

URANUS, A COMPUTER CODE FOR THE THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF FUEL ROD BEHAVIOUR

K. LABMANN

*Institut für Reaktortechnik, Technische Hochschule Darmstadt,
Petersenstrasse 18, D-6100 Darmstadt, Germany*

SUMMARY

Fuel rods of power reactors consist of fuel pellets and a cladding tube, which has to prevent the release of radioactive fission products. Due to this safety purpose a very careful thermal and mechanical analysis of this structural element of the reactor core has to be done taking into account the complex interaction between pellet and cladding tube. The structural problem is three dimensional (3d) and since the constitutive laws are nonlinear and specific effects take place, the time as a fourth independent variable is involved. An exact and complete solution of fuel rod analysis is not possible within the present knowledge. So one has to make assumptions to simplify either the complexity of the state of deformations or the complexity of material behaviour, which includes the analysis of only a small section of the fuel rod. The author wants to point out, that both lines of analysis are important and complementary to each other.

The URANUS-code follows the first line: a quasi 2d thermal and mechanical integral fuel rod analysis is combined with highly complex material behaviour. The quasi 2d solution has been compared with a 2d-finite element solution. An excellent agreement in the axial friction force distribution was found. The mechanical description takes seven components of strains into account: elastic, time-independent plastic, creep, thermal and strains due to swelling, cracking and densification. Models for temperature distributions, heat generation, gap closure, pellet cracking, crack healing, fission gas release, corrosion, O/M distribution and Pu-redistribution are included.

The URANUS-code is an advanced fuel rod design code with a variable multizone concept. Geometric nonlinearity (large displacements) are involved, the loads (pressure or temperature) are considered as steady state or transient loads. The crack structure and the axial friction forces are calculated by means of an axial loop. The URANUS code is applicable to every fuel rod type (LWR, LMFBR, HWR). Geometric details as well as material properties are regarded as input parameters. During the development of URANUS, main attention was put to a transparent code structure, a transparent mechanical solution and an accurate numerical evaluation. The code has been designed for different users and will be available in the middle of 1977.

In the paper the new basic mechanical concept, which is a superposition of a 1d-radial solution and a 1d-axial solution is given as well as all basic equations. The mechanical concept determines the code structure, which also is shown in detail. Example analysis and comparisons to experiments and results from other codes are given. The result of the present work is the URANUS-code, which is an advanced tool for the better understanding of fuel rod behaviour in normal operation and safety analysis. The URANUS-code works extremely fast as calculations up to now showed.

1. Einleitung

Brennstäbe von Leistungsreaktoren bestehen aus Brennstoff in Form von gesinterten Brennstofftabletten und einer zylindrischen Hülle, die die erste Sicherheitsbarriere gegen die Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte bildet. Wegen dieser Sicherheitsfunktion der Hülle ist der Nachweis ihrer Integrität im Normalbetrieb und im Störfall das wichtigste Auslegungskriterium der Brennstabmechanik. Die hierfür notwendige thermische und mechanische Analyse muß vor allem die sehr komplexe Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff erfassen, wobei neben einer Reihe von physikalischen Effekten vor allem nichtlineares Werkstoffverhalten und zeitlich instationäres Verhalten zu berücksichtigen ist. Einzelheiten hierzu werden im Kapitel 2 behandelt.

Wegen der geometrischen Ähnlichkeit der Stäbe von Leistungsreaktoren wird in dieser Arbeit eine für alle Stäbe gültige mechanische Beschreibung gewählt, die im Rechenprogramm URANUS numerisch ausgewertet wird. Geometrische Daten werden ebenso wie Daten zur Leistungsgeschichte, zu Kühlkanal-Temperaturen und -Drücken etc. als gegebene Daten, d.h. als Eingabedaten des Rechenprogramms URANUS betrachtet.

Die notwendige geometrische Idealisierung wird in Form einer quasi-zweidimensionalen Behandlung vorgenommen. Mit dieser Annahme ist eine Beschreibung des gesamten Brennstabes möglich, die im rechentechnischen Umfang noch zu vertreten ist. Lokale Effekte, wie z.B. der typische Bambuseffekt der Brennstofftabletten bei Leichtwasserreaktoren können somit nicht betrachtet werden und müssen zweidimensionalen Berechnungen vorbehalten bleiben. Diese zweidimensionalen Berechnungen weisen allerdings den Nachteil auf, daß sie wegen des hohen Aufwands an Rechenzeit und Speicherplatzbedarf nicht den gesamten Brennstab, sondern nur einen wenige Pellets umfassenden Ausschnitt behandeln können. Zur vollständigen Brennstabanalyse sind somit gleichermaßen globale wie lokale Untersuchungen notwendig.

