

KfK 4645
Januar 1990

Analyse und Bewertung der an der Universität Bremen durchgeführten SIMMER- Rechnungen zum SNR-300

W. Maschek, R. Heger
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

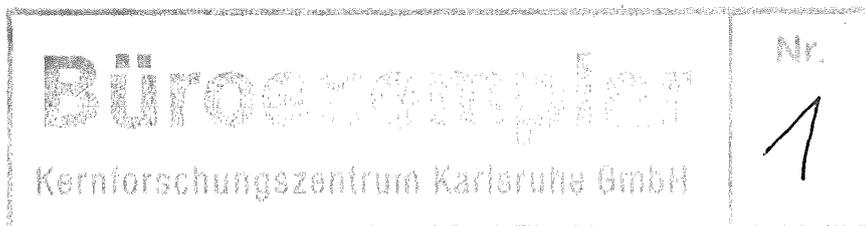


KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 4645

*Analyse und Bewertung der an der Universität
Bremen durchgeführten SIMMER-Rechnungen
zum SNR-300*

W. Maschek, R. Heger



Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In dem Report Nr. 8 des Fachbereiches Physik der Universität Bremen vom Juli 1984 (Autor R. Donderer) wurden mit dem Programm SIMMER-II errechnete mechanische Energiefreisetzungen für den hypothetischen Bethe-Tait-Störfall im SNR-300 ausgewiesen, die z.T. über dem Auslegungswert von 370 MJ liegen. Auf Wunsch der für den SNR-300 zuständigen Genehmigungsbehörde (Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie (MWMT)) des Landes Nordrhein-Westfalen sollte dieser Report Nr. 8 auch in die Prüfung neuerer wissenschaftlicher Ergebnisse einbezogen und bewertet werden.

In einem im Januar 1986 vorgelegten KfK-Primärbericht, den u.a. auch die Genehmigungsbehörde (MWMT) erhielt, wurden zwei spezielle Rechenfälle A6 und B3 und die den Rechnungen zugrundeliegenden Annahmen im Detail analysiert. A6 und B3 sind dabei diejenigen Fälle mit den höchsten mechanischen Energiefreisetzungen von 806 MJ bzw. 435 MJ, die damit den Auslegungswert von 370 MJ überschreiten.

Die Analyse dieser Fälle, die im 1. Teil dieses Berichtes dargestellt wird, hat ergeben, daß die von Donderer berechneten hohen Energiefreisetzungen keine physikalisch sinnvolle Bedeutung haben. Sie kommen im wesentlichen durch numerische Instabilitäten in den Rechnungen zustande, die dadurch entstehen, daß sich durch die Nichtberücksichtigung eindeutig vorhandener oder nachweisbarer Tatbestände (Bedrosselung der Brennelemente, Blockadebildung), Unzulänglichkeiten im SIMMER-Code bei der Druckberechnung an Strömungsquerschnittsänderungen drastisch auswirken. Hinzu kommen mehrere andere Eingriffe Donderers in das Programm, die physikalisch nicht vernünftig begründet werden können, vielmehr als inkonsistent oder gar fehlerhaft bezeichnet werden müssen. Anhand von eigenen Rechnungen wird gezeigt, daß bei angemessener Berücksichtigung entwurfsbedingter Gegebenheiten und physikalischer Phänomene diese Unzulänglichkeiten in SIMMER nicht zum Tragen kommen und Energiefreisetzungen berechnet werden, die konsistent zu früheren Ergebnissen sind, d.h. weit unterhalb der Auslegungsgrenze des SNR-300 liegen.

In einem im Februar 1987 erschienenen KfK-Primärbericht wurden ergänzende Analysen zu den SIMMER-Rechnungen von R. Donderer dargestellt und ebenfalls der Genehmigungsbehörde (MWMT) zur Kenntnis gebracht.

Die numerischen Unzulänglichkeiten in SIMMER bei der Druck-Berechnung an Querschnittsänderungen waren inzwischen für die hydrostatischen Drücke eliminiert und die Beschreibung des Strömungsverhaltens an plötzlichen Querschnittsänderungen war verbessert worden.

Eine erneute Nachrechnung des Bremer Rechenfalles mit der höchsten Energetik (Fall A6) - wobei alle fehlerhaften bzw. inkonsistenten Annahmen Donderers voll übernommen wurden - bestätigte die im 1. Bericht gemachte Aussage, daß die Ergebnisse Donderers auf numerischen Instabilitäten, und nicht auf physikalisch begründeten Kausalzusammenhängen beruhen. Es zeigte sich, daß allein durch die Korrekturen in der Numerik des SIMMER-Codes und eine Stabilisierung der Rechnung sich das mechanische Arbeitspotential bei der Donderer-Rechnung von ursprünglich 800 MJ um eine Größenordnung auf etwa 80 MJ reduzierte.

Der vorliegende KfK-Bericht faßt nochmals die 1986/1987 erstellten Beiträge zur Analyse und Bewertung der an der Universität Bremen durchgeführten SIMMER-Rechnungen zum SNR300 in zitierbarer Form zusammen.

Analysis of SIMMER calculations for SNR-300 performed at the
University of Bremen

Abstract

The report No. 8 of July 1984 (author R. Donderer) of the Fachbereich Physics of the University Bremen displays SIMMER-II calculations which partly results in energy releases for a hypothetical Bethe-Tait accident beyond the design limit of SNR-300. Due to the wish of the licensing authorities (Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie (MWMT)) of North Rhine Westfalia this report Nr. 8 was to be introduced into a general assessment of recent scientific results. In a January 1986 released internal KfK report which was also submitted to the licensing authorities (MWMT), the two calculations with the highest energy releases, cases A6 and B3, were analyzed in detail. The mechanical energy releases of case A6 were 806 MJ and for B3, 435 MJ respectively thus going beyond the design limit of 370 MJ.

The analyses show that the high energy releases have no meaningful physical background. They result from numerical instabilities caused by neglecting obvious facts like orifices in the subassemblies or blockage formation so that deficiencies in the SIMMER-code concerning the pressure calculation at flow cross section changes have a drastic impact. In addition, Donderer has performed various interferences with the SIMMER program which are inconsistent and even erroneous.

Own calculations demonstrated that by taking into account the specific design features and physical phenomena properly, these deficiencies in SIMMER have no impact and energy releases are calculated which are consistent with earlier studies and range much below the design limit of SNR-300.

In a further KfK internal report (Feb. 1987) additional analyses concerning Donderer's SIMMER calculations were documented and submitted to the licensing authorities (MWMT).

The numerical deficiencies in the hydrostatic pressure calculation at flow cross section changes had been finally eliminated in SIMMER and also the flow behaviour at flow cross section changes had been improved.

A recalculation of the Bremen case with the highest energy release (case A6) showed that after improving the numerics of the code and stabilizing the calculation - taking all erroneous and inconsistent assumptions of Donderer as they are - the mechanical work potential dropped from originally 800 MJ by an order of magnitude to 80 MJ. Thus demonstrating again that Donderer's results are due to numerical instabilities and have no physical basis.

The present report compiles the 1986/87 analyses and assessment of the SIMMER-calculations for SNR300 performed at the Bremen University.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Teil I: Analyse der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer zum SNR-300	1
Teil II: Stellungnahme und klärende Anmerkungen zu der Behandlung von Rekritikalitätsereignissen und den SIMMER-Rechnungen von R. Donderer	73

Teil I: Analyse der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer zum SNR-300

Inhaltsverzeichnis für Teil 1

1. Einleitung
 - 1.1 Anlaß
 - 1.2 Einordnung der Rechnungen Donderers in den Störfallablauf
 - 1.3 Methoden zur Analyse der Übergangsphase
 - 1.4 Aufbau des Berichtes
2. Kurzbeschreibung des Störfallablaufs in der frühen Übergangsphase
3. Ergebnisse der weltweit durchgeführten SIMMER-Analysen
4. Beschreibung der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer
5. Analyse der Rechnungen von R. Donderer und Beschreibung der darin gemachten Fehler
6. Beschreibung der durchgeführten Vergleichsrechnungen mit dem SIMMER Code
7. Zusammenfassende Bewertung der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer und Schlußbemerkungen
8. Literatur

1. Einleitung

1.1 Anlaß

Mit Schreiben vom 30.11.1984 an die TÜV-Arge KTW hat die atomrechtliche Genehmigungsbehörde in Nordrhein-Westfalen den Wunsch geäußert, in die Prüfung neuer wissenschaftlicher Arbeiten zum Bethe-Tait-Störfall auch die Ausarbeitung /1.1/:

R. Donderer, Energetics of Early Transition Phase
Recriticalities in the SNR-300, Fachbereich Physik der
Universität Bremen, Report No. 8, July 1984

einzu beziehen. In dieser Ausarbeitung werden Ergebnisse von Rechnungen mit dem SIMMER-II-Code zu Rekritikalitäten in der frühen Übergangsphase dargelegt. Die angegebenen Energiefreisetzungen überschreiten zum Teil den der Auslegung des Tank- und Primärsystems des SNR-300 zugrunde gelegten Wert von 370 MJ.

Im Oktober 1981 wurde von KfK an die Universität Bremen die Version 7 des SIMMER-II Codes zusammen mit einer ausführlichen Dokumentation und Testbeispielen übergeben /1.2/. Zusätzlich wurde am 14.5.1982 ein SNR-300 typischer Datensatz von KfK an die Universität Bremen übersandt /1.2/. Die im oben genannten Bericht von R. Donderer dargestellten Rechnungen wurden mit dieser Version 7 des SIMMER-II Codes durchgeführt und basieren auf dem übergebenen SNR-300 typischen Datensatz von KfK.

Da das KfK seit vielen Jahren an der Weiterentwicklung und Verifikation des SIMMER-II-Codes beteiligt ist und weitreichende Erfahrungen bei der Benutzung dieses komplexen Programmes angesammelt hat, hat die TÜV-Arge KTW mit Brief vom 18.2.1985 das KfK um Unterstützung bei der Prüfung der Rechnungen Donderers ersucht. Im Rahmen der gutachterlichen Tätigkeit der TÜV Arge KTW hat die GRS die Begutachtung der Unterlagen zum Bethe-Tait-Störfall und im besonderen derjenigen, die zur Frage der Energiefreisetzungen

Aussagen enthalten, übernommen. Die GRS hat die Fragen, in denen sie von der KfK Unterstützung erwartet, in einem Brief vom 10.9.1985 im einzelnen formuliert. Danach sollte die Unterstützung bei der Prüfung auf die Fälle A6 und B3 aus der o.g. Ausarbeitung beschränkt werden, denn nur in diesen beiden von insgesamt 11 Fällen wird der Auslegungswert von 370 MJ überschritten.

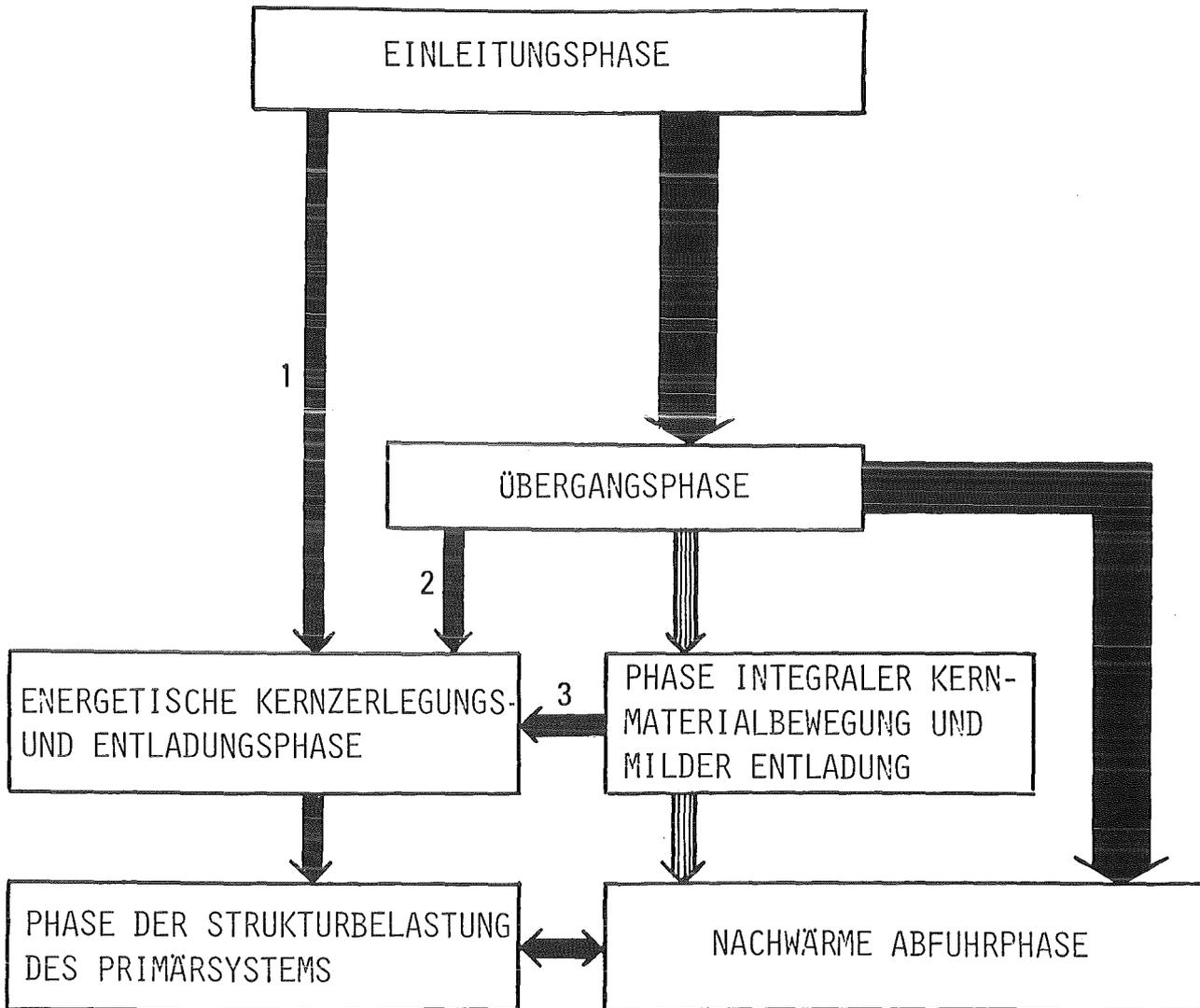
Die Historie der SIMMER-Rechnungen an der Universität Bremen sowie der Bezug zum Genehmigungsverfahren sind in /1.2/ dargestellt.

1.2 Einordnung der Rechnungen Donderers in den Störfallablauf

Als Einleitungsereignis für den hypothetischen Bethe-Tait-Störfall wurde im Genehmigungsverfahren des SNR-300 der unkontrollierbare Kühlmitteldurchsatzstörfall (Unprotected Loss of Flow = ULOF) zugrunde gelegt. Er deckt sowohl in seinen Konsequenzen als auch von seiner Eintrittswahrscheinlichkeit her andere postulierte Einleitungsereignisse für Kernzerstörungen ab. Dies wird in der "Obergrenzenstudie" /1.3/ und in der "Risikoorientierten Analyse zum SNR-300" /1.4/ bestätigt. Daher nimmt dieses Einleitungsereignis eine zentrale Stelle bei der Analyse des Bethe-Tait-Komplexes für den SNR-300 ein.

Beim LOF wird postuliert, daß bei Anregung einer Reaktorschnellabschaltung mit Abschaltung der Kühlmittelpumpen die beiden unabhängigen Abschaltssysteme vollständig versagen. In der Abb. 1.1 ist der sich dann anschließende Störfallverlauf anhand eines Phasenablaufdiagramms dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Phasen findet sich in /1.7/.

Wegen des zeitlich rasch abfallenden Kühlmitteldurchsatzes kommt es nach ca. 8 s im oberen Kernbereich zum Natrium-Sieden. Das flüssige Natrium wird aus den aktiven Bereichen der einzelnen Brennelemente verdrängt. Die Natriumverdrängung aus dem zentralen



 KÜHLMITTEL-
DURCHSATZSTÖRFALL
ERWARTETER VERLAUF

1 }
2 }  NICHT ERWARTETE ENERGETISCHE STÖRFALL VERLÄUFE
3 } (ENERGETISCHE GRENZFÄLLE)

ABB. 1.1: ABLAUFDIAGRAMM FÜR EINEN UNKONTROLLIERTEN KÜHLMITTELDURCHSATZSTÖRFALL

Kernbereich bewirkt eine Reaktivitätszunahme (Void-Effekt) und damit eine Leistungsexkursion, die durch gegenläufige Effekte (z.B. axiale Brennstoffexpansion und Doppler-Effekt bei Brennstoffwärmung) abgemildert wird. Es kommt zu Hüllrohr- und Brennstoffschmelzen, und es entstehen Mehrphasenzonen aus festen, flüssigen und gasförmigen Materialien (Brennstoff, Stahl, Spaltgas) im Kern.

Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik verläuft die Einleitungsphase eines hypothetischen Kühlmitteldurchsatzstörfalls mit sehr großer Wahrscheinlichkeit unenergetisch /1.6/. Die durch die Primärexkursion entstehenden Dampfdrücke und Dispersionskräfte reichen dann nicht aus, um frühzeitig die genügende Entfernung von Brennstoff aus dem Kernbereich sicherzustellen und so den Reaktor permanent nuklear unterkritisch zu machen. Ein weiteres Zusammenschmelzen des Kerns führt in die sog. Übergangsphase in der weitere Leistungspulse durch Rekritikalitäten auftreten können. Die Einleitungsphase wurde mit dem SAS3D Code untersucht /1.5/.

Die sich direkt an eine unenergetische Einleitungsphase anschließende frühe Übergangsphase ist Gegenstand der von Donderer vorgelegten SIMMER-II-Rechnungen. Diese Phase ist dadurch charakterisiert, daß die Brennelementkastenwände noch intakt sind und die Kernmaterialbewegungen in den verschiedenen Brennelementen fluid-dynamisch weitgehend entkoppelt voneinander ablaufen (vgl. Abschnitt 2).

1.3 Methoden zur Analyse der Übergangsphase

Vom Kernforschungszentrum Karlsruhe wurden Untersuchungen zur Energetik der Übergangsphase durchgeführt, die in /1.8/ dokumentiert sind. Nach dem damaligen Stand von Wissenschaft und Technik war eine lückenlos-mechanistische Beschreibung der Übergangsphase nicht möglich. Dies gilt bei Anlegen strenger Maßstäbe auch noch

heute, wenngleich in den vergangenen Jahren durch Verbesserungen der theoretischen Simulation und durch zahlreiche Experimente, insbesondere durch die SIMBATH- und CABRI-Experimente, ein erheblicher Kenntniszuwachs zu verzeichnen ist (siehe auch Abschnitt 2). Aus diesem Grunde wurde bei den damaligen Untersuchungen das Energetikpotential der Übergangsphase durch die Analyse verschiedener Modellfälle ermittelt, bei deren Festlegung verschiedene denkbare Rekritikalitätsformen (z.B. das Herabfallen von Brennstabstümpfen in die Kernmittelebene bei noch intakten Brennelementkästen oder das Kollabieren eines siedenden Brennstoff/Stahlpools im Corebereich) angenommen und jeweils plausible pessimistische Randbedingungen zugrundegelegt wurden. Letzteres gilt z.B. für die gewählten Kernmaterialverteilungen, Temperaturprofile, die Vernachlässigung von Spaltgas- und Stahldampfdrücken sowie für die Größe und Kohärenz der in den Kernbereich zurückkehrenden Brennstoffmassen.

Die Reaktivitäten für die zeitabhängigen Materialkonfigurationen wurden mittels Transporttheorie bestimmt. Die Konsequenzen der so definierten Rekritikalitätsereignisse wurden mit dem Programm KADIS /1.9/ berechnet.

Das Programm KADIS ist ein zweidimensionaler Hydrodynamik-Neutronik Code für Zylindergeometrie. Die hydrodynamischen Gleichungen (Lagrangeformalismus) beschreiben das Reaktormaterial als kompressible nicht viskose Flüssigkeit. Für die Thermodynamik wird ein adiabates Modell verwendet, d.h. es wird mit Ausnahme der Brennstoff/Natriumreaktion kein Wärmeübergang zwischen Brennstoff und den übrigen Materialien oder zwischen Brennstoffschichten unterschiedlicher Temperatur simuliert. Es wird insbesondere kein Wärmeübergang zum Stahl berücksichtigt, welcher bei längeren Exkursionszeiten (≥ 50 msec) wirksam wird und neben dem Brennstoffdampfdruck zu einer starken zusätzlichen Druckquelle führt. Spaltgasdrücke können im Prinzip in KADIS berücksichtigt werden. Es wird außerdem keine Relativbewegung (Slip) zwischen den verschiedenen Materialien bzw. Phasen berücksichtigt. Für die Neutronik

wird ein Punktkinetikmodell verwendet. Die geometrische Form der Leistungsverteilung im Lagrangenetz wird während der Exkursion nicht geändert. KADIS enthält einen Modul mit dem das Arbeitspotential der Brennstoffdampfblase bei isentroper Expansion auf das Schutzgasvolumen berechnet werden kann.

Aufgrund dieser Merkmale ist KADIS hauptsächlich zur Beschreibung energetischer Exkursionen geeignet.

Die geschilderte Vorgehensweise zur Eingrenzung der Energetik der Übergangsphase hat den Vorteil, daß die Konservativität der gewählten Randbedingungen und der Modellierung verhältnismäßig leicht nachvollziehbar ist, die berechneten physikalischen Abläufe überschaubar sind und die Ergebnisse mit begrenztem Aufwand überprüft werden können. Auf der anderen Seite ist die Einschränkung auf Grenzfallanalysen unbefriedigend, da die mechanischen Belastungen möglicherweise drastisch überschätzt werden. Daher werden seit einiger Zeit Anstrengungen unternommen, Rechenprogramme zu entwickeln, die in der Lage sein sollen, die Übergangsphase und die Expansionsphase realistischer zu analysieren. Diese Zielsetzung wird insbesondere mit dem SIMMER-Code /1.10/ verfolgt. Nach Erreichen dieses Zieles würde man von der Analyse pauschal definierter Grenzfälle Abstand nehmen, stattdessen realistische Szenarien durchrechnen und die Energetik-Eingrenzung nur noch durch Variation der wesentlichen noch mit Unsicherheiten behafteten Parameter vornehmen.

Die SIMMER-Entwicklung wurde Mitte der 70er Jahre im Los Alamos National Laboratory (USA) in Angriff genommen. Inzwischen beteiligen sich PNC (Japan), CEA (Frankreich), UKAEA (Großbritannien) und KfK an der Weiterentwicklung und Validierung des Programmes.

SIMMER ist ein gekoppelter Neutronik-Mehrphasen, Mehrkomponenten Fluidodynamik-Code in RZ-Geometrie. Für die orts- und zeitabhängige neutronische Rechnung wird die sog. quasistatische Methode benutzt, wobei entweder für die Neutronenflußberechnung Diffu-

sions- oder die aufwendigere Transporttheorie verwendet werden kann. In der Fluidodynamik werden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie für ein System von Mehrphasen- und Mehrkomponentenfeldern gelöst. Es werden zwischen den Phasen "fest, flüssig, gasförmig" die Phasenübergänge wie Schmelzen, Gefrieren, Verdampfen und Kondensieren sowie die relevanten Wärmeübertragungsvorgänge und der Impulsaustausch modelliert. Das Komponentenfeld enthält dabei die Kernmaterialien Brennstoff, Brutstoff, Stahl, Natrium, Absorber und Spaltgas.

Der heutige Stand der Programmentwicklung erlaubt die Durchführung von Trendanalysen. Beim Umgang mit dem Code treten aber immer noch Mängel zu Tage, die von Fall zu Fall eine äußerst sorgfältige Bewertung der Ergebnisse erforderlich machen. Dies und der damals völlig unzureichende Stand der Programmvalidierung waren der Grund dafür, daß KfK empfohlen hat, SIMMER-II nicht für Rechnungen einzusetzen, deren Ergebnisse im Genehmigungsverfahren im einzelnen zu prüfen sind. Auch der Bremer Gruppe hat KfK geraten, bei der Verwendung von SIMMER-II-Ergebnissen für ihre Beiträge zur risikoorientierten Analyse zum SNR-300 äußerste Vorsicht walten zu lassen /1.11/.

Die bisherigen Analysen des KfK mit SIMMER-II haben in erster Linie orientierenden Charakter und erfolgten flankierend zu den laufenden F+E-Vorhaben in deren Rahmen Teilmodelle von SIMMER validiert wurden. Sofern sie sich auf den SNR-300 beziehen, basieren sie auf einem "SNR-300-typischen Datensatz", der vorläufigen Charakter hat und nicht den für ein Genehmigungsverfahren erforderlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen unterworfen wurde. Darauf hat das KfK mehrfach deutlich hingewiesen, u.a. in /1.11/. Gleichwohl hat KfK auf Drängen der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Zukünftige Kernenergie-Politik" die 1981/82er Fassung dieses Datensatzes der Bremer Gruppe übergeben.

