

KfK 2690
September 1978

**Jahresbericht der Arbeitsgruppe
Brennstab- und
Brennelementmechanik des
Instituts für Reaktortechnik (IRT)
der TH Darmstadt für das
Projekt Schneller Brüter**

H. Fabian, W. Humbach, K. Laßmann,
J. J. Müller, T. Preußner, K. Schmelz

Kernforschungszentrum Karlsruhe

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Projekt Schneller Brüter

KfK 2690

Jahresbericht der Arbeitsgruppe Brennstab-
und Brennelementmechanik des Instituts für Reaktortechnik (IRT)
der Technischen Hochschule Darmstadt

für das Projekt Schneller Brüter

H.Fabian, W.Humbach, K.Laßmann, J.J.Müller,
T.Preußner, K.Schmelz

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Auftrage
des Projekts Schneller Brüter durchgeführt.

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht gibt sechs Einzelvorträge wieder, die im Rahmen eines Informationstages vom Institut für Reaktortechnik der Technischen Hochschule Darmstadt (IRT) am 24.4.1978 in Darmstadt gehalten wurden. Die Vorträge stellen einen Rechenschaftsbericht über die im IRT durchgeführten Arbeiten zur Brennstab- und Brennelementmechanik dar, die vom Projekt Schneller Brüter (PSB) des KfK gefördert werden.

Diese Arbeiten können in Untersuchungen zum integralen Brennstab (Rechenprogramm URANUS) und in mehrdimensionale Untersuchungen zum Brennstab mit Hilfe der Finit-Element-Methode (Rechenprogramme FINEL und ZIDRIG) eingeteilt werden. Zusätzlich wird über den Stand der Versuchsanlage zur Simulation von out-of-pile Hüllrohrbelastungen sowie über das IRT-Projekt zur Simulation und Analyse von Strahlenschäden berichtet.

Im Anschluß an diese Vorträge fand jeweils eine Diskussion statt, die mit freundlicher Genehmigung der Diskussionsteilnehmer wiedergegeben wird.

Status report of Darmstadt fuel pin working group

Summary

This report comprises six single lectures given at an information meeting organized by the Institut für Reaktortechnik der Technischen Hochschule Darmstadt (IRT) in Darmstadt on April 24, 1978. The lectures are an account of work performed at IRT on the mechanics of fuel pins and fuel elements and supported by the Fast Breeder Project (PSB) of KfK.

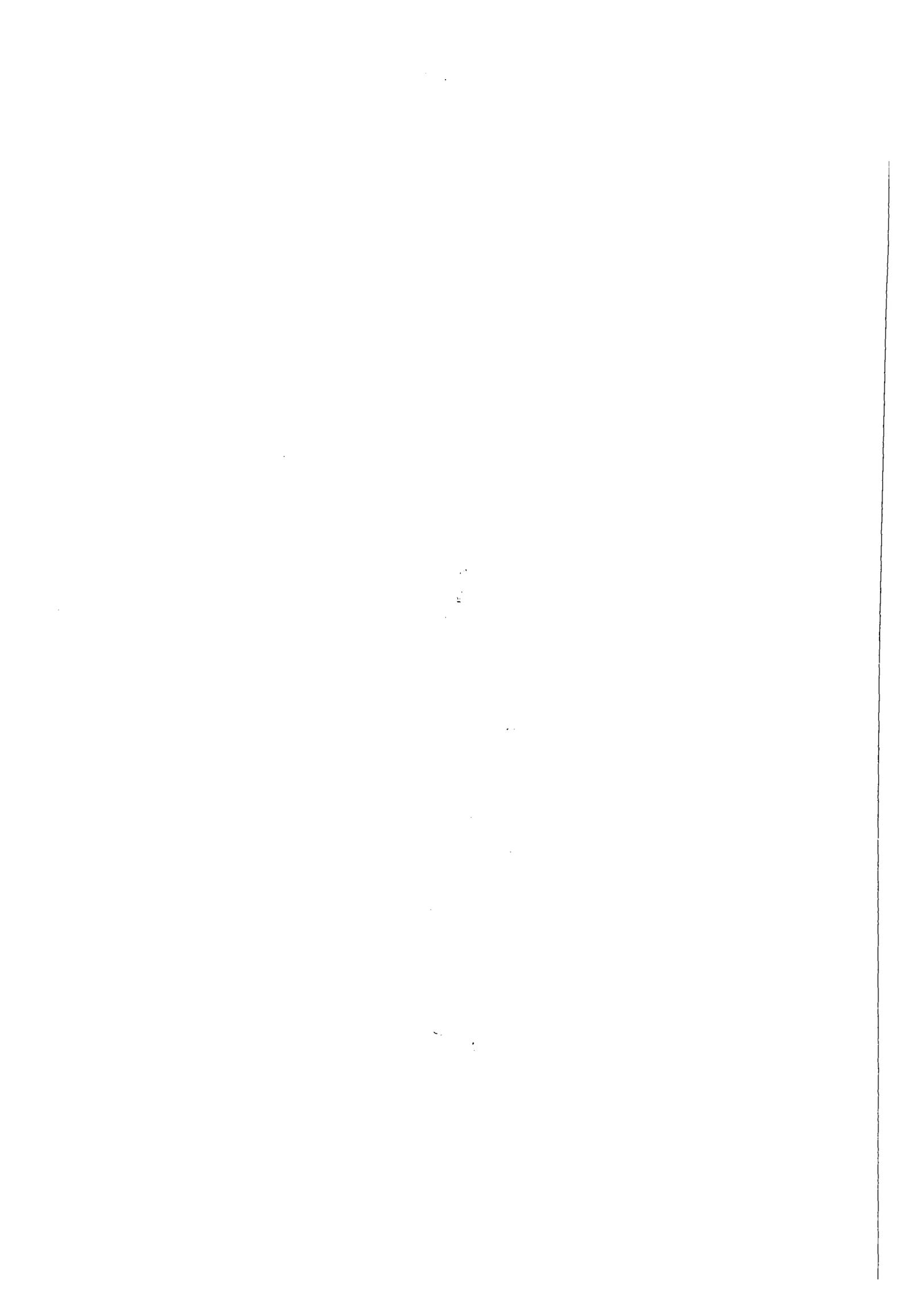
These activities can be broken down into studies of the integral fuel pin (URANUS computer code) and into multidimensional studies of the fuel pin using the finite-element method (FINEL and ZIDRIG computer codes). Moreover, a report is presented of the status of the test facility for simulation of out-of-pile cladding tube loads and of the IRT project on the simulation and analysis of radiation damage.

Each of the lectures was followed by a discussion the wording of which is reproduced by courtesy of the persons participating in it.



I n h a l t

	Seite
Prof. Dr. W. Humbach	
Begrüßung	1
Dr.-Ing. K. Laßmann	7
Vortrag: Stand und Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS	
Diskussionsbeiträge zum Vortrag	34
Dipl.-Ing. H. Fabian	38
Vortrag: Mehrdimensionale Berechnung des Brennstabes nach der Finit-Element- Methode	
Dipl.-Ing. T. Preußner	62
Vortrag: Die Modelle zum Werkstoffverhalten im URANUS-Rechenprogramm, dargestellt am Beispiel der Brennstoffnachver- dichtung	
Diskussionsbeiträge zum Vortrag	77
Dipl.-Ing. H.-J. Müller	
Vortrag: Stand der Versuchsanlage zur Simulation von out-of-pile Hüllrohrbelastungen	82
Diskussionsbeiträge zum Vortrag	89
Dipl.-Phys. K. Schmelz	
Vortrag: Darstellung des Projektes zur Simulation von Strahlenschäden	93



Begrüßungsrede von Herrn Prof. Dr. W. Humbach anlässlich des
Statusberichtes des IRT am 24.4.1978

Meine Herren, ich darf Sie herzlich begrüßen.

Wir freuen uns ganz besonders über die Resonanz, die unsere Einladung gefunden hat, denn wir durften nicht hoffen, daß so viele Gäste zu uns kommen würden; ich darf begrüßen die Herren vom Kernforschungszentrum Karlsruhe, von EURATOM/Karlsruhe, die Herren der KWU, von INTERATOM und von BBR. Insgesamt betrachtet, freuen wir uns über das hochkarätige Publikum, das zu uns gekommen ist. Das Vortragsprogramm für den Vormittag liegt Ihnen vor, am Nachmittag möchten wir Ihnen im Rahmen einer Besichtigung zeigen, was an experimentellen Möglichkeiten vorhanden ist und welche Möglichkeiten im Prinzip gegeben sind.

Mit Rücksicht darauf, daß nicht nur alte Bekannte zu uns gekommen sind, möchte ich in einer kurzen Einführung ein paar Worte zur Geschichte dieses Institutes sagen. Es entstand vor 17 Jahren praktisch vom Stande Null aus, nämlich in einer Baracke. Umgezogen in dieses neue Gelände sind wir mit den Büros 1972, mit der Werkstätte und der Halle im Lauf des vergangenen Herbstes. Eine Grotteske am Rande: das Genehmigungsverfahren für den Umzug des Reaktors hat von 1972 bis 1978 gedauert.

Was haben wir in diesem Institut betrieben? Bei den Mitteln, die uns zu Beginn zur Verfügung standen, und bei der allgemeinen Konkurrenzlage auf dem wissenschaftlichen Gebiet, haben wir uns auf Randgebiete des damaligen Interesses beschränkt. Mit Hilfe des Unterrichtsreaktors haben wir Untersuchungen gemacht zur Ausmessung von Natururan - Leichtwassergittern, dann experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Neutronenstatistik - das war damals ein aktuelles Gebiet, auf dem man auch mit geringen Mitteln etwas leisten konnte. Erstaunlicherweise konnten wir erstmals das Fermi-Alter verzögerter Neutronen messen; Sie wissen, welche Mittel in der Neutronenphysik üblicherweise für konkurrenzfähige Messungen eingesetzt werden müssen. Mit dem Abschluß dieser Arbeiten, die durchweg zu Dissertationen geführt haben, hat sich aber auch das Ende dessen abgezeichnet, was ich 'autonome Forschung' nennen möchte, das heißt, Forschung, die wir mit unseren eigenen Mitteln betreiben können. Etwa ab 1969 haben wir uns be-

müht, eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen, insbesondere mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, zu finden. Es hat zunächst Besprechungen mit Herrn Häfele gegeben, die zu einer vorläufigen Problemformulierung geführt haben. Zum Glück haben wir dann den direkten Anschluß an das Projekt Schneller Brüter gefunden. Wir haben uns experimentell und theoretisch mit dem Kriechbeulen von Brennstab-Hüllrohren unter Außendruck im Zusammenhang mit dem Dampfbrüter befaßt. Herr Krugmann hat eine Methode entwickelt, mit der man die Verbeulung kontinuierlich messen kann, und zwar ohne daß zusätzliche mechanische Lasten aufgebracht werden, was außerordentlich wichtig ist. Eine Besonderheit dieser Methode ist es, daß sie die Messung äußerst kleiner Verformungen ermöglicht. Mit dem Ausscheiden von Herrn Krugmann und mit dem ganzen Problem des Umzuges hängt es dann zusammen, daß die Apparatur seit etwa anderthalb Jahren stillstand, sie ist jetzt wieder in Betrieb, und wir hoffen auf die Formulierung einer neuen Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe auf diesem speziellen Gebiet. Herr Müller wird später etwas dazu sagen. Parallel dazu sind theoretische Untersuchungen von Herrn Laßmann gelaufen, die Ihnen zum größten Teil bekannt sein dürften. Er hat eine kritische Durchsicht der damals üblichen Methoden veranstaltet und dann Eigenes dazu erarbeitet mit dem Resultat, daß wichtige Voraussagen und Interpretationen möglich waren. Auf der Dissertation von Herrn Laßmann, die sich daraus ergeben hat, baut dann die spätere Arbeit auf, die, wie Sie wissen, zu dem Programm URANUS geführt hat. Im Rahmen dieser Entwicklung wurde schnell sichtbar, daß ergänzende Arbeiten nötig sein würden. Zur Behandlung bis zu dreidimensionaler Probleme bei der Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Brennstäben hat Herr Fabian deshalb die Methode der finiten Elemente angewandt. Neben diesen Arbeiten, die offiziell in das Projekt Schneller Brüter aufgenommen worden sind, hat Herr Schwarz - quasi als Option - Bruchmechanik betrieben, speziell im Hinblick auf Brennstab-Hüllrohre. Leider ist diese Arbeit nicht so abgeschlossen worden, wie es wünschenswert und nach dem Stand der Dinge auch möglich gewesen wäre. Kurz angepeilt haben wir in einer Studie die grundsätzlichen Möglichkeiten, Brennelement- und Core-Mechanik zu betreiben. Diese Studie ist nach verhältnismäßig kurzer Zeit abgebrochen worden mit Ergebnissen, die rein formal offen geblieben sind. Trotzdem waren

sie methodisch sehr aufschlußreich, denn sie haben sehr schön gezeigt, was auf diesem außerordentlich schwierigen Gebiet möglich und mehr noch, was unmöglich ist. Die genannten Arbeiten wurden alle mit finanzieller Unterstützung von, bzw. in Zusammenarbeit mit Karlsruhe durchgeführt. Ich muß hier ein paar Namen nennen: das ist für das Projekt Schneller Brüter Herr Dr. Karsten, dann hatten wir immer einen sehr engen Kontakt mit Ihnen, Herr Dr. Kummerer, und natürlich mit Professor Laue. Gelegentlich haben wir auch mit Herrn Dr. Fischer zusammengearbeitet. Ich darf mich dann an Sie, Herr Dr. Mühling, wenden und die Hoffnung aussprechen, daß diese Art der Zusammenarbeit unter Ihrer Ägide so schön weiterlaufen wird wie bisher.

Für ein Hochschulinstitut liegt es auf der Hand, daß wir nebenher immer auf der Suche nach weiteren Projekten waren, zumal die langfristige Entwicklung eines Projekts nie sicher abzusehen ist. Man muß also sozusagen rechtzeitig noch an anderen Stellen Anker auswerfen. Was war da möglich? Wir hatten uns ja bemüht, den Karlsruher Argonaut zu bekommen. Heute muß ich sagen, zu unserem Glück ist er nicht nach Darmstadt gekommen, wir wären nämlich am Genehmigungsverfahren gescheitert, das war damals noch nicht so klar wie heute zu ersehen. Aber es gibt eine für Darmstadt außerordentlich attraktive und schöne Möglichkeit; wir haben hier ja den Schwerionenbeschleuniger und wir sind daher schon vor 5 Jahren in das Gebiet der Simulation von Strahlenschäden mit Hilfe des Schwerionenbeschleunigers eingestiegen. Herr Schmelz wird darüber etwas berichten. Es hat zwei Dissertationen auf diesem Gebiet gegeben und die Arbeit wird weiter fortgeführt. In dem Zusammenhang muß ich vor allem den Namen von Herrn Dr. Ehrlich in Karlsruhe nennen. Diese Zusammenarbeit auf rein persönlicher Basis ist nicht an ein Projekt gebunden, und alles, was in diesem Zusammenhang an finanziellem Aufwand entstanden ist, stammt aus Institutsmitteln. Unsere eigenen Mittel und die aus Karlsruhe werden peinlich sauber auseinander gehalten. Wir waren aber in der glücklichen Lage, einen Posten von zwei Tonnen Natururan für 100.000 DM zu verkaufen. Das für die Analyse von Strahlenschäden unbedingt erforderliche Elektronenmikroskop mit Rastereinrichtung hat über 150.000 DM gekostet. Den Rest von 50.000 DM konnten wir zähneknirschend aus dem Insti-

tutsetat aufbringen. Bezüglich der präparativen Hilfsmittel sind wir in einer einigermaßen befriedigenden Position.

Wie ist der Stand der Dinge heute? Der Umzug ist im wesentlichen abgeschlossen, und Sie werden heute nachmittag sehen, welche experimentellen Möglichkeiten gegenwärtig vorhanden sind. Sie werden aber auch sehen, was an allgemeinen Möglichkeiten grundsätzlich gegeben ist. Wir haben eine sehr gute mechanische Werkstatt, eine sehr gute Elektronikwerkstatt, und wir haben viel Raum. Daß wir so viel Raum haben, hängt zum Teil damit zusammen, daß der Argonaut nicht zu uns gekommen ist. Das bedeutet aber eben, daß wir in der Zukunft durchaus noch weitere experimentelle Projekte - im Prinzip wenigstens - auf uns nehmen können. Es ist Ihnen ja bekannt, daß es gar nicht so schwierig ist, eine Halle zu bauen, aber einen für Experimente gedachten Komplex mit Geist auszufüllen, das ist eine ganz andere Sache, und es ist mir völlig bewußt, daß das seine Zeit dauern wird.

Ein Problemkreis, an den wir gedacht haben - das möchte ich nur kurz andeuten - könnte sein, Simulationsexperimente zur Core-Ver-spannung durchzuführen - reine Modelluntersuchungen ohne Neutronenbestrahlung. Das Gesamtproblem ist ja so vielfältig und so kompliziert, daß möglicherweise auch auf diesem Gebiet eine Hochschule etwas beitragen kann.

Welche Personalprobleme haben wir? Das zentrale Problem, mit dem wir grundsätzlich leben müssen, ist, daß die Personalstellen der wissenschaftlichen Bediensteten Zeitstellen sind, 5-Jahresstellen. Was außerhalb bei Diskussionen auf große Überraschung gestoßen ist, ist die Tatsache, daß Herr Laßmann die immense Arbeit der Aufstellung seines URANUS-Codes als Zeitbeschäftigter und im Ein-Mann-Betrieb durchgezogen hat.

Wir haben sieben Personalstellen des früheren Assistententyps. Das ist eine gute Ausstattung. Aber innerhalb eines einzigen Jahres - das hängt mit der Struktur der Gesetze zusammen - sind fünf Stellen frei geworden und müssen jetzt neu besetzt werden. Sie können sich vorstellen, daß der Übergang eine Schwierigkeit darstellt, die aber hoffentlich in absehbarer Zeit überwunden sein wird. In diesem Zusammenhang steht auch das Problem, daß Herr Laßmann, vom Stand der Arbeit gesehen, zu früh weggehen muß.

Ich hoffe allerdings sehr, daß es eine weitere Zusammenarbeit mit ihm geben wird, die die Übergabe und die Weiterführung der laufenden Projekte erleichtern wird.

Was das sogenannte nichtwissenschaftliche Personal betrifft, sind wir recht gut bestellt. Wir haben einen Programmierer, Herrn Kohl, der sehr gute Arbeit im Zusammenhang mit dem Programm URANUS geleistet hat, wir haben für die Betreuung der Kriechbeulaparatur Herrn Trettin, und für die Bestrahlungsexperimente Herrn Soltau.

In diesem Zusammenhang sollte ich noch ein Wort über Studien- und Diplomarbeiten sagen: es sieht so aus, als seien diese Arbeiten eine wesentliche Quelle von Arbeitskraft bei uns. Da trügt der Schein: wir sind froh, wenn der Betreuungsaufwand und der Gewinn für die Projektarbeit sich die Waage halten. Der Betreuungsaufwand ist deshalb so hoch, weil wir - für theoretische wie experimentelle Arbeiten - immer nur in sich abgeschlossene Aufgaben stellen, die einen vollständigen, in sich konsistenten Bericht erfordern. Bei uns gibt es keinen Giftschränk, in dem bereits abgearbeitete Diplomarbeiten versteckt werden müssen, weil sie sonst abgeschrieben würden. Jede einzelne Arbeit ist eine eigene Arbeit, sowohl des Betreuers als auch des Betreuten.

Ein Wort möchte ich zur Fremdfinanzierung von Personalstellen sagen: die Versuchung ist groß, sich durch Verträge zusätzliche Personalstellen ans Institut zu ziehen, aber diejenigen von Ihnen, die mit dem Problem vertraut sind, wissen auch, daß das nicht notwendig ein Vorteil ist. Es gibt grundlegende Probleme, die mit der Fremdfinanzierung von Personalstellen verbunden sind, fast immer sind nur 2-Jahres-Verträge möglich. Das bedeutet nicht nur einen Schaden für die Qualität der Arbeit, sondern für den Institutsleiter einen permanenten "Türkenbau", mit dem man die Fremdfinanzierung im überschlagenden Verfahren verlängern kann. Ich halte nichts von diesem Verfahren, sondern meine, man solle dafür sorgen, daß das verfügbare Personal vernünftig eingesetzt wird und frei arbeiten kann. Das ist an unserem Institut deswegen möglich, weil wir nur eine verhältnismäßig kleine Zahl von Studenten zu betreuen haben.

Bezüglich der sächlichen Ausstattung und der laufenden Mittel des Instituts steht uns ein Problem ins Haus, das die ganzen technischen Zweige der Hochschule betrifft: als Folge der Hessischen Hochschulgesetze müssen wir in ein bis zwei Jahren mit drastischen Kürzungen rechnen. Dazu kommt ein seit vielen Jahren konstanter Haushalt. Kaufkraftverkuste sind nicht ausgeglichen worden, und Berufungszusagen werden sich auf die Dauer nicht halten lassen.

Ein letztes Problem möchte ich anschneiden, das habe ich vorhin schon anklingen lassen: wie kann ein Institut für Reaktortechnik an einer Technischen Hochschule sich überhaupt behaupten in seiner Arbeit gegenüber der finanziellen und personellen und allgemeinen Ausrüstung der Kernforschungszentren? Das ist entweder möglich, indem man sich auf Randgebiete setzt, die etwas abseits des allgemeinen Interesses liegen, und interessanterweise ist das, was Herr Laßmann zunächst betrieben hat, tatsächlich so ein Randgebiet gewesen. Es hat sich zum Glück zu einem tragenden Gebiet entwickelt, aber das war nicht vorauszusehen. Die andere Möglichkeit ist die der Zusammenarbeit mit den Kernforschungszentren. Wenn es für uns ein Ziel der heutigen Veranstaltung gibt, dann das der Fortsetzung und Intensivierung der Zusammenarbeit mit Karlsruhe sowie das der Intensivierung unserer Beziehungen zur Industrie, für die wir die Studenten ja ausbilden.

Damit möchte ich schließen, ich darf Sie noch einmal herzlich begrüßen und meiner Freude über Ihr zahlreiches Erscheinen Ausdruck geben, und bitte jetzt Herrn Laßmann, das Wort zu übernehmen.

Stand und Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS

K. Laßmann

Ich möchte den Bericht über den Stand und die Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS unter das übergeordnete Thema 'Störfallanalyse' stellen. Dieses Thema hatte im Rahmen unserer Arbeiten mit dem Projekt Schneller Brüter des Kernforschungszentrums Karlsruhe die erste Priorität, daneben war uns die Aufgabe gestellt worden, eine Karbid-Version zu entwickeln. Formal gesehen liegt zwar eine Karbid-Version vor, es stellte sich jedoch heraus, daß heute das Karbidverhalten unter Bestrahlung noch nicht ausreichend verstanden wird, um eine fundierte Analyse des Karbidstabs durchzuführen. Zum Komplex Karbid-Version wird Herr Preußner in seinem Vortrag noch einige Bemerkungen machen. Ich beschränke mich deshalb in meinem Bericht auf die Fragestellung: "Wie ist eine Störfallanalyse mit dem URANUS-Rechenprogramm durchzuführen?"

Eine Brennstab-Strukturanalyse für sehr schnell ablaufende Störfälle im Sekundenbereich ist gegenüber langsamen Änderungen im Stundenbereich etwas prinzipiell Neues. Am Beginn dieser Arbeiten stand deshalb eine Dokumentation des bisher erreichten Standes und eine Verifikation der derzeit vorliegenden URANUS-Version. Als Vorarbeiten wurden systematische Untersuchungen zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse durchgeführt, daran schlossen sich die eigentlichen Arbeiten zur Entwicklung einer Programmversion für Störfallanalysen an. Die Untersuchungen zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse hatten zwei sehr wichtige Ergebnisse:

1. Der statistische Aspekt ist zu berücksichtigen, besonders bei Störfallanalysen.
2. Aus systematischen Untersuchungen resultierte eine Programmstruktur mit hoher Flexibilität, die gleichzeitig zu einer hohen Rechengeschwindigkeit führte.

Das zweite Ergebnis konnte bereits mit Erfolg zur Entwicklung verschiedener Programm-Versionen angewendet werden. Eine dieser Ver-

sionen ist die 'transiente' URANUS-Version zur Störfallanalyse.

Bevor ich die einzelnen Punkte diskutiere, möchte ich Ihnen die personelle Situation skizzieren, die mit der URANUS-Entwicklung verbunden ist. Die eigentliche Entwicklung wurde von mir durchgeführt, seit Januar 1977 arbeitet Herr Kohl als Datenverarbeitungs-Fachmann ausschließlich am URANUS-System. Über seine Arbeiten werde ich noch kurz berichten. Daneben wurden Einzelaspekte zum URANUS-System in Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten behandelt. Zu diesen Arbeiten möchte ich zwei Anmerkungen machen:

- a) Unsere Studenten, die hier den allgemeinen Maschinenbau studieren, haben keine speziellen Kenntnisse über Brennstäbe von Kernreaktoren oder gar über Rechenprogramme zur Stabanalyse. Trotzdem sind sie in der Lage, Einzelaspekte zu untersuchen, ins URANUS-System zu integrieren und mit dem URANUS-System zu arbeiten. Dies spricht für die einfache Handhabung des URANUS-Systems.
- b) Obwohl permanent zwei bis drei Studenten an der URANUS-Entwicklung mitgearbeitet haben, bedeutet dies keine wesentliche Kapazitätserweiterung. Im Mittel wird bei diesen Arbeiten in etwa der Betreuungsaufwand kompensiert.

Die personelle Basis ist also im Vergleich zu anderen Gruppen klein. Trotzdem hat die URANUS-Entwicklung Anerkennung gefunden, die z.B. in unseren internationalen Kooperationsvorhaben zum Ausdruck kommt. Mit Hilfe des Internationalen Büros des Kernforschungszentrums Karlsruhe wurden und werden Kooperationsvorhaben durchgeführt, die allerdings nicht notwendigerweise in sich ausgewogen sind, z.T. sogar überwiegend einen Ausbildungscharakter aufweisen. Zu nennen sind Kooperationsvorhaben mit Spanien, Finnland, Mexiko und Argentinien, die bereits zu zwei Publikationen geführt haben: gemeinsam mit Herrn Dr. Moreno aus dem spanischen Kernforschungszentrum, der ein knappes Jahr in unserem Institut beschäftigt war, wurde die URANUS-LWR-Version entwickelt [1], mit dem finnischen Kernforschungszentrum wurde ein Vergleich zwischen dem URANUS-Rechenprogramm und dem amerikanischen GAPCON-THERMAL-2 Programm durchgeführt [2]. Diese Arbeit wird weiter unten noch diskutiert. Derzeit werden weitere Aufenthalte von ausländischen Kollegen vorbereitet, so z.B. aus Finnland (Thema: "Verifikation des

URANUS-Rechenprogramms" und "Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff mit Hilfe der Finit-Element-Methode"). Im Rahmen dieser Kooperationsvorhaben wurde ein internationaler Ferienkurs zur thermisch/mechanischen Brennstab-Strukturanalyse konzipiert, der für den Sommer 1978 geplant war, der allerdings verschoben werden mußte. Ich möchte darauf im Rahmen dieses Vortrags nicht näher eingehen, sondern nur feststellen, daß wir diese Ausbildungsfunktion durchaus als Teil einer umfangreichen Programmentwicklung sehen. Im Hintergrund steht letztlich die Frage "Wie führt man potentielle Anwender an Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse heran?"

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die personellen Möglichkeiten im Rahmen der URANUS-Entwicklung sehr begrenzt sind. Studien- und Diplomarbeiten sowie Kooperationsvorhaben haben bislang noch nicht zu einer wesentlichen Verbesserung geführt. Im letzten Punkt dieses Berichts - also bei der Beschreibung der Arbeiten zur transienten URANUS-Version - wird diese begrenzte personelle Situation noch einmal eine Rolle spielen.

Ich möchte jetzt auf den eigentlichen ersten Punkt dieses Berichts, nämlich die Dokumentation, zu sprechen kommen. Wir haben das Prinzip gewählt, diese Dokumentation in Form von Zeitschriftenveröffentlichungen bzw. Vorträgen - teils in internationalem Rahmen - vorzulegen. Der überwiegende Teil dieser Arbeiten wurde dadurch bereits durch unabhängige Referenten überprüft. Wir sehen darin einen gewissen Qualitätsnachweis. Seit 1977 sind 11 Arbeiten [1 - 11] entstanden, auf die ich während des Vortrags nur zum Teil eingehen kann. Besonders hervorheben möchte ich die Arbeiten zur URANUS-Leichtwasser-Version [1], eine kritische Untersuchung zur Brennstab-Strukturanalyse [6] sowie eine umfassende Arbeit zur Mechanik des URANUS-Rechenprogramms [8]. Die Arbeiten zur Statistik [9, 11] und zur 'transienten' URANUS-Version [7] werden im Laufe des Vortrags noch angesprochen werden. Die eigentlichen URANUS-Bedienungshandbücher sind in Bearbeitung. Diesen Teil der Dokumentation führt im wesentlichen Herr Kohl mit Hilfe eines speziellen Textbearbeitungssystems auf dem Fachbereichsrechner pdp-10 durch. Grob gesprochen lassen sich dabei Textänderungen per Knopfdruck einarbeiten, der Rechner stellt neue Inhaltsangaben, neue Seiteneinteilungen etc., automatisch zusammen. Für den potentiellen

URANUS-Benutzerkreis ist damit ein einfacher Zugriff zur aktuellen Information gewährleistet. Ergänzend dazu sollen die weiteren Arbeiten von Herrn Kohl am URANUS-Rechenprogramm genannt werden: er ist für die Systemmaintenance zuständig, die bei Programmänderungen notwendig ist und hat das URANUS-Rechenprogramm mit Erfolg auf eine IBM-Anlage implementiert - eine Aufgabe, die wir im Hinblick auf die Anwendung des URANUS-Programms im Kernforschungszentrum Karlsruhe übernommen haben.

Ich komme nun zum wichtigen Punkt der Code-Verifikation. Dazu können zunächst zwei allgemeine Aussagen gemacht werden:

- a) ein Rechenprogramm ohne umfangreiche Verifikation, die sich in der Regel über Jahre erstreckt, ist wertlos.
- b) Der Aufwand zur Verifikation sollte - im Vergleich zur eigentlichen Programmentwicklung - nicht unterschätzt werden.

Die Code-Verifikation kann in drei verschiedenen Ebenen durchgeführt werden:

- Vergleich der Lösung aus dem Rechenprogramm mit bekannten, in der Regel analytischen Lösungen. Diese Vergleiche sind jedoch nur in ganz speziellen Fällen möglich. Im Rahmen der URANUS-Verifikation wurden diese Vergleiche so weit wie irgend möglich durchgeführt, wie dies bei einer wissenschaftlichen Vorgehensweise auch selbstverständlich ist. Letztlich wird damit im wesentlichen die Richtigkeit der Programmierung überprüft. Ich gehe darauf nicht weiter ein, weil diese Arbeiten zur vollsten Zufriedenheit abgeschlossen werden konnten.
- Vergleich mit anderen Rechenprogrammen. Auf diese Art der Code-Verifikation wird noch weiter unten eingegangen.
- Vergleich mit Experimenten. Hierzu sind mit dem URANUS-Rechenprogramm erst erste Ansätze gemacht worden.

Die mit dem URANUS-Rechenprogramm durchgeführte Code-Verifikation beschränkt sich also auf die ersten beiden Punkte. Vergleiche mit Ergebnissen anderer Rechenprogramme wurden in drei Einzelarbeiten durchgeführt:

- Vergleich der Rechenprogramme
FRUMP - SATURN - URANUS [12]

- Vergleich der Rechenprogramme
GAPCON - URANUS [2]
- Vergleich des URANUS-Rechenprogramms
mit Ergebnissen der EPRI Studie [10]

Wie Sie wissen, bestehen derartige Vergleiche aus einer enormen Fülle von Ergebnissen, deren vollständige Interpretation sehr wichtig ist, auf die ich hier jedoch nicht im einzelnen eingehen kann. Details sind in den oben angegebenen Arbeiten zu finden. Als wichtigstes Ergebnis ist zu nennen, daß die URANUS-Ergebnisse in sich konsistent sind, daß das URANUS-Programm numerisch zuverlässig und schnell arbeitet, und daß sich einzelne Abweichungen eindeutig auf Modelle zum Werkstoffverhalten zurückführen lassen, die wir der offenen Literatur entnommen haben.

Der FRUMP - SATURN - URANUS -Vergleich wurde bereits im Arbeitskreis Modelltheorie vorgetragen. Zur besseren Anschaulichkeit sollen zwei Abbildungen gezeigt werden. Für ein hochdichtes Hohlpellet ergibt sich eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung (Abb.1), für das Vollpellet, das eine niedrige Dichte aufwies, ergaben sich nicht tolerierbare Diskrepanzen, die auf das Nachverdichtungsmodell zurückzuführen sind (Abb.2). Dies wird Herr Preußner in seinem Vortrag noch im Detail erläutern.

Der Vergleich zwischen dem amerikanischen Code GAPCON-THERMAL-2 in einer verbesserten Version und dem URANUS-Rechenprogramm wurde im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem finnischen Kernforschungszentrum durchgeführt, wobei von finnischer Seite das wesentliche Ziel war, herauszufinden, ob das Rechenprogramm URANUS als Auslegungsprogramm verwendet werden kann. Da beim GAPCON-Code die thermische Analyse im Vordergrund steht, wurden zunächst Temperaturen miteinander verglichen. Als Datenfall wurde eine Rampensituation für den Brennstab des russischen Reaktors, der LOVIISA-Anlage, zugrunde gelegt. Die Berechnungen der Temperaturen zeigten eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung, wie die Abb.3 exemplarisch zeigt. Die mechanische Analyse nach Abschluß der Rampe wies erhebliche Diskrepanzen auf, die auf eine völlig unzureichende Mechanik im GAPCON-Code zurückzuführen sind. Wie vielschichtig das Problem nach der Rampe ist, zeigt die Abb.4. Um Relaxationsvorgänge vernünftig beschreiben zu können, ist eine sehr detaill-

ierte Kriechmechanik von Hülle und Brennstoff zu fordern, die im URANUS-Rechenprogramm enthalten ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusätzlich die für den Brennstab-Designer wichtige Frage untersucht, ob es notwendig ist, den gesamten (integralen) Brennstab mechanisch sehr detailliert zu untersuchen, oder ob es ausreicht, einen hochbelasteten Schnitt allein zu analysieren. Wie die Abb.4 zeigt, führen im hier vorliegenden Fall integrale Analysen und eine Analyse eines einzelnen Schnitts zu praktisch identischen Aussagen. Aus der sehr günstigen Rechenzeit des URANUS-Rechenprogramms wurde der Schluß gezogen, daß dieses Rechenprogramm ein sehr nützliches Instrument für zahlreiche praktische Berechnungen zum Brennstab eines Leichtwasser-Reaktors darstellt. Nach wie vor ist die finnische Seite sehr am URANUS-Rechenprogramm interessiert und ist bereit, für eine weitere URANUS-Verifikation einen Kollegen nach Darmstadt zu delegieren.