Für die Belastung der Hülle infolge mechanischer Wechselwirkung mit dem Brennstoff spielt naturgemäß die Geometrie des Brennstoffs eine entscheidende Rolle. Wie Schlifffbilder und schon einfache Rechnungen zeigen, treten im Brennstoff Risse auf, die die Geometrie stark beeinflussen und deshalb bei der Analyse des Hüllrohrs berücksichtigt werden müssen. Ein bruchmechanisches Modell, das die Berechnung von Rissen in allen Ebenen zuläßt, wird in einem speziellen Beitrag im Detail beschrieben [1]. Die Lösung erfolgt iterativ und berücksichtigt physikalische Ausheileffekte. Es werden Kriterien angegeben, die es gestatten, die während des Iterationsvorgangs durchgeführten Schätzungen zur Plastizität oder zur Rißstruktur zu überprüfen und eventuell zu korrigieren.

Im Kapitel 3 werden Ergebnisse exemplarisch dargestellt und diskutiert.

2. Behandlung der mechanischen Grundgleichungen

Die Analyse von Brennstäben wird zum Teil mit recht unterschiedlichen Methoden zur Behandlung der mechanischen Grundgleichungen durchgeführt. Es existieren sowohl analytische als auch praktisch jede Art von numerischen Lösungen [Matthews,2]. Da in der Brennstabmodelltheorie zahlreiche Modelle miteinander gekoppelt werden, die sich gegenseitig beeinflussen, sind - unabhängig von der Behandlung der mechanischen Grundgleichungen - Lösungen nur auf iterativem Weg möglich. Als Gemeinsamkeit aller Beschreibungen zum Brennstabverhalten kann man die Schwierigkeit auffassen, eine Konvergenz der Lösung zu erzielen. Neben der Genauigkeit der Modelle selbst kommt daher der numerischen Sicherheit eine entscheidende Bedeutung zu.

Um zusätzliche Iterationen oder Ungenauigkeiten aus rein numerischen Behandlungen zu vermeiden, wurde eine analytische Lösung gewählt, die durch drei Annahmen möglich wird:

- a) in axialer Richtung liegt ein modifizierter ebener Dehnungszustand vor
- b) der Brennstab wird als rotationssymmetrisch angenommen
- c) die Struktur (Hülle und Brennstoff) läßt sich bereichsweise durch isotope, ortsunabhängige elastische Konstanten beschreiben.

Diese analytische Lösung wird zur ersten mechanischen Analyse in einem Schnitt I (Abb. 1) verwendet. Sukzessiv werden in gleicher Weise alle Schnitte des Stabs berechnet. Diese erste mechanische Analyse kann allerdings in erheblicher Weise fehlerbehaftet sein, da die zu Beginn einer Rechnung noch unbekanntes Reib- bzw. Haftkräfte nicht berücksichtigt wurden. Diese Kräfte werden in einer axial eindimensionalen mechanischen Behandlung errechnet, die ausführlich in [3] beschrieben ist. Dabei wird berücksichtigt, daß die axiale Reibkraft stets kleiner als die maximale Haftkraft sein muß und daß axiale Zugkräfte im Brennstoff physikalisch nicht möglich sind.

Die oben beschriebene Behandlung der axialen Abhängigkeiten erfolgt also iterativ durch die Überlagerung einer eindimensionalen Rechnung in radialer Richtung und einer eindimensionalen Rechnung in axialer Richtung. Diese Behandlung wird als quasi-zweidimensional bezeichnet. Der Vergleich mit einer zweidimensionalen Lösung nach der Finitelement-Methode [Fabian,4] zeigte eine außerordentlich gute Übereinstimmung im Axialkraftverlauf in verschiedenen Testfällen.

