



KfK 2875  
Februar 1980

# **Stand und Problematik der Brennstab- Strukturanalyse**

**K. Lassmann**  
**Institut für Reaktorentwicklung**  
**Projekt Schneller Brüter**  
**Fachgebiet Reaktortechnik der**  
**Technischen Hochschule Darmstadt**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

Fachgebiet Reaktortechnik der  
Technischen Hochschule Darmstadt

KfK 2875

STAND UND PROBLEMATIK DER BRENNSTAB-STRUKTURANALYSE

von

Klaus Lassmann

vom Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Hochschule Darmstadt  
genehmigte Habilitationsschrift D 17

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Die vorliegende Arbeit ist der allgemeine Teil der gleichnamigen Habilitationsschrift, die im Institut für Reaktortechnik der Technischen Hochschule Darmstadt angefertigt wurde. Der spezielle Teil der Habilitationsschrift wurde in Form von Veröffentlichungen vorgelegt, auf die in den Anhängen hingewiesen wird.

Der Verfasser dieser Arbeit ist seinem akademischen Lehrer, Herrn Prof. Dr. W. Humbach, zu großem Dank verpflichtet. Ohne seine langjährige Unterstützung und außergewöhnliche Förderung hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

## Stand und Problematik der Brennstab-Strukturanalyse

### Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zur Brennstab-Strukturanalyse gliedert sich in zwei Teile: im ersten - in sich abgeschlossenen - Teil werden allgemein die Grundlagen deterministischer Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse kritisch zusammengestellt, und ein Weg zur Erweiterung im Hinblick auf statistische Untersuchungen gezeigt. Der zweite Teil enthält fachliche Details in Form von 11 Veröffentlichungen, die durchweg in Zeitschriften mit einem Referentenstab erschienen sind. Als wesentliche Punkte dieser Arbeit werden angesehen:

- Beiträge zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse,
- kritische Analyse zum grundsätzlichen Aufbau von Rechenprogrammen,
- kritische Analyse des mechanischen Konzepts integraler Brennstabrechenprogramme,
- der Aufbau eines umfassenden Rechenprogramm-Systems (URANUS),
- die Erweiterung von rein deterministischen Aussagen um statistische Analysen, sowie
- die methodische und rechenprogrammtechnische Entwicklung zur Analyse von schnell ablaufenden Störfällen.

## The State-of-the-Art and Problems of Fuel Element Structural Analysis

### Summary

This study of fuel element structural analysis is arranged in two parts: In the first, self-contained, part the general basic principles of deterministic computer programs for structural analysis of fuel elements are reviewed critically and an approach is shown which can be used to expand the system with respect to statistical investigations. The second part contains technical details summarized in 11 publications, all of which appeared in periodicals with reviewer teams. The major aspects of this study are thought to be the following ones:

- Contributions to the "philosophy" of fuel element structural analysis.
- Critical analysis of the basic structure of computer programs.
- Critical analysis of the mechanical concept of integral fuel rod computer programs.
- Establishment of a comprehensive computer program system (URANUS).
- Expansion from purely deterministic information by statistical analyses.
- Methodological and computer program developments for the analysis of fast accidents.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	
1. Einleitung und Gesamtübersicht	1
2. Einführung in die spezielle Problematik	9
2.1 Kritische Diskussion der methodischen Annahmen	12
2.2 Zur Wertung vorhandener Modelle	21
3. Grundsätzlicher Aufbau von Rechenprogrammen	27
3.1 Klassifizierung der Aufgaben	27
3.2 Allgemeine Programmstruktur	29
3.3 Zeitliche Programmstruktur	33
3.4 Verfeinerte Programmstruktur	36
4. Das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme	41
4.1 Mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff	42
4.2 Axiale Kopplung	47
4.2.1 Axiale Kopplung der Temperaturen	47
4.2.2 Axiale Transportphänomene	50
4.2.3 Axiale Kopplung von Kräften	52
4.2.4 Kritische Diskussion zur axialen Kopplung von Kräften	56
4.3 Das mechanische Konzept des URANUS-Rechenprogramms	62
5. Materialdaten und physikalische Modelle	68
5.1 Wärmeübergang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff	69
5.2 Plastizität und bruchmechanisches Modell	71
6. Analyse von Störfällen	77
6.1 Transientes Materialverhalten	78
6.2 Instationäre Temperaturberechnung	79
6.3 Statistischer Aspekt	81



	<u>Seite</u>
7.    Schlußbetrachtung	86
8.    Acknowledgement	91
Nomenklatur und Abkürzungen	92
Zusammenstellung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Definitionen	94
Literatur	96

Anhang 1:

LASSMANN K., A criticism on fuel rod structural analysis,  
Nucl. Technology, Vol. 40 (1978), 321-328

Anhang 2:

LASSMANN K., Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in in-  
tegralen Brennstabcodes, ATKE, Bd. 27 (1976), Lfg. 1,  
41 - 45

Anhang 3:

LASSMANN K., URANUS - a computer programme for the thermal  
and mechanical analysis of the fuel rods in a nuclear  
reactor, Nucl. Eng. Design, 45 (1978), 325 - 342

Anhang 4:

LASSMANN K., MORENO A., The light-water-reactor version of  
the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Bd. 30 (1977),  
Lfg. 3, 207 - 215

Anhang 5:

LASSMANN K., Zum Wärmedurchgang im Spalt zwischen Hülle  
und Brennstoff eines Brennstabs, Wärme- und Stoffübertragung, 12  
(1979), 185-202

Anhang 6:

FABIAN H., LASSMANN K., Untersuchungen zur Brennstofftable-  
te unter Berücksichtigung der Zweidimensionalität, des Plasti-  
fizierens und des Reißens, atw XXIII, Nr. 11 (Nov. 1978), 519-522

Anhang 7:

LASSMANN K., The statistical version of the URANUS-programme,  
IAEA Specialists' meeting on fuel element performance com-  
puter modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 5, Nucl. Eng.  
Design, im Druck

Anhang 8:

LASSMANN K., Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modelling code evaluation project, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 17, Nucl. Eng. Design, im Druck

Anhang 9:

LASSMANN K., KELPPE S., MATTILA L., Comparative evaluation of the steady state fuel rod thermal behavior code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS, VTT-Bericht, 34 (April 1978), ISBN 951-38-0619-7

Anhang 10:

LASSMANN K., Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS, atw, XXII, Nr. 7 (Okt. 1977), 521 - 524

Anhang 11:

LASSMANN K., Stand und Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS, Beitrag zu KfK 2690 (Sept. 1978), 7-37

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zur Brennstab-Strukturanalyse gliedert sich in zwei Teile: im ersten - in sich abgeschlossenen - Teil werden allgemein die Grundlagen deterministischer Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse kritisch zusammengestellt, und ein Weg zur Erweiterung im Hinblick auf statistische Untersuchungen gezeigt. Der zweite Teil enthält fachliche Details in Form von 11 Veröffentlichungen, die durchweg in Zeitschriften mit einem Referentenstab erschienen sind. Als wesentliche Punkte dieser Arbeit werden angesehen:

- Beiträge zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse,
- kritische Analyse zum grundsätzlichen Aufbau von Rechenprogrammen,
- kritische Analyse des mechanischen Konzepts integraler Brennstabrechenprogramme,
- der Aufbau eines umfassenden Rechenprogramm-Systems (URANUS),
- die Erweiterung von rein deterministischen Aussagen um statistische Analysen, sowie
- die methodische und rechenprogrammtechnische Entwicklung zur Analyse von schnell ablaufenden Störfällen.

Im allgemeinen Teil der Arbeit wurden folgende Ergebnisse gewonnen:

- 1) Eine vollständige und physikalisch exakte Brennstab-Strukturanalyse, die in gleicher Weise die dreidimensionale Struktur und das komplexe Materialverhalten berücksichtigt, liegt außerhalb der heute gegebenen Möglichkeiten. Jede Beschreibung des Brennstabverhaltens basiert deshalb auf vereinfachenden Annahmen. Eine Brennstab-Strukturanalyse ist deshalb nur dann als vollständig zu bezeichnen, wenn 1-D (bzw. 1 1/2-D) und 2-D Modelle sowie statistische Analysen einander ergänzend durchgeführt werden; die verschiedenen methodischen Ansätze sind folglich komplementär.
- 2) Eine Wertung verschiedener Rechenprogramme im Sinn einer all-

gemein gültigen Rangfolge kann nicht durchgeführt werden, weil Aufgaben und Ziele der einzelnen Rechenprogramme zu verschiedenen sind, und diese Programme in der Regel nicht frei verfügbar sind, d. h. auch im Detail nicht analysiert werden können. Jedes der Rechenprogramme hat während der letzten Jahre dem jeweiligen Benutzer als einzig mögliches Instrument zum eigentlichen Verständnis des Brennstabverhaltens wertvolle Dienste geleistet, der Leistungsumfang der diskutierten Rechenprogramme ist annähernd ausgeglichen.

- 3) Aufgrund einer Klassifizierung der Aufgaben kann ein überraschend ins Detail gehender grundsätzlicher Aufbau von Rechenprogrammen zur Brennstab-Strukturanalyse entwickelt werden. Dieser Aufbau ermöglicht eine klare Gliederung eines Rechenprogramms in einzelne Komponenten und führt zu einer allgemein gültigen Programmstruktur, die ausführlich dargestellt wird.
- 4) Das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme kann als Überlagerung von radialen Analysen und axialer Kopplung identifiziert werden. Integrale Brennstab-Rechenprogramme, in denen axiale Reibkräfte vernachlässigt werden, sind in ihrer mechanischen Beschreibung des Brennstabverhaltens als unvollständig anzusehen.
- 5) Auf der Basis grundsätzlicher Überlegungen zur Programmstruktur und zum mechanischen Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme wurde das URANUS-System entwickelt. Es zeichnet sich durch hohe Flexibilität und niedrige Rechenzeiten aus. Verschiedene Programmversionen konnten entwickelt werden, die sowohl grundsätzliche und umfangreiche ('highly sophisticated') Analysen als auch routinemäßige ('simplistic') Untersuchungen gestatten.
- 6) In den Materialdaten und den physikalischen Modellen ist eine solche Fülle an experimentellen Ergebnissen des letzten Jahrzehnts enthalten, daß sie ein einzelner nicht mehr in ihrer Gesamtheit überblicken, werten und kritisch zusammenstellen kann. Dies muß speziellen Daten-Komitees vorbehalten bleiben, die auch bereits umfangreiche Datensammlungen erarbeitet haben.

Die eigenen Modelle zum Wärmeübergang im Spalt und zur Behandlung der gerissenen Brennstoffstruktur stellen Verbesserungen gegenüber dem bisherigen Kenntnisstand dar und werden ausführlich dargestellt. Es muß kritisch angemerkt werden, daß klare und eindeutige Anwendungsvorschriften für physikalische Modelle in der Regel fehlen. Daraus folgt, daß die Darstellung eines physikalischen Modells ohne detaillierte Angaben zur verwendeten Datenbasis und zur übrigen theoretischen Beschreibung im streng wissenschaftlichen Sinn als unvollständig anzusehen ist.

- 7) Die thermisch/mechanischen Beschreibungen zum quasi-stationären Brennstabverhalten haben einschließlich der Materialdaten und der physikalischen Modelle einen Stand erreicht, der zur Interpretation der physikalischen Vorgänge und zur ingenieurmäßigen Beschreibung ausreicht. Die noch offenen Fragen können in den meisten Fällen dem lokalen Bereich zugeordnet werden. Vom methodischen Vorgehen her gesehen genügt der erreichte Stand auch für die Untersuchung fortgeschrittener Brennstabkonzepte. Für die Kenntnis der Materialdaten trifft dies noch nicht annähernd zu.
- 8) Die Brennstab-Strukturanalyse von schnell ablaufenden Störfällen ist gegenüber den quasi-stationären Laständerungen etwas prinzipiell Neues. Eine kritische Wertung der derzeit vorliegenden transienten Version von Rechenprogrammen kann noch nicht vorgenommen werden, da ihre Entwicklung erst am Anfang steht. Die grundsätzlichen Fragestellungen zum transienten Materialverhalten und zur instationären Temperaturberechnung werden dargestellt. Als wichtigstes Ergebnis erhält man, daß statistische Analysen wegen der Grenzen der deterministischen Aussagen bei Störfallanalysen unumgänglich sind. Es wird anhand des URANUS-Rechenprogramms gezeigt, daß durch die hohe Rechengeschwindigkeit und Flexibilität statistische Untersuchungen auf der Basis der Monte-Carlo-Methode möglich sind.
- 9) Es wird vorgeschlagen, Vergleiche zwischen Rechenprogrammen in stärkerem Maß als bisher durchzuführen. Wegen der Größe der Aufgabe und der Schwierigkeit, allgemein zugängliche und bis ins letzte Detail dokumentierte Experimente zur Verfügung stellen zu können, sollten derartige Vergleichsstudien durch

internationale Behörden (z. B. die IAEA) angeregt werden.

- 10) Das zukünftige Interesse der Brennstab-Strukturanalyse wird sich neben der Untersuchung des transienten Verhaltens dem Aspekt der Wechselwirkung von Brennstäben bzw. Brennelementen - also dem gesamten Kernverband - zuwenden.

Im zweiten Teil der Arbeit sind folgende Publikationen zusammengestellt:

- LASSMANN K., A criticism on fuel rod structural analysis, Nucl. Technology, Vol. 40 (1978), 321-328
- LASSMANN K., Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in integralen Brennstabcodes, ATKE, Bd. 27 (1976), Lfg. 1, 41 - 45
- LASSMANN K., URANUS - a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel rods in a nuclear reactor, Nucl. Eng. Design, 45 (1978), 325 - 342
- LASSMANN K., MORENO A., The light-water-reactor version of the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Bd. 30 (1977), Lfg. 3, 207 - 215
- LASSMANN K., Zum Wärmedurchgang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff eines Brennstabs, Wärme- und Stoffübertragung, 12 (1979), 185-202
- FABIAN H., LASSMANN K., Untersuchungen zur Brennstofftablette unter Berücksichtigung der Zweidimensionalität, des Plastifizierens und des Reißens, atw XXIII, Nr.11 (Nov. 1978), 519-522
- LASSMANN K., The statistical version of the URANUS-programme, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 5, Nucl. Eng. Design, im Druck
- LASSMANN K., Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modelling code evaluation project, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 17, Nucl. Eng. Design, im Druck.

- LASSMANN K., KELPPE S., MATTILA L., Comparative evaluation of the steady state fuel rod thermal behavior code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS, VTT-Bericht 34 (April 1978), ISBN 951-38-0619-7
- LASSMANN K., Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS, atw, XXII, Nr. 7 (Okt. 1977), 521 - 524
- LASSMANN K., Stand und Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS, Beitrag zu KfK 2690 (Sept. 1978), 7-37

Die Brennstab-Strukturanalyse hat sich als einzig mögliches Instrument zum Verständnis der physikalischen Vorgänge im Brennstab über mehr als ein Jahrzehnt bewährt. Sie stellt das eigentliche Werkzeug dar, mit dem experimentelle Ergebnisse systematisch ausgewertet, gesammelt und interpretiert werden können. Ihre grundsätzliche methodische Entwicklung ist abgeschlossen, sie wird jedoch noch weiterhin erweitert, verfeinert und ständig dem experimentellen Kenntnisstand angepaßt werden müssen.

## Summary

This study of fuel element structural analysis is arranged in two parts: In the first, self-contained, part the general basic principles of deterministic computer programs for structural analysis of fuel elements are reviewed critically and an approach is shown which can be used to expand the system with respect to statistical investigations. The second part contains technical details summarized in 11 publications, all of which appeared in periodicals with reviewer teams. The major aspects of this study are thought to be the following ones:

- Contributions to the "philosophy" of fuel element structural analysis.
- Critical analysis of the basic structure of computer programs.
- Critical analysis of the mechanical concept of integral fuel rod computer programs.
- Establishment of a comprehensive computer program system (URANUS).
- Expansion from purely deterministic information by statistical analyses.
- Methodological and computer program developments for the analysis of fast accidents.

In the general part of the study the following results were obtained:

- (1) A comprehensive and physically precise fuel element structural analysis taking into account equally well the three-dimensional structure and the complex materials behavior is beyond present possibilities. For this reason, any description of fuel rod behavior will be based on simplifying assumptions. Consequently, a fuel element structural analysis can be regarded as complete only if one-dimensional (and 1 1/2-dimensional, respectively) as well as two-dimensional models



and statistical analyses are carried out so as to supplement each other. The different methodological approaches are therefore complementary.

- (2) It is not possible to evaluate various computer programs so as to set up a generally valid ranking order, because the objectives and purposes of each of these computer programs differ too widely and, as a rule, these programs are not available freely and, for this reason, cannot be analyzed in detail. Each of these computer programs has rendered valuable service to the respective user in the past few years as the only possible instrument for properly understanding fuel rod behavior; the performance levels of the computer programs discussed are more or less balanced.
- (3) In the light of a classification of purposes it is possible to develop a surprisingly detailed fundamental structure of computer programs for fuel element structural analysis. This setup makes it possible to clearly arrange a computer program in individual components and leads to a generally applicable program structure which is explained in detail.
- (4) The mechanical concept of integral fuel rod computer programs can be identified as a superposition of radial analyses and axial coupling. Integral fuel rod computer programs neglecting axial friction forces must be regarded as incomplete in their mechanical description of fuel rod behavior.
- (5) On the basis of fundamental considerations of program structure and the mechanical concept of integral fuel rod computer programs the URANUS

system was developed. It is characterized by high flexibility and short computation times. Various program versions have been developed which permit both fundamental and highly sophisticated analyses as well as routine, simplistic studies to be carried out.

- (6) The materials data and the physical models contain such an abundance of experimental results obtained in the past decade that it is impossible for any individual to review, evaluate and critically compile them all. This must be reserved to special data committees, which have already drafted extensive data collections. The author's models describing heat transfer in the gap and treating cracked fuel structures represent improvements over the previous state of the art and are described in great detail. As a critical remark it must be added that clear and unequivocal rules for the application of physical models are mostly missing. Consequently, the description of a physical model without detailed information about the data base used and the other theoretical descriptions is incomplete in a strictly scientific sense.
- (7) The thermo-mechanical descriptions of quasi-steady state fuel rod behavior, including materials data and physical models, have reached a status which is sufficient for interpretation of the physical events and for engineering description. Any questions still open can mostly be assigned to the local area. Methodologically speaking, the status now reached is also sufficient for studies of advanced fuel rod concepts. However, this is not even approximately true of our knowledge of materials data.
- (8) The fuel element structural analysis of fast accidents is something basically new compared to quasi-steady state load changes. It is not

yet possible to give a critical assessment of the transient versions of computer programs presently available, because their development is still in its early stages. The fundamental problems related to transient materials behavior and non-steady state temperature calculation are represented. The main result obtained indicates that statistical analyses are necessary because of the limits of deterministic information in the case of accident analyses. On the basis of the URANUS computer program it is shown that the high computer speed and flexibility allows statistical studies to be carried out on the basis of the Monte Carlo method.

- (9) It is proposed to carry out more comparisons among computer programs than so far. Because of the magnitude of the problem and the difficulty involved in making available generally accessible experiments documented down to the minutest detail, such intercomparison studies should be initiated by international agencies (e.g. IAEA).
- (10) The future interest in fuel element structural analysis will be devoted not only to studies of the transient behavior, but also to the aspect of interactions among fuel rods and fuel elements, respectively, i.e., the whole core structure.

The second part of the study contains the following publications:

- LASSMANN, K.: A criticism on fuel rod structural analysis, Nucl. Technology, Vol. 40 (1978), 321-328
- LASSMANN, K.: Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in integralen Brennstabcodes, ATKE, Vol. 27 (1976), Lfg. 1, 41-45
- LASSMANN, K.: URANUS - a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel rods in a nuclear reactor, Nucl.Eng. Design, 45 (1978), 325-342

- LASSMANN, K.; MORENO, A.: The light-water-reactor version of the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Vol. 30 (1977), Lfg. 3, 207-215
- LASSMANN, K.: Zum Wärmedurchgang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff eines Brennstabs, Wärme- und Stoffübertragung, 12 (1979), 185-202
- FABIAN, H.; LASSMANN, K.: Untersuchungen zur Brennstofftablette unter Berücksichtigung der Zweidimensionalität, des Plastifizierens und des Reißens, atw XXIII, Nr. 11 (Nov. 1978), 519-522
- LASSMANN, K.: The statistical version of the URANUS-programme, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U.K. (1978), paper 5, Nucl.Eng. Design, in the press
- LASSMANN, K.: Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modelling code evaluation project, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool, U.K. (1978), paper 17, Nucl. Eng. Design, in the press
- LASSMANN, K.; KELPPE, S.; MATTILA, L.: Comparative evaluation of the steady state fuel rod thermal behavior code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS, VTT-Bericht 34 (April 1978), ISBN 951-38-0619-7
- LASSMANN, K.: Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS, atw, XXII, Nr. 7 (Okt. 1977), 521-524
- LASSMANN, K.: Stand und Entwicklung des integralen Stabrechenprogramms URANUS, contribution in KfK 2690 (Sept. 1978), 7-37

Fuel rod structural analysis has proved to be the only possible instrument for understanding the physical processes in the fuel rod for more than a decade. It represents the tool which can be used to evaluate systematically, collect and interpret experimental results. Its fundamental methodological development has been completed, but it will continue to be expanded, refined and adapted continuously to the state of the art of experimentation.

## 1. Einleitung und Gesamtübersicht

Ein Kernkraftwerk besteht aus sehr verschiedenen Teilen, wie z. B. dem Reaktorkern, dem Druckbehälter, den Dampferzeugern und der Turbine, um nur einige der Großkomponenten zu nennen. Daneben enthält eine derartige Anlage kerntechnische Hilfs- und Nebenanlagen sowie Sicherheitseinrichtungen der verschiedensten Art. Die eigentliche Leistungserzeugung findet durch Spaltung von Atomen im Reaktorkern statt, der somit das Herz ('Core') einer kerntechnischen Anlage darstellt. Dieser Reaktorkern ist naturgemäß derjenige Bereich, in dem die speziellen Probleme der Reaktor-Technologie überwiegend auftreten.

Sämtliche Leistungsreaktoren weisen eine heterogene Kernstruktur auf, weil sich homogene Mischungen z. B. in Form von gelösten Uransalzen aus technologischen Gründen noch nicht verwirklichen lassen. Dies ist letztlich auf Korrosionsprobleme zurückzuführen. Für die heterogene Kernstruktur sind zwei Konzepte entwickelt worden: ein mikroskopisches Konzept, in dem einzelne kleine Brennstoffpartikel von verschiedenen Schichten umhüllt sind ('coated particles'), die eine Freisetzung des entstehenden Spaltgases verhindern sollen und ein makroskopisches Konzept, in der Form von Brennstäben. Das mikroskopische Konzept findet im Hochtemperatur-Reaktor (HTR) Anwendung, alle übrigen Leistungsreaktoren, wie der Leichtwasser-Reaktor (LWR) und der Schnelle Brutreaktor (SBR) verwenden Brennstäbe. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt, das mikroskopische Konzept wird nicht weiter verfolgt werden.

Der prinzipielle Aufbau von Brennstäben ist außerordentlich

einfach: der Brennstoff befindet sich in einer gasdicht verschweißten, sehr langen zylindrischen Hülle, die eine erste Sicherheitsbarriere gegen die Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten darstellt. Die Integrität der Hülle muß wegen dieser Sicherheitsfunktion im Normalbetrieb und im Störfall gewährleistet sein, woraus die Forderung nach einer Analyse des Verhaltens der Brennstäbe während der gesamten Einsatzzeit resultiert.

Diese Analyse des Brennstabverhaltens hat während der letzten Jahre zunehmend an Bedeutung gewonnen. Während es zunächst um prinzipielles Verstehen der physikalischen Vorgänge oder gar um das Erkennen noch unbekannter Effekte selbst ging, verlangen sicherheitstechnische Überlegungen und wirtschaftliche Aspekte heute umfangreiche quantitative Analysen. Inzwischen liegen über Jahrzehnte experimentelle und theoretische Untersuchungen vor, so daß das in-pile Verhalten in manchen Bereichen bereits gesichert beschrieben und vorausberechnet werden kann. Die theoretische Beschreibung des Brennstabverhaltens ist das Thema dieser Arbeit und wird als Brennstab-Strukturanalyse bezeichnet:

DEF.1: Die Beschreibung des thermisch/mechanischen Brennstabverhaltens wird Brennstab-Strukturanalyse genannt.

Etwa gleichwertig neben dem Begriff 'Brennstab-Strukturanalyse' wird die Bezeichnung 'Brennstab-Modelltheorie' verwendet. Beide Begriffe sind aus dem amerikanischen Sprachgebrauch übernommen worden, wie dies praktisch bei allen Begriffen der

Reaktor-Technologie der Fall ist.<sup>1</sup> Dem Begriff 'Strukturanalyse' wurde hier der Vorzug gegeben, weil der Schwerpunkt dieser Arbeit - nämlich die mechanische Beschreibung - besser erfaßt wird, während sich der Begriff 'Modelltheorie' eher auf die modellmäßige Beschreibung der physikalischen Vorgänge selbst bezieht.

Im Brennstab treten im Laufe der Bestrahlung sehr komplexe physikalische und mechanische Vorgänge auf, die nur in idealisierter Weise mathematisch zu beschreiben sind. Lösungen sind daher heute ausschließlich numerisch in Form von sehr großen Rechenprogrammen möglich. Die Komplexität der Abhängigkeiten ist - allerdings in etwas spektakulärer Weise - in der Abb. 1 (nach Beyer et al. [1]) am Beispiel des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Hülle und Brennstoff dargestellt. Eine sinnvolle Gliederung in physikalische Teilprobleme, eine klare mathematische Formulierung und die logische Einordnung ins Rechenprogramm (Programmstruktur) sind folglich grundsätzliche Voraussetzungen einer jeden vernünftigen Brennstabbeschreibung. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Punkte ausführlich behandelt.

Die eigentliche Darstellung der physikalischen Phänomene ist schon an verschiedenen Stellen vorgenommen worden und wurde zum Teil bereits in Vorlesungen aufgenommen [z. B. 2].

---

1) Eine kritische Betrachtung zum sprachlichen Aspekt des behandelten Gebiets zeigt, daß durch die Übernahme aus dem amerikanischen Sprachgebrauch sehr häufig die Bedeutung verwischt wurde und daß klare Definitionen fehlen. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit in Form expliziter Definitionen nachgeholt.

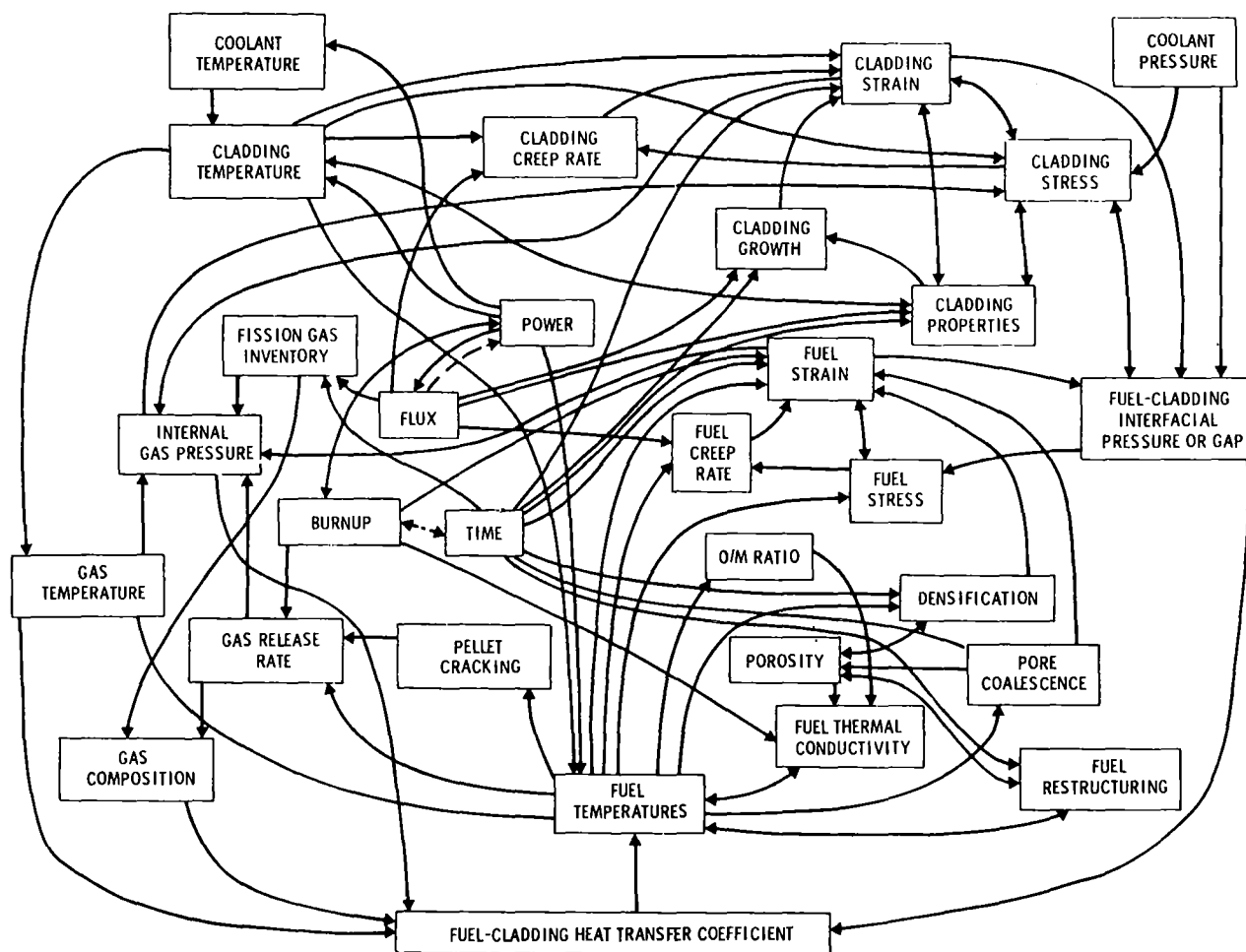


Abb. 1: Typische Parameter, die den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Hülle und Brennstoff beeinflussen (nach Beyer et al. [1])



Eine umfassende Darstellung, die auch noch heute die grundlegenden physikalischen Probleme in gültiger Form beschreibt, ist das Ergebnis eines Arbeitskreises [3], neueren Datums ist eine knappe, zusammenfassende Einführung von Fabian [4].<sup>1</sup>

Die folgende Abbildung 2 zeigt jedoch, daß zusammenfassende Darstellungen kaum die Fülle an einzelnen Arbeiten mit all ihren Details ersetzen können. Selbst für Einzelprobleme wie z. B. die Spaltgasfreisetzung oder die Nachverdichtung des Brennstoffs wurde eine derartige Vielfalt von Modellen entwickelt, daß sie ein einzelner kaum in allen Details überblicken kann. Dies gilt vor allem bei der Anwendung dieser Modelle unter sehr verschiedenen Bedingungen, wie z. B. im Normalbetrieb oder im Störfall oder gar auf verschiedene Brennstabtypen (LWR oder SBR).

