

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

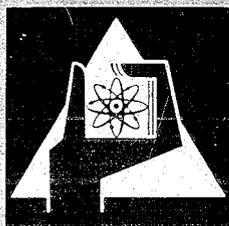
Februar 1970

KFK 1031

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Der direkt elektrisch geheizte UO_2 -Brennstab

D. Freund, W. Schikarski



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1970

KFK 1031

Institut für Angewandte Reaktorphysik

DER DIREKT ELEKTRISCH GEHEIZTE UO_2 -BRENNSTAB

von

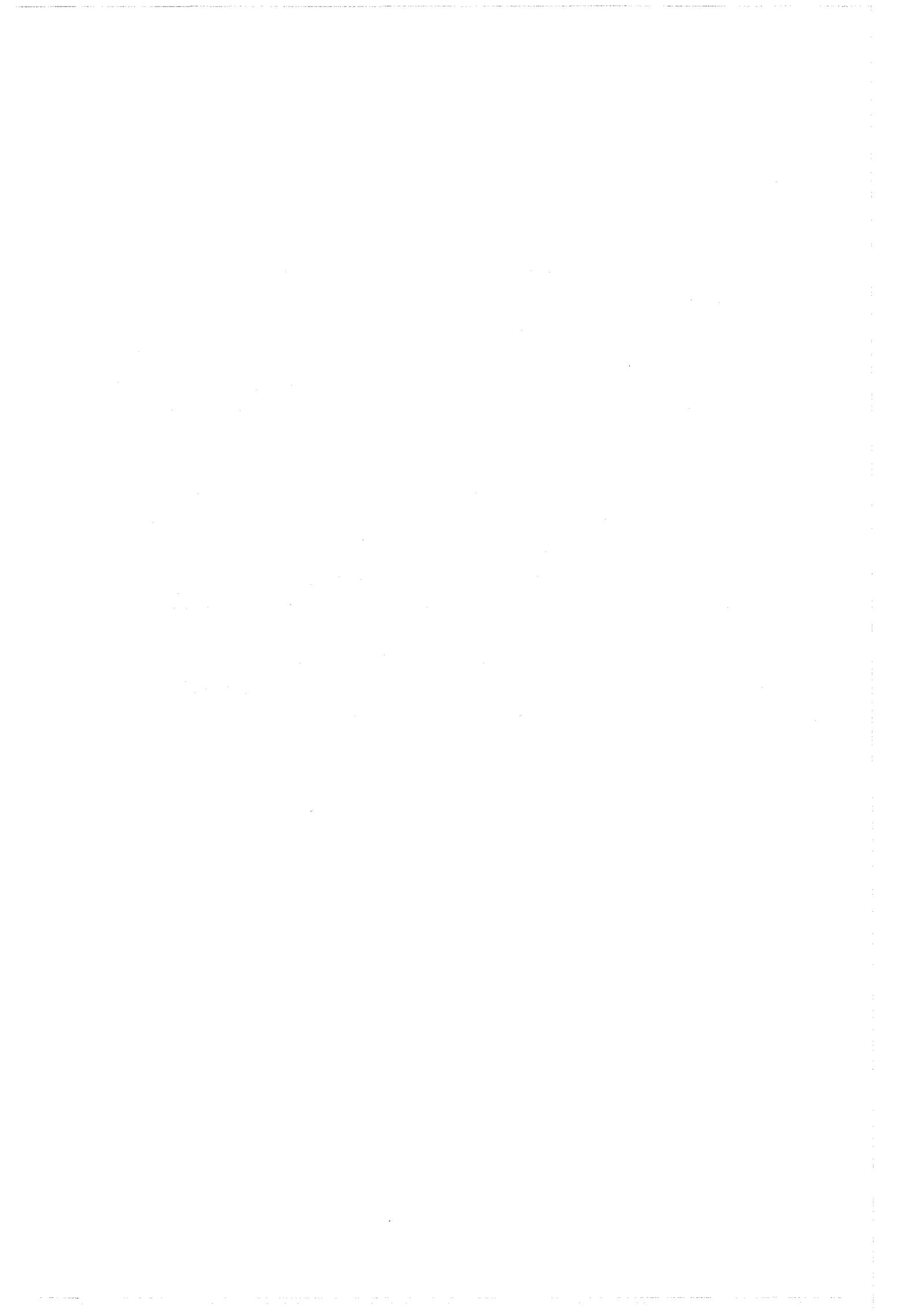
D. Freund und W. Schikarski

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Summary

The new method reported allows heating of sintered UO_2 -rods by direct electric current without an internal axial metallic resistance heater. The temperature distribution of a direct electrically heated UO_2 -rod is calculated by means of a digital computer program based upon radial power balance. The comparison between the direct electrically heated rod and the nuclear reactor fuel rod shows that a good simulation of the nuclear fuel temperature distribution can be achieved.