Der Vorteil dieser quasi-zweidimensionalen Behandlung gegenüber einer reinen zweidimensionalen Behandlung liegt in einer erheblichen Rechenzeiterparnis. Die Vergleiche haben außerdem gezeigt, daß eine Behandlung des gesamten Brennstabs mit einer zweidimensionalen Finitelement-Methode nicht möglich ist.

Der durch dieses quasi-zweidimensionale Modell vorgegebene prinzipielle Ab-

lauf der Berechnungen bestimmt die Programmstruktur des URANUS-Programms (Abb.2). Werkstoffgrößen, mechanische und physikalische Modelle werden in Unterprogrammen formuliert, so daß brennstabspezifische Programmversionen leicht entwickelt werden konnten. Insgesamt enthält das URANUS-Programm z.Z. etwa 80 Unterprogramme. Zusätzlich zum eigentlichen URANUS-Programm stehen Testprogramme für verschiedene Unterprogramme zur Verfügung. Testprogramme und das URANUS-Rechenprogramm bilden das URANUS-System. Entwickelt sind z.Zt. eine Leichtwasser (LWR)-Version und eine Schnellbrüter (SNR)-Version.

Für die thermische und mechanische Analyse werden in jedem Schnitt 1 - wie in Abb. 2 dargestellt - eine Reihe von Effekten berücksichtigt. Die hierfür benötigten mechanischen Grundgleichungen werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

2.1 Spannungs-Dehnungsbeziehungen

Um das Materialverhalten möglichst vollständig erfassen zu können, müssen verschiedene Dehnungsanteile berücksichtigt werden. Als erste Annahme wird getroffen, daß sich die Änderung der Gesamtdehnung $\{d\epsilon\}$ additiv aus den verschiedenen Dehnungsänderungen ergeben:

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^{el}\} + \{d\epsilon^{cr}\} + \{d\epsilon^{pl}\} + \{d\epsilon^s\} + \{d\epsilon^{th}\} + \{d\epsilon^f\} + \{d\epsilon^{sin}\}$$

(1)

- $\{\epsilon^{el}\}$: elastische Dehnung
- $\{\epsilon^{cr}\}$: Kriechdehnung
- $\{\epsilon^{pl}\}$: zeitunabhängige plastische Dehnung
- $\{\epsilon^s\}$: Schwelldehnung
- $\{\epsilon^{th}\}$: Wärmedehnung
- $\{\epsilon^f\}$: Rißdehnung
- $\{\epsilon^{sin}\}$: Sinterdehnung

Hier und im folgenden wird die Notation der Matrizenrechnung gewählt:

- $[A], [a]$ Matrix
- $\{B\}, \{b\}$ Spaltenmatrix
- $\{B\}^T, \{b\}^T$ transponierte Spaltenmatrix

Die Annahmen a) und b) bedeuten, daß in der Gleichung (1) nur radiale, tangentielle und axiale Komponenten der Dehnungen auftreten, die im allgemeinen

von der radialen Koordinate R und der Zeit t abhängen und sich auf einen bestimmten axialen Schnitt der Höhe Z_1 (s. Abb. 1) beziehen. Somit gilt

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r (R, Z_1, t) \\ \varepsilon_t (R, Z_1, t) \\ \varepsilon_a (R, Z_1, t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Fettgedruckte Buchstaben weisen im folgenden stets auf diese Abhängigkeiten hin, wobei nicht alle drei Abhängigkeiten gleichzeitig auftreten müssen.

Die elastischen Dehnungen $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}^{el}$ sind mit den Spannungen $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ durch das allgemeine Hook'sche Gesetz verbunden. In differentieller Form kann dies folgendermaßen geschrieben werden:

$$\{d\boldsymbol{\sigma}\} = [\mathbf{C}] \{d\boldsymbol{\varepsilon}^{el}\} + [d\mathbf{C}] \{\boldsymbol{\varepsilon}^{el}\} \quad (3)$$

Die Annahme c) eines elastisch isotropen Materials mit räumlich konstanten Komponenten der Matrix $[\mathbf{C}]$ gestattet es, die Spannungsdehnungsbeziehungen in eine einfache Form zu bringen. Zunächst werden alle Dehnungsterme bis auf die elastische Terme zu einer Zusatzdehnung $\{\boldsymbol{\varepsilon}^{ex}\}$ zusammengefaßt:

$$\{d\boldsymbol{\varepsilon}^{ex}\} = \{d\boldsymbol{\varepsilon}^{cr}\} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}^{p4}\} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}^s\} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}^{th}\} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}^f\} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}^{sin}\} \quad (4)$$