Trotzdem ist ein Gesamtüberblick äußerst wichtig, weil praktisch alle Phänomene - auch wenn ihre Modelle in sich mehr oder weniger abgeschlossen erscheinen - über die Temperatur oder andere Einflußgrößen miteinander gekoppelt sind. Konsequenterweise findet der wissenschaftliche Gedankenaustausch zu einem großen Teil in Arbeitskreisen oder in internationalen Konferenzen statt, in denen Vertreter der verschiedensten Teilgebiete in Übersichtsvorträgen den letzten Stand darstellen. Einen hervorragenden Platz nimmt dabei die SMIRT-Tagung

---

1) Beim Überarbeiten dieses Manuskripts erschien eine Buchbesprechung über "OLANDER D. R., Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements, U. S. energy research and development administration, technical information center, Oak Ridge, Tennessee (1976)." Der Referent A. Bonilla ordnet die Arbeit sehr positiv ein, so daß sie mit den oben genannten Arbeiten zu nennen ist.

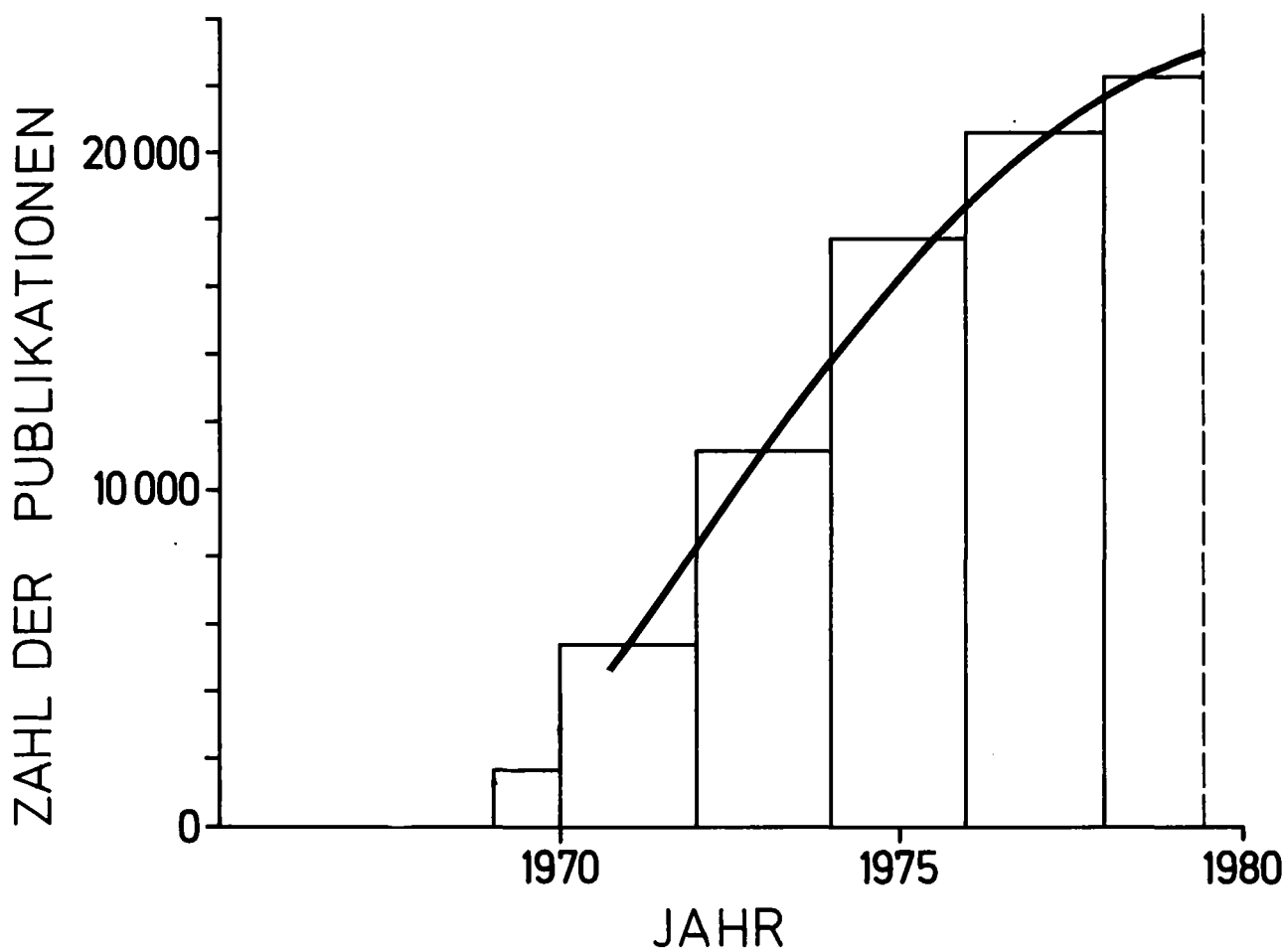


Abb. 2: Gesamtzahl der Publikationen, die in einer retrospektiven Literaturrecherche unter dem Stichwort 'FUEL ELEMENTS' gefunden wurden. An dieser Stelle danke ich herzlich Herrn Lorenz (Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik), der die Recherche durchgeführt hat. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Zahl der Arbeiten bis zum Jahr 1970 unvollständig erfaßt wurde, da eventuell nur wesentliche Arbeiten in die Dateien aufgenommen wurden.

("Structural Mechanics in Reactor Technology") ein [5 - 8], in der in zweijährigem Zyklus Brennstabprobleme stets sehr ausführlich behandelt wurden. Gleichwertige Veranstaltungen werden von der internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) z. B. [9, 10] und vielen anderen Institutionen durchgeführt (z. B. [11, 12]).

Im Rahmen der SMIRT-4 Konferenz (San Francisco) gab Weeks [13] einen sehr umfassenden und sachlich fundierten Überblick über die Strukturanalyse von Brennstäben, in dem die historische Entwicklung, die derzeitigen Trends und die zukünftigen Aufgaben diskutiert wurden. Anlässlich der gleichen Tagung untersuchte der Autor dieser Arbeit die Möglichkeiten und Grenzen der Brennstab-Strukturanalyse [14]. Eine erweiterte Fassung dieser Arbeit [15] ist im Anhang 1 wiedergegeben, ihre wesentlichen Aussagen werden zur Einführung für die vorliegende Arbeit verwendet (Kap. 2). Die eigenen Beiträge an der Gesamtentwicklung der Brennstab-Strukturanalyse werden in diesem Kapitel in allgemeiner Form kritisch diskutiert.

Da sich - wie oben erwähnt - die Brennstab-Strukturanalyse in sehr verschiedene Teilgebiete gliedert, kommt einer allgemeinen Klassifizierung entscheidende Bedeutung zu, aus der sich zum Teil bereits der grundsätzliche Aufbau von Rechenprogrammen herleiten läßt (Kap. 3). Wegen der derzeit gegebenen Grenzen der Vorhersagefähigkeit dieser Analysen werden in diesem Kapitel gleichzeitig Fragen der Verifikation und der Dokumentation von Rechenprogrammen diskutiert. Die eigenen fachlichen Beiträge und Anregungen folgen in den Kapiteln 4 - 6, wobei fachliche Details in Form von Veröffentlichungen in den Anhängen wiedergegeben werden, um für den Leser die Übersicht-

lichkeit zu erleichtern. Da die Publikationen durchwegs in Zeitschriften mit einem Referentenstab erschienen sind, darf davon ausgegangen werden, daß Konzepte und fachliche Details bereits kritisch überprüft worden sind. Als wesentliche Punkte dieser Arbeit werden angesehen:

- Beiträge zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse,
- kritische Analyse zum grundsätzlichen Aufbau von Rechenprogrammen,
- kritische Analyse des mechanischen Konzepts integraler Brennstabrechenprogramme,
- der Aufbau eines umfassenden Rechenprogramm-Systems (URANUS),
- die Erweiterung von rein deterministischen Aussagen um statistische Analysen, sowie
- die methodische und rechenprogrammtechnische Entwicklung zur Analyse von schnell ablaufenden Störfällen.

## 2. Einführung in die spezielle Problematik

Brennstäbe aller Leistungsreaktoren sind im Prinzip ähnlich aufgebaut. Sie werden in Brennelementen zusammengefaßt (s. Abb. 3). Brennstäbe und Brennelemente weisen zwar typenspezifische Besonderheiten auf, die kritische Diskussion des derzeitigen Kenntnisstands zum Brennstabverhalten kann jedoch gemeinsam für alle Typen geführt werden.

Die Grundlage der folgenden Diskussion bildet die Arbeit [14], die in einer erweiterten Fassung [15] im Anhang 1 wiedergegeben ist. Der hier gewählte Ausgangspunkt kann in folgender Weise zusammengefaßt werden:

"Eine vollständige und physikalisch exakte Brennstab-Strukturanalyse, die in gleicher Weise die dreidimensionale Struktur und das komplexe Materialverhalten berücksichtigt, liegt außerhalb der heute gegebenen Möglichkeiten. Jede Beschreibung des Brennstabverhaltens basiert deshalb auf vereinfachenden Annahmen."

Die Grenzen sind vor allem durch unvollständiges Verständnis der verschiedensten physikalischen Vorgänge und ihres zum Teil statistischen Charakters gegeben, zusätzlich spielt der rechen-technische Aufwand eine ganz entscheidende Rolle. Allerdings muß betont werden, daß die grundsätzlichen physikalischen Vorgänge im Brennstab im Prinzip bekannt sind. Unvollständig werden in der Regel Wechselwirkungen und Details einzelner Vorgänge verstanden, die allerdings naturgemäß für quantitative Angaben wichtig sind.

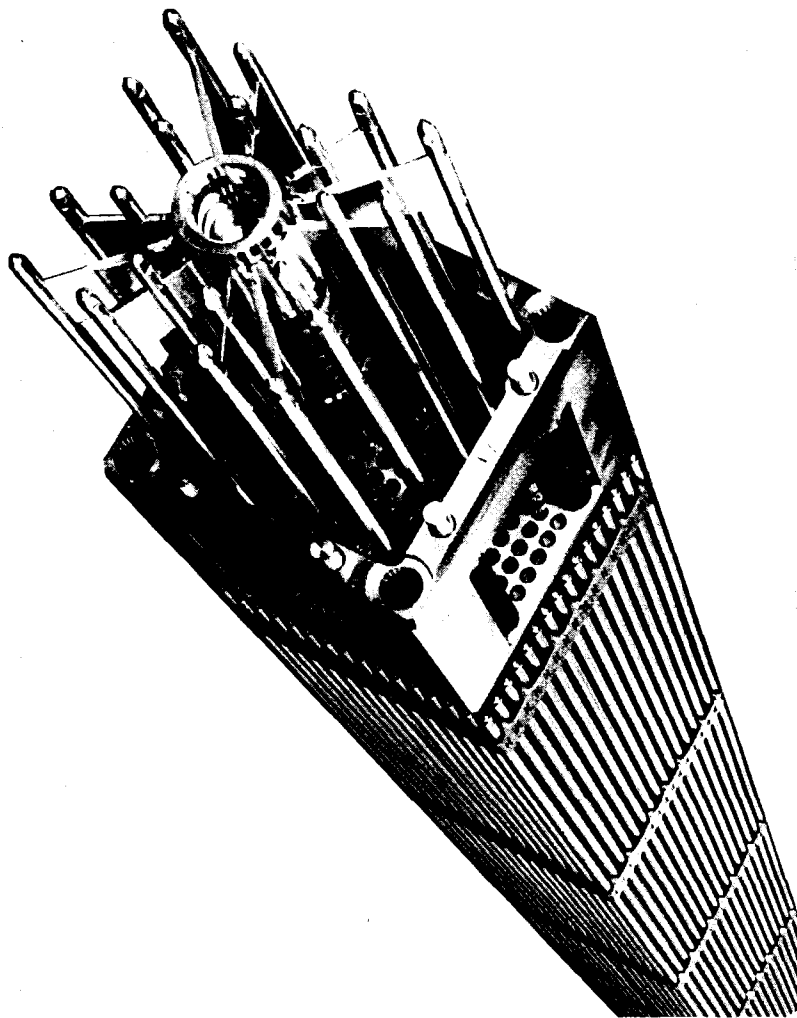


Abb. 3: Brennelement und Steuerelement  
(nach [16])

Betrachtet man sich die Analyse des Brennstabverhaltens näher, dann muß zunächst entschieden werden, welcher der ca. 60.000 Stäbe z. B. eines 1300 MWe-Leichtwasserreaktors überhaupt untersucht werden soll. Ein Blick auf ein willkürlich gewähltes Betriebshistogramm (Abb. 4) zeigt zusätzlich, daß die zeitliche Analyse sicher aufwendig sein wird, wobei lokale Änderungen der örtlichen Leistungsdichte aufgrund von Änderungen der Regelstabposition und des Abbrands noch gar nicht dargestellt sind. In der Regel werden deshalb idealisierte Verhältnisse analysiert, die genügend konservativ sind, um eine technisch verwertbare Aussage zu erhalten. Im folgenden Kapitel sollen nun allgemein die notwendigen oder die methodisch bedingten Idealisierungen näher diskutiert werden.

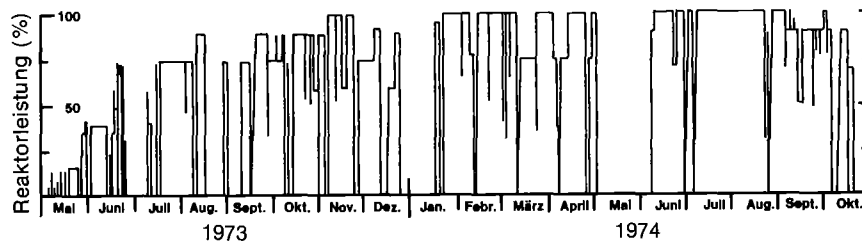


Abb. 4: Oconee-1 Betriebsprogramm (nach [17] )

## 2.1 Kritische Diskussion der methodischen Annahmen

Je nach Fragestellung kann die notwendige Vereinfachung des Problems bei der mechanischen oder der physikalischen Beschreibung gewählt werden. Sämtliche Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse lassen sich daher qualitativ in ein Diagramm einordnen, in dem die Komplexität des Materialverhaltens in Abhängigkeit von der Komplexität der mechanischen Beschreibung dargestellt ist (Abb. 5). Ausgewählt wurden ausschließlich Programmsysteme, die die thermische oder die thermisch/mechanische Analyse umfassend behandeln. Kleinere Rechenprogramme mit spezielleren Aufgaben, wie z. B. zur Behandlung des Kriechbeulverhaltens wurden nicht erfaßt, was wegen ihrer Vielzahl auch bereits nicht mehr möglich sein dürfte. Allerdings fällt auch in dieser Darstellung die Vielfalt vorhandener Rechenprogramme auf, eine Tatsache, die weiter unten noch ausführlich - gemeinsam mit dem Aspekt ihrer Wertung - diskutiert wird.

In der Regel liegen für jedes Rechenprogramm mehrere, zeitlich weit auseinanderreichende Publikationen vor, die in ihrer Gesamtheit erst das Rechenprogramm beschreiben. Hier wurde jeweils ein wesentliches, neueres Zitat ausgewählt, anhand dessen leicht die weiteren Publikationen gefunden werden können. Gegenüber der Fig. 1, Anhang 1 wurde die Zusammenstellung auf den neuesten Stand gebracht und geringfügig geändert.

Vor Diskussion der Abb. 5 soll der Begriff der räumlichen Dimension im Rahmen dieser Arbeit eindeutig festgelegt werden, weil kaum ein Begriff des vorliegenden Gebiet so vieldeutig gebraucht wird:



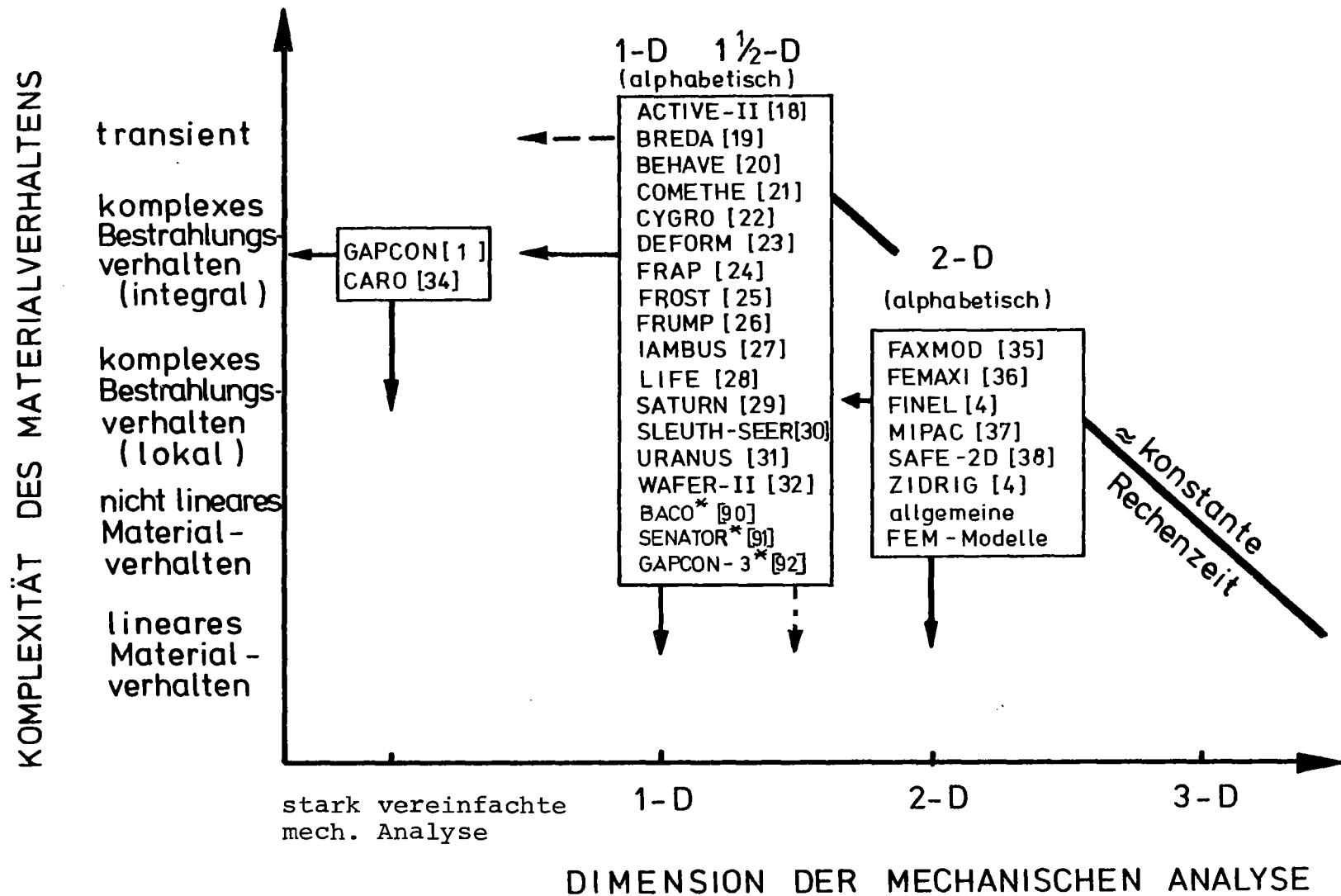


Abb. 5: Qualitative Gruppierung von Rechenprogrammen zur Brennstab-Strukturanalyse (Stand Aug. 1978; \* neu hinzugekommene Rechenprogramme außerhalb der alphabetischen Ordnung)

DEF.2: "Die Angabe der Dimension bezieht sich auf die thermische oder die mechanische Analyse und gibt die Zahl der unabhängigen Variablen in der räumlichen Beschreibung an. Demnach existieren eindimensionale (1-D), zwei- und dreidimensionale (2-D, 3-D) Beschreibungen. Gebrochene Indizes deuten Superpositionen an: die Superposition von 2 eindimensionalen Lösungen in 2 verschiedene Koordinatenrichtungen wird als quasi-zweidimensional ( $1\frac{1}{2}$ -D) bezeichnet."

In der Abb. 5 ist die Dimension der mechanischen Analyse auf der Abszisse aufgetragen. Die Ordinate, die die Komplexität des Materialverhaltens wiedergibt, ist durch Begriffe charakterisiert, deren klare Definition hier zunächst zurückgestellt werden muß. Dies wird in den Kapiteln 3 bzw. 6 nachgeholt. Vereinfachend gesagt umfaßt der Begriff 'transient' in der Abb. 5 sämtliche physikalischen Vorgänge unter Bestrahlung bei hohen Laständerungsgeschwindigkeiten wie sie z. B. in Störfällen auftreten können.

Die Einordnung der zweidimensionalen Modelle in die Abb. 5 ist nicht selbstverständlich, weil die Beschreibung des Materialverhaltens im Prinzip unabhängig davon ist, ob die Struktur räumlich ein- oder zweidimensional betrachtet wird. Der rechen-technische Aufwand steigt jedoch bei zweidimensionalen Analysen, die durchweg auf der Finit-Element-Methode (FEM) basieren, so stark an, daß nur lokale Ausschnitte aus einem Brennstab behandelt werden können. Verschiedene physikalische Effekte wie z. B. die Spaltgasfreisetzung und der daraus resultierende Innendruck beziehen sich jedoch auf den ganzen Brennstab und können daher nicht durch Berechnung eines Ausschnitts aus dem Stab

ermittelt werden. Zweidimensionale, lokale Analysen benötigen daher Rand- oder Anschlußbedingungen, die nur aus Analysen des ganzen Brennstabs gewonnen werden können. Diese globalen Analysen werden im folgenden als integrale Analysen bezeichnet:

DEF.3: "Analysen des gesamten Brennstabs werden integrale Analysen genannt. Rechenprogramme, die diese Analysen ermöglichen, werden als integrale Brennstab-Rechenprogramme (-Codes) bezeichnet."

Ganz prinzipiell wurden daher zweidimensionale Rechnungen im Hinblick auf die Komplexität des Materialverhaltens in der Abb. 5 niedriger als eindimensionale Analysen eingestuft. Wie die Abb. 5 zeigt, werden integrale Analysen derzeit ausschließlich mit 1-D bzw. 1 1/2-D-Methoden durchgeführt. Eine Ausnahme bildet die Arbeit von Too et al. [39], in der ein Brennstab des CANDU-Reaktors auf der Basis der FEM-Methode integral behandelt wird, ohne daß die Zahl der Unbekannten größer als bei sonst üblichen, lokalen FEM-Analysen wird. Das Verfahren ("repeatable boundary conditions") ist aber nur deshalb möglich, weil im speziell vorliegenden Fall die axiale Leistungsverteilung mit Ausnahme der beiden Stabenden über die gesamte Länge praktisch konstant ist. Der Stab wird zwar in eine beliebige Anzahl von Segmenten eingeteilt, sämtliche mittleren Segmente weisen jedoch identische Temperaturen und Verschiebungen auf, so daß auch nur ein repräsentatives Segment tatsächlich berechnet werden muß. Hier liegt also - gegeben durch den Reaktor- bzw. den Stab-Typ - ein sehr spezielles Verhalten vor. Trotzdem sieht Too in dieser Methode einen gangbaren Weg für allgemeinere

Fälle [40].

Neben den ein- und zweidimensionalen Rechenprogrammen wurden in die dritte Gruppe Rechenprogramme aufgenommen, die im wesentlichen thermische Analysen ermöglichen. Da jedoch die Temperaturberechnung - wie später noch ausführlich gezeigt wird (s. Kap. 5.1) - sehr empfindlich von Verformungen (z. B. des Spalts zwischen Hülle und Brennstoff) abhängt, benötigen diese Rechenprogramme eine Reihe von Näherungen zum mechanischen Verhalten. Die Problematik dieser Näherungen wird weiter unten noch diskutiert.

In Form einer Abschätzung wurde in die Abb. 5 eine Linie konstanter Rechenzeit eingetragen, die gleichzeitig als Grenze des derzeit möglichen Rechenaufwands interpretiert werden kann. Zwar liegt die dreidimensionale Behandlung auch bei plastischem - also nicht-linearem Werkstoffverhalten eindeutig im Rahmen der heutigen Möglichkeiten, im vorliegenden Fall einer Brennstabanalyse ist jedoch zu berücksichtigen, daß zum nichtlinearen Werkstoffverhalten auch das Kriechen zählt. Die Zeit kommt also - wie dies auch bereits aus der Darstellung einer Lastgeschichte deutlich wurde - als weitere unabhängige Variable hinzu. Als Abschätzung kann gesagt werden, daß die Hinzunahme der zeitlichen Abhängigkeiten zu den räumlichen den Rechenaufwand um etwa den Faktor 100 vergrößert. Eine dreidimensionale Berechnung ist somit derzeit nicht durchführbar. Sie sollte nach Meinung des Autors allerdings selbst dann nicht angestrebt werden, wenn in der Zukunft größere und schnellere Computer zur Verfügung stehen werden: der Aufwand für die möglicherweise gewon-

nene zusätzliche Information steht in gar keinem Verhältnis zu den werkstoffbedingten Unsicherheiten der Ergebnisse. Diese Analyse müßte als eine nur scheinbare Verbesserung gewertet werden. Deshalb werden Stabverbiegungen, die ein spezielles Ziel dreidimensionaler Analysen sind, in gesonderten Modellen behandelt, wie die Arbeiten von McAreavey [41], Miki [42], Buttemer [43], Halleux und Reynen [44] sowie Segal [45] zeigen. In einem lokal sehr begrenzten Bereich um einen Riß, der größenordnungsmäßig mehrere Korngrößen des Gefüges umfaßt, werden derzeit allerdings dreidimensionale bruchmechanische Untersuchungen für unumgänglich gehalten [46]. Diese Untersuchungen weisen jedoch so viele spezielle Aspekte auf, daß sie von der allgemeinen Brennstab-Strukturanalyse entkoppelt behandelt werden und folglich wiederum zu den Rechenprogrammen mit speziellen Aufgaben gezählt werden müssen.

Der statistische Aspekt der Brennstab-Strukturanalyse wird noch ausführlich in Kapitel 6 diskutiert. Neben von Natur aus statistischen Effekten, wie z. B. dem Reißen der Brennstofftabletten, weisen sämtliche freie Parameter Unsicherheiten auf, die sich in Unsicherheiten der Ergebnisse niederschlagen. Vor allem im Zusammenhang mit Genehmigungsverfahren oder Risikoabschätzungen leuchtet daher ein, daß der Fehlerangabe einer numerischen Rechnung größte Bedeutung zukommt. Aus der Kumulierung der ungünstigsten bzw. günstigsten Konstellation dieser Parameterunsicherheiten läßt sich jedoch, sofern diese Konstellationen überhaupt zu ermitteln wären, prinzipiell kein sinnvolles Fehlerband herleiten. Üblicherweise werden daher Parameter mit entscheidendem Einfluß, also mit sensitiver Natur, systematisch

variiert, um Anhaltspunkte für die Unsicherheiten der Rechnungen zu gewinnen. Derartige Sensitivitätsstudien können jedoch kein Ersatz für eine statistische Aussage sein. Einzelrechnungen, die den statistischen Aspekt nicht berücksichtigen, werden als deterministische Rechnungen bezeichnet, sie können im Sinne einer Abschätzung nach der sicheren Seite (konservative Rechnung) durchgeführt werden oder auch versuchen, das Brennstabverhalten im Mittel richtig zu beschreiben ('best estimate' Rechnung).