1.4 Aufbau des Berichtes

Im folgenden Kapitel wird eine kurze Beschreibung des Störfallablaufs in der frühen Übergangsphase gegeben. Anschließend werden in Kapitel 3 die an anderen Stellen erzielten SIMMER-Ergebnisse für diese Störfallphase wiedergegeben. Nach diesen Kapiteln, die helfen sollen, die Dondererschen Rechnungen in das Gesamtbild des betrachteten Störfallablaufs einzuordnen, wird in Kapitel 4 das den Dondererschen Rechnungen zugrunde liegende Vorgehen beschrieben. Die Analyse und Prüfung dieser Rechnungen und der ihnen zugrunde liegenden Annahmen erfolgt in Kapitel 5.

Daran anschließend wird in Kapitel 6 über Ergebnisse der bei KfK durchgeführten Kontrollrechnungen berichtet. Eine zusammenfassende Bewertung erfolgt in Kapitel 7.

2. Kurze Beschreibung des Störfallablaufs in der frühen Übergangsphase

Die sich unmittelbar an eine unenergetische oder energetisch milde Einleitungsphase anschließende frühe Übergangsphase ist dadurch charakterisiert, daß die Brennelementkastenwände noch vollständig intakt sind und die Kernmaterialbewegungen in den verschiedenen Kästen fluiddynamisch weitgehend entkoppelt voneinander ablaufen (siehe auch Abb. 2.1). Aufgrund der für jedes Brennelement unterschiedlichen Vorgeschichte herrschen in den einzelnen Brennelementen unterschiedliche Enthalpieniveaus, Material- und Druckverteilungen sowie Strömungsverhältnisse. Nach der Störfall-Einleitungsphase befinden sich diese sog. "subassembly pools" (Mehrphasenzone aus Brennstoff, Stahl und Spaltgas in einem Brennelement) in einem instabilen dispergierten Zustand. Die Ursache für diese Instabilität ist im wesentlichen der Abbau der Druckgradienten am Ende der Primärexkursion.

Im folgenden kommt es lokal zu Verdichtungs- und Kompaktionsprozessen des Brennstoffs, die eine Rekritikalität mit einer sog. Sekundärexkursion auslösen können. Aufgrund der schon oben erwähnten zeitlichen und örtlichen Inkohärenz (Inter-Subassemblyinkohärenz) der Bewegungsvorgänge in den verschiedenen Brennelementen sind die entstehenden Reaktivitätsrampen und Leistungsexkursionen relativ mild /2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8/. Auch innerhalb eines Brennelementkastens selbst laufen die Kompaktionsvorgänge des Brennstoffs inkohärent ab. So fällt flüssiger Brennstoff nicht als zusammenhängender Pfropfen zur Kernmittelebene, sondern wird durch Instabilitätsphänomene axial verschmiert, so daß seine mittlere Geschwindigkeit niedriger als bei freiem Fall ist. Das evtl. Herunterfallen von Brennstoff-Pelletbrocken aus oberen Brennstabstümpfen kann nur nach dem Hüllrohrschmelzen auftreten und ist daher auch inkohärent, entsprechend den unterschiedlichen Aufschmelzraten der Hüllrohre (Intra-Subassemblyinkohärenz). Das Ablösen der Pellet-Brocken ist aber auch für jeden einzelnen Brennstabstumpf ein zeitlich gestreckter Vorgang entsprechend dem axialen Fortschreiten der Schmelzfront im Hüllrohr.

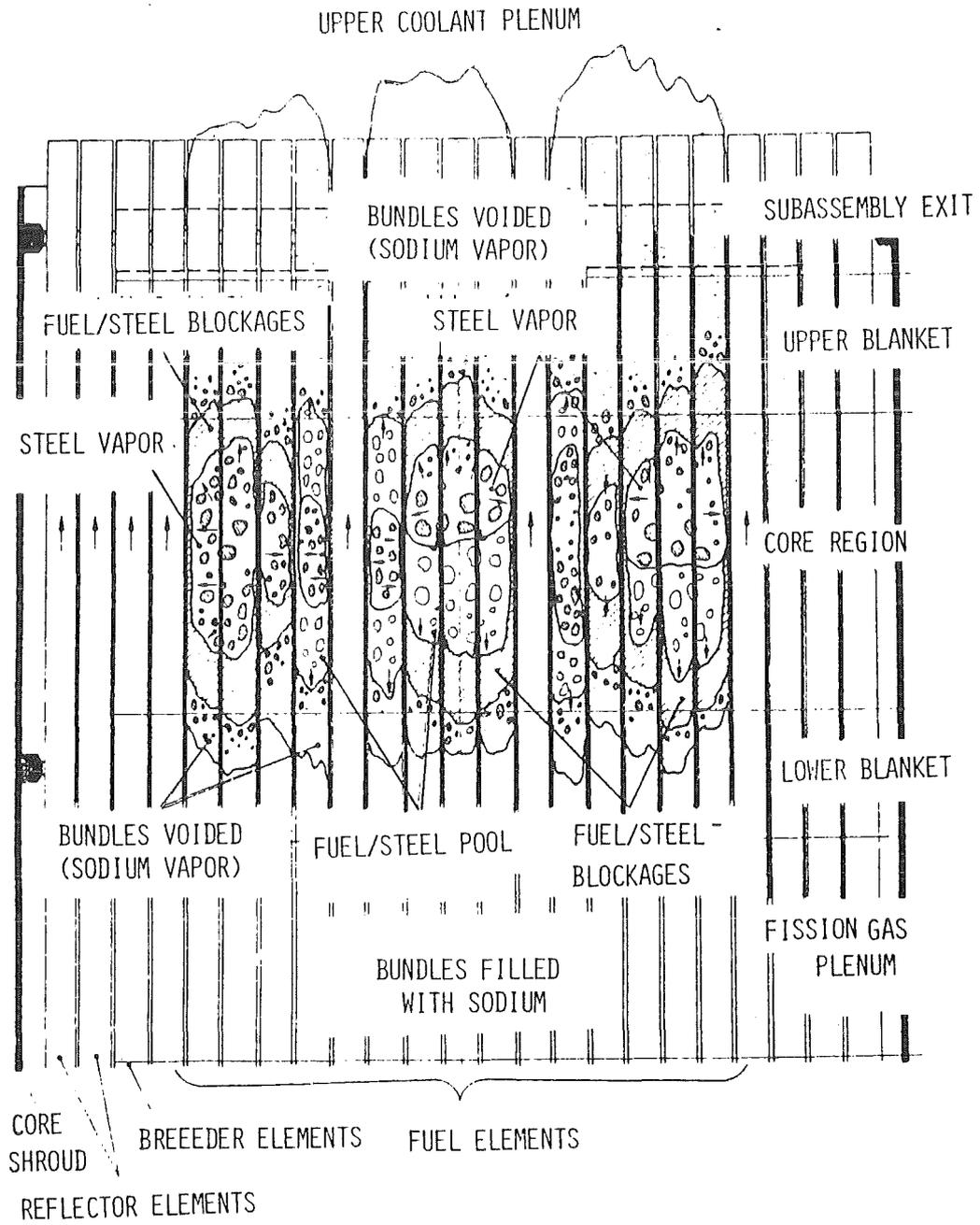


Abb. 2.1: Prinzipskizze der Kernkonfiguration in der frühen Übergangsphase

Die Erkenntnisse über die Art der Bewegungsvorgänge werden u.a. aus der Auswertung experimenteller Untersuchungen abgeleitet, die im Rahmen der SIMBATH-Experimente /2.9, 2.10, 2.11/ und bei einigen CABRI-Experimenten /2.12, 2.13, 2.14, 2.15/ gewonnen wurden. Hierbei sind die Auswertung der SIMBATH-Hochgeschwindigkeitsfilme, der CABRI-Hodoskop-Daten und der Nachuntersuchungen von besonderem Interesse. Sie weisen auf folgende Tatbestände eindrucksvoll hin:

- Die Brennstoffbewegung in "subassembly pools", wie sie sich bei den Mehrstab-SIMBATH-Experimenten bilden, ist in hohem Maße dispersiv (Tröpfchenströmung), instabil und innerhalb jedes Brennelementes durch zweidimensionale Effekte dominiert.

- Bei den SIMBATH-Experimenten nehmen von den in blockierten Brennelementreststrukturen zunächst akkumulierten schmelzflüssigen Materialien nur begrenzte Anteile wieder an nachfolgend einsetzenden Umverteilungen teil. Auch diese Bewegung ist dispersiv, d.h. durch die sich aufbauenden Druckgradienten werden dichte, noch schmelzflüssige Materialansammlungen aufgebrochen. Diese auf der Grundlage von SIMBATH-Filmen abgeleitete Phänomenologie der Materialbewegung in "subassembly"-pools wird durch die Auswertung der Hodoscope-Daten von CABRI-Experimenten qualitativ bestätigt, wenn auch der Übertragbarkeit der experimentellen CABRI-Befunde auf die frühe Übergangsphase Grenzen gesetzt sind, da in CABRI nur Einstabanordnungen untersucht wurden.

- Aus den Nachuntersuchungen von Blockadekonfigurationen der CABRI-Experimente kann abgeleitet werden, daß Brennstoffpelletstrukturen, bei denen das Hüllrohr bei einsetzender Blockadebildung zunächst noch intakt war, auch nach dem Abschmelzen des Hüllrohrs innerhalb der im Kühlkanal ausgefrorenen Materialien hängenbleiben und bei Abbau der Druckgradienten nicht unbedingt in die zerstörten Bereiche des Brennelements hineinfallen.

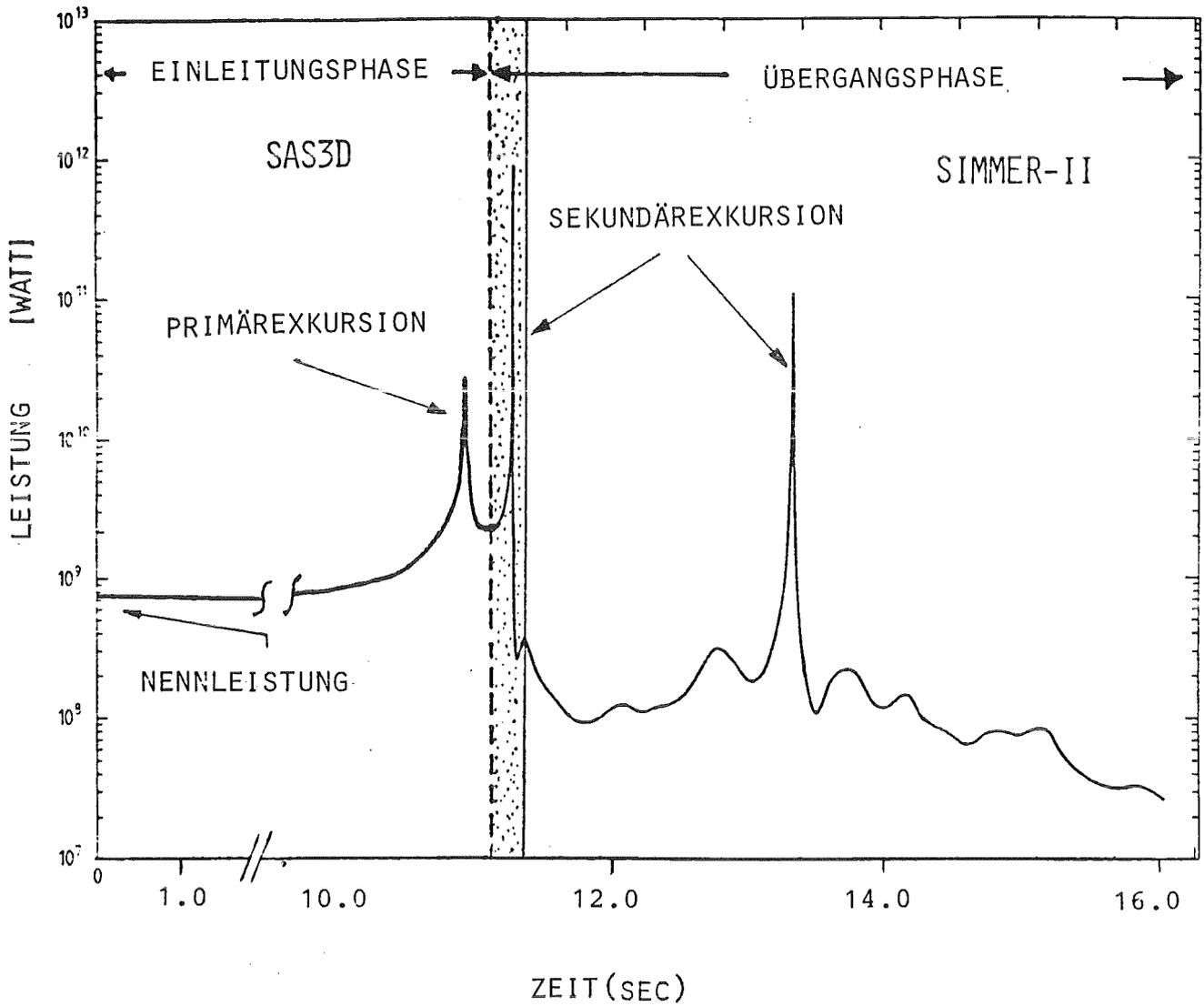


ABB. 2.2: TYPISCHER LEISTUNGSVERLAUF IN EINER GEKOPPELTEN SAS3D - SIMMER-ANALYSE

Beispielhaft ist in der Abb. 2.2 ein typischer von SIMMER simulierter Störfallablauf während der Übergangsphase anhand seines nuklearen Leistungsverlaufes dargestellt. In der dargestellten Simulation tritt nach dem radialen Durchschmelzen der Brennelementkastenwände Brutstoff aus dem oberen axialen Brutmantel in den Kern ein. Der inkohärent in den Kern fallende kalte Brutstoff führt wegen seiner hohen Neutronenabsorption zu permanenter Unterkritikalität und Abkühlung des im Kern befindlichen Brennstoffs.

Das punktierte Kästchen umfaßt den Zeitbereich der von Donderer in seinen Rechnungen behandelt wurde und von uns in diesem Bericht kritisch analysiert wird. In Donderers Rechnungen kommt es wegen der in Kapitel 5 näher beschriebenen Inkonsistenzen und Fehler schon in dieser sehr frühen Übergangsphase (siehe punktiertes Kästchen) zu einer Exkursion mit einer derart hohen Energiefreisetzung (die Leistungsspitze von Fall A6 von $P_{\max} = 1.164 \cdot 10^{13}$ Watt führt über die in Abb. 2.2 gezeigte Ordinatenskala hinaus), daß der Kern schon zu diesem frühen Zeitpunkt endgültig zerstört wird und das Kernmaterial aus dem aktiven Kernbereich ausgeworfen wird.

Die Störfallrechnungen mit SIMMER knüpfen an die vorher beschriebene SAS3D Simulation für die Einleitungsphase des Störfalles an. Zu einem sinnvoll gewählten Zeitpunkt nach dem Ende der Primärexkursion muß aus den spezifischen Ausgabedaten von SAS3D (Geometrische Daten, nukleare Parameter, Brennstoff/Stahl/Natrium-Massen, und deren Temperaturen etc.) eine Eingabe für eine SIMMER-II-Rechnung generiert werden. Da hierbei trotz unterschiedlicher Modelle die grundlegende Störfallphänomenologie erhalten bleiben muß, ist es sinnvoll, für einen vernünftig festgelegten Zeitbereich überlappende Rechnungen zwischen SIMMER-II und SAS3D durchzuführen. Der Vergleich der in diesem Zeitbereich mit beiden Codes berechneten Reaktivitäts- und Leistungsverläufe ist ein wesentlicher Bestandteil der Konsistenzprüfung für die SIMMER-Rechnung. Abweichungen zwischen SAS3D- und SIMMER-Ergebnissen müssen in einem plausiblen Rahmen bleiben.

In der Abb. 2.2 wird der Leistungsverlauf eines derartig gekoppelten SAS3D/SIMMER-II-Rechenlaufes gezeigt.

Es muß hier nochmals angemerkt werden, daß bei der Benutzung großer Codesysteme, die das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Phänomene beschreiben können, sehr darauf geachtet werden muß, daß die Phänomenologie physikalisch vernünftig und entsprechend dem experimentellen und theoretischen Kenntnisstand konsistent modelliert wird.

3. Ergebnisse der weltweit durchgeführten SIMMER-Analysen

SIMMER-Analysen zur Übergangsphase wurden bisher vornehmlich in drei Laboratorien durchgeführt: Im Los Alamos National Laboratory (LANL) in den USA, in dem der Code ursprünglich entwickelt wurde, im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und bei der Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) in Japan. In allen genannten Laboratorien wird der Code weiterentwickelt und durch ausgedehnte experimentelle und theoretische Programme validiert.

Insgesamt steht heute umfangreiche Information von SIMMER-Analysen für alle Größenklassen von Reaktorkernen als auch für unterschiedliche Entwürfe (heterogen, homogen) zur Verfügung. Die am LANL durchgeführten Analysen betreffen den homogenen CRBR Kern (975 MW_{th}) /2.1/, den heterogenen CDS Entwurf (2740 MW_{th}) /2.2/, sowie den heterogenen Kern des CRBR (975 MW_{th}) /2.5, 2.6/. Die Untersuchungen bei KfK konzentrierten sich auf SNR-300-typische homogene Kerne der 760 MW_{th} Klasse /2.3, 2.4/. Die Analysen bei PNC bezogen sich auf den homogenen Kernentwurf des MONJU von 700 MW_{th} /2.7/.

Trotz Unterschiede in den Entwurfsmerkmalen der verschiedenen Reaktoren kann man gewisse allgemein gültige Aussagen aus der Gesamtheit der Analysen ableiten und auf den SNR-300 übertragen.

- Alle Analysen zeigen, daß auf der Basis der vorhandenen SIMMER-Rechnungen weder in der frühen noch in der späten Übergangsphase Energiefreisetzungen durch Rekritikalitäten berechnet werden, die bei Übertragung auf den SNR-300 dessen Auslegungsgrenze für den Reaktortank (370 MJ) überschreiten.
- Insbesondere in der frühen Übergangsphase, die hier zur Diskussion steht, sind die Energetikpotentiale gering bzw. vernachlässigbar klein.

Die weltweit durchgeführten Analysen sind hier völlig konform in ihrer Aussage. Sehr deutlich weist insbesondere die von der amerikanischen Genehmigungsbehörde USNRC beim LANL in Auftrag gegebene Analyse zum CRBR nochmals auf diesen Umstand hin /2.5/. Zu den in der frühen Übergangsphase auftretenden Rekritikalitäten werden sowohl Aussagen zum Energetikpotential als auch zur Wahrscheinlichkeit hoher Energiefreisetzungen in dieser Störfallphase gemacht (siehe S. II.8-1 in /2.5/):

"The subassembly and annular-pool stages do not favor amplification of mild recriticalities to substantial energetic events. This statement is based on inherent physical behavior and analysis and is insensitive to gross uncertainties in the detailed phenomenology that controls fuel motions. Because significant amplification is not likely, VHS (vessel head structure) failure is considered physically unreasonable....."*

Diese Bewertung gründet sich nicht nur auf die durchgeführten SIMMER Analysen sondern vor allem auf das grundlegende physikalische Verständnis der Phänomene und der Auswertung verfügbarer umfassender experimenteller Information.

*Anmerkung: Klammer und Unterstreichungen hinzugefügt

4.) Beschreibung der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer

Alle Rechnungen Donderers betreffen den frühen Teil der Übergangsphase bei dem die Kastenwände noch intakt sind. Den Rechnungen ist gemein, daß sie hohe mechanische Arbeitspotentiale (isentropische Expansion des heißen Brennstoffs auf 70 m^3) in der Größenordnung von 100-800 MJ aufweisen. Sie liegen damit um rund eine Größenordnung höher als die für diese Störfallphase von KfK, LANL und PNC gefundenen Arbeitspotentiale. In dieser Analyse wird nicht auf den gesamten Text des Fachberichts eingegangen, sondern es werden - wie von der GRS gewünscht - insbesondere zwei Fälle "Fall A6 und B3" analysiert.

Die beiden Fälle A6 und B3 sind dabei jeweils aus einer Serie von Rechnungen herausgegriffen, Serie A1 bis A6 und B1 bis B4, wobei innerhalb jeder Serie das zugrunde gelegte Störfallszenario vergleichbar ist. Die beiden Fälle A6 und B3 zeichnen sich dadurch aus, daß bei ihnen das Arbeitspotential über den Auslegungswert des SNR 300 Reaktortanks von 370 MJ hinausgeht. Im Falle A6 werden 806 MJ und in B3 werden 435 MJ erreicht.

Die angegebenen mechanischen "Energiewerte" sind als isentropische Arbeitspotentiale (d.h. mechanische Arbeit, die bei der angenommenen isentropischen Expansion des heißen Brennstoffs auf das Reaktorschutzgasvolumen von 70 m^3 entsteht) zu verstehen. Die Umsetzung der thermischen in mechanische Energie beruht nicht auf einer realistischeren Weiterrechnung mit SIMMER.

Im folgenden wird im Detail das Vorgehen Donderers bei den Fällen A6 und B3 geschildert:

Fall A6: Hier wird ausgehend von dem von KfK am 14.5.1982 an die Universität Bremen übergebenen Datensatz eine Rechnung mit der SIMMER Version 7 bis zu einem Zeitpunkt $t = 0.336 \text{ s}$ durchgeführt. Etwa zu diesem Zeit-

punkt wird in der Rechnung ein Reaktivitätsminimum erreicht. Am oberen und unteren Kernrand stehen dann noch Rest-Brennstabstümpfe. Zum Zeitpunkt $t = 0.336$ s ist in der oberen Hälfte des gesamten Kerns das Hüllrohr von diesen Restbrennstabstümpfen bereits abgeschmolzen.

In der Version 7 des SIMMER-Programmes wird dies so modelliert, daß nach dem Hüllrohrabschmelzen die Pellet-Stalaktiten am oberen axialen Kernende vorerst hängen bleiben und erst dann fortschreitend beweglich werden, wenn der Brennstoff selbst zu schmelzen beginnt.

Zu diesem Zeitpunkt werden nun von Donderer 2 Änderungen in das SIMMER-Programm eingeführt:

- 1) Zu einem festen Zeitpunkt von $t = 0.336$ s in der Nähe des Reaktivitätsminimums wird die gesamte Pelletmasse (520 kg Brennstoff) in der 2. Kernzone gleichzeitig beweglich gemacht.
- 2) Zum selben Zeitpunkt wird in der 2. Kernzone (außer in den Rechenmaschen am unteren Kernrand) dem neu instantan beweglich gemachten Brennstoff (als Brennstoffpartikel) ein Radius von 1 mm zugewiesen, sowie der Radius der schon vorhandenen Brennstoffpartikel um den Faktor 10 erhöht. Dies entspricht einem plötzlichen Koaleszieren der Brennstoffpartikel mit einer Volumenzunahme um den Faktor 1000.

Anschließend wird mit der so geänderten SIMMER-Version mit Hilfe eines sog. "Restarts" weitergerechnet.

Fall B3: Hier wird die Version 7 des SIMMER-Codes von Beginn an so abgeändert, daß nach dem Aufschmelzen des Hüllrohrs die oben hängenden Brennstoffstalaktiten sofort beweglich werden und in den Kern (Corezonen 1 und 2) hineinfallen können.

Als Eingabe für den Rechenlauf wird wieder der von KfK übergebene Datensatz verwendet, wobei allerdings ein Exponent (PIEE) in der Reibungsbeziehung zwischen Flüssigkeit und Gas von 2.5 auf 2.0 herabgesetzt wird. Die Rechnung wird von Beginn an mit diesen Änderungen durchgeführt.

In der Tab. 4.1 werden einige signifikante Ergebnisse der Fälle A6 und B3 zusammengestellt. In den Abb. 4.1 und 4.2 werden die dazugehörigen Leistungs- und Reaktivitätsverläufe dargestellt.