Unter Verwendung von gemittelten elastischen Konstanten, die die Lastgeschichte widerspiegeln, erhält man:

$$\mathbf{G} = \frac{\tilde{E}}{1 + \tilde{\nu}} [\mathbf{I}] (\{\boldsymbol{\varepsilon}\} - \{\boldsymbol{\varepsilon}^{ex}\}) - \frac{\tilde{\nu} \tilde{E}}{(1 + \tilde{\nu})(1 - 2\tilde{\nu})} \{\mathbf{I}_0\}^T (\{\boldsymbol{\varepsilon}\} - \{\boldsymbol{\varepsilon}^{ex}\}) \{\mathbf{I}_0\} \quad (5)$$

\tilde{E} : Elastizitätsmodul, gemittelt

$\tilde{\nu}$: Querkontraktionszahl, gemittelt

Auf die Mittlungsvorschrift für \tilde{E} und $\tilde{\nu}$ kann hier nicht eingegangen werden.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, daß diese Gleichung einmal durch die Terme der Plastizität und des Kriechens das nichtlineare Werkstoffverhalten beschreibt und daß zum ändern alle Zusatzterme anisotropes Verhalten aufweisen können.

2.2 Formänderungsbeziehungen und Gleichgewichtsbedingung

Die allgemeinen Beziehungen zwischen den drei hier interessierenden Komponenten der Dehnungen und den Verschiebungskomponenten \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} lassen sich nach Klingbeil [5] für Zylinderkoordinaten R , \varnothing , Z in folgender Form her-

herleiten:

$$\left\{ \epsilon \right\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_t \\ \epsilon_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial R} \right)^2 \right) \\ \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{u}{R} - \frac{1}{2R^2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial \phi} - v \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} + u \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)^2 \right) \\ \frac{\partial w}{\partial Z} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial Z} \right)^2 \right) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

u : radiale Verschiebung

v : tangentielle Verschiebung

w : axiale Verschiebung

Berücksichtigt man die vorausgesetzte Rotationssymmetrie sowie die Annahme eines modifizierten ebenen Dehnungszustands in axialer Richtung

- Annahmen a) und b) - , dann erhält man

$$\left\{ \epsilon \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{du}{dR} - \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dR} \right)^2 \\ \frac{u}{R} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{R} \right)^2 \\ C_3 - \frac{1}{2} C_3^2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Die obigen Gleichungen stellen die vollständigen Formänderungsbeziehungen für die gewählte Geometrie dar. Wegen der quadratischen Terme in Gl. (7) sind diese Beziehungen geometrisch nicht linear und gelten deshalb auch bei großen Verformungen, wobei Bezug auf die verformte Geometrie zu nehmen ist. Dieser Bezug wird durch große Buchstaben (z.B. R, Z) deutlich gemacht.

Es gilt

$$R = r + u \quad (8)$$

r : Referenzradius

Die Formulierung für ϵ_a wurde wegen der Analogie zu den beiden anderen Komponenten gewählt.

Die Gleichgewichtsbeziehung lautet für den betrachteten Spezialfall

$$\frac{d\sigma_r}{dR} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{R} = 0 \quad (9)$$

2.3 Lösung der mechanischen Grundgleichungen in einem Schnitt 1

Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde, handelt es sich bei den gegebenen Gleichungen um ein nichtlineares Problem, das sowohl nichtlineares Werkstoffverhalten als auch geometrische Nichtlinearität infolge endlicher Änderung der geometrischen Struktur beinhaltet. Ganz generell stehen zur Behandlung drei Methoden zur Verfügung

- a) Teillastaufbringung
- b) iterative Behandlung
- c) gemischte Behandlung

Im vorliegenden Fall hat sich die gemischte Behandlung als günstigste herausgestellt.