In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß nur eins der in Abb. 5 aufgeführten Programme, nämlich das eigene Rechenprogramm URANUS, den statistischen Aspekt berücksichtigt, alle anderen sind rein deterministisch<sup>+</sup>. Andere in der Literatur beschriebene statistische Analysen wurden dem in der Abb. 5 nicht dargestellten Bereich der kleineren Rechenprogramme zugeordnet. Zu nennen sind die Arbeiten von Misfeld [47], Mattila et al. [48], Carajilescov et al. [49], Poncelet et al. [50] und Peck et al. [51].

Aus der bisherigen Diskussion der prinzipiell zur Verfügung stehenden Beschreibungen des Stabverhaltens und der angewandten Rechenprogramme kann ein wichtiges Fazit zur 'Philosophie' der Brennstab-Strukturanalyse gezogen werden:

"Die Brennstab-Strukturanalyse ist nur dann als vollständig zu bezeichnen, wenn 1-D (bzw. 1 1/2-D) und 2-D Modelle sowie statistische Analysen einander ergänzend durchgeführt werden."

Anders ausgedrückt: alle Lösungsmethoden sind Näherungen. Keine

---

<sup>+</sup> Inzwischen wurde für den FRAP-code ebenfalls eine statistische Variante (FRAP Uncertainty Analysis Option) entwickelt.

liefert eine vollständige Beschreibung; diese wird vielmehr erst durch eine Vielfalt komplementärer Methoden erreicht. Im übrigen ist die bei Diskussionen der Fachleute immer wieder entstehende Meinungsverschiedenheit darüber, ob sehr einfache Rechenmodelle (simplistic models) oder komplizierte (highly sophisticated models) eine größere Berechtigung haben, mit der obigen Bemerkung ebenfalls bereits beantwortet.

Der komplementäre Aspekt verschiedener Methoden wird besonders deutlich, wenn Grundlagen bzw. Ziele und Aufgaben von Rechenprogrammen einander gegenübergestellt werden. 'Simplistic models' verwenden in der Regel empirische Korrelationen, die aufgrund experimenteller Ergebnisse aufgestellt werden. Naturgemäß basieren diese Korrelationen nur zum Teil auf physikalischen Grundlagen, so daß sich der Gültigkeitsbereich dieser Modelle im wesentlichen auf den Bereich beschränkt, der durch Experimente abgedeckt ist. Da experimentelle Untersuchungen wegen hoher Kosten (bzw. hohem Aufwand) und Dauer häufig einen Engpaß darstellen, kann die oben gemachte Einschränkung auf einen u. U. nur kleinen Gültigkeitsbereich sehr entscheidend sein. Liegt jedoch für einen Brennelementhersteller ein Brennstab-Design-Konzept fest, wie es z. B. für den Leichtwasser-Reaktor heute gegeben ist, dann leisten diese 'simplistic models' wertvolle Beiträge für Detailverbesserungen, d. h. für die ingenieurmäßige Arbeit. Besonders die sicherheitstechnische Untersuchung gewinnt für eine Genehmigungsbehörde dann an Wert, wenn eben alle Aussagen experimentell abgesichert sind. Es ist auf der anderen Seite jedoch auch nicht selbstverständlich, daß experimentelle Befunde in jedem Fall, also z. B. auch

bei hypothetischen Störfällen, in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen.

Die detaillierteren Modelle ('highly sophisticated models') versuchen dagegen, sämtliche Vorgänge grundsätzlich zu verstehen und zu analysieren ('first principles'), wodurch die Extrapolierbarkeit dieser Ergebnisse weit eher gewährleistet ist. In der Vergangenheit wurde überwiegend angestrebt, die physikalischen Vorgänge auf der Basis von 'first principles' zu beschreiben, im Rahmen dieser Arbeit wird die These vertreten, daß dieses Prinzip auch so weit wie möglich auf die mechanische Beschreibung selbst anzuwenden ist. Als Beispiel sei das Verhalten des gerissenen Brennstoffs genannt. Während häufig willkürliche Annahmen über die - als Tortenstücke gedachten - gerissenen Brennstoffsegmente gemacht werden, wird in Kapitel 5.2 eine Theorie entwickelt, die auf grundsätzlichen mechanischen Methoden basiert. Das Ziel solcher 'first principles' Modelle ist klar: gelingt es erst einmal, den entsprechenden Vorgang zu verstehen und physikalisch umfassend zu beschreiben, dann wird es in der Regel leicht möglich sein, Vereinfachungen für spezielle Anwendungsbereiche, eben 'simplistic models', zu formulieren. Hier zeigt sich der komplementäre Charakter verschiedener Methoden.

In der Praxis sind die Dinge allerdings sehr viel komplexer, weil die Abgrenzung bei der Vorgehensweise nur für den einzelnen Vorgang selbst vorgenommen werden kann, die Brennstabbeschreibung jedoch eine Fülle von Vorgängen berücksichtigen muß. Deshalb soll im folgenden eine derartige Differenzierung im



Hinblick auf die in Abb. 5 dargestellten Modelle nur exemplarisch vorgenommen werden. Danach könnte das SLEUTH-SEER-Rechenprogramm [30] zu den 'simplistic models' gezählt werden, die großen Stabrechenprogramme, wie z. B. COMETHE [21], LIFE [28] oder auch das eigene URANUS-Programm [31] sind den 'highly sophisticated' Modellen zuzordnen.

Im eigenen URANUS-Rechenprogramm wurde vom Konzept her versucht, beide Vorgehensweisen dadurch zu kombinieren, daß durch den Programmablauf verschiedene Pfade führen, die einen sehr unterschiedlichen Grad an Details erfassen. Darauf wird noch näher eingegangen werden.

Abschließend soll aus der kritischen Diskussion der methodischen Annahmen eine für die praktische Vorgehensweise wichtige Strategie für eine ingenieurmäßig durchzuführende Brennstab-Strukturanalyse hergeleitet werden. Wie schon diskutiert, müssen verschiedene Methoden eingesetzt werden. Zunächst muß das integrale Stabverhalten unter Berücksichtigung von Sensitivitätsstudien untersucht werden, wobei gleichzeitig der Grad an detailliertheit schrittweise gesteigert werden muß. Erst nach Abschluß dieser Untersuchungen ist es sinnvoll, Brennstabdetaillien wie Einflüsse von Endstopfen, Abstandhaltern oder Pelletstoßstellen zu analysieren. Dies wird mit zweidimensionalen Modellen durchgeführt, die als Rand- oder Anschlußbedingungen die Ergebnisse der integralen Untersuchungen verwenden. Schließlich sollten diese deterministischen Rechnungen so weit wie möglich durch statistische Untersuchungen ergänzt werden. Dies ist vor allem im Hinblick auf hypothetische Störfälle zu fordern.

## 2.2 Zur Wertung vorhandener Modelle

In diesem Abschnitt soll auf die Vielzahl vorhandener Rechenprogramme eingegangen werden und das Problem ihrer Wertung diskutiert werden. Dazu gehört auch die Diskussion der Aussagekraft dieser Analysen.

Es war schon kurz erwähnt worden, daß das unvollständige Verständnis der verschiedensten physikalischen Modelle unweigerlich zu hohen Unsicherheiten in quantitativen Angaben führt. Dies kann folgendermaßen zusammengefaßt werden.

"Methodische Unterschiede werden in der Regel bei weitem durch Unsicherheiten physikalischer Modelle überdeckt."

Es kommt hinzu, daß die Zahl der experimentell erfaßbaren Größen sehr viel kleiner ist als die Anzahl freier Parameter der Theorie. Direkt meßbar sind im wesentlichen geometrische Änderungen, der Innendruck sowie die Spaltgaszusammensetzung, indirekt sind durch Analyse von Schliffbildern Informationen über Temperaturen zu gewinnen. Mit Hilfe von Teststäben, die speziell instrumentiert sind, lassen sich zwar eventuell noch weitere Daten ermitteln, insgesamt ändert sich jedoch auch dann nichts an der Tatsache, daß die Zahl der nicht direkt meßbaren Parameter diejenigen der meßbaren bei weitem übersteigt. Die "Eichungen" von Rechenprogrammen an Experimenten stellen folglich eher Interpretationsversuche als statistische Anpassungen dar. Die Ergebnisse von Rechenprogrammen müssen daher - auch wenn die Programme noch so groß und dadurch scheinbar genau sind - besonders kritisch interpretiert werden.

Daneben darf allerdings der Nutzen dieser Programmsysteme nicht unterschätzt werden. Nur umfangreiche Rechenprogramme bieten die Möglichkeit, die physikalischen Vorgänge bzw. ihre Wechselwirkung zu erfassen, ohne sie wären Experimente nur in Form von Ja-/Nein-Aussagen auswertbar. Letztlich stellen die Rechenprogramme also die einzig möglichen Instrumente dar, mit denen die experimentellen Erfahrungen systematisch ausgewertet und gesammelt werden können.

Dies erklärt zum größten Teil ihre Vielfalt: jede Forschergruppe, die in den letzten 10 Jahren auf dem Gebiet der Brennstab-Strukturanalyse gearbeitet hat, hat auch ein eigenes Programmsystem aufgebaut. Für diese Eigenentwicklungen dürfte neben kommerziellen Gesichtspunkten bzw. der verständlichen Abneigung der Firmen, mit Übergabe der Rechenprogramme industrielles know-how weiterzugeben - ein Argument, das analog auch für Forschungsinstitutionen gilt -, eine große Rolle gespielt haben, daß Rechenprogramme erst heute den Stand erreicht haben, der für eine Übernahme notwendig ist. Aus dieser Sicht kann mit einiger Sicherheit vermutet werden, daß die Zahl der Rechenprogramme nicht mehr anwachsen wird. Als sehr wesentliche Zukunftsaufgabe muß der Versuch unternommen werden, eine Vereinheitlichung der Programme herbeizuführen. Die Grundlagen dafür werden weiter unten noch behandelt.

Die zunächst beeindruckende Vielzahl der Rechenprogramme wird darüberhinaus noch verständlicher, wenn die Rechenprogramme nach Ländern gruppiert werden, wie dies in der Tab. 1 bei den 1-D bzw. 1 1/2-D-Rechenprogrammen durchgeführt wurde. Für den Bereich der Bundesrepublik ergibt sich, daß im industriellen

Land	Rechenprogramm
USA:	BEHAVE [20]; CYGRO [22]; DEFORM [23] FRAP [24]; LIFE [28]; CAPCON-3 [92]
Bundesrepublik Deutschland:	BREDA [19]; IAMBUS [27]; SATURN [29] URANUS [31]; CARO [34]; SENATOR [91]
Japan:	ACTIVE-II [18]; FROST [25]
U. K.:	FRUMP [26]; SLEUTH- SEEP [30]
Belgien:	COMETHE [21]
Dänemark:	WAFER [32]
Argentinien:	BACO [90]

Tabelle 1: Gliederung von 1-D bzw. 1 1/2-D Rechenprogrammen  
nach Ländern

Bereich zwei Rechenprogramme verwendet werden (IAMBUS [27]: Firma Interatom und CARO [34]: Firma Kraftwerk Union)<sup>+</sup>. Im Bereich der Forschungszentren bzw. der Hochschulen stehen drei Rechenprogramme zur Verfügung (BREDA [19], SATURN [29]: Kernforschungszentrum Karlsruhe, URANUS [31]: Technische Hochschule Darmstadt). Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, daß das BREDA-Rechenprogramm als Teil eines reaktordynamischen Programmsystems zur Sicherheitsanalyse hypothetischer Störfallabläufe beim Schnellen Natriumbrüter einen sehr speziellen Charakter aufweist, zum anderen, daß das eigene URANUS-Rechenprogramm langfristig Aufgaben im Bereich des Kernforschungszentrums Karlsruhe übernehmen soll. Im nationalen Bereich wurde demnach die Entwicklung von Rechenprogrammen zur Brennstab-Strukturanalyse auf wenige Objekte konzentriert.

Die eigentliche Wertung von Rechenprogrammen ist bereits an anderer Stelle versucht worden. Kummerer und Eibel [52] stellen in Form einer Tabelle den Leistungsumfang verschiedener Rechenprogramme gegenüber (s. Anhang 3, S. 338). Obwohl diese Zusammenstellung den Stand vom Dezember 1976 repräsentiert, weist das eigene Rechenprogramm URANUS, das in den letzten Jahren noch erweitert wurde, mit den höchsten Leistungsumfang auf. Allerdings sollten derartige Auflistungen im wesentlichen als Dokumentation betrachtet werden, die über die Qualität noch wenig aussagt. Dies stellen auch die Autoren selbst fest: "Die Wertung eines Rechenprogramms durch Außenstehende muß zwangsläufig unvollständig bleiben". Allerdings möchte der Autor dieser Arbeit nicht so weit gehen wie Hoppe [53], der derartigen Auflistungen jeglichen Wert abstreitet. Zweifelsohne ist aber heute

---

<sup>+</sup> neu entwickelt wurde bei der Kraftwerk Union das Rechenprogramm SENATOR [91]

der Leistungsumfang eher ausgeglichener und keins der in Abb. 5 aufgenommenen Systeme weist Mängel auf, die eine Anwendung prinzipiell ausschließen würde. Auch aus einem ganz anderen Grund kann ein Rechenprogramm nur bedingt nach derartigen Tabellen gewertet werden. Alle Erfahrung zeigt, daß die eigentlichen Schwierigkeiten der Brennstab-Strukturanalyse weniger in der analytischen Erfassung der verschiedensten Problemkreise liegt, sondern hauptsächlich numerischer Art sind: die starken Wechselwirkungen der physikalischen Effekte können prinzipiell nur iterativ gelöst werden. Naturgemäß ist jedoch numerische Stabilität keine absolute Eigenschaft eines Rechenprogramms, sondern an den Fall bzw. den Anwendungsbereich geknüpft. Die Qualität der Rechenprogramme kann deshalb letztlich nur durch Vergleiche ihrer Vorhersagefähigkeit im Hinblick auf definierte Experimente festgestellt werden.

Ein derartiger Vergleich ist vom Electric Power Research Institute (EPRI) durchgeführt worden. Die zahlreichen Berichte, von denen hier nur der Abschlußbericht [54] zitiert werden soll, zeigen, daß ein Vergleich von Rechenprogrammen - selbst beschränkt auf den Spezialfall von Leichtwasserreaktoren - eine überaus umfangreiche Aufgabe ist. Gleichzeitig zeigt die Studie, daß neben objektiven Kriterien wie Vorhersagefähigkeit und Rechenzeit durchaus subjektive Kriterien wie Handhabung und Dokumentation stehen. Verglichen wurde das belgische Rechenprogramm COMETHE-III mit den amerikanischen Rechenprogrammen BEHAVE-4, LIFE-THERMAL-1, GAPCON-THERMAL-2, CYGRO-3 und FMODEL, wobei die Reihenfolge der Nennung die gefundene Rangfolge wiedergibt. Nachträglich wurde das URANUS-Rechenprogramm in die-

sen Vergleich einbezogen (Laßmann [33], s. Anhang 8).

Nach dem oben gesagten ist es müßig, nach einer allgemein gültigen Rangfolge der in der Abb. 5 dargestellten Rechenprogramme zu fragen. Dazu sind Ziele und Aufgaben der einzelnen Rechenprogramme zu verschieden. Jedes der Rechenprogramme hat während der letzten Jahre dem jeweiligen Benutzer als Instrument zum eigentlichen Verständnis des Brennstabverhaltens wertvolle Dienste geleistet. Aber selbst wenn Kriterien für eine Wertung gefunden werden könnten, stellt sich der kritischen Wertung ein entscheidendes Hindernis in den Weg: von den genannten Rechenprogrammen ist praktisch keines frei verfügbar. Hier ist für die Zukunft eine größere Offenheit anzustreben. Sieht man einmal davon ab, daß neu entstehende Brennstabgruppen ein komplettes Rechenprogramm kaufen werden, dann wird sich ein Erfahrungsaustausch in der nächsten Zukunft auf die Übernahme einzelner Programmteile beschränken. Um gangbare Wege für diese Übernahme zu zeigen, soll im nächsten Kapitel eine Klassifizierung der Aufgaben vorgenommen werden und der grundsätzliche Aufbau von Rechenprogrammen diskutiert werden.

Als Beispiel für die Übernahme einzelner Programmteile soll hier die Schaffung und Verwendung einheitlicher Materialdaten (z. B. durch das MATPRO-System [55], s. auch Kap. 5) angeführt werden, sowie auf einen Fall aus dem eigenen Bereich hingewiesen werden, wo eine argentinische Brennstabgruppe für ein Stab-Rechenprogramm die Behandlung von axialen Effekten vom URANUS-Rechenprogramm übernehmen wird.

### 3. Grundsätzlicher Aufbau von Rechenprogrammen

#### 3.1 Klassifizierung der Aufgaben

Kummerer und Elbel haben in der schon zitierten Arbeit [52], die auf eine Arbeit von Kummerer [56] zurückgeht, Aufgaben zur Brennstab-Strukturanalyse grundsätzlich klassifiziert. Danach werden unterschieden:

- Materialphänomene M
- Auslegungsgrößen A
- Betriebsbedingungen B

Die auftretenden Beanspruchungen faßt Kummerer in Lastgrößen L zusammen, deren Kollektiv innerhalb der Schadensgrenze S bleiben muß:

$$\mathbf{L} = f(\mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{B}) \cong \mathbf{S} \quad (3.1)$$

Sämtliche Größen werden in weitere Parametergruppen unterteilt (Tab. 2). Kummerer gibt in der Arbeit [56] detaillierte Abhängigkeiten der verschiedensten Werkstoffgrößen an, auf diese Darstellung soll jedoch verzichtet werden. Die kritische Diskussion der Autoren führt zum Ergebnis, daß analytische Lösungen der Gl. 1 nicht möglich sind und somit die zeitliche Integration nur numerisch (diskret) durchgeführt werden kann. Dies deckt sich voll mit den eigenen Aussagen ([14], [15], s. auch Anhang 1). Den späteren Überlegungen vorweggreifend soll hier festgestellt werden, daß auch die räumliche Behandlung nur diskret erfolgen kann.



Tabelle 2: Parametergruppen der Brennstab-Strukturanalyse

(nach Kummerer [56])

Auslegungsgrößen A	Materialarten Werkstoffzustand Geometrie u. a.
Betriebsbedingungen B	Stableistung Neutronenfluß Kühlmitteltemperatur Außendruck u. a.
Materialphänomene M (Hülle und Brennstoff)	Mechanische Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit Wärmeübergang Brennstoff - Hülle Schwellen und Porenwanderung Spaltgasfreisetzung u. a.
Lastgrößen L	Temperatur Spannungen Verformungen Materialverteilung Korrosion u. a.

Damit ist die Grundstruktur von Rechenprogrammen festgelegt. Kummerer gibt zwar ein prinzipielles Flußdiagramm an, das hier jedoch wegen seiner zu großen Simplifizierung nicht verwendet werden soll.

### 3.2 Allgemeine Programmstruktur

Für den Stab müssen Geometrie, gegebene Materialien, Kühlmitteldruck und Kühlmitteltemperatur sowie die Leistungsgeschichte als Eingabegrößen vorgegeben sein. Die eigentliche Brennstab-Strukturanalyse wird - wie oben dargestellt - zeitlich diskret durchgeführt, so daß die logische Struktur zunächst durch eine alles umfassende Zeitschleife gebildet wird. Im Inneren dieser Schleife wird die eigentliche Brennstab-Analyse lokal durchgeführt. Die schon erwähnten Wechselwirkungen der physikalischen Phänomene, vor allem thermisch-mechanische Wechselwirkungen, lassen dabei nur iterative Lösungen zu, so daß die Analyse nochmals durch eine Iterationsschleife umschlossen ist. Ganz selbstverständlich ist die rechentechnische Behandlung selbst in Form einzelner Komponenten gegliedert, in denen in sich geschlossene Aufgaben erfüllt werden, wie z. B. die Temperaturberechnung oder die mechanische Analyse. Die eigene praktische Erfahrung zeigt, daß es unumgänglich ist, für die einzelnen Komponenten spezielle Testprogramme zu entwickeln. Neben diesen Testprogrammen sollten noch spezielle Programme für die Aufarbeitung des Datenfalls, also für die Zusammenstellung und Überprüfung von Eingabedaten ('pre-processor') sowie für die Auswertung der Ergebnisse ('post-processor') vorhanden sein. Pre- und post-processor, die verschiedenen Testprogramme und das eigentliche Re-

chenprogramm bilden das Programmsystem, dessen bisher diskutierte prinzipielle Struktur in der Abb. 6 dargestellt ist. Es ist zweckmäßig, zwischen einfachen Werkstoffgrößen wie z. B. dem E-Modul oder dem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und komplexem Materialverhalten wie z. B. dem Nachverdichten oder der Spaltgasfreisetzung zu unterscheiden. Einfache Größen, die im folgenden als Materialdaten bezeichnet werden, können in einer Materialdatenbasis in verschiedener Form (Tabellen bzw. Function-Unterprogrammen) zur Verfügung gestellt werden. Für die Beschreibung von komplexem Materialverhalten sind physikalische Modelle zu entwickeln, die in eigenen Komponenten rechen-technisch ausgewertet werden.

Aufgrund dieser sehr einfachen Überlegungen sind die eigentlichen Schwierigkeiten noch nicht zu erkennen. Problematisch sind beide Arten der Diskretisierung, also die räumliche und die zeitliche sowie die Konvergenz der Iteration. Die Diskussion der räumlichen Diskretisierung soll hier zurückgestellt werden, weil sie an die gewählte mechanische Beschreibung geknüpft ist und damit keinen allgemeinen Charakter aufweist, der in diesem Kapitel ausschließlich behandelt werden soll. Für die zeitliche Diskretisierung gilt zunächst scheinbar allgemein: je feiner, desto besser. Diese Forderung wird jedoch dadurch eingegrenzt, daß durch zu feine Diskretisierung der Aufwand sehr schnell die gegebenen rechentechnischen Grenzen überschreitet. Gleichzeitig könnten die im Zeitschritt  $\Delta t$  berechneten Änderungen mancher (nicht aller!) Größen so klein sein, daß die Rechnergenauigkeit unterschritten werden oder vorgegebene Genauigkeitsschranken und damit indirekt die zeitliche Integration fehlerhaft würde. Ein ähnlicher Effekt trat z. B. im CRASH - Pro-

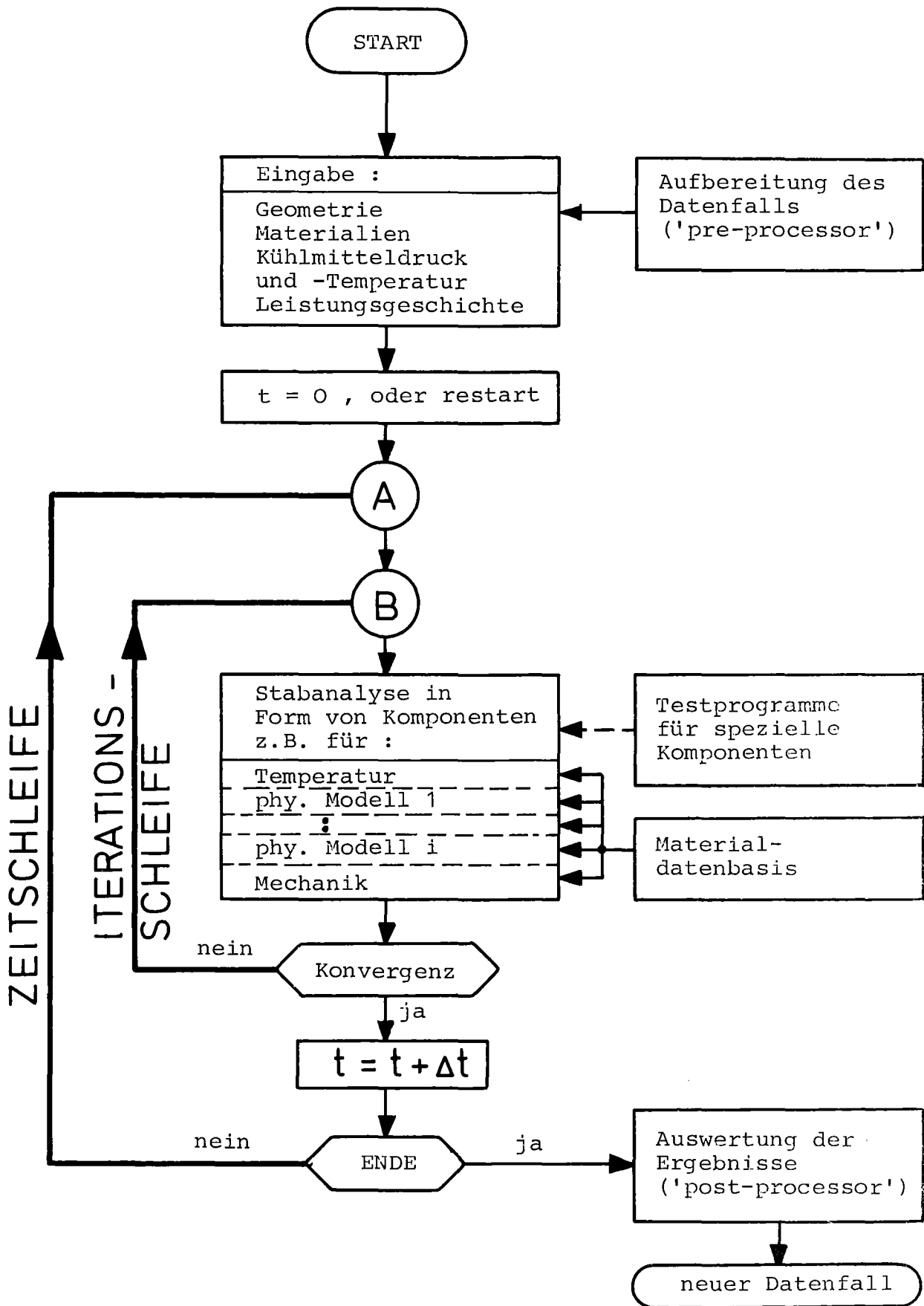


Abb. 6: Prinzipielle Struktur eines Rechenprogrammsystems zur Brennstab-Strukturanalyse ( $t, \Delta t$ : Zeit bzw. Zeitschritt)

gramm [57] bei Untersuchungen zum Konvergenzverhalten auf. Eine Festlegung des Zeitschritts  $\Delta t$  basiert deshalb auf der allgemeinen Forderung, daß die im Zeitschritt berechneten inkrementellen Änderungen der Größen physikalisch und numerisch sinnvoll sein müssen. Zusammen mit der grundsätzlichen Forderung einer vernünftigen Rechenzeit ist diese Forderung nur mit variabler Zeitschrittlänge zu lösen, die das Rechenprogramm aufgrund verschiedenster Kriterien selbst ermittelt.

Newman et al. [22] haben für das Rechenprogramm CYGRO-4 eine Liste dieser Kriterien aufgestellt (s. Tabelle 3) und als Leistung dieses Rechenprogramms besonders hervorgehoben. Es muß jedoch betont werden, daß die automatische Steuerung eines variablen Zeitschritts nach ähnlichen Kriterien in jedem Programm enthalten ist.

Limits to time step in CYGRO-4

---

1. Discontinuity in rate of change of reactor data: power level, coolant temperature, coolant pressure, etc.
  2. Change in state of fuel-clad radial interaction.
  3. Change in state of fuel-clad axial interaction.
  4. Change in state of rod-support interaction.
  5. Fuel cracking or closing of cracks in fuel.
  6. Change of strain rate resulting from hardening or change of stress.
  7. Change of compliance from value estimated using assumed time step.
  8. Change of geometry resulting from large increment of strain.
  9. Effect of temperature on deformation rates.
  10. Changes in conditions such as clad collapse or initiation of 'hourglassing' interaction between fuel and clad that require a change in the equations describing the behavior of the element.
- 

Tabelle 3: Kriterien einer Zeitschritt-Begrenzung im Rechenprogramm CYGRO-4 [22]

### 3.3 Zeitliche Programmstruktur

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, daß nur eine variable Zeitschrittänderung numerisch und physikalisch sinnvolle Ergebnisse liefern kann und daß man auf diese Weise überhaupt erst zu vernünftigen und vertretbaren Rechenzeiten kommt. Im folgenden soll dieses allgemeine Konzept zur Zeitschrittsteuerung näher diskutiert werden, weil der hohe numerische Aufwand auf sehr verschiedene Weise begrenzt wird. Der einfachste Weg besteht darin, die Gesamtzahl der Zeitintervalle zu begrenzen. Dieser Weg wurde z. B. im IAMBUS- und im CARO-Rechenprogramm [27], [34] gewählt (jeweils maximal 100 Zeitschritte). Diese Vorgehensweise ist jedoch besonders im Hinblick auf die Kriechmechanik sehr problematisch, so daß mechanische Aussagen dieser Rechenprogramme jeweils von Fall zu Fall sorgfältig analysiert werden müssen.

Ein prinzipiell anderer Weg wurde im COMETHE-Rechenprogramm [21] gewählt, indem verschiedene physikalische Größen durch jeweils verschiedene Längen der Zeitschritte erfaßt werden. Dies führt naturgemäß zu einem hohen Aufwand in der allgemeinen Programmsteuerung. Außerdem müssen Wechselwirkungen verschiedener physikalischer Größen sehr sorgfältig überlegt werden. Anders ausgedrückt heißt das, daß die Kriterien zur Steuerung der verschiedensten Zeitschritte gegenüber der Tabelle 3 wesentlich komplizierter werden. Im Fall der instationären Wärmeleitung scheint dieses Problem im COMETHE-Rechenprogramm noch nicht zufriedenstellend gelöst zu sein (s. Vliet [58]).