Experimental and measuring devices are described. The stationary electrical heating of the UO_2 -pin with electrical energy requires a power controlled circuit. The dynamic conditions are simulated by a puls current taken from a bank of capacitors. The method allows investigations on thermal and thermodynamic behaviour of UO_2 -fuel pins. Structural changes and physical effects due to temperature gradients can be simulated. Performance of UO_2 -pins under dynamic conditions depending only on thermal influences are investigated. The method allows a partial simulation of pin failure and of nuclear reactor excursions with well defined parameters. Preliminary results with sintered UO_2 -pins are reported.



<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	- 1 -
2. Theoretische Grundlagen	- 3 -
2. 1. Die radiale Temperaturverteilung	- 3 -
2. 2. Der Einfluß des spezifischen elektrischen Widerstandes und der Wärmeleitfähigkeit auf die radiale Temperaturverteilung	- 12 -
2. 3. Vergleich des elektrischen und des nuklearen UO_2 -Brennstabes	- 20 -
2. 4. Der Einfluß nuklearer und thermischer Effekte auf das Brennstabverhalten	- 29 -
3. Der Betrieb des UO_2 -Brennstabes	- 31 -
3. 1. Versuchsaufbau	- 31 -
3. 2. Elektrische Aufheizung der UO_2 -Proben	- 32 -
3. 3. Meßtechnik	- 34 -
4. Anwendungen	- 35 -
4. 1. Untersuchung der Temperaturverteilung	- 35 -
4. 2. Untersuchung der temperaturabhängigen Brennstoffstruktur und Brennstoffeigenschaften	- 38 -
4. 3. Untersuchung des UO_2 -Stabes unter dynamischen Bedingungen	- 39 -
4. 3. 1. Cycling	- 39 -
4. 3. 2. Exkursionen	- 42 -
4. 3. 3. Brennstabversagen (pin failure)	- 43 -
5. Zusammenfassung	- 44 -
6. Literatur	- 45 -



1. Einleitung

Die meisten Reaktoren der Typen, wie sie heute im Bau und in der Entwicklung sind, haben stabförmige Brennelemente, die aus einer Säule von zylindrischen UO_2 -Tabletten bestehen, die in einem unter Schutzgas dicht verschweißten Metallrohr aufgeschichtet sind.

Dieser Brennstab ist im Betrieb bestimmten Belastungen ausgesetzt, die sich aus der im Stab erzeugten Leistung, der Temperaturverteilung, der Spaltprodukterzeugung, der Stabgeometrie und anderer Parameter ergeben.

Bei der Auslegung eines Brennstabes geht man von den maximalen Forderungen aus, die ein zuverlässiges Verhalten und eine optimale Lebensdauer des Brennstabes erwarten lassen. Brennstäbe werden daher für bestimmte stationäre Bedingungen des Reaktorbetriebes ausgelegt, wobei deren langfristige Änderung berücksichtigt wird.

Vom Standpunkt der Reaktorsicherheit ist es nun bedeutsam, das Verhalten von Brennstäben kennenzulernen, wenn diese stationären Bedingungen nicht eingehalten werden; wenn z. B. durch einen Störfall oder auf Grund von Materialänderungen ein Versagen eines Brennstabes auftritt.

Unter dem Versagen eines Brennstabes, dem "pin-failure", wird hier zunächst die lokale Änderung der geometrischen und damit thermischen Struktur des Brennstabes verstanden. Daß diese Änderung des Brennstabes zu einer einfachen lokalen Kühlungsstörung und in der Folge zur Kühlungsstörung eines ganzen Brennstabbündels und möglicherweise darüber hinaus führen kann, ist heute eines der zentralen Themen der Störfallanalyse bei schnellen Reaktoren.