Die wohl umfassendste Code-Vergleichs-Studie wurde vom Electric Power Research Institute (EPRI) durchgeführt. Die Schwierigkeiten eines derartigen Vergleichs lassen sich daran ablesen, daß drei Phasen notwendig waren, um die untersuchten Rechenprogramme zu werten. Von den zahlreichen Berichten sei hier nur der Abschlußbericht angeführt [13].

In der EPRI-Studie wurden die Rechenprogramme COMETHE-III, BEHAVE-4 LIFE-THERMAL-1, GAPCON-THERMAL-2, CYGRO-3 und FMODEL miteinander verglichen, wobei die Reihenfolge der Nennung die Wertung der Rechenprogramme wiedergibt. Nachträglich wurde das URANUS-Rechenprogramm in diesen Vergleich einbezogen, erste Ergebnisse wurden anläßlich eines IAEA-Expertentreffens in Blackpool vorgetragen [10]. Auch dieser Vergleich besteht aus einer großen Anzahl von Ergebnissen, von denen ich Ihnen die Leistungsdichten und als Beispiel eine Temperaturberechnung sowie eine Hüllrohrverformung zeigen möchte (Abb.5-7). Es zeigte sich wiederum, daß das URANUS-Rechenprogramm in sich konsistente Ergebnisse liefert, die in befriedigender Übereinstimmung zu den Ergebnissen des Code-Vergleichs stehen. Auf Einzelheiten kann ich hier nicht eingehen, kurz diskutieren möchte ich den Vergleich der Rechenzeiten (Abb.9). Die URANUS-Rechenzeiten sind praktisch identisch mit den Rechenzeiten nach dem COMETHE-Programm, allerdings läßt die hohe Zahl der Zeitschritte darauf schließen, daß die Dateneingabe zur Steuerung der

Numerik im URANUS-Rechenprogramm keineswegs optimal war. Wir konnten inzwischen eine Reduktion der Rechenzeit um den Faktor 5 erzielen, ohne daß die Genauigkeit der Aussage darunter litt. Darauf komme ich noch einmal unter dem Punkt 'Flexibilität' des URANUS-Rechenprogramms zurück.

Zusammenfassend kann zur URANUS-Verifikation gesagt werden, daß sämtliche bisher durchgeführten Vergleichsrechnungen in sich konsistente Ergebnisse geliefert haben, daß das URANUS-Programm numerisch zuverlässig und schnell arbeitet und daß sich einzelne Diskrepanzen auf Modelle zum Werkstoffverhalten aus der offenen Literatur zurückführen lassen. Der direkte Vergleich zu Experimenten muß noch durchgeführt werden.

Parallel zu den oben dargestellten Arbeiten 'Dokumentation' und 'Verifikation' wurden als Vorarbeiten zur Störfallanalyse grundsätzliche Überlegungen zur Brennstab-Strukturanalyse durchgeführt, die ich mit dem Begriff 'Brennstab-Philosophie' umreißen möchte. Die systematischen Untersuchungen der Methoden zeigten zwar die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Brennstab-Strukturanalyse. Unser seit langer Zeit bestehendes Konzept einer Design-Philosophie, das den verschiedenen methodischen Ansätzen einen komplementären Charakter zuweist, konnte nicht nur voll bestätigt werden, sondern wurde noch erweitert. Die ausführliche Darstellung dieser Untersuchungen finden Sie in der Arbeit [6], Herr Fabian wird im Rahmen seines Vortrags noch kurz auf dieses Design-Konzept eingehen. Die Erweiterung besteht in der Forderung nach statistischen Untersuchungen, auf die ich noch näher eingehen werde.

Neben den Untersuchungen der Methoden wurde eine systematische Untersuchung der Programmstruktur derartiger Rechenprogramme durchgeführt. Das Ergebnis war eine hohe Flexibilität und Schnelligkeit des URANUS-Rechenprogramms. In diesem Zusammenhang möchte ich erwähnen, daß zum eigentlichen URANUS-Rechenprogramm weitere Programme zur Datenaufbereitung und zur Auswertung der Ergebnisse gehören, die zusätzlich durch eine ganze Reihe von Testprogrammen ergänzt werden. Alle Programme zusammen bilden das URANUS-System. Als weiteres Ergebnis dieser Untersuchungen kann gesagt werden, daß ein überraschend ins Detail gehender grundsätzlicher Aufbau

Von Rechenprogrammen zur Brennstab-Strukturanalyse entwickelt werden konnte. Dieser grundsätzlich gemeinsame Aufbau wird für uns der Ansatz sein, über eine Vereinheitlichung unserer verschiedenen Programmsysteme am Institut für Reaktortechnik (IRT) nachzudenken.

Im Fall der Materialdatensätze ist die Idee einer Vereinheitlichung unmittelbar einzusehen, Herr Fabian wird jedoch zeigen, daß auch weit größere Komplexe darunter zu verstehen sind, wie z.B. die Kopplung des sehr detaillierten URANUS-Modells zur Berechnung des gemeinsamen Brennstoffes mit einer zweidimensionalen Behandlung nach der Finitelement-Methode. Neben Herrn Fabian wird auch noch Herr Preußner diesen wichtigen Aspekt einer Vereinheitlichung ansprechen. Die oben angesprochenen allgemeinen Gesichtspunkte werden z.Zt. im Rahmen einer größeren Arbeit ausführlich dargestellt.

Zur Flexibilität des URANUS-Rechenprogramms möchte ich noch ein Beispiel geben. Durch das URANUS-Programm führen sehr verschiedene Pfade, die Analysen mit sehr unterschiedlichem Grad an Komplexität ermöglichen. Einer dieser Pfade ist unsere URANUS-Design-Version, die etwa den gleichen Leistungsumfang wie der CARO-Code der Firma KWU [14] bildet. Gerechnet wurden die Fälle C und D der EPRI-Studie, die bereits oben erwähnt wurden (Abb.9). Die Abweichungen zu den sehr viel detaillierteren Untersuchungen sind vernachlässigbar. Aus den absoluten Angaben der Abb.9 kann folgende Aussage gemacht werden: läßt sich ein Datenfall eines Leichtwasser-Reaktor-Stabs durch 20 Zeitschritte und 10 axiale Schnitte idealisieren, dann kann dieser Fall mit der Design-Version des URANUS-Rechenprogramms in etwa 12 Sekunden auf einem Großrechner analysiert werden. Ich möchte mit diesen Angaben dem Eindruck entgegenwirken, daß ein großes Programmsystem in jedem Fall aufwendig und kompliziert sein muß. Es ist im Gegenteil eher besser durchdacht und organisiert als ein sogenannter 'einfacher' Code, weil es bei umfangreicheren Untersuchungen leicht an rechentechnische Grenzen stößt.

Diese Arbeiten zur Philosophie und zur Programmstruktur waren zur Entwicklung einer transienten URANUS-Version unbedingt notwendig. In Form eines Statements möchte ich noch einmal den

statistischen Aspekt aufgreifen:

"Bedingt durch die Grenzen der deterministischen Analysen, sind statistische Analysen unumgänglich, vor allem im Fall von Störfallanalysen".

Wir haben in den letzten zehn Jahren gesehen, wie schwierig schon deterministische Brennstabanalysen sind. Ich sehe deshalb keinen Weg, die statistische Betrachtungsweise direkt in die gesamten Analysen mit den komplexen Wechselwirkungen aller Modelle einzuführen. Dies dürfte nur in speziellen Fällen, wie z.B. bei thermoelastischen Analysen sehr einfacher Geometrien möglich sein. Wir haben deshalb für spezielle Einzelbetrachtungen den Weg über eine Monte-Carlo-Methode gewählt und auf dieser Basis eine URANUS-Statistik-Version geschaffen, die wir exemplarisch zur Untersuchung des Hüllrohrverhaltens bei einem LWR-Kühlmittelverlust-Störfall verwendet haben [9,11] (Abb.10-13).

Die Entwicklung einer Statistik-Version ist noch nicht abgeschlossen, vor allem muß die Frage nach der Unabhängigkeit der gewählten statistischen Variablen und die Dichteverteilungen der Eingangsparameter weiter untersucht werden. Verschiedene Arbeiten aus der allerneuesten Literatur, wie z.B. die Arbeit von Abramson et al. [15], bestätigen eindeutig den hier eingeschlagenen Weg zur Störfall-Analyse. Die heute mögliche Rechengeschwindigkeit zeigt darüber hinaus, daß zusätzliche statistische Untersuchungen auch bei sonstigen Brennstoff-Analysen sinnvoll sind. Damit wäre uns endlich eine Möglichkeit gegeben, Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment vernünftig und besser interpretieren zu können.

Zum Schluß dieses Berichts möchte ich den Stand der eigentlichen Arbeiten zur transienten URANUS-Version darstellen. Mit dem Begriff 'transient' meine ich sehr schnell ablaufende Störfälle. Zu berücksichtigen sind einmal instationäre Temperaturverteilungen, zum andern Werkstoffdaten bzw. Modelle zum Materialverhalten, die große Änderungen der Belastung (z.B. Druck und Temperatur) beinhalten. Daten aus rein stationären Versuchen können die Auslegung von Störfallexperimenten zwar erleichtern, quantitativ werden derartige Rechnungen jedoch nur von geringer Hilfe sein. Der erste Teil der Arbeiten, die Behandlung der instatio-

nären Wärmeleitungsgleichung, ist im Prinzip abgeschlossen (s. auch Abb.14 und 15) und wurde in einer Veröffentlichung [7] dargestellt. Das verwendete Verfahren baut auf der Tatsache auf, daß die Brennstab-Strukturanalyse räumlich und zeitlich diskret durchgeführt wird. Auf Einzelheiten soll hier verzichtet werden, die Numerik dieses Verfahrens wurde im Rahmen einer Diplomarbeit ausführlich in einem speziellen Testsystem untersucht [16], die entsprechenden Programmteile müssen jedoch noch in das URANUS-Programm integriert werden.

Eine offene Frage bilden die Materialdaten. Im Prinzip kann zwar jedes beliebige Materialverhalten im URANUS-Rechenprogramm berücksichtigt werden, im Detail könnten allerdings derzeit noch nicht sichtbare Schwierigkeiten auftreten. In jedem Fall ist es aufgrund der personellen Situation notwendig, daß diese Daten vom Projekt Schneller Brüter zur Verfügung gestellt werden, zumal zum Materialverhalten auch so umfangreiche Modelle, wie z.B. die Spaltgasfreisetzung, gehören, die allein die volle Aufmerksamkeit eines einzelnen verlangen. Hier sind uns also deutliche Grenzen gesetzt, auf die wir im übrigen bereits bei Beginn dieser Arbeiten hingewiesen haben.

In Form eines Schlußworts möchte ich die Frage beantworten: "Wo steht das URANUS-System heute?" Im Hinblick auf den Leistungsumfang und die Flexibilität bzw. die Schnelligkeit braucht das URANUS-System keinen Vergleich zu scheuen. Es dürfte in dieser Hinsicht in der Spitzengruppe der Rechenprogramme zu finden sein, wie die letzte SMIRT-Tagung in San Francisco gezeigt hat. Vergleichsweise ungünstig sieht die Situation im Hinblick auf die Verifikation des Rechenprogramms anhand von Experimenten aus. Zum Teil konnte diese Verifikation durch Vergleiche mit anderen Rechenprogrammen kompensiert werden. Die Entwicklung der transienten Version darf solange noch nicht als abgeschlossen gelten, wie Erfahrungen zum transienten Materialverhalten fehlen. Zweifelsohne wird das URANUS-Programm in der Lage sein, die Planung von Störfallexperimenten zu unterstützen, und durch ständige Versuchsauswertung eine Art begleitende Hilfestellung geben zu können. Wir dürfen jedoch nicht automatisch erwarten, daß ein derzeit noch unbekanntes Materialverhalten durch das URANUS-Rechenprogramm vernünftig prognostiziert werden kann. Darin unterscheidet sich das URANUS-Rechenprogramm nicht von anderen Systemen.

L i t e r a t u r

- [1] LASSMANN K., MORENO A., The light-water-reactor version of the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Bd.30 (1977), Lfg.3, S. 207-215
Erscheint geringfügig modifiziert auf Spanisch in der Zeitschrift "Energía Nuclear", und wurde als Bericht der spanischen Atomenergie-Kommission gedruckt (J.E.N.397)
- [2] LASSMANN K., KELPPE S., MATTILA L., Comparative evaluation of the steady state thermal fuel-rod code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel-rod performance code URANUS, VTT-Bericht, im Druck
- [3] LASSMANN K., URANUS, a computer code for the thermal and mechanical analysis of fuel-rod behaviour, SMIRT-4, San Francisco (1977), D 1/2
- [4] LASSMANN K., An iterative model for calculating the crack structure in fuel-rod design, SMIRT-4, San Francisco (1977) (1977) C1/3
- [5] LASSMANN K., Some critical remarks on fuel-rod structural analysis, Post-SMIRT-4 Seminar on mathematical/mechanical modeling of fuel elements, San Francisco (1977)
- [6] LASSMANN K., A criticism on fuel-rod structural analysis, angenommen in Nuc. Tech.
- [7] LASSMANN K., Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS, atw, XXII, Nr.7 (Okt.1977), S. 521-524
- [8] LASSMANN K., URANUS, a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel-rods in a nuclear reactor, Nuc. Eng. Design, Vol.45, No.2 (1978), S. 325-342
- [9] LASSMANN K., The statistical version of the URANUS-programme; gehaltener Vortrag anlässlich des IAEA-Specialists meeting on

fuel element performance computer modeling, Blackpool, U.K. (März 1978); Nuc. Eng. Design zum Druck vorgelegt

- [10] LASSMANN K., Preliminary results of a comparison URANUS - EPRI's modeling code evaluation project; gehaltener Vortrag anlässlich des IAEA-Specialists meeting on fuel element performance computer modeling, Blackpool, U.K. (März 1978) Nuc. Eng. Design zum Druck vorgelegt.

- [11] LASSMANN K., Statistische Störfallanalyse mit dem Stabrechenprogramm URANUS; angenommener Vortrag für die Reaktortagung 1978 des Deutschen Atomforums/KTG in Hannover, S. 672

- [12] MAY M., Der integrale Brennstabcode URANUS - Anwendung auf den Brennstab des Schnellen Brütters im Zusammenhang mit anderen Rechenprogrammen, Diplomarbeit am Institut für Reaktortechnik der THD (Juli 1977)

- [13] FREEBURN H.R., PATI S.R., FIERO I.B., Light-water-reactor fuel-rod modeling code evaluation, EPRI NP-369 (1977)

- [14] EBERLE R., WUNDERLICH F., DISTLER I., The KWU fuel-rod code CARO, IAEA-Specialists meeting on fuel element performance computer modeling, Blackpool, U.K., (1978), paper 7, Veröffentlichung in Vorbereitung

- [15] ABRAMSON P.B. et al, Probabilistic accident analysis with deterministic codes using statistically variable parameters, Nuc. Science and Eng., 66 (1978), S. 14-23

- [16] PREUSSER G., Zur Behandlung transienter Belastungen mit dem Brennstabcode URANUS, Diplomarbeit am Institut für Reaktortechnik der THD (Sep. 1977)

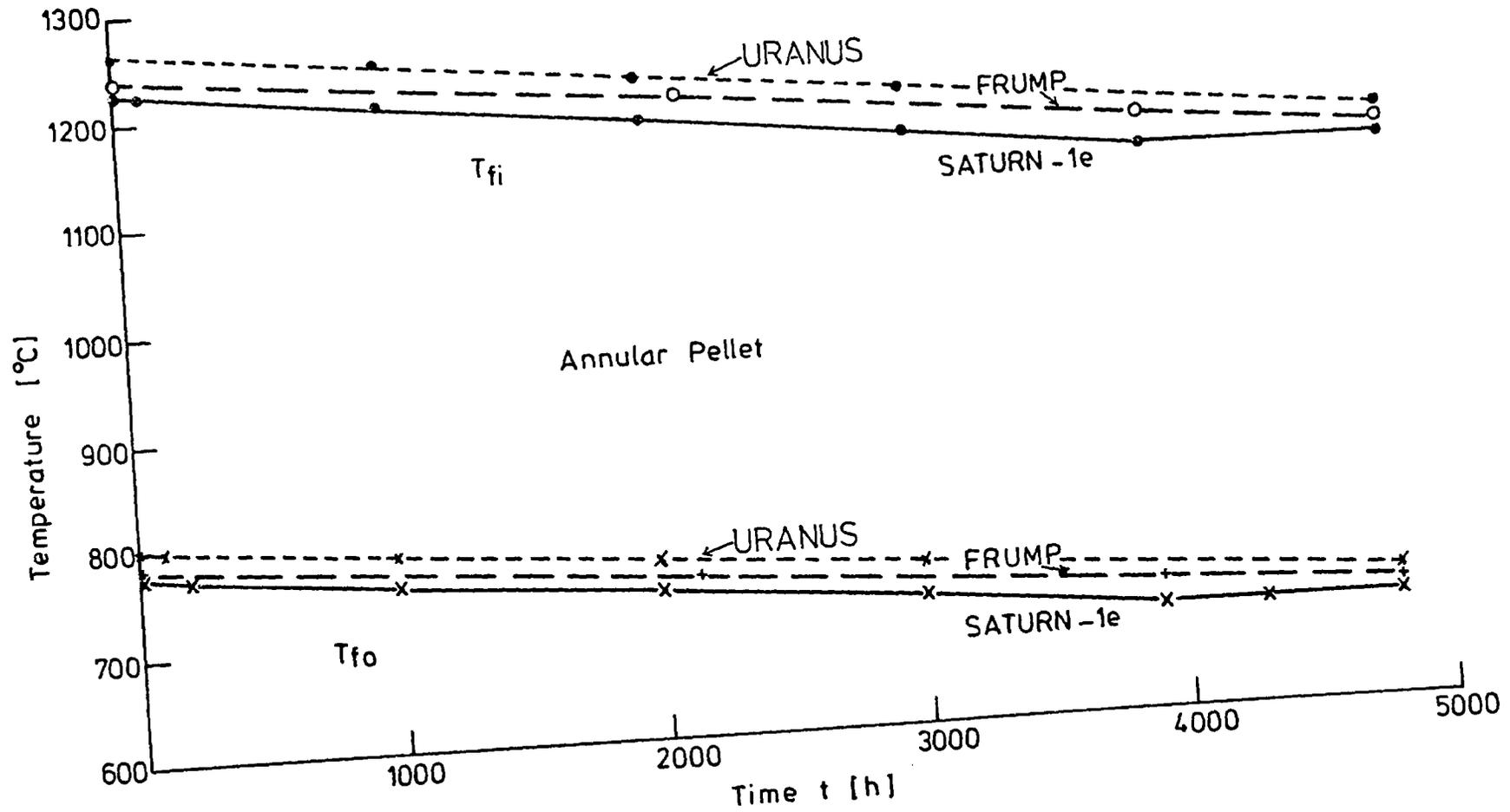


Abb.1 : Zentraltemperatur T_{fi} und Brennstoffaußentemperatur T_{fo} als Funktion der Zeit (nach [12], Hohlpellet)

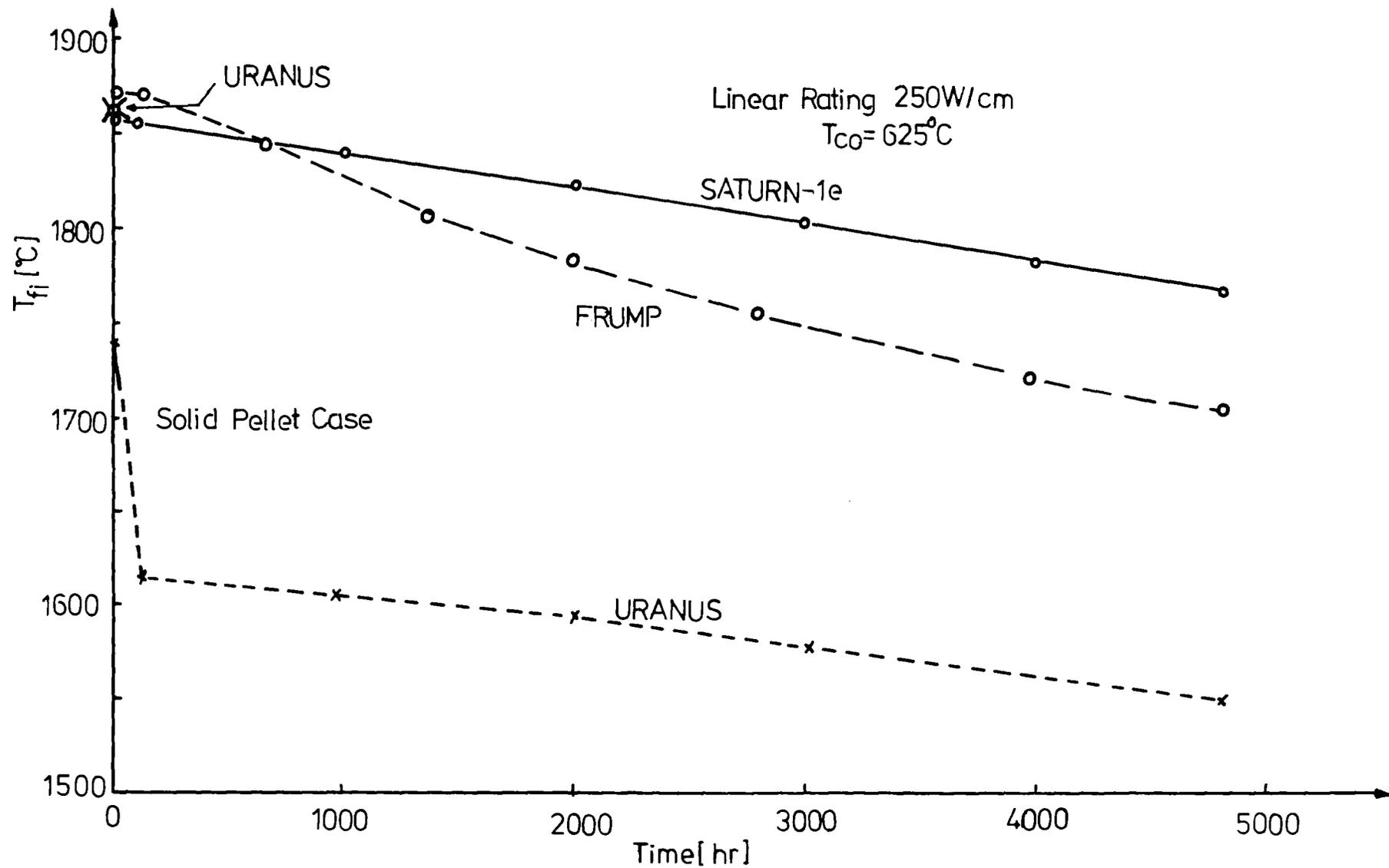


Abb. 2 : Zentraltemperatur als Funktion der Zeit (nach [12], Vollpellet)

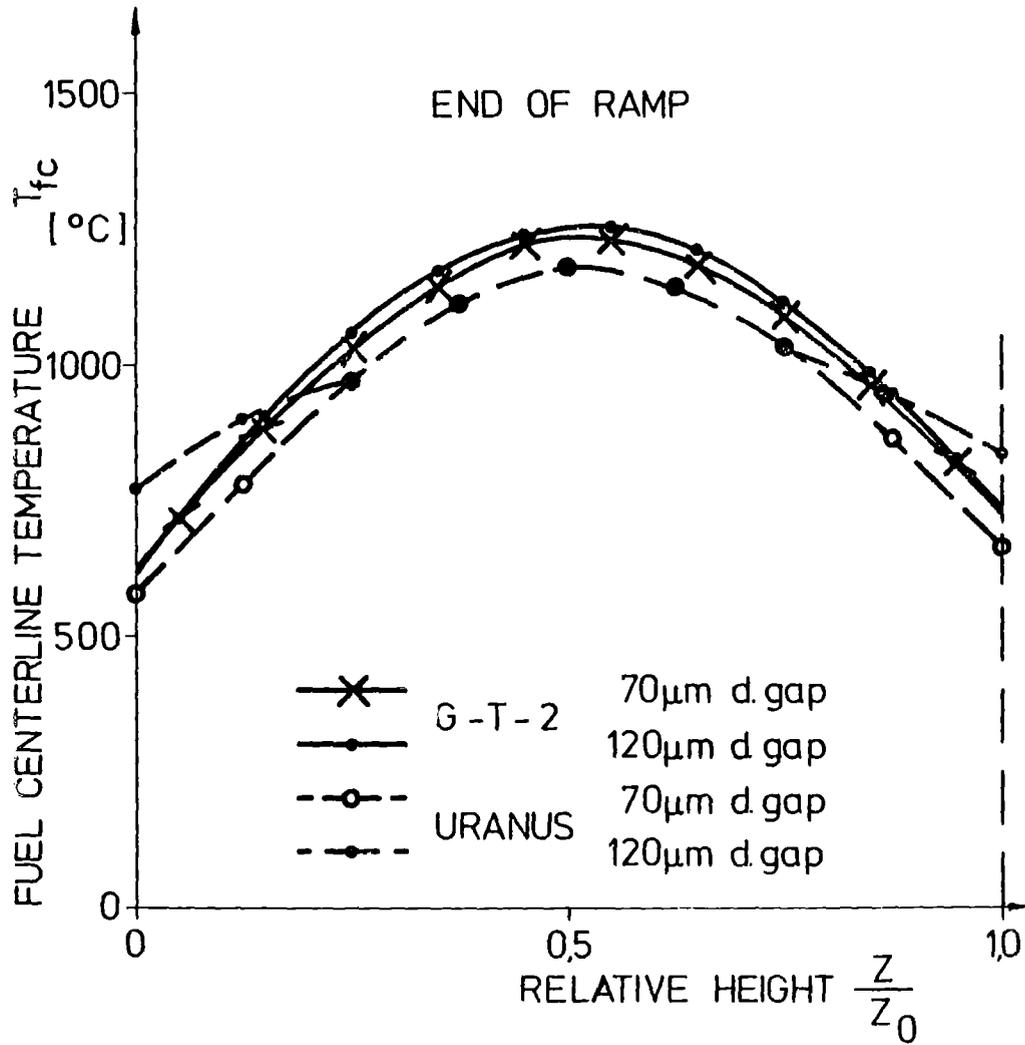


Abb.3 : Vergleich der Zentraltemperatur am Rampenende nach dem Rechenprogramm GAPCON-THERMAL-2 und URANUS (nach [2]).

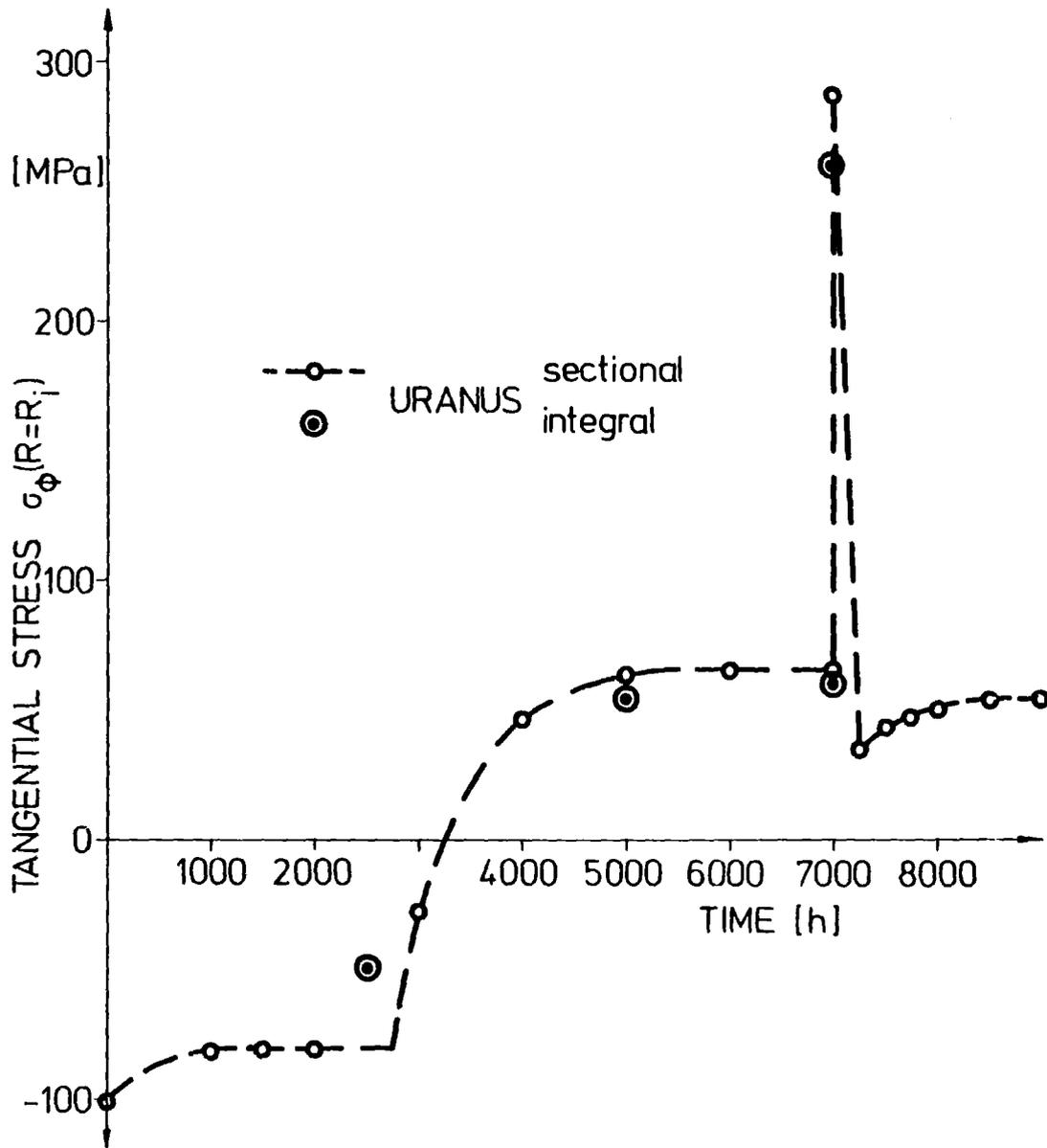


Abb.4 : Vergleich der tangentialen Spannung an der Innenseite des Hüllrohrs als Funktion der Zeit zwischen einer integralen und sektionalen URANUS-Berechnung (nach [2]).