Im eigenen Rechenprogramm URANUS wurde das Konzept eines für alle physikalischen oder mechanischen Beschreibungen gültigen Zeitschritts gewählt, dessen Länge durch das Minimum aller Anforderungen bestimmt wird. Ganz analog zu der oben beschriebenen Behandlung im COMETHE-Rechenprogramm zeigt sich jedoch, daß

dieser Zeitschritt für manche Vorgänge nicht unbedingt so klein sein muß. Dies gilt z. B. für die Spaltgasfreisetzung, die Änderung der Kühlkanalgeometrie durch die Stabverformung und die damit verbundene Änderung der Hüllrohräußentemperatur, die Änderung der radialen Leistungsdichteverteilung etc.. Diese Vorgänge werden nun rein inkrementell behandelt, d. h. sie werden innerhalb der iterativen Behandlung des Gesamtproblems nur im ersten Iterationsschritt eines jeden Zeitschritts  $\Delta t$  erfaßt. Diese - für bestimmte Berechnungen zulässige - rein inkrementelle Vorgehensweise hat sich als sehr erfolgreich erwiesen, weil klarer logischer Aufbau der Gesamtlösung mit niedrigem Rechenaufwand kombiniert wird. Außerdem ist die Beschränkung der Iterationsvorgänge auf das unbedingt notwendige Maß der einzige Weg, zu viele, ineinander verschachtelte Iterationen zu vermeiden, deren numerische Stabilität nur noch im Einzelfall untersucht werden könnte.

Die obige Diskussion der Probleme, die sich im Zusammenhang mit der Wahl eines Zeitschritts ergeben, soll noch durch folgende Bemerkung abgerundet werden. Die eigene Erfahrung zeigt, daß sich physikalisch sinnvolle Anwendungsbereiche von konkreten physikalischen Modellen nicht unbedingt mit denjenigen Bereichen decken, die sich während der iterativen Behandlung rein numerisch ergeben könnten. Physikalische Modelle sind folglich so aufzustellen, daß die numerischen Extrapolationen über ihre physikalischen Gültigkeitsbereiche hinaus nicht zu Inkonsistenzen führen.

Im Zusammenhang mit der zeitlichen Beschreibung müssen die - auch im Deutschen üblichen - Begriffe steady-state (bzw. quasi-

steady-state) und transient definiert werden. Wie schon aus der Lastgeschichte (s. Abb. 4) zu erkennen ist, ändern sich mit der Zeit die Belastungen. So z. B. die Stablängenleistung oder die Temperatur und damit alle von der Temperatur abhängigen Vorgänge. Die Belastung ist also instationär. Allerdings hat sich dieser Begriff nicht durchsetzen können, weil für die überwiegende Zahl aller möglichen Betriebszustände die Aussage gemacht werden kann, daß Belastungsänderungen sehr langsam erfolgen, wobei langsam hier den Bereich von Stunden umfaßt. In diesen Fällen ist es noch zulässig, Werkstoffkennwerte in der Berechnung zu verwenden, die unter konstanten Lastbedingungen gewonnen wurden und auch die Temperaturberechnung stationär vorzunehmen. Steady-state Rechenprogramme können ausschließlich derartige quasi-stationären Bedingungen berücksichtigen. Schnell ablaufende Änderungen der Belastung, wie sie vor allem in Störfällen auftreten, verlangen eine grundsätzlich andere Behandlung. Zu berücksichtigen sind Werkstoffkennwerte für nicht konstante Lastbedingungen sowie eine instationäre Temperaturberechnung. Damit ergibt sich folgende Definition:

DEF.4: Steady-state Rechenprogramme können ausschließlich quasi-stationäre Bedingungen berücksichtigen. Schnell ablaufende Änderungen der Belastung, wie sie vor allem in Störfällen auftreten, verlangen eine grundsätzlich andere Behandlung. Zu berücksichtigen sind Materialdaten für nicht konstante Lastbedingungen sowie eine instationäre Temperaturberechnung. Als transiente Rechenprogramme gelten diejenigen, die diese Bedingungen erfüllen. Im Zusammenhang mit der Belastung oder mit dem Materialverhalten steht



der Begriff transient synonym für instationär.

### 3.4 Verfeinerte Programmstruktur

Im folgenden soll nun die prinzipielle Struktur von Rechenprogrammen verfeinert werden. Entsprechend dem Thema dieser Arbeit der Brennstab-Strukturanalyse, sollen die mechanischen Grundgleichungen für Hülle und Brennstoff im Vordergrund stehen. Die physikalischen Vorgänge bewirken nun entweder Änderungen der Geometrie (z. B. infolge von Wärmedehnungen oder durch Korrosionsabtrag) oder haben einen direkten oder indirekten Einfluß auf die Temperatur, die rückkoppelnd wiederum die Geometrie beeinflusst. Dies läßt sich im folgenden Ansatz mathematisch beschreiben:

$$\{d\mathbf{E}\} = \{d\mathbf{E}^{el}\} + \{d\mathbf{E}^{cr}\} + \{d\mathbf{E}^s\} + \{d\mathbf{E}^{th}\} + \{d\mathbf{E}^f\} + \{d\mathbf{E}^{sin}\} + \{d\mathbf{E}^{pl}\} \quad (3.2)$$

mit

- $\{\mathbf{E}\}$  = Gesamtdehnung
- $\{\mathbf{E}^{el}\}$  = elastische Dehnung
- $\{\mathbf{E}^{cr}\}$  = Kriechdehnung
- $\{\mathbf{E}^{pl}\}$  = zeitunabhängige plastische Dehnung
- $\{\mathbf{E}^s\}$  = Schwelldehnung
- $\{\mathbf{E}^{th}\}$  = thermische Dehnung
- $\{\mathbf{E}^f\}$  = Rißdehnung
- $\{\mathbf{E}^{sin}\}$  = Nachsinterdehnung

Um Konsistenz mit der Terminologie der eigenen Arbeit [31], siehe auch Anhang 3, zu bewahren, wurden hier die aus dem Englischen stammenden Indizes übernommen. Im folgenden soll Matrizen-Schreib-

weise gewählt werden, d. h.  $[A]$ ,  $[a]$  sind Matrizen,  $\{B\}$ ,  $\{b\}$  Spaltenvektoren und  $\{B\}^T$ ,  $\{b\}^T$  transponierte Spaltenvektoren. Fettgedruckte Symbole weisen darauf hin, daß die einzelnen Komponenten vom Ort und von der Zeit abhängen, also z. B.

$$\left\{ \boldsymbol{\varepsilon}^i \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\varepsilon}_x^i(x, y, z, t) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y^i(x, y, z, t) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z^i(x, y, z, t) \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

Die differentielle Form der Gleichung 2 läßt sich leicht in eine inkrementelle Schreibweise umschreiben, die sich in vielen Bereichen der Brennstab-Strukturanalyse anbietet, wie dies weiter oben bereits ausgeführt wurde. Anschaulich heißt das, daß pro Zeitschritt kleine (inkrementelle) Änderungen berechnet werden, aus deren Summation man die gesamte Änderung erhält. Alle bekannten zweidimensionalen Finit-Element-Beschreibungen des Brennstoffverhaltens basieren z. B. auf inkrementellen Spannungsdehnungsbeziehungen. Ein erster Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen läßt sich leicht aus Gleichung 2 über das Hook'sche Gesetz

$$\{d\boldsymbol{\varepsilon}\} = [d\mathbf{D}]\{\boldsymbol{\sigma}\} + [\mathbf{D}]\{d\boldsymbol{\sigma}\} \quad (3.4)$$

$$[\mathbf{D}] = \text{inverse Elastizitätsmatrix}$$

herleiten. Allerdings hängen auch andere Terme in der Gleichung 2 von den Spannungen ab, so z. B. die Kriechdehnung  $\{\boldsymbol{\varepsilon}^{cr}\}$  und die plastische Dehnung  $\{\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}\}$ . Die Herleitung der vollständigen inkrementellen Spannungs-Dehnungsbeziehungen ist deshalb das Thema vieler Arbeiten. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang die grundsätzliche Arbeit von Rashid [59], auf der praktisch alle Finit-Element-Lösungen aufbauen. In einer neueren Arbeit geben

Banerjee et al. [60] Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für instationäre Vorgänge an.

Inzwischen ist die Formulierung von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ('constitutive equations') ein Forschungszweig für sich geworden, dem z. B. in der SMIRT-Konferenz stets eine eigene Sektion gewidmet wird. Der gegenwärtige Stand dieser Disziplin läßt sich etwa folgendermaßen skizzieren:

"Theoretische Beschreibungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen können aufgrund thermodynamischer Prinzipien mit Hilfe von Zustandsgrößen entwickelt werden (s. z. B. Bard [61]). Die zahlenmäßige Bestimmung der zahlreichen Parameter ist heute jedoch noch nicht möglich."

Auf eine weitergehende Diskussion kann hier verzichtet werden, da auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nur soweit eingegangen werden sollte, daß die grundsätzliche Behandlung von physikalischen Vorgängen im Rahmen der mechanischen Analyse sichtbar wird.

Implizit ist in allen Termen der Gleichung 2 auch die Temperatur enthalten. Mathematisch gesehen liegt beim Brennstab ein einfaches Wärmeleitungsproblem vor, so daß hier auf eine nähere Diskussion der Temperaturberechnung verzichtet werden kann. Die Schwierigkeiten liegen in der Unsicherheit der Stoffdaten bzw. in Unsicherheiten der physikalischen Modelle. Als besonders empfindlich stellt sich dabei der Bereich zwischen Hülle und Brennstoff heraus, für den ein eigenes Modell entwickelt wurde (s. Kap. 5.1).

Nach dem oben gesagten kann der innere Teil der Iterationsschlei-

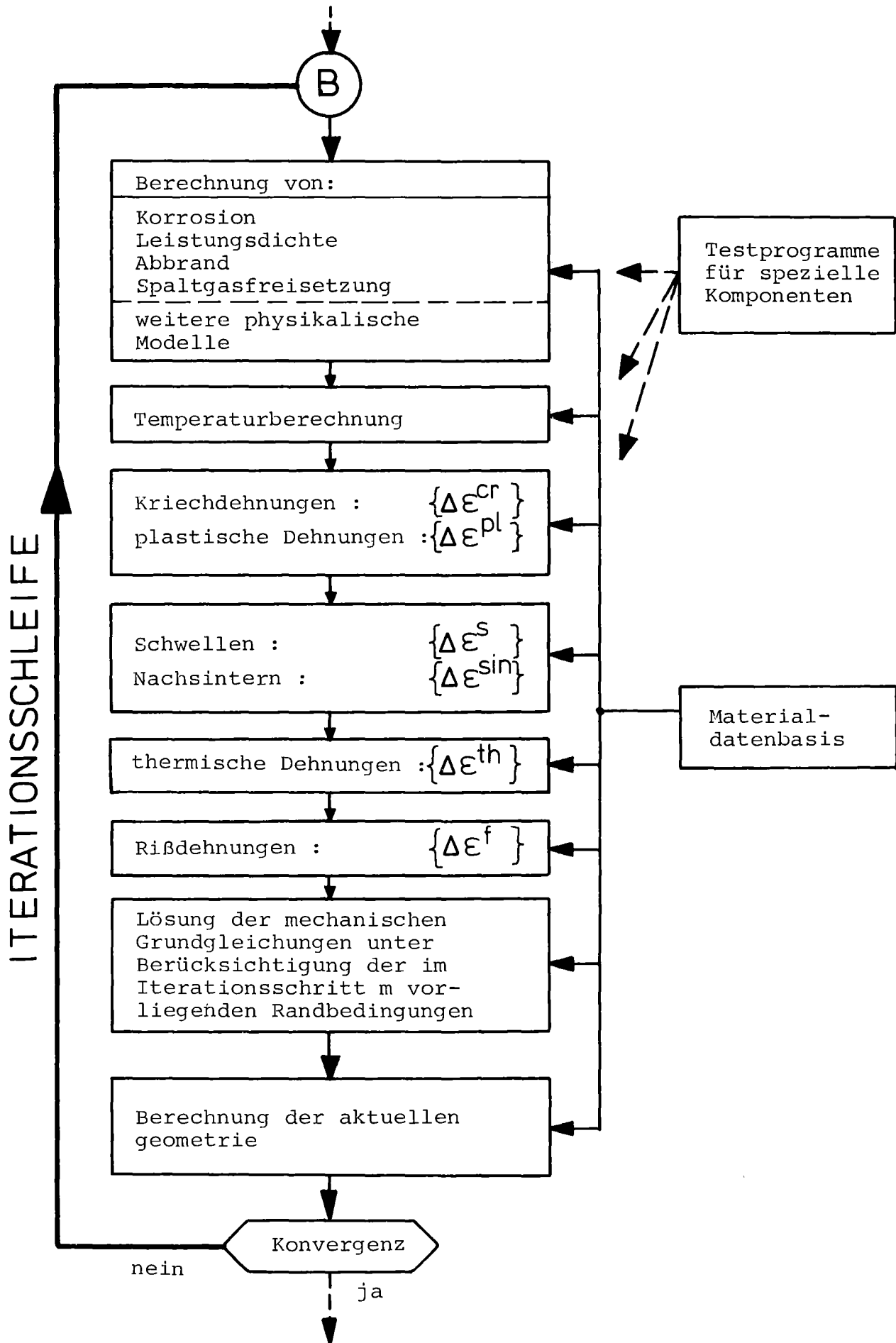


Abb. 7: Verfeinerte Programmstruktur ( Ausschnitt aus Abb.6 )

fen aus der Abb. 6 weiter gegliedert werden (Abb. 7), allerdings ist dann eine weitere Verfeinerung in einem allgemeinen Rahmen nicht mehr möglich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß aufgrund einer Klassifizierung der Aufgaben ein überraschend ins Detail gehender grundsätzlicher Aufbau von Rechenprogrammen zur Brennstab-Strukturanalyse entwickelt werden kann. Dieser Aufbau ermöglicht eine klare Gliederung eines Rechenprogramms in einzelne Komponenten mit definierten Aufgaben. Dieser grundsätzliche Aufbau wird durch die Wahl einer speziellen mechanischen Lösung nur noch geringfügig geändert, wie im speziellen Fall des eigenen Rechenprogramms URANUS noch dargestellt wird (Kap. 4.3).

#### 4. Das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme

---

In den bisherigen Betrachtungen wurden ein-, zwei- und dreidimensionale Brennstabbeschreibungen gegenübergestellt. Gemäß der Def. 2 bezog sich diese Aussage auf die Zahl der unabhängigen Variablen in der räumlichen Beschreibung. Im folgenden sollen nun die Annahmen diskutiert werden, die es gestatten, ein endliches Gebilde wie den Brennstab in der weitestgehenden Vereinfachung eindimensional zu behandeln. Dazu werden allgemein zwei Annahmen gemacht:

- a) in axialer Richtung liegt ein modifizierter ebener Dehnungszustand vor,
- b) der Brennstab wird als rotationssymmetrisch angenommen.

Die Annahme a) ist in der kontaktfreien Brennstab-Hülle praktisch über die gesamte Länge erfüllt, Abweichungen davon treten z. B. am Endstopfen oder den Abstandhaltern auf, allerdings in lokal sehr begrenzten Bereichen (s. z. B. Fabian [4] oder Krugmann [62]). Sehr viel gravierender ist die Annahme a) jedoch im Hinblick auf den Brennstoff: bei hoher thermischer Belastung weist die Tablette eine ausgeprägte Verwölbung auf, die bei einer mechanischen Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff, also im Kontaktfall, auch der Hülle aufgeprägt wird. Dieser spezielle Fall wird weiter unten noch gesondert diskutiert werden. Immerhin kann jedoch mit der Annahme a) das mittlere Spannungsniveau im Brennstoff - verglichen mit einer zweidimensionalen Berechnung - auf etwa  $\pm 10\%$  übereinstimmend berechnet werden. Für die Annahme b) lassen sich ebenfalls Fälle angeben,

in denen diese Näherung nicht mehr zutrifft. So z. B. bei einem natrium-gebundenen Karbidstab, in dem eine Spaltgasblase lokal einen sehr schlechten Wärmeübergang bewirkt (Steiner [63]), oder beim Kriechbeulproblem, wo sich die Hülle bei hohem Außendruck in einer etwa elliptischen Form an den Brennstoff anlegt (Laßmann [64]). Naturgemäß kann die Annahme b) nur für glatte Hüllrohre gemacht werden, berippte Hüllrohre müssen zweidimensional behandelt werden.

Die Diskussion der Annahmen a) und b) soll im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vertieft werden. Insgesamt kann festgestellt werden, daß beide Annahmen für die Untersuchung des integralen Verhaltens sehr brauchbare Näherungen darstellen. Dies wird allgemein anerkannt: Sämtliche integrale Brennstabanalysen basieren auf diesen Annahmen.

#### 4.1 Mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff

Die Annahmen a) und b) reichen bereits aus, um das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme zu entwickeln: der Stab wird durch einzelne axiale Schnitte charakterisiert, die zunächst für sich analysiert werden. Dies ist gemäß den obigen Annahmen eine eindimensionale Berechnung von Spannungen und Dehnungen als Funktion aller physikalischen Effekte. Indirekt ist die wichtige Einschränkung enthalten, daß die gesamte Säule der Brennstofftabletten als Kontinuum interpretiert wird. Die Berechnung selbst kann nach sehr verschiedenen mechanischen Methoden vorgenommen werden, die Matthews [65] ausführlich dargestellt hat. Die häufigste Anwendung haben analytische Lösungen

(z. B. im LIFE- [28], SATURN- [29] und URANUS-Rechenprogramm [31]) und Differenzenmethoden (z. B. im FRUMP- [26], IAMBUS [27] und WAFER-Rechenprogramm [32]) gefunden. Als Ergebnis erhält man zur Zeit  $t$  die radialen Verschiebungen  $u$  und die Spannungen  $\{\sigma\}$  in Hülle und Brennstoff für einen betrachteten Schnitt  $l$  als Funktion aller physikalischen Effekte:

$$u = u(R, Z_l, t) \quad (4.1)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma(R, Z_l, t)\} \quad (4.2)$$

mit  $R$  = aktueller Radius

$Z$  = aktuelle Höhe

Durch unterschiedliche Temperaturen oder durch unterschiedliche Schwellvorgänge in Hülle und Brennstoff kann Kontakt auftreten, der eine radiale und axiale mechanische Wechselwirkung verursacht. Diese Wechselwirkung wird als PCMI-Effekt (pellet-cladding-mechanical-interaction) bezeichnet:

DEF.5: Die radiale und axiale mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wird als PCMI-Effekt (pellet-cladding-mechanical-interaction) bezeichnet.

Neben der mechanischen Wechselwirkung ist wegen des Wärmeübergangs eine thermische Wechselwirkung zu beachten (s. Kap. 5.1), zusätzlich bewirken Spaltprodukte chemische Reaktionen mit der Hülle. Im LWR-Brennstab z. B. führt Jod zu einer Spannungsrißkorrosion, die den wesentlichen Schädigungsmechanismus der Hülle darstellt. Die gesamte Wechselwirkung (PCI) ist also mechanisch, thermisch und chemisch bedingt:



DEF.6: Die gesamte Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wird als PCI-Effekt (pellet-cladding-interaction) bezeichnet. Sie ist mechanisch, thermisch und chemisch bedingt.

Da die gesamte Wechselwirkung im Hinblick auf ein mögliches Hüllrohrversagen die wahrscheinlichste Ursache darstellt, soll diese Frage näher betrachtet werden. In der Abb. 8 ist rein graphisch die Wechselwirkung am Beispiel eines LWR-Brennstabs skizziert, dessen Hülle besonders zu der dargestellten bambusartigen Verformung neigt. In der schematischen Gegenüberstellung einer eindimensionalen (linkes Bild) und einer zweidimensionalen Behandlung (rechtes Bild) wird rein anschaulich deutlich, daß lokal begrenzte Bereiche, deren Analyse für eine Voraussage von Hüllrohrschäden naturgemäß entscheidend sind, durch die Annahme a) sicher unvollständig beschrieben werden. Trotzdem wurde im Rahmen des integralen URANUS-Rechenprogramms vermieden, theoretische oder empirische Korrekturen in den Bereichen zu verwenden, wo die Annahmen a) oder b) in wesentlichem Umfang verletzt werden. Im allgemeinen ist es nach Meinung des Autors sinnvoller, derartige Probleme mit speziellen zweidimensionalen Methoden zu behandeln als über Korrekturen oder weitere Näherungen nachzudenken. Im oben angesprochenen PCMI-Fall steht diese Auffassung im Gegensatz zu Kjaer-Petersen [32] bzw. Verbeek und Hoppe [21], die spezielle Korrekturen in ihren Rechenprogrammen WAFER und COMETHE verwenden. Entgegenzuhalten ist vor allem, daß die genaue Berechnung der Tablettenkontur durch das Reißen der Tablette, durch Verformungen infolge Temperatur, Schwellen, Kriechen, Nachsintern etc. keineswegs eine einfache Aufgabe ist (Fabian, Laßmann [66], Anhang 6) und mit Unsicherheiten behaftet

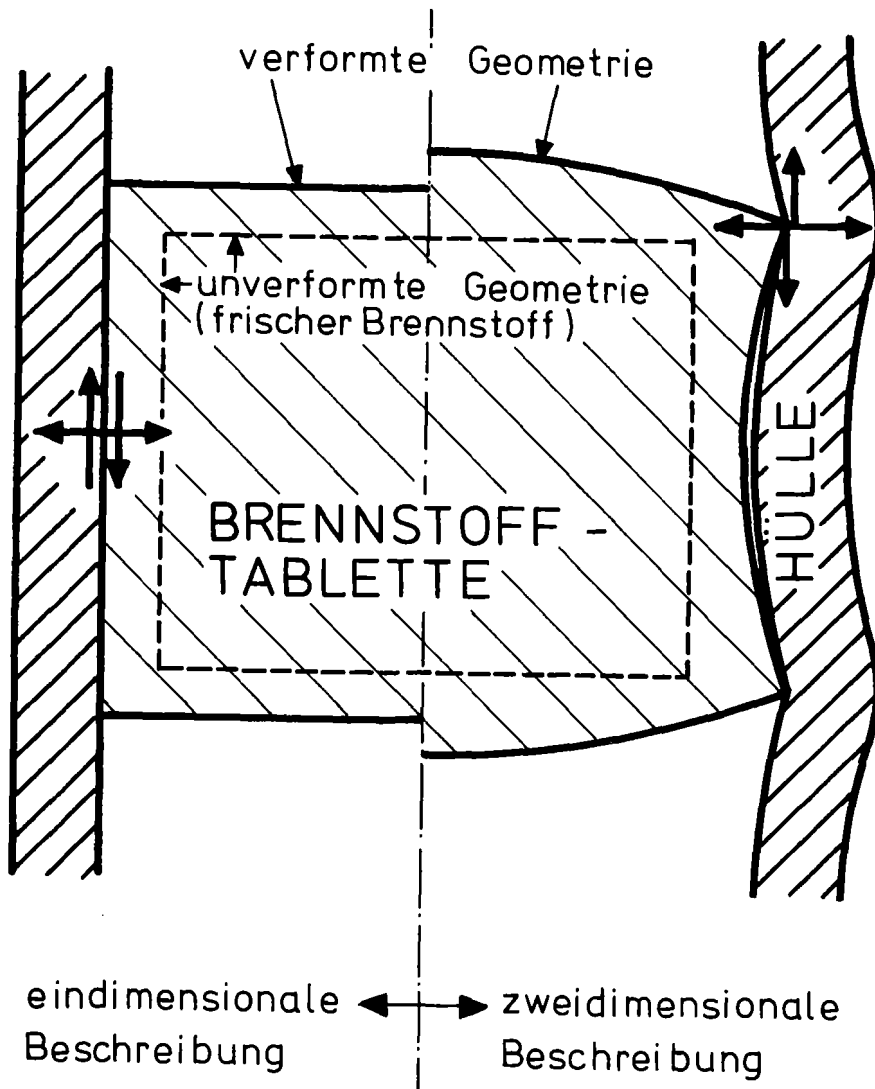


Abb. 8: Schematische Gegenüberstellung der Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff in einer eindimensionalen (linkes Bild) und einer zweidimensionalen (rechtes Bild) Beschreibung für den Brennstab eines Leichtwasserreaktors. Die unverformte Hüllrohrgeometrie ist nicht dargestellt.

ist, die in der gleichen Größenordnung wie der Geometrieeffekt infolge der Verwölbung liegen.

Zusammengefaßt läßt sich sagen, daß die lokale Analyse von PCI-Effekten - also aller mechanisch, thermisch und chemisch bedingten Effekte - nach Meinung des Autors speziellen Untersuchungen vorbehalten bleiben sollte. Im Rahmen von integralen Brennstab-Rechenprogrammen sind derartige lokale Analysen nur begrenzt durchführbar.

In den Gleichungen (4.1) und (4.2) wird die radiale mechanische Wechselwirkung über die Randbedingung

$$r_a^B + u_a^B = r_i^H + u_i^H \quad (4.3)$$

mit  $r$  = Referenzradius  
 $u$  = radiale Verschiebung  
 $B$  = Brennstoff  
 $H$  = Hülle  
 $a$  = außen  
 $i$  = innen

erfaßt, die in Form einer Verträglichkeitsbedingung ein Überschneiden von Hülle und Brennstoff ausschließt. Damit ist die mechanische Analyse wegen der axialen Wechselwirkung jedoch noch nicht abgeschlossen: relative Verschiebungen in axialer Richtung, die im kontaktfreien Fall auftreten können, werden im Kontaktfall ganz oder teilweise behindert. Dadurch treten Reibkräfte auf, die erfaßt werden müssen. Gleichzeitig hat eine axiale Dehnung in einem bestimmten Schnitt eine Rückwirkung

auf andere Schnitte zur Folge. Die Einzelberechnungen aller Schnitte müssen also miteinander in Einklang gebracht werden. Dies wird als axiale Kopplung bezeichnet und im folgenden Kapitel wegen des Umfangs für sich behandelt. Radiale Analyse (Gl. 4.1 und 4.2) und axiale Kopplung stellen somit das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme dar.

## 4.2 Axiale Kopplung

Im Rahmen der oben beschriebenen Diskussion zur Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wurde das mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme als radiale Analysen einzelner Schnitte identifiziert, wobei die Rechnungen einzelner Schnitte miteinander in Einklang gebracht werden müssen. Dies wurde als axiale Kopplung bezeichnet und soll nun näher diskutiert werden. Bevor jedoch die eigentliche axiale Kopplung von Kräften vorgenommen werden kann, müssen die Temperaturen und die Materialzusammensetzung im Brennstab bekannt sein. Deshalb werden zunächst die axiale Kopplung von Temperaturen und axiale Transportphänomene behandelt. Die Ergebnisse beider Untersuchungen werden dann bei der axialen Kopplung von Kräften berücksichtigt.