Vom Standpunkt der Brennstab-Entwicklung ist die genaue Kenntnis des Verhaltens von Brennstäben unter stationären und unter anderen für den Reaktorbetrieb typischen Bedingungen (z. B. cycling) ebenfalls von zentraler Bedeutung. So ist die Kenntnis der Temperaturverteilung, der Stableistung, der Brennstoffstruktur und der zeitabhängige Zusammenhang dieser Größen in Abhängigkeit vom Reaktorbetrieb noch sehr lückenhaft. Über die Frage, welche Faktoren zur Kanalbildung im UO_2 -Brennstab quantitativ beitragen, existieren nur erste theoretische Ansätze. Wei-

tere Probleme, wie z. B. die Porenwanderung, Kornwachstum und Schmelzzoneneffekte, sind noch nicht quantitativ geklärt.

Die hier erstmals entwickelte Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes ist eine Möglichkeit, die genannten Probleme experimentell anzugehen und zu ihrer Lösung beizutragen, indem sie das thermische und thermodynamische Verhalten von UO_2 -Stäben während ihres Einsatzes im Reaktor simuliert. Bei dieser Simulationsmethode wird die nukleare Energie im Brennstab durch die elektrische Energie ersetzt.

Die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes ist zunächst für UO_2 -Brennstoff entwickelt worden. Grundsätzlich ist sie auch für andere Brennstoffe (z. B. Urancarbid) anwendbar. Die Begrenzung liegt nur darin, daß im zu untersuchenden Brennstab eine ausreichend hohe elektrische Leistung unter Betriebsbedingungen erzeugt werden muß.

Natürlich hat jede Simulationsmethode ihre Grenzen. Beim direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstab liegen sie darin, daß nukleare Effekte (z. B. Spaltprodukterzeugung, Änderung von Struktur und Materialeigenschaften durch Bestrahlung) nicht berücksichtigt werden. Dagegen können die unter thermischen und thermodynamischen Bedingungen erfolgenden Änderungen sehr gut nachgebildet werden.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Theorie des direkt elektrisch geheizten Brennstabes am Beispiel des UO_2 -Brennstabes, diskutiert die Möglichkeiten dieser neuen Methode und zieht einen Vergleich zum nuklearen Brennstab.

Über erste experimentelle Ergebnisse zur Stützung der Theorie wird berichtet.

2. Theoretische Grundlagen

2. 1. Die radiale Temperaturverteilung

Bei stationären Wärmeströmungsverhältnissen ist die Temperaturverteilung in einem wärmeproduzierenden Volumen V durch die Wärmebilanzgleichung

$$\iiint_V q dV = \iint_F j_n df \quad (1)$$

sowie durch die Fouriersche Gleichung

$$j = -k \text{ grad } T \quad (2)$$

gegeben.

Es bedeuten

$$\begin{aligned} q &= \text{Wärmequellendichte } \underline{[W/cm^3]} \\ j &= \text{Wärmestromdichte } \underline{[W/cm^2]} \\ F &= \text{Oberfläche des Volumens } \underline{[cm^2]} \\ k &= \text{Wärmeleitfähigkeit } \underline{[W/cm \text{ } ^\circ\text{C}]} \\ \text{sowie} \quad T &= \text{Temperatur } \underline{[^\circ\text{C}]} \end{aligned}$$

Für Zylindergeometrie und radial nach außen gerichtetem Wärmefluß erhält man aus (1) und (2), [1, 2]

$$\int_0^r \frac{1}{r'} \left(\int_0^{r'} q(r'') r'' dr'' \right) dr' = \int_{T_a}^{T_i} k(T) dT \quad (3)$$

bzw.

$$\int_0^r \frac{1}{r'} \left(\int_0^{r'} q(r'') r'' dr'' \right) dr' = \int_{T(r)}^{T_i} k(T) dT \quad (4)$$

mit

- T_i = Brennstoffzentraltemperatur
- T_a = Brennstoffoberflächentemperatur
- $T(r)$ = Temperatur im Abstand r von der Achse
- r_p = Radius des UO_2 -Brennstabes

Die radiale Temperaturverteilung ist somit durch den radialen Verlauf der Wärmequell-dichte q und durch die Wärmeleitfähigkeit k gegeben.

Für Zylindergeometrie folgt mit

$$dV = l \cdot r \cdot dr \cdot d\psi \quad (5)$$

und der Abnahme einer vom Winkel ψ unabhängigen Wärmequell-dichte

$$\int dN = \iiint q \, dV = 2 \pi l \int_0^R q(r) \cdot r \, dr, \quad (6)$$

wobei

$$N = \text{Gesamtleistung} \quad \underline{\underline{[W]}}$$

$$l = \text{Probenlänge} \quad \underline{\underline{[cm]}}$$

und $r_p = \text{Probenradius} \quad \underline{\underline{[cm]}}$

bedeuten.