Größe \ Fall	Dim.	A6	B3
Rampe bei prompt kritisch	\$/s	156	114
max. Reaktivität	\$	1.392	1.29
max. Leistung	Watt	$1.164 \cdot 10^{13}$	$6.94 \cdot 10^{12}$
max. Brennstofftemperatur	K	8121	7203
Arbeitspotential (isentropische Expansion auf 70 m ³)	MJ	806	435

Tab.: 4.1: Ergebnisse der Fälle A6 und B3 aus /1.1/

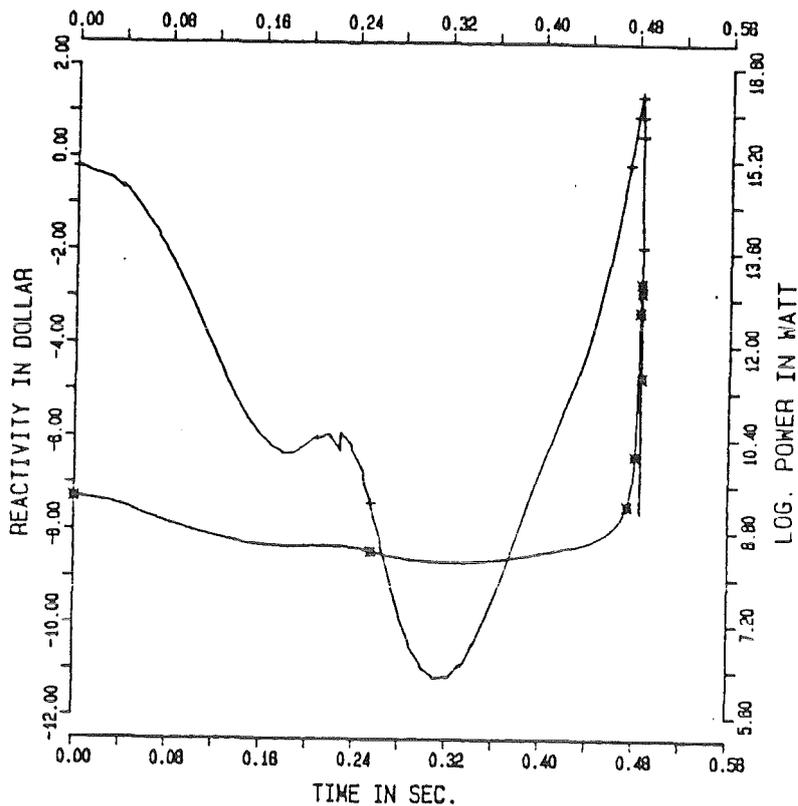


FIGURE 2 : REACTIVITY (+) AND POWER (*) HISTORY FOR CASE A6

Abb. 4.1: Leistungs- und Reaktivitätsverlauf des Falles A6 (Kopie aus dem Donderer Bericht /1.1/)

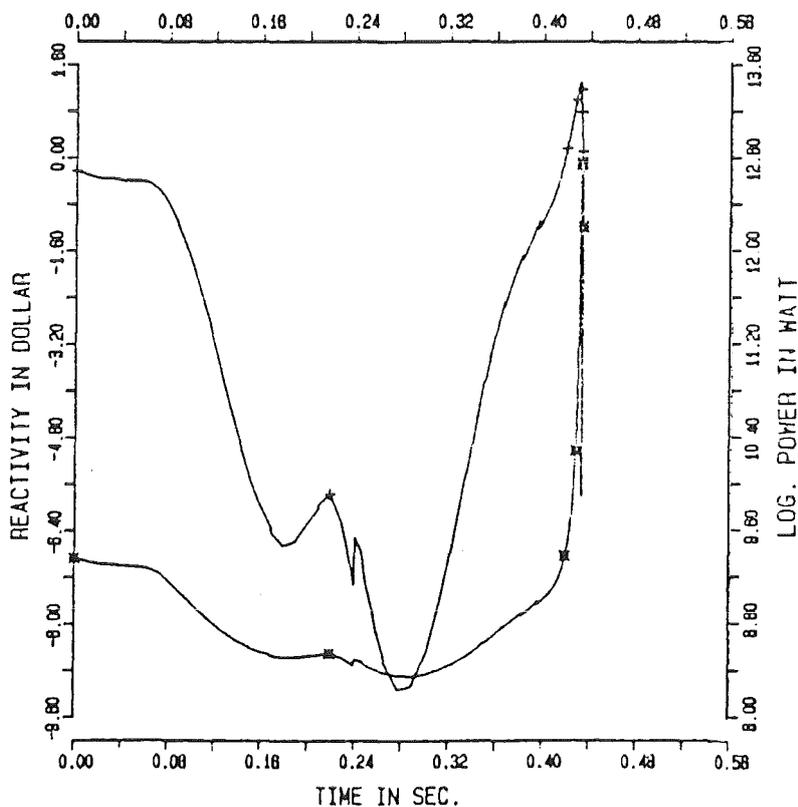


FIGURE 5 : REACTIVITY (+) AND POWER (*) HISTORY FOR CASE B3

Abb. 4.2: Leistungs- und Reaktivitätsverlauf des Falles B3 (Kopie aus dem Donderer Bericht /1.1/)

5.) Kritische Bewertung der Rechnungen von R. Donderer und der darin gemachten Annahmen

In /1.1/ wird nicht diskutiert, warum die Ergebnisse der dokumentierten SIMMER-Rechnungen von allen bisher durchgeführten SIMMER-Analysen einschließlich denen des Kernforschungszentrums Karlsruhe (obwohl von KfK sogar die Eingabe übernommen wurde) stark abweichen. Die Unterschiede in den Ergebnissen treten nicht nur bei den Fällen A6 und B3 auf, vielmehr weichen die Ergebnisse aller in /1.1/ dokumentierten Rechnungen in ihrer Tendenz von den sonst publizierten SIMMER-Analysen ab.

Aus der in /1.1/ vorgelegten Arbeit ist selbst für einen Experten nicht erkennbar, warum die von Donderer erzielten Ergebnisse so stark von denen anderer wissenschaftlicher Institutionen abweichen. Eine in Einzelheiten stichhaltige, letzte Klärung der Diskrepanzen konnte erst nach Einsicht in die von Donderer vorgenommenen Detail-Änderungen und Eingriffe im SIMMER-Programm und nach Durchführung von Vergleichsrechnungen erfolgen. Die erforderlichen Detailinformationen standen dem KfK erst ab Ende September 1985 zur Verfügung /1.2/.

Im folgenden wird detailliert auf die Annahmen eingegangen, die Donderer bei seinen Rechnungen gemacht hat und deren Auswirkung auf die Störfallsimulation beschrieben. Daran schließt sich eine Bewertung dieser Annahmen an (siehe auch Kapitel 7). Wo es die zu diskutierende Annahme erlaubt, wird dabei zur Verdeutlichung die von KfK gewählte Vorgehensweise und die Vorgehensweise von Donderer jeweils graphisch dargestellt.

Im folgenden wird zunächst kurz die KfK-Vorgehensweise beim Übergang von SAS3D (Behandlung der Einleitungsphase des Störfalles) auf SIMMER-II (Behandlung der nachfolgenden Übergangsphase) beschrieben. Das übergeordnete Ziel der Kopplung dieser beiden Störfallcodes ist eine möglichst konsistente Weiterführung der Phänomenologie in den aufeinanderfolgenden Störfallphasen (siehe Abb. 2.2).

Die mechanistischen SIMMER-Analysen von KfK stellen die Fortsetzung einer vorher durchgeführten Rechnung für die Einleitungsphase des Störfalls mit SAS3D dar. Wie bereits ausgeführt, müssen die detaillierten mit SAS3D berechneten Störfallbedingungen (Geometrien, Massenverteilungen, Temperaturfelder, neutronische Parameter etc.) zu einem sinnvoll ausgewählten Zeitpunkt (t_1) in die SIMMER-Eingabe konvertiert werden (siehe Abb. 5.1). Die ablaufenden Phänomene sollen dabei konsistent weitergeführt werden. Es wird also im Zeitbereich t_1 bis t_2 eine "überlappende" Rechnung durchgeführt. Trotz unterschiedlicher Detailmodelle in SAS3D und SIMMER müssen bei konsistenter Datenübertragung beide Codes im Zeitbereich t_1 bis t_2 ähnliche Ergebnissen liefern. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde für die mechanistische SAS3D/SIMMER Rechnung ein Fall aus der sog. E-Serie von SAS3D (Referenzfallrechnungen) und zwar im speziellen der Fall EF /1.5/ gewählt. Auf die oben beschriebene Vorgehensweise wurde detailliert in einer Veröffentlichung über KfK SIMMER-Analysen /2.4/ eingegangen. Im Zeitbereich t_1 bis t_2 wurde diese überlappende Rechnung durchgeführt und ein möglichst konsistenter Phänomenologieanschluß erreicht.

Die in den KfK-Veröffentlichungen schon in den Jahren 1982 und 1983 gegebene Information hätte Donderer als Indikator dienen können, daß seine SIMMER-Ergebnisse möglicherweise Inkonsistenzen und Fehler enthalten.

Wie die von KfK nunmehr durchgeführten Vergleichsrechnungen zeigen, unterbricht Donderer in seinen SIMMER-Rechnungen durch die nachfolgend beschriebenen Inkonsistenzen die Kontinuität der Phänomenologie des Störfallablaufs. Der detaillierte Informationsgehalt, den man aus den SAS3D-Ergebnissen für eine SIMMER-Eingabe ableitet, wird dadurch weitgehend zunichte gemacht.

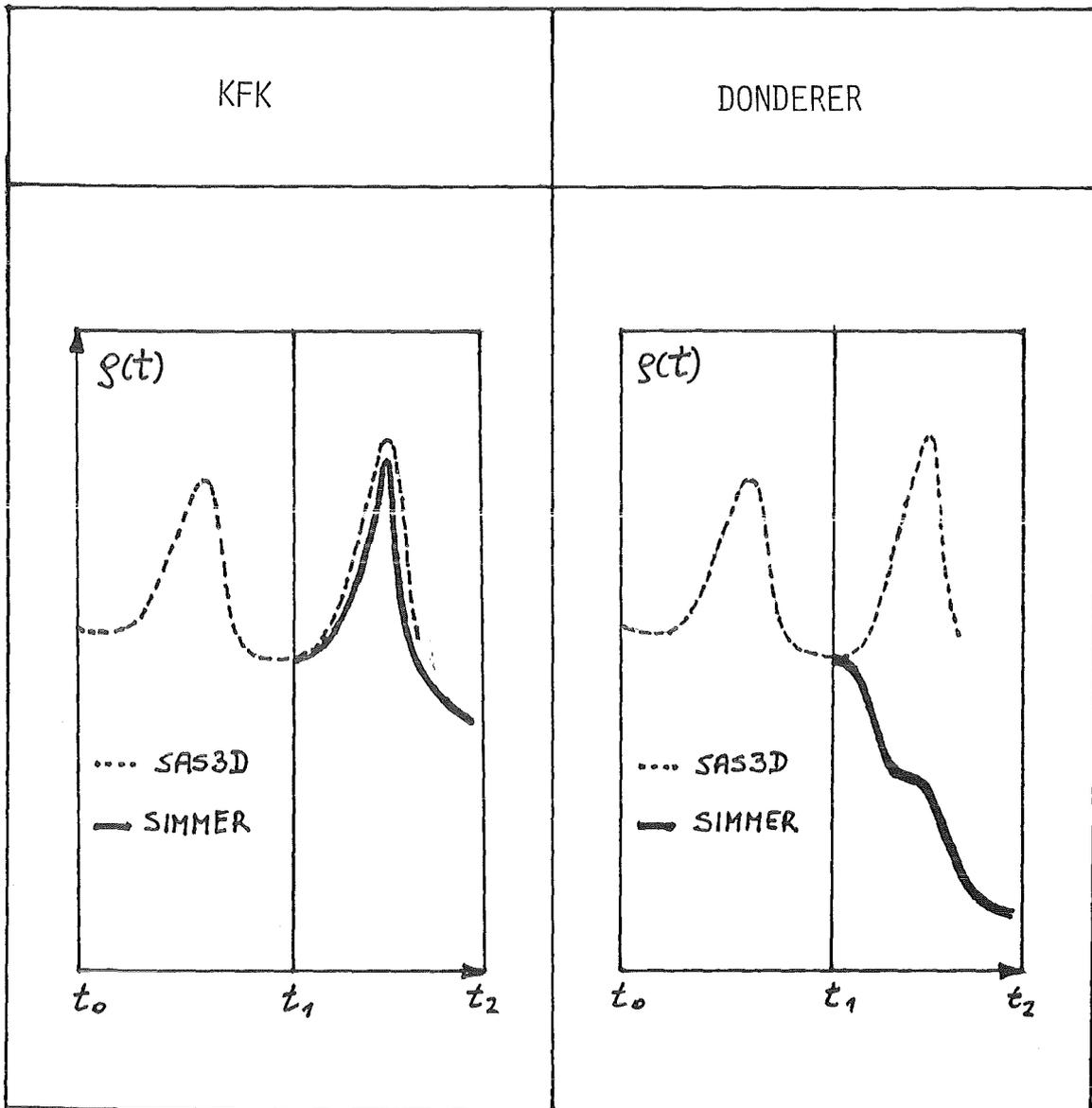


Abb.5.1: Reaktivitätsverläufe während der Überlappungsphase zwischen den Störfallsimulationscodes SAS3D (für die Einleitungsphase) und SIMMER-II (für die nachfolgende Übergangsphase).

Kritikpunkt 1: Nichtberücksichtigung des Ausfrierungsverhaltens von Kernmaterial in kälteren Strukturen

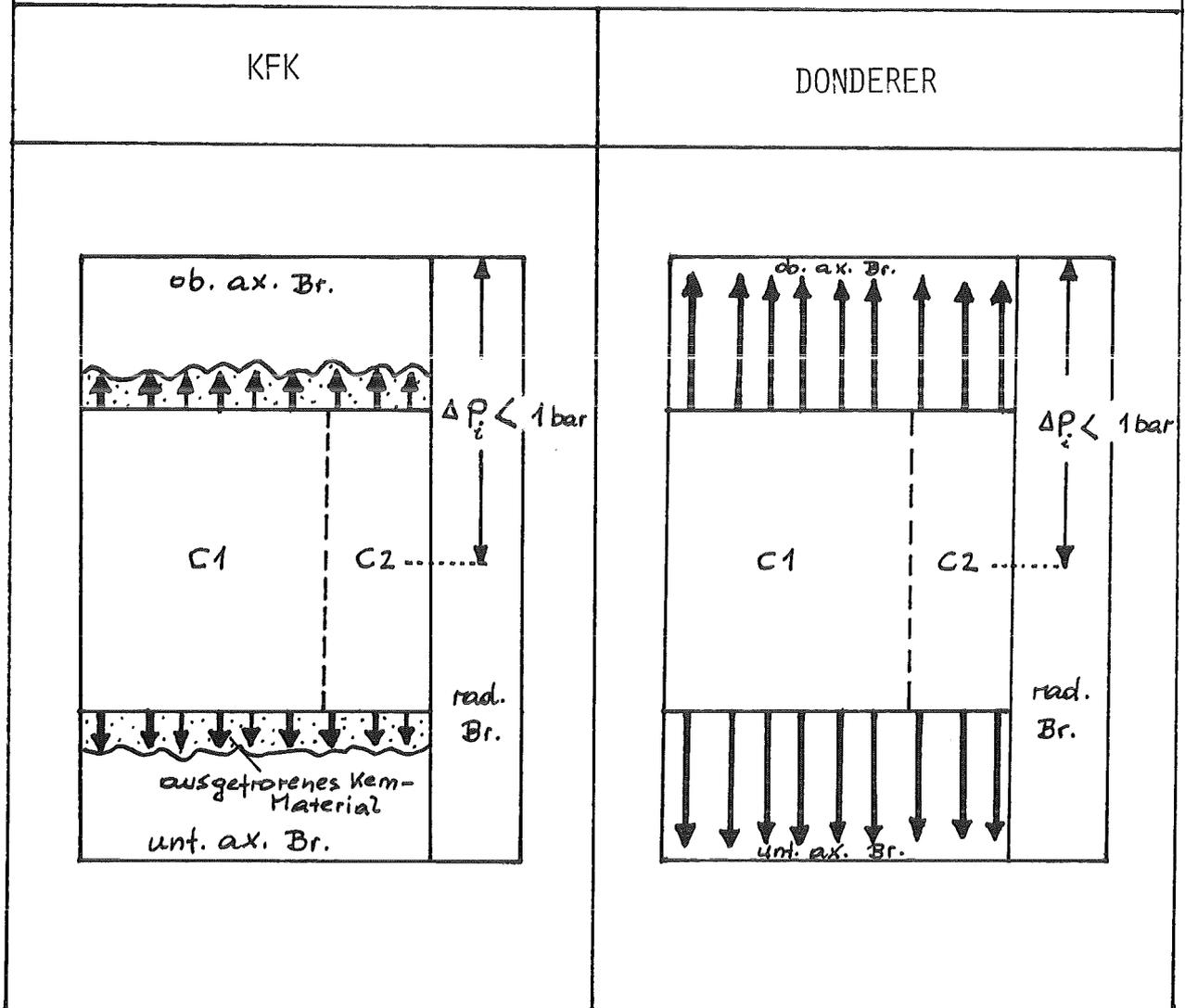


Abb. 5.2: Unterschiede im Eindringverhalten von mobilem Kernmaterial in kalte Brutmantelstrukturen

Kritikpunkt 1: Nichtberücksichtigung des Ausfrierungsverhaltens von Kernmaterial in kälteren Strukturen

Infolge der durch Natriumsieden ausgelösten Primärexkursion (Einleitungsphase des Störfalls) kommt es zu Hüllrohr- und Brennstoffschmelzen in den axialen Mittenbereichen des Kerns. Nach der Primärexkursion enthält der Kern damit flüssigen Brennstoff bzw. Brennstoff in Partikelform und flüssigen Stahl.

Dringt dieses mobil gewordene Kernmaterial aus dem heißen, unter Druck stehenden Kern in die kälteren Brenn- bzw. Brutmantelbereiche ein, so kommt es dort zum Ausfrieren von Brennstoff und Stahl. Je höher das vorhandene Temperatur- und damit auch Druckniveau der Schmelze ist, desto tiefer wird das Kernmaterial in die axialen Brutmäntel eindringen. Zu diesen Ausfrierphänomenen von Brennstoff/Stahlmischungen liegen Ergebnisse zahlreicher in- und out-of-pile Experimente vor /2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18/, auf deren Basis das Eindringen und Ausfrieren von Kernmaterialien in kalten Strukturen im SIMMER-II Code simuliert werden kann. Bei den 1982/1983 von KfK veröffentlichten Untersuchungen mit SIMMER-II /2.3, 2.4/ wurde das Ausfrierverhalten in den oberen und unteren Brutmantelbereichen simuliert, wobei man sich an den experimentellen Arbeiten, die im Argonne National Laboratory durchgeführt worden waren /2.16/, orientierte.

Der von KfK an Donderer übergebene Datensatz basiert auf Ergebnissen einer SAS3D Vorrechnung für einen Kühlmitteldurchsatzstörfall der Serie E (Referenzfallanalysen). Die während der Einleitungsphase auftretende Primärexkursion ist energetisch so milde, daß zwar Brennstabschmelzen eintritt aber das geschmolzene Material (Flüssigkeit und feste Partikel) wegen der zu niedrigen Temperaturen und Drücke nicht weit in die Brutmäntel eindringen kann. Zu Beginn der Simulation mit SIMMER betragen die maximalen Brennstofftemperaturen nur ~ 3300 K und die Druckunterschiede liegen bei dem speziellen Rechenfall zwischen z.B. Kernmitte und

dem oberen äußeren Brutmantelrand unter einem bar. Dementsprechend kommt es schon früh zu Ausfriervorgängen. Dies muß bei der Simulation des Störfallablaufes angemessen berücksichtigt werden (siehe Fälle T1, T2, R, in den KfK-Rechnungen /2.3, 2.4/).

Donderer simuliert in seinen SIMMER-Rechnungen, abweichend von allen verfügbaren experimentellen Informationen, daß das nahe am Gefrierpunkt befindliche Kernmaterial zunächst frei und ungehindert aus dem fast drucklosen Kern in die axialen Brutmäntel entweichen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder ungehindert in den Kern zurückkehren kann. Trotz der sehr viel niedrigeren Temperaturen (einige 100 °K) in den axialen Brutmänteln - insbesondere im unteren Brutmantel - wird in Donderer's Rechnungen die Bewegungsfähigkeit des Kernmaterials nicht reduziert. Als Konsequenz dieser Annahme wird die Kernmaterialbewegung bei den Rechnungen von Donderer verfälscht und es werden unrealistische Reaktivitätsverläufe berechnet, die ihrerseits wieder den Störfallverlauf beeinflussen.

So liegen etwa beim Vergleich der SIMMER-Rechnungen (siehe Kapitel 6) die von Donderer berechneten Reaktivitätsminima (vor der eigentlichen Exkursion) für die analysierten Fälle A6 und B3 um etwa einen Faktor 5 unter denen von KfK ermittelten Werten.

Im Rahmen der KfK-SIMMER-Analysen wurde in /2.3, 2.4/ auch ein Rechenfall "S" dargestellt, bei dem das Kernmaterial die axialen Brutmäntel ungehindert durchdringen kann. Diese KfK-Rechnung führt, da sie die nachfolgend geschilderten Fehler und Inkonsistenzen nicht enthält, zu keinen weiteren Rekritikalitäten und Sekundärexkursionen. Der Reaktor wird durch den starken Brennstoffverlust permanent nuklear abgeschaltet. Dieser Fall wurde in /2.4/ explizit als "unrealistically optimistic" bezeichnet.

Kritikpunkt 2: Nichtberücksichtigung der irreversiblen Druckverluste in den Drosseln der Brennelementfüße (Falsche Zuordnung der Orificekoeffizienten)

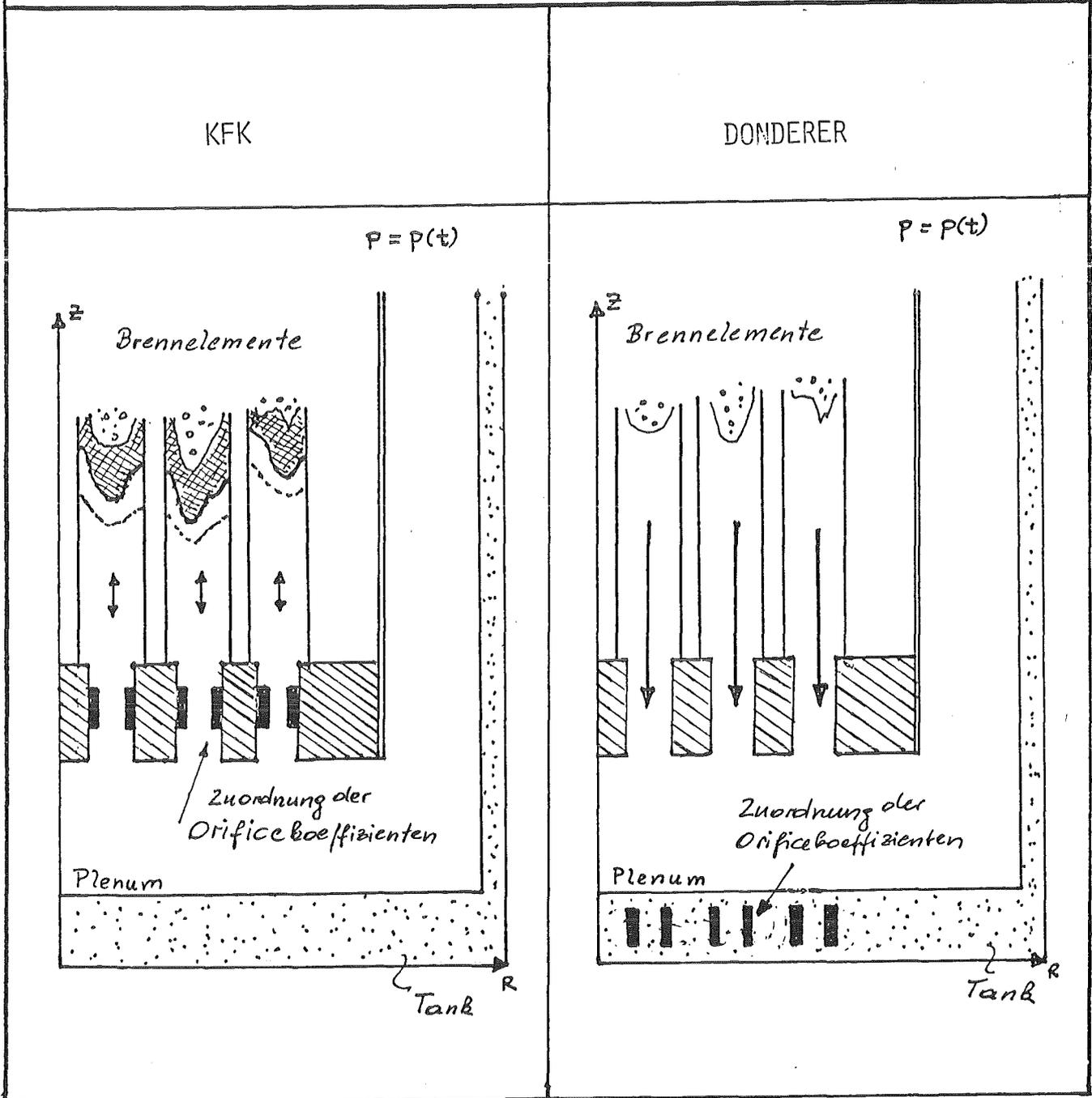


Abb. 5.3: Unterschiedliche Zuordnung der Orifice-Koeffizienten

Kritikpunkt 2: Nichtberücksichtigung der irreversiblen Druckverluste in den Drosseln der Brennelementfüße (Falsche Zuordnung der Orificekoeffizienten).