CASE C (IFA-418 ROD 6)-FUEL LINEAR HEAT RATING VS. BURNUP

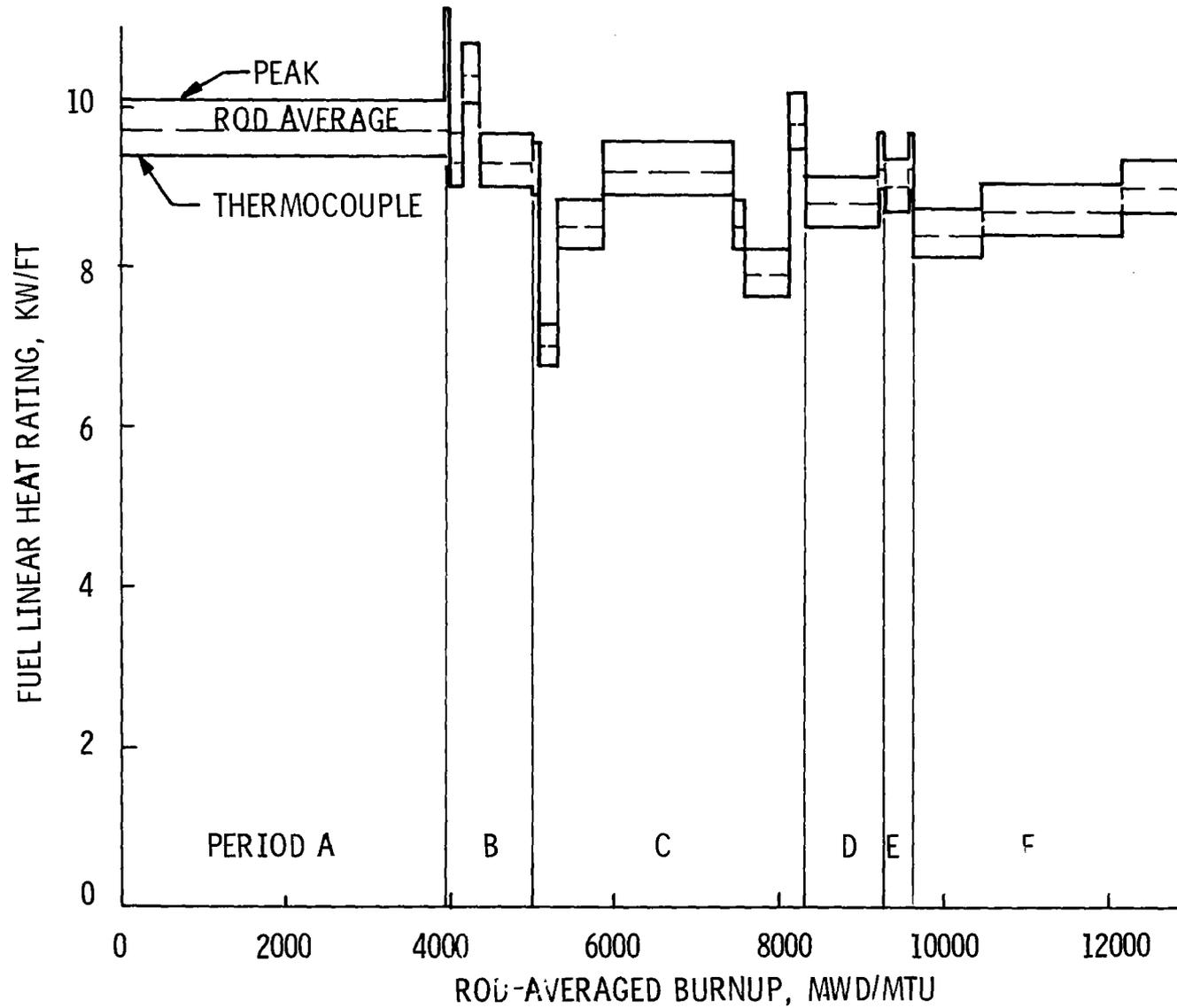


Abb.5 : Leistungsgeschichte als Funktion des Abbrands (nach [10] , Fall C)

CASE D (PWR ROD)-FUEL LINEAR HEAT RATING VS. BURNUP

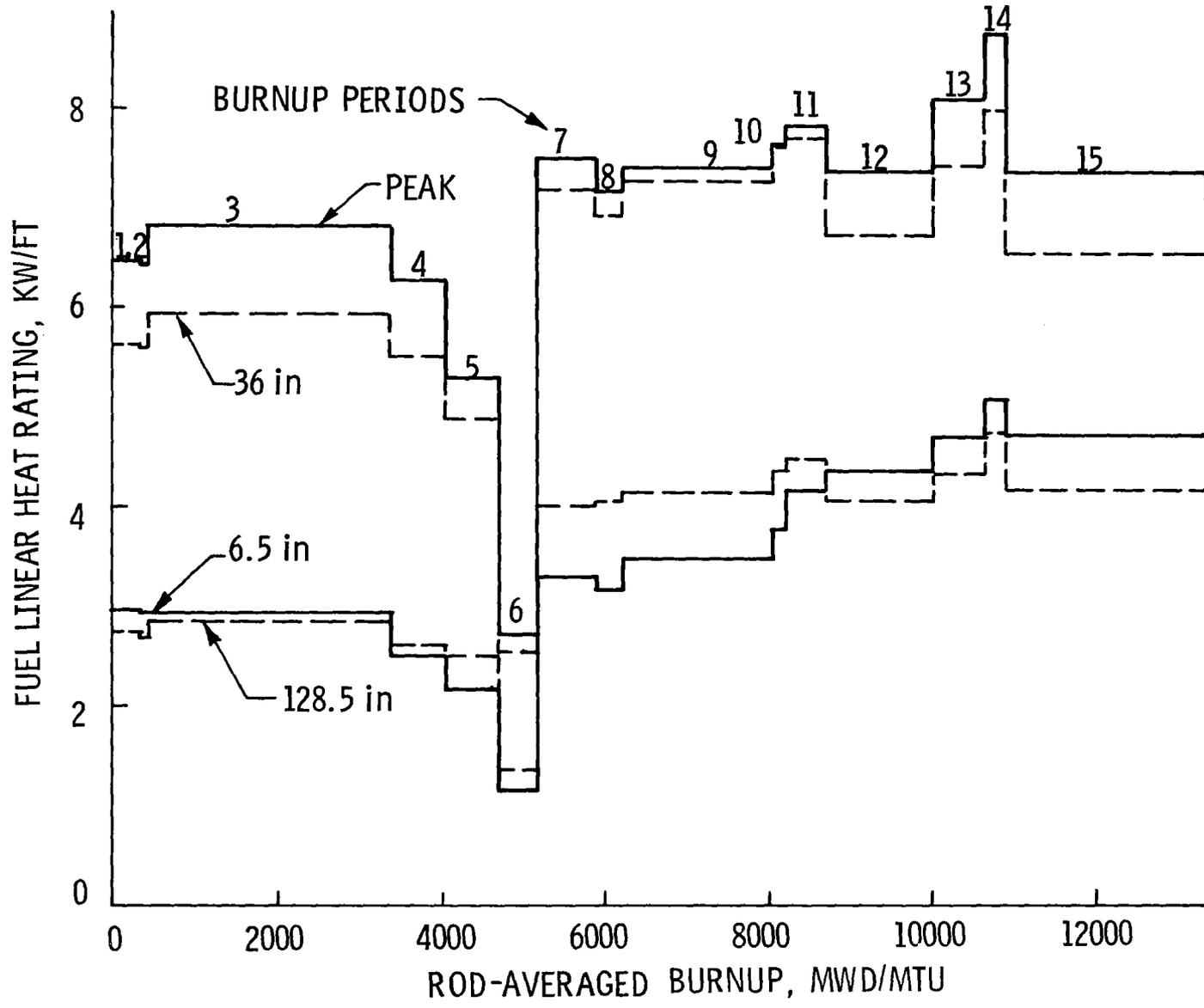


Abb.6 : Leistungsgeschichte als Funktion des Abbrands (nach [10] , Fall D)

CASE D (PWR ROD)-FUEL CENTRAL TEMPERATURE VS. BURNUP AT 36 INCHES

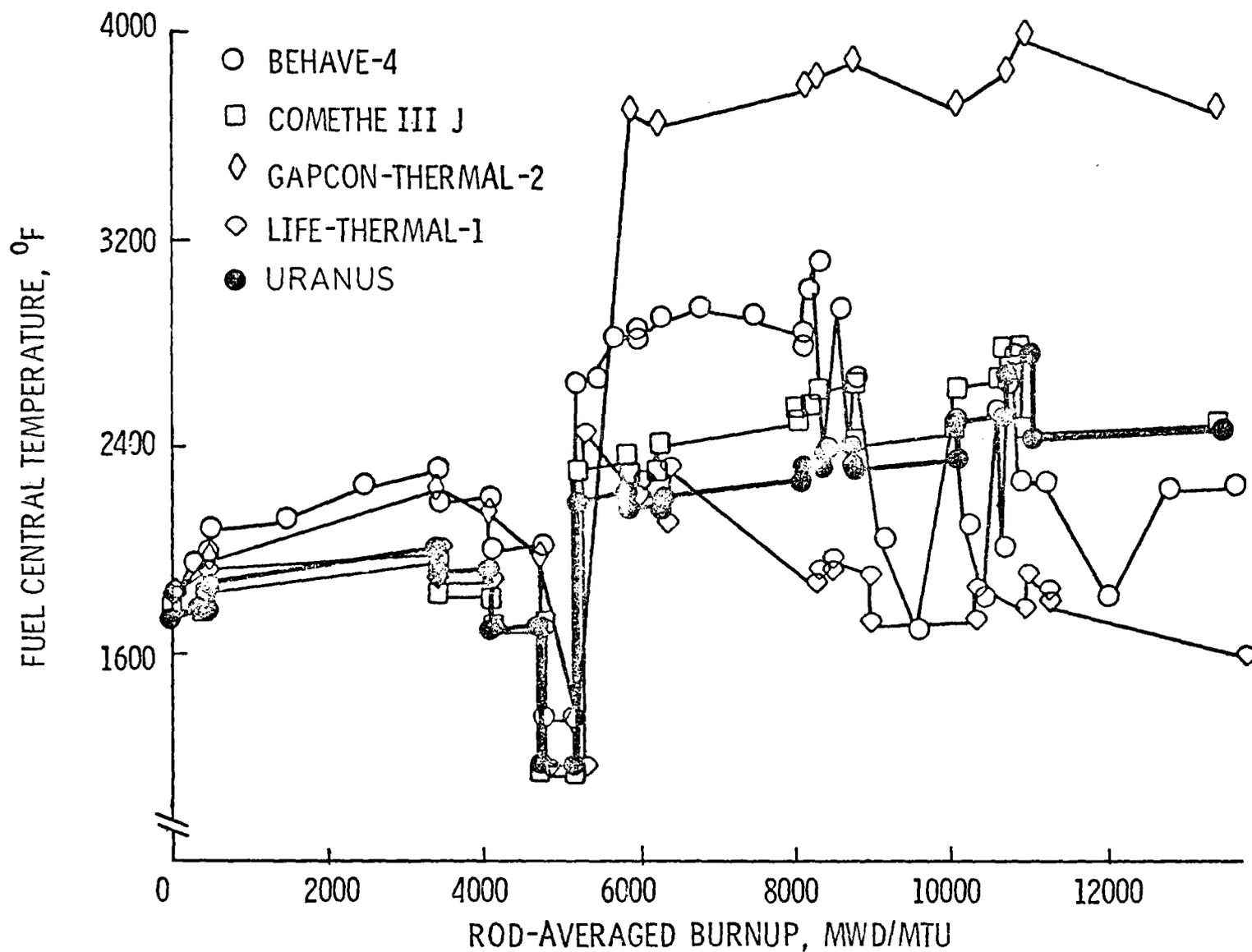


Abb.7 : Zentraltemperatur als Funktion des Abbrands (nach [10], Fall D)

CASE D (PWR ROD)-COLD PERMANENT CLADDING STRAIN VS. BURNUP AT 36 INCHES

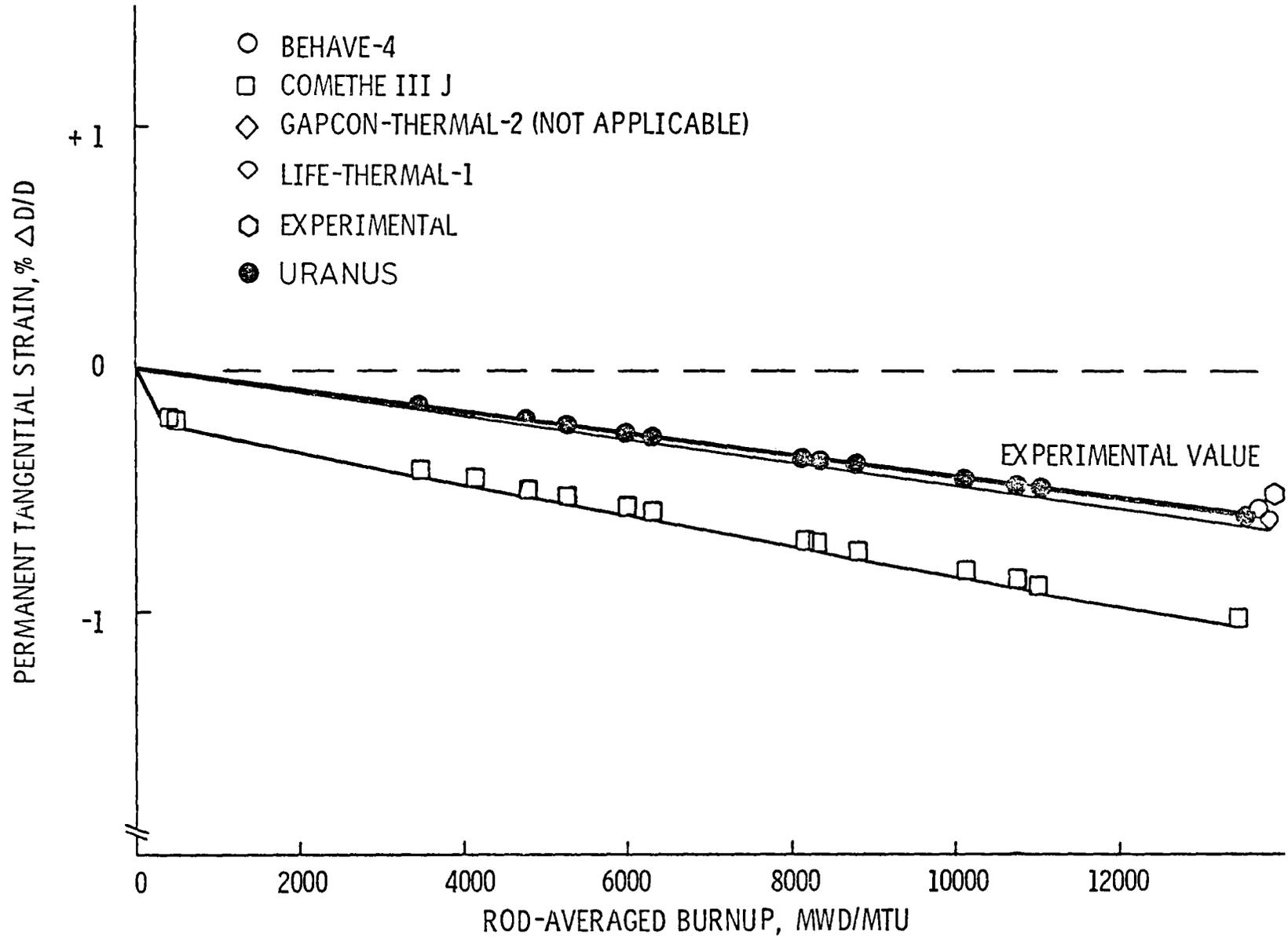


Abb.8 : Bleibende Dehnung in der Hülle als Funktion des Abbrands (nach [10] , Fall D)

	C	D
BEHAVE-4	70	100
COMETHE-III	45	35
GAPCON-THERMAL-2	8	11
LIFE-THERMAL-1	100	96
URANUS	40	38
	(414 time steps)	(737 time steps)
URANUS-DESIGN- Version	7 (99 time steps)	7 (142 time steps)

Absolute Angaben für IBM 370/168 (Fall C und D):
$\text{Rechenzeit} = \frac{5 \dots 7}{100} \left[\frac{\text{Sekunden}}{\text{Schnitt} \cdot \text{Zeitschritt}} \right]$
bei 17 radialen Punkten

Abb.9 : Relativer Vergleich der Rechenzeiten für die Fälle C und D der EPRI-Studie (nach [10]).

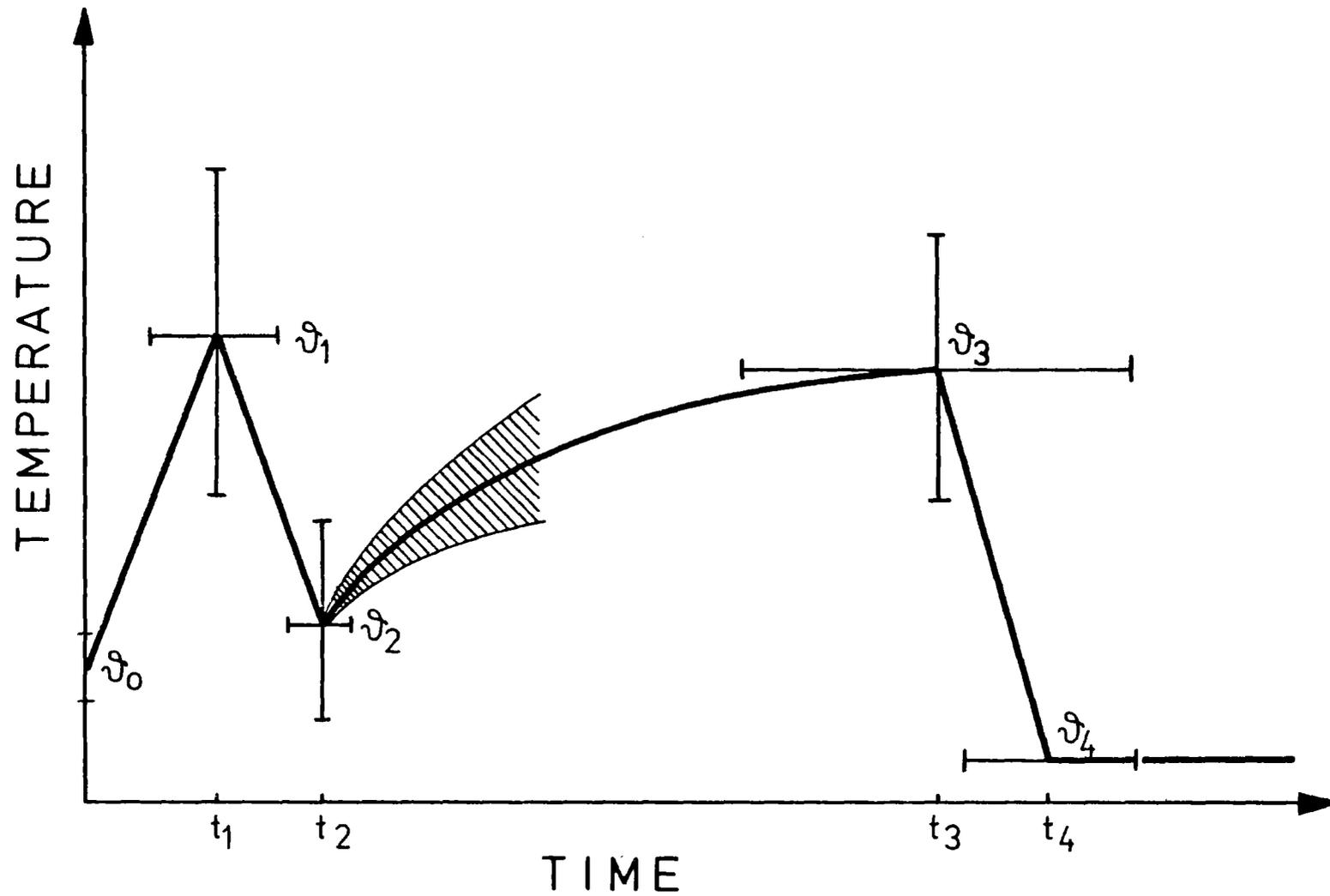


Abb.10 : URANUS-STATISTIK-Version, Dateneingabe für Hüllrohr-
außentemperatur als Funktion der Zeit (nach [9])

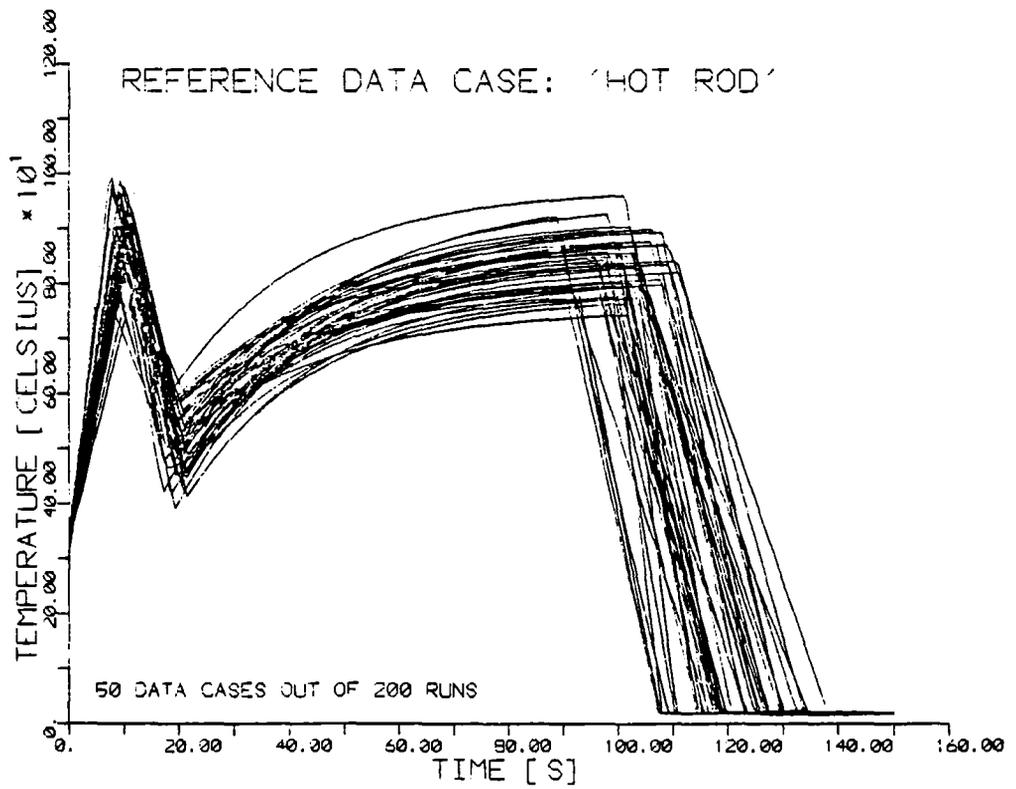


Abb.11 : Hüllrohraußentemperatur als Funktion der Zeit für 'Heißstab' (nach [9]).

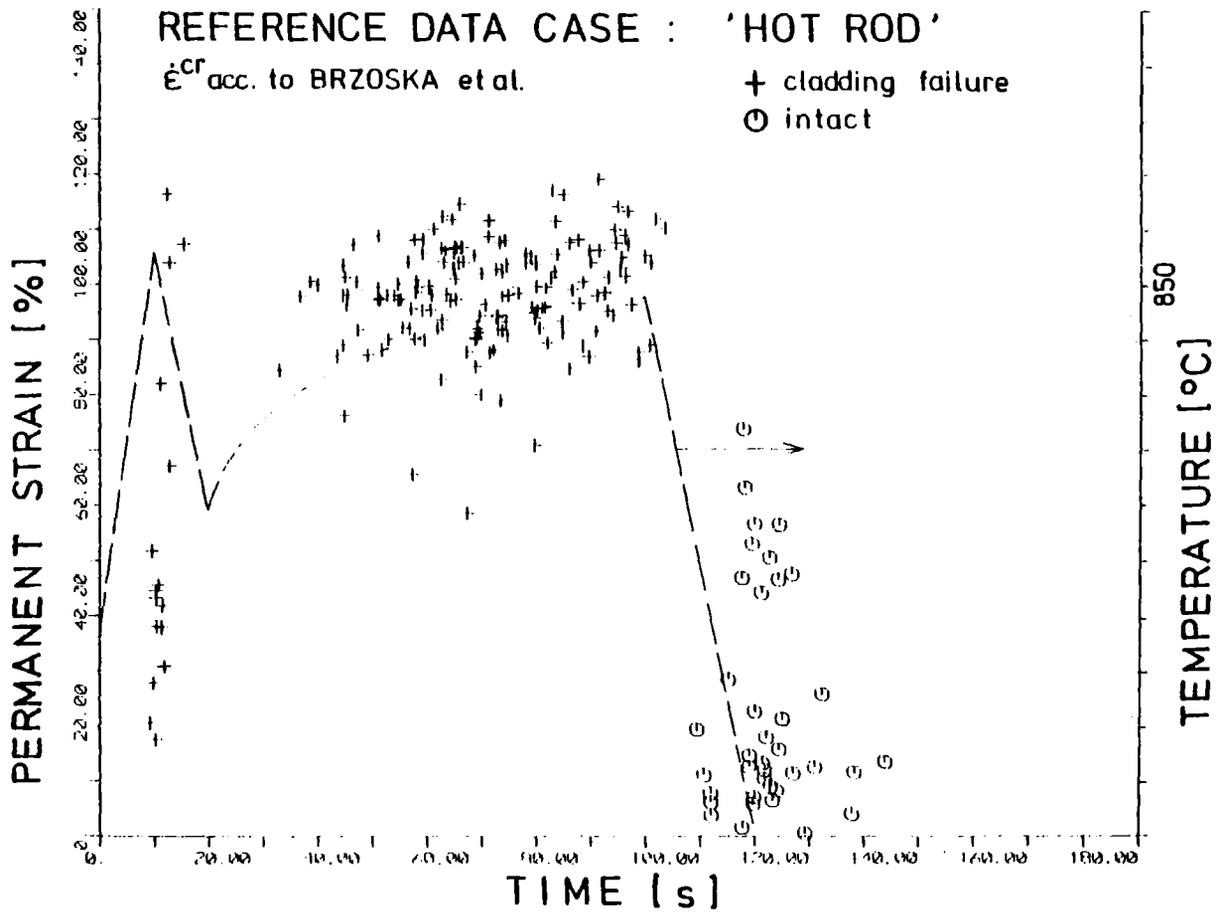


Abb.13 : Bleibende Dehnung in der Hülle als Funktion der Zeit für 'Heißstab' (nach [9]).

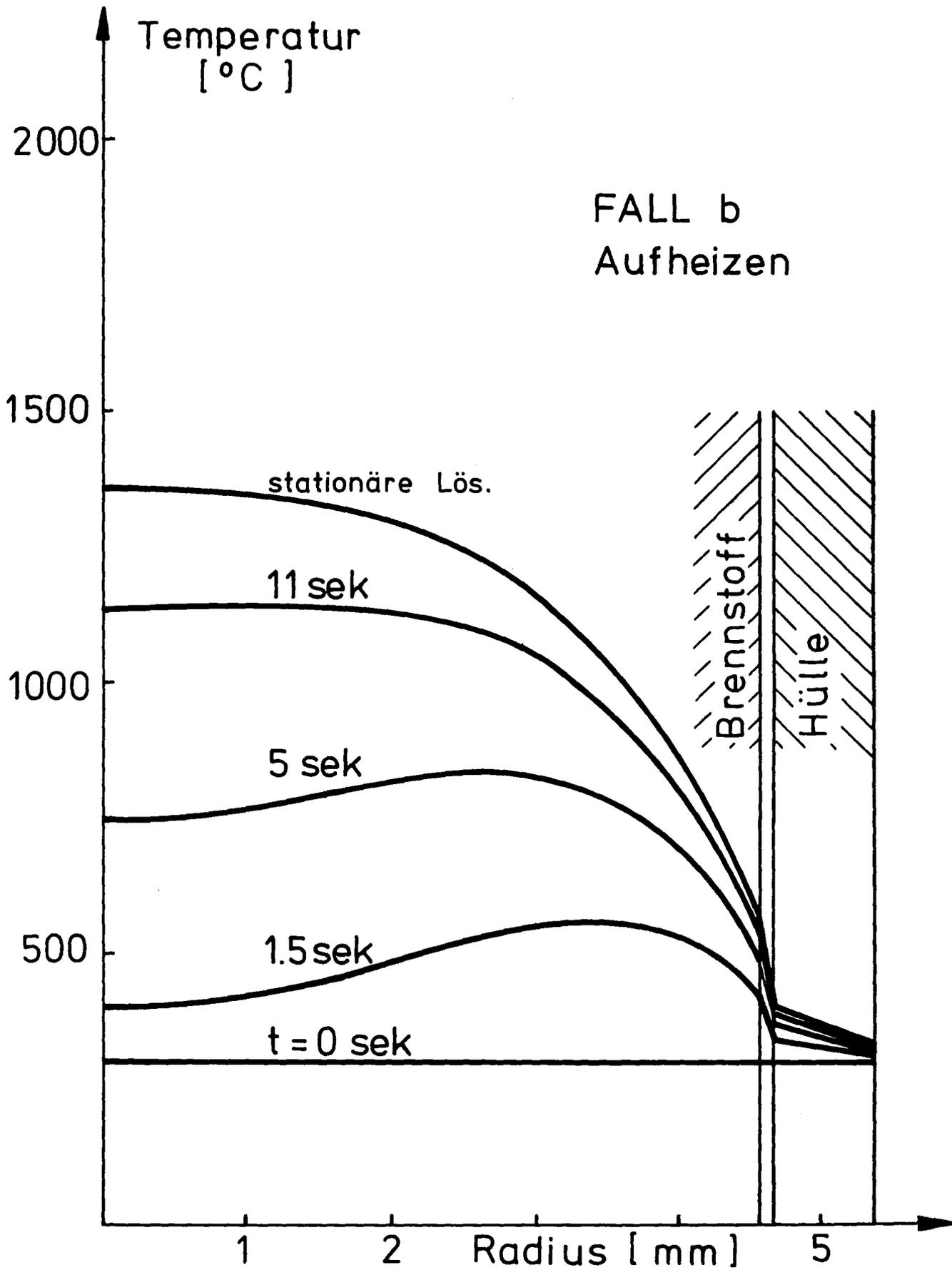


Abb.14 : Radiale Temperaturverteilung als Funktion der Zeit für einen Aufheizvorgang (nach [7]).

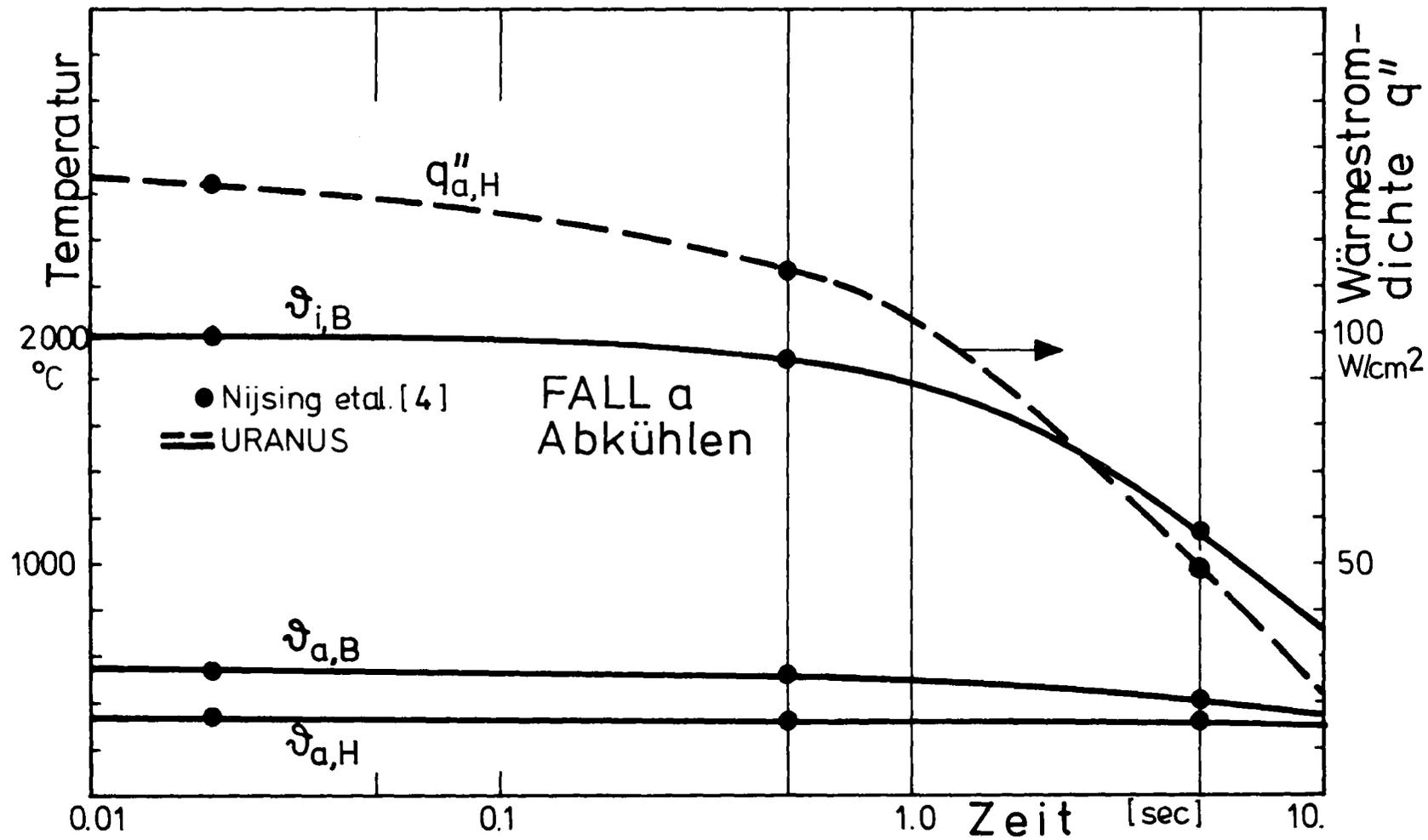


Abb.15 : Temperaturen und Wärmestromdichte als Funktion der Zeit bei einem Abkühlvorgang (nach [7])

Diskussion nach Vortrag Laßmann

Dr. Kummerer: Meine Frage nach dieser sehr guten und geschlossenen Darstellung, welche auch die Lücken und Unvollkommenheiten mit einschloß, zielt nicht auf irgendeine Einzelheit, sondern auf die weitere Entwicklung des ganzen URANUS-Systems. Es ist noch viel "Auffüllarbeit" zu leisten.

Herr Humbach, Sie haben angedeutet, daß Herr Laßmann diese Arbeit hier nicht mehr weiterführen wird. Wie stellen Sie sich diese Auffüllarbeit vor, insbesondere die Verifikation des Rechenprogramms, die Entwicklung der transienten Version und die Anwendung dieses statistischen Verfahrens, das vorgestellt wurde. Wie soll es weitergehen? Es scheint ein relativ hoher personeller Aufwand nötig zu sein.

Dr. Laßmann: Zunächst einmal werden Sie noch im Vortrag von Herrn Preußner sehen, daß wir an das Bisherige anknüpfen, und daß wir versuchen, diese Arbeiten weiterzuführen. Ich glaube, daß wir - bedingt durch den personellen Wechsel - mit einer Lücke von einem halben bis einem Jahr rechnen müssen. Erst dann können wieder weitere Fortschritte erzielt werden, denn so lange dauert es sicherlich, bis man im Detail die verschiedenen Aspekte der Versionen versteht. Es geht also nicht darum, nur ein Modell an einer Stelle einzubauen, sondern Sie haben sehr richtig gesagt, Auffüllarbeiten an verschiedenen Teilen sind zu leisten, und wann das nun wirklich gemacht werden kann, kann ich nicht prognostizieren.

Dr. Kummerer: Können wir damit zufrieden sein? Für die Leichtwasser-Version, die Sie richtigerweise in den Vordergrund stellen, ist eine Verifikation an Hand der Halden-Experimente versucht worden. Eine weitere Nachprüfung ist doch nur möglich, wenn von Industrieseite weitere experimentelle Ergebnisse zur Verfügung gestellt werden. Sehe ich das so richtig?

Dr. Laßmann: Ja, wir haben hier mehr die Aufgabe gehabt, die Methoden selbst zu entwickeln. In diesem Zusammenhang muß ich Herrn Dr. Karsten danken, der für diese methodischen Arbeiten viel Verständnis hatte. Die noch anstehende Arbeit können wir nicht allein tun. Vor allem ist die Nachrechnung von Hunderten von Experimenten ohne direkten Zugang zu Experimenten unmöglich. Wir haben deshalb

versucht, Partner zu finden, die uns diese Arbeit abnehmen, und die nachher mit den speziellen Teilen dieses Codes auch wirklich arbeiten wollen.

Prof. Humbach: Die Frage, die Sie an mich gerichtet haben, wenn ich Sie, Herr Dr. Kummerer, noch einmal als Hoffnung ansprechen darf: es ist ganz klar, daß dieser Personalwechsel uns große Schwierigkeiten bereitet. Ich glaube nicht, daß die neuen Mitarbeiter bis zum Ende des Jahres - ich will es mal etwas salopp ausdrücken - das Format von Herrn Laßmann erreicht haben können. Herr Laßmann arbeitet 5 Jahre an seinem Problem, da ist es keine Frage, daß die Einarbeitung nicht innerhalb von 9 Monaten möglich ist. Aber die Kenntnisse werden soweit übertragen, daß eine weitere Arbeit hier im Hause glatt weitergehen kann. Außerdem besteht die Hoffnung, daß Herr Laßmann in einer Funktion landet, die die weitere Zusammenarbeit ermöglicht, so daß er die Arbeiten in gewissem Sinne aus der Ferne noch weiter betreuen kann. Ist das eine ungefähre Antwort auf Ihre Frage, Herr Kummerer?