### 4.2.1 Axiale Kopplung der Temperaturen

Die axiale Kopplung der Temperaturen ist außerordentlich einfach und dient hier nur zur anschaulichen Darstellung. Analog zu den bisherigen Darstellungen kann die allgemeine Wärmeleitungsgleichung

$$c \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla \vartheta + q''' \quad (4.4)$$

mit  $c$  = spezifische Wärme  
 $\rho$  = Dichte  
 $\vartheta$  = Temperatur  
 $t$  = Zeit  
 $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit  
 $q'''$  = Leistungsdichte

durch die Annahme, daß der Wärmestrom in axialer Richtung gegenüber dem radialen Wärmestrom vernachlässigt werden kann (äquivalente Annahme zur bisherigen Annahme a) und daß wiederum Rotationssymmetrie vorliegt (Annahme b) in eindimensionaler Weise geschrieben werden:

$$c \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial R} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial R} \right) + q''' \quad (4.5)$$

Die Lösungsmöglichkeiten dieser Gl. 4.5 sollen hier nicht näher diskutiert werden, als Ergebnis erhält man im stationären Fall einen radialen Temperaturverlauf, der in Abb. 9a qualitativ dargestellt ist. Die Kühlmitteltemperatur  $\vartheta_k$  ist der Randwert der Lösung und gleichzeitig die Größe, über die die axiale Kopplung der Temperaturen stattfindet. Diese Kühlmitteltemperatur wird aus der Gleichung

$$\vartheta_k(Z) = \vartheta_k(Z=0) + \frac{1}{\dot{m}_k} \int_0^Z \frac{1}{c_k} q'(L) dL \quad (4.6)$$

mit  $\dot{m}_k$  = Kühlmittel-Massenstrom  
 $c_k$  = Spezifische Wärme des Kühlmittels  
 $q'$  = Stablängenleistung

berechnet (Abb. 9b). Die axiale Kopplung der Temperaturen stellt sich

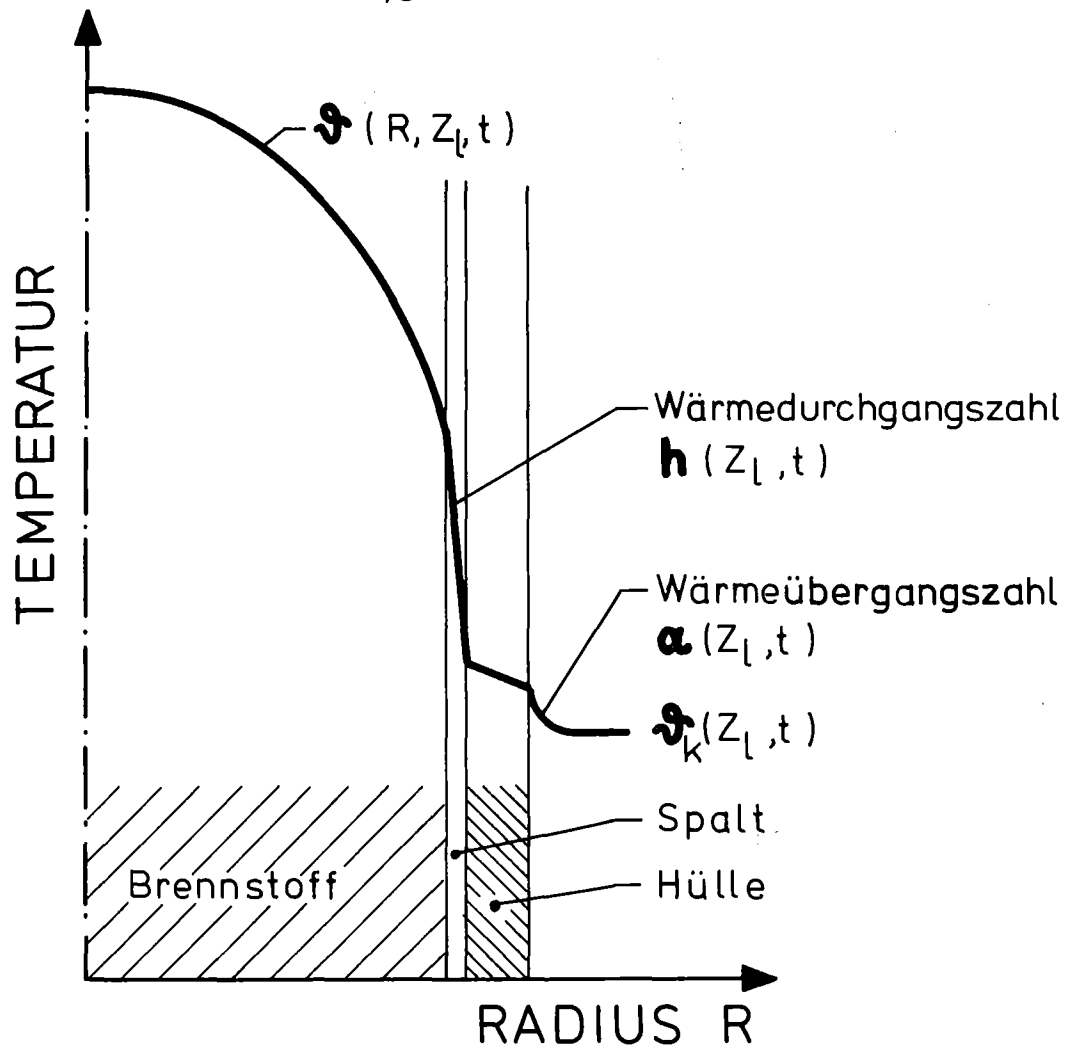


Abb. 9a: Qualitative Darstellung der radialen Temperaturverteilung im axialen Schnitt  $z_1$  zur Zeit  $t$ .

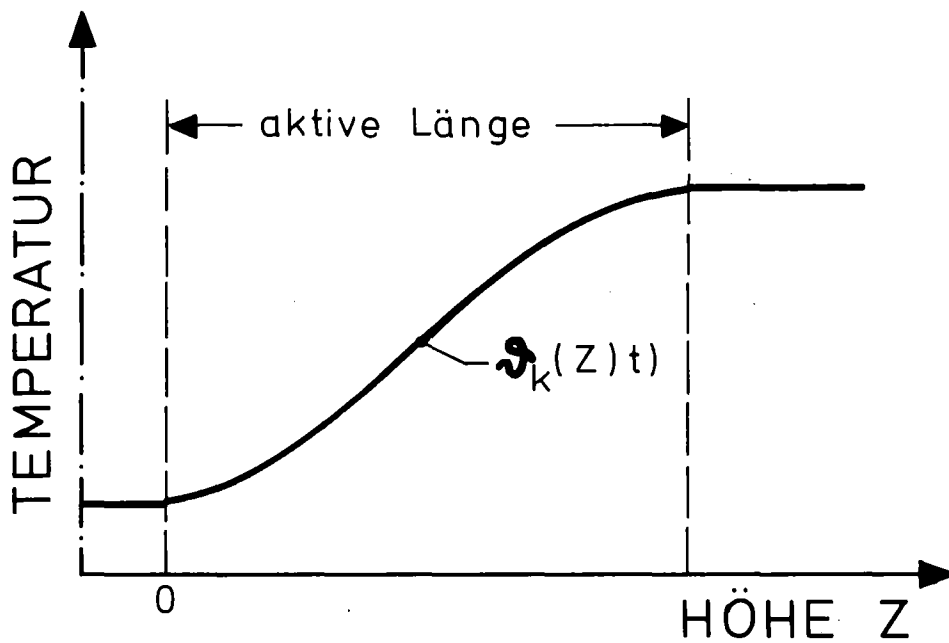


Abb. 9b: Qualitative Darstellung der Kühlmitteltemperatur als Funktion der Höhe  $Z$  zur Zeit  $t$

demnach als eine Überlagerung einer eindimensionalen Berechnung in radialer Richtung und einer eindimensionalen Berechnung in axialer Richtung dar. Diese Superposition wird nach der Def. 2 als quasi-zweidimensional bezeichnet.

Sämtliche integralen Rechenprogramme berücksichtigen diese Art der axialen Kopplung der Temperaturen, wobei gelegentlich auf die explizite Berechnung der Kühlmitteltemperatur und des Wärmeübergangs zur Hülle verzichtet wird, wie z. B. im FRUMP-Rechenprogramm [26], in dem die Hüllenrohraußentemperatur als Funktion der axialen Höhe und der Zeit vom Benutzer direkt vorgegeben werden muß.

#### 4.2.2 Axiale Transportphänomene

Während des Betriebs eines Kernreaktors entstehen durch die Spaltung in der Brennstoffmatrix gasförmige Spaltprodukte, die über Diffusionsmechanismen oder knock-out-Prozesse teilweise freigesetzt werden. Die Freisetzungsrates ist lokal unterschiedlich, so daß Vermischungseffekte, also axiale Transportphänomene, auftreten. Andere Transportphänomene sind bei Schmelzvorgängen zu erwarten.

In der überwiegenden Zahl aller integraler Brennstab-Rechenprogramme werden derzeit nur axiale Spaltgas-Transportphänomene berücksichtigt. Es wird angenommen, daß der Spaltgasdruck im gesamten Brennstab identisch ist:

$$p_i(t) = \frac{\left( \sum_j n_j^{fr}(t) + n^0 \right) \mathcal{R}}{\sum_j \frac{v_j}{T_j}} \quad (4.7)$$

mit  $P_i$  = Innendruck  
 $n_j^{fr}$  = Molmenge des freigesetzten Spaltgases im  
Teilvolumen j  
 $n^o$  = Gesamtmolmenge des Füllgases  
 $R$  = Gaskonstante  
 $V_j$  = Teilvolumen  
 $T_j$  = mittlere absolute Temperatur im Teilvolumen j

Weiterhin wird angenommen, daß die Gaszusammensetzung ortsunabhängig ist. In die Analyse des Brennstabverhaltens geht somit nur die Gesamtmolmenge des freigesetzten Spaltgases und ein konstantes Verhältnis der Spaltgase - im wesentlichen Krypton zu Xenon - ein. Somit stellen die beiden oben beschriebenen Annahmen einen vollständigen Ersatz für die eigentliche Beschreibung von Spaltgas-Transportphänomenen dar.

Bei schnell ablaufenden Störfällen, auf die im Kapitel 6 noch näher eingegangen wird, reicht diese Behandlung nach Gulden [67] im Fall eines LWR-Störfalls nicht mehr aus. Ausbeulvorgänge in der Hülle, Temperatur- bzw. Druckänderungen im oberen oder unteren Spaltgasplenum führen zu Strömungsvorgängen, die berücksichtigt werden müssen. Ob dies in Anbetracht der Unsicherheiten anderer Effekte wie z. B. Spaltgasfreisetzung während des Störfalls tatsächlich von Bedeutung ist, wird von Gulden nicht nachgewiesen.

Transportmechanismen von geschmolzenem Material werden vor allem im Hinblick auf Störfälle untersucht. Eine axiale Wanderung der Schmelze z. B. in benachbarte Zonen wird außer in einer sehr modellmäßigen Näherung im BEHAVE-Rechenprogramm [20] derzeit in



keinem anderen integralen Brennstab-Rechenprogramm berücksichtigt. Im Rahmen des FRUMP-Rechenprogramms ist jedoch eine Behandlung dieser Fragen für die nächste Zukunft vorgesehen [68]. Da als allgemeiner Trend zu beobachten ist, daß integrale Stab-rechenprogramme auch zur Störfallanalyse oder zu Risikoabschätzungen eingesetzt werden sollen, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten, daß die Berücksichtigung axialer Transportphänomene das wesentliche Thema dieser Programme für die Zukunft ist.

#### 4.2.3 Axiale Kopplung von Kräften

Die axiale Kopplung von Kräften, die der Forderung nach Gleichgewicht in axialer Richtung äquivalent ist, wird im Rahmen einiger integraler Brennstab-Rechenprogramme in ganz analoger Weise zur axialen Kopplung der Temperaturen durchgeführt. Allerdings liegen wesentlich kompliziertere Verhältnisse vor, außerdem wird diese Kopplung von Kräften nicht in allen integralen Brennstab-Rechenprogrammen vorgenommen. Die in den vorangegangenen Kapiteln behandelten Gebiete, axiale Kopplung der Temperaturen und axiale Transportphänomene, werden bei der axialen Kopplung der Kräfte indirekt über Geometrieänderungen (z. B. infolge Wärmedehnungen) und direkt über Randbedingungen berücksichtigt. Dies geschieht z. B. durch die Forderung, daß die radiale Spannung an einer freien Oberfläche gleich dem Innendruck sein muß.

Bedingt durch die Fahrweise des Reaktors oder durch die Versuchsdurchführung in einem Experiment kann in einem Schnitt sowohl

radialer Kontakt zwischen Hülle und Brennstoff als auch axialer Kontakt benachbarter Brennstoffscheiben vorhanden sein. Es sind jedoch auch andere Kombinationen denkbar, die in der Rechnung berücksichtigt bzw. ausgerechnet werden müssen. Die Abb. 10 zeigt einige Möglichkeiten:

z. B. Schnitt 2: kein radialer Kontakt, jedoch axialer Kontakt im Brennstoff

Schnitt 1-1: radialer Kontakt, jedoch kein axialer Kontakt im Brennstoff

Um axiales Gleichgewicht herzustellen, müssen axiale Reibkräfte berechnet werden, die im allgemeinen Fall aufgrund der geometrischen Verhältnisse (s. z. B. Abb. 10) in sehr komplexer Weise von der axialen Koordinate  $Z$  abhängen werden. Die Berechnungen basieren üblicherweise auf der Forderung, daß keine relativen Verschiebungen zwischen Hülle und Brennstoff auftreten, wenn die lokale Reibkraft  $F(Z)$  kleiner als die lokale Haftkraft  $H(Z)$  ist:

$$\Delta w^H(Z) = \Delta w^B(Z) \quad (4.7)$$

für  $F(Z) \leq H(Z)$

mit  $w$  = axiale Verschiebung

$F$  = lokale Reibkraft

$H$  = lokale Haftkraft

Die Gl. (4.7) ist - unter Verwendung der axialen Gleichgewichtsbilanz - letztlich die Bestimmungsgleichung zur Ermittlung der Reibkräfte  $F(Z)$ . Wie eine solche Berechnung im Detail aussieht, ist am Beispiel des URANUS-Modells zur Kopplung der axialen

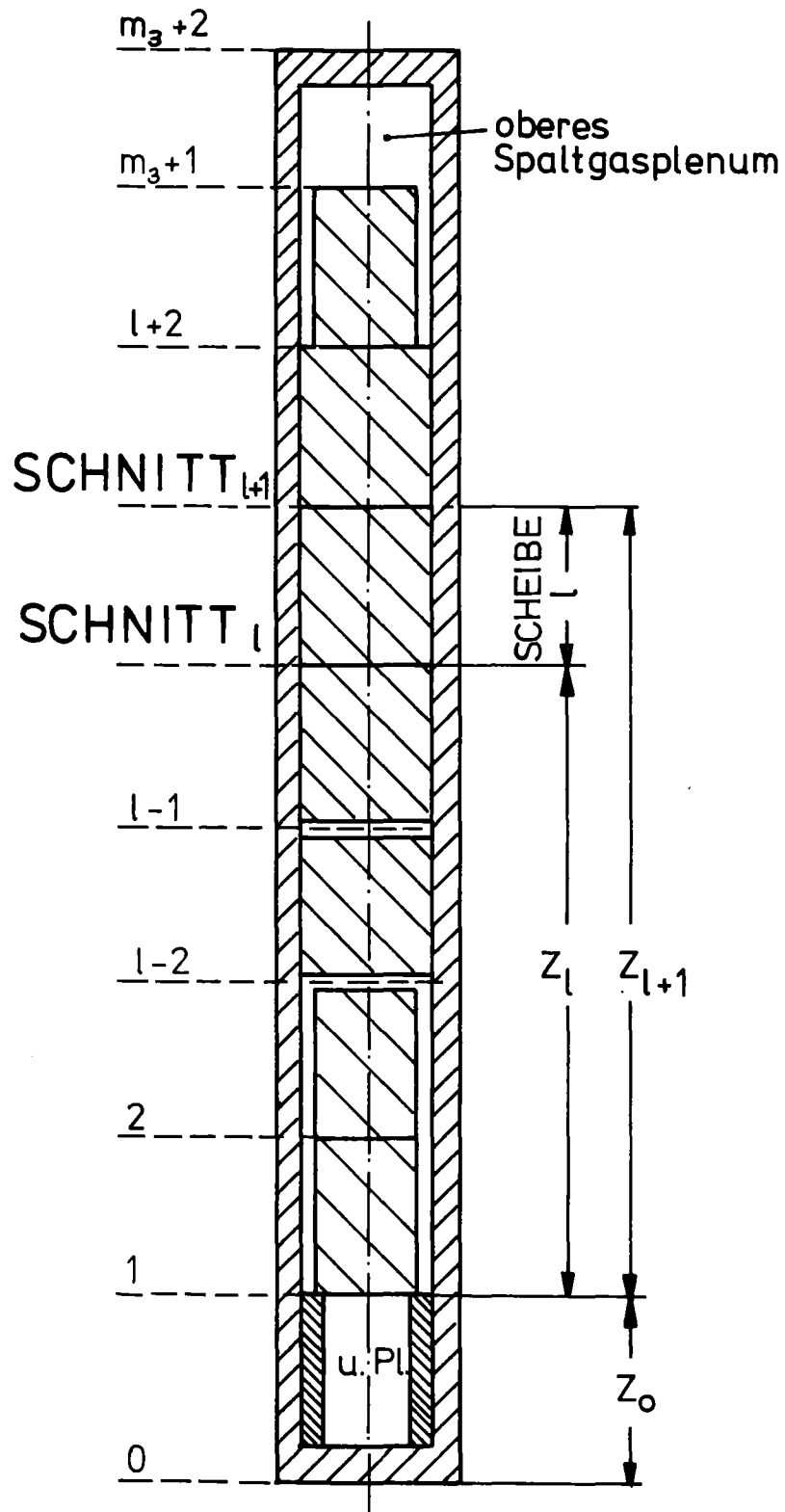


Abb. 10: Schematische Darstellung der Geometrie eines Brennstabs

Kräfte ausführlich in Laßmann, [69] beschrieben. Der Anhang 2 enthält diese Veröffentlichung. Ganz konsequent im Rahmen der Annahme a) werden hier Reibkräfte als Normalkräfte interpretiert. Diese Annahme wurde kritisch mit einer korrekten zweidimensionalen Behandlung mit Hilfe des Rechenprogramms FINEL von Fabian [4] überprüft, das auf einer Finit-Element-Methode basiert. Der Vergleich ist ausführlich im Abschnitt 3 des Anhangs 2 dargestellt.

Die axialen Reibkräfte  $\mathbf{F}$  selbst werden im URANUS-Modell aus einem linearen Gleichungssystem berechnet, das aufgrund des vorliegenden Problems wechselseitiger Einflüsse rekursiv - also rechenzeitsparend - aufgebaut werden kann. Die numerische Durchführung erfolgt in einem speziellen Unterprogrammssystem. Damit ist von vornherein die Möglichkeit gegeben, verschiedene mechanische Beschreibungen des Brennstabverhaltens mit diesem Modell der axialen Kopplung zu erfassen.<sup>1</sup>

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung [69] zum URANUS-Modell sind:

- Axiale Reibkräfte  $\mathbf{F}(Z)$  werden an den Einleitstellen der Kräfte nicht richtig wiedergegeben. Hier zeigen sich die Grenzen der Annahme, daß Reibkräfte als Normalkräfte behandelt werden und somit Verwölbungen nicht zugelassen werden.
- Die für die Brennstab-Strukturanalyse wichtige Größe der gesamten Axialkraft  $\mathbf{P}(Z)$ , die aus der Integration der lo-

---

1) Im Rahmen eines Kooperationsvorhabens mit dem argentinischen Kernforschungszentrum CNEA ist die Übernahme des URANUS-Modells in das argentinische Rechenprogramm PELT [70] geplant, dessen mechanische Konzeption der des FRUMP-Rechenprogramms [26] entspricht, und das sich derzeit in Entwicklung befindet.

kalen Reibkräfte  $F(z)$  resultiert, wird durch das URANUS-Modell in außerordentlich befriedigender Weise beschrieben.

Als allgemeines Fazit ergibt sich, daß der Einfluß der Reibkräfte auf die Brennstab-Mechanik nicht vernachlässigt werden darf. Integrale Brennstab-Rechenprogramme, in denen axiale Reibkräfte vernachlässigt werden, sind in ihrer mechanischen Beschreibung des Brennstabverhaltens deshalb als unvollständig anzusehen.

#### 4.2.4 Kritische Diskussion zur axialen Kopplung von Kräften

Zur Zeit des Entstehens der oben diskutierten Arbeit [69] in den Jahren 1974 bis 1975 konnte in einer kritischen Gegenüberstellung der damals vorhandenen Modelle gezeigt werden, daß eine Berechnung der Reibkräfte nur im BEHAVE- [20] und im IAMBUS-Rechenprogramm [27] vorgenommen wird. Die seinerzeit gemachten Einwände gegenüber dem IAMBUS-Modell sind auch heute noch gültig: bei der Berechnung der Reibkräfte und der daraus resultierenden Axialkraftverteilung wird in diesem Modell keinerlei wechselseitige Beeinflussung der axialen Verschiebungen berücksichtigt. Der Nachteil des BEHAVE-Modells besteht darin, daß infolge des speziellen Übertragungsverfahrens zur Lösung der mechanischen Grundgleichungen die Zahl der axialen Segmente aus rechentechnischen Gründen auf  $\leq 5$  beschränkt ist. Von den in neuerer Zeit entstandenen Rechenprogrammen ist im Hinblick auf die Berechnung der axialen Reibkräfte das FROST-Rechenprogramm [25] zu erwähnen, dessen Behandlung offensichtliche Ähnlichkeiten zum URANUS-Modell aufweist, dessen Details jedoch noch

nicht publiziert wurden. Zeitlich nach der Publikation des eigenen Modells zur Berechnung der axialen Reibkräfte hat Hoppe [71], der die Entwicklung des COMETHE-Rechenprogramms geleitet hat, die Notwendigkeit bestätigt, diese Kräfte in integralen Brennstab-Rechenprogrammen zu berücksichtigen. Allerdings war in der damaligen COMETHE-Version diese Möglichkeit nicht vorhanden. Inzwischen ist jedoch auf Grund der Analyse des URANUS-Modells ein Modell zur Behandlung der Reibkräfte im Rahmen der COMETHE-III-J-Version verwirklicht worden [72], das gegenüber dem eigenen URANUS-Modell folgende Erweiterung aufweist: eine axiale Wechselwirkung wird auch dann im COMETHE-Modell angenommen, wenn rein rechnerisch noch ein kleiner Spalt zwischen Hülle und Brennstoff vorhanden ist. Dieser Effekt einer Pellet-Blockage bei offenem Spalt soll die tatsächliche Pelletkontur (siehe Abb. 8, rechte Darstellung) berücksichtigen. Entsprechend den bisherigen Annahmen zum mechanischen Konzept des URANUS-Rechenprogramms wurde im eigenen Modell bisher, wie bereits erwähnt, von derartigen Korrekturen Abstand genommen.

Die eigentliche Berechnung der axialen Reibkräfte wird gelegentlich dadurch kompensiert, daß die Gl. (4.7) direkt als Randbedingung in die Behandlung der mechanischen Grundgleichungen eingeht. Ohne zunächst eine Wertung vornehmen zu wollen, soll diese Behandlung gegenüber der tatsächlichen Berechnung der axialen Reibkräfte als 'Ersatz-Lösung' bezeichnet werden. Hülle und Brennstoff werden in diesem Fall als ein einziges Kontinuum, allerdings mit unterschiedlichen Materialdaten, behandelt. Naturgemäß kann auf diesem Weg die Einschränkung der Gl. (4.7)  $F(z) \leq H(z)$  nicht überprüft werden. Aufgrund sehr vieler Rechnungen mit dem

URANUS-Modell konnte jedoch festgestellt werden, daß die Einschränkung der Gl. (4.7) praktisch immer erfüllt ist. Die gleiche Aussage erhält Hoppe aus seinen Untersuchungen [72]. Daraus darf allerdings nicht der Schluß gezogen werden, daß die 'Ersatz-Lösung' der tatsächlichen Berechnung stets äquivalent ist, wie die folgende Betrachtung im Fall eines nur bereichsweisen radialen Kontakts zwischen Hülle und Brennstoff zeigt (Abb. 11). Für die axiale Gleichgewichtsbilanz im betrachteten Schnitt  $i$ , der keinen radialen Kontakt aufweist, und damit für das gesamte Spannungsniveau in diesem Schnitt müssen die axialen Reibkräfte aus dem Kontaktbereich berücksichtigt werden. Die obige 'Ersatz-Lösung' gilt zwar lokal, auf die Berechnung der axialen Reibkräfte selbst kann jedoch streng genommen nur dann verzichtet werden, wenn radialer Kontakt über den gesamten Brennstoffbereich vorliegt.

Mit einem Beispiel aus praktischen Auslegungsrechnungen sollen die oben dargestellten Fragen verdeutlicht werden. Die spezielle Aufgabe war eine Störfallanalyse für den Brennstab der russischen LOVIISA-Anlage. Zu untersuchen waren die Hüllrohrspannungen nach einer Laständerung über die mittlere Betriebslast hinaus (positive Lastrampe). Da im vorliegenden Fall die 'Ersatz-Lösung' gilt, kann die Berechnung der Spannungen in einem Schnitt allein (Schnittberechnung) mit Ergebnissen einer vollständigen integralen Analyse verglichen werden. Einzelheiten sind in der Arbeit [73] (siehe Anhang 6) dargestellt. Die Abb. 12 zeigt, daß zwischen beiden Lösungen eine gute Übereinstimmung besteht. Für den Brennstab-Ausleger steht hinter diesen Vergleichen letztlich die Frage: "Kann die mechanisch detail-

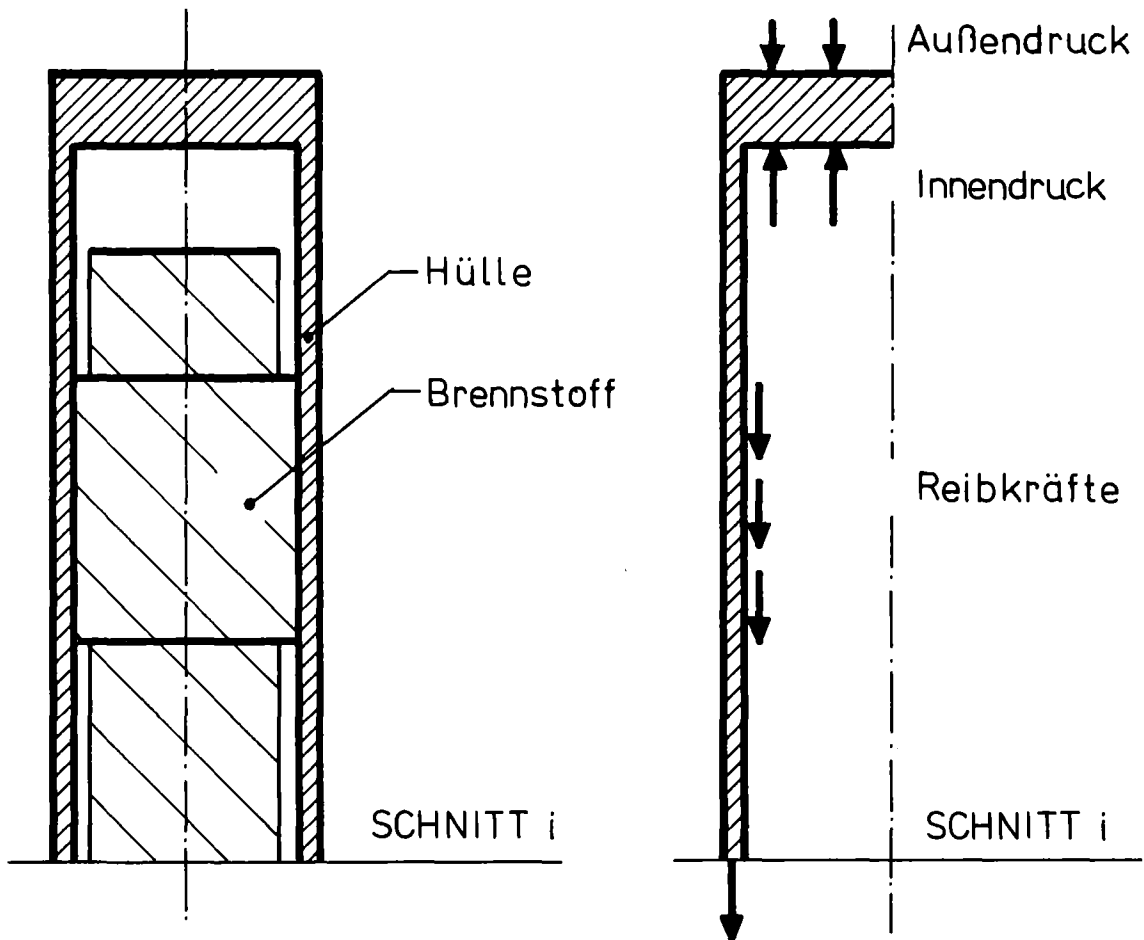


Abb. 11: Axiale Kräftebilanz im Schnitt i für eine spezielle Konfiguration



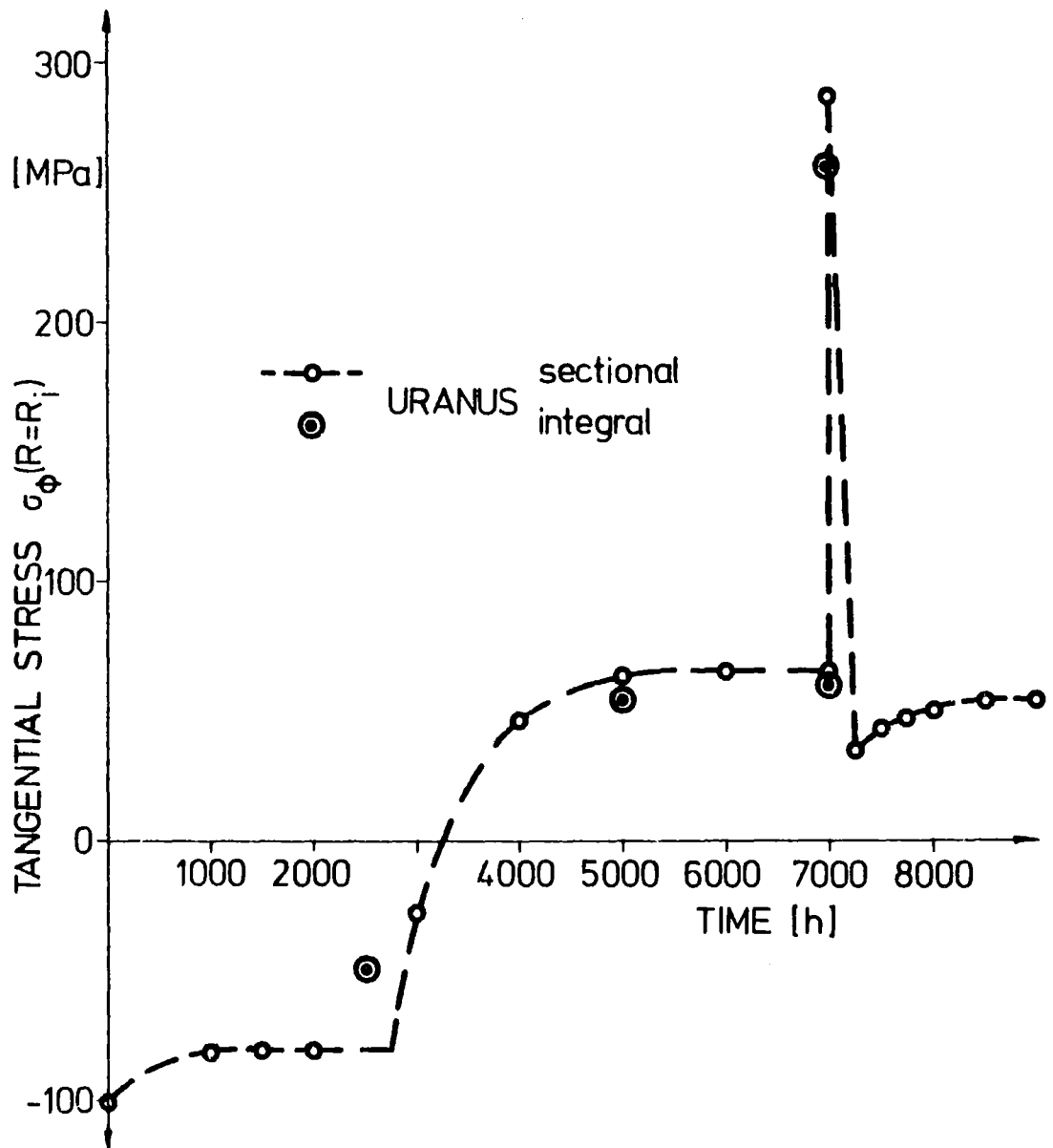


Abb. 12: Vergleich der tangentialen Spannung zwischen einer integralen Analyse und der Analyse eines einzelnen Schnitts (nach [73]).

lierte und damit sehr aufwendige Analyse ersatzweise im höchstbelasteten Schnitt allein vorgenommen werden?" Nach dem oben gesagten ist diese Frage jedoch nicht mit einem generellen ja zu beantworten.