Die Brennelemente für Schnelle Brutreaktoren besitzen in ihren Füßen sog. Drosseln (Orifices), um im stationären Betrieb einen vorgegebenen Kühlmittel-Massendurchsatz einzustellen. Da die Brennelementleistung u.a. mit der radialen Position im Kernverband variiert, wird angestrebt, mit den Brennelementdrosseln den Massendurchsatz so einzustellen, daß sich für jedes Element etwa die gleiche Kühlmittel-Aufheizspanne ergibt. (Dieses Ziel kann wegen der sich mit dem Abbrand ändernden Leistungsverteilung nur angenähert erreicht werden.) Die Drosseln unterscheiden sich also je nach Position des Brennelementes im Kern. Diese Drosseln verursachen zusammen mit den übrigen Widerständen im Brennelementfuß einen Strömungswiderstand, der im stationären Betrieb etwa die Hälfte des Gesamtdruckabfalls des Brennelementes ausmacht.

Die Brennelement-Drosseln können in der Version 7 des SIMMER-II Codes an der unteren Grenze des Rechen-Maschennetzes mit Hilfe geeigneter Randbedingungen und "Orifice-Koeffizienten" simuliert werden. Die geometrische Simulation des Reaktors und seiner unteren Strukturen endet dann bei diesen Brennelementdrosseln. Als Folge bleibt dann die hydraulische Kopplung zwischen den Brennelementen über das Kühlmittel-Eintrittsplenum unberücksichtigt. Um diese Kopplung zu erfassen, wurde in der KfK-Simulation der SIMMER-Code erweitert. Die Brennelementdrosseln wurden axial so nach oben versetzt, daß sich auch noch das im SNR-300 vorhandene untere Plenum simulieren läßt. Diese "Plenumkopplung" die z.B. auch in SAS3D realisiert wurde, ermöglichte die Darstellung der wesentlichen Konstruktionsteile des Reaktors unterhalb des Kerns.

Der an Donderer übergebene SIMMER-Eingabedatensatz entspricht dieser erweiterten Simulation. Er enthält die Eingabedaten für das untere Plenum, die konsistenten Druck- und Geometrierandbedingungen sowie die auf dieser Basis festgelegten "Orificekoeffi-

zienten". Dies ist eindeutig erkennbar. Damit ist auch erkennbar, daß erst durch eine entsprechende Codeanpassung die richtige Zuordnung der Orifice-Koeffizienten erreicht werden kann. Donderer hat weder die erforderliche Änderungen in Version 7 des SIMMER-Codes vorgenommen noch den Eingabedatensatz so verändert, daß er zu der ihm verfügbaren SIMMER-Version 7 - ohne Plenumsimulation - paßt. In den Rechnungen von Donderer werden die Orifice-Koeffizienten Rechen-Nodes zugewiesen (Tankboden) in denen sie unwirksam sind. Als Folge werden in den Brennelementen keine durch die Orificekoeffizienten gegebenen irreversiblen Druckverluste berücksichtigt.

In den Dondererschen Rechnungen "sacken" die Kernmaterialien in beiden Kernzonen nach unten hin extrem kohärent ab und führen zu starken Brennstoff-Kompaktionsprozessen mit den noch am unteren Kernrand stehenden restlichen Brennstabstümpfen. Diese extrem kohärente Materialbewegungsform resultiert aus der falschen Zuordnung der Orificekoeffizienten in Kombination mit der Nichtberücksichtigung des Ausfrierverhaltens von Kernmaterialien (siehe Kritikpunkt 1).

Es wird aber nicht nur eine unrealistische Bewegungskohärenz (in 97% aller Rechenmaschen ist die Bewegung gleich gerichtet) in beiden Kernzonen bewirkt, sondern es werden auch die Geschwindigkeiten bei kompaktiver Bewegung gesteigert. So sind bei Donderer die Materialgeschwindigkeiten in einzelnen Rechenmaschen z.T. um bis zu 100 mal größer als in den KfK-SIMMER-Rechnungen.

Die falsche Zuordnung der Orificekoeffizienten sowie die Nichtberücksichtigung des Ausfrierverhaltens von Kernmaterial führt noch zu numerischen Schwierigkeiten des SIMMER-Codes (Instabilitäten - siehe Kritikpunkt 3).

Insgesamt ergeben sich damit bei Donderer die extrem hohen Reaktivitätsrampen und Energiefreisetzungen, die jedoch wegen der angegebenen Fehler und Inkonsistenzen in der Modellierung und Phänomenologie sowie der dadurch auftretenden Instabilitäten des SIMMER-Codes nicht belastbar sind.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß die von KfK in den Jahren 1981/82 verwendeten Orifice-Koeffizienten (bei gleichzeitiger Modellierung von Strömungsverengungen in SIMMER) zu groß angenommen wurden. Dies hat, wie überprüft wurde, auf die damaligen von KfK publizierten SIMMER-Ergebnisse praktisch keinen Einfluß. In den damaligen Rechnungen wird die Beweglichkeit der Kernmaterialien im unteren Kernbereich schon durch den transienten Aufbau von partiellen Blockaden so stark gedämpft, daß die Genauigkeit der Berücksichtigung der Drossel auf das Spektrum der Ergebnisse keinen wesentlichen Einfluß mehr hat. Werden keine Ausfriervorgänge berücksichtigt, so ist eine adäquate Modellierung der Druckverluste an der Drossel weit wichtiger. Es ist wohlbekannt, daß viele fluiddynamische Programme bei der Simulation von plötzlichen starken Veränderungen des Strömungsquerschnittes (Verengungen oder Erweiterungen) numerische Schwierigkeiten haben. Auch für SIMMER sind inzwischen Methoden in Entwicklung, um solche Situationen besser beschreiben zu können /7.3/. Bevor solche Änderungen und Verbesserungen in SIMMER verfügbar sind, sollte zur Vermeidung von numerischen Schwierigkeiten auf die explizite Modellierung von starken Querschnittsveränderungen, wie sie z.B. im unteren Plenum oder an den Eintrittsdrosseln auftreten können, in SIMMER verzichtet werden. Stattdessen sollte z.B. der irreversible Druckverlust an den Brennelementdrosseln durch geeignet angepasste Orifice-Koeffizienten berücksichtigt werden.

Ein weiterer Tatbestand, der die Beweglichkeit der Materialien (Rückströmung nach unten) stark behindert, wird weder von Donderer noch von KfK berücksichtigt. Es handelt sich um die Massen-Trägheit des Kühlmittels in den Primärkreisen. Auf die KfK-Ergebnisse hat diese Vernachlässigung (z.B. wegen der angemessenen Simulation der transienten Blockadebildung) keinen wesentlichen Einfluß.

Kritikpunkt 3: Nichterkennen und Fehlinterpretation von
numerisch bedingten Instabilitäten

Die Nichtberücksichtigung jeglicher Ausfriervorgänge im unteren Kernbereich (Kritikpunkt 1) und die gleichzeitige Nichterfassung der irreversiblen Druckverluste im unteren Brennelement (Kritikpunkt 2) führen in der SIMMER-Simulation zu einer unrealistisch hohen Durchlässigkeit der unteren Strukturen. Im SIMMER-Code können unter solchen Bedingungen (große Beschleunigungen, hohe Geschwindigkeiten in Geometrien mit plötzlichen Querschnittsänderungen) numerische Schwierigkeiten auftreten. Solche Probleme sind auch bei anderen fluiddynamischen Programmen zu beobachten. Im SIMMER-Code verschärfen sie sich noch durch die Kopplung mit dem Lösungsalgorithmus der Neutronik (siehe unten). Die möglichen Folgen reichen von begrenzten Ungenauigkeiten der Ergebnisse über eine große Sensitivität der Ergebnisse gegenüber Zeitschrittwahl und anderen Parametern bis hin zu physikalisch unsinnigen Ergebnissen.

In den bei KfK durchgeführten Rechnungen mit den von Donderer angegebenen Randbedingungen /1.1/ kommt es aufgrund von numerischen Problemen zur Berechnung von unphysikalischen Druckverläufen. Diese Druckfehlberechnungen treten zuerst nur lokal im Orificebereich weit unterhalb des Kerns auf, weiten sich jedoch in immer größere Bereiche nach oben hin aus. Es treten Vakuumdrücke und extrem starke Druckoszillationen auf. Von Zeitschritt zu Zeitschritt ($\Delta t \sim 10^{-4}$ s) ändern sich in verschiedenen Rechenmaschen die Drücke um 4-5 Zehnerpotenzen. Lokal treten Druckrampen von ~ 1 Mio bar/s auf, und Drücke wechseln z.T. ihr Vorzeichen. Durch das Nichtmodellieren des Ausfrierverhaltens von Kernmaterial (Kritikpunkt 1) können diese Druckfehlberechnungen schließlich die Brennstoffbewegungsvorgänge auch im Kern beeinflussen und es treten die schon vorher beschriebenen kompakten Materialbewegungsvorgänge auf.

Der Code wird insgesamt extrem instabil. Geringe Unterschiede in den gewählten Zeitschritten beeinflussen die Reaktivitäts- und Leistungsverläufe sehr stark. Diese Zeitschrittsensitivität spricht auch Donderer in seinem Bericht (S. 6) an, er geht aber der Ursache nicht nach, versucht vielmehr das Problem durch Parametervariation der Reaktivitätswerte zum Zeitpunkt des Herunterfallens der Brennstabstümpfe zu lösen (siehe Fälle A2 und A6). Donderer hat offensichtlich nicht erkannt, daß der Rechencode numerisch instabil geworden ist und die Rechenergebnisse daher nicht mehr physikalisch sinnvoll interpretierbar sind. Donderer führt z.B. die hohen Kompaktions-Geschwindigkeiten der Kernmaterialien auf den Zusammenbruch von BNR-Dampfdrücken am unteren Kernrand zurück. Diese Interpretation trifft nicht zu. Die extrem hohen Kompaktionsgeschwindigkeiten werden durch die Druckfehlberechnungen verursacht, die ihrerseits aus der Überlagerung der Vernachlässigung der Simulation von Blockadebildung und einer falschen Zuordnung der Orificekoeffizienten resultieren.

Da in allen 11 Fällen Donderers /1.1/ ähnlich vorgegangen wird, muß wohl davon ausgegangen werden, daß auch die Ergebnisse der nicht im Detail nachgerechneten Fälle durch die Auswirkung von numerischen Instabilitäten bestimmt werden. Daher ist es nicht einmal zulässig, aus den Parameteruntersuchungen Trendaussagen abzuleiten. Die Ergebnisse von Donderer /1.1/ sind nicht belastbar.

Kritikpunkt 4: Nichtberücksichtigung der thermischen Expansion von Kernmaterialien in hochenergetischen Fällen

Kernmaterialien dehnen sich wie andere Stoffe bei Temperaturerhöhung aus. Dies führt insbesondere bei der Simulation hochenergetischer Exkursionen bei denen extrem hohen Brennstofftemperaturen berechnet werden, zu einem wichtigen, inhärent wirksamen physikalischen Effekt. Durch die thermische Ausdehnung wird während einer solchen Leistungsexkursion in verschiedenen Bereichen des Reaktorkerns das vorhandene freie Volumen nach und nach ausgefüllt, und es werden einphasige Flüssigkeitszustände erreicht. Die dann auftretenden Einphasendrucke sind extrem hoch (trotz gleichzeitig auch erhöhter Kompressibilität des Kernmaterials bei hohen Temperaturen) und treiben das Kernmaterial solcher einphasiger Bereiche nahezu instantan auseinander. Die Kettenreaktion wird dadurch abgebrochen und die Leistungsexkursion vorzeitig beendet. Die Halbwertsbreite eines Leistungspulses wird reduziert und damit wird auch die Energiefreisetzung geringer.

Die Wirkung dieses Effektes wurde 1976 schon von KfK in /5.11/ beschrieben und ist in verschiedenen Veröffentlichungen /5.12, 2.5, 2.6/ eingehend behandelt worden. Die Wirkung dieser Brennstoffexpansion mit Aufbau von Einphasendrucken wurde insbesondere in den im Auftrag der amerikanischen Genehmigungsbehörde USNRC von LANL (Los Alamos) durchgeführten SIMMER-Analysen für den heterogenen CRBR Kern /2.5/ demonstriert.

Der Effekt soll hier nochmals in einer Bildfolge verdeutlicht werden. Die Abb. 5.4 stellt den Verlauf der Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur für die Zustandsgleichung des Brennstoffs dar (SST-EOS aus KADIS /7.2/).

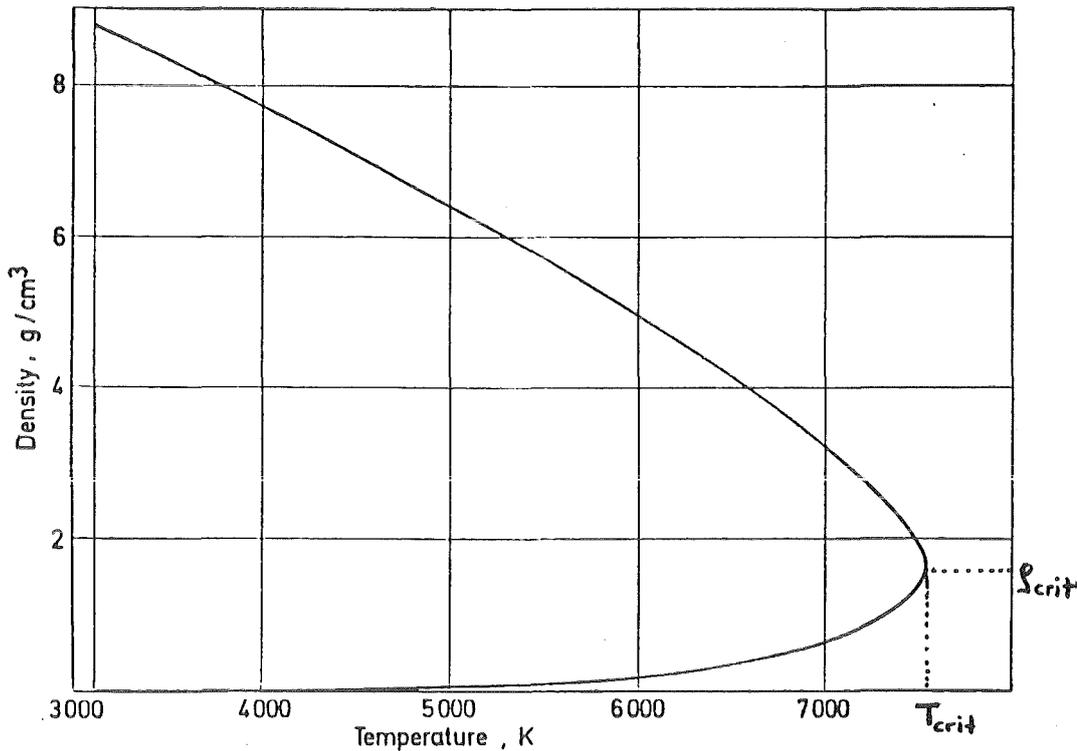


Abb. 5.4: Dichte-Temperatur-Sättigungslinie für UO_2

Mit der Abnahme der Dichte nimmt das Volumen zu. Geht man z.B. von ~ 3000 K bis zum kritischen Punkt bei 7550 K, so erhöht sich das Brennstoff-Volumen um etwa den Faktor 5. In der folgenden Abbildung wird dies illustriert. Es bedeuten dabei α_F = Volumenanteil des Brennstoffs, α_S = Volumenanteil des Stahls bzw. α_V der Voidanteil (die angegebenen Werte entsprachen denen einer "unge störten Zelle", d.h. es hat noch keine wesentliche Materialumverteilung stattgefunden).

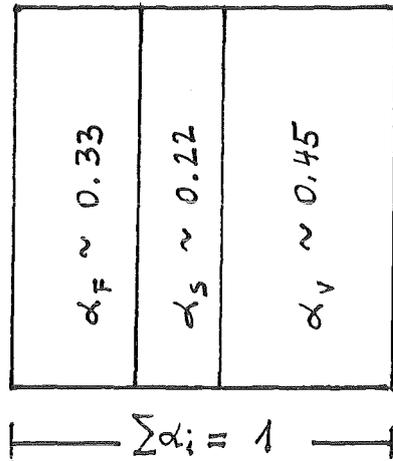


Abb. 5.5: Flüssigkeits-Volumenanteile (typisch für SNR-300) von Brennstoff, Stahl, Void in Einheitszelle

Wird nun der Brennstoff auf etwa 7000 K aufgeheizt, so ergibt sich folgendes Bild (es wird angenommen, daß der Stahl sich entsprechend den sehr kurzen Zeiträumen während einer superprompt-kritischen Exkursion nicht aufheizt und ausdehnt):

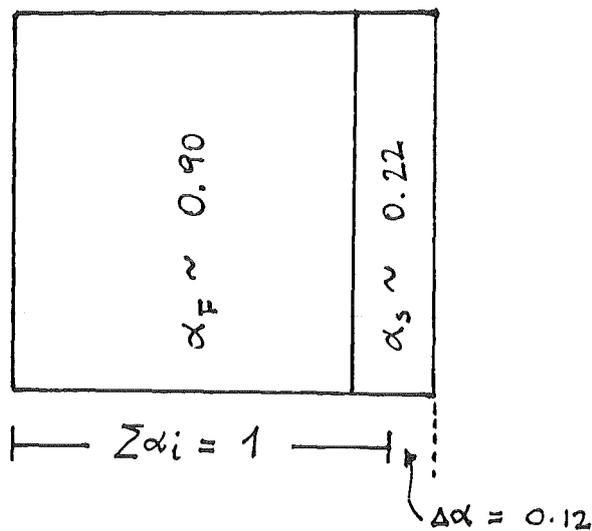


Abb. 5.6: Volumenanteile in "Einheitszelle" bei ~ 7000 K.

Vom Volumen her paßt die "gedehnte Zelle" nicht in die Einheitszelle; d.h. schon bei einer niedrigeren Brennstofftemperatur (~ 6700 K) wird das freie Volumen durch Brennstoffexpansion aufgebraucht und es treten dann in der Folge hohe Einphasendrucke auf, die das Kernmaterial auseinandertreiben und die Exkursion neutronisch rasch beenden.

Für das Auftreten einer Rekritikalität muß sich das Kernmaterial an bestimmten Stellen im Kern schon vorverdichtet und rekompaktiert haben, der entsprechende Leervolumenanteil α_v aus Abb. 5.5 ist also schon kleiner als in der ungestörten Zelle. Der Brennstoff/Stahlanteil in diesen vorverdichteten Zellen ist damit schon viel höher als im "ungestörten" Reaktorkern. Dort wo also die Rekritikalität entsteht, wird bei schon viel niedrigeren Temperaturen als die oben erwähnten 6700 K das Leervolumen in der Einheitszelle aufgebraucht und es werden lokal hohe Einphasendrucke aufgebaut. Die Ursache für die Rekritikalität wird damit sozusagen beseitigt und die Leistungsexkursion vorzeitig beendet.

In der Version 7 des SIMMER-Codes wird die thermische Expansion der Kernmaterialien nicht simuliert. Dies würde nur dann einen Einfluß auf die Ergebnisse haben können, wenn die Exkursionsrechnungen in Bereiche von extrem hohen Temperaturen führen (Donderer: Fall A6) oder von vornherein nur wenig Leervolumen verfügbar ist. Der Codeanwender muß die Vernachlässigung dieses Phänomens in Version 7 von SIMMER vor Augen haben und dementsprechend seine Ergebnisse relativieren, wenn extrem hohen Temperaturen berechnet werden.

Donderer weist in einer Entgegnung /5.13/ auf eine im Verwaltungsstreitverfahren in Düsseldorf zu diesem Effekt gemachte Aussage des KfK Gutachters darauf hin, daß er bei Benutzung der "KADIS Formel" kein signifikantes Reduktionspotential sehe. Vermutlich bezeichnet Donderer die auch in KADIS enthaltene sog. ANL-Zu-

standsgleichung /1.9/ als "KADIS-Formel". Diese ist in dem bei Donderer vorliegenden Temperaturbereich (ca. 8000 K) nicht gültig.

Zusätzlich spricht Donderer in diesem Zusammenhang noch eine mögliche Energetikerhöhung durch die Reduktion des Neutronenstreamings (Behrens-Effekt) an. Dieser Effekt wurde seit 1978 von KfK untersucht /5.14, 1.8/. Seine Auswirkungen auf die Energetik von Sekundärexcursionen wurden ermittelt und bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Kritikpunkt 5: Brennstab-Aufbrechmodell verfälscht Massenbilanzen und führt zu inkorrekten Temperaturniveaus des Brennstoffs

Die Kernbedingungen zu Beginn der Übergangsphase sind mit dadurch charakterisiert, daß im oberen Kernbereich noch Reststümpfe von Brennstäben hängen. In der Version 7 des SIMMER-Programms bleiben die Pelletbrocken dieser Brennstabstümpfe nach Aufschmelzen des Hüllrohrs vorerst in ihren Positionen bis der Brennstoff selbst geschmolzen ist. Sowohl KfK als auch Donderer änderten das SIMMER-Programm so ab, daß nach Hüllrohrschmelzen die Pelletbrocken beweglich werden. Dadurch stehen höhere mobile Inventaranteile früher für etwaige Rekritikalitätsereignisse zur Verfügung. Wie die CABRI /2.12, 2.13, 2.14, 2.15/ und SIMBATH /2.9, 2.10, 2.11/ Experimente zeigen, ist dies eine pessimistische Annahme, da durchaus beträchtliche Inventaranteile an den noch bestehenden Brennstabstümpfen ausfrieren und hängenbleiben.

Die in den KfK SIMMER-Rechnungen gewählte Modellierung des Brennstab-Stalaktit-Aufbrechens geht davon aus, daß nach Hüllrohrschmelzen die am oberen Kernrand noch befindlichen Restbrennstabstümpfe mit ihren Pelletbrocken als bewegliche Feststoffpartikel in dem etwa noch vorhandenen flüssigen Brennstoff vorliegen. Die Partikel besitzen dabei die Festkörper-Temperatur T_s der Pelletbrocken ($T_s < T_{melt}$) und die Flüssigkeit die Temperatur T_l ($T_l \geq T_{melt}$). Ebenso bleiben die relativen Massenanteile erhalten. Abhängig vom weiteren Störfallablauf können dann diese Partikel entweder auch aufschmelzen oder der zunächst flüssige Brennstoff kann als Folge des Energieaustausches mit anderen Komponenten des Gemisches als Partikel oder als Brennstoffkruste an den Kastenzwänden ausfrieren.

Donderer beschreitet einen anderen Weg. Anstatt die festen Pelletbrocken direkt in das "Partikelfeld" zu überführen, werden die Festkörperbrocken zuerst "verflüssigt". Diese "Pseudoflüssigkeit" hat Temperaturen, die in einzelnen Rechenmaschen (siehe Abbildung

5.7) bis zu einigen 100 K unter dem Schmelzpunkt liegen (z.B. im Fall A6). Diese "Pseudoflüssigkeit" ($T < T_{\text{melt}}$) wird nun mit dem schon vorher in der Rechenmasche vorhandenen flüssigen Brennstoff ($T > T_{\text{melt}}$) vermischt und "friert" zusammen mit diesem im nächsten Zeitschritt zu Brennstoffpartikeln aus. Diese Brennstoffpartikel haben dann eine Mischungstemperatur (T_{mix}), die zwischen der Festkörper- und Flüssigkeitstemperatur liegt.

Letztendlich verschieben sich dadurch die Massenverhältnisse von flüssigem und als Partikel vorliegendem Brennstoff und zudem werden die Temperaturniveaus für die Partikel verfälscht.

Durch die Donderer'sche Vorgehensweise kommt es zu "Brüchen" in der Rechnung, da durch geänderte Massenverhältnisse und Temperaturniveaus sowohl die verschiedenen thermohydraulischen Prozesse als auch die Neutronik (z.B. Doppler) beeinflusst werden. Z.B. werden die Wärmeübergangsprozesse geändert, da sich die Oberflächen der Flüssigkeits- und Festkörperpartikel um bis zu einem Faktor 10^4 unterscheiden sowie natürlich auch die Stoffdaten von flüssig und fest unterschiedlich sind.

Wie die Analyse der Dondererschen SIMMER-Rechnungen in Kapitel 6 zeigt, hat diese Art der Modellierung des Brennstabaufbrechens alleine für die untersuchten Rechenläufe A6 und B3 nicht das Potential extrem hohe Energiefreisetzungen herbeizuführen.