Die Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität erfolgt näherungsweise. Man setzt

$$\left\{ \epsilon^{la} \right\}^{(m+1)} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(\frac{d\mathbf{u}}{dR} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\mathbf{u}}{R} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \mathbf{C}^2 \end{array} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \epsilon^2 \right\}^{(m)} \quad (10)$$

Der Index la steht für große Verschiebung (large displacement), die Größe (m) gibt den Iterationsschritt an. Die nichtlinearen Terme für den Iterationsschritt (m + 1) werden also aus dem Schritt (m) berechnet und damit als bekannte Größen vorausgesetzt. Definiert man nun

$$\left\{ \epsilon^{ex'} \right\}^{(m+1)} = \left\{ \epsilon^{ex} \right\}^{(m+1)} + \left\{ \epsilon^{la} \right\}^{(m+1)} \quad (11)$$

dann läßt sich mit Hilfe der Spannungs-Dehnungsbeziehung (5), der Gl. (7) und der Gleichgewichtsbedingung (9) eine Differenzialgleichung 2. Ordnung angeben. Diese Gleichung ist die Lamé Gleichung, die auch die nicht elastischen Dehnungen berücksichtigt und die integriert werden kann. Nach einigen Umformungen erhält man für die radiale Verschiebung \mathbf{u} :

$$\mathbf{u} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \left(\frac{1}{R} \int_{R_i}^R R (\epsilon_r^{ex'} + \epsilon_t^{ex'}) dR + \int_{R_i}^R \frac{\epsilon_r^{ex'} - \epsilon_t^{ex'}}{R} dR \right) + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{1}{R} \int_{R_i}^R R \epsilon_{tot}^{ex'} dR + C_1 R + \frac{C_2}{R} \quad (12)$$

$$\epsilon_{tot}^{ex'} = \{ I_0 \}^T \{ \epsilon^{ex'} \} \quad (13)$$

Die Gleichung (12) ist im wesentlichen formal mit der Gleichung identisch,

wie sie Matthews [2, S. 84] angibt, sie enthält allerdings näherungsweise die geometrisch nichtlinearen Terme und berücksichtigt die Lastgeschichte. Aus der Gleichung (12) lassen sich mit (7) bzw. (5) sämtliche Komponenten von Spannungen und Dehnungen explizit berechnen.

2.4 Räumliche Diskretisierung

Die bisherigen Gleichungen können nur bereichsweise angewendet werden (Annahme c). Durch diese Annahme und wegen der notwendigen numerischen Integration ergibt sich zwangsläufig das Konzept für die räumliche Diskretisierung im URANUS-Programm. Die Struktur wird in radiale Grobzonen eingeteilt, auf die die bisherige mechanische Beschreibung angewandt wird. In diesen Grobzonen werden also ortsunabhängige elastische Konstanten angenommen. Die Grobzonen selbst werden in Feinzonen unterteilt. Anzahl und Größe von Grob- und Feinzonen können für jeden axialen Schnitt frei gewählt werden. Dieses Konzept wird als variables Multizonenkonzept bezeichnet (Abb. 3)

3. Ergebnisse

Ein Vergleich des Rechenprogramms URANUS mit anderen Programmen wie z.B. LIFE-III, FMODEL, CYGRO, BEHAVE, COMETHE, IAMBUS, SATURN etc. wurde kürzlich von Kummerer et al. [6] vorgenommen. Gegenüber dem dort berichteten Stand ist als wesentliche Erweiterung hinzugekommen, daß auch transiente Bedingungen in extrem schnell ablaufenden Störfällen behandelt werden können. Die Schnellbrüter-Version des URANUS-Programms enthält neben der Oxid- eine Karbid-Version. Die LWR-Version ist in [7] ausführlich beschrieben. Die Tabelle I gibt den Ausdruck des URANUS-Rechenprogramms wieder. Alle berechneten Größen können zu beliebigen Zeiten ausgedruckt werden.

Während der bisherigen Arbeiten zum URANUS-Programm hat sich gezeigt, daß Plastizität und Ribstruktur der Tabletten einen großen Einfluß auf die Ergebnisse haben. Aus diesem Grund wurde auf die Entwicklung eines neuen bruchmechanischen Modells großes Gewicht gelegt. Dieses Modell wird - wie schon erwähnt - in einem speziellen Beitrag dargestellt [1], so daß hier auf eine Wiedergabe von Ergebnissen verzichtet werden kann.