#### 4.3 Das mechanische Konzept des URANUS-Rechenprogramms

Das bisher allgemein dargestellte mechanische Konzept integraler Brennstab-Rechenprogramme soll nun für den speziellen Fall des URANUS-Rechenprogramms im Detail beschrieben werden. Wie bereits im Kapitel 2.2 dargestellt, spielt die numerische Stabilität wegen der komplexen Wechselwirkung verschiedener Modelle in der Brennstab-Strukturanalyse eine wichtige Rolle. Der numerischen Sicherheit kommt daher neben der Genauigkeit der Modelle zum Werkstoffverhalten eine entscheidende Bedeutung zu. Aus diesen Gründen wurde im URANUS-Rechenprogramm eine semi-analytische Lösung der mechanischen Grundgleichungen gewählt, die zusätzlich zu den bisher schon diskutierten Annahmen a) und b) durch eine dritte Annahme c) möglich wird:

c) die Struktur (Hülle und Brennstoff) läßt sich bereichsweise durch isotrope, ortunabhängige elastische Konstanten beschreiben.

Da im Brennstoff Temperaturdifferenzen in der Größenordnung von  $1000^{\circ}\text{C}$  auftreten, wird der Brennstoff in mehrere Zonen eingeteilt, auf die jeweils die Annahme c) zutrifft. Diese Zonen werden als Grobzonen bezeichnet, ihre Anzahl ist variabel, so daß die räumliche Diskretisierung als variables Multizonenkonzept bezeichnet wird. Betrachtet man sich die semi-analytische Lösung der mechanischen Grundgleichungen näher, dann erkennt man, daß in Spezialfällen wie z. B. im thermoelastischen Fall eine exakte Lösung möglich ist. Im allgemeinen Fall enthält die Lösung numerisch auszuwertende Integrale, so daß Grobzonen weiter in Feinzonen diskretisiert werden müssen. Einzelheiten sind ausführ-

lich in [Laßmann, 31] dargestellt, diese Arbeit befindet sich im Anhang 3.

Es ist schwierig, die Vorteile dieses Verfahrens gegenüber anderen Verfahren quantitativ anzugeben. Im Vergleich zu Differenzenverfahren ist der numerische Aufwand sicher geringer und die Genauigkeit größer. Die günstigen Rechenzeiten bestätigen diese Aussage (Laßmann [84], s. Anhang 11).

Mit der oben diskutierten semi-analytischen Methode werden die Gl. (4.1) und (4.2) für alle Schnitte 1 eines Brennstabs gelöst. Diese Lösungen können wegen eventuell noch unbekannter Reibkräfte fehlerbehaftet sein, was mit Hilfe des schon erwähnten URANUS-Modells [69] zur axialen Kopplung überprüft wird. Ganz analog zur Berechnung der Temperaturen ist die gesamte mechanische Analyse im URANUS-Rechenprogramm somit eine Superposition der oben skizzierten eindimensionalen Rechnung in radialer Richtung und der ebenfalls eindimensionalen Lösungen aus dem URANUS-Modell zur axialen Kopplung. Diese Behandlung wird nach Def. 2 als quasi-zweidimensional ( $1\ 1/2$ -D) bezeichnet. Der Vorteil dieser quasi-zweidimensionalen Behandlung gegenüber einer reinen zweidimensionalen Behandlung liegt nicht nur in einer erheblichen Rechenzeitersparnis, sondern ermöglicht überhaupt erst eine integrale Behandlung des Brennstab-Verhaltens.

Der durch dieses quasi-zweidimensionale Modell vorgegebene prinzipielle Ablauf der Berechnungen bestimmt die Programmstruktur des URANUS-Rechenprogramms. Verglichen mit der Abb. 6, in der die prinzipielle Struktur eines Rechenprogrammsystems zur Brennstab-Strukturanalyse wiedergegeben ist, kommt zusätzlich eine Schleife über die axialen Schnitte 1 und ein Programmteil zur axialen

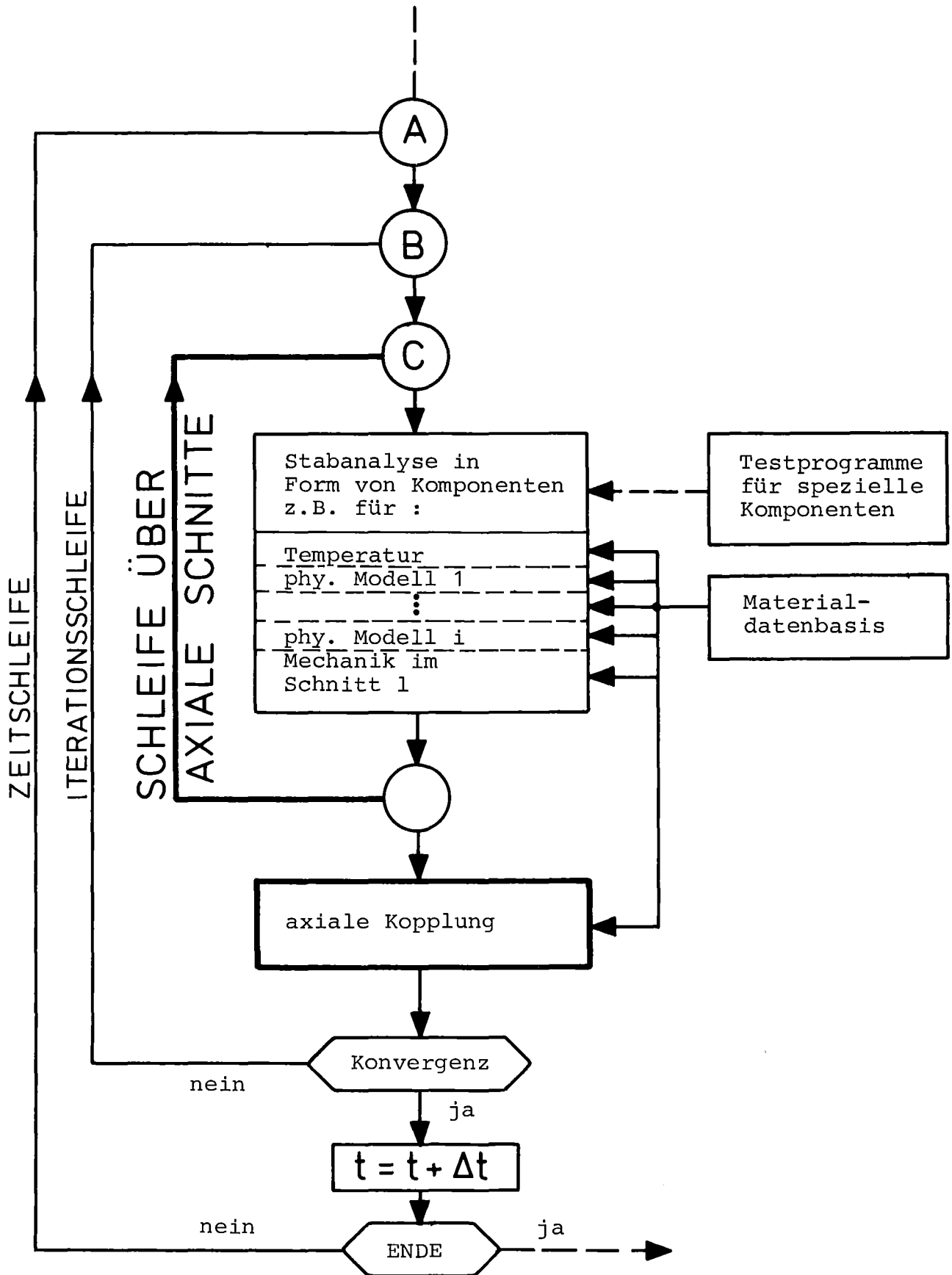


Abb. 13: Programmstruktur des URANUS-Systems  
( Ausschnitt aus Abb. 6 )

Kopplung hinzu (Abb. 13). Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, diese zusätzliche Schleife in die schon vorhandene Iterations-  
schleife zu legen. Wie schon allgemein dargestellt (s. Kap. 3.2) wurden Werkstoffdaten, physikalische und mechanische Modelle in speziellen Komponenten formuliert, die aus einem oder mehreren Unterprogrammen bestehen können. Insgesamt enthält das URANUS-Rechenprogramm ca. 80 Unterprogramme; es bildet zusammen mit verschiedenen Testprogrammen, dem Datenaufbereitungsprogramm und speziellen Auswerteprogrammen das URANUS-System. Aufgrund der klaren Programmstruktur und der dadurch erzielten Flexibilität konnten verschiedene Programmversionen entwickelt werden. Vorhanden ist eine LWR-Version, die ausführlich in [74, s. Anhang 4] beschrieben ist und eine SBR-Version, jeweils in verschiedenen Modifikationen. Neben der oben diskutierten modularen Programmstruktur weist das URANUS-System für die Materialdaten eine Art Schubladensystem auf. In einer speziellen Komponente sind jeweils mehrere Formeln aus verschiedenen Quellen oder für verschiedene Materialien enthalten. Z. B. ist die Komponente, in der die Wärmeleitfähigkeit berechnet wird, in Hüllmaterialien und Brennstoffmaterialien gegliedert. Für beide Materialien können bis zu 30 verschiedene Formeln in das Programm eingebracht werden, wobei in den einzelnen Materialdatensätzen die verschiedensten Abhängigkeiten von Temperatur, Abbrand, etc. berücksichtigt werden können. Auf diese Weise war es ohne Änderung der Grundstruktur möglich, eine URANUS-Karbid-Version zu entwickeln, die allerdings in ihrer Aussagekraft noch sehr niedrig zu werten ist, weil das Verhalten eines Karbidstabs derzeit noch nicht ausreichend verstanden wird (Laßmann [84], s. auch Anlage 11). Ebenfalls entwickelt wurde die URANUS-Statistik-Version, die im Kapitel 6 besprochen wird.

Abschließend sollen nun kurz die verschiedenen Pfade skizziert werden, die durch das URANUS-System führen. Die einfachsten Berechnungen stellen Berechnungen der Hülle allein dar, die im Fall eines Spalts zwischen Hülle und Brennstoff gerechtfertigt sind. Der Anstieg des Gasinnendrucks kann dann allerdings nicht berechnet werden, sondern muß vorgegeben sein. Mit derartigen Rechnungen wurde z. B. das bestrahlungsinduzierte Längenwachstum eines LWR-Brennstabs untersucht (Anhang 4, Fig. 14 bis 16). Analog dazu kann der Brennstoff für sich allein behandelt werden, was allerdings nur für Testzwecke sinnvoll ist. Als weitere Pfade können die schon im vorigen Kapitel (s. Abb. 12) angesprochene Analyse des einzelnen Schnitts und die integrale Analyse angesehen werden. Darüberhinaus können verschiedene Modelle in sehr unterschiedlichem Grad an Detailliertheit berücksichtigt werden.

Kurz gestreift werden soll noch die URANUS-Design-Version (s. auch Anhang 11). Analog zu anderen Rechenprogrammen (z. B. CARO [34], COMETHE [21]) wird in dieser Version auf die kriechmechanische Behandlung des Brennstoffs verzichtet. Um realistische Geometrien zu erhalten, werden zwar die Verschiebungen (Gl. 4.1) berechnet, die daraus resultierenden Spannungen bleiben jedoch unberücksichtigt. Als Resultat erzielt man eine außerordentlich hohe Rechengeschwindigkeit. Zwar können Rechenzeiten verschiedener Programme nicht direkt miteinander verglichen werden, allgemein kann man jedoch sagen, daß eine Analyse eines Schnitts für eine übliche Leistungsgeschichte auf einer Großrechenanlage im Minutenbereich liegt. Die URANUS-Design-Version ist nun in der Lage, eine vereinfachte integrale Analyse einer idealisier-

ten Lastgeschichte in ca. 10 ÷ 20 Sekunden durchzuführen. Hier zeigt sich, welche Entwicklung das eigene integrale Rechenprogramm URANUS erfahren hat. Es kann deshalb auch für ingenieurmäßige Routineuntersuchungen wie z. B. Detailoptimierung eingesetzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß systematische Untersuchungen zur Programmstruktur im Fall des URANUS-Systems zu hoher Flexibilität geführt haben. Damit steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem sowohl grundsätzliche als auch routinemäßige Untersuchungen möglich sind.



## 5. Materialdaten und physikalische Modelle

Die bisherigen Betrachtungen zur Klassifizierung der Aufgaben der Brennstab-Strukturanalyse und zum grundsätzlichen Aufbau von Rechenprogrammen haben gezeigt, daß Materialdaten und physikalische Modelle in speziellen Komponenten eines Rechenprogramms formuliert werden können und müssen (Kapitel 3.2). Dies gilt ohne jede Einschränkung hinsichtlich der numerischen Behandlung. Das lokale oder globale Materialverhalten sollte im Idealfall darüberhinaus auch von der Art der mechanischen Beschreibung unabhängig sein. Allerdings läßt sich diese im Grundsatz richtige Forderung in der Praxis nicht konsequent erfüllen. Wird z. B. der Brennstoff spannungsmäßig nur in einer sehr groben Näherung behandelt, dann können auch die Einflüsse von Spannungen auf das Werkstoffverhalten nicht richtig wiedergegeben werden. Dies rührt an einen Punkt, der im Rahmen der abschließenden Diskussion dieser Arbeit noch einmal in allgemeiner Form aufgegriffen werden wird: die Eichung der Parameter von Materialdaten und physikalischen Modellen ist unter Umständen an spezielle, vereinfachende Annahmen der theoretischen Beschreibung geknüpft. Die Eichung ist dann nicht mehr allgemein gültig.

In den Materialdaten und den physikalischen Modellen ist letztlich eine solche Fülle an experimentellen Ergebnissen des letzten Jahrzehnts enthalten, daß sie ein einzelner nicht mehr in ihrer Gesamtheit überblicken, werten und kritisch zusammenstellen kann. Dies muß speziellen Daten-Komitees vorbehalten bleiben, die umfangreiche Datensammlungen erarbeitet haben. Zu nennen sind z. B. die 'standards committees' der American Nuclear Society. Im Fall des LWR ragt das MATPRO-System [55] heraus, eine andere -

allerdings nicht so umfangreiche - Zusammenstellung der Materialdaten hat Gehr sowohl für den LWR als auch den SBR vorgenommen [75]. Eine kritische Zusammenstellung der physikalischen Modelle und der Materialdaten hat der Autor dieser Arbeit gemeinsam mit Moreno für die URANUS-LWR-Version vorgelegt [74, s. Anhang 4]. Ähnliche Arbeiten sind an vielen Stellen durchgeführt worden, deren Ergebnisse allerdings in den seltensten Fällen wegen industrieller oder sonstiger Restriktionen vollständig zugänglich sind.

Die im URANUS-System insgesamt in den verschiedensten Programmversionen enthaltenen Materialdaten und physikalischen Modelle sollen hier nicht einzeln dargestellt und kritisch diskutiert werden. Reine Materialdaten wie z. B. der E-Modul, die Wärmeleitfähigkeit, die thermische Dehnung etc. werden gar nicht behandelt, von den physikalischen Modellen zur Spaltgasfreisetzung, zum Nachverdichtungsverhalten, zum Wärmeübergang im Spalt oder zur Berechnung der gerissenen Brennstoffstruktur sollen nur die beiden letzten Punkte aufgegriffen werden, da die übrigen Modelle für das URANUS-System der Literatur entnommen wurden. Dies ist umso eher gerechtfertigt, als z. B. das MATPRO-System nicht nur sehr umfassende und kritische Literaturrecherchen, sondern bereits komplette FORTRAN-Unterprogramme enthält, die direkt übernommen werden können.

### 5.1 Wärmeübergang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff

Materialdaten und physikalische Modelle hängen zwar von sehr verschiedenen Parametern ab, der entscheidende Parameter ist jedoch in der Regel die Temperatur. Da das Wärmeleitungsproblem in ei-

nem Brennstab in den meisten Fällen eindimensional behandelt werden kann, ist die Berechnung der Temperaturverteilung einfach und zunächst so genau, wie Wärmeleitfähigkeiten gemessen werden können. Allerdings tritt im Bereich Hülle/Brennstoff wegen des schlechten Wärmeübergangs im Gas eine erhebliche Temperaturdifferenz auf, die mehrere hundert Grad betragen kann. Unsicherheiten in der Berechnung dieser Temperaturdifferenz beeinflussen also direkt das mittlere Temperaturniveau im Brennstoff und damit alle temperaturabhängigen Effekte. Die Spaltweite bzw. der Kontaktdruck zwischen Hülle und Brennstoff hängt nun wiederum über die thermischen Dehnungen im wesentlichen vom mittleren Temperaturniveau ab, so daß eine starke Kopplung zwischen der eigentlichen Temperaturberechnung im Spalt und der daraus resultierenden Verschiebung der Brennstofftablette resultiert. Numerisch gesehen muß die Berechnung iterativ und wegen der sehr empfindlichen Kopplung mit einer Relaxationsmethode erfolgen:

$$s^{(m+1)} = a s_{\text{berechnet}}^{(m+1)} + (1-a) s^{(m)} \quad (5.1)$$

$s$  = Spaltweite

$m$  = Iterationsschritt

$a$  = Relaxationsfaktor

Im Anhang 10 ist ein vom Verfasser neu entwickeltes Modell zum Wärmedurchgang im Detail beschrieben. Danach sind die wichtigsten Parameter dieses neuen Modells

- Spaltweite, bzw. Kontaktdruck
- Gasdruck und Gaszusammensetzung
- Oberflächenbeschaffenheit von Hülle und Brennstoff

- Wärmeleitfähigkeiten aller beteiligten Materialien.

Es bestätigt im wesentlichen das klassische Modell von Ross und Stoute [76] für den kontaktfreien Fall. Die Berechnung des Wärmedurchgangs im Kontaktfall erfolgt nach einer neuen Korrelation, die gegenüber dem bisherigen Ross-Stoute-Modell eine wesentliche Verbesserung darstellt. Das Modell wurde an verschiedenen Experimenten mit Erfolg überprüft und ist für eine Veröffentlichung vorgesehen. Die im Anhang 9 dargestellte Fassung und die angegebenen Parameter des Modells sind jedoch noch vorläufig, da die von Notley [77] in privaten Mitteilungen zur Verfügung gestellten in-pile Daten noch nicht ausgewertet werden konnten.

## 5.2 Plastizität und bruchmechanisches Modell

Im folgenden Kapitel soll das URANUS-Modell zur Behandlung der Plastizität und der gerissenen Struktur beschrieben werden. Es ist ausführlich in den eigenen Arbeiten [78] und [31] (s. Anhang 3, Kapitel 3 und 4) dargestellt und soll hier nur in seinen wesentlichen Grundzügen skizziert werden.

Sowohl aus rechentechnischen als auch aus theoretischen Gründen wurde für die Behandlung der Bruchmechanik ein Weg gewählt, der der Behandlung der Plastizität analog ist. Wie schon einfache Rechnungen zeigen, führen die thermischen Belastungen in einer Brennstofftablette zu plastischen Vorgängen. Allerdings reicht das Plastifizierungsvermögen des Brennstoffs nicht immer aus, so daß Risse entstehen. Dieses Verhalten wird durch Schliffbilder von Brennstofftabletten nach dem Einsatz bestätigt: es entstehen zahlreiche Bruchstücke, deren Größe stark variiert. Grund-

sätzliche Überlegungen hinsichtlich der Rechenkapazität und des vertretbaren Aufwands schließen jedoch aus, daß jedes einzelne Bruchstück - auch wenn dessen Form und Größe als bekannt vorausgesetzt würde - im Rahmen einer Brennstabanalyse berücksichtigt wird. Solche Detailuntersuchungen sind zwar sinnvoll, sie müssen jedoch eher als Studien für umfassendere Modelle angesehen werden. Detailuntersuchungen haben Guha et al. [79], Yu und Westmann [80] sowie Kramer [81] durchgeführt, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, daß die Aussagekraft derartiger Untersuchungen dadurch begrenzt ist, daß die Rand- oder Anschlußbedingungen für ein oder für mehrere Bruchstücke nur schwer formuliert werden können. Es gilt somit, ein physikalisch sinnvolles Modell zu entwickeln, das im Mittel gesehen die Plastizität und das Reißen der Tablette sowie die Wechselwirkung der Bruchstücke untereinander beschreiben kann. Darüberhinaus muß das Modell die im hohen Temperaturbereich unter Druckspannungen auftretende Rißausheilung berücksichtigen.

Diese Forderungen werden durch Einführung von fiktiven Rißdehnungen  $\{\epsilon^f\}$  erfüllt. Die gerissene Struktur wird also nach wie vor als Kontinuum behandelt. Für die fiktiven Rißdehnungen gelten folgende Zuordnungen:

$$\epsilon_l^f \geq \epsilon_{res}^f, \quad (5.2)$$

wenn ein Riß senkrecht zur Richtung  $l$  vorliegt. Die Größe  $\epsilon_{res}^f$  ist stets größer oder gleich Null und berücksichtigt, daß beim Schließen eines Risses die Oberflächengenauigkeit der Rißufer ein vollständiges Schließen des Risses verhindern.

Die eigentlichen Annahmen zur Fließ- und Bruchmechanik lassen sich in folgenden Iterationszielen formulieren:

Für den plastischen Bereich muß gelten, daß die Fließgrenze  $\sigma_{V,F}$  nicht überschritten werden darf, für einen gerissenen Bereich wird angenommen, daß die Spannung senkrecht zum Rißufer gleich einer mittleren Spannung  $\bar{\sigma}$  ist.

Es werden also folgende Forderungen aufgestellt:

$$\sigma_V = \sigma_{V,F} \quad (5.3)$$

und 
$$\sigma_l = \bar{\sigma} \quad , \quad \text{für } \epsilon_l^f > \epsilon_{res}^f \quad (5.4)$$

Die Gleichung (5.3) bezieht sich auf den plastifizierten Bereich, Gl. (5.4) gilt jeweils für die senkrecht auf einem vorhandenen Rißufer stehende Komponente.

Zur Steuerung des Iterationsablaufs wird eine Diagonalmatrix  $[i]$  eingeführt, die sich auf die Komponenten der plastischen Dehnung und der Rißbildung bezieht:

$$[i] = \begin{bmatrix} i^{pl} & & & \\ & i^f & & \\ & & i_1^{pl} & \\ & & & i_2^f \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Die Koeffizienten von  $[i]$  können die Werte Null und 1 annehmen. Die Festsetzung ihrer Werte ist ausführlich in [31, 78] beschrieben. Danach ist die Diagonalmatrix  $[i]$  von der Plastizitätsgeschichte und einer richtungsindividuellen Bruchgeschichte abhängig, sowie eine Funktion der aktuellen Belastung. Berücksichtigt wird eine Rißfortpflanzung ebenso wie eine mögliche Rißausheilung nach einem Schließen eines Risses.

Die Iterationsvorschrift zur Erfüllung der Iterationsziele - Gleichung (5.3) und (5.4) - kann damit allgemein in folgender Weise angegeben werden:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \boldsymbol{\epsilon}^{\text{pl}} \\ \Delta \boldsymbol{\epsilon}^{\text{f}} \end{Bmatrix}^{(m+1)} = \left[ \mathbf{i} \right]^{(m+1)} \{ \mathbf{S} \}^{(m)} \quad (5.6)$$

(m): Iterationsindex

Die Größe  $\{ \mathbf{S} \}$  stellt die eigentliche Schätzvorschrift für die betrachteten Dehnungszuwächse dar, während die Koeffizienten der Matrix  $\left[ \mathbf{i} \right]$  bestimmen, ob die Zuwächse  $\{ \Delta \boldsymbol{\epsilon} \}^{(m+1)}$  von Null verschieden sind. Die neuen Werte für die plastischen Dehnungen  $\{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{pl}} \}$  und die Reißdehnungen  $\{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{f}} \}$  erhält man nach

$$\{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{pl}} \}_{t+\Delta t}^{(m+1)} = \{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{pl}} \}_t + \sum_k \{ \Delta \boldsymbol{\epsilon}^{\text{pl}} \}_{t+\Delta t}^{(k)} \quad (5.7)$$

$$\{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{f}} \}^{(m+1)} = \{ \boldsymbol{\epsilon}^{\text{f}} \}^{(m)} + \{ \Delta \boldsymbol{\epsilon}^{\text{f}} \}^{(m+1)} \quad (5.8)$$

Die Iteration ist abgeschlossen, wenn die Gleichungen (5.3) und (5.4) im Rahmen vorzugebender Schranken erfüllt sind.

Wie im Anhang 3, Kapitel 4 gezeigt wird, konnte die Entstehung der Risse während eines An- bzw. Abfahrvorgangs nach dem oben beschriebenen Modell mit einem Experiment verglichen werden, in dem akustische Signale während der gleichen Vorgänge gemessen wurden. Die Übereinstimmung war sehr befriedigend. Allerdings muß das Modell an weiteren Experimenten geeicht werden, außerdem muß die Reißfortpflanzung noch näher untersucht werden.

Im folgenden sollen die eigentlichen Konsequenzen diskutiert werden, die aus dem Reißen der Brennstofftablette resultieren. Rein anschaulich ist leicht einzusehen, daß mit dem Reißen der Tablette eine Geometrieänderung verbunden sein muß: Gegenüber der thermoelastischen Tablettenkontur bedeuten Risse geometrische Änderungen, die in folgender Weise zu erklären sind: im rein thermoelastischen Fall werden die thermischen Dehnungen zum Teil durch elastische Dehnungen kompensiert, die beim Aufreißen wegfallen. Dies ist jedoch nicht der einzig mögliche Mechanismus für eine geometrische Änderung: werden zwei Rißufer einander näher gebracht, dann können Oberflächenrauigkeiten ein vollständiges Schließen der beiden Ufer verhindern. Diese Vorgänge im Zusammenhang mit der gerissenen Struktur werden als sogenannte 'relocation-Effekte' bezeichnet. Es ist allerdings anzumerken, daß im Rahmen des schon erwähnten Expertentreffens in Blackpool [9] keine klare Definition für 'relocation-Effekte' gefunden werden konnte. Für das eigene Modell ist allerdings eine Definition sehr leicht möglich:

DEF 7: Als 'relocation-Effekte' werden diejenigen Verschiebungen der Brennstofftabletten bezeichnet, die sich auf den Dehnungsterm  $\{\epsilon^f\}$  zurückführen lassen.

Eigene quantitative Untersuchungen haben die außerordentlich große Bedeutung dieses 'relocation-Effekts' auf die geometrische Form der Brennstofftablette gezeigt (s. z. B. Anhang 4, Fig. 11). Ohne eine modellmäßige Erfassung wären Modelle zum Wärmedurchgang im Spalt oder Modelle zur Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wertlos, da für beide Problemkreise die Geometrie der



Brennstofftablette naturgemäß von wesentlicher Bedeutung ist. An dieser Stelle zeigt sich die Problematik von Rechenprogrammen, die eine rein thermische Analyse ermöglichen (s. Abb. 5, Rechenprogramme GAPCON [1], CARO [34]). Ganz prinzipiell können sie keinen 'relocation-Effekt' tatsächlich berechnen, sie verwenden vielmehr empirische Korrelationen, die als Parameter den kalten Anfangsspalt aufweisen [34] oder zusätzlich vom Abbrand abhängen [1].

Das oben beschriebene Modell ist nicht an eine bestimmte mechanische Behandlung gebunden. Im Anhang 6 wird gezeigt, daß es mit Erfolg mit einer zweidimensionalen Beschreibung nach einer Finit-Element-Methode (Rechenprogramm FINEL [4]) gekoppelt werden konnte [66]. Die mit einer eindimensionalen Behandlung erzielten Ergebnisse zu 'relocation-Effekten' stimmen gut mit den zweidimensionalen Ergebnissen in der Tablettenmitte überein.

Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, daß das entwickelte Modell für die Beschreibung von 'relocation-Effekten' im Rahmen der Rechenprogramme URANUS und FINEL eingesetzt wurde. Der Vollständigkeit halber soll jedoch noch hinzugefügt werden, daß mit dem Modell prinzipiell auch bruchmechanische Untersuchungen in der Hülle vorgenommen werden können.

## 6. Analyse von Störfällen

In diesem Kapitel soll die Brennstab-Strukturanalyse für schnell ablaufende Störfälle skizziert werden, die in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt. Vom methodischen Vorgehen her gesehen ist diese Analyse des transienten Verhaltens zwar den quasi-stationären Untersuchungen sehr ähnlich, z. B. im Hinblick auf die Programmstruktur oder die mechanische Behandlung, vom Materialverhalten jedoch etwas prinzipiell Neues.

Bei üblichen Betriebsbedingungen ändern sich die Belastungen eines Brennstabs im Bereich von Stunden. Wie bereits im Kapitel 3.3 dargestellt, ist es in diesen Fällen noch zulässig, Werkstoffkennwerte in der Berechnung zu verwenden, die unter konstanten Lastbedingungen gewonnen wurden. Nach der Def. 4 verlangen Störfälle mit schnell ablaufenden Änderungen der Belastung im Sekundenbereich jedoch eine grundsätzlich andere Behandlung. Zu berücksichtigen sind Materialdaten für nicht konstante Lastbedingungen sowie eine instationäre Temperaturberechnung. Rechenprogramme, die diese Bedingungen erfüllen, wurden als transient bezeichnet.

Im Anhang 10, in dem die transiente Version des Rechenprogramms URANUS dargestellt ist [Laßmann, 87], werden Rechenprogramme in "steady-state" und "transiente" Rechenprogramme klassifiziert. Diese Klassifizierung muß bereits heute als überholt bezeichnet werden, obwohl sie etwa den Stand des Jahres 1977 repräsentiert. Letztlich spiegelt sich in dieser Tatsache ein Entwicklungstrend zur transienten Analyse: derzeit werden praktisch für alle Rechenprogramme transiente Versionen entwickelt, wobei diese Ent-

wicklung allerdings erst am Anfang steht. Sie wird für die nächsten Jahre zu den wesentlichen Aufgaben der Brennstab-Struktur-analyse gehören. Aus diesem Grund wäre es verfrüht, eine kritische Wertung der derzeit vorliegenden transienten Versionen von Rechenprogrammen vorzunehmen, zumal auf diesem Gebiet - verglichen mit der Fülle an Beschreibungen von "steady-state" Rechenprogrammen - relativ wenig publiziert wurde. Im folgenden sollen deshalb nur die grundsätzlichen Fragestellungen zum transienten Materialverhalten und zur instationären Temperaturberechnung anhand des URANUS-Rechenprogramms behandelt werden.

#### 6.1 Transientes Materialverhalten

Analysiert man die Fülle der experimentellen Ergebnisse zum Stabverhalten, dann muß man fast alle Ergebnisse zur Gruppe der Daten unter stationären bzw. quasi-stationären Bedingungen zuordnen. Erst in jüngster Zeit werden im Rahmen von LOCA-Bedingungen am LWR gezielte Experimente zu nicht konstanten Belastungen in größerem Umfang durchgeführt. Störfallexperimente für den Schnellen Brüter werden derzeit in großem Umfang geplant. Es gilt also, die Gesetzmäßigkeiten des Materialverhaltens unter Reaktorbedingungen erst herauszufinden. Dabei kann die Anwendung bisher gewonnener quasi-stationärer Daten auf rein transiente Bedingungen die Auslegung zwar erleichtern, quantitativ wird sie allerdings nicht von großer Hilfe sein.

Am Beispiel des Kriechens einer Zircaloy-Hülle unter LOCA-Bedingungen wird der Mangel an experimentellen und theoretischen Untersuchungen deutlich: die beiden in einer Literaturstudie für

transiente Belastung gefundenen Kriechgesetze von Brzoska et al. [88] sowie Clay [89] sind vom Typ her gesehen Kriechgesetzen unter stationären Bedingungen identisch. Die Laständerungsrate wird nicht berücksichtigt, beide Kriechformeln modifizieren also nur die Kriechparameter, um dem transienten Verhalten gerecht zu werden. Der Anwendungsbereich ist deshalb auf denjenigen Bereich der Laständerung beschränkt, der experimentell untersucht wurde.

Weit größere Schwierigkeiten, das transiente Materialverhalten zu beschreiben, ergeben sich für die physikalischen Modelle wie z. B. die Spaltgasfreisetzung oder die axialen Materialtransportphänomene während eines Schmelzvorgangs. Hier liegen heute sowohl methodisch als auch bezüglich der Kenntnis physikalischer Prozesse die Grenzen unseres Kenntnisstands. Es soll jedoch noch einmal betont werden, daß im Rahmen des URANUS-Rechenprogramms jeder beliebige Datensatz zum Materialverhalten einschließlich beliebiger Gesetzmäßigkeiten verarbeitet werden kann.

## 6.2 Instationäre Temperaturberechnung

Die Kenntnis der Temperaturen als Funktion von Ort und Zeit ist die grundsätzliche Voraussetzung einer Störfallanalyse, weil damit direkt Auslegungskriterien wie z. B. der Sicherheitsabstand zum Schmelzpunkt überprüft werden können. Die aufgrund von Temperatureffekten ablaufenden Ereignisketten sowie die Berechnung der gespeicherten Wärmeenergie müssen jedoch ebenfalls mit vorgegebenen Kriterien überprüft werden. Als Beispiel einer Ereigniskette soll die transiente Spaltgasfreisetzung genannt werden: eine Erhöhung der mittleren Brennstofftemperatur kann eine Zunahme der

Spaltgasfreisetzung bewirken, die den Wärmedurchgang im Spalt wegen schlechterer Gasleitung herabsetzt und somit zu einer weiteren Temperaturerhöhung führt. Aus der genauen Kenntnis von zeitlichen Temperaturänderungen kann erst im Vergleich zum zeitlichen Ablauf von Diffusionsprozessen oder sonstigen Freisetzungsmechanismen der gasförmigen Spaltprodukte auf die Spaltgasfreisetzung geschlossen werden. Eine andere Ereigniskette ist z. B. das Schmelzen des Brennstoffs mit Rückwirkungen auf die Geometrie und die örtliche Leistungsdichte.

Die Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung (Gl. 4.4, s. Kapitel 4.2.1) wird durch die radiale Abhängigkeit der Stoffdaten und der Leistungsdichte erschwert. Eine spezielle numerische Lösung ist in der schon zitierten Arbeit (Laßmann [87], Anhang 11, Kap. 3) beschrieben. Die räumlichen und zeitlichen Abhängigkeiten werden diskret behandelt, wie es durch den allgemeinen Rahmen der Brennstab-Strukturanalyse naheliegend ist. Das spezielle Verfahren ist also mit der sonstigen Behandlung konsistent. Die Ergebnisse können in folgender Weise zusammengefaßt werden:

- a) eine radiale Diskretisierung mit etwa 10 Punkten erfüllt bereits im Rahmen der Rechengenauigkeit die Forderung nach hoher räumlicher Diskretisierung (räumlich asymptotischer Fall);
- b) eine zeitliche Diskretisierung mit etwa 5 bis 15 äquidistanten Temperatursprüngen selbst bei großer Leistungsänderung erfüllt ebenfalls im Rahmen der Rechengenauigkeit die Forderung nach hoher zeitlicher Diskretisierung (zeitlich asymptotischer Fall);

- c) selbst Ungenauigkeiten, die durch wesentlich gröbere räumliche und zeitliche Diskretisierung entstehen, werden bereits durch geringfügige Unsicherheiten der Stoffdaten überdeckt.

Zu dieser Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung muß kritisch angemerkt werden, daß sie - verglichen mit den noch offenen Fragen zum transienten Materialverhalten - eher einen unbedeutenden Teil der gesamten Störfallanalyse darstellt. Aus diesem Grund sollen auch andere Lösungen nicht weiter diskutiert werden.

### 6.3 Statistischer Aspekt

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden die Unsicherheiten in der Beschreibung des transienten Materialverhaltens diskutiert, hier soll nun auf die Konsequenzen dieser Unsicherheiten eingegangen werden. Neben diesen Unsicherheiten ist zu berücksichtigen, daß der eigentliche Ablauf eines Störfalls hypothetischer Natur ist und keinesfalls strikt deterministisch prognostiziert werden kann. Die Ergebnisse deterministischer Störfall-Rechnungen müssen also sehr vorsichtig interpretiert werden, zumal kein sinnvolles Fehlerband angegeben werden kann (s. Kapitel 2.1). Im Zusammenhang mit Störfallanalysen ist folglich die Forderung nach ergänzenden statistischen Untersuchungen zu stellen. Dies wird in den eigenen Arbeiten [82, s. Anhang 7], [83] und Teilen der Arbeit [84, s. Anhang 11] näher ausgeführt. In einer allgemeineren Form kann die zu stellende Forderung folgendermaßen formuliert werden:

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

von Störfallanalysen."

Zunächst soll der im Rahmen der URANUS-Statistik-Version eingeschlagene Weg einer statistischen Behandlung begründet werden. Untersuchungen von sehr einfachen Geometrien bei sehr speziellen Bedingungen wie z. B. rein thermoelastischen Verformungen können sicher geschlossen gelöst werden. Für die gesamte Brennstab-Strukturanalyse, die die komplexe Wechselwirkung aller Modelle berücksichtigen muß, scheidet dieser Weg jedoch z. Zt. aus. Auf der anderen Seite haben Fortschritte in der numerischen Behandlung der vorliegenden Probleme im Laufe der URANUS-Entwicklung zu einer erheblichen Reduktion der Rechenzeiten geführt. Hierzu sollen zwei Zahlen genannt werden, die sich auf einen Großrechner vom Typ IBM 370/168 beziehen:

- a) die Analyse einer Hülle mit Verformungen bis zu 100 %, bei einer sehr komplizierten Lastgeschichte, benötigt etwa eine Sekunde (LOCA-Untersuchung, siehe weiter unten)
- b) die Rechenzeiten der URANUS-Design-Version betragen 6/100 Sekunden pro Schnitt und Zeitschritt. Danach wäre eine integrale Analyse für einen einfachen LWR-Datenfall in etwa 12 Sekunden möglich (Laßmann [84], s. Anhang 11, Abb. 9).

Diese Rechenzeiten ermöglichen statistische Untersuchungen auf der Basis der Monte-Carlo-Methode, die deshalb auch für die URANUS-Statistik-Version gewählt wurde. Die wesentlichen Vorteile dieser Methode bestehen darin, daß der grundsätzliche Aufbau des URANUS-Rechenprogramms beibehalten werden konnte und daß beliebige Dichteverteilungen von statistischen Größen berücksichtigt werden können. Allerdings sind die tatsächlich vorliegenden Verteilungen der statistischen Größen in den meisten Fällen unbekannt, zusätzlich

muß die Frage nach deren Unabhängigkeit gestellt werden. Statistische Untersuchungen mit großen Programmsystemen stehen deshalb erst am Anfang ihrer Entwicklung, verschiedene Arbeiten aus der neuesten Literatur bestätigen jedoch eindeutig den oben skizzierten Weg für eine statistische Analyse. Zu nennen sind hier die Arbeiten von Abramson et al. [85], Beck und Schmidt [86].<sup>+</sup>

Die hohe Rechengeschwindigkeit allein ist zwar eine notwendige, jedoch keineswegs eine hinreichende Bedingung für statistische Untersuchungen auf der Basis von Monte-Carlo-Methoden. Im Laufe der weiteren Entwicklung werden mit Sicherheit Änderungen im programmtechnischen Ablauf zu erwarten sein, sobald die Verknüpfungen der derzeit als unabhängig betrachteten statistischen Variablen näher untersucht werden. Es wird also auch sehr entscheidend auf die Flexibilität eines Rechenprogramms ankommen, die im URANUS-Rechenprogramm bereits in hohem Maße verwirklicht werden konnte.

Exemplarisch wurde die URANUS-Statistik-Version bisher zur Untersuchung des Hüllrohrverhaltens bei einem LWR-Kühlmittelverlust-Störfall eingesetzt (Laßmann [82], [83]). Als wichtigstes Ergebnis erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der bleibenden Dehnungen nach Ablauf des Störfalls (s. Anhang 7, Abb. 9 und 10).

In der Abb. 14, die einer eigenen Arbeit [15, s. Anhang 1] entnommen wurde, soll die Aussagefähigkeit statistischer Untersuchungen in einem weiteren Beispiel anschaulich dargestellt werden. Aufgetragen ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Standzeit eines isotherm belasteten Rohrs unter konstantem Innendruck ('ballooning test'). Zusätzlich ist das Ergebnis einer deterministischen Berechnung eingetragen, das mit dem Maximum der Wahrschein-

---

<sup>+</sup> s.a. Fußnote S. 17



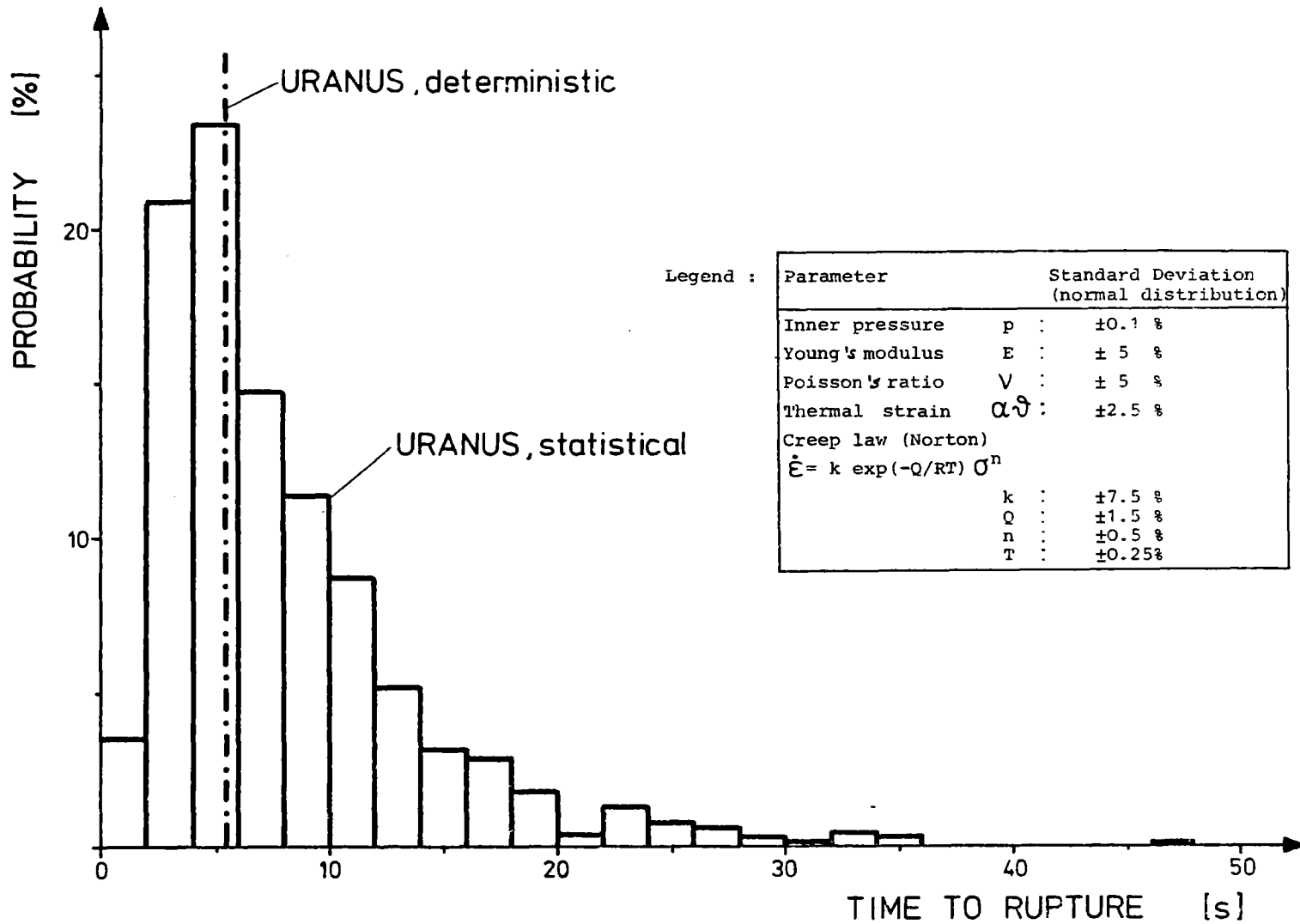


Abb. 14: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Standzeit eines Rohrrinnendruckversuchs (Laßmann [15], s. Anhang 1)

lichkeitsverteilung übereinstimmt. Während das Maximum dieser Verteilung bei etwa 25 % liegt, ist die Wahrscheinlichkeit für eine dreifache Standzeit immer noch 5 %. Nach dieser hypothetischen Untersuchung, bei der nur sehr niedrige Schwankungsbreiten der einzelnen statistischen Größen angenommen wurden, wären Standzeiten zwischen etwa 1 und 30 Sekunden im Experiment zu erwarten.

Beide Beispiele demonstrieren eindrucksvoll, daß die Aussagen einer deterministischen Rechnung im Vergleich zu einer statistischen Analyse begrenzt sind. Hier liegt der eigentliche Schlüssel für das Verständnis experimenteller Ergebnisse, auch wenn keineswegs alle Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment auf statistisch gegebene Schwankungen zurückgeführt werden dürfen. Aber die statistische Untersuchung bietet als einzige prinzipiell die Möglichkeit, experimentelle Streuungen vernünftig zu interpretieren. Im Fall der hier behandelten Störfallanalyse, die hypothetischer Natur ist, liefern überhaupt nur statistische Analysen brauchbare Aussagen. Dies ist auch der Grund dafür, daß der statistische Aspekt im Rahmen der Störfallanalyse behandelt wurde: auf diesem Gebiet ist ein Anstieg statistischer Untersuchungen unmittelbar zu erwarten. Aber auch in der allgemeinen Brennstab-Strukturanalyse wird der statistische Aspekt zunehmend an Bedeutung gewinnen.

## 7. Schlußbetrachtung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Grundlagen deterministischer Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse kritisch zusammengestellt. Die verschiedenen methodischen Ansätze sind Näherungen und einander komplementär. Neben diesen methodisch bedingten Näherungen spielt die Interpretation der experimentellen Ergebnisse eine wesentliche Rolle, weil die Zahl der anzupassenden Parameter in den Materialdaten und den physikalischen Modellen die Zahl der Meßgrößen wesentlich übersteigt, und weil die physikalischen Prozesse wegen starker Wechselwirkungen in der Regel nicht isoliert voneinander untersucht werden können. So ist z. B. die Vorhersage der Zentraltemperatur, die experimentell zugänglich ist, nur über eine Folge von Materialdaten und Modellen möglich: diese Folge umfaßt u. a. die Berechnung der Wärmeübergangszahl zum Kühlmittel, der Wärmeleitfähigkeit in Hülle und Brennstoff, des Wärmeübergangs im Spalt, der relocation-Effekte, der Nachsinter- und Schwelleffekte usw. Es ist unmittelbar einzusehen, daß die gleiche Zentraltemperatur auf sehr verschiedene Weise errechnet werden kann. Dies kann in allgemeiner Form dargestellt werden (s. auch Kapitel 5):

"Die Eichung der Parameter von Materialdaten und von physikalischen Modellen ist unter Umständen an spezielle vereinfachende Annahmen der theoretischen Beschreibung geknüpft. Die Eichung ist dann nicht allgemein gültig."

Es ist kritisch anzumerken, daß dies nur selten gesehen wird, und daß - in etwas anderer Weise ausgedrückt - klare und eindeutige Anwendungsvorschriften für physikalische Modelle in der Regel fehlen. Ein Beispiel zu einem Nachverdichtungsmodell soll

diese Aussagen deutlich machen. Als Meßgröße für die Eichung eines derartigen Modells steht z. B. die Längenänderung der Brennstoffsäule zur Verfügung. Ersetzt man nun die gesamte Leistungsgeschichte und die örtlich unterschiedlichen Leistungsdichten eines Experiments durch Mittelwerte, dann können sicher Parameter gefunden werden, die das Experiment beschreiben. Diese Auswertung des Experiments wäre eine integrale Auswertung, so daß dieses speziell geeichte Modell keineswegs differentiell, also jeweils auf einzelne Punkte eines Brennstabs angewendet werden dürfte. Analog dazu wäre fraglich, ob dieses spezielle Modell zur Interpretation der Nachverdichtung im Fall einer nicht konstanten Leistungsgeschichte herangezogen werden dürfte. Aus diesen Betrachtungen kann eine allgemeine Aussage gemacht werden:

"Die Darstellung eines physikalischen Modells ist ohne detaillierte Angaben zur verwendeten Datenbasis und zur übrigen theoretischen Beschreibung im streng wissenschaftlichen Sinn als unvollständig anzusehen."

Aus der kritischen Untersuchung zur Aussagekraft derartiger Methoden resultierte die Forderung, daß deterministische Analysen durch statistische Untersuchungen ergänzt werden sollten. Die eigenen Erfahrungen mit dem URANUS-Rechenprogramm haben gezeigt, daß heute diese statistischen Analysen auf der Basis der Monte-Carlo-Methode durchgeführt werden können. Der gegenüber deterministischen Methoden größere numerische Aufwand wird dadurch gerechtfertigt, daß nur auf diesem Weg Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment vernünftig interpretiert werden können. Für die Analyse von Störfällen werden statistische Untersuchungen für unumgänglich behalten.

Die thermisch/mechanischen Beschreibungen zum quasi-stationären Brennstabverhalten haben - einschließlich der Materialdaten und der physikalischen Modelle - einen Stand erreicht, der zur Interpretation der physikalischen Vorgänge und zur ingenieurmäßigen Auslegung ausreicht. Die noch offenen Fragen können in den meisten Fällen dem lokalen Bereich zugeordnet werden. So z. B. für lokale Wechselwirkungseffekte der gerissenen Brennstofftablette mit der Hülle unter Berücksichtigung chemischer Effekte. Die derzeit existierenden Rechenprogramme müssen zwar ständig anhand von Experimenten verifiziert und aktualisiert werden, sie haben jedoch eindeutig die prinzipielle Entwicklungsphase hinter sich gebracht. Es bietet sich demnach an, vergleichende Studien durchzuführen, zumal im Kapitel 3 gezeigt wurde, daß die prinzipielle Struktur dieser Rechenprogramme identisch ist und weder an die mechanische Methode noch an die Materialdaten oder die physikalischen Modelle zum Werkstoffverhalten geknüpft ist. Es sind deshalb nach Meinung des Autors weitere Vergleichsstudien von der Art des EPRI-Code-Vergleichs [54] anzustreben. Wegen der Größe der Aufgabe und der Schwierigkeit, allgemein zugängliche und bis ins letzte Detail dokumentierte Experimente zur Verfügung stellen zu können, sollten derartige Vergleiche durch internationale Behörden (also z. B. die IAEA) angeregt werden.

Vom methodischen Vorgehen her gesehen ist der erreichte Stand der theoretischen Beschreibung zur quasi-stationären Brennstab-Strukturanalyse auch für die Untersuchung fortgeschrittener Brennstabkonzepte (z. B. des Karbid-Brennstabs) ausreichend. Ganz eindeutig steht hier die Untersuchung noch unbekannter physikalischer Effekte oder des Materialverhaltens im Vordergrund. Wie die eigene

Entwicklung der URANUS-Karbid-Version zeigt, können neue Erkenntnisse zum Materialverhalten praktisch sofort in diese Version integriert werden.

Die Struktur-Analyse des transienten Verhaltens ist zwar vom methodischen Vorgehen her gesehen den quasi-stationären Untersuchungen sehr ähnlich (Programmstruktur, mechanische Behandlung), vom Materialverhalten jedoch etwas prinzipiell Neues. Wie am Beispiel der URANUS-Entwicklung gezeigt wurde, sind die theoretischen Probleme mehr oder weniger gelöst, das transiente Materialverhalten ist jedoch noch weitgehend unbekannt. Dies gilt zwar generell für Brennstäbe aller Reaktortypen, der Kenntnisstand selbst ist allerdings unterschiedlich. Z. Zt. werden praktisch für alle Rechenprogramme zur Brennstab-Strukturanalyse transiente Versionen entwickelt, wobei diese Entwicklung noch einige Jahre in Anspruch nehmen dürfte.

Das zukünftige Interesse wird sich jedoch nicht nur auf das Gebiet des transienten Verhaltens von Brennstäben konzentrieren, sondern sich mehr und mehr dem Aspekt der Wechselwirkung von Brennstäben bzw. Brennelementen zuwenden. Verbiegungen infolge von Temperaturgradienten oder Gradienten des Neutronenflusses, die zu lokal unterschiedlichen Schwellverformungen führen, haben Konsequenzen auf die Kühlkanalgeometrie, wodurch rückwirkend wiederum das Brennstabverhalten beeinflusst wird. Ziel derartiger Untersuchungen wird sein, das gesamte Brennelementverhalten abzusichern und zu optimieren. Auch diese - gegenüber dem eigentlichen Stabverhalten erweiterten - Fragestellungen werden vor allem im Zusammenhang mit Störfällen der Gesamtanlage, also z. B. beim Erdbeben oder beim Flugzeugabsturz, mehr und mehr aktuelles Interesse fin-

den. Die hohe Zahl von Brennstäben (ca. 60000 im Fall eines 1300 MWe-LWR's) und die Komplexität der Kernstruktur läßt jedoch eine detaillierte Anwendung der bislang behandelten Brennstab-Strukturanalyse im Rahmen dieser mehr globalen Fragestellungen als unwahrscheinlich erscheinen. Die für letztere zu entwickelnden Näherungen können jedoch nur aus umfangreichen Detailuntersuchungen des Brennstabverhaltens entwickelt werden. Neben den Beschreibungen des transienten Brennstabverhaltens wird folglich die Entwicklung dieser Näherungen und ihre sinnvolle Eingliederung in eine gesamte Core-Analyse die Hauptaufgabe der Brennstab-Strukturanalyse der nächsten Zukunft sein.

Die Brennstab-Strukturanalyse hat sich als einzig mögliches Instrument zum Verständnis der physikalischen Vorgänge im Brennstab über mehr als ein Jahrzehnt bewährt. Sie stellt das eigentliche Werkzeug dar, mit dem experimentelle Ergebnisse systematisch ausgewertet, gesammelt und interpretiert werden können. Ihre grundsätzliche methodische Entwicklung ist zwar im wesentlichen abgeschlossen, sie wird jedoch noch weiterhin verfeinert und ständig dem experimentellen Kenntnisstand angepaßt werden müssen.

## 8. Acknowledgement

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Dozent an der Technischen Hochschule Darmstadt. Sie wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Projekt Schneller Brüter des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KFK) durchgeführt. Den Herren Dr. Kummerer, Dr. Karsten und Dr. Mühling vom KFK möchte ich meinen Dank aussprechen. Herrn Prof. Dr. Smidt, Herrn Prof. Dr. Stegemann sowie Herrn Prof. Dr. Laue danke ich für die Übernahme der Korreferate. Herr Prof. Dr. Laue (KFK), der auch als Honorarprofessor an der Technischen Hochschule Darmstadt wirkt, hat die Arbeit über viele Jahre mit Interesse verfolgt und unterstützt. Ganz besonders herzlich möchte ich meinem akademischen Lehrer und Referenten dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr. Humbach, Leiter des Instituts für Reaktortechnik, danken. Ohne seine langjährige Unterstützung und außergewöhnliche Förderung hätte diese Arbeit nicht entstehen können.



## Nomenklatur und Abkürzungen

Größen, die vom Ort (R, Z) und der Zeit t abhängen können, werden durch fett gedruckte Buchstaben charakterisiert.

a	= Relaxationsfaktor
<b>A</b>	= Auslegungsgrößen (s. Gl. 3.1)
<b>B</b>	= Betriebsbedingungen (s. Gl. 3.1)
<b>C</b>	= spezifische Wärme
<b>[D]</b>	= inverse Elastizitätsmatrix
<b>F</b>	= lokale Reibkraft
<b>H</b>	= Wärmedurchgangszahl
<b>I</b>	= lokale Haftkraft
<b>[i]</b>	= Steuermatrix (s. Gl. 5.5)
<b>L</b>	= Lastgrößen (s. Gl. 3.1)
<b>M</b>	= Materialphänomene (s. Gl. 3.1)
<b>m</b>	= Massenstrom
<b>n</b>	= Molmenge
<b>p</b>	= Druck
<b>q</b>	= Stablängenleistung
<b>q'''</b>	= Leistungsdichte
r	= Referenzradius
R	= aktueller Radius
$\mathcal{R}$	= Gaskonstante
<b>s</b>	= Spaltweite
<b>S</b>	= Schadensgrenze (s. Gl. 3.1)
<b>{S}</b>	= Schätzvorschrift (s. Gl. 5.6)
t	= Zeit
$\Delta t$	= Zeitschritt
T	= absolute Temperatur
<b>u</b>	= radiale Verschiebung
<b>V</b>	= Volumen
<b>w</b>	= axiale Verschiebung
<b><math>\alpha</math></b>	= Wärmeübergangszahl
<b>{<math>\epsilon</math>}</b>	= Dehnung (s. Gl. 3.2)
<b><math>\vartheta</math></b>	= Temperatur

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit  
 $\rho$  = Dichte  
 $\{\sigma\}$  = Spannung

Indizes:

a = außen  
B = Brennstoff  
cr = Kriech- (s. Gl. 3.2)  
el = elastisch  
f = Riß- (s. Gl. 3.2)  
fr = freigesetzt  
F = Fließ- (s. Gl. 5.3)  
H = Hülle  
i = innen  
K = Kühlmittel  
m = Iterationsschritt  
pl = plastisch  
res = residual (s. Gl. 5.2)  
s = Schwell- (s. Gl. 3.2)  
sin = Sinter- (s. Gl. 3.2)  
th = thermisch  
v = Vergleichs- (s. Gl. 5.3)

Abkürzungen:

EPRI = Electric Power Research Institute  
FEM = Finit-Element-Methode  
HTR = Hochtemperatur-Reaktor  
IAEA = International Atomic Energy Agency  
LWR = Leichtwasser-Reaktor  
SBR = Schneller Brutreaktor  
SMIRT = International Conference on Structural Mechanics in  
Reactor Technology

Zusammenstellung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten  
Definitionen

---

DEF.1: Die Beschreibung des thermisch/mechanischen Brennstab-  
verhaltens wird Brennstab-Strukturanalyse genannt.