Kritikpunkt 6: Erzwingen einer künstlichen Kohärenz in einem mechanistischen Programm (Fall A6)

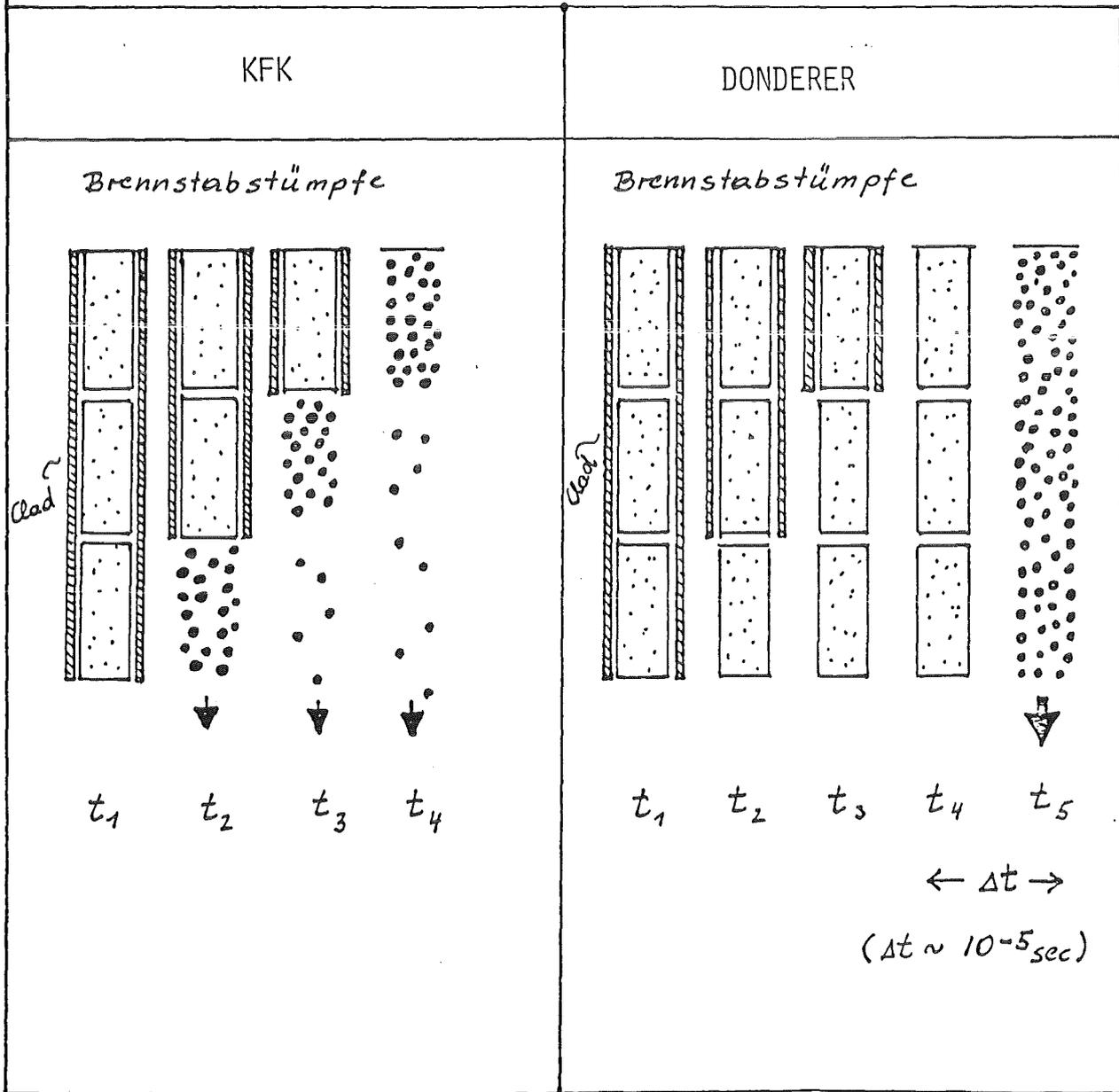


Abb. 5.8: Erzwingen einer räumlichen und zeitlichen Kohärenz beim Aufbrechen von Restbrennstabstümpfen (Darstellung in zylindrischer RZ-Geometrie).

Kritikpunkt 6: Erzwingen einer künstlichen Kohärenz in einem mechanistischen Programm (Fall A6)

Die vorhandene axiale, radiale und azimutale Inkohärenz der Materialbewegungsvorgänge kann in SIMMER wegen der zweidimensionalen Modellierung mit relativ großen Maschen nur in begrenztem Maße berücksichtigt werden. Die KfK-Analysen machen von dieser begrenzten Möglichkeit der Simulation von inkohärenten Materialbewegungsvorgängen vollen Gebrauch.

In der von KfK gewählten Modellierung bricht nach dem Schmelzen eines axialen Hüllrohrsegmentes der betreffende Brennstoffanteil durch Festkörperdispersion auf. Dieser Aufbruchvorgang erfolgt also axial inkohärent.

In radialer Richtung ist die Inkohärenz der Materialbewegung durch die vorhergehende SAS3D Simulation der Einleitungsphase festgelegt. Wegen der im SIMMER-Code benutzten zylindersymmetrischen Ring-Geometrie (RZ-Geometrie), die aus der 10-Kanal SAS Rechnung übernommen wurde, bedeutet dies in den KfK-Analysen, daß für die 2. Corezone sich in Ring 8 immer noch etwa 7000 Pins und in Ring 9 etwa 8000 Pins identisch verhalten, aber zumindest zwischen den 9 "Kern-Ringen" die Prozesse inkohärent ablaufen*.

Die überdies noch vorhandene azimutale Inkohärenz zwischen den Brennelementen wird dabei ebenfalls nicht berücksichtigt.

* Die in Wirklichkeit vorhandene Inkohärenz im Brennelement wird maßgeblich von der vom Leistungsbetrieb her vorgeprägten Temperaturungleichförmigkeit bestimmt. Die Größenordnung dieser Ungleichförmigkeit kann z.B. für Ring 9 aus Abb. 5.9 ersehen werden /5.15/

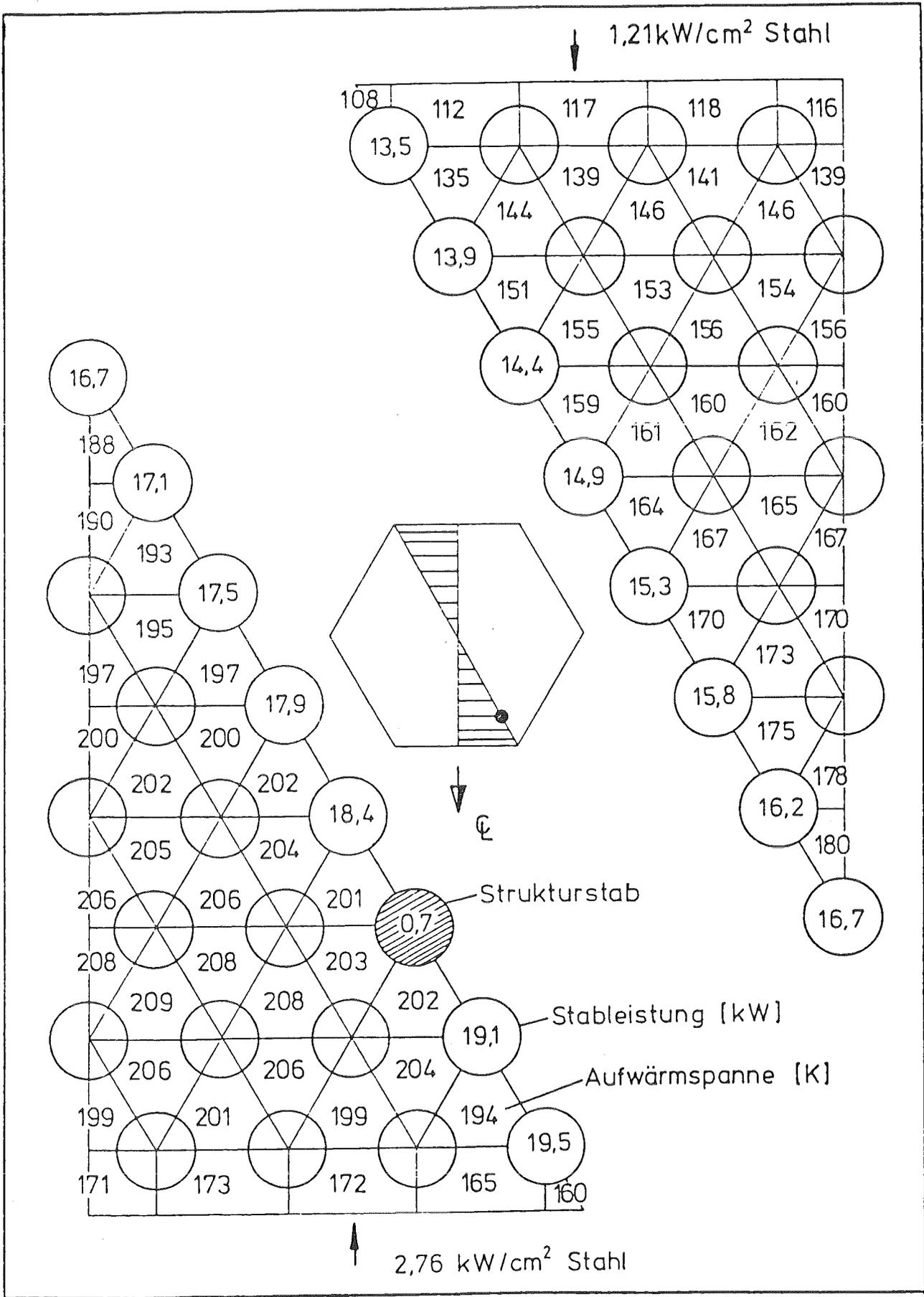


Abb. 5.9: Verteilung der Aufwärmspannen des Kühlmittels im Randelement am Ende der Spaltstoffzone (1. Zyklus Anfang) /5.15/

In der Rechnung A6 von Donderer wird die existierende Inkohärenz in der 2. Kernzone (azimutal, axial und radial) vollständig unterdrückt. Es wird angenommen, daß zuerst sowohl in der ersten als auch in der zweiten Corezone alle Pinstümpfe trotz Hüllrohrschmelzen an der Coreoberkante bis zu einem bestimmten Zeitpunkt stehen bleiben.

Schließlich wird der Fallprozeß in der Rechnung ausgelöst, wenn sich ein Reaktivitätsminimum bei der SIMMER-Rechnung ergibt. So entstehen bei dem Fallprozeß wegen der dann größten Fallwege die höchsten Geschwindigkeiten und Reaktivitätsrampen. Es wird daran erinnert, daß der Wert dieses Reaktivitätsminimums durch die weiter oben beschriebenen Inkonsistenzen und Fehler (Kritikpunkte 1-3) selbst verfälscht ist.

Im Bereich des Reaktivitätsminimums tritt bei Donderer plötzlich eine Programmänderung in Kraft und es kommt zum Aufbrechen des Brennstoffs (Abb. 5.8 (t_5)) und zwar gleichzeitig in den beiden Ringen 8 und 9 der 2. Corezone. Dadurch wird in der Rechnung ein völlig identisches Verhalten von etwa 15 000 Brennstabstümpfen erzwungen. Selbst wenn man diese exzessive Kohärenz nicht völlig ausschließen wollte, so ist eine entsprechende Annahme doch zumindest als äußerst unwahrscheinlich einzustufen.

SIMMER als mechanistisches Programm wurde gerade deshalb entworfen, um die Störfallmodellierung realistischer durchführen zu können und nicht mehr auf unangemessen konservative Annahmen auch bzgl. der Kohärenz angewiesen zu sein. So kann in SIMMER zumindest die durch eine SAS3D Rechnung ermittelte radiale Inkohärenz mitberücksichtigt werden. Durch die Vorgehensweise Donderers und die speziellen Eingriffe wird die im SIMMER-Code vorhandene Möglichkeit inkohärente Materialbewegungen im begrenzten Umfange zu simulieren, bewußt ignoriert.

Der Hintergrund für die Annahme einer solch extremen Kohärenz der Kernmaterialbewegungsvorgänge liegt offensichtlich darin, daß

Donderer mit seinen SIMMER-Rechnungen Ergebnisse eines schon 1978 ins Genehmigungsverfahren eingebrachten sog. Modellfalles für Reaktivitäten in der frühen Übergangsphase (Modellfall A) /1.8/ überprüfen will. Dies wird aus seinen 1984 beim Verwaltungsgerichtsverfahren in Düsseldorf eingereichten Unterlagen deutlich. In dem sog. Modellfall A wurden bewußt Extremannahmen für die Kohärenz der Bewegungsvorgänge gemacht, da zu dieser Zeit noch keine mechanistischen Rechencodes für diese Störfallphase zur Verfügung standen. Auch hier wurde angenommen, daß in der 2. Kernzone im Sinne einer pessimistischen Grenzabschätzung 15 000 Pinstümpfe kohärent zur Kernmittelebene fallen. Allerdings gibt es zu den von Donderer vorgelegten SIMMER-Rechnungen einige wesentliche Unterschiede:

- 1) Die Materialumverteilungen und damit die Reaktivitätsniveaus im Modellfall A wurden entsprechend dem zugrundeliegenden Szenario korrekt mit Neutronentransportrechnungen bestimmt, sie resultieren also nicht aus Fehlern und Inkonsistenzen (Kritikpunkte 1-3) wie die Reaktivitätsniveaus bei den Dondererschen SIMMER-Analysen.
- 2) Für die erste Kernzone war im Modellfall A die Materialbewegung durch Inkohärenz als reaktivitätsneutral charakterisiert worden. Im Gegensatz dazu kommt es bei der SIMMER-Simulation von Donderer durch die oben beschriebenen Fehler zu einer völligen Kohärenz der kompakten Kernmaterialbewegung in der gesamten ersten Kernzone.

Nach Korrektur der aufgezeigten Fehler zeigen die SIMMER-Rechnungen wieder die schon 1978 von KfK angenommene Inkohärenz der Materialbewegung innerhalb der ersten Kernzone. Die bei KfK durchgeführten mechanistischen SIMMER-Analysen sowie die neuere vorhandene theoretische und experimentelle Information bestätigen die Konservativität des Vorgehens bei dem Modellfall A - zeigen allerdings auch auf, daß ein derartig konservatives Vorgehen heute nicht mehr gerechtfertigt ist.

Wie aus den Ergebnissen der SIMMER-Rechnungen in Kapitel 6 hervorgeht, liegt selbst bei Annahme einer völligen Kohärenz des Brennstabaufbrechens in der 2. Kernzone (nach Beseitigung der Fehler und Inkonsistenzen, Kritikpunkte 1-3) die dadurch ausgelöste Energetik einer Sekundärexkursion noch weit unter der Auslegungsgrenze des SNR-300.

Kritikpunkt 7: Unphysikalische Änderung der Partikelgrößen nach dem Aufbruchvorgang (Fall A6)

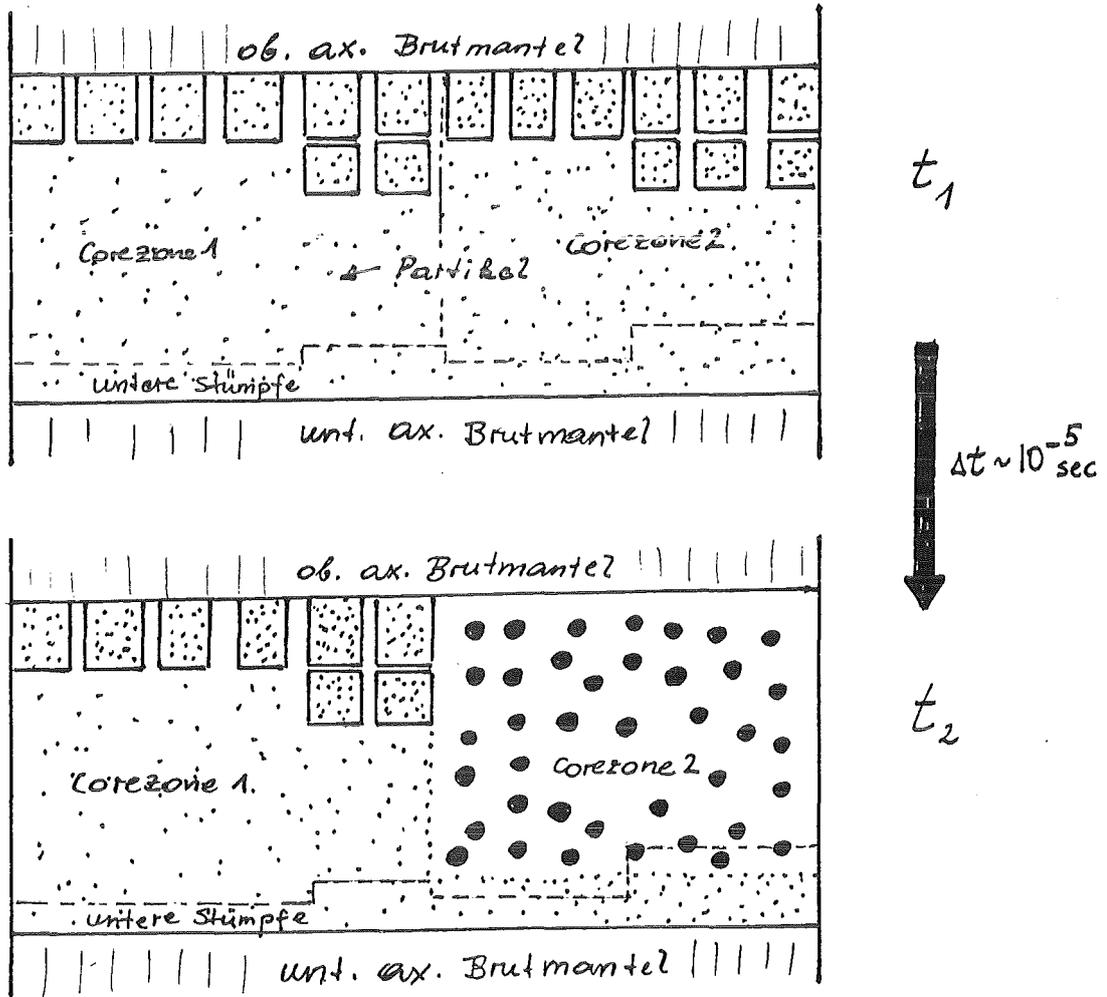


Abb. 5.10: Erhöhung des Partikelvolumens um den Faktor 1000 nach Brennstabaufbrechen

Kritikpunkt 7: Unphysikalische Änderung der Partikelgrößen nach dem Aufbruchvorgang

Gleichzeitig mit dem Aufbrechen der oberen Brennstabstümpfe nimmt Donderer in seinem Rechenfall A6 an, daß in Bereichen der zweiten Kernzone die Partikel plötzlich vergrößert werden. Donderer selbst nennt keine Begründung für diese Vergrößerung des Partikelvolumens um den Faktor 1000. Dieses Vergrößern wird von ihm auch nicht an ein besonders benanntes Kriterium oder einen physikalischen Mechanismus geknüpft: Das Hochsetzen erfolgt, wenn an einem gewissen Zeitpunkt der Code einen sog. "long print" durchführt, also seine bis dahin berechneten Größen detailliert auf Papier gedruckt werden.

Die Vergrößerung erfolgt nicht nur im Bereich, in dem die Brennstabstümpfe selbst aufbrechen, sondern auch in dem Bereich, der sich bis zu 50 cm unterhalb dieser Stümpfe befindet. Die 2. Kernzone wird am unteren Ende nochmals willkürlich axial unterteilt. Am unteren Kernrand sind die Partikel wieder kleiner.

Gegen eine sinnvolle Parametrierung des dem aufbrechenden Brennstoffs zugewiesenen Partikelradius' ist an sich nichts einzuwenden. Physikalisch fragwürdig ist aber die dabei gleichzeitig erzwungene instantane Volumenzunahme des schon vorher aufgebrochenen Brennstoffs. Die Energetik der berechneten Sekundärexkursion wird durch diesen willkürlichen Eingriff gesteigert.

Wie schon frühere KfK-Rechnungen /2.4/, bei denen größere Partikel vom Beginn der Rechnung an benutzt wurden, zeigten, erhöht sich durch größere Brennstoff-Partikel tendenziell die Energetik von Sekundärexkursionen, da die Erhöhung der Partikelgröße zu etwas höheren Kompaktionsgeschwindigkeiten führt. Selbst bei einer Vergrößerung des Partikelvolumens um den Faktor 1000 liegen die für die frühe Übergangsphase berechneten Energetikpotentiale der KfK-SIMMER-Rechnungen jedoch immer noch um Faktoren unter der Auslegungsgrenze des SNR 300.

Ähnlich wie bei den Kritikpunkten 5 und 6 beschrieben, wird auch durch das Hochsetzen des Partikelvolumens die SIMMER-Rechnung mit einem Trend in die energetische Richtung versehen, jedoch verursacht auch dieser Trend alleine keine Energetikpotentiale, die über die Auslegungsgrenze des SNR 300 hinausführen.

6) Beschreibung der durchgeführten Vergleichs- und Kontrollrechnungen mit dem SIMMER Code

Für die von KfK durchgeführten Vergleichsrechnungen wurde als Ausgangspunkt die SIMMER-II Version 7 verwendet, die am 28.10.1981 zusammen mit einer ausführlichen Dokumentation und Testbeispielen an die Universität Bremen (Prof. von Ehrenstein, Univ. Bremen) übersandt wurde. Dieselbe Codeversion erhielt am gleichen Tage auch die Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) in Köln. Da diese spezielle alte SIMMER-Version wegen der laufenden Überarbeitung des SIMMER-Programmes bei KfK nicht gesondert archiviert wurde, mußte sie rekonstruiert werden. Um völlig sicher zu gehen, daß die rekonstruierte Version mit der an die Universität Bremen übergebenen Version identisch ist, erfolgte ein maschineller Vergleich der rekonstruierten Version mit der an die GRS übersandten Version des Codes. Dieser Vergleich zeigte, daß die beiden Versionen identisch sind.

Als Codeeingabe diente bei den Vergleichsrechnungen der an die Universität Bremen am 14.5.82 weitergegebene Eingabedatensatz. Durch dieses Vorgehen können die unterschiedlichen Annahmen in der Modellierung und ihre Auswirkung auf den Störfallablauf direkt verdeutlicht werden. Die SIMMER-Kontrollrechnungen wurden entsprechend dem Wunsche der GRS für die Fälle A6 und B3 durchgeführt. Es wurde so vorgegangen, daß zuerst die Rechnungen A6 und B3 mit den von Donderer getroffenen Annahmen rein formal nachvollzogen wurden.

Diesen Rechnungen wurden dann die KfK-Rechnungen (M1 und M2 in Tab. 6.1 und Tab. 6.2) gegenübergestellt, welche die vorher angesprochenen Fehler und Inkonsistenzen nicht enthalten. Um speziell den Einfluß der von Donderer in den SIMMER-Code eingebauten Programmänderungen wie das Brennstabaufbrechmodell, das Hochsetzen des Partikelvolumens und das Erzwingen der Kohärenz in der 2. Kernzone zu untersuchen, wurden noch zusätzliche Rechnungen ($\tilde{A}6$ und $\tilde{B}3$ in Tab. 6.1 und Tab. 6.2) durchgeführt. Es läßt sich dadurch der Einfluß der von Donderer gemachten Annahmen auf das mechanische Arbeitspotential verdeutlichen bzw. es läßt sich erkennen, wodurch im einzelnen die extrem hohen Arbeitspotentiale bei Donderer

zustande kommen. In den Tabellen 6.1 und 6.2 wird das Verfahren nochmals dargestellt, und es werden auch die mechanischen Arbeitspotentiale der einzelnen Rechnungen (isentropische Expansion des heißen Brennstoffs auf 70 m³ (gedehntes Schutzgasvolumen des SNR300)) angegeben. Dabei wird auf den Kritikpunkt 4 (thermische Expansion der Kernmaterialien) nicht eingegangen, da sich nach Beseitigung der Fehler und Inkonsistenzen aus den Dondererschen Rechnungen nur noch geringe Energiefreisetzungen ergeben, für die dieser Effekt von untergeordneter Bedeutung ist.

In den Tabellen 6.3 und 6.4 sind noch einige Einzelergebnisse der durchgeführten SIMMER-Rechnungen angegeben. In der jeweils ersten Spalte werden die von Donderer in seinem Bericht /1.1/ angegebenen Werte aufgelistet. Wegen der schon erwähnten numerischen Instabilitäten und der damit verbundenen starken Zeitschrittsensitivität war eine exakte Nachrechnung der Fälle von Donderer nicht möglich. Die Ergebnisse der Rechnungen, die mit den Annahmen von Donderer durchgeführt wurden (Fall A6 und B3) schwanken in einem weiten Bereich. In den Tabellen und Abbildungen sind die KfK-Nachrechnungen dargestellt, die den Reaktivitäts- und Leistungsverläufen von Donderer am nächsten kommen.

In den Abb. 6.1 bis 6.6 sind die entsprechenden Leistungs- und Reaktivitätsverläufe für die verschiedenen Rechenfälle dargestellt.

Die Ursache für die von Donderer ermittelten hohen Energiefreisetzungen geht insbesondere aus der Tabelle 6.1 und 6.3 für den Fall A6 (dem mit 806 MJ höchstenergetischen) hervor. Der extrem hohe Wert von 806 MJ für das mechanische Arbeitspotential (Fall A6) resultiert aus Fehlern und Inkonsistenzen in der Modellierung und Phänomenologie, welche die oben beschriebenen Codeinstabilitäten auslösen. Korrigiert man die in den Kritikpunkten 1 bis 3 angesprochenen Fehler und Inkonsistenzen, so werden selbst bei Annahme einer extremen willkürlich erzwungenen Kohärenz der Fallbewegungsvorgänge (alle Pinstümpfe in der 2. Kernzone fallen völlig gleichzeitig in totaler Kohärenz zur Kernmitte), Hochsetzen des Partikel-

volumens und zusätzlich inkonsistentem Aufbrechmodell nur Energiefreisetzungen von etwa 100 MJ erreicht (Fall $\tilde{A6}$).