Im folgenden werden hier im Vorabdruck nur einige Ergebnisse exemplarisch dargestellt. Das Diagramm 4 zeigt einen transienten Fall, die Übereinstimmung mit Nijsing et al. [8] ist praktisch vollständig. Unter Vorgabe von Randbedingungen wie Kühlmitteldruck und Kühlmiteleintrittstemperatur ist das URANUS-Rechenprogramm in der Lage, einen loss of cooling accident (LOCA) zu beschreiben.

Die beiden folgenden Diagramme 5 und 6 zeigen die radiale Spaltweite und die axiale Verlängerung des Brennstabs in Abhängigkeit von der Zeit für LWR typische Bedingungen. Im Diagramm 5 ist die thermoelastische Lösung eingezeichnet. Dabei ist zu bemerken, daß die tatsächliche Spaltweite unter Berücksichtigung von Reißen weniger als die Hälfte der rein thermoelastischen Lö-

sung beträgt. Eine nicht konstante Leistung (Diagramm 6) führt wegen "ratcheting" Effekten zu höheren axialen Verlängerungen als im Fall konstanter Leistung.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem URANUS-Programm haben gezeigt, daß das Programm schnell und zuverlässig arbeitet und somit ein wertvolles Werkzeug für die thermische und mechanische Brennstabanalyse darstellt. Die Rechenzeiten für einen gesamten Brennstab liegen im Fall eines LWR je nach Leistungsgeschichte zwischen 30 Sekunden und 12 Minuten auf einer IBM 370-168 bei einer ausreichenden räumlichen und zeitlichen Diskretisierung.

4. Acknowledgement

Die Entwicklung des URANUS-Rechenprogramms wurde im Institut für Reaktortechnik der Technischen Hochschule Darmstadt (IRT, Institutsleiter Prof. Dr. W. Humbach) mit einer wesentlichen Unterstützung durch das Projekt Schneller Brüter des Kernforschungszentrums Karlsruhe (PSB, GfK) durchgeführt. Vom PSB ist besonders Herrn Dr. Karsten zu danken. Herrn Prof. Dr. Laue und vor allem Herrn Prof. Dr. Humbach danke ich für wertvolle Diskussionsbeiträge.

5. Literatur

- [1] K. Laßmann, An iterative model for calculating the crack structure in fuel rod design, SMIRT 4, C 3/c (1977)
- [2] J. R. Matthews, The quantitative description of deformation and stress in cylindrical fast reactor fuel pins, Contribution to Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 6, p. 65 (1972), Academic Press
- [3] K. Laßmann, Zur Behandlung der axialen Reibkräfte in integralen Brennstabcodes, Atomkernenergie (ATKE) 27, Lfg. 1, S. 71 (1976)
- [4] H. Fabian, Zweidimensionale Brennstabberechnung nach der Finitelementmethode, Atomwirtschaft-Atomtechnik ATW, XXI, Nr. 6 (Juni 1976), S. 309
- [5] E. Klingbeil, Tensorrechnung für Ingenieure, B.I. Hochschultaschenbücher 197/197a, Mannheim (1966)
- [6] K. R. Kummerer, H. Elbel, New developments in fuel pin modeling, ANS Int.Conf., Washington, D.C. (1976)
- [7] K. Laßmann, A. Moreno, The LWR-version of the integral fuel rod code URANUS, ATKE, im Druck
- [8] R. Nijssing, W. Eifler, The hybrid method, a new accurate computation method for transient temperature distributions in fuel rods, Nuc. Eng. Design, 32 (1975), p. 208-220

Table I: Output of the URANUS-program

In this table the following notation is used:

$$\{ \mathbf{A} \} = \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_r (R, Z, t) \\ \mathbf{A}_t (R, Z, t) \\ \mathbf{A}_a (R, Z, t) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{B} = \mathbf{B} (R, Z, t)$$

R : Radius
t : time
Z : axial coordinate

r : radial
t : tangential
a : axial

Output:

$\{ \mathbf{G} \}$: stress
 $\{ \mathbf{E} \}$: strain
 $\{ \mathbf{E}^f \}$: crack strain
 $\{ \mathbf{E}^{th} \}$: thermal strain
 $\{ \mathbf{E}^s \}$: swelling strain
 $\{ \mathbf{E}^{sh} \}$: hot pressing strain
 $\{ \mathbf{E}^{cr} \}$: creep strain
 $\{ \mathbf{E}^{pl} \}$: time independent plastic strain
 $\{ \mathbf{i} \}$: crack structure