Dr. Kummerer: Ich entnehme dem, daß das Institut an dem Thema selbst weiterarbeiten will (Humbach: Aber ja!) und auch im Rahmen von Studien-, Diplomarbeiten und Dissertationen Teilbeiträge zur Auffüllung dieses ganzen Netzwerkes leisten möchte.

Prof. Humbach: Auf jeden Fall, Sie werden dies nachher in einem Vortrag von Herrn Preußner noch hören.

Dr. Steinbock: Bei der Lösung der transienten Wärmeleitungsgleichung treten an Materialgrenzflächen Schwierigkeiten auf, wenn man z.B. finite Differenzverfahren anwendet. Welches Verfahren haben Sie angewendet, und traten die Schwierigkeiten bei Ihnen auch auf?

Dr. Laßmann: Das gewählte Verfahren beruht auf einer geschlossenen Lösung für dünne Zylinderschalen, die aufgrund der räumlichen Diskretisierung sowieso vorhanden sind. Die Lösung ist formal mit einer geschlossenen Lösung des stationären Problems identisch. Ich möchte jetzt ungern auf die Details eingehen und Sie auf die Arbeit zur transienten Version selbst hinweisen, in der die grundlegenden Gleichungen ausführlich dargestellt sind. Wir haben darüber

hinaus eine analytische Näherungslösung entwickelt und haben diese geschlossene Lösung und die numerische Lösung miteinander verglichen. Die Probleme, die auftraten, waren numerische Instabilitäten, die wir allerdings vollständig lösen konnten. Die von Ihnen angesprochenen Schwierigkeiten traten vielleicht deshalb nicht auf, weil wir dem Gas keine hohe Wärmekapazität zugebilligt haben und das Gas einfach vernachlässigt haben.

Dr. Kuczera: Ich habe noch eine Frage zum transienten Modell: wieweit haben Sie vor, den Brennstoff in seiner geschmolzenen Form zu beschreiben?

Dr. Laßmann: Das wird von der Entwicklung abhängig sein, wir berücksichtigen derzeit das Materialverhalten im geschmolzenen Zustand fiktiv, indem wir sagen, ein geschmolzener Zustand läßt sich in Form eines niedrigen E-Moduls interpretieren. Es ist derzeit nicht daran gedacht, axiale Materialtransportphänomene zu berücksichtigen. Ich weiß, daß Sie in Ihrem Code BREDA in dieser Hinsicht ein Stück weiter sind. Die Problematik von geschmolzenem Brennstoff und axialem Materialtransport können wir vielleicht im nächsten Jahr angehen; ich spreche dabei für das Institut. Wir hatten bis zum Ende 1978 nur die Aufgabe, eine erste Programm-Version zu erstellen, mit der Störfälle vorausgelegt werden können.

Herr Plitz: Das gezeigte Dia zum EPRI-Vergleich, auf dem mit verschiedenen Programmen berechnete Brennstoffzentraltemperaturen für das Experiment IFA-418 dargestellt waren, hat mich etwas überrascht. Wie sind die großen Unterschiede in den berechneten Zentraltemperaturen - ich habe im Gedächtnis knapp 1600 Grad als URANUS-Ergebnis und etwa 4000 Grad als maximal anderswo berechnetes Ergebnis - zu erklären?

Dr. Laßmann: Zunächst muß betont werden, daß das URANUS-Ergebnis in der Mitte der Ergebnisse anderer Modelle lag, und nur ein einziges Modell extrem davon driftete, nämlich das GAPCON-Modell. Dies war auf eine sehr hohe Spaltgasfreisetzung zurückzuführen. Im übrigen sind die dargestellten URANUS-Ergebnisse noch nicht die endgültigen Berechnungen, weil wir das Nachverdichtungsverhalten, so wie es der Code-Vergleich als Eingabe vorschreibt,

noch nicht voll berücksichtigen konnten. Hier ist die Eingabevorschrift, wie dieser Code-Vergleich durchzuführen ist, unvollständig, so daß wir bislang nur vorläufige Rechnungen durchgeführt haben.

Dr. Többe: Ist es richtig, daß bei diesem Vergleich der Codes im wesentlichen diese Unterschiede durch den Wärmeübergang im Spalt bestimmt werden, und daß durch die Ähnlichkeit der Wärmeübergangsmodelle in URANUS und COMETHE diese gute Übereinstimmung zwischen beiden Codes zustande kommt?

Dr. Laßmann: Das Wegdriften der GAPCON-Kurve ist eindeutig auf die Spaltgasfreisetzung zurückzuführen. Man hat eine wesentlich höhere Spaltgasfreisetzung prognostiziert, die den Wärmeübergang verschlechtert hat. Dadurch stiegen die Temperaturen noch mehr an und die Spaltgasfreisetzung wurde noch größer. Ihre Frage, ob das allein an einem Modell hängt, kann so jedoch nicht beantwortet werden, weil diese Modelle in einer komplizierten Wechselwirkung stehen. Wir sehen dies in einem ganz anderen Fall sehr deutlich. Wir hatten vorhin beim Code-Vergleich zwischen GAPCON und URANUS gesehen, daß beide Codes in der Lage waren, übereinstimmende Temperaturen zu berechnen. Im hier diskutierten EPRI-Fall liegen GAPCON und URANUS um 'Größenordnungen' auseinander. Ich habe in meinem Vortrag bewußt den krassesten Fall ausgewählt, es gibt andere Diagramme der Temperatur an anderen Stabpositionen und an anderen Datenfällen, die sehr viel bessere Übereinstimmung zeigen. Allgemein kann man vielleicht zu diesem EPRI-Code-Vergleich die Aussage machen, daß Unsicherheiten von $\pm 25\%$ bei ca. 1600°C Zentraltemperatur nicht tolerierbar sind. Über die Qualität der Codes muß man also sicherlich noch mehr nachdenken. Man kann - um dies abschließend zu sagen - also eine Abweichung oder eine Übereinstimmung nicht auf ein einzelnes Modell zurückführen. Es gibt z.B. Codes, die ein relocation-Modell enthalten, das sehr große Verschiebungen der Tablette bewirkt, und damit einen guten Wärmedurchgang im Spalt liefern, andere Codes enthalten überhaupt kein relocation-Modell und kommen trotzdem zur gleichen Zentraltemperatur.

Dr. Caligara: Sie sagen, daß man die hohe Zentraltemperatur durch die Gasfreisetzung bekommt, warum nicht umgekehrt?

Dr. Laßmann: Sie haben recht, ich hätte es umgekehrt formulieren sollen.

Mehrdimensionale Berechnung des Brennstabes
nach der Finit-Element-Methode

H. Fabian

1. Einführung: Konzept einer Gesamtanalyse des Brennstabes

Der zweite Schwerpunkt der hier am Institut für Reaktortechnik (IRT) gepflegten Brennstab-Analyse liegt in der mehrdimensionalen Berechnung des Brennstabes nach der Finit-Element-Methode. Zunächst vorab einige Bemerkungen zur Brennstab-Philosophie, aus der die Motivation zu dieser Arbeit abgeleitet wurde.

Alle Bemühungen zum Verständnis des Verhaltens von Brennstäben haben letztlich zum Ziel, die mechanische Integrität der Hülle über die gesamte Einsatzzeit hinweg sicherzustellen. Sie muß unter allen Reaktorbetriebsbedingungen einschließlich der Auslegungsfälle gewährleistet sein. Um die realen Verhältnisse am Brennstab zu erfassen, müssen neben der Mehrdimensionalität der Struktur eine ganze Reihe von Einflußgrößen berücksichtigt werden. Diese sind verschiedenen Ursprungs, im einzelnen z.T. sehr komplex und beeinflussen sich u.U. gegenseitig. Mit einem einzigen Rechenprogramm ist eine komplette Analyse schon aus rechentechnischen Gründen nicht möglich. Zur Lösung des Problems bietet sich eine Teilung der Aufgabe an:

1. Eine Auslegungsrechnung, bei der primär das Materialverhalten im Vordergrund steht und die notgedrungen auf einer relativ einfachen Mechanik basiert. Als mechanisches Modell dient dabei fast ausschließlich der ebene Schnitt durch einen rotations-symmetrischen Brennstab, also ein eindimensionales Modell mit einer unabhängigen Variablen in radialer Richtung.
2. Eine Auslegungsrechnung, bei der primär ein komplexes mechanisches Verhalten der Struktur interessiert und die sich dafür nur auf die wesentlichen, zur technologischen Relevanz notwendigen, Materialphänomene stützt. Die hier verwendeten mechanischen Modelle sind mehrdimensional.

Beide Rechnungen sind gleichermaßen notwendig und ergänzen sich gegenseitig zur Gesamtanalyse des Brennstabverhaltens.

Diese Überlegungen führten bereits vor Jahren dazu, daß die beiden,

vom IRT vorgeschlagenen theoretischen Arbeiten in den Kooperationsvertrag mit dem Projekt Schneller Brüter - PSB - aufgenommen wurden. In einem Konferenzbeitrag von Kummerer/Elbel [KumE 76] über "Neuere Tendenzen in der Brennstabmodelltheorie" vom Nov.76 wird dieses Konzept bestätigt.

Ein qualitativer Vergleich der aus der Literatur bekannten Brennstabcodes in Bezug auf die Komplexität des Materialverhaltens und die Komplexität der mechanischen Beschreibung des Problems wurde von K. Laßmann [Laß 77] erarbeitet und auf der SMIRT-4 Tagung diskutiert.

Er ist in Abb.1 dargestellt und weist auf die relativ große Anzahl von Programmen im eindimensionalen (1-D) Bereich hin. Diese Codes berücksichtigen z.T. ein sehr komplexes Materialverhalten. Im mehrdimensionalen Feld zeigt sich ein Mangel an verfügbaren Codes. Hier sind die beiden im Rahmen des Vertrages erstellten Programme ZIDRIG und FINEL einzuordnen. Die vertikale Einstufung der beiden Programme fällt durch die grobe Klassifizierung zu Ungunsten dieser aus, da in ihnen enthaltene Einzelaspekte des Bestrahlungsverhaltens nicht berücksichtigt werden. Das mit 'constant CPU-time' ange deutete Rechenzeitverhalten weist bereits auf die rechentechnischen Schwierigkeiten mehrdimensionaler Systeme hin.

Es soll hier nicht der Eindruck erweckt werden, daß bisher keine mehrdimensionalen Rechnungen zum Stabverhalten existieren. Doch diese wurden jeweils für einen speziellen Detailaspekt durchgeführt und verwenden eine problemorientierte Lösungsmethode, deren Einsatzbereich entsprechend begrenzt ist. Hierzu zählen z.B. die Arbeiten von Malmberg [Mal 71] und Laßmann [Laß 73] zum Phänomen des Kriechbeulens von zylindrischen Brennstäben oder auch die von Steinbock [Ste 78] in jüngster Zeit durchgeführten Finit-Element-Rechnungen zum Defektwachstum von Brennstäben.

2. FEM-Programmsysteme

Die Aufgabenbereiche mehrdimensionaler Programmsysteme sind entsprechend dem Bemühen um ein besseres Verständnis des Verhaltens von Brennstäben in drei wichtigen Aspekten zu sehen:

Aufgabenbereiche der mehrdimensionalen Berechnung des Brennstabes

1. Auslegungsrechnung unter Berücksichtigung der realen Geometrie und Belastung am Brennstab
 - a. konstruktive Gegebenheiten
 - z.B. Hüllrohre mit integralen Rippen
 - Endstopfen
 - Abstandhalterkräfte
 - Brennstofftablette
 - Azimutale Temperaturschwankung
 - mechanische Wechselwirkung zw. Tablette und Hüllrohr
 - b. Abweichung der Geometrie und Belastung von den Idealbedingungen
 - z.B. Geometrietoleranz (Ovalität, Exzentrizität)
 - lokale Störung im Temperaturverlauf
 - Bambuseffekt
 - Belastung durch Brennstoffbruchstücke
 2. Abschätzung der Grenzen und Verbesserung der eindimensionalen, mechanischen Modelle in integralen Codes
 - z.B. bei mechanischer Wechselwirkung u. lokalen Belastungen
 3. Auslegung und Auswertung von Experimenten
 - z.B. bei spezieller Probenform u. Belastung
-

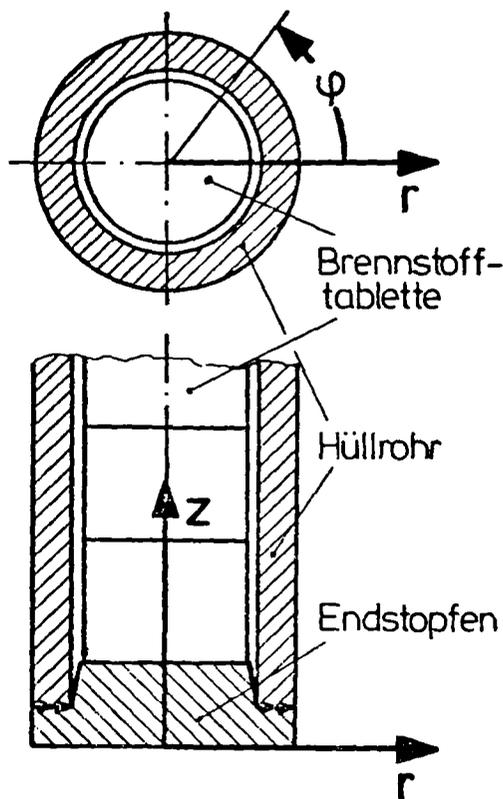
Durch die Anwendung der Programme für die verschiedenen Aspekte und die darin enthaltenen Teilprobleme muß ein möglichst hoher Grad an Allgemeingültigkeit gegeben sein.

Die Frage nach der anzuwendenden Lösungsmethode, die der Forderung nach Mehrdimensionalität und Allgemeingültigkeit nachkommt, wurde zugunsten eines rein numerischen Verfahrens entschieden, der Finit-Element-Methode (FEM) [Zie 71].

Bei der Wahl des mechanischen Modells des Brennstabs muß beachtet werden, daß eine mehrdimensionale Strukturberechnung immer einen erhöhten mathematischen Aufwand erfordert, wie bereits zuvor in Abb.1 angedeutet. Dieser steigt bei zeitabhängigen Problemen stark an. In Anbetracht dessen und auch im Sinne der Eindeutigkeit der Ergebnisse werden hier zwei Konzeptvarianten mit unterschiedlichen zweidimensionalen mechanischen Modellen verwendet.

Zweidimensionale Berechnung des Brennstabes
nach der Finit-Element-Methode

Mechanische Modelle



Konzept A:

Stabquerschnitt

r und φ als unabhängige Variable
(z=konst.)

Programm: ZIDRIG

Konzept B:

Stablängsschnitt

r und z als unabhängige Variable
(φ =konst., Rotationssymmetrie)

Programm: FINEL

Beschreibung einer unsymmetrischen Belastung durch eine Fourierreihe: halbanalytische Berechnung des rotationssymmetrischen Brennstabes unter beliebiger Belastung

r, z und φ als unabhängige Variable, dreidimensionales Programm FINFOU

Strukturdehnungen

$$\{\varepsilon(r, \varphi, z, t, u)\} = \{\varepsilon^{el}\} + \{\varepsilon^{\nu}\} + \{\varepsilon^{cr}\} + \{\varepsilon^{sw}\} + \{\varepsilon^{pl}\} + \{\varepsilon^f\}$$

Die Strukturberechnung ist:

- räumlich zweidimensional in $\begin{cases} r, \varphi \\ r, z \end{cases}$ Ebene
- nichtlinear durch Materialgesetze
- nichtlinear durch große Verschiebungen
- zeitabhängig (instationär)

Eine Erweiterung der rotationssymmetrischen Stabberechnung durch die Beschreibung einer unsymmetrischen Belastung in einer Fourierreihe ermöglicht eine halbanalytische Berechnung des rotationssymmetrischen Brennstabes unter beliebiger Belastung. Dieses Konzept wurde im Programm FINFOU verwirklicht. Diese Lösung ist dreidimensional.

Der eindimensionale Fall ist selbstverständlich als einfachste Lösung in jeder mehrdimensionalen Rechnung enthalten.

Die FEM basiert auf einer räumlichen Diskretisierung der Struktur durch einzelne Elemente, wie später noch am konkreten Fall zu sehen ist. Als Grundtyp werden hier in beiden Fällen Simplex-Elemente, also dreieckige Elemente, verwendet. Für Konzept A sind diese in ebener Form, für Konzept B als rotationssymmetrisches Ringelement ausgeführt. Damit können die beiden Programme weitgehend analog aufgebaut werden.

Die Elemente enthalten jeweils zwei räumlich unabhängige Variable, in radialer und azimuthaler, bzw. in radialer und axialer Richtung. Das Programm FINFOU wird hier zunächst ausgeklammert.

Als mechanische Grundgrößen sind die elastischen $\{\varepsilon^e\}$, die thermischen $\{\varepsilon^t\}$ und die irreversiblen Dehnungen durch das nichtlineare Materialkriechen $\{\varepsilon^c\}$ explizit enthalten. Damit sind vom Materialverhalten und vom mechanischen Vorgehen her gesehen die wichtigsten Größen zur Berechnung des Brennstabes vorhanden. Das Materialschwellen $\{\varepsilon^s\}$, die Plastizität $\{\varepsilon^p\}$ und die rißbedingten Dehnungen $\{\varepsilon^r\}$ wurden ebenso wie das Kriechen durch ein, wie es in der FEM genannt wird, "inkrementelles Vordehnungsverfahren" behandelt.

Mit Hilfe dieses inkrementellen Vorgehens kann mit jedem Schritt die aktuelle Geometrie der Struktur berücksichtigt werden, so daß das geometrisch nichtlineare Verhalten durch die großen Verschiebungen ebenfalls erfaßt wird.

Die zur Berechnung des Kriechens notwendige Zeitstruktur des Programmes wird gleichzeitig zur Behandlung der instationären Belastung genutzt.

Hinsichtlich des methodischen Vorgehens und der programmtechnischen Verwirklichung enthalten die Programme einige Feinheiten um den großen Rechenaufwand der mehrdimensionalen und zeitabhän-

gigen Strukturanalyse zu reduzieren. Eine, vielleicht die wichtigste, soll hier herausgestellt werden. Die Güte der Lösung bei inkrementellen Rechenverfahren hinsichtlich Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit hängt in entscheidendem Maße von der Größe der Zeitintervalle ab. Diese werden bei der Berechnung des Brennstabs im wesentlichen durch das Kriechen bestimmt. In den hier erstellten Programmen wird die Länge des Zeitschritts automatisch berechnet und damit dem jeweils aktuellen Belastungsstand der Struktur angepaßt. Insgesamt gewinnt dadurch die Lösung natürlich auch an Stabilität.

Mit diesen beiden praktisch identisch aufgebauten Programmen kann nun ein ganzer Komplex von mehrdimensionalen Fragestellungen zur mechnischen Auslegung von Brennstäben diskutiert werden.

3. Anwendung der FEM-Programme

Die beiden Programme wurden bereits für eine Reihe von Anwendungsfällen eingesetzt, auf die hier nicht alle eingegangen werden kann. Zum Teil wurde darüber bereits in unserem letzten Statusbericht in Karlsruhe referiert [FabK 76]. Hier sollen nur einige Beispiele herausgegriffen werden.

3.1. Das Programm ZIDRIG

Das im Programm ZIDRIG verwendete Brennstabmodell des Stabquerschnittes mit r und φ als unabhängigen Variablen, siehe Skizze 1, ist in hervorragendem Maß geeignet, den Einfluß der Abweichung der Geometrie des Hüllrohres von den Idealbedingungen z.B. durch Exzentrizität und Ovalität auf die Standzeit zu untersuchen.

In Abb.2 ist ein hierzu durchgeführter Vergleich festgehalten. Es sind dort die Standzeiten eines rotationssymmetrischen Rohres t_{sa}^o mit denen ovaler und exzentrischer Rohre verglichen. Als Belastung wurde Außendruck $p_a=100$ [bar] und als Standzeitkriterium eine bleibende Dehnung $\epsilon_y^r = 0,5$ [%] gewählt.

Es zeigt sich, daß das ovale Rohr, dessen Ovalitätsform durch die erste Oberwelle ($\cos 2\varphi$) beschrieben wird, nur etwa $t_s = 0,37 \cdot t_{sa}^o$ der Standzeit des rotationssymmetrischen Rohres t_{sa}^o erreicht.

Der Einfluß der Ovalität höherer Ordnung, hier der Form $\cos 4\varphi$, ist dagegen mit $t_s = 0,88 \cdot t_{sa}^0$ praktisch unbedeutend. Gleiches gilt für die Exzentrizität, die mit $t_s = 0,95 t_{sa}^0$ schon gar nicht ins Gewicht fällt.

Auch bei Innendruck stimmen diese Relationen untereinander, jedoch ist der Einfluß betragsmäßig geringer.

Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Spezifikation der Ovalität wesentlich schärfer ausfallen muß als die der Exzentrizität des Rohres. Eine genaue Abstimmung der beiden kann mit derartigen Analysen vorgenommen werden.

In unserem letzten Statusbericht wurde eine Erweiterung des Programmes ZIDRIG angekündigt, um auch Hüllrohre mit integralen Rippen in die Berechnung einzubeziehen. Durch die Unterschiede bezüglich Form und Anzahl der Rippen war eine erhebliche Erweiterung desjenigen Programmteiles notwendig, der die automatische Diskretisierung der Struktur vornimmt, und außerdem bedurfte es natürlich einer Abstimmung der gesamten Programmtechnik.

In Abb.3 ist die Strukturunterteilung eines Ausschnittes eines Rohres mit 6 integralen Rippen dargestellt. Im Rippenteil selbst wurde eine feinere Diskretisierung als im Glattrohrteil gewählt, um die Spannungsgradienten in diesem Bereich genauer zu erfassen. Die mit diesem Modell errechneten Vergleichsspannungen bei einem Innendruck von $p_i = 70$ [bar] und einer konstanten Temperatur von $\vartheta = 450$ [°C] sind in Abb.4 dargestellt. Ihr Maximum liegt eindeutig im Rippengrund an der Innenseite des Rohres. Der Rippenkopf ist praktisch spannungslos. Aus diesem Grunde ist auch die Höhe der Rippe, wenn sie größer als die Wandstärke selbst ist ($h_r > s$), spannungsmäßig bedeutungslos. Die betrachtete Rippenform ist in ihrem Fuß gut ausgerundet, so daß keine Kerbwirkung auftritt, die u.U. dort zu erheblichen Spannungen führen kann. Im Glattrohrteil verläuft der radiale Gradient der Spannungen wesentlich flacher als im Rippenteil und hat außerdem ein entgegengesetztes Vorzeichen. Insgesamt ist also die Spannungsverteilung im Rohr durch die Rippen sehr ungleichmäßig geworden. Ein Vergleich der mit ZIDRIG berechneten und aus spannungsoptischen Aufnahmen, nach Krieg [Kri 72] gewonnenen Spannungsverteilung, zeigt qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung. Die zuvor beschriebenen Effekte

werden hierdurch voll bestätigt.

Die beiden Zeichnungen: Strukturunterteilung und Spannungsverteilung in der verformten Struktur wurden vom post-processing-Programm ZPILO [Fab 77] erstellt. ZIPLO dient ebenso wie FINPLO zur Auswertung und Darstellung der mit den FEM-Programmen errechneten Strukturunterteilungen, Verformungen und Spannungen. Beispielsweise zeichnet das Programm bei Vergabe der gewünschten Anzahl von Spannungsniveaus die Isodynen in der Struktur selbsttätig. Derartige Programme sind gerade bei FEM-Rechnungen notwendig, da durch die räumliche Diskretisierung der Struktur große Datenmengen anfallen, die so übersichtlicher und einfacher aufbereitet werden.

Für die technische Anwendung dieses Hüllrohrtypes ist die Frage nach dem Einfluß auf die Standzeit des Brennstabes von großem Interesse. In Abb.5 sind die Standzeiten (Standzeitkriterium:

$\epsilon_y^r \leq 5\%$) von Hüllrohren mit ovaler Basisgeometrie bei unterschiedlicher Anzahl, Lage und Form der Rippen gegenübergestellt. Insgesamt ergibt sich eine Schwankungsbreite von $t_s/t_s^0 \approx 25\%$ zu der Standzeit t_s^0 des unberippten Rohres. Für ein Rohr mit 6 Rippen ist die Schwankung geringer, etwa nur $t_s/t_s^0 \approx \pm 15\%$.

Die Nachrechnung der Experimente zum Standzeitverhalten berippter Hüllrohre von Kaupa [Kau 71] liefert, wie die Abb.6 zeigt, eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die einem experimentell gewonnenen Ergebnis anhaftenden Unsicherheiten lassen keinen Unterschied mehr zwischen den verschiedenen Rohrtypen erkennen.

Eine Verbesserung der Standzeit eines Hüllrohres durch integrale Rippen ist wirklich nur dann zu erzielen, wenn die Rippen in ihrem Fuß konstruktiv gut ausgebildet, d.h. ausgerundet sind. Diese Form hat allerdings den Nachteil, daß sie zu einer Überhöhung der Temperatur im Rippengrund des Rohres führt. Insgesamt gesehen muß der Einsatz dieses Rohrtypes also sehr sorgfältig hinsichtlich verschiedener Kriterien abgewogen werden.

Die hier angesprochenen Beispiele zeigen, daß das Programm ZIGRIG zur Berechnung nahezu jeder beliebigen Form eines Hüllrohres eingesetzt werden kann. Die technisch wichtigen Konturen sind bereits direkt im Programm enthalten. Dies ist durch die verwendete Rechenmethode, die FEM, praktisch keinen Beschränkungen unterworfen.

3.2 Das Programm FINEL

Auch das Programm FINEL wurde bereits für eine Reihe von konkreten Auslegungsfällen eingesetzt:

1. Die Beanspruchung des Hüllrohres im Bereich des Endstopfens, ein Stabrandproblem also, wurde diskutiert.
2. Das Verhalten des Hüllrohres bei Kühlmittelverlust wurde berechnet. Das Problem stellt durch die stark instationäre Belastung, die großen Verschiebungen (ballooning) und die hohen Kriechgeschwindigkeiten Anforderungen an ein Rechenprogramm, die weit über den üblichen Rahmen hinausgehen.
3. Das mechanische Verhalten der Brennstofftablette wurde analysiert. Dabei führt die große thermische Beanspruchung zum Plastifizieren und zur Ribbildung in dem Pellet.
4. Die mechanische Wechselwirkung zwischen Tablette und Hüllrohr wurde betrachtet. Die lokale Belastung des Hüllrohres durch die verformte Tablette führt dabei zu einer bambusartigen Oberfläche des Brennstabes.

Auf die ersten beiden Anwendungen wurde bereits in unserem letzten Statusbericht eingegangen [FabK 76].

Heute soll die zweidimensionale Berechnung einer UO_2 -Brennstofftablette im Vordergrund stehen, deren Verformung für die mechanische Wechselwirkung zwischen Pellet und Hüllrohr ganz entscheidend ist.

Der große radiale Temperaturgradient im Brennstoff führt bekanntermaßen zu erheblichen Spannungen. In Abb.7 ist der radiale Verlauf der Temperatur und der thermoelastischen Spannungen in der Mittelebene der Tablette dargestellt. Diese Verläufe decken sich mit den eindimensionalen Rechnungen. Der Bereich bis zur Fließgrenze σ_{VF} des Materials ist schraffiert dargestellt. Er liegt weit unterhalb der berechneten Vergleichsspannungen $\bar{\sigma}_V$.

Die Verteilung der Tangentialspannung $\sigma_{\varphi}^{t,el}$ im gesamten Pellet ist in Abb.8 anhand von Isodynien dargestellt. Im Kern der Tablette bildet sich eine Zone mit Druckspannungen aus, zur Oberfläche der der Tablette hin wirken Zugspannungen. Ein Maximum der Spannungen befindet sich an der Tablettenkante.

Die Temperatur bewirkt eine Aufwölbung der Tablette an den Stirnseiten. An den Tablettenkanten kommt es durch den freien Rand an der Stirnseite zu einer größeren Radialverschiebung als an der Außenseite der Mittelebene; diese Differenz wird in der Brennstabmodelltheorie 'ridge height' genannt. Durch die angedeutete Lage des Hüllrohres ist in der Abb. der lokale Kontakt mit dem Hüllrohr zu erkennen, der schließlich dort zum Bambuseffekt führt. Durch die Höhe der Spannungen reicht die thermoelastische Analyse zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Tablette alleine nicht mehr aus. Der Einfluß des Plastifizierens und der Ribbildung muß berücksichtigt werden. Das Programmsystem URANUS von Laßmann [Laß 78] enthält zur Beschreibung der Fließ- und Bruchmechanik des Brennstoffes ein eigens auf dieses Problem abgestimmtes Modell. Die plastischen Dehnungen $\{\epsilon^p\}$ werden dabei nach den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Fließmechanik berechnet. Das Reißen wird über fiktive Dehnungen $\{\epsilon^f\}$ berücksichtigt. Diese Behandlung kommt den in FINEL verwendeten Ringelementen sehr entgegen. Die ribbedingten Dehnungen werden also in den einzelnen Elementen analog den plastischen Dehnungen behandelt.

Dieser Weg stellt auch die einzige praktikable Möglichkeit dar, da einerseits die Betrachtung einer Vielzahl von einzelnen Bruchstücken einen sehr großen Rechenaufwand erfordert und andererseits keine Randbedingungen für die einzelnen Bruchstücke formuliert werden können.

Dieses fließ- und bruchmechanische Modell wurde für die Anwendung in einem zweidimensionalen Programm erweitert und den besonderen Belangen der FEM-Rechnung angepaßt.

In Abb. 9 sind die mit Hilfe dieses Modells berechneten Verformungen und die Bereiche der Ribbildung für eine Tablette mit und ohne Dish dargestellt. Als Stablängenleistung wurde wieder $Q_l = 500 \left[\frac{W}{cm} \right]$ gewählt, die mit zwei Leistungssprüngen erreicht wird, als Temperatur am Brennstoffaußenrand wurde $\vartheta_B = 500 [^{\circ}C]$ angenommen. Wenden wir uns zunächst einer Tablette mit geraden Stirnseiten zu. Das Plastifizieren und Reißen bewirkt eine zusätzliche Verformung, die in der Mittelebene etwa 30% der thermoelastischen beträgt, im Zentrum der Stirnseite sogar negativ wird und an den Tablettenkanten in radialer Richtung geringer ausfällt als in der Mittelebene.

Dadurch wird der Maximalwert der Radialverschiebung an der Kante größer, die 'ridge height' und die axiale Längung der Tablette kleiner als nach der thermoelastischen Rechnung. Da das Plastifizieren unter Volumenkonstanz abläuft, wird die zusätzliche Verschiebung praktisch nur durch das Reißen bewirkt.

Das Rißbild der Tablette weist für alle randnahen Bereiche Risse auf, lediglich im Innern bleibt ein unzerstörter Kern. Oberhalb $T = 1500 [^{\circ}\text{C}]$ kann der Brennstoff plastifizieren und auch Risse ausheilen, soweit diese durch Druck entstanden sind und somit nicht klaffen. Nach dem Temperaturprofil in Abb.7 und der Verteilung der Spannungen in Abb.8 ist dies nur im Innern der Tablette möglich. Ein Vergleich des Bereiches der Radialrisse mit den Iso-dynen der thermoelastischen Tangentialspannung zeigt, daß die Grenze des ungerissenen Bereiches gut mit der neutralen Faser $\sigma_y = 0$ übereinstimmt. Die Tiefe der Axialrisse nimmt entsprechend der Axialspannung von der Mittelebene ausgehend zu den Stirnseiten hin ab. Umfangsrisse treten bei der gewählten Leistungsgeschichte nur im Zentrum an den Stirnseiten auf, sie sind hier nicht gezeichnet.

Vergleicht man hierzu eine Tablette mit Dish, so zeigt sich lediglich ein Unterschied in der Aufwölbung an den Stirnseiten, keine Veränderung dagegen an ihren Seitenflächen, wie auch schon nach der thermoelastischen Rechnung festzustellen. Der Maximalwert der Radialverschiebung an der Kante und auch die 'ridge height' sind identisch. Die axiale Längung einer Tablette mit Dish ist immerhin um 35% geringer als für ein gerades Pellet (Verformungsmaßstab beachten!). Der Bereich der Axialrisse wird zur Stirnseite hin kleiner, da infolge des Dishes die Axialspannung geringer wird; der Bereich der Radialrisse bleibt praktisch gleich.

Einen räumlichen Eindruck von der Verformung und der konkreten Rißstruktur einer Tablette gibt abschließend zu diesem Komplex die Skizze in Abb.10 wieder. Das 'ridging' führt, wie angedeutet, im Kontaktfall zu einer bambusartigen Verformung der Brennstaboberfläche.

Zum Schluß sei noch ein kurzer Ausblick auf zukünftige Arbeiten am IRT erlaubt. Wie in der letzten Skizze angedeutet, erleidet das Hüllrohr im Kontaktfall eine bambusartige Verformung. Eine Berechnung dieses Effektes der mechanischen Wechselwirkung wurde für den thermoelastischen Fall mit FINEL bereits durchgeführt. Im Bereich der Stoßstellen der Tabletten wurden dabei im Hüllrohr Spannungsüber-

höhungen bis zum Zweifachen des Wertes in Höhe der Mittelebene errechnet. Dieses Ergebnis konnte jedoch nur mit einem sehr hohen Aufwand erzielt werden. Hier stößt die rein numerische Behandlung des Problems an rechentechnische Grenzen. Gelingt es für die Belastung des Hüllrohres infolge der Tablettenverwölbung, eventuell unter Zuhilfenahme ein- und zweidimensionaler Rechnungen, eine raum- und zeitabhängige Lastfunktion zu finden, kann das Problem mit FINEL auch unter Berücksichtigung des Kriechens gelöst werden. Hier könnte z.B. ein Schwerpunkt der zukünftigen Zusammenarbeit liegen.