Bei entsprechender Berücksichtigung der sich allein aus der SAS3D Vorrechnung ergebenden Inkohärenz (Der Kern wird durch 10 "Kanäle" simuliert, deren detaillierte physikalische Information beim Übergang von SAS3D auf SIMMER übertragen wird) und bei Verwendung eines konsistenten Modells für das Aufbrechen von Brennstabstümpfen wird die Energetik des Rechenfalles (M1) vernachlässigbar klein.

Auch im Fall B3 resultiert das hohe mechanische Arbeitspotential von 435 MJ aus Fehlern und Inkonsistenzen, die starke Codeinstabilitäten bedingen. Nach Korrektur dieser Fehler und Inkonsistenzen (Fälle $\tilde{B3}$ und M2) ergibt sich ein unenergetischer Verlauf. Die beiden Fälle $\tilde{B3}$ und M2 unterscheiden sich nur dadurch, daß für $\tilde{B3}$ das inkonsistente Brennstab-Aufbrechmodell (siehe Abb. 5.7) von Donderer verwendet wird.

Dies bedeutet, daß die hohen Arbeitspotentiale für die Fälle A6 und B3 nicht durch Extremalannahmen im Rahmen eines Störfallszenarios oder extreme Parameterwahl, sondern vor allem auf durch Fehler und Inkonsistenzen in der Phänomenologie (Nichtberücksichtigung des Ausfrierens von Kernmaterial) und Modellierung (falsche Zuordnung der Orifice-Koeffizienten) zustande kommen, die zu starken Codeinstabilitäten führen.

Tab. 6.1 Rechenläufe zum Fall A6

Modelle und Phänomene	Ausfrieren von Kernmaterial	Zuordnung der Orificekoeffizienten	Codeinstabilität	Brennstab-aufbrechen	Annahme extremer Kohärenz + Hochsetzen des Partikelvolumens	Mechanisches Arbeitspotential [MJ] (Isentrope Expansion auf 70 m ³)
Fall	Kritikpunkt 1	Kritikpunkt 2	Kritikpunkt 3	Kritikpunkt 5	Kritikpunkte 6+7	
A6 aus /1.1/	nicht berücksichtigt	falsch	existent	inkonsistent	ja	806
$\tilde{A6}$	berücksichtigt	richtig	nicht existent	inkonsistent	ja	87
M1	berücksichtigt	richtig	nicht existent	konsistent	nein	0

Tab.: 6.2 Rechenläufe zum Fall B3

Fall \ Modelle und Phänomene	Ausfrieren von Kernmaterial Kritikpunkt 1	Zuordnung der Orificekoeffizienten Kritikpunkt 2	Codeinstabilität Kritikpunkt 3	Brennstab-aufbrechen Kritikpunkt 5	Mechanisches Arbeitspotential [MJ] (Isentrope Expansion auf 70 m ³)
B3 aus /1.1/	nicht berücksichtigt	falsch	existent	inkonsistent	435
B3	berücksichtigt	richtig	nicht existent	inkonsistent	0
M2	berücksichtigt	richtig	nicht existent	konsistent	0

Fall		A6 (Original aus /1.1/)	A6 KfK Nachrechnung	$\tilde{A6}$	M1
Anfangs-Reaktivität (Reaktivitätsminimum)	\$	- 10.8	- 13.5	- 3.0	- 1.5
Rampe bei promptkritisch	\$/s	156	176	42	-
Max. Reaktivität	\$	1.392	1.397	1.132	0.814
Max. Leistung	Watt	$1.164 \cdot 10^{13}$	$1.246 \cdot 10^{13}$	$1.880 \cdot 10^{12}$	$1.26 \cdot 10^{10}$
Max. Brennstoff- temperatur K	K	8121	8225	5374	3620
Mechanisches Arbeits- potential (isentropie Expansion auf 70 m^3)	MJ	806	830	87	0

Tab. 6.3 Ergebnisse der Rechnungen zum Fall A6

Fall		B3 (Original aus /1.1/)	B3 KfK Nachrechnung	$\tilde{B3}$	M2
Anfangs-Reaktivität (Reaktivitätsminimum)	\$	- 9.1	- 10.0	- 2.2	- 2.3
Rampe bei promptkritisch	\$/s	114	127	-	-
Max. Reaktivität	\$	1.29	1.28	0.97	0.95
Max. Leistung	Watt	$6.94 \cdot 10^{12}$	$6.69 \cdot 10^{12}$	$6.93 \cdot 10^{10}$	$4.55 \cdot 10^{10}$
Max. Brennstoff- temperatur K	K	7203	7199	3825	3756
Mechanisches Arbeits- potential (isentropie Expansion auf 70 m^3)	MJ	435	415	0	0