\mathcal{J} : temperature
 ρ : porosity
 bu : burn up
 ϕ : flux
 ϕt : fluence
 \mathbf{E}_v^{cr} : equivalent creep strain
 \mathbf{E}_v^{pl} : equivalent plastic strain
 \mathbf{G}_v : equivalent stress

α : heat transfer coefficients
 R, R_{ref} : actual and reference radius
 Z, Z_{ref} : actual and axial coordinate
 Gas pressure and composition

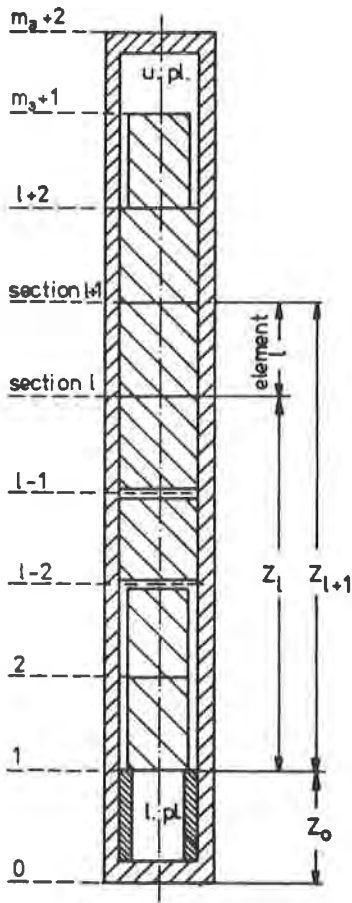


Fig. 1: Geometry of the fuel element

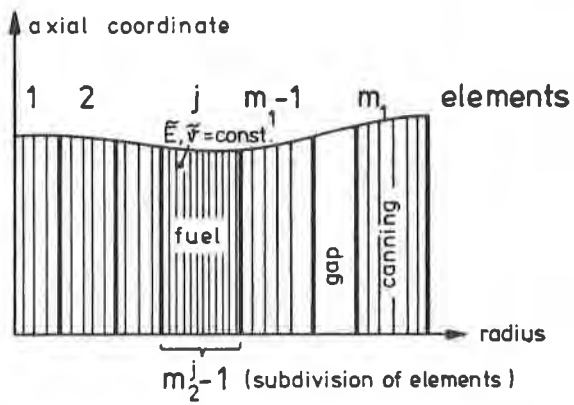


Fig. 2: Program-structure of the URANUS-system