DEF.2: "Die Angabe der Dimension bezieht sich auf die thermi-  
sche oder die mechanische Analyse und gibt die Zahl der  
unabhängigen Variablen in der räumlichen Beschreibung  
an. Demnach existieren eindimensionale (1-D), zwei- und  
dreidimensionale (2-D, 3-D) Beschreibungen. Gebrochene  
Indizes deuten Superpositionen an: die Superposition  
von 2 eindimensionalen Lösungen in 2 verschiedene Koor-  
dinatenrichtungen wird als quasi-zweidimensional (1 1/2-D)  
bezeichnet."

DEF.3: "Analysen des gesamten Brennstabs werden integrale Ana-  
lysen genannt. Rechenprogramme, die diese Analysen er-  
möglichen, werden als integrale Brennstab-Rechenprogram-  
me (-Codes) bezeichnet."

DEF.4: Steady-state Rechenprogramme können ausschließlich quasi-  
stationäre Bedingungen berücksichtigen. Schnell ablaufen-  
de Änderungen der Belastung, wie sie vor allem in Stör-  
fällen auftreten, verlangen eine grundsätzlich andere Be-  
handlung. Zu berücksichtigen sind Materialdaten für nicht  
konstante Lastbedingungen sowie eine instationäre Tempera-

turberechnung. Als transiente Rechenprogramme gelten diejenigen, die diese Bedingungen erfüllen. Im Zusammenhang mit der Belastung oder mit dem Materialverhalten steht der Begriff transient synonym für instationär.

DEF.5: Die radiale und axiale mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wird als PCMI-Effekt (pellet-cladding-mechanical-interaction) bezeichnet.

DEF.6: Die gesamte Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff wird als PCI-Effekt (pellet-cladding-interaction) bezeichnet. Sie ist mechanisch, thermisch und chemisch bedingt.

DEF 7: Als 'relocation-Effekte' werden diejenigen Verschiebungen der Brennstofftabletten bezeichnet, die sich auf den Dehnungsterm  $\{\epsilon^f\}$  zurückführen lassen.

Literatur

- [1] BEYER C. E., HANN C. R., LANNING D. D., PANISKO F. E.,  
PARCHEN L. J., GAPCON-THERMAL-2:  
A computer program for calculating the thermal behavior of  
an oxide fuel rod, BNWL-1898, NRC 1 and 3 (1975)
- [2] HUMBACH W., LASSMANN K., Reaktortechnik IV,  
Technische Ausführung von Reaktoren, Vorlesung an der  
Technischen Hochschule Darmstadt
- [3] Brennstabmodelltheorie, Modelle und Materialdaten, zusam-  
mengestellt von H. Kämpf et al., Kernforschungszentrum  
Karlsruhe, KFK 1400 (1971)
- [4] FABIAN H., Mehrdimensionale Brennstabberechnung nach der  
Finit-Element-Methode, Darmstädter Dissertation, Kern-  
forschungszentrum Karlsruhe, KFK 2858 (1979)
- [5] First international conference on structural mechanics in  
reactor technology, SMIRT-1, Berlin (1971)
- [6] SMIRT-2, Berlin (1973)
- [7] SMIRT-3, London (1975)
- [8] SMIRT-4, San Francisco (1977)
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA), Specialist  
meeting on pellet cladding interaction for water reactors:  
experience, testing and evaluation, Atomic Energy review,  
Vol. 15, No. 4 (1977)
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA), Specialist  
meeting on fuel element performance computer modelling,  
Blackpool (1978), Atomic Energy review, im Druck
- [11] CUNDY M. R., VON DER HARDT P., LOELGEN R. H., (Editors),  
International colloquium on the measurement of irradiation  
enhanced creep in nuclear materials, Petten (1976), North-  
Holland Publishing Company, Amsterdam

- [12] Workshop on fission gas behavior in nuclear fuels, European Institute for Transuranium Elements (Okt. 78), Karlsruhe
- [13] WEEKS R. W., Structural analysis of reactor fuel elements, SMIRT-4, San Francisco (1977), ebenfalls: Nucl. Eng. Design, 46 (1978), 303 - 311
- [14] LASSMANN K., Some critical remarks on fuel rod structural analysis, post SMIRT-4 seminar on mathematical/mechanical modelling of fuel elements, San Francisco (1977)
- [15] LASSMANN K., A criticism on fuel rod structural analysis, Nucl. Technology, Vol. 40 (1978), 321-328
- [16] Druckwasserreaktor, Druckschrift der Kraftwerk Union, KWU 292 (1975)
- [17] Brennelemente von BBR, Druckschrift der Babcock-Brown Boveri Reaktor GmbH, BBR-V 5001 D
- [18] KATSURAGAWA M., KAJIYAMA T., YAMAGUCHI T. KIYONAGA Y., Analysis of mixed oxide fuel element irradiated in Saxton and GETR using the ACTIVE-II computer code, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 47, im Druck
- [19] KUCZERA B., Modelltheoretische Untersuchungen zum transienten Verhalten von natrium-gekühlten Schnellbrüter-Brennstäben unter Einbeziehung spezieller Abbrandeinflüsse, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 1964 (1974)
- [20] OLDBERG S. Jr., STUART R. G., Steady-state and transient fuel mechanics: the BEHAVE-3 Code, GEAP-14021 (1974)
- [21] VERBEEK P., HOPPE N., COMETHE III-J, A computer code for predicting mechanical and thermal behavior of a fuel pin, BN 7609-01 (1976)
- [22] NEWMAN J. B., GIOVENGO J. F., COMDEN L. P., The CYGRO-4 fuel rod analysis computer program, SMIRT-4, San Francisco (1977), D 1/1, ebenfalls: Nuc. Eng. Design 46 (1978), 1 - 15

- [25] WATANABE A., unveröffentlichte Ergebnisse
- [24] BERNA G. A., BOHN M. P., COLEMAN D. R., DEARIEN J. A., KERRIGAN J. D., SIEFKEN L. J., Deformation and failure analysis in the FRAP fuel rod codes, SMIRT-4, San Francisco (1977), D1/9
- [25] NUNO H., IRISA Y., TAKADA Y., MIZUTA M., MOCHIZUKI S., The FROST code for predicting fuel rod performance, Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 49, im Druck
- [26] HAYNS M. R., WILMORE D., FRUMP - A computer programme for the calculation of stresses in reactor fuel pins, AERE - R7380, 1973
- [27] WORDSWORTH J., IAMBUS-1: A digital computer code for the design, in-pile performance prediction and post-irradiation analysis of arbitrary fuel rods, Nucl. Eng. Design, 31 (1974), 309 - 336
- [28] BILLONE M. C., HARBOURNE B. L., JANKUS V. Z., POEPEL R. B., ROTH T. S., SHACK W. J., STEPHEN J. D., SUNDQUIST B., TARABA F. R., TURNER J. E., ZAWADZKI S., LIFE-III fuel-element performance code, ANL-77-56 (1977)
- [29] KÄMPF H., ELBEL H., DEPISCH F., Das Rechenprogramm SATURN-1a für Brennstäbe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 1575 (1972)
- [30] HOWL D. A., Modelling fuel failure mechanisms from the pellet clad interaction (PCI), IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 15, im Druck
- [31] LASSMANN K., URANUS - a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel rods in a nuclear reactor, Nucl. Eng. Design, 45 (1978), 325 - 342

- [32] KJAER-PEDERSEN N., WAFER-2, A code for thermal and mechanical fuel performance modelling, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 9, im Druck
- [33] LASSMANN K., Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modelling code evaluation project, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 17, im Druck
- [34] EBERLE R., WUNDERLICH F., DISTLER I., The KWU fuel rod code CARO, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 7, Veröffentlichung geplant
- [35] TOO J. J. M., FAXMOD - A computer code for predicting fuel sheath ballooning and high temperature creep behavior, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 33, im Druck
- [36] KINOSHITA M., ICHIKAWA M., Fuel rod deformation code FEMAXI-II and its application, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 8, im Druck
- [37] IWANO Y., MIPAC, Computer code MIPAC for fuel performance analysis by finite element method, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 6, im Druck
- [38] RASHID Y. R., NERMAN H., Application of SAFE-2D program to the analysis of fuel rod ramp tests, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 24 (1976), 170 - 171
- [39] TOO J. J. M., RIGBY G. L., TAMM H., Repeatable boundary conditions and their application in the analysis of a complete CANDU fuel pin, SMIRT-4, San Francisco (1977), D1/8
- [40] TOO J. J. M., private Mitteilung



- [41] McAREAVEY G., Thermal/hydraulic bowing stability analysis of grid-supported multi-pin bundles with differential swelling and irradiation creep, SMIRT-4, San Francisco (1977), D2/1
- [42] MIKI K., Three-dimensional analysis for fuel pin deformation in an LMFBR assembly, SMIRT-4, San Francisco (1977), D2/3
- [43] BUTTEMER D. R., Elastic fuel rod deflections and spacer reactions due to transverse temperature gradients, SMIRT-4, San Francisco (1977), D2/7
- [44] HALLEUX J. P., REYNEN J., Bowing and corresponding thermal stress phenomena in fuel pins during transients, SMIRT-4, San Francisco (1977), D4/2
- [45] SEGAL A. W. L., A model to relate hot and cold fuel element bow, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 40, im Druck
- [46] Panel Discussion Session, Fracture resistance of reactor components, SMIRT-4, San Francisco (1977)
- [47] MISFELD I., Reliability of nuclear fuel, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 4, im Druck
- [48] MATTILA L., SAIRANEN R., STENGARD J. O., Probabilistic models for fuel rod puncturing in an LWR core during a LOCA, Nucl. Eng. Design, 36 (1976), 239 - 250
- [49] CARAJILESCOV P., TODREAS N. E., Expansion of the method of correlated temperatures to clad and fuel design analysis, Nucl. Eng. Design, 30 (1974), 3 - 19
- [50] PONCELET J. P., PAY A., Statistical mechanical analysis of LMFBR fuel cladding tubes, SMIRT-4, San Francisco (1977), C4/2

- [51] PECK S. O., LOVEJOY W. S., A probabilistic design method for LMFBR fuel rods, SMIRT-4, San Francisco (1977), C4/9
- [52] KUMMERER K. R., ELBEL H., New developments in fuel pin modelling, ANS International conference, Washington D. C. (1976)
- [53] HOPPE N., persönliche Mitteilung
- [54] FREEBURN H. R., PATI S. R., FIERO I. B., Light water reactor fuel rod modelling code evaluation, EPRI NP-369 (1977)
- [55] MacDONALD P. E., THOMPSON L. B., Editors, MATPRO-VERSION 09, A handbook of material properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior, TREE-NUREG-1005 (Dec. 1976)
- [56] KUMMERER K. , Neuere Entwicklungen in der Brennelement-Modelltheorie, Manuskriptfassung eines Seminarvortrages am 24. 6. 1976 an der RWTH Aachen
- [57] GUYETTE M., CRASH: a computer programme for the analysis of creep and plasticity in fuel pin sheaths, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 1050 (1969)
- [58] VAN VLIET J., LEBON G., MATHIEU Ph., A COMETHE version with transient heat transfer capability, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 37, im Druck
- [59] RASHID Y. R., Mathematical modelling and analysis of fuel rods, Nucl. Eng. Design, 29 (1974), 22 - 32
- [60] BANERJEE S., BRIDGES H. J., TOO J. J. M., HSU T. R., A model for analysis of fuel behaviour in transients, Nucl. Eng. Design, 42 (1977), 319 - 355
- [61] BARD F. E., Modelling of LMFBR fuel cladding mechanical behavior under transient conditions, SMIRT-4, San Francisco (1977), C4/3

- [62] 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, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 2336 (1976)
- [63] STEINER H., Die Auswirkungen von Spaltgasblasen in der Bindung auf die Temperaturverteilung in Na-gebundenen Karbid-Brennstäben, Tagungsbericht der Reaktortagung 1978, Deutsches Atomforum e. V.; Kerntechnische Gesellschaft, 664 - 667
- [64] LASSMANN K., Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zylindrischen Brennstäben eines Kernreaktors, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 1853 (1973), Dissertation D17
- [65] MATTHEWS J. R., in: Contribution to advances in nuclear science and technology, Vol. 6, Academic Press, New York (1972), 65 - 104
- [66] FABIAN H., LASSMANN K., Untersuchungen zur Brennstofftablette unter Berücksichtigung der Zweidimensionalität, des Plastifizieren und Reißen, atw XXIII, Nr. 11 (1978), 519-522
- [67] GULDEN W. et al., Dokumentation SSYST-1, Ein Programmsystem zur Beschreibung des LWR-Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverluststörfällen, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 2496 (1977), S. 127 ff.
- [68] MATTHEWS J. R., private Mitteilung
- [69] LASSMANN K., Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in integralen Brennstabcodes, ATKE, Bd. 27 (1976), Lfg. 1, 41 - 45
- [70] HARRIAGUE S., MATTHEWS J. R., SAVINO E. J., unveröffentlichte Ergebnisse
- 71 HOPPE N., LASSMANN K., Briefwechsel 1976

- [72] HOPPE N., Improvements to COMETHE III-J fuel rod modelling code, Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 16, im Druck
- [73] LASSMANN K., KELPPE S., MATTILA L., Comparative evaluation of the steady state fuel rod thermal behavior code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS, VTT-Bericht 34 (April 1978), ISBN 951-38-0619-7
- [74] LASSMANN K., MORENO A., The light-water-reactor version of the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Bd. 30 (1977), Lfg. 3, 207 - 215
- [75] GEHR H. L., unveröffentlichte Ergebnisse
- [76] ROSS A. M., STOUTE R. L., Heat transfer coefficient between  $UO_2$  and Zircaloy-2, Chalk River, Ontario (1962), CRFD-1075
- [77] NOTLEY M. J. F., private Mitteilung (März/Mai 1978)
- [78] LASSMANN K., An iterative model for calculating the crack structure in fuel-rod design, SMIRT-4, San Francisco (1977), C1/3
- [79] GUHA R. M., HEAD J. L., MATTHEWS J. R., Analysis of crack patterns in fast reactor fuel pellets, SMIRT-4, San Francisco (1977), C2/7
- [80] YU J. C., WESTMANN R. A., Asymmetric fracture of fuel element pellets, SMIRT-4, San Francisco (1977), C2/6
- [81] KRAMER J., Modelling of fuel cracking in LMFBR fuel pins during accident transients, post-SMIRT-4 seminar on mathematical/mechanical modelling of fuel elements, San Francisco (1977)
- [82] LASSMANN K., The statistical version of the URANUS-programme, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 5, im Druck

- [83] LASSMANN K., Statistische Störfallanalyse mit dem Stab-rechenprogramm URANUS, Tagungsbericht der Reaktortagung 1978, Deutsches Atomforum e. V.; Kerntechnische Gesellschaft, 672 - 678
- [84] LASSMANN K., Stand und Entwicklung des integralen Stab-rechenprogramms URANUS, Beitrag zu KFK 2690 (1978), 7-37
- [85] ABRAMSON P. B. et al., Probabilistic accident analysis with deterministic codes using stochastically variable parameters, Nuc. Science and Eng., 66 (1978), 14 - 23
- [86] BECK W., SCHMIDT F., Statistische Analyse der Auswirkungen von ungenauen Daten auf Aussagen der Reaktorsicherheit, Tagungsbericht der Reaktortagung 1978, Deutsches Atomforum e. V.; Kerntechnische Gesellschaft, 367 - 370
- [87] LASSMANN K., Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS, atw, XXII, Nr. 7 (Okt. 1977), 521 - 524
- [88] BRZOSKA B., CHELIOTIS G., KUNICK A., SENSKI G., A new high temperature deformation model for zircaloy clad ballooning under hypothetical LOCA conditions, SMIRT-4, San Francisco (1977), C1/8
- [89] CLAY B. D., HEALEY T., REDDING G. B., The deformation and rupture of zircaloy-2 tubes during transient heating, OECD-Specialists' meeting on the behaviour of water reactor fuel elements under accident conditions, Nord-Torpa, Norway (1976)
- [90] HARRIAGUE S. et al., The BACO fuel rod analysis computer program, SMIRT-5, paper D 1/2, Berlin (1979)
- [91] WUNDERLICH F.; SENSKI G., Private Mitteilung
- [92] LANNING D.D.; PANISKO F.E.; MOHR C.L., GAPCON-THERMAL-3, Verification and comparison to in-reactor data, PNL-2434, Pacific Northwest Laboratory (1978)

## ANHANG 1:

LASSMANN K., A criticism on fuel rod structural analysis

Nucl. Technology, Vol. 40 (1978), 321-328

### Zusammenfassung

*The state-of-the-art in fuel rod structural analysis is discussed, and possible future developments in this field are outlined. The conclusion is drawn that the most important goal for future research is a deeper understanding of material behavior. It is suggested that a strategy of successive use of diverse models appropriate to the varying degrees of theoretical sophistication be followed in fuel rod structural analysis: Preliminary work should be an analysis of the integral fuel rod with one-dimensional models, followed by local two-dimensional analyses. Finally, the deterministic analyses should be augmented by probabilistic work. All these modeling approaches are inevitably complementary in exhaustive fuel rod analysis, but they are, despite the tremendous theoretical efforts, no substitute for fuel rod performance tests. Nevertheless, analytical modeling will remain an indispensable tool for a long time to come, since with this theoretical background, the interpretation of experimental results is facilitated, and a better insight into fuel rod behavior is provided.*

## ANHANG 2:

LASSMANN K., Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in integralen Brennstabcodes, ATKE, Bd. 27 (1976)  
Lfg. 1, 41 - 45

### Zusammenfassung

*Integrale Brennstabcodes, die detaillierte Beschreibungen der Brennstabmodelltheorie berücksichtigen, sind ausschließlich auf der Basis räumlich eindimensionaler mechanischer Beschreibungen aufgebaut. Axiale Reibkräfte zwischen Hülle und Brennstoff werden in diesen Rechenprogrammen teils vernachlässigt, teils in stark vereinfachter Form behandelt. In dieser Arbeit wird eine Methode dargestellt, die gegenüber bisherigen Modellen eine bessere Behandlung der axialen Reibkräfte in derartigen Codes ermöglicht. Die Genauigkeit der Methode wird durch Vergleichsrechnungen mit einer räumlich zweidimensionalen Finit-Element-Methode untersucht. Die Übereinstimmung ist sehr gut. Für die numerische Auswertung wird nur wenig Rechenzeit benötigt. Bei der Anwendung dieser Methode auf einen realen Brennstab zeigt sich, daß der Einfluß der Reibkräfte auf die Brennstabmechanik nicht vernachlässigt werden darf. Integrale Brennstabcodes, in denen axiale Reibkräfte vernachlässigt werden, sind damit in ihrer mechanischen Beschreibung des Brennstabverhaltens als unvollständig anzusehen.*

### Abstract

**A method for the calculation of axial friction forces in integral fuel rod performance computer codes**

All integral fuel rod performance computer codes which take detailed fuel rod modelling into account are based on one-dimensional mechanical descriptions. Axial friction forces between cladding and fuel are neglected in most codes and are considered only in few codes in a very simplified manner. In this paper a method is described which gives—compared with other models—a much better calculation of the friction forces in fuel rod performance computer codes. The accuracy of the method is compared with a spatial two-dimensional theory of Fabian. The agreement is very good. For numerical evaluation only very little computational time is needed. The application of the method to a real fuel rod shows that the influence of these friction forces on fuel rod mechanics is large. Integral fuel rod performance computer codes which do not take these forces into account therefore are incomplete from the view of the mechanical description.

## ANHANG 3:

LASSMANN K., URANUS - a computer programme for the thermal and mechanical analysis of the fuel rods in a nuclear reactor, Nucl. Eng. Design, 45 (1978), 325 - 342

### Zusammenfassung

The URANUS code, a digital computer programme for the thermal and mechanical analysis of integral fuel rods, is described. With this code the fuel rods found in the majority of power reactors can be analyzed. URANUS is built around a quasi two-dimensional analysis of fuel and cladding. The mechanical analysis can accommodate seven components of strain: elastic, time-independent plastic, creep and thermal strains, as well as strains due to swelling, cracking and densification. The heat generation and temperature distribution, cladding/fuel gap closure, pellet cracking and crack healing, fission-gas release, corrosion, O/M-distribution and plutonium redistribution are modelled. Geometric non-linearities (large displacements) are included; steady state or transient loading (pressure, temperature) is possible. In this paper special attention is paid to a theory for determining crack structures. The present status of the URANUS computer programme and a critical comparison with other fuel rod codes as well as sample analyses are given.



## ANHANG 4:

LASSMANN K., MORENO A., The light-water-reactor version of the URANUS integral fuel-rod code, ATKE, Bd. 30 (1977), Lfg. 3, 207 - 215

### **Abstract**

*The LWR version of the URANUS code, a digital computer programme for the thermal and mechanical analysis of fuel rods, is presented. Material properties are discussed and their effect on integral fuel rod behaviour elaborated via URANUS results for some carefully selected reference experiments. The numerical results do not represent post-irradiation analyses of in-pile experiments, they illustrate rather typical and diverse URANUS capabilities. The performance test shows that URANUS is reliable and efficient, thus the code is a most valuable tool in fuel rod analysis work.*

*K. Laßmann developed the LWR version of the URANUS code, material properties were reviewed and supplied by A. Moreno.*

### **Zusammenfassung**

#### **Die Leichtwasser-Reaktor-Version des integralen Brennstabcodes URANUS**

Es wird die LWR-Version des Rechenprogramms URANUS zur thermischen und mechanischen Analyse von Brennstäben beschrieben. Die Materialdaten werden diskutiert und auf verschiedene Rechenbeispiele angewandt. Dabei stellen die Ergebnisse keine Nachrechnung spezieller Experimente dar, sondern sind reine Testbeispiele. Die durchgeführten Rechnungen zeigen, daß der URANUS-Code in seiner LWR-Version schnell und zuverlässig arbeitet und somit ein wertvolles Werkzeug für die thermische und mechanische Brennstabanalyse darstellt. Die Entwicklung der LWR-Version des Rechenprogramms URANUS wurde von K. Laßmann durchgeführt, A. Moreno stellte die Materialdaten kritisch zusammen.

## ANHANG 5:

LASSMANN K., Wärmedurchgang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff eines Brennstabs

Wärme- und Stoffübertragung, 12 (1979), 185-202

### Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficient in a Reactor Fuel Element

Abstract. Models describing the fuel-to-cladding heat transfer coefficient in a reactor fuel element are reviewed critically. A new model is developed with contributions from solid, fluid and radiation heat transfer components. It provides a consistent description of the transition from an open gap to the contact case. Model parameters are easily available and highly independent of different combinations of material surfaces. There are no restrictions for fast transients. The model parameters are fitted to 388 data points under reactor conditions. For model verification another 274 data points of steel-steel and aluminium-aluminium interfaces, respectively, were used. The fluid component takes into account peak-to-peak surface roughnesses and, approximately, also the wavelengths of surface roughnesses. For minor surface roughnesses normally prevailing in reactor fuel elements the model asymptotically yields Ross' and Stoute's model for the open gap, which is thus confirmed. Experimental contact data can be interpreted in very different ways. The new model differs greatly from Ross' and Stoute's contact term and results in better correlation coefficients. The numerical algorithm provides an adequate representation for calculating the fuel-to-cladding heat transfer coefficient in large fuel element structural analysis computer systems.

Zusammenfassung. Modelle zum Wärmedurchgang im Bereich zwischen Hülle und Brennstoff eines Brennstabs werden kritisch untersucht. Es wird ein neues Modell entwickelt, das aus einem Spaltanteil  $h^g$ , einem Strahlungsanteil  $h^r$  und einem Kontaktterm  $h^k$  besteht. Dieses Modell beschreibt den Übergang vom offenen Spalt zum Kontaktfall in sich konsistent, es enthält nur leicht zugängliche Stoff- und Geometrieparameter, es weist eine sehr weitgehende Unabhängigkeit von verschiedenen Werkstoffpaarungen auf, und es enthält keine Einschränkungen im Hinblick auf die Anwendung von schnell ablaufenden Störfällen. Das Modell wird an 388 Meßpunkten unter Reaktorbedingungen geeicht. Für Voruntersuchungen wurden weitere 274 Meßpunkte an St-St- bzw. Al-Al-Paarungen verwendet. Im Spaltenanteil  $h^g$  werden sowohl Einflüsse von Rauigkeitsspitzen als auch von Welligkeiten näherungsweise berücksichtigt. Für geringe Einflüsse von Rauigkeiten, wie sie beim Brennstab vorliegen, gehen die entwickelten Gleichungen in das klassische Modell für den Wärmedurchgang im offenen Spalt von Ross und Stoute über, das somit bestätigt wird. Im Kontaktfall kann das vorliegende experimentelle Material auf sehr verschiedene Weise interpretiert werden. Eine neu entwickelte Korrelation unterscheidet sich wesentlich vom Kontaktterm  $h^k$  wie er im Ross und Stoute-Modell verwendet wird und führt zu besseren Korrelationskoeffizienten. Der gesamte entwickelte Formelapparat zur Berechnung des Wärmedurchgangs eignet sich speziell für den Einsatz im Rahmen von integralen Brennstab-Rechenprogrammen.

ANHANG 6:

FABIAN H., LASSMANN K., Untersuchungen zur Brennstofftablette unter Berücksichtigung der Zweidimensionalität, des Plastifizierens und des Reißens, atw XXIII, Nr. 11 (Nov. 1978), 519-522

ANHANG 7:

LASSMANN K., The statistical version of the URANUS-programme, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 5, Nucl. Eng. Design, im Druck

Zusammenfassung

A limited aspect of a probabilistic fuel-rod analysis is given which should extend the present limitations of fuel-rod analyses, mainly in the case of accident analyses.

## ANHANG 8:

LASSMANN K., Preliminary comparison of URANUS-code results with results from EPRI modelling code evaluation project, IAEA Specialists' meeting on fuel element performance computer modelling, Blackpool U. K. (1978), paper 17, Nucl. Eng. Design, im Druck

### Zusammenfassung

In this paper preliminary results of the URANUS-code are compared with the results of the EPRI code evaluation project on the basis of some selected data cases. The necessary URANUS input requirements were not adequately fulfilled by EPRI's general code input. Further information is mainly needed for densification. Consequently, the results are preliminary ones. Nevertheless, URANUS results showed a satisfactory agreement with other code predictions and with experimental data. The fact that all results are consistent has to be stressed. No numerical stability problems occurred and the computer costs turned out to be very reasonable, still a potential for further reduction of computer costs exists. Thus, this first benchmarking of the URANUS code showed satisfactory results.

## ANHANG 9:

LASSMANN K., KELPPE S., MATTILA L., Comparative evaluation of the steady state fuel rod thermal behavior code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS,

VTT-Bericht 34 (April 1978), ISBN 951-38-0619-7

### Zusammenfassung

A comparison between the steady state fuel rod thermal behaviour code GAPCON-THERMAL-2 and the integral fuel rod performance code URANUS was made by analyzing with both codes a few sample data cases representing idealized LWR fuel conditions.

The results reveal certain discrepancies in the thermal submodels of the codes, but quite consistent fuel maximum temperature predictions are achieved. Capabilities of the GAPCON-THERMAL-2 for mechanical performance analyses appear very limited, but as far as the calculation of thermal behaviour is concerned the mechanical parts of the code seem to be quite acceptable.

The URANUS results for mechanical phenomena seem very plausible. Yet, no reference to experimental findings was made at this stage of the evaluation. The running times of URANUS appear very short, especially if demands for detail are optimized. After refining certain submodels and sufficient verification against experimental data URANUS is potentially a most valuable tool for a wide variety of practical LWR fuel applications.

ANHANG 10:

LASSMANN K., Die transiente Version des Rechenprogramms URANUS,  
atw, XXII, Nr. 7 (Okt. 1977), 521 - 524

ANHANG 11:

LASSMANN K., Stand und Entwicklung des integralen Stabrechen-  
programms URANUS, Beitrag zu KFK 2690 (Sept. 1978), 7-37