Tab. 6.4 Ergebnisse der Rechnungen zum Fall B3

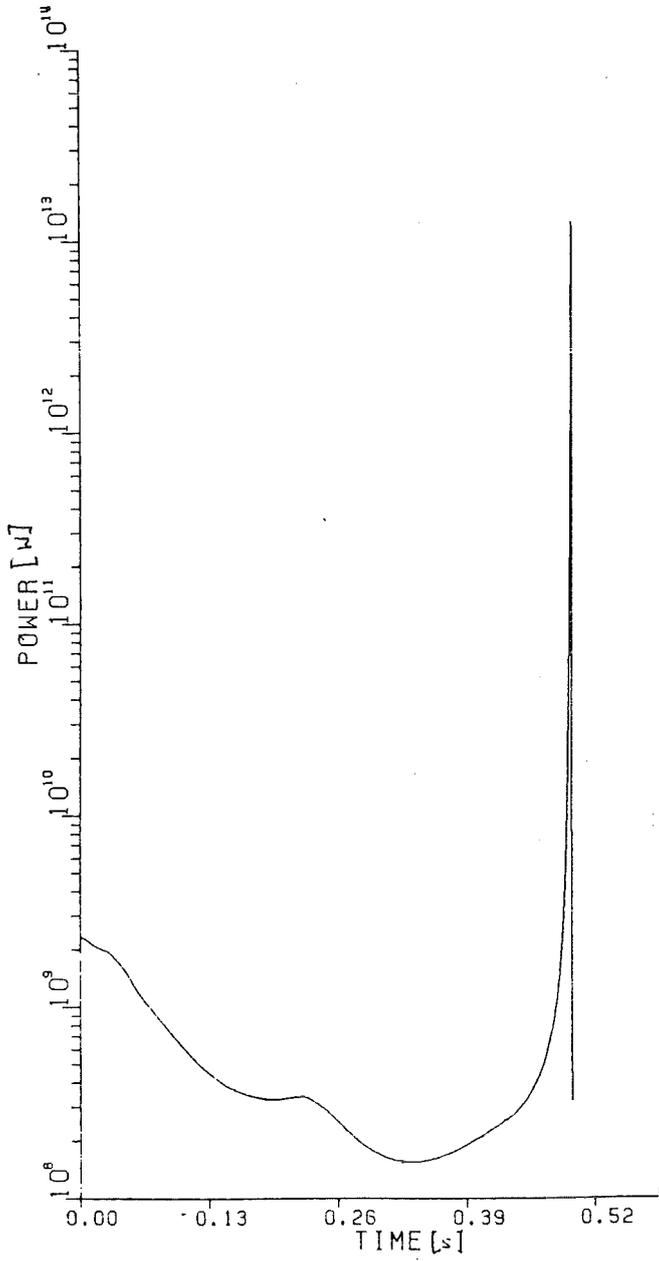


Abb. 6.1 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles A6

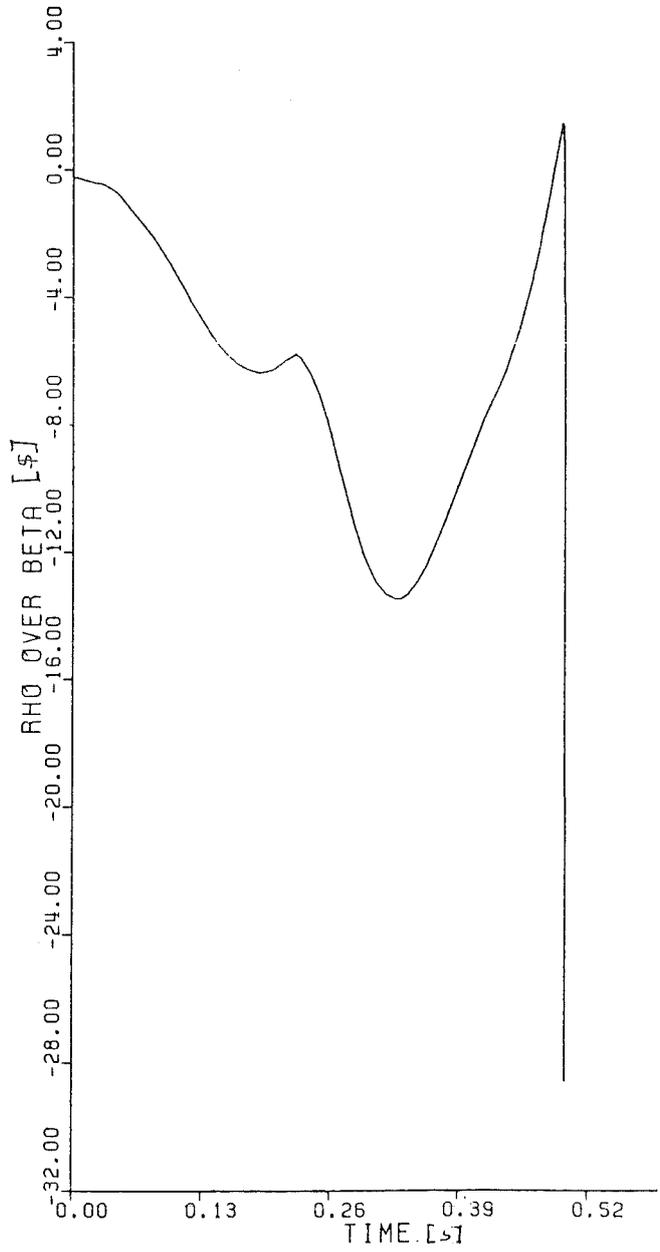


Abb.6.2 Reaktivitätsverlauf des Falles A6

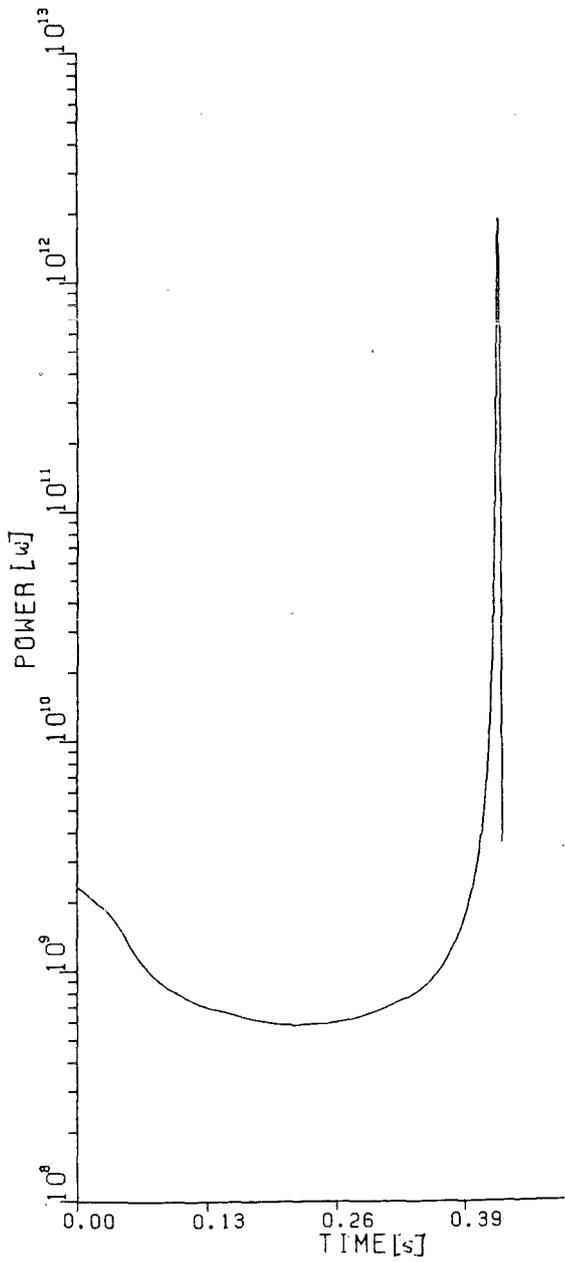


Abb. 6.3 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles \tilde{A}_6

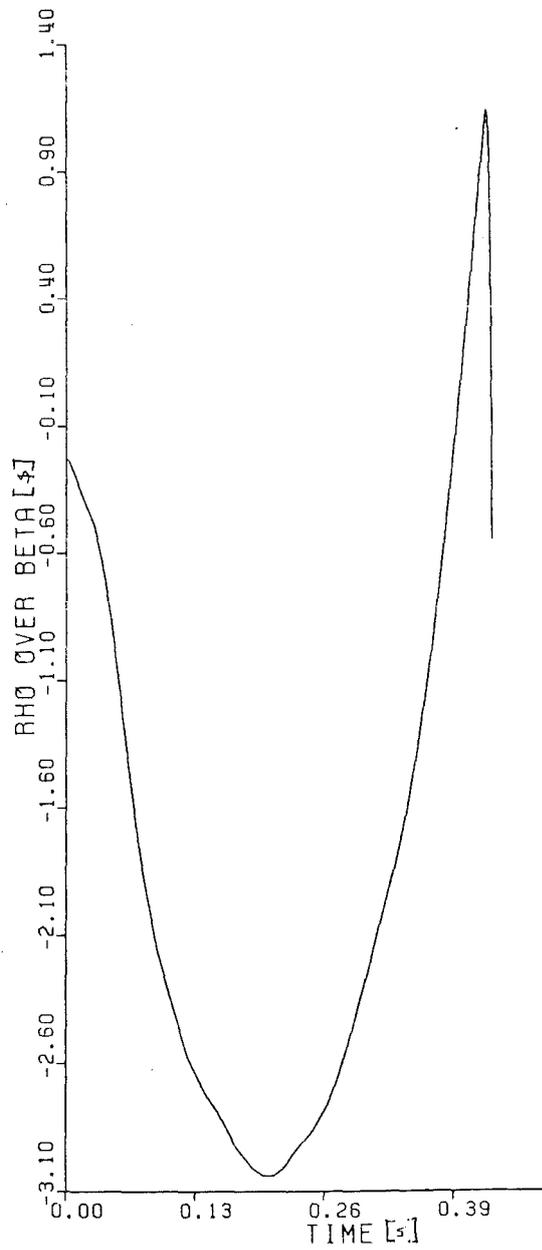


Abb. 6.4 Reaktivitätsverlauf des Falles \tilde{A}_6

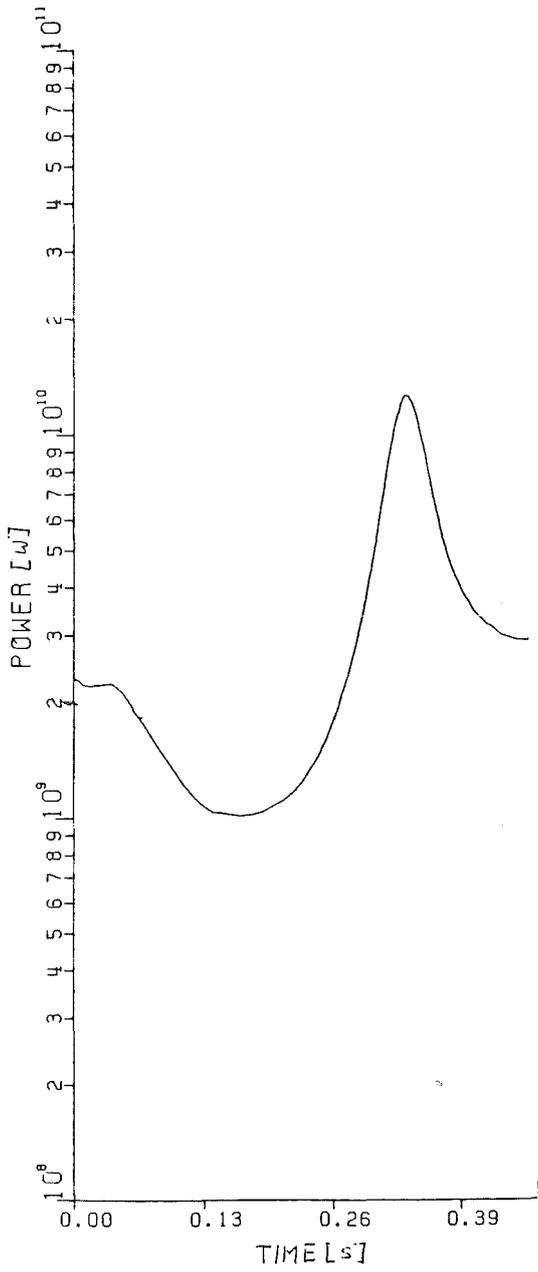


Abb. 6.5 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles M1

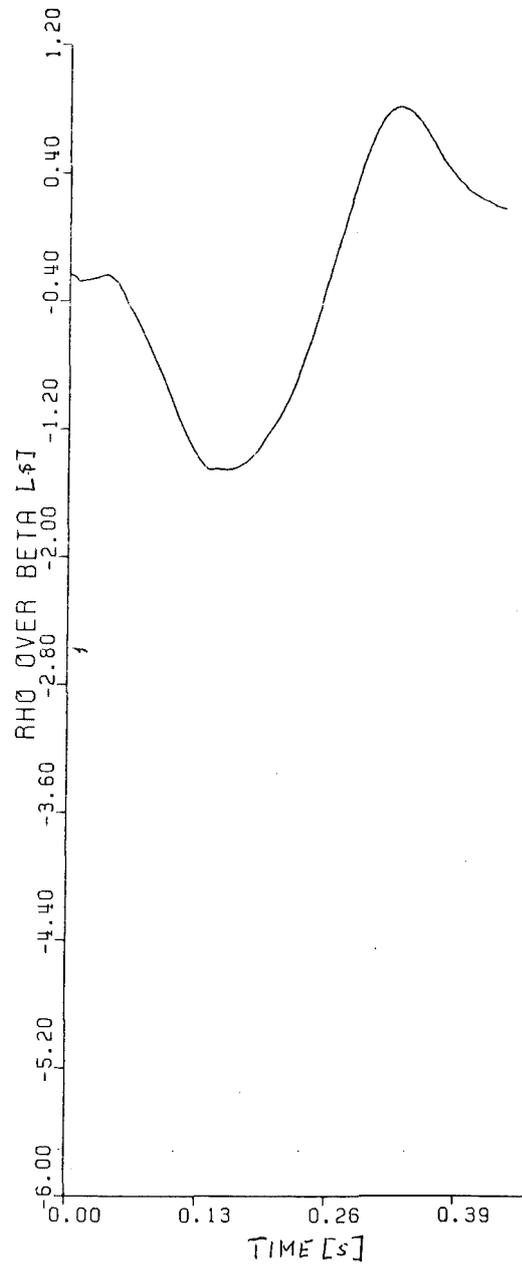


Abb. 6.6 Reaktivitätsverlauf des Falles M1

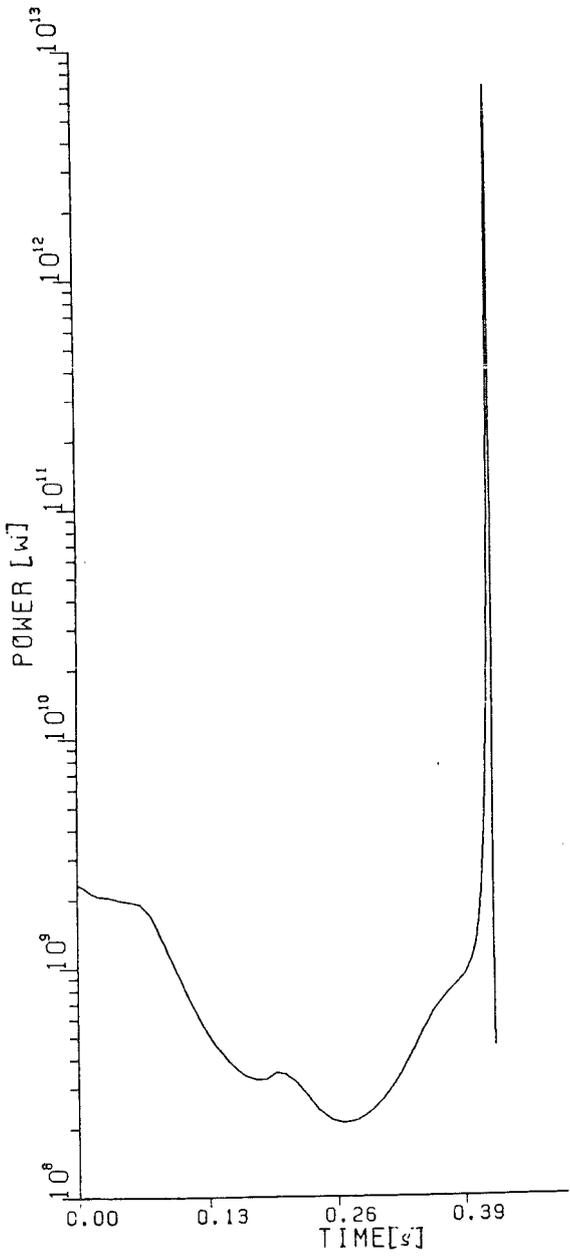


Abb. 6.7 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles B3

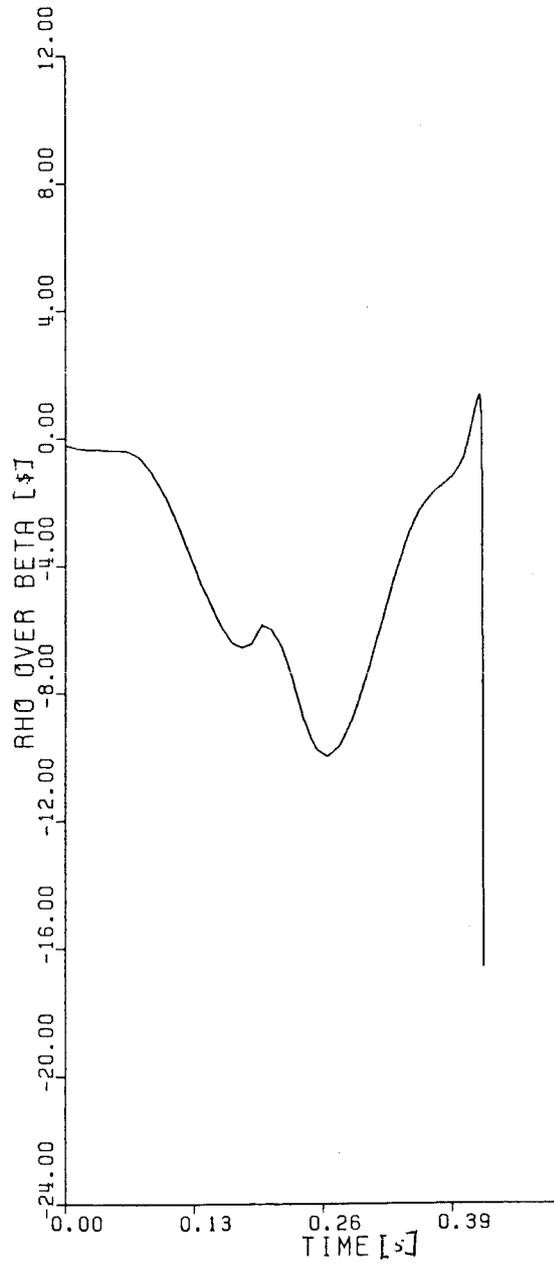


Abb. 6.8 Reaktivitätsverlauf des Falles B3

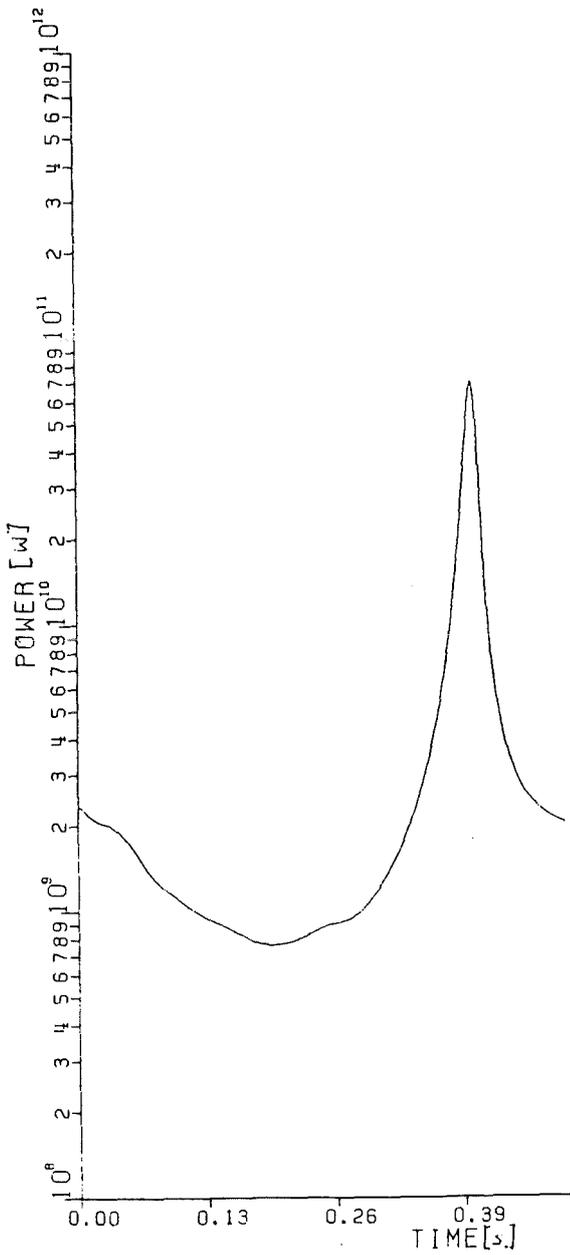


Abb. 6.9 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles B3

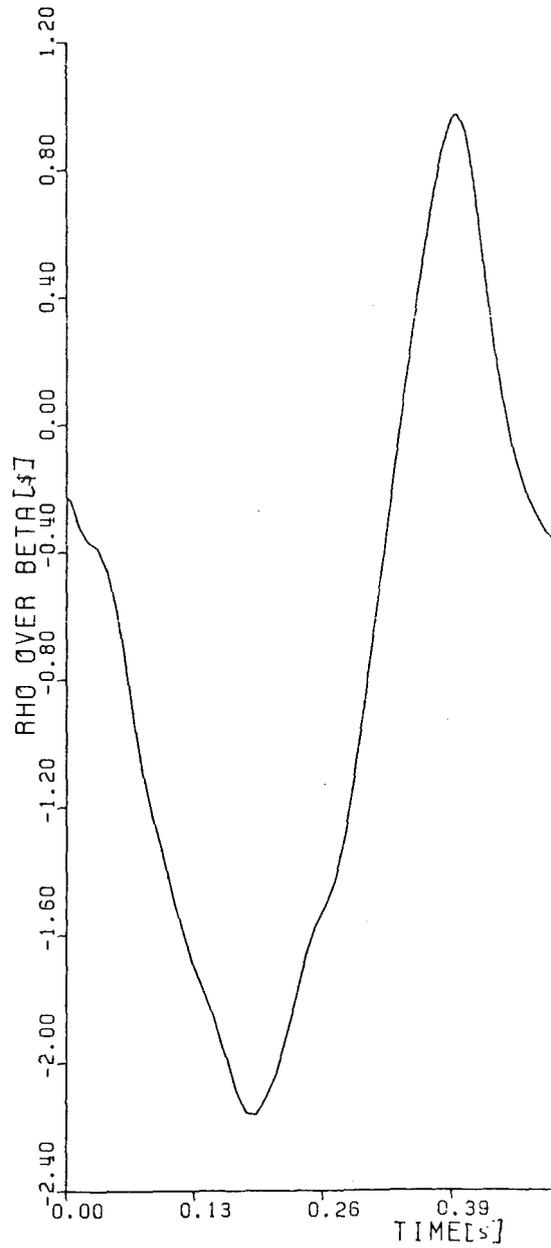


Abb. 6.10 Reaktivitätsverlauf des Falles B3

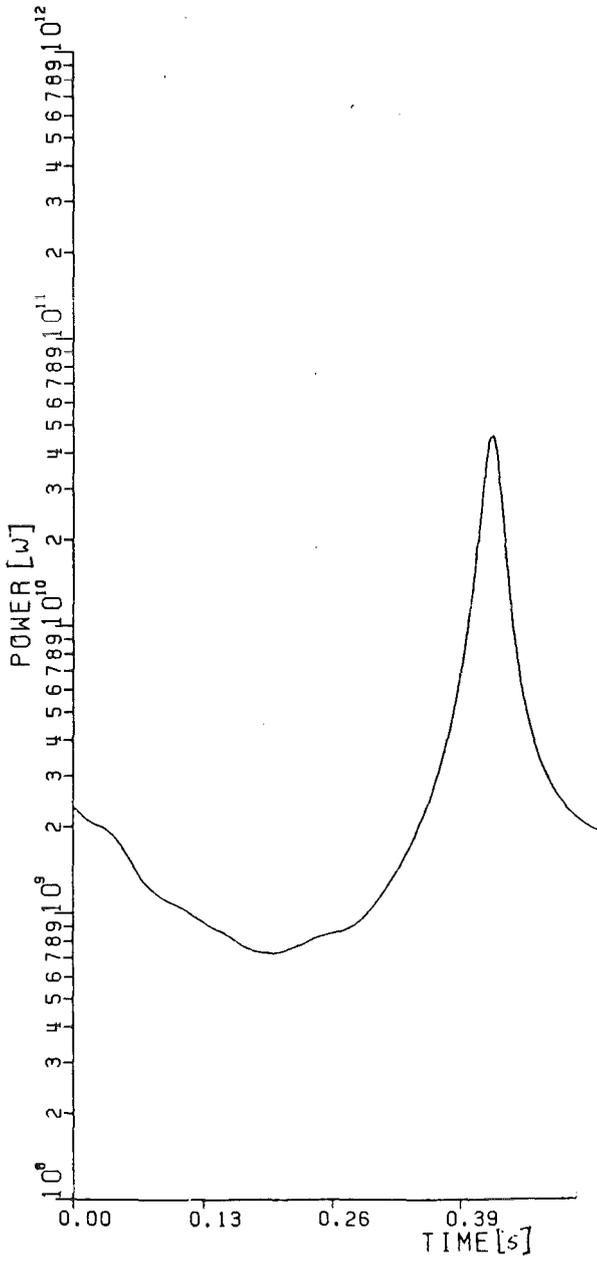


Abb. 6.11 Nuklearer Leistungsverlauf des Falles M2

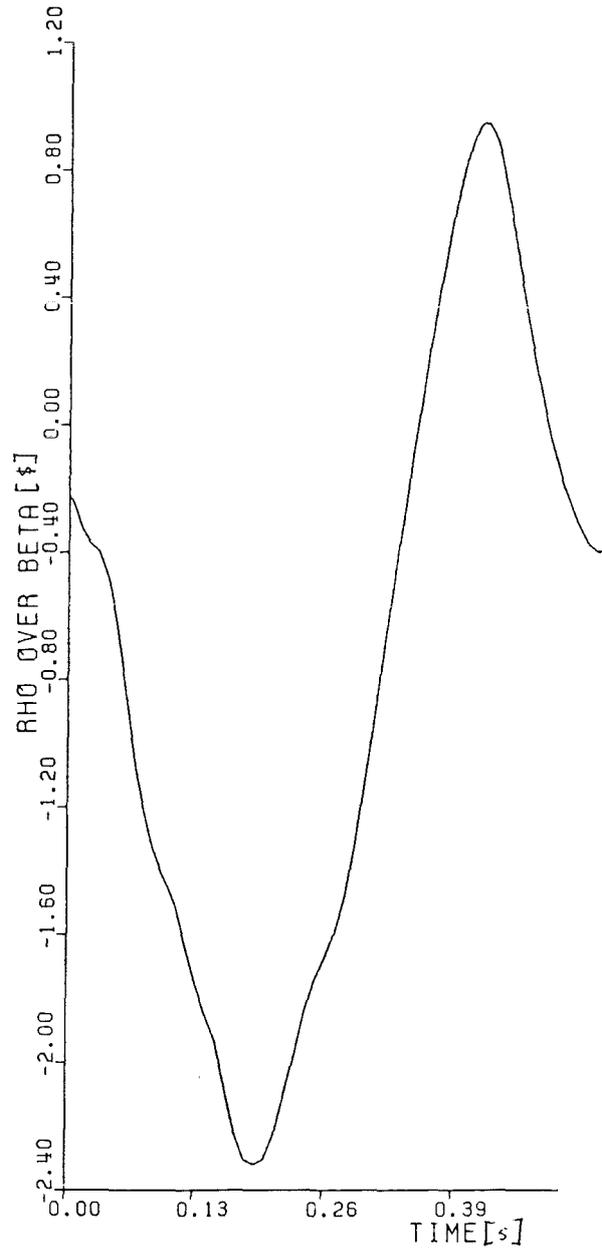


Abb. 6.12 Reaktivitätsverlauf des Falles M2

7) Zusammenfassende Bewertung der SIMMER-Rechnungen von
R. Donderer und Schlußbemerkungen

Die kritische Durchsicht der dargestellten Rechenergebnisse Donderers /1.1/ anhand der im Detail überprüfbaren Fälle A6 und B3 zeigt, daß in den Rechnungen Inkonsistenzen, Fehler und ein durch künstliche Vorgaben aufgeprägter Trend in Richtung zu höheren Energiefreisetzungen enthalten sind. Die von Donderer errechneten extrem hohen mechanischen Arbeitspotentiale ($E_{\text{mech}} > 370 \text{ MJ}$) resultieren nicht daraus, daß im Rahmen der Phänomenologie- oder Parameterunsicherheiten Extremalwerte gewählt wurden. Sie beruhen vielmehr auf Codeinstabilitäten, die ihrerseits durch Fehler und Inkonsistenzen in der Modellierung und Phänomenologie bedingt sind.

In der folgenden Tabelle 7.1 werden nochmals die einzelnen Kritikpunkte aufgelistet und bewertet. In den Rechnungen Donderers sind die einzelnen Fehler und Inkonsistenzen untereinander z. T. gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig, wie dies in Abschnitt 5 dargestellt wurde.

Da allen Fällen A1 bis A7 sowie B1 bis B4 in der Arbeit von Donderer /1.1/ dieselben Mängel zugrunde liegen, sind die Ergebnisse all dieser SIMMER-Rechenfälle aus /1.1/ fragwürdig bzw. falsch. So wird durch eine Art "common mode" Effekt das gesamte Spektrum der Arbeitspotentiale in die hochenergetische Richtung verzerrt. Die Dondererschen SIMMER-Rechnungen können daher das Bild, wie es in der Obergrenzenstudie von KfK /1.3/ sowie in den Risikostudien der KfK /7.1/ und der GRS /1.4/ dargestellt wurde, nicht in Frage stellen.

Tab. 7.1 Kurze Zusammenfassung und Bewertung der Kritikpunkte an den SIMMER-Rechnungen von Donderer

Kritikpunkt Nr.	Beschreibung und Auswirkung der Kritikpunkte	Bewertung
1	<p>Ausfrierverhalten von Kernmaterial wird nicht modelliert.</p> <p>Führt zu falschen und zu tiefen Reaktivitätsniveaus Erhöhung der Störfallenergetik</p>	<p>Experimentell nachgewiesenes Phänomen nicht berücksichtigt</p>
2	<p>Orificekoeffizienten an falscher Stelle simuliert.</p> <p>Führt zusammen mit der Nichtberücksichtigung des Ausfrierverhaltens zu Codeinstabilitäten</p>	<p>Datensatz nicht mit Code in Konsistenz gebracht</p>
3	<p>Instabilität des Codes. Numerische Fehler bei der Druckberechnung beeinflussen Materialbewegung im Kern (Folgefehler von 1+2)</p> <p>Führt zu unphysikalischen Ergebnissen</p>	<p>Numerischer Rechenfehler.</p> <p>Ergebnisse nicht mehr belastbar.</p>
4	<p>Thermische Expansion der Kernmaterialien bei hochenergetischen Exkursionen nicht berücksichtigt.</p> <p>Überschätzung der Störfallenergetik</p>	<p>Inhärent wirksames physikalisches Phänomen nicht berücksichtigt</p>
5	<p>Partikel-, Flüssigkeitsmassen und Temperaturen werden durch gewähltes Brennstabaufbrechmodell inkonsistent berechnet</p> <p>Auswirkung vermutlich nicht sehr erheblich</p>	<p>Inkonsistentes fehlerhaftes Modell</p>

Kritik- punkt Nr.	Beschreibung und Auswirkung der Kritikpunkte	Bewertung
6	Erzwingen einer künstlichen zeitlichen + räumlichen Kohärenz des Herunterfallens von Kern- material Erhöhung der Störfallenergetik (Nur Fall A6)	Künstlicher Eingriff in mechanistischen Code
7	Volumen der Brennstoffpartikel während der Rechnung um den Faktor 1000 vergrößert Erhöhung der Störfallenergetik (Nur Fall A6)	Inkonsistenz durch Eingriff in Code erzwungen

8) Literaturverzeichnis für Teil 1

- /1.1/ R. Donderer
Energetics of Early Transition Phase Recriticalities in the SNR 300,
Fachbereich Physik der Universität Bremen, Report No. 8, Juli 1984
- /1.2/ G. Heusener
Zur Historie der an der Universität Bremen durchgeführten SIMMER-Rech-
nungen,
interner Bericht, Januar 1986
- /1.3/ E.A. Fischer et al.
Kritische Bewertung der Literatur zu hohen Energiefreisetzen bei
hypothetischen Störfällen in natriumgekühlten schnellen Brutreaktoren,
KfK 3366 (1983)
- /1.4/ Risikoorientierte Analyse zum SNR 300,
Bericht GRS-51 (1982)
- /1.5/ P. Royl et al.
Untersuchungen zu Kühlmitteldurchsatzstörfällen im abgebrannten Mark
1A-Kern des KKW Kalkar,
KfK 2845 (1979)
- /1.6/ E. A. Fischer et al.
Bewertung neuer wissenschaftlicher Arbeiten zum Bethe-Tait-Störfall im
Hinblick auf den SNR 300,
PB 01.02.06 P 69A (1985)
- /1.7/ E. A. Fischer et al.
Einleitungsmechanismen für hypothetische Störfälle des SNR 300 und
Relevanz von Schlüsselphänomenen für den Ablauf und die Energiefrei-
setzung schwerer hypothetischer Störfälle unter besonderer Berücksich-
tigung des Standes der experimentellen Validierung,
(Vorlage für die Enquete-Kommission "Zukünftige Kernenergiepolitik des
8. Deutschen Bundestages), März 1980

- /1.8/ W. Maschek, R. Fröhlich
Untersuchungen von Modellfällen für Sekundärkritikalitäten im Kernbereich des SNR 300,
KfK 3320 (1982)
- /1.9/ P. Schmuck et al.
KADIS - Ein Computerprogramm zur Analyse der Kernzerlegungsphase bei hypothetischen Störfällen in schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren,
KfK 2497 (1977)
- /1.10/ L. L. Smith
SIMMER-II: A Computer Program for LMFBR Disrupted Core Analyses,
Bericht NUREG/CR-0453 (1980)
- /1.11/ Brief des KfK vom 4.3.1982 an den damaligen Vorsitzenden der Enquete-Kommission "Zukünftige Kernenergiepolitik"
- /2.1/ W. R. Bohl
Some recriticality studies with SIMMER-II,
Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979,
Vol. III, p. 1415
- /2.2/ L. B. Luck et al.
An Evaluation of the Calculated Results of an Unprotected Transient Undercooling Accident in a Large, Heterogeneous Core LMFBR,
NUREG/CR-3031 (1981)
- /2.3/ W. Maschek, E. A. Fischer, M. W. Asprey
Transition phase and recriticality analyses for a SNR-type homogeneous core with the SIMMER-II code,
Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. III, p. 357
- /2.4/ W. Maschek, M. W. Asprey
SIMMER-II recriticality analyses for a homogeneous core of the 300 MWe class,
Nucl. Technol. 63 (1983) 305

- /2.5/ T. G. Theofanous, C. R. Bell
An Assessment of CRBR Core Disruptive Accident Energetics,
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. I,
p. 4714
- /2.6/ T. G. Theofanous, C. R. Bell
An Assessment of CRBR Core Disruptive Accident Energetics,
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. I,
p. 4714
- /2.7/ S. Kondo, A. Furutani, M. Ishikawa
SIMMER-II application and validation studies in Japan for energetics
accomodation of severe LMFBR accidents,
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. I,
p. 481
- /2.8/ P. Royl, M. Cramer, R. Düsing
Scoping analyses of early recriticalities for hypothetical loss of flow
accidents in SNR-type reactors using the SAS3D-system,
Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. IV, p. 111
- /2.9/ P. Menzenhauer et al.
Out-of-pile simulation of mild TOPs: Development of pin failure, material
movement and relocation in bundle geometry,
Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979,
Vol. IV, p. 2040
- /2.10/ F. Kedziur et al.
Material movement in the bundle region during hypothetical accidents in
FBRs (SIMBATH out-of-pile experiments and code development (CALIPSO)),
Proc. Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. II, p. 409
- /2.11/ W. Pepler et al.
Experimental investigation of material movement and relocation caused
by a simulated loss of flow SIMBATH out-of-pile experiment,
Proc. LMBWG-Meeting, Oct. 23 - 26, Grenoble (1984), Vol. I, p. 445

- /2.12/ D. Struwe et al.
Fuel pin behaviour in power burst experiments performed in CABRI,
Proc. Reactor Safety Aspects of Fuel Behavior, Sun Valley, August 1981,
Vol. II, p. 30
- /2.13/ J. Dadillon et al.
CABRI-Projekt: Recent progress and present status,
Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. II, p. 177
- /2.14/ J. C. Melis et al.
Analysis of the CABRI in-pile experiments,
Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. IV, p. 501
- /2.15/ H. H. Helmick et al.
Recent activities of the Cabri hodoscope,
Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. IV, p. 543
- /2.16/ B.W. Spencer, R.E. Henry et al.
Summary and Evaluation of Reactor Material Fuel Freezing Tests,
Proc. Int. Meeting on Fast Reactor Safety Technology, Seattle 1979,
p. 1766
- /2.17/ R. O. Gauntt, D. A. McArthur et al.
Analysis of the TRAN in-pile fuel freezing penetration experiments,
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. II,
p. 849
- /2.18/ B. W. Spencer, L. J. Wilson et al.
Results of recent reactor material tests on dispersal of oxide from a
disrupted core,
Proc. Int. Topl. Mtg. Fast Reactor Safety, Knoxville, April 1985, Vol. II,
p. 877

- /5.11/ J. Pena et al.
Critical Configurations and Secondary Excursions of High Temperature Fuel/Steel Mixtures,
CONF-761001, Int. Meeting on Fast Reactor Safety, Chicago 1976, p. 1152
- /5.12/ W. R. Stratton, L. B. Engle, D. M. Peterson
Energy Release from Meltdown Accidents,
ANS Transactions 17, 362 (1973)
- /5.13/ Schreiben von R. Donderer an W. Maschek vom 8.5.1984
- /5.14/ E. A. Fischer, W. Maschek
The role of vapor bubble dynamics during energetic power excursions in fast reactor core disruptive accidents,
Nucl. Technol. 71 (1985) 173
- /5.15/ Auslegungsbegründung, Brennelemente der Erstbeladung MK Ia,
IA/BN Common Note No. 403.0265.9
- /7.1/ D. Struwe, P. Roysl, R. Fröhlich
Vessel Failure Event Tree Analysis of SNR300 for a Hypothetical Unprotected Loss of Flow Accident,
Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon 1982, p. 625
- /7.2/ E. A. Fischer, G. Arnecke
Further Development of the LMFBR Accident Analysis Codes Hope and KADIS: Automatic Data Transfer, New Equation of State, (1978)
KfK 2546
- /7.3/ P. Schmuck
An Efficient Method to Improve Flow Representation Across Abrupt Changes of Cross-Sectional Areas,
Nucl. Techn., Vol. 71, pp. 314 (1985)

**Teil II: Stellungnahme und klärende Anmerkungen zu der
Behandlung von Rekritikalitätsereignissen und den
SIMMER-Rechnungen von R. Donderer**

Stellungnahme und klärende Anmerkungen zu der Behandlung von Rekritikalitätsereignissen und den SIMMER-Rechnungen von Herrn Donderer

Bezugnehmend auf die verschiedenen Diskussionen /1,2,3/ zu der Bewertung von Rekritikalitätsereignissen bei einem hypothetischen Störfall - und insbesondere zum Themenkomplex der Rechnungen von Herrn Donderer - möchten wir nochmals eine Stellungnahme dazu abzugeben und einige klärende Anmerkungen machen.

- I) Bei der Einordnung des Ablaufes von Rekritikalitäten und der möglichen Energiefreisetzung von Sekundärexpansionen muß auch das zugrunde gelegte Szenario adäquat berücksichtigt und bewertet werden. Das von Donderer bei seinen SIMMER-Rechnungen /4/ verwendete Szenario - der kohärente Absturz aller Brennstabstümpfe in der 2. Corezone (etwa 15000!!) stellt ein Grenzfallszenario dar und muß auch als solches bewertet werden. Donderer übernahm neben dem Rechencode SIMMER auch die komplette Eingabe hierzu und versuchte darauf aufbauend das KfK-Grenzfallszenario des Falles A /5/ zu simulieren.

Wie schon die KfK-Rekritikalitäts-Analysen für das Genehmigungsverfahren des SNR-300 zeigten, ist bei diesem Szenario ein energetischer Störfallablauf zu erwarten /5/. Die damaligen Analysen mit dem KADIS-Code /6/ führten auf ein mechanisches Arbeitspotential¹⁾ von etwa 70 MJ. Auf der Grundlage des KfK Szenarios traf Donderer im Rahmen seiner SIMMER-Rechnungen einige spezielle Annahmen, die im folgenden nochmals aufgelistet werden.

1) Die mechanische Arbeitspotentiale beziehen sich dabei immer auf die isentrope Expansion des heißen Brennstoff-Zweiphasengemisches auf das Reaktorschutzgasvolumen des SNR300 von 70 m³.

1. Die Brennstabstümpfe am oberen Kernrand bleiben auch nach Hüllrohrschmelzen im gesamten Kern vorerst ununterstützt hängen, um zu einem späteren Zeitpunkt in einer erzwungenen Kohärenz in das Kerninnere zu fallen.
2. Das schon bewegliche Kernmaterial kann sich auch in den kälteren Brutmantelbereichen ungehindert bewegen und bei Rückkehr in den Kern an Kompaktionsprozessen teilnehmen.
3. Zu einem willkürlich gewählten Zeitpunkt brechen alle Brennstabstümpfe (Stalaktiten) in der 2. Corezone gleichzeitig auf und können als Partikelbrocken kohärent in den Kern hineingefallen.
4. Zu demselben Zeitpunkt wird der Radius aller sich in der 2. Corezone befindlichen Festkörperpartikel um den Faktor 10 (Volumen: Faktor 1000) erhöht, um den Fallprozeß zu beschleunigen.

Eine derartige Vorgehensweise mit den vielen ad-hoc Eingriffen wäre bei Verwendung des SIMMER-Codes an sich nicht mehr nötig, da sich mit ihm die gegebene Inkohärenz der Materialbewegung durchaus mechanistisch beschreiben läßt. Wenn aber z.B. die vorhandenen Inkohärenzen bewußt ignoriert werden, oder Partikelradien ohne physikalischen Hintergrund plötzlich vergrößert werden, so sollte das Ergebnis einer solchen Grenzfall-Parameterstudie auch als solches ausgewiesen werden.

II) Zunächst überraschten - trotz der Annahme eines Grenzfallszenarios - die hohen Energiefreisetzungen, die Donderer bei seinen SIMMER Rechnungen erzielte. Diese standen sowohl im Widerspruch zu den von KfK durchgeführten KADIS-Analysen für das Genehmigungsverfahren des SNR 300 /5,7/, aber auch zu den KfK-SIMMER-Analysen, bei denen ein im wesentlichen gleicher Datensatz benutzt wurde /8,9/.

Auch die Ergebnisse der in anderen Laboratorien durchgeführten SIMMER-Analysen etwa im LANL /10,11/ oder bei PNC /12/ standen im Widerspruch zu den Ergebnissen der Rechnungen der Universität Bremen.

In dem KfK-Bericht "Analyse der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer zum SNR 300" /13/ wurde eine genaue Analyse der Rechnungen von Donderer durchgeführt. Diese Analyse ergab, daß bei der Durchführung der SIMMER-

Rechnungen durch Donderer der von KfK übernommene Datensatz verändert, Rechenoptionen ausgeschaltet bzw. inkonsistente Modellannahmen eingebaut, und dadurch zahlreiche Fehler und Inkonsistenzen gemacht wurden.

Die mannigfaltigen Ursachen für die von Donderer ausgewiesenen z.T. recht hohen mechanischen Energiefreisetzen von bis zu 800 MJ wurden in /13/ dargestellt. Bei einer sukzessiven Beseitigung der im folgenden näher spezifizierten Fehler und Inkonsistenzen reduzieren sich schließlich wie ausführlich in /13/ gezeigt, die Energiefreisetzen der Sekundärexkursionen auf $E_{\text{mech}} < 100 \text{ MJ}$.