Als weitere Arbeit wird eine gegenseitige Abstimmung des im IRT vorhandenen integralen Brennstabcodes URANUS und der FEM-Programme empfohlen. Hier haben sich bereits, wie das Beispiel zuvor zeigte, sehr nützliche Anwendungen ergeben: Das Modell des Plastifizierens und der Ribbildung in FINEL wurde weitgehend aus URANUS übernommen und das Modell zur "Behandlung von axialen Reibkräften in integralen Brennstabcodes URANUS" wurde mit Hilfe von FINEL erarbeitet. In dieses Aufgabengebiet fällt auch eine Vereinheitlichung der verwendeten Datensätze.

3.3. Zum Programm FINFOU

Zum Abschluß möchte ich noch kurz eine Anwendung des halbanalytischen Programms FINFOU andeuten. Eine lokale Störung der Wärmeabfuhr am Brennstab kann zu einer lokalen thermischen Belastung, einer Temperaturspitze (hot spot), führen, wie in Abb.11 angedeutet. Durch den um die azimutale Abhängigkeit erweiterten Verschiebungs- und Lastansatz in FINFOU kann nun eine derartig extreme echt dreidimensionale Belastung einer rotationssymmetrischen Struktur analysiert werden. Der hohe rechentechnische Aufwand eines rein dreidimensionalen Programmes wird mit diesem Ansatz weitgehend umgangen. Die gewonnene Lösung, auf die hier nicht näher eingegangen wird, liefert auch tatsächlich ein lokales Ausbeulen des Hüllrohres im Bereich des Temperaturpieks. Ein Vergleich dieser Lösung mit den Ergebnissen aus zweidimensionalen Berechnungen des Problems zeigt, daß die getroffenen Vereinfachungen zu einer Unterschätzung oder gar zu völlig falschen Werten der Verschiebungen und Spannungen führen. Derartig lokale Belastungen sind ausschließlich mit einer dreidimensionalen Berechnung zu analysieren.

Schlußbemerkung

Derzeit werden die Ergebnisse zur "Mehrdimensionalen Berechnung des Brennstabes nach der Finit-Element-Methode" insgesamt in einer umfassenden Arbeit zusammengestellt [Fab 78]. Mit deren Fertigstellung stehen dann auch die erarbeiteten Rechenprogramme zur Verfügung.

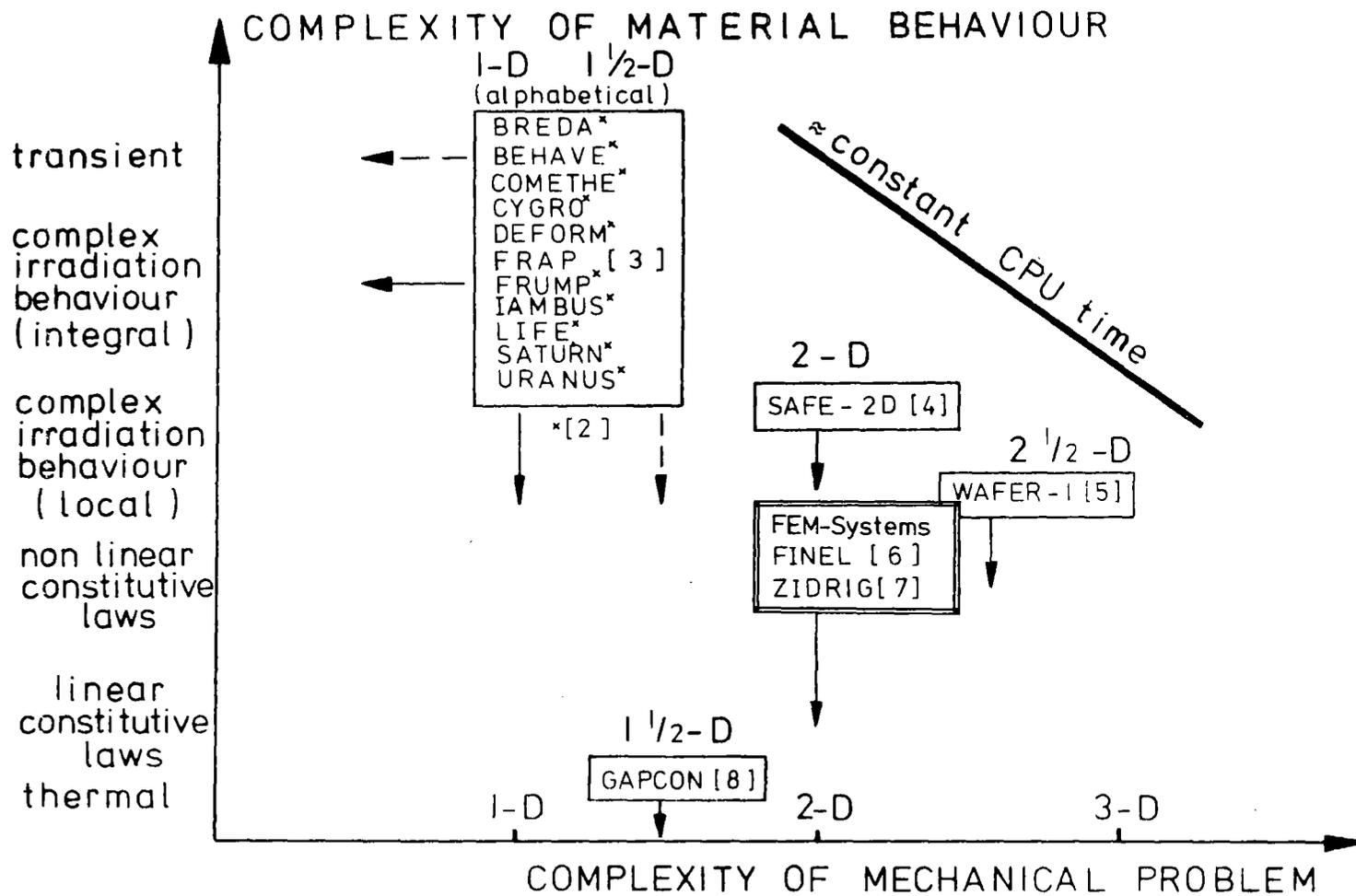


Abb.1: Vergleich von vorhandenen Codes zur Brennstabauslegung unter dem Gesichtspunkt der Komplexität des Materialverhaltens und der mechanischen Behandlung, nach Laßmann [Laß 77].

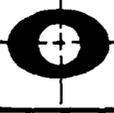
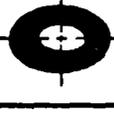
	Funktion der Hüllrohrkontur	Standzeit t_s [h]	
		Innendruck	Außendruck
	$r_a = r_a^o$	2573	2361
	$r_i = r_i^o$	Δt_{si}^o	Δt_{sa}^o
	$r_a = r_a^o$	2144	1211
	$r_i = r_i^o + f_i^o \cos 2\varphi$	$0.83 t_{si}^o$	$0.51 t_{sa}^o$
	$r_a = r_a^o + f_a^o \cos 2\varphi$	2276	1355
	$r_i = r_i^o$	$0.88 t_{si}^o$	$0.57 t_{sa}^o$
	$r_a = r_a^o + f_a^o \cos 2\varphi$	1541	877
	$r_i = r_i^o + f_i^o \cos 2\varphi$	$0.60 t_{si}^o$	$0.37 t_{sa}^o$
	$r_a = r_a^o + f_a^o \cos 4\varphi$	2321	2093
	$r_i = r_i^o + f_i^o \cos 4\varphi$	$0.90 t_{si}^o$	$0.88 t_{sa}^o$
	$r_a = r_a^o$	2403	2237
	$r_i = e_i^o \cos \varphi + \sqrt{(r_i^o)^2 - (e_i^o \sin \varphi)^2}$	$0.93 t_{si}^o$	$0.95 t_{sa}^o$

Abb. 2:

Vergleich der Standzeiten von Hüllrohren mit Ovalität und Exzentrizität.

Hüllrohrdaten entsprechen SNR-Gegebenheiten

Ovalität und Exzentrizität: $f^o = e^o = 0,01$ [mm]

Druckbelastung: $p_i = p_a = 100$ [bar]

Standzeitkriterium: $\epsilon_y^{cr} \leq 0,5$ [%]

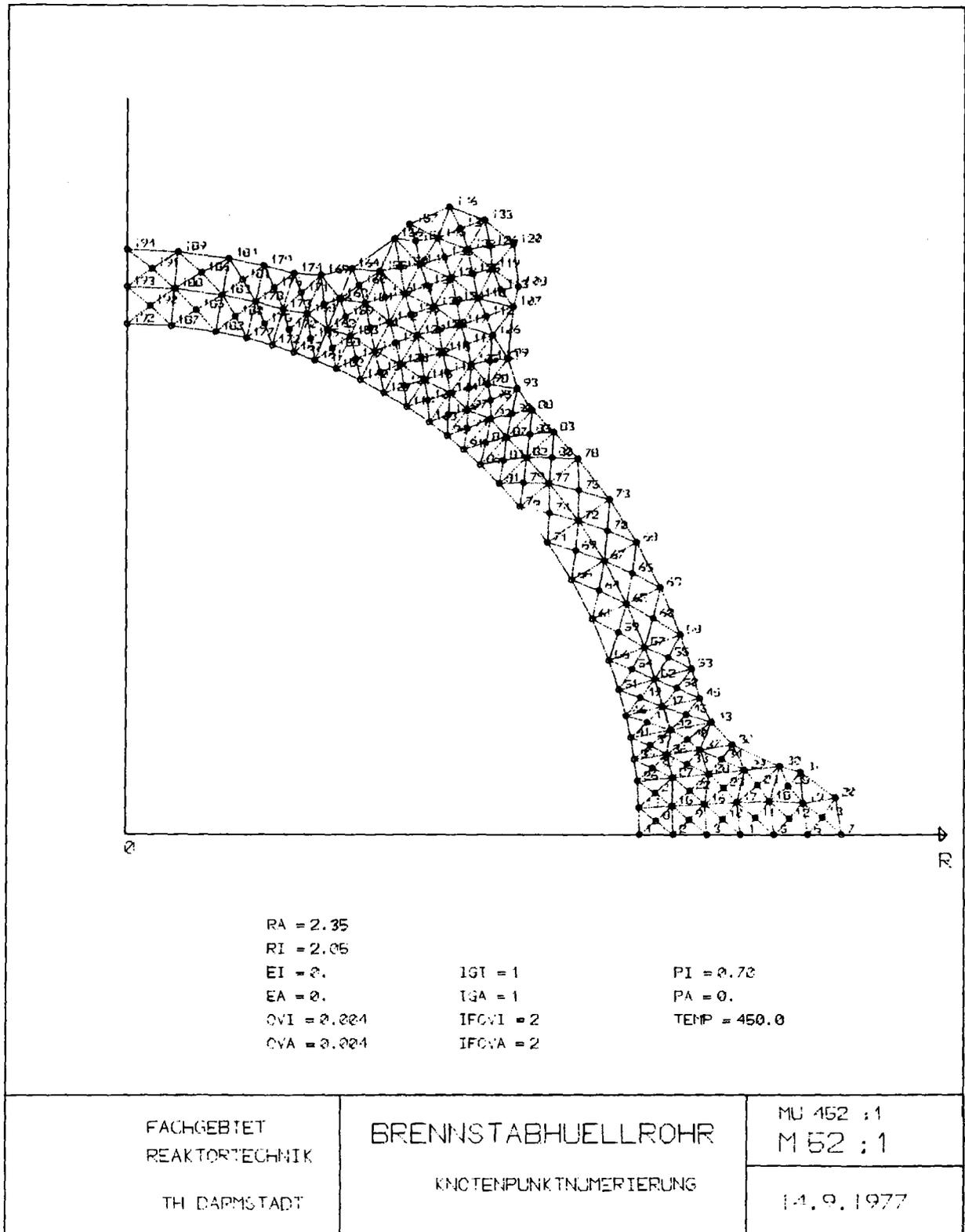
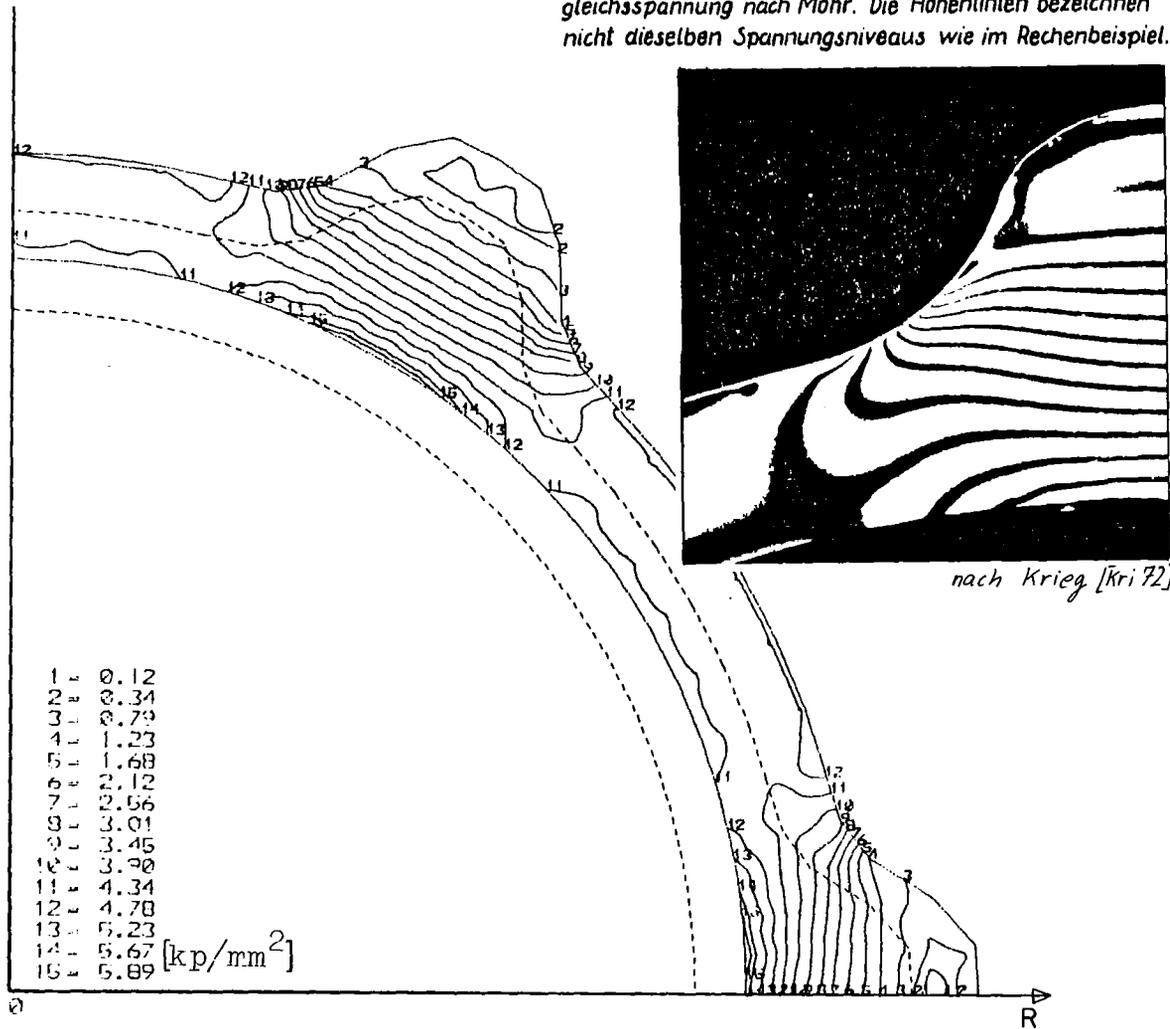


Abb. 3:

Strukturunterteilung und Knotenpunktnumerierung eines Hüllrohres mit 6 integralen Rippen. Zeichnung vom post-processing Programm ZIPLO [Fab 77] erstellt.

Durch spannungsoptische Experimente bestimmte Vergleichsspannung nach Mohr. Die Höhenlinien bezeichnen nicht dieselben Spannungsniveaus wie im Rechenbeispiel.



- 1 - 0.12
 - 2 - 0.34
 - 3 - 0.79
 - 4 - 1.23
 - 5 - 1.68
 - 6 - 2.12
 - 7 - 2.56
 - 8 - 3.01
 - 9 - 3.45
 - 10 - 3.90
 - 11 - 4.34
 - 12 - 4.78
 - 13 - 5.23
 - 14 - 5.67
 - 15 - 5.89
- [kp/mm²]

PA - 2.35
 PI - 2.05
 EI - 0.
 EA - 2.
 QVI - 0.001
 QVA - 0.001
 KCI - 1
 KCA - 1
 IFCAI - 2
 IFQVA - 2
 PI = 0.70
 PA = 0.
 TEMP = 450.0
 T = 2.

FACHGEBIET REAKTORTECHNIK TH. DARMSTADT	BRENNSTABHÜELLRÖHR VERGLEICHSSPANNUNGEN	MU 452 . I M 52 . I
		14.9.1977

Abb. 4:

Verteilung der Vergleichsspannungen in einem Hüllrohr mit 6 integralen Rippen bei $P_i = 70$ [bar] und $\vartheta = 450$ [°C]. Zeichnung mit ZIPLO [Fab 77] erstellt. Vergleich mit spannungsoptischen Experimenten nach Krieg [Kri 72].

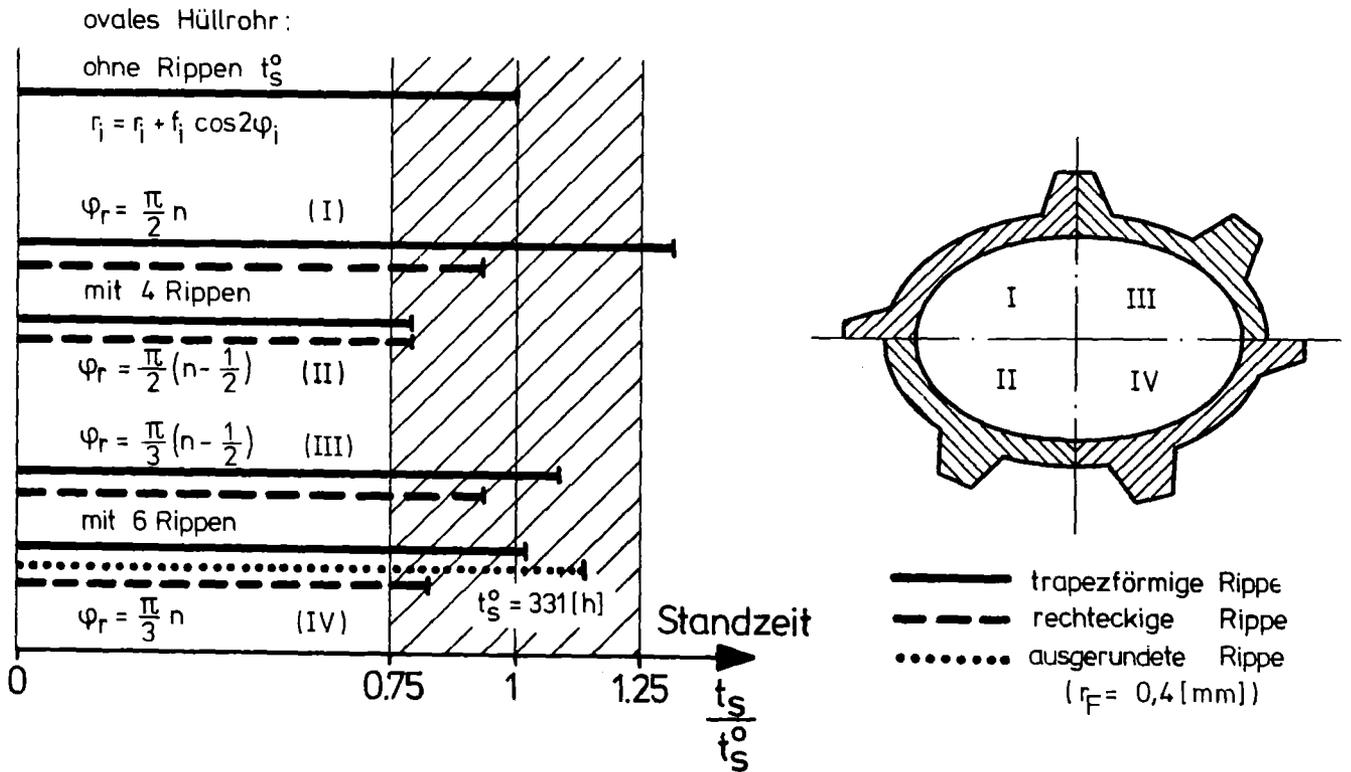


Abb. 5:

Vergleich der Standzeiten t_s von Hüllrohren mit integralen Rippen bei ovaler Basisgeometrie.

Unterschiede in Anzahl (4 + 6), Lage (φ_R) und Form der Rippen.

Standzeitkriterium: $\varepsilon_y^{cr} \leq 5\%$.

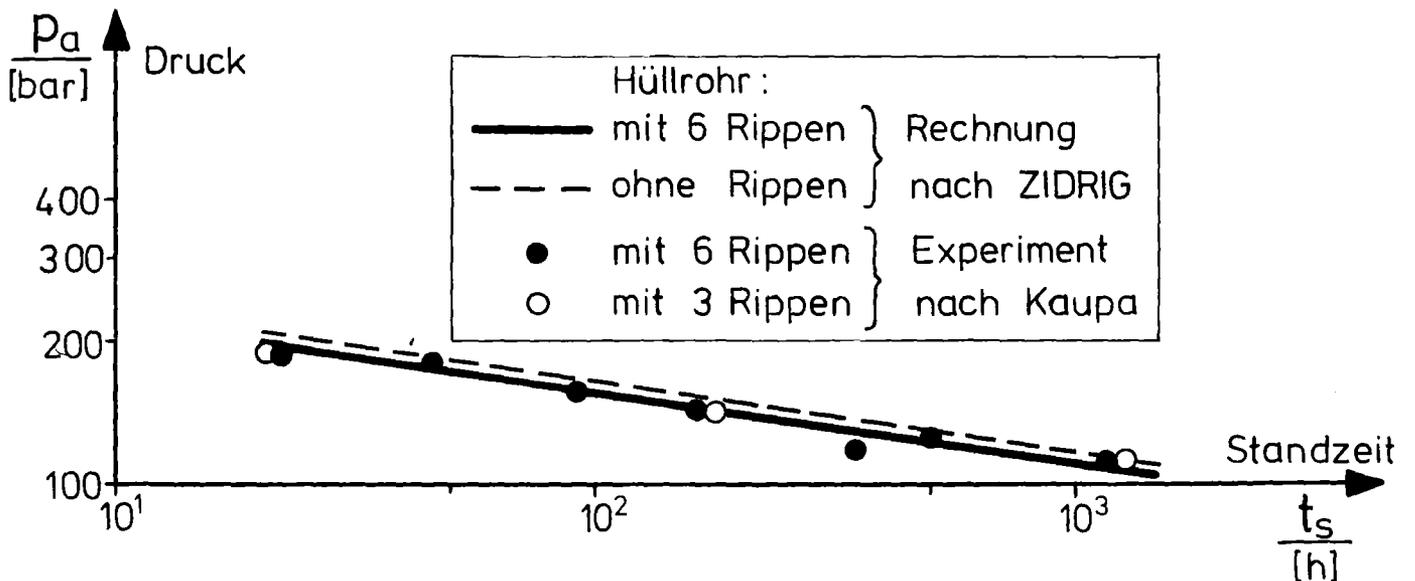


Abb. 6:

Vergleich der Standzeit t_s von ovalen Hüllrohren mit integralen Rippen in Abhängigkeit vom Außendruck p_a zwischen Rechnungen mit ZIDRIG und Experimenten von Kaupa [Kau 71].

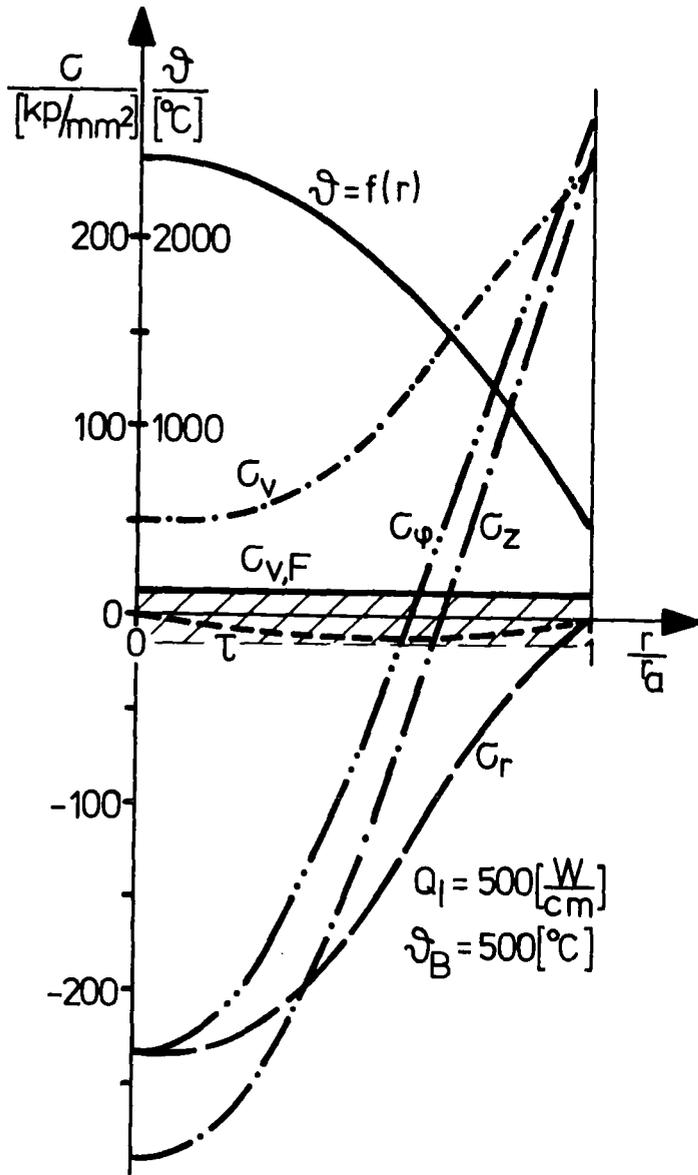


Abb.7 : Radialer Verlauf der Temperatur und der thermoelastischen Spannungen in der Mittelebene einer Brennstofftablette. Bereich bis zur Fließgrenze $\sigma_{v,F}$ schraffiert.

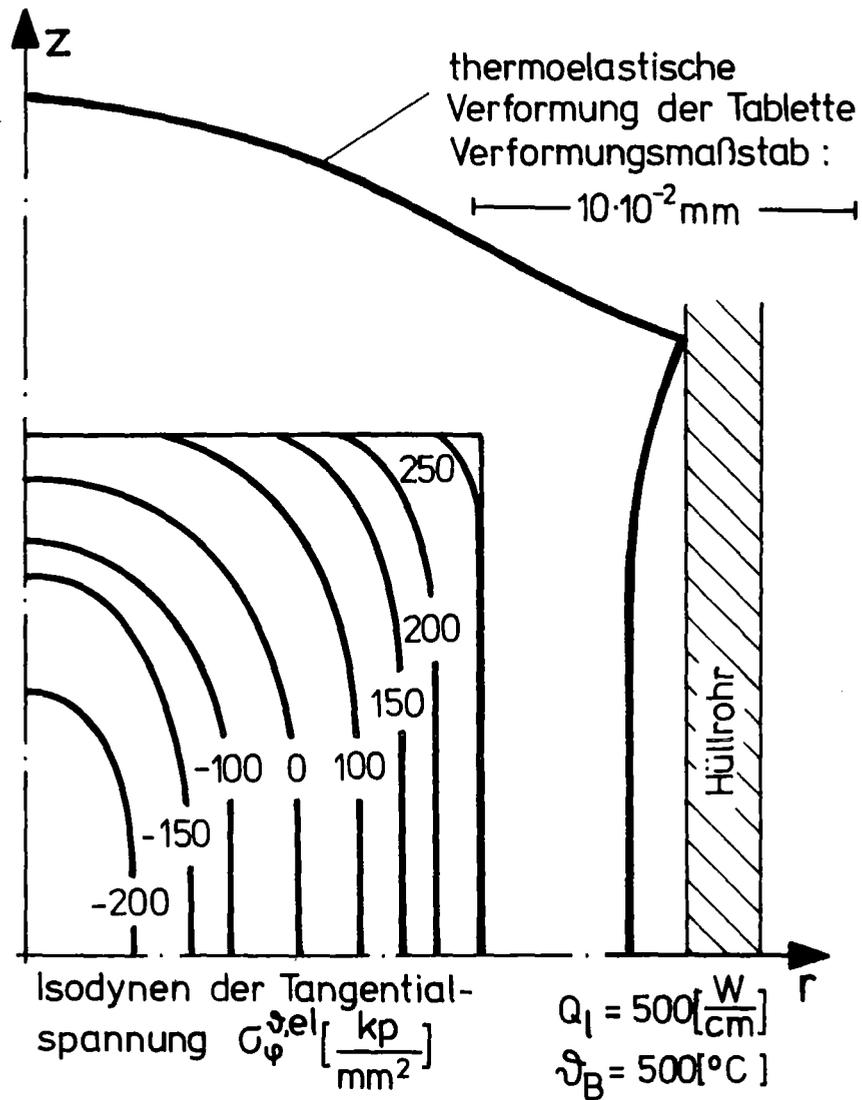
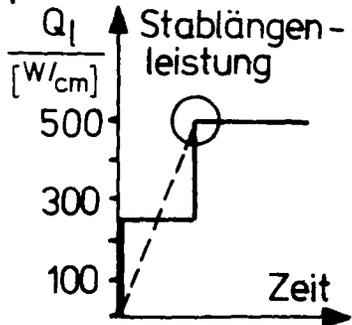
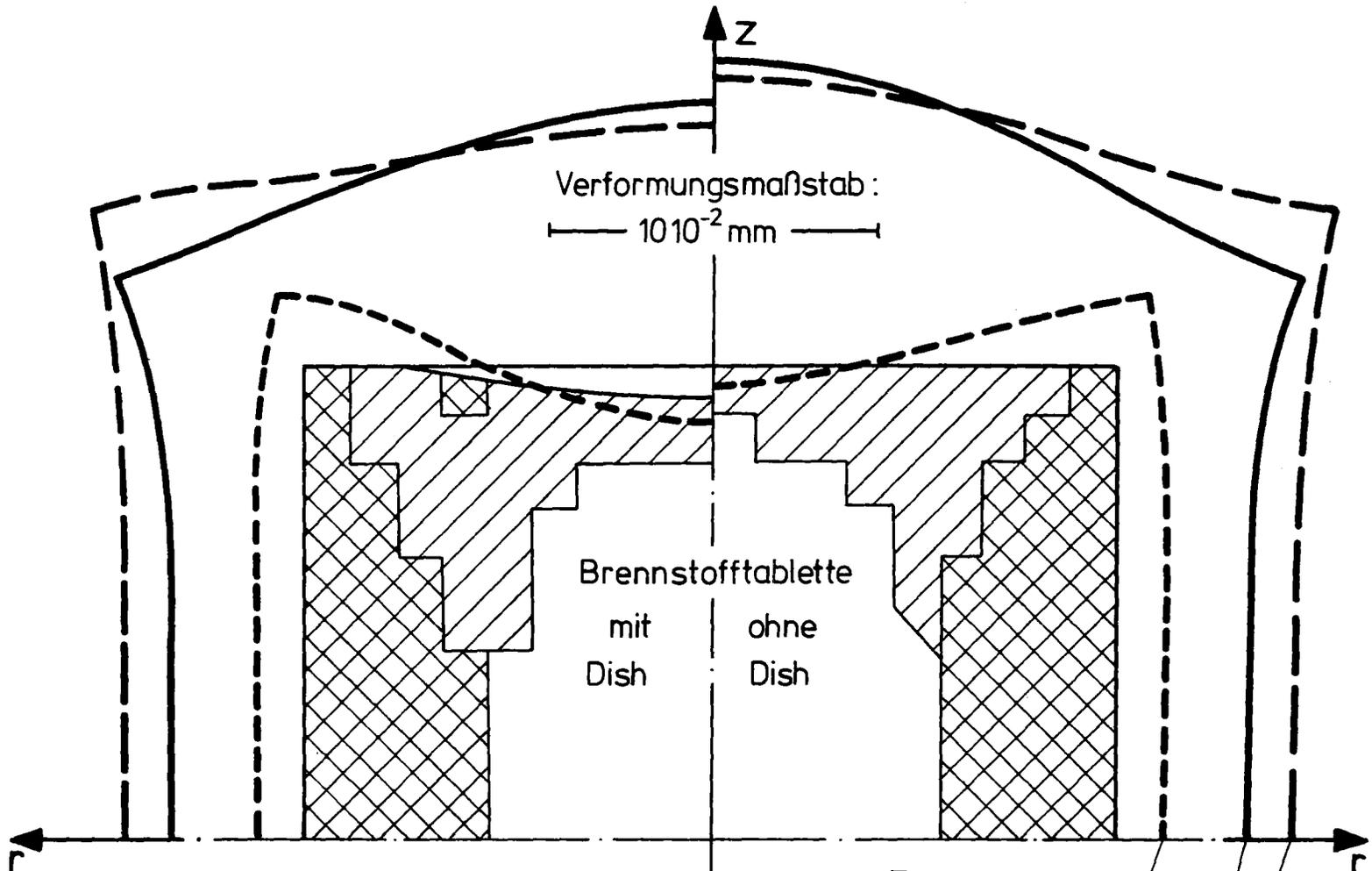


Abb. 8 :

Thermoelast. Verformung und Verteilung
der Tangentialspannung $\sigma_{\varphi}^{\text{rel}}$ in einer
Brennstofftablette. Lage des Hüllrohres
angedeutet.



Lastprofil des Brennstabes bei $\vartheta_B = 500 [^{\circ}\text{C}]$

- Bereich :
- radialer Risse
 - axialer Risse

Kontur der Tablette bei :

- plast. u. rißbed. Verf. $u=f(\epsilon^{pl}, \epsilon^f)$
- thermoel. Verf. $u=f(\epsilon^{el}, \epsilon^{\vartheta})$
- thermoel.,
plast. u. rißbed. Verf. $u=f(\epsilon^{el}, \epsilon^{\vartheta}, \epsilon^{pl}, \epsilon^f)$

Abb.9 : Verformte Kontur und Rißbereiche einer Brennstofftablette mit und ohne Dish.