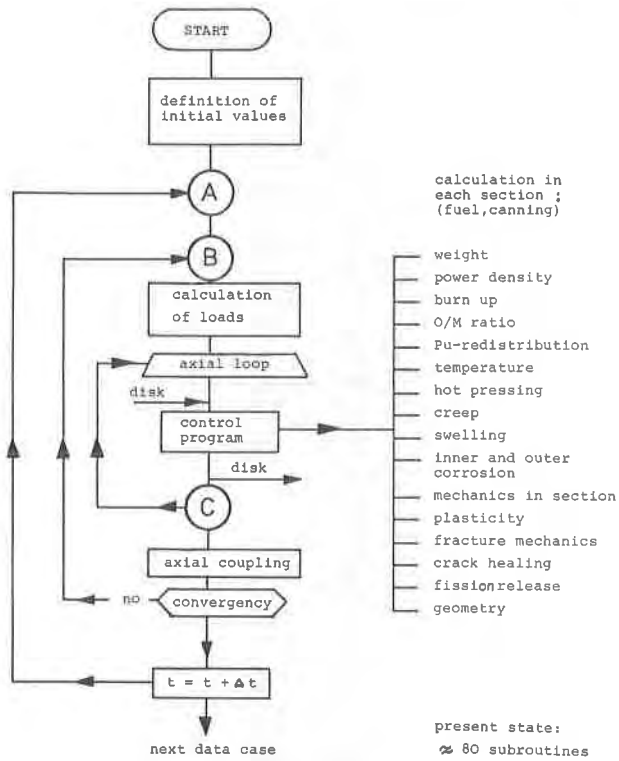


Fig. 3: Radial discretisation in section 1

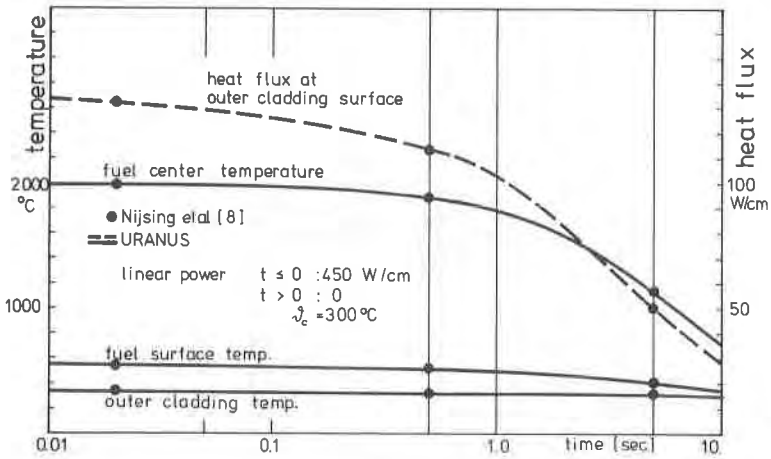


Fig. 4: Thermal response of fuel rod to sudden loss of heat generation

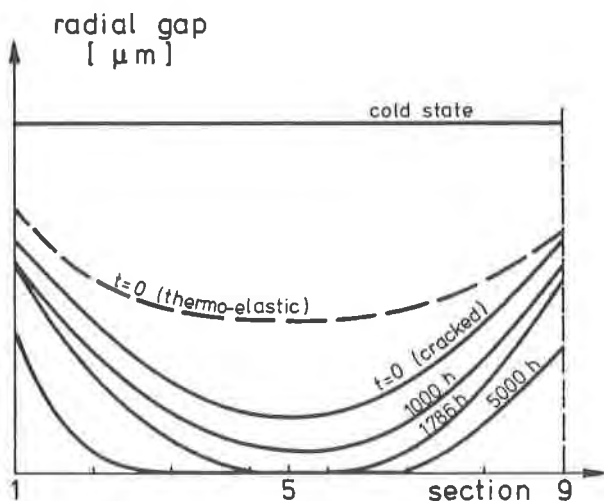


Fig. 5: Axial distribution of the radial gap at different times (LWR-conditions)

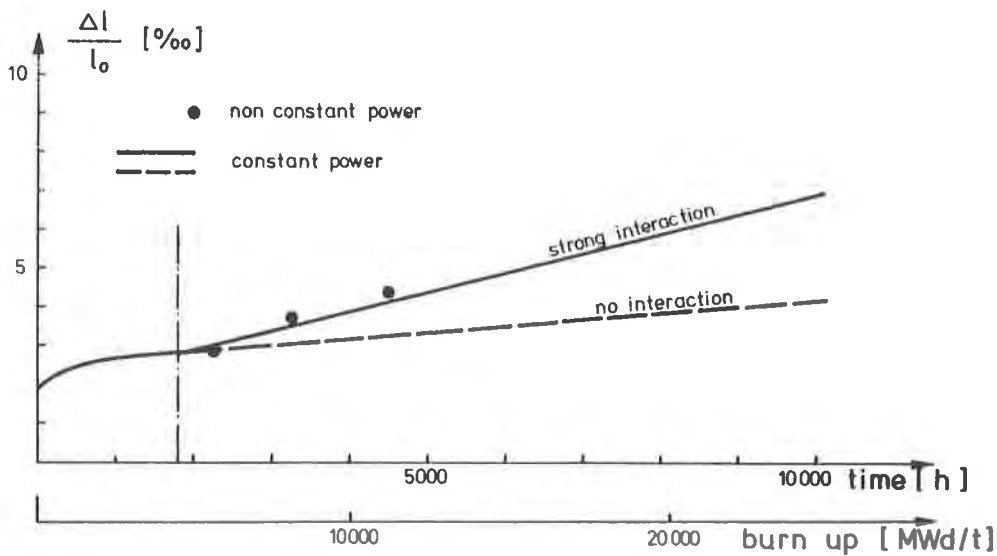


Fig. 6: Axial lengthening of the fuel rod for different power histories as a function of time and burn up (hot state)