Eine entscheidende Schlußfolgerung der KfK Analysen war, daß die Ergebnisse der Dondererschen Rechnungen auf numerischen Instabilitäten beruhen, die ihrerseits durch Fehler und Inkonsistenzen in der Modellierung und Phänomenologie bedingt sind.

Zur Erinnerung werden auf der folgenden Seite nochmals alle von KfK aufgezeigten Kritikpunkte an den Dondererschen Rechnungen dargestellt /13/.

Tab. 7.1 Kurze Zusammenfassung und Bewertung der Kritikpunkte an den SIMMER-Rechnungen von Donderer

Kritikpunkt Nr.	Beschreibung und Auswirkung der Kritikpunkte	Bewertung
1	<p>Ausfrierverhalten von Kernmaterial wird nicht modelliert.</p> <p>Führt zu falschen und zu tiefen Reaktivitätsniveaus Erhöhung der Störfallenergetik</p>	<p>Experimentell nachgewiesenes Phänomen nicht berücksichtigt</p>
2	<p>Orificekoeffizienten an falscher Stelle simuliert.</p> <p>Führt zusammen mit der Nichtberücksichtigung des Ausfrierverhaltens zu Codeinstabilitäten</p>	<p>Datensatz nicht mit Code in Konsistenz gebracht</p>
3	<p>Instabilität des Codes. Numerische Fehler bei der Druckberechnung beeinflussen Materialbewegung im Kern (Folgefehler von 1+2)</p> <p>Führt zu unphysikalischen Ergebnissen</p>	<p>Numerischer Rechenfehler.</p> <p>Ergebnisse nicht mehr belastbar.</p>
4	<p>Thermische Expansion der Kernmaterialien bei hochenergetischen Exkursionen nicht berücksichtigt.</p> <p>Überschätzung der Störfallenergetik</p>	<p>Inhärent wirksames physikalisches Phänomen nicht berücksichtigt</p>
5	<p>Partikel-, Flüssigkeitsmassen und Temperaturen werden durch gewähltes Brennstabaufbrechmodell inkonsistent berechnet</p> <p>Auswirkung vermutlich nicht sehr erheblich</p>	<p>Inkonsistentes fehlerhaftes Modell</p>

Kritik- punkt Nr.	Beschreibung und Auswirkung der Kritikpunkte	Bewertung
6	Erzwingen einer künstlichen zeitlichen + räumlichen Kohärenz des Herunterfallens von Kern- material Erhöhung der Störfallenergetik (Nur Fall A6)	Künstlicher Eingriff in mechanistischen Code
7	Volumen der Brennstoffpartikel während der Rechnung um den Faktor 1000 vergrößert Erhöhung der Störfallenergetik (Nur Fall A6)	Inkonsistenz durch Eingriff in Code erzungen

Zusätzlich zu den in Tab.7.1 spezifizierten Kritikpunkten wies die GRS auf einen Fehler in SIMMER hin, der die Berechnung der hydrostatischen Drücke betraf. Dieser Fehler kann unter den bei den Bremer Rechnungen spezifizierten Randbedingungen (siehe vor allem Kritikpunkte 1-3) den Störfallablauf wesentlich beeinflussen, dadurch daß der Natriumspiegel unter dem Kern künstlich abgesenkt wird und dadurch die Natriumdampfmengen im Kern beeinflußt werden. Wie auf dem Fachgespräch am 12.12.1986 bei der Genehmigungsbehörde dargestellt, ist der Einfluß dieses Fehlers auf die von KfK präsentierten SIMMER-Rechenfälle jedoch gering /1/.

Außerdem übte GRS an dem für die SIMMER-Rechnungen benutzten Datensatz (siehe dazu auch weiter unten) Kritik, daß dieser wegen der darin modellierten scharfen Grenzflächen zu Sensitivitäten neige. Es wird ausdrücklich hervorgehoben, daß bei der KfK-Vorgehensweise (Ankopplung an das Szenario und überlappende Rechnung mit SAS3D, Modellierung des Ausfrierverhaltens von Kernmaterialien, Berücksichtigung von Drosseln in den Brennelementfüßen etc.) diese Sensitivitäten nicht auftreten.

Eine Sensitivität in den Donderer'schen Rechnungen bzgl. der Grenzflächen ist dadurch bedingt, daß die Bewegungsrichtung der Brennstoff/Stahlgrenzen bzw. Natriumgrenzflächen im unteren Brutmantel vorerst nicht eindeutig festliegt, und es je nach unterschiedlicher Bewegungsrichtung zu geänderten Verdampfungsprozessen beim Kontakt der Flüssigkeiten kommt.

Durch die weiter oben beschriebene KfK-Vorgehensweise ist aber diese Bewegungsrichtung für die KfK-SIMMER-Rechnungen auf Grund der SAS3D Vorrechnung, d.h. auf Grund konkreter physikalischer Vorgänge definiert und die Beliebigkeit bzgl. der Flüssigkeitsbewegungsrichtung existiert nicht mehr.

Zu beachten ist, daß diese durch die Grenzflächen bedingten Sensitivitäten auch in den Dondererschen Rechnungen bei weitem durch die vorher besprochenen numerischen Effekte und Instabilitäten dominiert werden. Die in Abb.1 zu sehenden Druckoszillationen in den Dondererschen Rechnungen sind also nicht durch Grenzflächensensitivitäten bestimmt.

III. Die in Donderers Rechnungen auftretenden extremen Sensitivitäten und Instabilitäten sind durch dessen Umgang mit dem Code und dem Datensatz bedingt. Die Nichtberücksichtigung jeglicher Ausfriervorgänge im unteren Kernbereich (Kritikpunkt 1) und die gleichzeitige Nichterfassung der irreversiblen Druckverluste im unteren Brennelement (Kritikpunkt 2) führen in der SIMMER-Simulation zu einer unrealistisch hohen Durchlässigkeit der unteren Strukturen. Durch den von der GRS entdeckten SIMMER-Fehler bei der Berechnung der hydrostatischen Drücke wird zudem noch ein künstlicher Bewegungsimpuls erzeugt, der eine zusätzliche starke Natriumbewegung auslöst. Im SIMMER-Code können unter solchen Bedingungen - große Beschleunigungen, hohe Geschwindigkeiten in Geometrien mit plötzlichen Querschnittsänderungen - numerische Schwierigkeiten auftreten. Diese äußern sich in Druckfehlberechnungen (Drucklöchern und extremen Druckoszillationen) welche den Code instabil machen /13/.

Daß es sich bei den Ergebnissen der Dondererschen SIMMER-Rechnungen um numerische Effekte handelt, kann bei aufmerksamem Lesen auch aus seiner Arbeit selbst /4/ ersehen werden:

In den dort dargestellten Rechenfällen A2 und A6 (siehe dortige Tabelle 1) beruhen die Unterschiede in den mechanischen Energiefreisetzungen von 322 MJ und 806 MJ ausschließlich auf numerische Sensitivitäten. Diese führen zu unterschiedlichen Anfangsreaktivitätswerten beim Auslösen der Exkursion nach ~ 0.33 sec während des Rechenlaufs. Beide Rechnungen A2 und A6 starten dabei jedoch von völlig identischen Anfangsbedingungen. Donderer führt dies zwar zunächst auf reine Zeitschritt sensitivitäten zurück, interpretiert dann aber trotzdem einen physikalischen Hintergrund in diesen Sachverhalt hinein (siehe Seite 6 in /4/ und Text weiter unten).

Beim Vergleich des Protokolls /2/ über das Fachgespräch am 17.01.1986 (Seite 5) und dem Text in Donderers Arbeit /4/ (Seite 8) ergeben sich zum Problem der Druckverläufe und Druckschwankungen im Rechenfall A6 bemerkenswert widersprüchliche Aussagen.

Protokoll /2/:

" Das KfK sieht in den Druckschwankungen, die in ihren eigenen Vergleichsrechnungen zeitweise auch zu sehr niedrigen oder gar negativen Drücken führten, eine wesentliche Ursache für die kohärente reaktivitätserhöhende Abwärtsbewegung von Brennstoff in Donderers Rechnungen. Donderer zeigt jedoch anhand der von ihm vorgelegten Abbildungen, daß dies bei seinen Rechnungen nicht zutrefte, weil sich die Druckschwankungen nicht bis in die Brennstoffbereiche hinein fortsetzen" 1)

Dazu aus /4/:

"In contrast to Cases A2, A3 and A4, where free-fall is approximately reached, the A5 and A6 Cases show accelerated stump entry. This results from a sodium-vapor pressure-collapse at the lower core boundary in Channel 8".

Wenig hilfreich bei diesem Sachverhalt ist auch, daß in dem Originalpapier von Donderer /4/ die "Kanäle" 8 und 9 als entscheidend für den Störfallablauf und die Energetik bezeichnet werden (siehe Seite 8 in /4/) - in seinen vorgelegten Abbildungen aber ausschließlich Kanal 1 dargestellt wurde. Zusätzlich wird der Kanal 1 noch in logarithmischer Darstellung angegeben und dadurch werden etwaige negative Drücke automatisch eliminiert.

Die im Protokoll /2/ zitierten Donderer Aussagen und Hinweise auf seine vorgelegten Abbildungen entkräften in keiner Weise die im Protokoll /2/ zitierten KfK-Aussagen, sondern die obengenannten Zitatstelle aus Donderers Arbeit /4/ bestätigt diese KfK Aussage.

1) Anmerkung: Für die Materialbeschleunigungen sind natürlich die axialen Druckgradienten verantwortlich.

- IV. Auf Grund der Tatsache, daß es sich bei den Rechenergebnissen Donderers um rein numerisch bedingte "Scheinergebnisse" handelt, können diese Resultate natürlich nicht als Maßstab für Sensitivitäten bezüglich Eingabegrößen oder Kenngrößen des Reaktors dienen. Eine solche Sensitivität wird an verschiedenen Stellen in /2/ und /3/ befürchtet.

So wird zwar durch realistische Berücksichtigung der Brennelementdrosseln in den GRS Rechenfällen /15/ die Energiefreisetzung von 800 MJ auf 130 MJ reduziert. Daraus kann aber nicht der Umkehrschluß gezogen werden, daß diese Drosseln in der Realität einen extrem großen Einfluß auf den Störfallablauf haben, da diese 800 MJ mit einem instabilen Rechenverfahren ermittelt wurden. Es verbietet sich also, die Problematik von Rekritikalitäten (hier im speziellen der frühen Übergangsphase) und den Einfluß von Parametern und Kenngrößen des Kerns auf SIMMER Ergebnisse aus der sehr beschränkten Sichtweise der Dondererschen Szenarien und fehlerhaften Rechnungen beurteilen zu wollen.

- V. Wie schon auf dem Fachgespräch am 12.12.86 dargestellt, wurde und wird bei KfK daran gearbeitet, die im SIMMER Code entdeckten Unzulänglichkeiten bzgl. der Fluidodynamik. (Fehlerhafte Berechnung der Druckänderung bei der Durchströmung von Querschnittsänderungen) und Fluidstatik (Fehlerhafte Berechnung der hydrostatische Drücke an Querschnittsänderungen) zu beseitigen.

Dafür wurden die im SIMMER vorhandenen Differenzenformeln neu überarbeitet und so geändert, daß sowohl die Beschreibung des Strömungsverhaltens an plötzlichen Querschnittsänderungen (numerische Kavitationsproblematik) als auch die des hydrostatischen Druckverhaltens korrigiert wurden /17,18/. Die neuen Verfahren wurden an einfachen Testbeispielen überprüft und befinden sich z.Z. in einer erweiterten Erprobungsphase wobei neben der Genauigkeit auch Fragen der Stabilität und Effektivität untersucht werden.

Außerdem wurde nochmals das Auftreten erratischer Druckoszillationen und Druckzusammenbrüche, wie sie in den Dondererschen Rechnungen beobachtet wurden, näher untersucht. Es lassen sich diese bei Analyse der Druckiteration von SIMMER als rein numerische Effekte nachweisen. Unter bestimmten Bedingungen können beim Phasenwechsel auch negative Drücke auftreten, die durch die Druckiteration nicht abgefangen werden (siehe dazu auch Abb.1).

Als interessantes integrales Testbeispiel für das neue Differenzenschema bot sich der von Donderer definierte Fall A6 mit allen seinen fehlerhaften Annahmen an. Auch in dieser Testrechnung werden keine Drosselkoeffizienten in den BE-Füßen simuliert und ebenso kein Ausfrierverhalten von Kernmaterial etc.

In den Abb.1 und Abb.2 sind die Druckverläufe für den Fall A6 im Brennelementfuß dargestellt. Die Abb.1 wurde dabei von GRS /14/ übernommen - um aufzuzeigen, daß sich diese extremen Druckverhältnisse nicht nur bei den KfK-Nachrechnungen des Donderer-Falles A6 ergaben (siehe /13/).

Aus den Abbildungen werden die unterschiedlichen Druckverläufe sehr augenscheinlich, die sich bei Verwendung des alten bzw. neuen Differenzschemas ergeben. In den Abbildungen werden dabei die Druckverläufe an denselben örtlichen Positionen dargestellt.

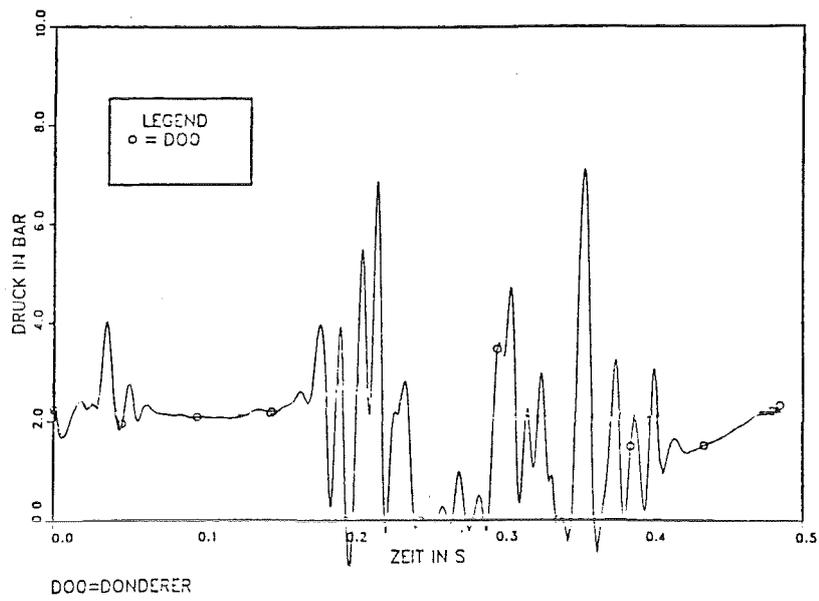


Abb.1: Druck im unteren Brennelementteil in Brennelementreihe 1 (GRS-Rechnungen)
DOO Donderer Fall A6 ohne Drosseln in den BE-Füßen

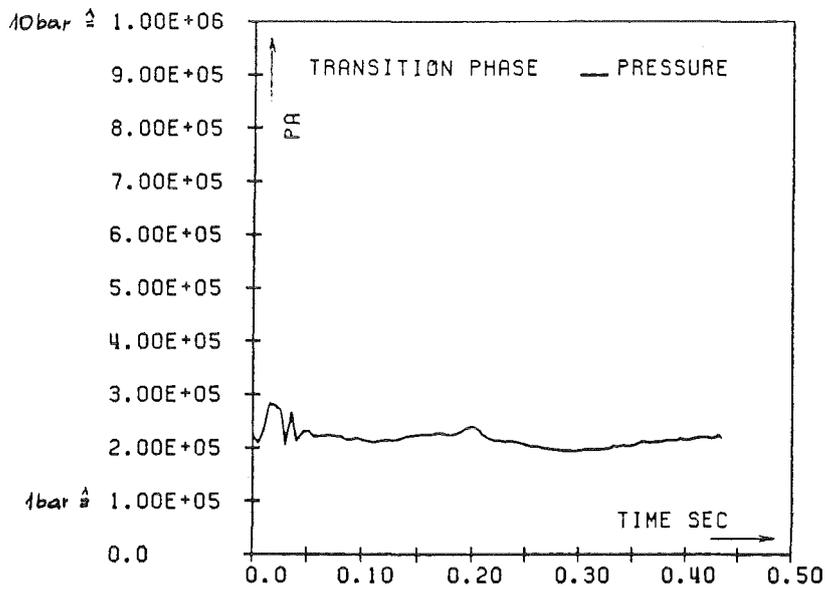


Abb.2: Druck im unteren Brennelementteil in Brennelementreihe 1 bei Verwendung des verbesserten Differenzschemas (Fall A6)

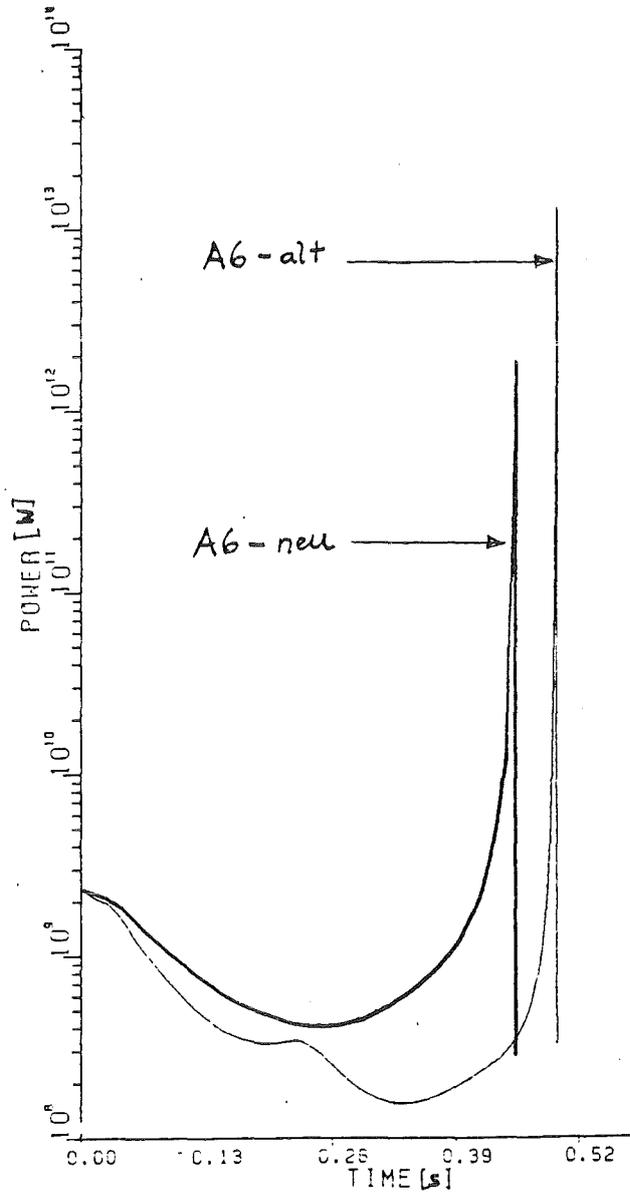


Abb.3: Nuklearer Leistungsverlauf des Falles A6
A6-alt: alte Differenzschemata
A6-neu: neue verbesserte Differenzschemata

Die Durchrechnung des Falles A6 mit dem neuen stabileren Differenzenverfahren in SIMMER ergab eine Leistungsexkursion mit einem mechanischen Arbeitspotential von ~ 80 MJ ^{1,2}. Dies ist zu vergleichen mit dem ursprünglich von Donderer berechneten Wert von 800 MJ. Die Leistungsverläufe der beiden Exkursionsrechnungen sind in Abb.3 dargestellt. In der obigen Rechnung stecken alle fehlerhaften Annahmen - es wurden lediglich durch die Verwendung des neuen Differenzenverfahrens die numerischen Instabilitäten vermieden.

Die mechanische Energiefreisetzung liegt bei dieser Rechnung in dem Bereich der für dieses Szenario schon im Rahmen der KfK-Analysen zu den Donderer Rechnungen genannt wurde (siehe Fall A6[~] /13/. Emech=87 MJ). Im Fall A6[~] wurde das Ausfrieren von Kernmaterial und Drosselkoeffizienten berücksichtigt, jedoch alle sonstigen fehlerhaften Annahmen und Inkonsistenzen der Bremer Rechnung übernommen .

Rechnet man diesen Fall A6[~] mit dem neuen Differenzverfahren durch, so ergibt sich ein Wert für das mechanische Arbeitspotential Emech von etwa 60 MJ.

Schließlich soll auch nochmals auf den schon 1978 für das Genehmigungsverfahren berechneten Wert des mechanischen Arbeitspotentials für dieses Störfallszenario (damals mit dem KADIS Code berechnet) von 79 MJ hingewiesen werden /5/.

1. Die mit der isentropen Expansion berechneten Arbeitspotentiale selbst stellen wiederum obere Abschätzungen dar. Würde man mit SIMMER etwa konsistent die mechanischen Energiefreisetzungen berechnen, so würde sich nochmals eine erhebliche Reduktion in diesen Werten ergeben /16/. Auch dieses Faktum muß bei der Bewertung der Energetik in Rechnung gestellt werden.
2. Bei einer Halbierung des Zeitschrittes ändert sich dieses Arbeitspotential auf 90 MJ. Auch hierbei zeigt sich die Stabilität des neuen Verfahrens gegenüber Zeitschrittvariationen.

VI. Diese Ergebnisse unterstreichen nochmals die schon in /13/ von KfK gemachte Aussage, daß die Ergebnisse der Dondererschen Rechnungen auf numerischen Instabilitäten beruhen, die ihrerseits durch Fehler und Inkonsistenzen in der Modellierung und Phänomenologie bedingt sind. Die bei den Dondererschen Rechnungen auftretenden scheinbaren Sensitivitäten bezüglich peripherer Kenndaten sind dadurch ebenso rein künstlicher Natur.

Literaturverzeichnis für Teil 2

- /1/ Fachgespräch im MWMT des Landes Nordrhein-Westfalen am 12.12.86
- /2/ Ergebnisprotokoll und Anlagen zum Fachgespräch vom 17.01.86 beim MWMT über die SIMMER-Rechnungen R. Donderers zum SNR-300 (verteilt am 10.12.86)
- /3/ Anmerkungen der atomrechtlichen Genehmigungsbehörde zur GRS Stellungnahme "Bewertung der Rechnungen von R. Donderer" vom Mai 1986 (verteilt am 18.12.86)
- /4/ R. Donderer
Energetics of Early Transition Phase Recriticalities in the SNR 300
Fachbereich Physik der Universität Bremen
Report No. 8, Juli 1984
- /5/ W. Maschek, R. Fröhlich
Untersuchung von Modellfällen für Sekundärkritikalitäten im Kernbereich des SNR 300
KfK 3320 (1982)
- /6/ P. Schmuck et al.
KADIS - Ein Computerprogramm zur Analyse der Kernzerlegungsphase bei hypothetischen Störfällen in Schnellen Natriumgekühlten Brutreaktoren
KfK 2497 (1977)
- /7/ W. Maschek, D. Struwe
Recriticality Considerations and Core Material Distribution in the Reactor Vessel of SNR-300 as Consequence of Unprotected Loss of Flow Transients in the Mark 1A Core, Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979, Vol. III, 721
- /8/ W. Maschek, E.A. Fischer, M.W. Asprey
Transition phase and recriticality analyses for a SNR-type homogeneous core with the SIMMER-II code, Proc. LMFBR Safety Topl. Mtg., Lyon, July 1982, Vol. III, 357
- /9/ W. Maschek, M.W. Asprey
SIMMER-II recriticality analyses for a homogeneous core of the 300 MWe class, Nucl. Technol. 63 (2983) 305

- /10/ W.R. Bohl
Some recriticality studies with SIMMER-II,
Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979,
Vol. III, p. 1415
- /11/ T.G. Theofanous, C.R. Bell
An Assessment of CRBR Core Disruptive Accident Energetics
NUREG/CR-3224 (1984)
- /12/ S. Kondo, A. Furutani, M. Ishikawa
SIMMER-II application and validation studies in Japan for energetics
accomodation of severe LMFBR accidents, Proc. Int. Topl. Mtg. Fast
Reactor Safety, Knoxville,
April 1985, Vol. I, 481
- /13/ W. Maschek, R. Heger
Analyse der SIMMER-Rechnungen von R. Donderer zum SNR 300
(siehe Teil 1)
- /14/ GRS
Stellungnahme zum Verlauf kernzerstörender Unfälle im SNR 300 unter
besonderer Berücksichtigung der von 1982 bis 1985 bekanntgewordenen
Forschungsergebnisse Anhang B -
Bewertung der Rechnungen von R. Donderer Januar 1986
Vorabzug SG 12/1 (1986)
- /15/ GRS
Stellungnahme zum Verlauf kernzerstörender Unfälle im SNR 300 unter
besonderer Berücksichtigung der von 1982 bis 1985 bekanntgewordenen
Forschungsergebnisse Anhang B -
Bewertung der Rechnungen von R. Donderer Mai 1986
Vorabzug SG 12/1 (1986)
- /16/ P. Schmuck
The Postdisassembly Phase in LMFBRs: SIMMER Results and their
Evaluation
Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon (1982), Vol. IV, 67

/17, 18/ J.J. Foit

Analysis of Expansion Phase Experiments with Improved Approximation
Schemes

KfK 4245 (1987)