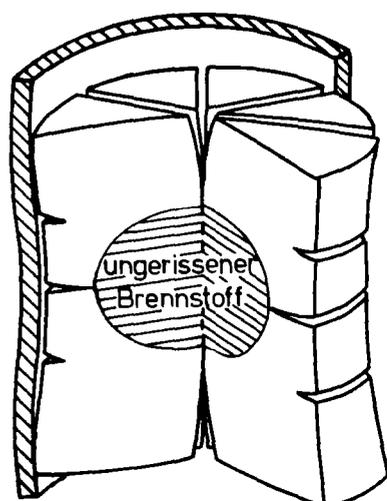


Abb. 10:

Räumliche Skizze einer gerissenen Tablette im Brennstab und bambusartige Verformung des Hüllrohres.

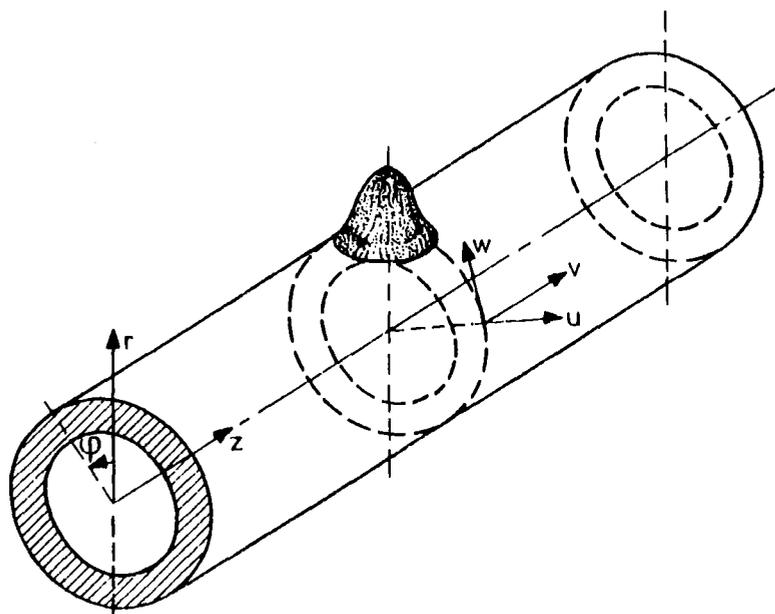


Abb. 11:

Temperaturspitze - hot spot - am Brennstab durch lokale Störung der Wärmeabfuhr. Berechnung eines rotationssymmetrischen Brennstabes unter beliebiger Belastung mit dem Programm FINFOU.

L i t e r a t u r

- [FabK 76] Fabian, H., Krugmann U., Laßmann K., Schwarz, R.:
Jahresbericht der Arbeitsgruppe Brennstab- und Brennelementmechanik des Instituts für Reaktortechnik
KfK 2274, April 1976
- [Fab 77] Fabian, H.; Die PLOT-Programme ZIPLO und FINPLO zur
graphischen Auswertung von mehrdimensionalen FE-Rechnungen zum Brennstab mit den Programmen ZIDRIG und FINEL. Fg. Reaktortechnik der THD, rtda 37-77, 1977
- [Fab 78] Fabian, H.; Beitrag zur mechanischen Auslegung von
zylindrischen Brennstäben eines Kernreaktors unter Berücksichtigung der Mehrdimensionalität der Struktur auf der Basis der Finit-Element-Methode
Veröffentlichung in Vorbereitung
- [Kau 71] Kaupa, H.; Experimentelle Untersuchung des Kriechbeulverhaltens dünnwandiger Rohre, KfK 1363; 1971
- [Kri 72] Krieg, R.; Zur Berechnung der Spannungen und Verzerrungen in zweifach zusammenhängenden prismatischen Körpern mit Rechenbeispielen für ein langberipptes Brennstabhüllrohr, KfK 1665, 1972
- [KumE 76] Kummerer, K.: Elbel, H., New developments in fuel pin modeling, ANS International Conference, Washington D.C. 11, 1976
- [Laß 73] Laßmann, K.: Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zylindrischen Brennstäben, KfK 1853, 1973
- [Laß 77] Laßmann, K.: Some critical remarks on fuel-rod structural analysis, Post Conference of the SMIRT-4 Conference, San Francisco 1977

- [Laß 78] Laßmann, K.: URANUS - A computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel-rods in a nuclear reactor, Nuc. Eng. a. Design, Vol.45, No.2, Febr. 1978
- [Mal 71] Malmberg, T.: Über einige Variationsprinzipien der Kriechmechanik und ihre Anwendung auf das Kriechkollapsproblem von Brennstabhüllrohren, KfK 1390, 1971
- [Ste 78] Steinbock, L.: Die Simulation des Defektwachstums von Brennstäben mit einem Finit-Element-Programm, Tagungsbericht der Reaktortagung des Deutschen Atomforums, 1978, (S.691).

Die Modelle zum Werkstoffverhalten im URANUS-Rechenprogramm
dargestellt am Beispiel der Brennstoffnachverdichtung

T. Preußer

Einleitung

Für die numerische Berechnung eines Brennstabes mit einem Brennstabcode müssen einerseits genaue Daten über Brennstoff und Hülle, andererseits aber auch Kenntnisse über das Verhalten der Materialien unter den auftretenden Belastungen bekannt sein. Dieses Materialverhalten ist häufig komplex und wird von einer Reihe von Parametern bestimmt, die ihre Werte in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen - Temperaturverteilung, Abbrand - verändern. Als einige Beispiele seien Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Porositätsänderung, Spaltgasfreisetzung genannt.

Um diese Abhängigkeiten zu beschreiben, muß entweder der tatsächliche physikalische Zusammenhang bekannt sein als "first principle" oder es muß ein Modell gefunden werden, das die natürlichen Mechanismen qualitativ und quantitativ beschreibt. In der Regel sind solche Modelle nicht allgemein gültig, sondern sie gelten nur unter bestimmten Randbedingungen und Voraussetzungen. Entsprechend muß die Gültigkeit von Modellen für unterschiedliche Datenfälle durch Anpassungen an den zu beschreibenden Fall hergestellt werden. Wenn eine solche Anpassung nicht möglich ist, weil der Gültigkeitsbereich des Modelles verletzt wird, müssen u.U. mehrere alternative Modelle eingesetzt werden. Für einen universellen Brennstabcode, dessen Algorithmus in der Regel unabhängig von den zu berechnenden Daten ist, und für den es somit prinzipiell unbedeutend ist, ob ein Leichtwasser- oder ein Schnellbrüterstab berechnet wird, bedeutet diese Einschränkung, daß jeweils ganze Materialdatensätze und Werkstoffgesetze ausgetauscht werden müssen, wenn sich die Aufgabenstellung ändert. Das URANUS-System/1,2/ gehört zu diesen universellen Codes. Zur Zeit existieren zwei Schnellbrüter-Versionen (Oxid- und Karbid-Brennstoff), eine Leichtwasser-Version und die Statistik-Version; die Design-Version und die transiente Version sind fast fertiggestellt /3/.

Am Beispiel der Brennstoffnachverdichtung soll exemplarisch gezeigt werden, auf welche Weise die für die verschiedenen Versionen unterschiedlichen modelltheoretischen Überlegungen zur Beschreibung des komplexen Werkstoffverhaltens in den Brennstabcode Eingang finden und wie sie dort verarbeitet werden.

Dieses Beispiel wurde gewählt, weil sich im Rahmen des Code-Vergleichs FRUMP-SATURN-URANUS/4/ und auch bei dem von uns erweiterten EPRI-Code-Vergleich /5/, gerade bei der Nachverdichtungsrechnung noch Diskrepanzen zu anderen Rechenprogrammen ergeben haben; diese Modelle sind daher für uns von aktuellem Interesse. Die programmtechnische Aufbereitung bei diesen und den übrigen Modellen in URANUS ist jedoch prinzipiell ähnlich.

Die URANUS-Datenbasis

Die Struktur von URANUS (Abb.1) sieht vor, Modelle oder Werkstoffgesetze grundsätzlich in Unterprogrammtechnik zu formulieren. Materialdaten werden in einer Art "Schubladensystem" gespeichert, das durch Steuergrößen zugänglich ist. Die Gesamtheit dieser Unterprogramme und Schubfächer stellt die URANUS-Datenbank dar. Aus der Unterprogrammtechnik resultieren eine Reihe von Vorteilen:

1. Übersichtlichkeit - in einem Unterprogramm wird jeweils nur ein Thema behandelt.
2. Ausbaumöglichkeit - durch einfache Modifikationen kann der jeweils neueste Stand der Modelltheorie eingebracht werden; die Zahl der zu berücksichtigenden Effekte kann durch weitere Unterprogramme erhöht werden. Parallele Modelle zum gleichen Thema lassen sich problemlos einbringen.
3. Gute Testmöglichkeiten - mit speziellen Testprogrammen lassen sich die einzelnen Modelle gründlich auf physikalische Richtigkeit und numerische Stabilität untersuchen, bevor sie in URANUS eingebracht werden.
4. Strukturunabhängig - der Aufbau des Programmsystems wird auch bei umfangreichen Änderungen oder Erweiterungen der Modelle in keiner Weise beeinflusst.

5. Mehrere Versionen in einem Programm - es existiert nur ein einziger URANUS-Code, der je nach Wunsch des Benutzers Schnellbrüterstäbe (Oxid oder Karbid) oder Leichtwasserstäbe rechnet.

Diese Art der Unterprogrammtechnik hat sich bei zur Zeit über 80 Unterprogrammen bewährt; ähnliche Techniken werden bei allen modernen Codes angewendet. Innerhalb dieser Unterprogramme wird ein logischer, in der Regel linearer Aufbau gewählt, so daß Rücksprünge weitestgehend vermieden werden. Abb.2 zeigt als Beispiel den Aufbau des Unterprogrammes ETADEN/6/, das zur Berechnung der Porosität, der Sinterdehnungen und im Schnellbrüterfall zur Berechnung des Zentralkanals dient. Entsprechend dem Wert einer Steuergröße wird der jeweils richtige Pfad durch das Unterprogramm gewählt. Hier können nach Belieben weitere Modelle parallel geschaltet werden, indem der Wertebereich der Steuergröße vergrößert wird. Zu Testzwecken kann das Programm auch übersprungen werden.

Brennstoffnachverdichtung

Der Effekt der Brennstoffnachverdichtung unter Temperatureinfluß und Bestrahlung bringt positive und negative Faktoren mit sich. Einerseits ist ein Schrumpfen des Brennstoffes konträr zu den Schwelldehnungen erwünscht, andererseits führt eine große Nachverdichtung zu Beginn des Einsatzes, wie sie besonders bei unstabilisiertem Brennstoff auftreten kann, zu einer Vergrößerung der Spaltweite mit den damit verbundenen Effekten wie schlechterer Wärmeübergang und fehlende Stützwirkung; in axialer Richtung tritt zudem eine Verkürzung der Brennstoffsäule ("stack shortening") auf. (Vgl. /7/).

Der Einfluß der Nachverdichtung kann zu Volumenänderungen von mehreren Prozent führen und somit thermische, elastische, plastische und Reißdehnungen von der Größenordnung her durchaus überdecken. Eine möglichst exakte Beschreibung des Phänomens ist daher unerläßlich. Als Ursache der Volumenabnahme werden, wie hinlänglich bekannt ist (vgl./8/), Porenschrumpfprozesse und Porenwanderungen beschrieben, die sowohl durch thermischen Einfluß (Verdampfungs- und Kondensationsmechanismen im Temperaturgradienten) als auch bestrahlungsinduziert auftreten (Auflösung kleinerer Brennstoffporen, wenn sie von einer Spaltfragmentbahn tangiert werden).

Das Ziel eines Nachverdichtungsmodells ist, die hieraus resultierenden Dichteänderungen des Brennstoffes in Abhängigkeit von Ausgangszustand, Temperatur, Zeit und Abbrand zu beschreiben.

Nachverdichtungsmodell für SNR-Oxidbrennstoff

Für die Oxidbrennstoff-Schnellbrüterversion des URANUS-Programmes wurde das von Többe /9/ beschriebene IAMBUS-Modell übernommen. Durch die einfache Beschreibung des Phänomens mit wenigen Gleichungen eignet sich dieses Modell sehr gut, um in einem Rechenprogramm verwendet zu werden. Abb.3 zeigt die benutzte Korrelation zwischen den bekannten Zonen unterschiedlichen Kernwachstums und den diesen Zonen zugewiesenen Dichten. Unter Berücksichtigung einer temperaturabhängigen Relaxationszeit verändert sich die Ausgangsporosität im Laufe von wenigen hundert Stunden auf die angegebenen Grenzwerte. Diesem Prozeß wird eine bestrahlungsinduzierte Verdichtung überlagert, die nur vom Abbrand abhängig ist und die sehr langsam abläuft.

Abb.4 zeigt, daß sich in den heißeren Zonen in der Brennstabmitte bereits innerhalb von 10 Stunden eine merkliche Verdichtung ergibt (thermisches Nachsintern), während sich in den kälteren Zonen am Rande des Brennstoffes die bestrahlungsinduzierte Verdichtung erst bei hohen Abbränden auswirkt. Hier zeigt sich die bereits angesprochene Diskrepanz zu anderen Rechenprogrammen, wie sie sich aus dem Code-Vergleich FRUMP-SATURN-URANUS/4/ergeben hat. Abb.5 zeigt die von den drei Programmen errechnete Porositätsverteilung über dem Radius nach einer Einsatzzeit von 5000 h und einer Stableistung von 250 W/cm. Die Nachverdichtung des IAMBUS-Modells ist hier vergleichsweise hoch; bei großen Leistungen und hohen Abbränden liefert das Modell dagegen Ergebnisse, wie sie aus Experimenten/10/ bekannt sind.

Unter Berücksichtigung der Massenbilanz wird die Volumenänderung als Ursache für die Ausbildung des Zentralkanals angesehen, der infolgedessen mit zunehmender Verdichtung wächst. Die Brennstoffverdichtung wird als irreversibel angesehen.

Nachverdichtungsmodell für LWR-Brennstoff

Abmann und Stehle/8/ beschreiben ein Modell zur Nachverdichtung von Kernbrennstoffen, das aufgrund seiner umfassenden Berücksichtigung aller einflußnehmenden Parameter grundsätzlich für alle Brennstoffe anwendbar ist. Zur Zeit ist es allerdings erst für Leichtwasserbedingungen verifiziert und kommt somit für die Schnellbrüterversion noch nicht in Frage; es wird in der URANUS-Leichtwasserversion angewendet.

Ähnlich wie bei dem IAMBUS-Modell /9/ werden unterschiedliche Temperaturbereiche (Regionen) ermittelt, in denen die Porenschrumpfgeschwindigkeit in Abhängigkeit von anderen Parametern definiert wird (Abb.6). Für jede dieser Zonen werden Gleichungen zur Bestimmung der Volumenänderung angegeben. Bisher sind in das URANUS-Programm erst die Gleichungen der Region 3 eingebracht, die für den Temperaturbereich zwischen 750°C und 1300°C gültig sind. Das vollständige Modell wird zur Zeit programmtechnisch aufbereitet und wird in Kürze zur Verfügung stehen.

Wesentlicher Unterschied zu dem schon beschriebenen IAMBUS-Modell ist, daß die Kinetik des Sinterprozesses in Abhängigkeit von der Ausgangsporengröße und der Porengrößenverteilung beschrieben wird. Thermisch- und strahleninduziertes Porenschrumpfen wird gemeinsam behandelt, die Schwelldehnung kann unmittelbar eingerechnet werden. Nachteil dieser Theorie ist die Vielzahl von eingehenden Parametern und Eingangsgrößen. Die Mitnahme von möglichst vielen einflußnehmenden Effekten bietet allerdings erst den Ansatzpunkt für eine spätere Erweiterung des Modells für Schnellbrüterbedingungen mit Oxid- oder Karbidbrennstoff.

Nachverdichtungsmodelle für Karbid-Brennstoff

Im Rahmen einer Studienarbeit /11/ wurden die notwendigen Daten zur URANUS-Karbid-Version zusammengetragen. Mit Ausnahme eines Nachverdichtungsmodells ist diese Datensammlung komplett integriert. Es hat sich allerdings gezeigt, daß offensichtlich noch keine geschlossene Beschreibung des sehr komplexen Nachsinterverhaltens der Karbide in einer Form vorliegt, die sich für ein Rechenprogramm anbietet. Die in der Literatur /12/ veröffentlichten Ergebnisse von Porositäts-Umverteilungen (Abb.7) nützen nur wenig,

solange die Kinetik des Verdichtungsprozesses nicht formelmäßig erfaßt ist. Sobald ein gültiges Nachverdichtungsmodell für den Karbid-Brennstoff zur Verfügung steht, wird URANUS auch als Karbid-Version in kurzer Zeit vernünftige Ergebnisse liefern können. An diesem Beispiel läßt sich ein wichtiger Punkt aufzeigen, der gleichermaßen für alle übrigen Modelle in einem Rechenprogramm gültig ist (und dennoch manchmal übersehen wird): die Genauigkeit der Rechenergebnisse ist in erster Linie abhängig von den zur Verfügung stehenden Datensätzen und Modelltheorien; ausgezeichnete Ergebnisse können nur erwartet werden, wenn bereits die eingebrachten Daten und Theorien diesem Anspruch gerecht werden. Am Institut für Reaktortechnik sehen wir unsere Aufgaben jedoch eher in der mechanischen und numerischen Behandlung der Brennstäbe als im Aufstellen von Modellen, wozu uns aus personellen und sachlichen Gründen auch die Voraussetzungen fehlen würden. Die Konsequenz hieraus ist, daß wir häufig auf Modelle anderer angewiesen sind.

Ausblick auf zukünftige Arbeiten an den URANUS-Modellen

Neben einer routinemäßigen Anpassung der Materialdaten an neuere Forschungsergebnisse sind einige Arbeiten bereits geplant. Zum einen soll das beschriebene Aßmann/Stehle-Modell vollständig übernommen werden, und, soweit notwendig, im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen geeicht werden. Auch das IAMBUS-Modell wird wegen der beschriebenen hohen Verdichtung bei geringen Leistungen noch einmal überprüft werden müssen, wofür der Autor freundlicherweise seine Unterstützung angeboten hat /13/. In diesem Zusammenhang muß auch die Frage der Isotropie der Dehnungen in den drei Raumrichtungen bzw. die Größe eines Anisotropiefaktors noch einmal diskutiert werden. Nach Abschluß dieser Verbesserungen ist es geplant, eine Untersuchung über die Längenänderung der Brennstoffsäule im integralen Stab durchzuführen, mit dem Ziel, den Einfluß des Nachsinterns auf das "stack shortening" zu beschreiben.

Die Karbidversion wird weiter verfolgt werden, insbesondere im Hinblick auf ein akzeptables Modell zum Nachsinterprozeß und zum Schwellen. Die Materialdaten und Materialgesetze der Leichtwasser-Version sollen mit dem amerikanischen MATPRO-Datenbanksystem /14/ verglichen werden, das zur Zeit eine führende Zusammenstellung auf diesem Gebiet darstellt. Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, daß das Schwergewicht der URANUS-Entwicklung nicht auf dem Leichtwasser-Sektor liegt. Die vergleichsweise hohe Zahl von Ergebnissen und Experimenten für den Leichtwasserreaktor gegenüber dem Brüter rechtfertigt diese Version dennoch, um Erfahrungen zu sammeln.

Zur Zeit wird im Rahmen einer Studienarbeit bereits an einem verbesserten Modell zur Berücksichtigung der Flußdepression für normale Pellets und Ringtabletten gearbeitet. Auch die abbrandabhängige Uran-Plutonium-Umverteilung soll hierin berücksichtigt werden.

Entsprechend der von Fabian /15/ vorgetragenen Philosophie der Brennstabberechnung, die sowohl die ein- wie die zweidimensionale Rechnung verlangt, sollen die Datensätze in URANUS und FINEL/ZIDRIG vereinheitlicht werden, mit dem endgültigen Ziel, ein gemeinsames Datenbanksystem zu entwickeln. Die prinzipiellen Möglichkeiten dazu liegen in der beschriebenen URANUS-Unterprogrammtechnik; am Beispiel des Rißmodelles wurde dies bereits realisiert /15/. Inwieweit diese Datenbank allgemeine Gültigkeit erreichen wird und auf einen wirklich aktuellen Stand gebracht werden kann, hängt ausschließlich davon ab, inwieweit umfassendes Datenmaterial zum Schnellbrüterfall zugänglich ist. Wir sind - aus den bereits angesprochenen personellen und sachlichen Gründen - in diesem Punkt zweifelsohne von den großen Forschungszentren wie Karlsruhe bzw. den Einrichtungen der Industrie abhängig und erachten in diesem Bereich eine Zusammenarbeit als notwendig und zweckmäßig. Das Beispiel MATPRO zeigt sehr deutlich, wie aufwendig die Zusammenstellung einer Datenbank letztlich ist. Für die deutschen Schnellbrüter-Codes müßte die Erarbeitung einer gemeinsamen nationalen Datenbasis durchaus reizvoll sein und auch im Bereich des Möglichen liegen.

L i t e r a t u r

- 1 Laßmann, K., URANUS - a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel-rods in a nuclear reactor Nuc. Eng. a. Design, Vol.45, No.2, February 1978, S.325-342
- 2 Laßmann, K., Der integrale Brennstabcode URANUS, Atomwirtschaft/Atomtechnik, Jahrgang XXI, Nr.6, Juli 1976, S.307-308
- 3 Laßmann, K., dieser Statusbericht, IRT, 24.4.1978
- 4 May, M., Der integrale Brennstabcode URANUS - Anwendung auf den Brennstab des Schnellen Brütters im Vergleich mit anderen Rechenprogrammen, Diplomarbeit IRT, Technische Hochschule Darmstadt, 1977
- 5 Laßmann, K., Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modeling code evaluation project, IAEA-Specialists meeting on fuel element performance computer modeling, Blackpool, U.K., März 1978
- 6 Preußner, T., Zum Nachsinterverhalten von Urandioxid und Uran-karbid, Diplomarbeit IRT, Technische Hochschule Darmstadt, Oktober 1977
- 7 Rubenstein, L.S., Ross, D.F., Impact of fuel densification on the US LWR industry, ANS Transactions, Vol.18,1974, S.120
- 8 Abmann, H., Stehle, H., Thermal and in-reactor densification of UO_2 : mechanisms and experimental results, Transactions of the 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.C 3/1, San Francisco, 1977
- 9 Többe, H., Das Brennstabrechenprogramm IAMBUS zur Auslegung von Schnellbrüter-Brennstäben, Interatom, Bensberg, 1975, S. 60-64 und 71-74.

- 10 Kummerer, K., Dichteabhängige Strukturänderungen in UO_2 - PuO_2 -Brennstofftabletten beim Abbrand, Deutsches Atomforum, Reaktortagung 1975, S.403-406
- 11 Greif, M., Voruntersuchungen zum Karbid-Brennstab, Studienarbeit IRT, Technische Hochschule Darmstadt, 1977
- 12 Blank, H., Sari, C., Restructering of carbide fuel in a radial temperature gradient, Deutsches Atomforum, Reaktortagung 1977, S.534-537
- 13 Többe, H., persönliche Mitteilung
- 14 MATPRO - Version O9, A handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel-rod behaviour, US Energy Research and Development Administration, Dezember 1976
- 15 Fabian, H., dieser Statusbericht, IRT, 24.4.1978

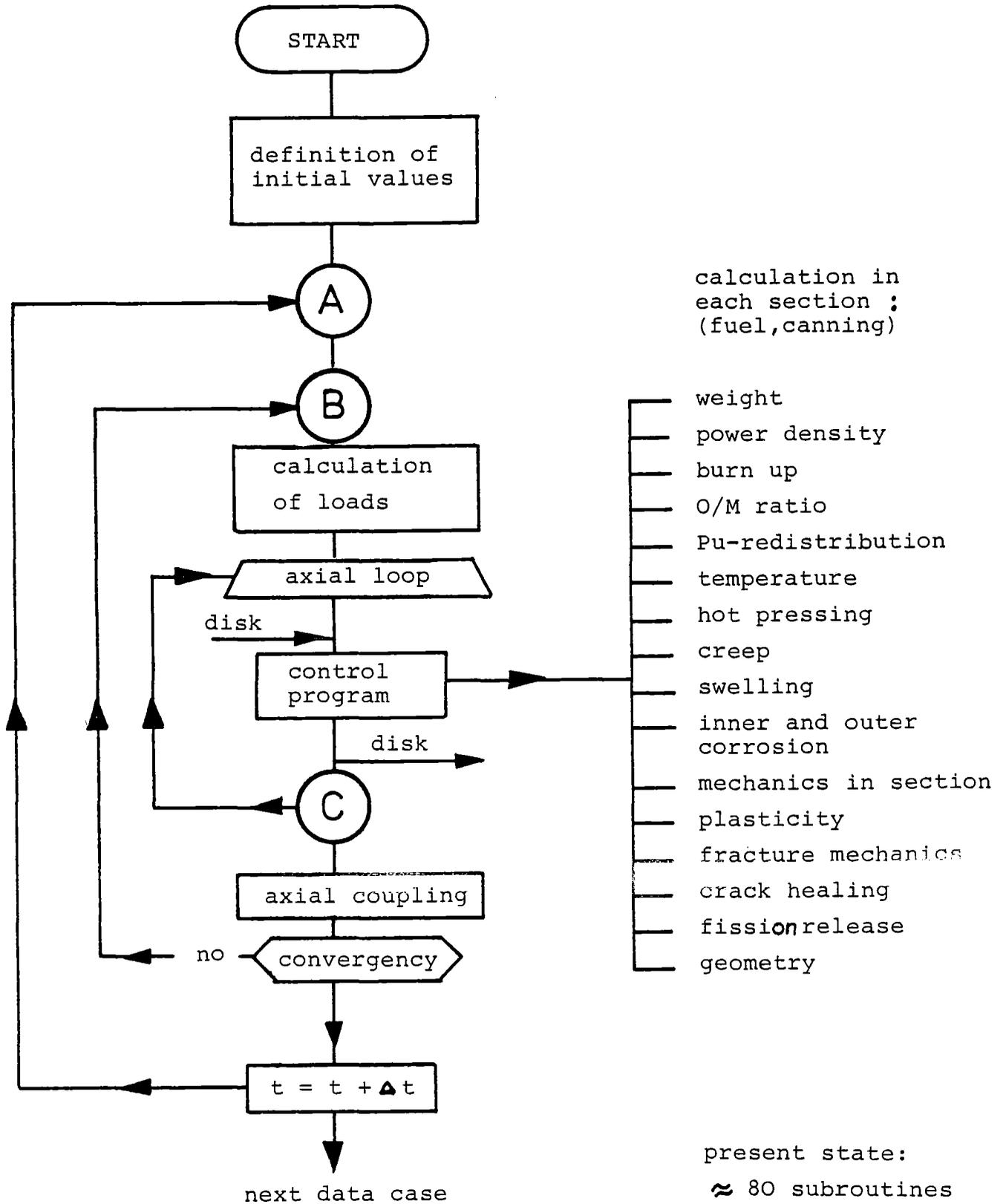


Abb.1: Struktur des URANUS-Rechenprogramms

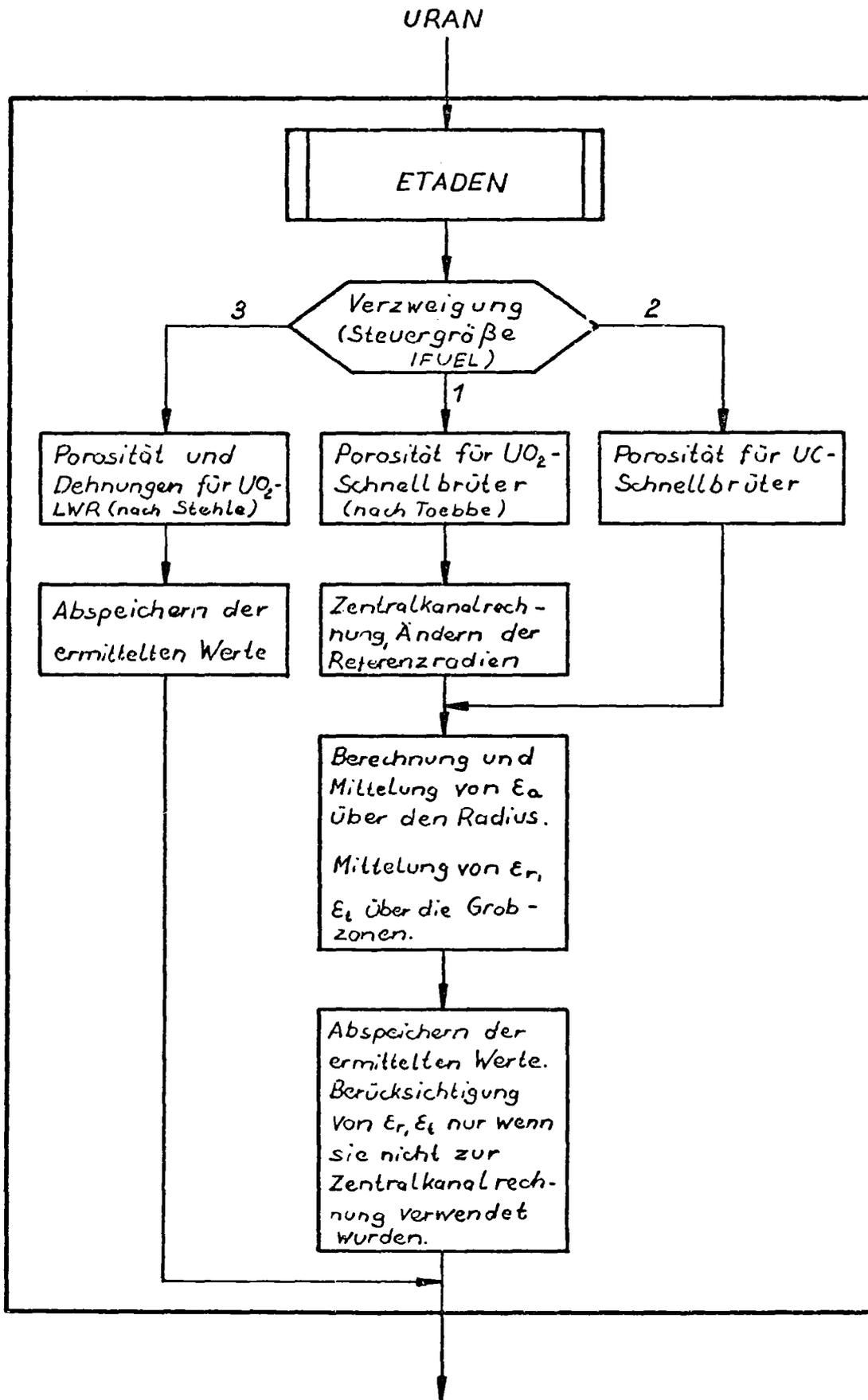


Abb. 2: Übersichtsflußdiagramm ETADEN.

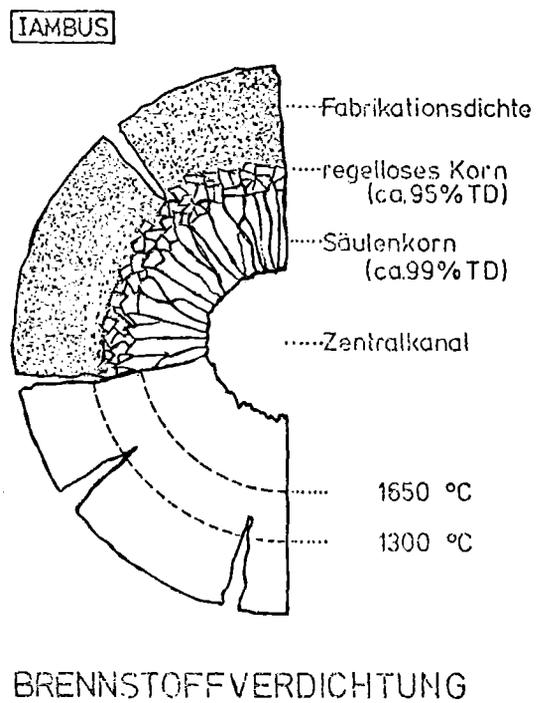


Abb. 3: Radiale Brennstoffverdichtung und Kornwachstum,
Többe-Modell (Abbildung entnommen aus /9/).

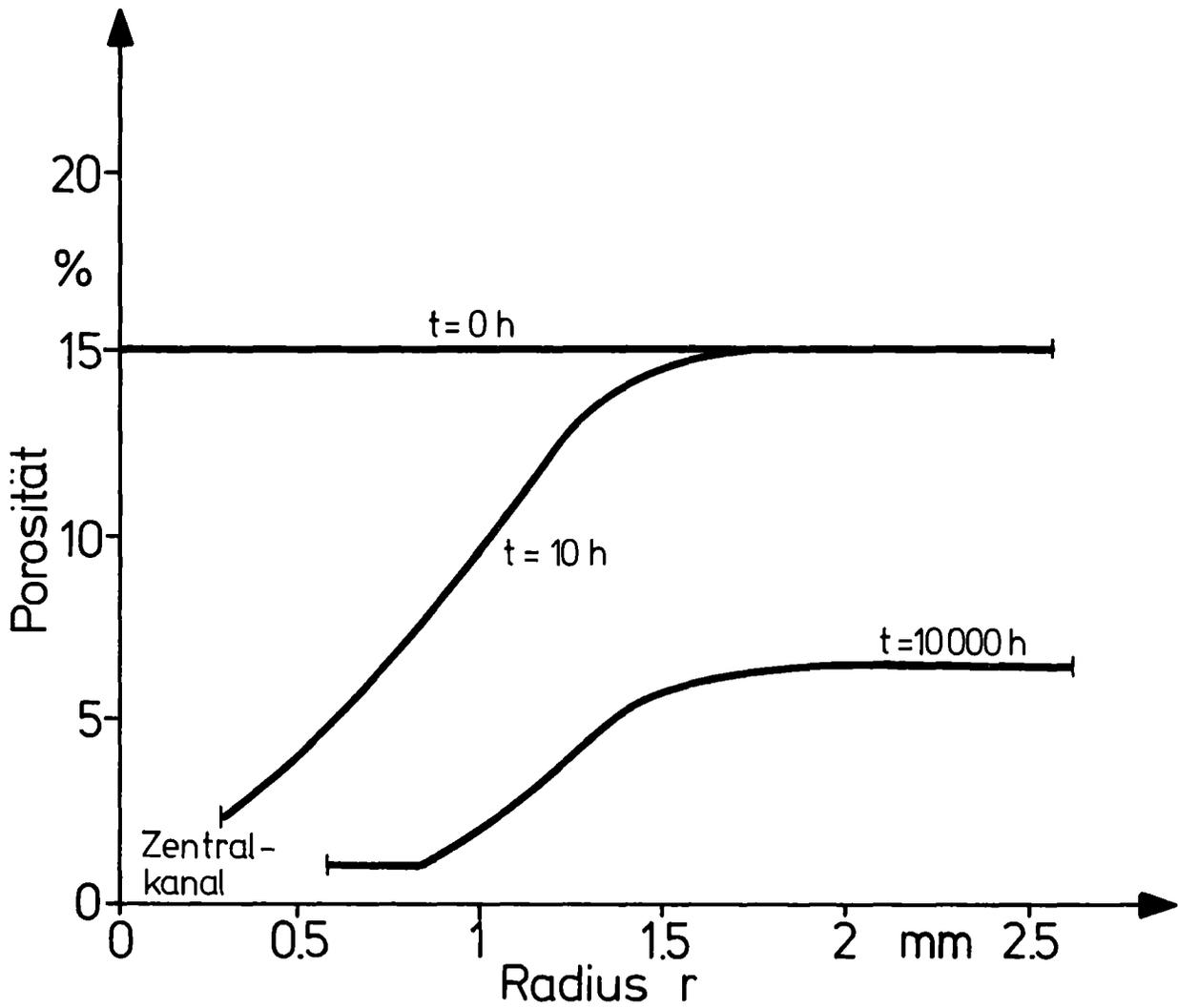


Abb. 4: Porositätsverteilung über dem Radius zu unterschiedlichen Zeiten. (URANUS, Többe-Modell)

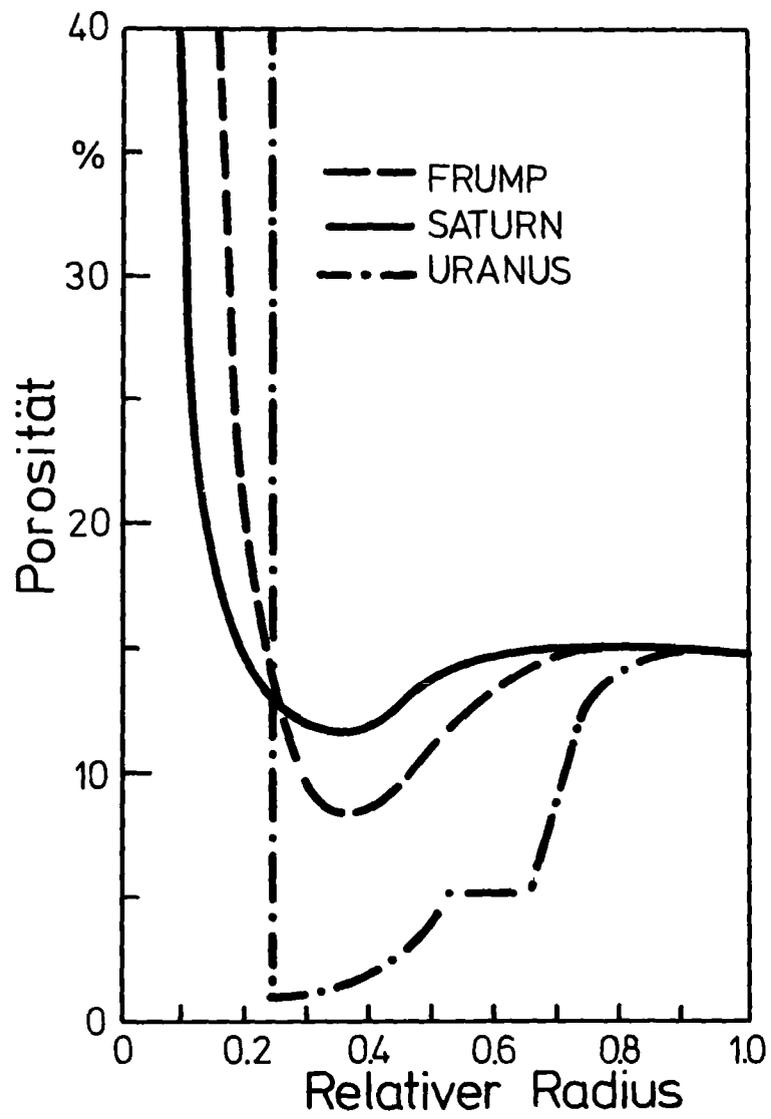


Abb.5: Vergleich FRUMP-SATURN-URANUS
Porositätsverteilung über dem Radius
nach 5000 h bei $250 \frac{W}{cm}$ Stablängenleistung.

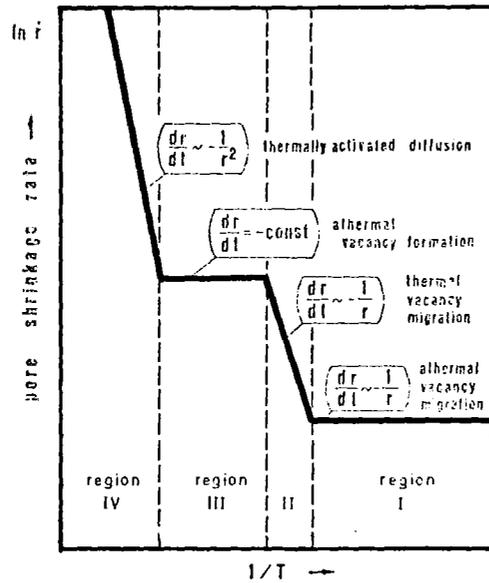


Abb.6: Verdichtungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Temperaturbereich für grobe Porosität, Aßmann-Stehle-Modell (Abbildung entnommen aus /8/).

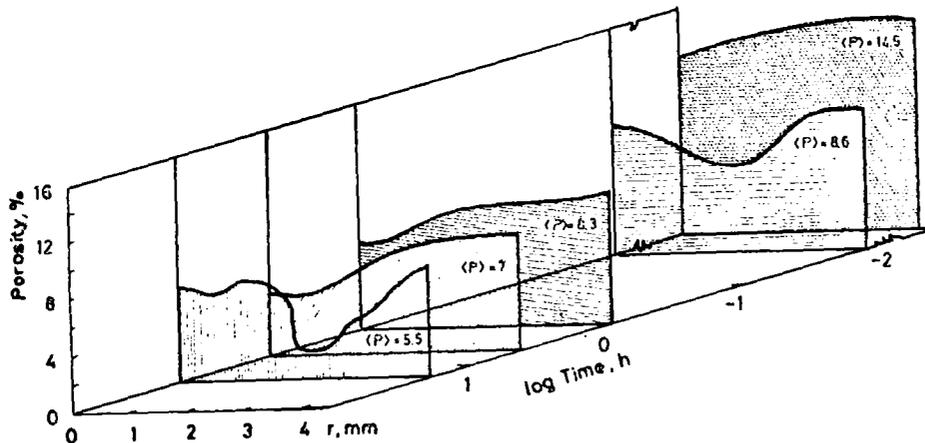


Abb.7: Porositätsverteilung von (U,Pu)C Pellets unter einem Temperaturgradienten von 1200 Grad/cm, aufgetragen über der Zeit (Abbildung entnommen aus /12/).

Diskussion nach Vortrag Preußer

Herr Elbel: Es gibt zur Brennstoffnachverdichtung noch andere Modelle, wie z.B. das Nichols-Modell, das die Porenwanderung beschreibt. Beabsichtigen Sie, auch diese Modelle zu untersuchen?

Herr Preußer: Das Nichols-Modell ist zweifellos ein interessantes Modell; es ist jedoch in seiner programmtechnischen Verwirklichung durchaus aufwendiger als das von Többe aufgestellte IAMBUS-Modell. Wir verwenden das IAMBUS-Modell ja gerade deshalb, weil es den Effekt der Nachverdichtung in einer Weise beschreibt, die sich sehr leicht in einem Rechenprogramm behandeln läßt. Durch eine Veränderung einzelner Parameter wollen wir dieses Modell zunächst so verbessern, daß die Kinetik des Prozesses richtig beschrieben wird. Von daher gesehen, besteht zur Zeit nicht die Absicht, weitere Modelle in URANUS einzubringen, wir konzentrieren uns zunächst darauf, die Modelle, die wir haben, so zu modifizieren, daß sie akzeptable Ergebnisse liefern. Wenn es sich jedoch erweisen sollte, daß wir mit den beiden beschriebenen Modellen nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen kommen werden, sollen auch weitere Modelle eingebracht werden. MATPRO/14/ bietet beispielsweise ebenfalls ein Nachverdichtungsmodell an.

Herr Elbel: Ich muß zugestehen, daß das Nichols-Modell in seiner modelltheoretischen Verwirklichung mehr Zeit braucht, als man z.B. bei Auslegungsrechnungen zur Verfügung stellen will. Aber es hat eben den großen Vorteil, daß Sie bestimmte Materialabhängigkeiten der Brennstoffnachverdichtung - wie die Abhängigkeit von der Stöchiometrie oder von dem Druck in der Pore - viel besser berücksichtigen können, und zwar in einer physikalisch relevanten Weise.

Dr. Kummerer: Ich beziehe mich auf den angesprochenen Vergleich der Rechenprogramme FRUMP-SATURN-URANUS (gemeint ist Abb.5). Bei URANUS ist die Nachverdichtung stärker und bricht dann plötzlich ab. Rein optisch sieht das so aus, als wenn das eine große Diskrepanz wäre, aber ansich muß die Kurve von URANUS beim Zentralkanal auf 100% schwenken.

Herr Preußer: Ja, das stimmt, dort liegt ein Sprung auf 100% vor. Das sollten wir in dem Diagramm besser darstellen.

Dr. Kummerer: Also liegt der Unterschied darin, daß bei den anderen Rechnungen am Rande des Zentralkanals eine Auffächerung des Mate-

rials , eine Übergangszone errechnet wird, während mit URANUS ein abrupter Sprung auftritt. Beim Experiment ist, soweit ich weiß, ein solcher Übergangsbereich tatsächlich vorhanden.

Dr. Ronchi: Das stimmt, aber das ist nicht so wichtig, denn der Einfluß im Bereich des Zentrums ist wegen der kleinen geometrischen Fläche doch relativ gering. Viel wichtiger sind die Unterschiede weiter außen, bei 0,6 oder 0,8 r. Aber ich komme zurück auf die Frage von Herrn Elbel - ich glaube, er hat ganz recht: entweder suchen Sie eine empirische Formel , um den Effekt zu beschreiben, die können Sie dann wählen, wie Sie wollen, oder Sie müssen die Physik richtig beschreiben. Dann dürfen Sie nicht solch ein einfaches Modell verwenden, sondern Sie müssen beispielsweise den Gasdruck und andere Parameter berücksichtigen, und das ist natürlich ein sehr großer Aufwand.

Dr. Többe: Die Dichte ist hier ja keine akademische Größe, sondern sie geht ein in die Brennstofftemperatur und in die Brennstoffmechanik, d.h., letztlich in die Hüllrohrmechanik. Man muß sich jetzt wirklich fragen, was man eigentlich will: will man die Dichte richtig beschreiben, oder will man die Brennstofftemperatur und die Hüllrohrbelastung richtig beschreiben? Man muß auch bereit sein, der Rechengenauigkeit wegen hier und da einmal Kompromisse zu machen. Ich plädiere deshalb für ein mehr empirisches Modell, denn es ist jederzeit möglich, durch die Wahl empirischer Konstanten eine Annäherung an die wahren Dichte-Verhältnisse im Brennstoff zu erzielen. In diesem Bild (gemeint ist Abb.5), ist ja noch nicht der stationäre Fall beschrieben, sondern irgendein Zeitpunkt, der hin zu dieser Verdichtung führt, wobei es in dem URANUS-Modell nur etwas schneller gelaufen ist als bei FRUMP und SATURN. Durch die Wahl einer geeigneten Zeitkonstante kann man schon eine viel bessere Übereinstimmung erzielen.

Herr Preußer: Ich darf darauf hinweisen, daß dieses Diagramm nach 5000 h Einsatzzeit entstanden ist, allerdings bei der relativ niedrigen Leistung von 250 W/cm.

Dr. Laßmann: Ich möchte noch einmal zu der Frage Stellung nehmen, ob man mehr physikalisch begründete Modelle oder empirische Modelle einsetzen soll. Ansich ist das URANUS-Rechenprogramm so konzipiert, daß wir, wo immer es möglich ist, auf "first principle"-Basis arbeiten. Wir möchten bevorzugt physikalische Modelle anwenden,

auch in der Mechanik selbst. Zur Nachverdichtung verwenden wir nun 2 Modelle, einmal das Modell nach Többe, das mehr empirischen Charakter hat, und auf der anderen Seite ein Modell von Aßmann und Stehle, das physikalisch weitgehend bis ins letzte Detail begründet ist. Beide Modelle haben Vor- und Nachteile. Wir können aber nicht alle Nachverdichtungsmodelle, die existieren, in den URANUS-Code einbringen. Wir glauben, daß das Modell von Aßmann und Stehle ein Modell auf einer sehr allgemeinen physikalischen Basis ist, das prinzipiell für jeden Brennstoff anwendbar sein sollte, und konzentrieren uns auf dieses Modell. Auf der anderen Seite muß ich allerdings sagen, daß vom ingenieurmäßigen Standpunkt her das Modell von Többe sehr praktisch ist. Es ist in der Lage, Experimente zu beschreiben, es ist in sich plausibel und rechentechnisch sehr einfach, so daß wir nach wie vor dieses Modell beibehalten möchten. Wir sind also nicht prinzipiell dagegen, Modelle auf physikalischer Basis einzuführen, nur haben wir uns in diesem Fall auf eines, nämlich auf das Aßmann/Stehle-Modell konzentriert. Soviel ich weiß, ist es bis jetzt erst für eine dieser verschiedenen Zonen, die in dem Modell enthalten sind, geeicht. Als umfassendes Modell ist es selbst bei der KWU noch nicht geeicht, ist das richtig?

Herr Wunderlich: Es ist richtig, daß das Modell noch nicht umfassend geeicht ist. Für die Eichung für die praktische Anwendung analysieren wir Pellets, die aus dem Reaktor kommen und deren Einsatzgeschichte wir kennen, hinsichtlich ihrer Porosität. Für die Eichung sollte man die radiale Porositätsverteilung und die Porengrößenverteilung kennen.

Dr. Laßmann: Das ist nun der Nachteil der physikalisch sehr detailliert begründeten Modelle, die nicht nur 3 oder 4 ingenieurmäßige Parameter als empirische Konstanten verwenden, sondern eine ganze Fülle von Konstanten aufweisen. Diese müssen erst einmal geeicht werden.

Herr Elbel: Ich möchte zur Klärung eventuell vorhandener Mißverständnisse folgendes feststellen: Das Aßmann/Stehle-Modell ist in erster Linie dazu gedacht, im Brennstoff des thermischen Reaktors Nachverdichtungsphänomene zu beschreiben, die durch bestrahlungsinduziertes Nachsintern auftreten. Bei dem Többe-Modell soll dagegen die Verdichtung des Brennstoffes beschrieben werden, die durch

die Wanderung der Poren hervorgerufen wird. Physikalisch sind die Modelle daher nicht vergleichbar. Zu Beginn der Entwicklung des SATURN-Rechenprogrammsystems haben auch wir versucht, mit einem einfacheren Modell zu arbeiten. Wir hatten damit wenig Erfolg. Die Ergebnisse aus Experimenten mit sehr kurzer Bestrahlungszeit unterschieden sich von denen mit längerer Bestrahlungszeit so stark, daß wir zwei deutlich verschiedene Parametersätze für ein ansich gleiches Verhalten benötigt hätten. Deshalb sind wir von einem einfachen empirischen Modell abgegangen und haben ein etwas aufwendigeres physikalisches Modell verwendet. Mit ihm konnten wir die beobachteten Phänomene zufriedenstellend beschreiben.

Dr. Kuczera: Eine Frage zum Verständnis: die Schrumpfungsvorgänge sind doch mit Relativbewegungen verbunden. Auf welchen Referenzradius beziehen Sie sich?

Dr. Laßmann: Wir haben eine sehr klare Trennung zwischen einer "kalten" und einer verformten Geometrie eingeführt. Der aktuelle Radius entsteht aus der kalten Geometrie plus der aktuellen Verschiebung unter Berücksichtigung großer Verformungen. Wenn man einen Zentralkanal zuläßt und vorher ein Vollpellet hatte, muß das ursprüngliche Referenzsystem auf eine neue Geometrie - das Hohlpellet - umdefiniert werden. Das wird auf physikalischer Basis gemacht, indem man von einem festen Punkt aus durch eine Volumenbilanz, die nicht isotrop sein muß, eine neue Referenzgeometrie ermittelt und damit neue Referenzradien definiert. Diese Änderung des Referenzsystems ist prinzipiell notwendig, weil in der mechanischen Behandlung der Vollpellets die Randbedingung enthalten ist, daß die Verschiebung im Zentrum, also bei $R = 0$, gleich Null ist.

Dr. Ronchi: Sie können in der Zentralzone des Brennstabes durchaus eine Verdichtung haben, ohne daß sich die geometrischen Maße des Brennstoffes ändern. Maßgebend ist das Verhalten des äußeren Ringes; wenn dort keine Dichtevariation auftritt, haben Sie keine Geometrieänderung, auch wenn sich innen ein Zentralkanal bildet. Aber in dem Moment, in dem Sie "Cracks" einführen, kann die Porositätskurve als Funktion des Radius zu einer großen Veränderung der geometrischen Größe der Tablette führen. Hier liegt ein großes Problem.

Dr. Caligara: Wenn Sie annehmen, daß jeder Ring eine konstante Menge von Materie enthält, können sich die Grenzen der Ringe bewegen infolge Schwellens, thermischer Ausdehnung, Porenwanderung usw.

Dr. Laßmann: Das ist automatisch in der mechanischen Lösung enthalten. Für den Fall, daß eine Tablette schrumpft, wandern sämtliche Radien, bedingt durch Änderungen von Dehnungen, mit. Nur im Fall, daß tatsächlich eine andere Geometrie entsteht, wenn also aus dem Vollpellet ein Hohlpellet wird, müssen wir einmal eine Umdefinition vornehmen. Alles andere ist durch die mechanischen Grundgleichungen automatisch erfüllt.

Dr. Caligara: Wenn Sie annehmen, daß es in dem Zentralring eine fixe Menge von Materie gibt, kann sich dort ein Loch bilden allein durch Porenwanderung, nicht Materiewanderung. Durch die Grenzen der Ringe kann nur das Gas wandern, und der Zentralkanal bildet sich dann automatisch, ohne Änderung der Koordinaten. So wird es z.B. in TPROF gemacht und das geht dort sehr gut.

Dr. Laßmann: Ich weiß nicht, ob dies richtig ist. Ich sehe auch nicht ein, warum man es so machen soll. Die mechanische Lösung selbst sagt uns, daß aus gewissen Dehnungen - über Verträglichkeitsbedingungen - Verschiebungen resultieren. Daher sehe ich keine Notwendigkeit, solche Bilanzen zusätzlich zu machen. Selbstverständlich muß man bei einer Code-Verifikation über solche Massenbilanzen Rechenschaft ablegen.

Dr. Caligara: Ist es eine Annahme, daß die Bilanz korrekt ist?

Dr. Laßmann: Ja. Natürlich ist hier eine gewisse Rechentechnik enthalten, die im Nachhinein überprüft werden muß. Wir gehen einen etwas anderen Weg als Sie in Ihrem TPROF-Code. Ich glaube aber, daß unsere Ausgangspunkte nicht so verschieden sind, wie es jetzt scheint. Sie verwenden sicher eine ähnliche Differenzierung in Referenzgeometrie und aktuelle Geometrie. Es gibt allerdings Rechenprogramme, die diesen Unterschied nicht machen, CRASH gehört dazu. Dies ist nur für kleine Verformungen zulässig, die deutlich unter einem Prozent bleiben. Wir haben jedoch mit Nachverdichtungen in der Größenordnung von mehreren Prozent zu tun, außerdem treten Probleme großer Verformungen auf, z.B. 100%-iges "ballooning" und ähnliche Effekte, so daß wir diesen Aspekt von Referenzgeometrie und aktueller Geometrie sehr sorgfältig analysiert haben.

Stand der Versuchsanlage zur Simulation von out-of-pile
Hüllrohrbelastungen

H.-J. Müller

Ich möchte nach einer kurzen Beschreibung der Kriechbeulanlage, die wir Ihnen im Anschluß an die Vorträge noch vorführen werden, einen Abriß über Vorschläge für die weitere Versuchsplanung geben. Die endgültige Formulierung des Programms muß dann noch mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe abgesprochen werden. Die Anlage (Abb.1), die vom Kernforschungszentrum Karlsruhe finanziert wurde, dient zur Messung von Hüllrohrverformungen aus Druck- und Temperaturbelastungen. Sie besteht aus 10 Autoklaven, in die die ca. 100 mm langen Stahl- oder Zircaloy-Hüllrohrabschnitte eingesetzt werden.

Die Beheizung kann bis zu einer Temperatur von etwa 1000°C erfolgen, es wird über die gesamte Länge der Rohrproben geheizt, die Temperatur wird an 3 Meßstellen im Abstand von jeweils 50 mm registriert. Die Heizleistung wird manuell geregelt.

Die Rohrproben können durch Innen- oder Außendruck belastet werden. Dementsprechend wird wahlweise im inneren oder äußeren Bereich ein Vakuum von ca. 10^{-3} mbar erzeugt, um eine Verzunderung der Kapazitätsmeßsonde und beim Einsatz von Stahl-Hüllrohrproben auch der Hüllrohre selbst zu vermeiden.

Druckseitig wird Helium als Inertgas verwendet.

Die Anlage ist für einen Maximaldruck von 500 bar ausgelegt; der Druck wird ebenfalls manuell geregelt.

Die Veränderung der Hüllrohrgeometrie wird kapazitiv gemessen; dabei stellt die Rohrprobe zusammen mit der sogenannten Meßsonde einen Zylinderkondensator dar, dessen Kapazitätsänderung ein Maß für die Verformung des Hüllrohres ist. Der spezielle Anwendungsbereich dieses Meßverfahrens ist das kontinuierliche Messen kleiner Verformungen; deswegen sollten die Versuche, ausgehend von stationären Belastungen, wie sie von Herrn Krugmann im Rahmen seiner Arbeit [1] durchgeführt wurden, auf vergleichsweise milde transiente oder auch wechselnde Belastungen beschränkt bleiben. Und damit komme ich zu den Vorschlägen für die weitere Versuchsplanung.

Grundsätzlich ist bezüglich der Belastungsgrößen und Meßergebnisse geplant, diese Daten auf einen kleinen vorhandenen Prozeßrechner zu geben, den man bei entsprechend geänderter und - allerdings erheblich - erweiterter Ausstattung des Versuchstandes auch zur Regelung der Versuchsabläufe verwenden könnte. Mit Vorbereitungen dafür hat Herr Trettin, der auch die Anlage betreut, bereits begonnen. Das Meßergebnis aus der Veränderung der Hüllrohrgeometrie wird in vorgebbaren Zeitschritten ausgedrückt und auf einem Lochstreifen registriert. Dieser wurde in den in der Institutshalle befindlichen Prozeßrechner eingelesen, die Daten von dort zum Fachbereichsrechner transferiert und die aus der Kapazitätsänderung berechnete Veränderung der Hüllrohrgeometrie durch den Plotter graphisch dargestellt.

In Abb.2 haben wir eine solche Darstellung aus der Arbeit von Herrn Krugmann [1]. Zu der Zeit war allerdings der Datentransfer noch nicht eingerichtet. Aufgetragen ist die radiale Aufweitung eines Hüllrohres über der Zeit, beaufschlagt mit einem Innendruck von etwa 18 N/mm^2 bei einer Temperatur von 700°C .

Als nächste wichtige Verbesserung bezüglich der Versuchsabläufe wird die Temperaturregelung automatisiert.

Nun zu den Versuchen selbst.

Aufgrund des Ausschnittes Druck und Temperatur aus der Gesamtbelastung der im Reaktorbetrieb eingesetzten Hüllrohre kann natürlich aus den Versuchsergebnissen nur ein Beitrag zur Beschreibung des Hüllrohrverhaltens geliefert werden. Jedoch liegen insbesondere für transiente Lastfälle z.Zt. nur sehr wenige Ergebnisse vor, und die ermittelten Kriechparameter beziehen sich auf Gesetze, die für stationäre Belastungen gelten, z.B. das Norton'sche Kriechgesetz.

Grundsätzlich muß aber damit gerechnet werden, daß für die Beschreibung des Hüllrohrverhaltens unter transienter Belastung andere Gesetze gelten.

Eine Aufgabe könnte es sein, Daten für die Entwicklung neuer Modelle zu liefern, die nach entsprechender Absicherung dann auch in die vorhandenen Brennstab-Codes integriert werden könnten.

Ein Vorschlag in dieser Richtung ist, eine Reihe von Versuchsserien zu fahren, bei denen jeweils eine Lastgröße auf verschie-

denen Niveaus konstant gehalten wird, und die andere transient ist mit verschiedenen Änderungsgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse hieraus würden neben der Ermittlung von Kriechparametern für transiente Belastung zur Überprüfung verschiedener Sensitivitätsstudien dienen, die mit einigen Brennstab-Codes, hier am Institut mit dem URANUS, vorgenommen wurden. Mit Hilfe dieser Sensitivitätsstudien wurde der Einfluß von Schwankungen verschiedener Lastgrößen, Werkstoffdaten und Kriechparameter überprüft.

Mit den Versuchsergebnissen könnte der wechselseitige Einfluß dargestellt werden, und dies würde als Grundlage für weitergehende Statistik-Untersuchungen dienen. Es wurde bereits eine Reihe von Berechnungen mit Statistik-Versionen verschiedener Brennstab-Codes durchgeführt, hier am Institut mit dem URANUS. In der Abb.3 ist das Ergebnis einer Statistik-Rechnung auf der Grundlage der Monte-Carlo-Methode dargestellt [2]. Aufgetragen ist die relative Häufigkeit über der Standzeit, wobei als Standzeit die Zeit definiert wurde, nach der das Hüllrohr unter stationärer Belastung eine Grunddehnung von 20% erreicht hatte.

Eine die Aussagefähigkeit einschränkende Vereinfachung bestand jedoch noch darin, daß alle Eingabegrößen als unabhängige Parameter eingesetzt wurden. Insgesamt wäre die Verbesserung oder auch Absicherung der vorhandenen Modelle und Stabrechenprogramm-Versionen im Hinblick auf die Aussagefähigkeit der Rechenergebnisse eine wichtige Aufgabe.

Es erscheint wünschenswert, für einige besonders interessante Belastungsfälle die Versuchsserien so umfangreich anzulegen, daß eine statistisch gesicherte Aussage gemacht werden kann. Die Belastungsfälle sollten jeweils zweckmäßigerweise so gewählt werden, daß sie dem Lastanteil einer vorgegebenen Gesamtbelastung für eine bestimmte Gruppe von Hüllrohren eines Cores entsprechen. Nach dem Schluß dieser dann vorliegenden quasi Stichprobenauswertung auf die Grundgesamtheit wäre eine Aussage über das wahrscheinliche Hüllrohrverhalten dieser Lastgruppe möglich.

L i t e r a t u r

- [1] Krugmann, U., Kriechen von Brennstabhüllrohren des Brutreaktors bei hoher Temperatur unter Innen- bzw. Außendruck. Entwicklung eines theoretischen Modells und eines Verfahrens zur kontinuierlichen Messung der Verformung.
Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Hochschule Darmstadt, veröffentlicht vom Kernforschungszentrum Karlsruhe als Bericht KfK 2336, 1976
- [2] Müller, H.-J., Zur Hüllrohrverformung unter transienter Belastung
Diplomarbeit am IRT im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Hochschule Darmstadt, 1977, S.38

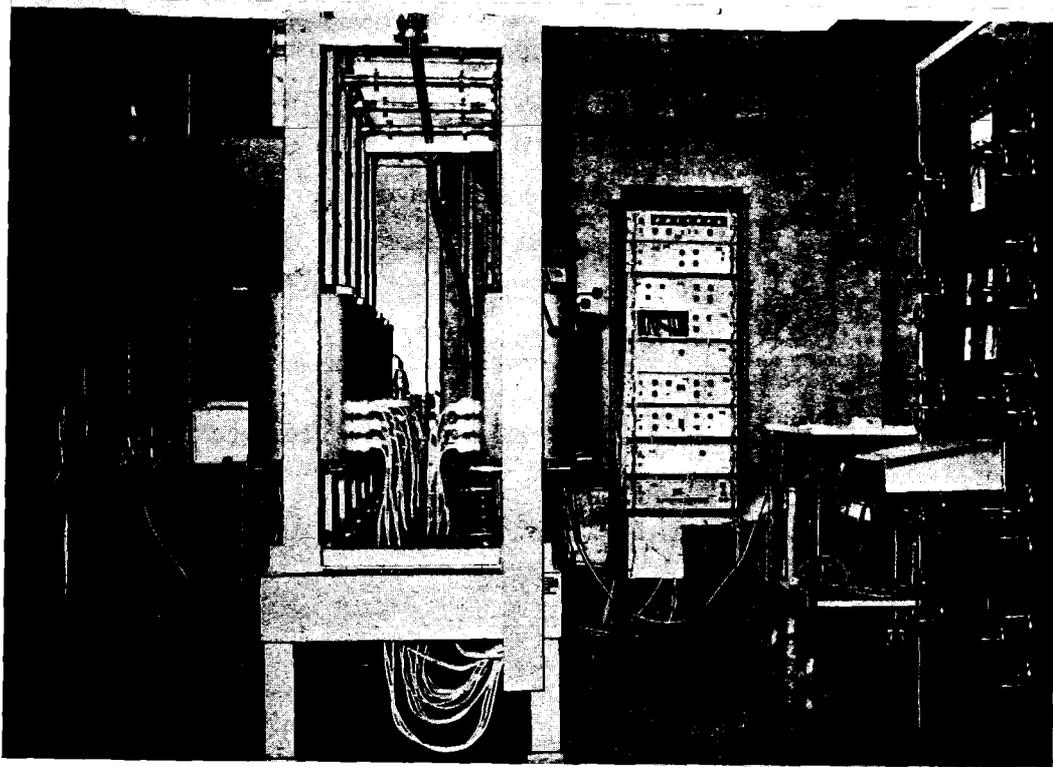


Abb.1: Teilansicht der Versuchsanlage zur Simulation von out-of-pile Hüllrohrbelastungen

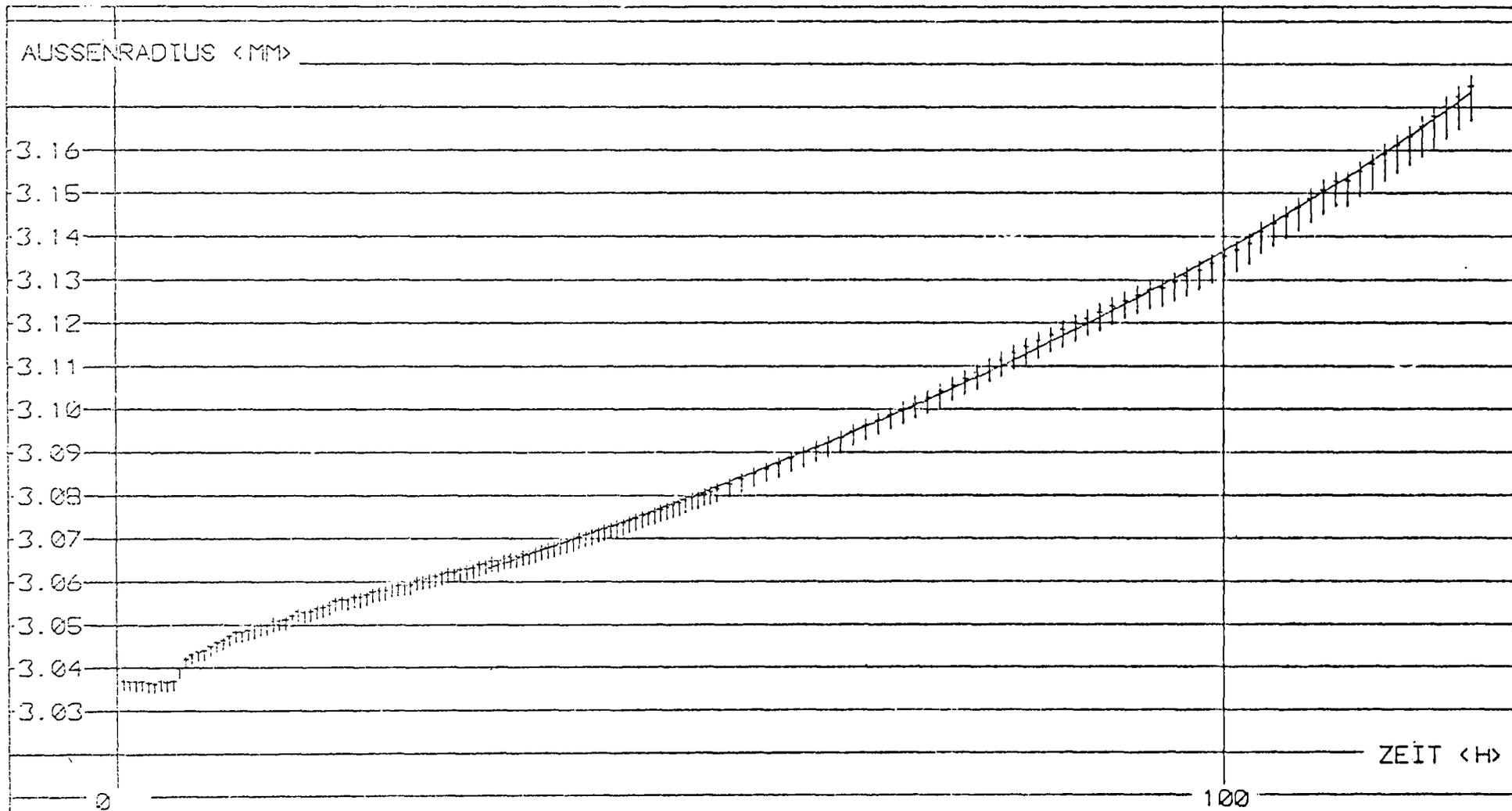


Abb. 2 RADIALE AUFWEITUNG
PROBE 4

DRUCK 17.66 N/MM²
TEMPERATUR 700 °C

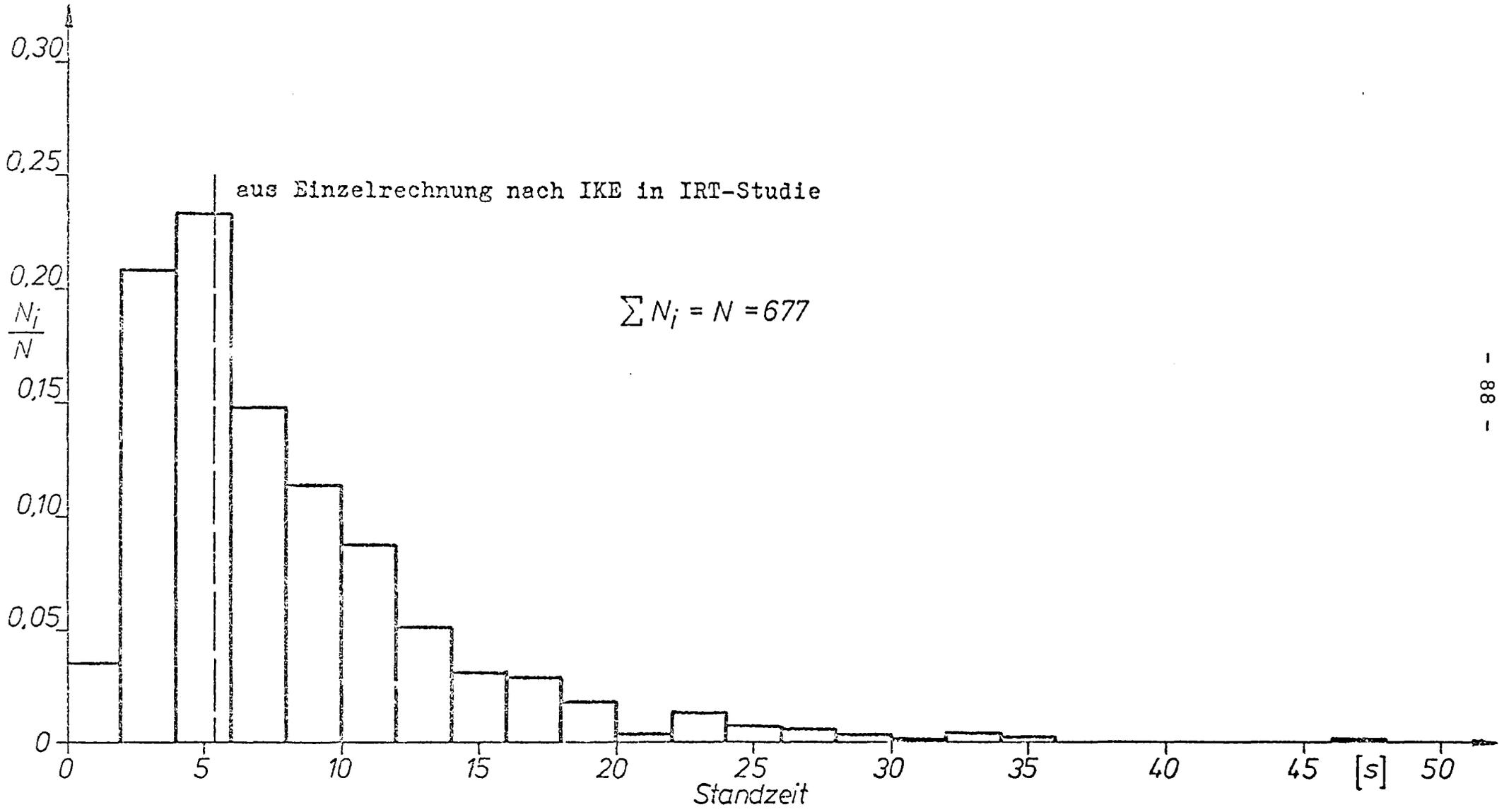


Abb. 3 Verteilung der Standzeiten aus den Statistik-Rechnungen mit der Formel nach IKE in IRT-Studie [4, 7]

Diskussion nach Vortrag Müller

Dr. Blank: Über welche Länge messen Sie die Durchmesseränderung?

Herr Müller: Über eine Länge von ungefähr 10 mm in der Mitte der Hüllrohrprobe.

Dr. Ronchi: Bis auf welche Temperatur?

Herr Müller: Wir heizen bis maximal 1000°C auf. Wir könnten noch höher heizen, aber darüber hinaus haben wir Probleme mit der Abdichtung der Öfen, die Glaswolle fängt dann an zu schmelzen.

Prof. Humbach: Es gibt auch noch ein anderes Problem, die zunehmende thermische Emission von Elektronen. Die Kapazitätsmessung wird dann schnell ungenau.

Herr Müller: Der Hauptarbeitsbereich soll bei 700 bis 800°C liegen.

Dr. Ronchi: Aber das hängt mit dem Material zusammen.

Herr Müller: Ja natürlich, ob wir Zirkaloy- oder Stahl-Hüllrohrproben einsetzen.

Dr. Többe: Ich finde Ihren Hinweis sehr interessant, daß Sie mit Ihrer Versuchsanordnung auch Transienten nachbilden können. Wie schnell können diese Transienten sein?

Herr Müller: Es ist so, daß ja zur Zeit die Anlage noch manuell geregelt wird, das ist natürlich noch ein wesentlicher Nachteil. Wenn man jetzt wirkliche Versuchsserien fahren will mit reproduzierbaren Daten, dann müßte bis dahin zumindest die Temperaturregelung automatisiert werden, und das ist ja auch als nächstes vorgesehen. Dann müssen wir erst einmal sehen, wie schnell wir aufheizen können.

Prof. Humbach: Dabei ist natürlich die Leistung, die Sie einstellen, nicht identisch mit dem, was Sie an Temperatur hinten herausbekommen, sondern Sie müssen eine Eichkurve dazwischenlegen mit definierten Temperaturbereichen.

Dr. Többe: In einem Reaktor wie dem SNR laufen Temperaturtransienten im Bereich von 5 bis 10 sec ab; wären z.B. solche Temperaturtransienten nachvollziehbar?

Herr Müller: Nein, in der Größenordnung nicht, das ist zu schnell.

Prof. Humbach: Zumindest bei der gegenwärtigen Methode der Beheizung. Es wäre etwas anderes, wenn man das Hüllrohr selber als

Widerstand verwendet und es elektrisch aufheizt. Wir haben dazu noch keine Erfahrungen.

Dr. Preininger: Meine Frage ist an und für sich schon beantwortet worden. Die Prüflingsbeheizung erfolgt von außen über Heizwicklungen. Dementsprechend ist die erreichte Aufheizgeschwindigkeit der Anlage sehr klein und damit auch für Transientenexperimente, denen Aufheizraten in der Größenordnung von über $100^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ zugrunde liegen, nicht anwendbar.

Prof. Humbach: Nein, das ist mit der gegenwärtigen Apparatur auf keinen Fall erreichbar.

Dr. Preininger: Wir haben im KfK-IMF/II eine speziell diesbezüglich entwickelte Anlage für Transientexperimente, die über ein Innenheizsystem mit Widerstandsheizwendeln Aufheizraten von $180^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ erreicht.

Prof. Humbach: Was haben Sie da für eine Wandstärke für das aufgeheizte Rohr?

Dr. Preininger: Die Wandstärke ist unter $0,5\text{ mm}$ (Mark 1a-Spezifikation).

Prof. Humbach: Darin liegt durchaus schon ein Problem: wenn Sie in einer Sekunde um 200° heraufgehen wollen, spielt die Wandstärke schon eine Rolle.

Dr. Preininger: Ja sicherlich.- Darüber hinaus haben wir damit auch möglicherweise Effekte, die von der thermischen Eigenspannungsbildung kommen. Eine solche ist kurzzeitig, insbesondere in und nach der Abkühlphase der Transiente gegeben, wo die Relaxationsmöglichkeiten durch thermische Effekte weitgehend unterbunden sind. Dies sind neben anderen (Erholung, Rekristallisation) z.B. dynamische Effekte, mit denen wir es unter den Transientbelastungen: schnelle und kurzzeitige Aufheizung bis auf 1200°C oder 1300°C , mit wiederum nachfolgend schneller Abkühlung, zu tun haben.

Prof. Humbach: Nein, das wird bei unserer Anlage nicht erreichbar sein, darüber müssen wir uns klar sein.

Dr. Preininger: Vielleicht noch eine andere Frage. Die Ermittlung der Kriechgeschwindigkeit unter stationären Temperaturbedingungen ist, wie ich glaube, mit Ihrer Methode über Kapazitätsmessung sehr genau. Können Sie diesbezüglich einen Wert für eine bestimmte Versuchszeit angeben?

Herr Trettin: Es ist möglich, bis zu einigen um genau zu messen, etwa auf ± 5 bis ± 10 μm genau, Sie sehen das schon aus der Kurverdarstellung in Abb.2 des Vortrages. Die Methode ist dabei auch sehr zuverlässig.

Dr. Preininger: Ist dies definitiv eine Verbesserung gegenüber der üblichen Methode der Messung mittels induktiver Wegaufnehmer über Quarzschneiden?

Herr Trettin: Der wesentliche Vorteil gegenüber den Wegaufnehmern ist, daß wir über den ganzen Umfang messen können, Kriechen und Beulen, und das über eine Strecke, wie Herr Müller schon sagte, von 10 bis 20 mm. Aber ich zeige Ihnen nachher in der Anlage nochmal dieses Meßsystem genau.

Prof. Humbach: Ihre induktiven Aufnehmer, sind die über ein Hebelsystem gekoppelt?

Dr. Preininger: Die Quarzschneiden werden an der Probenoberfläche mit geringen Drücken aufgegeben. Die Messung erfolgt über eine axiale Länge von 5 mm, allerdings nur an zwei radial gegenüberliegenden Punkten der Probenmitte.

Prof. Humbach: Hier liegt ein Vorteil bei unserer Methode, ich weiß nicht, ob Herr Trettin es gesagt hat: die Berührungsfreiheit der Messung.

Dr. Preininger: Ja, bei hohen Temperaturen generell sicherlich. In unserem Falle der Transientenversuche (SNR) spielt der Druck der Federelemente an die Probenoberfläche (10 p), angesichts der Innendruckbelastung von 50÷70 bar, dies entspricht dem Spaltgasdruck, keine Rolle.

Dr. Kummerer: Ich möchte nur sagen, daß meiner Meinung nach wirklichkeitsgetreue transiente Experimente nicht möglich sind, selbst wenn sie vom Zeitprogramm her durchführbar sind. Denn es ist doch der Temperaturgradient in der Hüllrohrwand falsch, weil ja von außen geheizt wird anstelle von innen.

Dr. Ronchi: Sind Sie auch in der Lage, chemisch aktive Gase in die Rohre zu bringen, CO_2 oder Sauerstoff?

Herr Müller: Ja, das ist grundsätzlich nicht ausgeschlossen, aber eigentlich nicht geplant. Ich weiß, daß es Untersuchungen gibt, den Einfluß von Jod auf das Verformungsverhalten der Hüllrohre zu bestimmen. Das ist bei uns zunächst nicht geplant, grundsätzlich

ist es möglich. Es kommt eben nur darauf an, welches Gas wir druckseitig verwenden, es könnte auch ein Gasgemisch sein.

Prof. Humbach: Aber ich glaube, man muß sich darüber im klaren sein, daß so etwas nicht einfach mit CO₂ gemacht ist, sondern man muß eine gewisse Präparationstechnik haben, um das alles wirklich sauber auszuwerten. In dem Zusammenhang vielleicht noch ein Hinweis darauf, daß das Elektronenmikroskop, das wir jetzt hier haben, vielleicht bei der Beurteilung der Kriechvorgänge der Rohrproben noch eine nützliche Rolle spielen könnte.

Darstellung des Projekts zur Simulation von Strahlenschäden

K. Schmelz

Einleitung

Die Untersuchung von Strahlenschäden wird an unserem Institut seit etwa 1971 betrieben. Seit Beginn wurde eine enge, nicht vertraglich gebundene Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe gepflegt. Im wesentlichen erfolgte diese Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Ehrlich, der die jeweiligen Arbeiten mitbetreut, teilweise hat er auch seine Experimentiereinrichtungen zur Verfügung gestellt.

Die ersten Arbeiten waren die inzwischen abgeschlossenen Doktorarbeiten der Herren Giesecke und Jahnke. Sie befaßten sich mit der Untersuchung des bestrahlungsinduzierten Schwellverhaltens durch Poren in Metallen. Herr Giesecke hat Reinstkupfer und Kupferlegierungen untersucht, Herr Jahnke Reinstaluminium und Al-Mg-Si-Legierungen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden noch später behandelt. Zunächst soll ein allgemeiner Überblick über Simulationsbestrahlungen gegeben werden.

Simulationsbestrahlungen

Unter Simulationsbestrahlungen versteht man Bestrahlungen mit Schwerionen oder Elektronen mit dem Ziel, im Material ähnliche Schädigungen zu erzeugen, wie man sie nach Neutronenbeschuß findet. Da die Wechselwirkungsquerschnitte für Schwerionen bis zu 10^6 höher liegen können als bei Neutronen (man sieht das in Bild 1, wenn man z.B. Ta-Ionen und schnelle Neutronen vergleicht), eignen sich Simulationsbestrahlungen für Hochdosisuntersuchungen.

Bei Hochdosisuntersuchungen kann man innerhalb kürzester Zeit im bestrahlten Material Schädigungen erzeugen, wie sie nach Neutronenbeschuß erst nach vielleicht 10 Jahren auftreten. Vor allem die höheren Neutronenflüsse in schnellen Brutreaktoren oder in den geplanten Fusionsreaktoren haben solche Hochdosisexperimente wieder aktualisiert.

Notwendiger aber als die einfache Anhäufung von dpa (displacement per atom) ist die Klärung von physikalischen Zusammenhängen. Einmal ist die Frage der Wechselwirkung des einfallenden Teilchens mit dem Kristallverband wichtig. Zum anderen ist das Verhalten des gestörten Kristalls zu erforschen, um z.B. Materialeigenschaften optimieren zu können oder langfristige Voraussagen über Materialverhalten machen zu können.

Vor allem die Wechselwirkungsunterschiede der einzelnen Projektile mit den Gitteratomen setzen der Simulation gewisse Grenzen. Neutronen wechselwirken über die Kernkräfte. Das gibt Stöße harter Kugeln, die ausgeprägte Stoßkaskaden zur Folge haben. Schwerionen wechselwirken über das wesentlich weichere Coulombpotential, dadurch werden erheblich mehr Einzeldefekte erzeugt. Beim Übertragen von Simulationsergebnissen auf Neutronensituationen muß dieser Unterschied berücksichtigt werden. Man sieht daraus sofort, daß man nicht auf Neutronenbestrahlungen verzichten kann.

Reaktorbestrahlungen haben aber mehrere Nachteile. Sie sind sehr kostspielig, sehr zeitraubend und in ihrer Interpretation, wegen der großen Zahl verschiedener gleichzeitiger Einflüsse, nicht immer eindeutig. An Beschleunigern kann man dagegen im allgemeinen billiger und mit kürzeren Zeiten bestrahlen. In der Regel lassen sich verschiedene Einflüsse auch besser separieren. Vor allem für das Studium der Festkörperantwort auf die Schädigung ist es wichtig, wenn man z.B. die Temperatur oder die Flußdichte variieren kann.

Wie man in Bild 1 weiterhin sieht, kann man zwei Arten von Simulationsbestrahlungen unterscheiden: Bestrahlungen im Peakbereich, also in der Nähe des Bahnendes der Schwerionen, oder Bestrahlungen im Coulombbereich.

Peakbestrahlungen eignen sich für Hochdosisuntersuchungen. Nachteilig ist, daß der Schädigungsbereich sehr schmal ist und starke Inhomogenitäten aufweist. Zur Auswertung kommt das Elektronenmikroskop in Frage. Nachteilig und störend kann sich noch auswirken, daß die Ionen in Peaknähe implantiert werden, es kann Fremdatomeffekte geben.

Bestrahlungen im Coulombbereich haben eine viel bessere Homogenität. Die geschädigten Bereiche erstrecken sich über Mikrometer. Dadurch können auch makroskopische Eigenschaften, wie z.B. der

elektrische Widerstand, in günstigen Fällen auch mechanische Eigenschaften untersucht werden. Naturgemäß liegen die erreichten Dosen niedriger.

Damit will ich die allgemeinen Ausführungen zur Simulation abschließen und auf unsere Bestrahlungsmöglichkeiten zu sprechen kommen.

Bestrahlungseinrichtungen

In Darmstadt sind wir in der glücklichen Lage, mit der GSI einen sehr leistungsfähigen Beschleuniger an der Hand zu haben. Bild 2 ist eine Prinzipskizze des UNILAC. Der Strahl wird in einem der beiden Injektoren erzeugt und anschließend beschleunigt. In der Stripperhalle wird nochmals der Ladungszustand geändert. Hier fällt ein auch für Experimente geeigneter Teilchenstrahl, der sogenannte Parasitärstrahl, an. Die gewünschte Ionenkomponente des gestrippten Strahls wird anschließend weiterbeschleunigt und steht am Hochenergieende zur Verfügung.

Das Hochenergieende hat sehr geringe Stromstärken, die Ionen haben einen geringen Wirkungsquerschnitt, und Experimentierzeit ist nicht leicht zu haben. Daher interessiert es weiterhin nicht.

Mit dem Parasitärstrahl lassen sich Bestrahlungen im Coulombbereich durchführen. Nachteilig ist, daß man hier sehr stark von den Experimentierzielen des Hochenergieendes anhängt.

Unsere bisherigen Bestrahlungen wurden am Testinjektor durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine komplette Strahlerzeugungseinheit für den UNILAC, die zwar im Beschleunigerbau untergebracht, aber nicht an den Beschleuniger angeschlossen ist. Der Testinjektor beschleunigt elektrostatisch mit Spannungen bis 300 kV. Er zeichnet sich durch hohe Stromstärken und ein breites Ionenspektrum aus.

Man kann am Testinjektor gut Bestrahlungen mit Selbstionen (also z.B. Al-Ionen auf Al-Targets) durchführen. Man vermeidet dadurch Verunreinigungseffekte durch Implantation. Am Testinjektor kann man den Verlagerungsquerschnitt über die Ordnungszahl Z der Ionen

oder die Energie variieren. Bei solchen Experimenten bieten sich auch Parallelversuche am Parasitärstrahl an.

Interessant ist der Energiebereich der Ionen. Er entspricht Energien, wie sie primäre Rückstoßatome nach einem Anstoß durch ein schnelles Neutron haben.

Dazu sei folgendes angemerkt: Neutronen wechselwirken zwar über die Kernkräfte, erzeugen aber schon beim ersten Stoß ein Rückstoßatom, das nun seine Energien weiterhin über die Coulombkräfte abgibt. Der Unterschied zwischen Neutronenbestrahlungen und Ionenbestrahlungen muß also nicht so dramatisch sein, wie man zunächst glaubt. Die Energien am Testinjektor kommen dem entgegen.

Mit diesem Vorteil handelt man sich aber sofort einen Nachteil ein. Die Eindringtiefen der Ionen vom Testinjektor betragen nur einige Tausend Angström. Man schädigt also nur eine schmale Zone unter der Oberfläche. Damit läuft man Gefahr, Verfälschungen zu erhalten. Leerstellen können abdiffundieren, Verunreinigungen, Oxidschichten oder mikroskopische Rauigkeiten können die Ergebnisse stark verfälschen. Die Präparation und die Auswertung ist also nicht unproblematisch.

Präparation und Auswertung

Die Probenpräparation erfordert einiges an metallographischer Behandlung. Das ist vor allem Schleifen und mechanisches und elektrolytisches Polieren. Auch Hochvakuumbehandlungen, vor allem Tempern ist erforderlich. Hier brauchen wir noch eine bessere Ausrüstung.

Ein zentraler Punkt ist allerdings das Elektronenmikroskop. Wir haben ein Gerät der Firma Jeol, ein JEM 100 C. Die Beschleunigungsspannung beträgt maximal 100 kV. Die Strichauflösung im Transmissionsbetrieb ist etwas besser als 5 \AA . Durch andere Probenhalter soll sogar 1.4 \AA erreichbar sein.

Das Elektronenmikroskop ist mit einem euzentrischen Side-Entry-Goniometer ausgerüstet, mit einem Kippbereich von $\pm 60^\circ$.

Das ist sehr angenehm für kristallographische und stereoskopische Auswertungen, weil man keine nennenswerten Probleme mit der Bildauswanderung beim Kippen hat.

Ich möchte sofort auf den ebenfalls am Gerät vorhandenen Rasterzusatz zu sprechen kommen. Der Elektronenstrahl kann gebündelt werden und so über die Probe hinweg gerastert werden. Mit Hilfe von Photomultipliern kann dann auf einer Oszillographenröhre ein Transmissionsbild, oder mit den emittierten Sekundärelektronen ein Oberflächenbild aufgenommen werden. Das ist sehr hilfreich wegen der schon erwähnten Schwierigkeiten mit Oberflächeneffekten.

Die Proben können sowohl vor als auch nach den Bestrahlungen auf Oberflächenverunreinigungen untersucht werden. Durch Vergleich der Oberflächen- und Transmissionsbilder können Oberflächeneffekte und Volumeneffekte leicht unterschieden werden. Ein bei einigen Metallen stark störender Sputtereffekt kann z.B. durch das Ausmessen der Stufe zwischen bestrahlten und unbestrahlten Stellen erfaßt werden. Mit dem Rasterzusatz kann man gut Übersichtsaufnahmen machen. Da die Intensität des durchtretenden Elektronenstrahls direkt quantitativ gemessen werden kann, war es z.B. möglich, in einer Diplomarbeit von Herrn Madjzoub, die Qualität einer für das Elektronenmikroskop präparierten Probe einigermaßen quantitativ zu erfassen. Als letzter Vorteil sei noch die Mikrobeugung erwähnt, die es gestattet, mit dem fokussierten Strahl Beugungsaufnahmen aus einem 200 \AA° Bereich zu machen. Das ist vor allem für die Identifizierung von Ausscheidungen interessant.

Damit habe ich im wesentlichen die Ausrüstung für die Strahlenschädigung umrissen. Man sollte hier sagen, daß diese Ausrüstung natürlich für Versuche, wie sie Herr Müller angesprochen hat, auch nützlich werden kann, wenn mikroskopische Effekte auf der Oberfläche oder im Material untersucht werden müssen.

Bisherige Arbeiten

Ich möchte nun auf die bisherigen Arbeiten zu sprechen kommen. Zunächst will ich den allgemeinen Rahmen abstecken, wie er von Herrn Ehrlich initiiert worden ist.

Am Testinjektor kann man verhältnismäßig billig viele Proben durchziehen. Die Experimente am Testinjektor stellen daher die erste Versuchsgeneration dar. Mit diesen Ergebnissen geht man dann an ein Schwerionenzyklotron, eventuell auch an den Parasitärstrahl. Als letztes steht schließlich der Hochflußreaktor an. Wir beteiligen uns vor allem an der ersten Versuchsgeneration.

Die beiden Dissertationen der Herren Giesecke und Jahnke - Herr Ehrlich war ein Doktorvater - sollten einmal die Methode erproben und Erfahrungen sammeln, zum weiteren wurde die Gültigkeit bestimmter Modelle bei den untersuchten Substanzen getestet.

Jahnke

Herr Jahnke hat die "Porenbildung in einer Al-Mg-Si-Legierung mit unterschiedlichen Ausscheidungszuständen und in Reinstaluminium nach Bestrahlungen mit 100 keV Al-Ionen" untersucht. Die Schädigung erfolgte bis ca. 100 dpa, es wurde bei Temperaturen zwischen 55° bis 300°C bestrahlt.

Die wesentlichen Ergebnisse sind folgende:

- In Reinstaluminium fand man die bekannte Temperaturabhängigkeit des Schwellens mit einem Maximum von 3,4% bei 150°C.
- In der ersten Legierung, die nur feinverteilte kohärente Ausscheidungen enthielt, wurde das Schwellen bis ca. 100 dpa vollständig unterdrückt.
- Im zweiten Legierungszustand (die Legierung war vollkommen homogenisiert) zeigt sich zwischen 55° bis 150°C keine Porenbildung bis ca. 100 dpa. Für diese starke Reduzierung des Schwellens werden vor allem gelöste Si-Atome verantwortlich gemacht. Ein Einfluß sehr kleiner Ausscheidungen wird jedoch auch nicht ausgeschlossen. Im Elektronenmikroskop wurde zwar kein Hinweis für solche Ausscheidungen gefunden, Messungen des spezifischen Widerstands könnten jedoch dahingehend ausgelegt werden.
- Im Gegensatz zu diesen beiden Legierungszuständen findet man bei einer Legierung mit semikohärenten stäbchenförmigen Ausscheidungen nur eine geringere Beeinflussung des Schwellverhaltens. Dieser Effekt dürfte im wesentlichen auf einem gewissen, noch gelösten Anteil von Si- und Mg-Atomen beruhen.

Zur Erklärung der Ergebnisse wurden die üblichen Bilanzgleichungen, die Ratengleichungen, herangezogen.

Giesecke

Herr Giesecke hat den "Einfluß substitutionell gelöster Fremdatome auf die Porenbildung in binären Kupferlegierungen" untersucht.

Die zulegierten Fremdatome haben alle einen größeren Durchmesser als das Wirtsgitter. Nach einer Theorie von Sparque müßte das zu einer Reduktion des Schwellens führen, weil die Leerstellen von den Fremdatomen eingefangen werden.

Die Ergebnisse zeigen eine Bestätigung der Theorie bei Cu-In und Cu-Mg. Das Schwellen wurde bei Cu-In bis auf ein Fünftel gegenüber Reinstkupfer reduziert. Vollkommen gegenläufige Ergebnisse fand man dagegen bei Cu-Au, aber auch bei Cu-Pd. Bei Cu-Au wurde gegenüber Reinstkupfer ein Anstieg des Schwellens bis um einen Faktor 10 gefunden. Eine endgültige Klärung konnte noch nicht gefunden werden. Man vermutet aber, daß die Selbstdiffusion, die bei einigen kubisch-flächenzentrierten Metallen, z.B. bei Pb durch Edelmetalle erhöht wird, für den drastischen Anstieg verantwortlich ist.

Eigene Arbeiten

Ich komme nun auf die eigenen Arbeiten im letzten Jahr zu sprechen. Mit dem Abschluß der beiden Doktorarbeiten werden nun etwas andere Ziele verfolgt. Man will weg von akademischen Substanzen wie Cu und Al. In Zusammenarbeit mit Herrn Ehrlich streben wir an, technische Materialien, z.B. Stähle, zu untersuchen. Dies erfordert höhere Bestrahlungstemperaturen, und damit entstand die Notwendigkeit, eine neue Bestrahlungseinrichtung, einen neuen Targethalter zu bauen.

Der neuen Targethalter wurde in der Studienarbeit von Herrn Rau konzipiert. Er soll für Temperaturen bis 1000°C eingesetzt werden können. Um thermische Ausheileffekte in den bestrahlten Proben zu

vermeiden, soll er schnelle Aufheiz- und Abkühlzeiten aufweisen. Der Targethalter wird gerade in der Institutswerkstatt gefertigt. Er muß noch getestet werden.

Zu den weiteren Arbeiten des letzten Jahres zählen die schon erwähnte Diplomarbeit über die Präparation für das Elektronenmikroskop von Herrn Madjzoub und eine Studienarbeit von Herrn Winetzhammer, die sich mit einer Verbesserung bei der Auswertung elektronenmikroskopischer Bilder befaßt. Angefangen wurde eine Arbeit über Dickenbestimmungen und stereoskopische Auswertung am Elektronenmikroskop und eine Arbeit über Oberflächeneffekte.

Sie sehen, daß diese Arbeiten noch kein konkretes Bestrahlungsthema beinhalten. Es ist vielmehr so, daß augenblicklich mit den Erfahrungen der Vorgänger neue Experimente vorbereitet werden. Für diese neuen Experimente werden folgende Problemkreise gemeinsam mit Herrn Ehrlich anvisiert:

Untersuchungen des Schwellverhaltens, wobei der Einfluß von Diffusionseffekten, ähnlich denen bei Herrn Giesecke, interessiert. Aber auch der Einfluß der Defektstruktur oder Agglomeration wird als Ziel erwogen. Es ist zwar heute so, daß man das Schwellverhalten, vor allem bei reinen Substanzen, recht gut versteht. Geht man hingegen zu Legierungen, vor allem zu technischen Legierungen, so ergeben sich noch eine Menge offener Fragen.

Wegen der großen Verlagerungsquerschnitte am Testinjektor wären auch Effekte der bestrahlungsinduzierten Diffusion interessant, wobei die Stabilität gewisser Phasen, aber auch Ordnungsphänomene angesprochen werden könnten. Von Interesse wäre auch die Segregation von Ausscheidungen an Poren.

Welches dieser in der Praxis ohnehin miteinander verkoppelten Themen wie stark zum Zug kommt, entscheidet sich in der nächsten Zeit. Wir hoffen, sofern uns nicht zuviele Schwierigkeiten aufhalten, im Herbst wieder bestrahlen zu können.

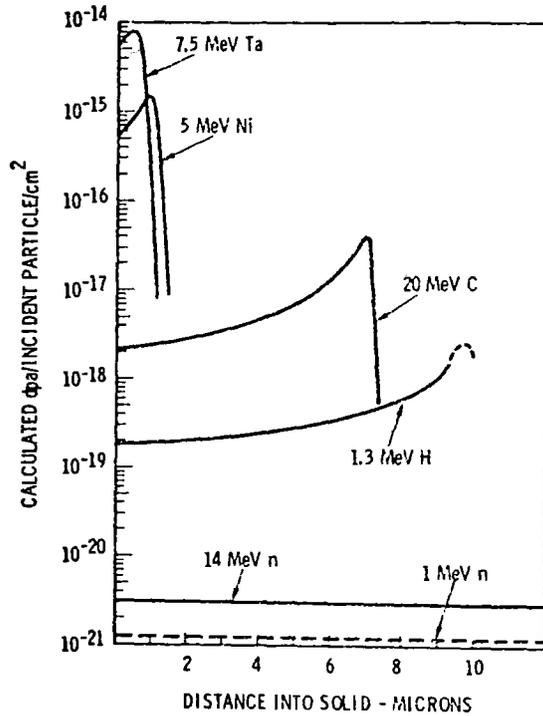


FIG. 3. Ratio of displacement dose to particle fluence as a function of distance into a nickel target: calculated curves for various particles. From Kulcinski and coworkers.⁽¹⁶⁾

Bild 1 aus D.I.R. Norris "Voids in Irradiated Metals (Part I)",
Rad. Eff. 14, (1972), 1-37

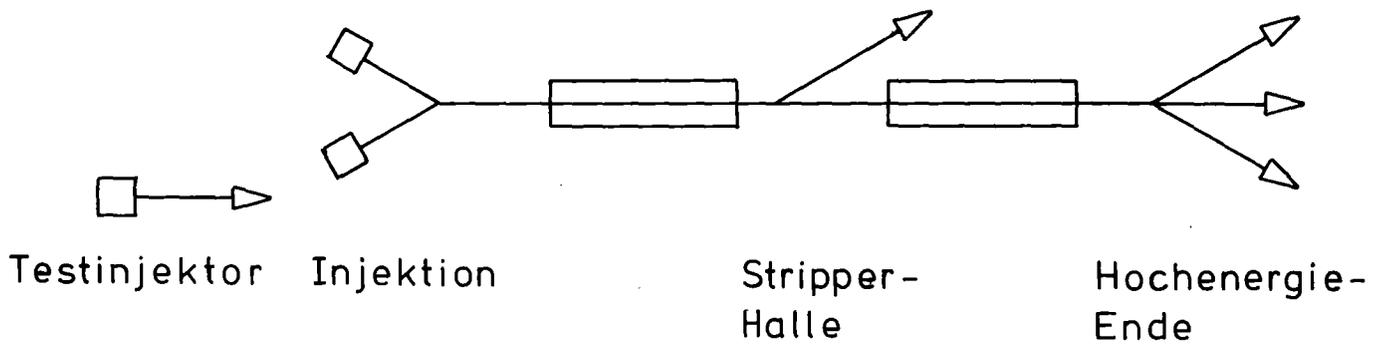


Bild 2 Skizze der GSI-Bestrahlungseinrichtungen

L i t e r a t u r

Giesecke, P., Einfluß substitutionell gelöster Fremdatome auf die Porenbildung in binären Kupferlegierungen;
Doktorarbeit, TH Darmstadt, 1977

Jahnke, B., Porenbildung in einer Al-Mg-Si-Legierung mit unterschiedlichen Ausscheidungszuständen und mit Reinstaluminium nach Bestrahlung mit 100 keV Al-Ionen;
Doktorarbeit, TH Darmstadt, 1977

Madjzoub, F., Präparationsversuche für das Transmissions-Elektronenmikroskop;
Diplomarbeit, Reaktortechnik TH Darmstadt 1977

Rau, W., Auslegung und Konstruktion eines Targethalters
Studienarbeit, Reaktortechnik TH Darmstadt 1978;

Norris, D.I.R., Voids in Irradiated Metals (Part I)
Rad. Eff. 14 (1972) 1-37

Teilnehmerliste

<u>Name</u>	<u>Organisation</u>
C. Ronchi	EURATOM KHE
H. Blank	EURATOM KHE
F. Caligara	EURATOM KHE
R. Mandler	EURATOM KHE
H. Plitz	KfK/PSB/PL
F. Wunderlich	KWU, Erlangen
G. Senski	KWU, Erlangen
H. Többe	INTERATOM, Bensberg
B. Steinmetz	INTERATOM, Bensberg
H. Elbel	KfK/IMF III
D. Nentwich	KfK/IB
G. Mühling	KfK/PSB
K. Kummerer	KfK/IMF
K. Schuchmann	BBR, Mannheim
L. Steinbock	KfK/IMF
B. Kuczera	KfK/IRE
D. Preininger	KfK/IMF II
H. Steiner	KfK/IMF
H.-J. Ritzhaupt-Kleissl	BBR, Mannheim