Wie aus den Gleichungen ersichtlich ist, soll nur die radiale Verteilung untersucht werden, d. h. die axiale Verteilung wird als konstant über die Probenlänge angenommen.

Die analytische Darstellung der Wärmequell-dichte $q(r)$ folgt durch Bildung des totalen Differentials der Gesamtleistung und durch Vergleich mit der rechten Seite von Gl. (6).

Es gilt:
$$N = \frac{U_p^2}{R(T(r))}$$

bzw.
$$N = \frac{U_p^2 \cdot \pi \cdot r^2}{l \cdot \rho(T(r))} \quad (7)$$

mit U_p = Spannungsabfall an der UO_2 -Probe $\int \underline{v} \underline{d}$
 R = elektrischer Widerstand der Probe $\int \underline{\Omega} \underline{d}$
 und ρ = spezifischer elektrischer Widerstand $\int \underline{\Omega} \text{ cm} \underline{d}$

Differentiation von (7) und Vergleich mit (6) liefert

$$q(r) = \frac{U_p^2}{2l^2} \cdot \frac{2\rho - r \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}}{\rho^2} \quad (8)$$

Betrachtet man die Wärmeleitungsgleichung für den stationären Zustand

$$-\frac{q(r)}{k} = \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \quad (9)$$

(für Zylindergeometrie, rein radialabhängige Temperatur und temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit k), so wird deutlich, daß eine analytische Behandlung der Temperaturverteilung mit $q(r)$ aus Gl. (8) zu komplizierten Ausdrücken führt.

Noch unübersichtlicher wird das Problem durch die Forderung einer temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit. Statt der Gl. (9) erhält man aus (1) und (2) folgenden Ausdruck

$$-\frac{q(r)}{k(T(r))} = \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{k(T(r))} \frac{dk}{dT} \left(\frac{dT}{dr} \right)^2 \quad (10)$$

Die Differentialgleichung der Temperatur lautet dann:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} - \frac{r U_p^2}{2 l^2 \rho^2 k} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \frac{dT}{dr} + \frac{1}{k} \frac{dk}{dT} \left(\frac{dT}{dr} \right)^2 + \frac{U_p^2}{l^2 \rho k} = 0 \quad (11)$$

Um zu einer Beschreibung der Temperaturverteilung im direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstab zu kommen, kann man Gl. (11) numerisch durch Entwicklung eines digitalen Rechenprogrammes lösen.

Das in der vorliegenden Arbeit angewendete Verfahren geht einen anderen Weg, der sich durch eine bessere Übersichtlichkeit und Anschaulichkeit im Hinblick auf die physikalischen Zusammenhänge auszeichnet.

Der zylindrische UO_2 -Brennstab wird in Koaxialzylinder gleicher Querschnitte eingeteilt, die bei konstanter Temperatur alle den gleichen elektrischen Widerstand haben. Auf diese Weise wird eine "Normierung" erreicht, welche einen unmittelbaren graphischen Vergleich der Partialströme und -leistungen erlaubt.

Heizt man den Brennstab nun auf, so wird sich bei einer konstanten elektrischen Leistung ein stationärer Zustand einstellen, der durch eine bestimmte Brennstoffoberflächentemperatur T_a und eine Temperaturverteilung $T(r)$ charakterisiert wird. Durch Aufstellen der Leistungsbilanz für jeden der Brennstoff-Koaxialzylinder kann dann folgendermaßen die Wärmequell-dichte-, Strom-, Widerstands- und Temperaturverteilung bestimmt werden:

Die Leistungsbilanz für den i -ten Zylinder lautet

$$N_{i \rightarrow i+1}^j = N_i^{el} + N_{i-1 \rightarrow i}^j \quad (12)$$

Es bedeutet:

$N_{i \rightarrow i+1}^j$: Wärmestrom von Zylinder i in den Zylinder $i+1$. Für den äußeren Zylinder ist dies die nach außen abgestrahlte und durch Konvektion abgeführte Leistung.

Bei eindimensionaler Betrachtung, d. h. Vernachlässigung einer axialen Temperaturverteilung, ist dies gerade die elektrische Gesamtleistung N^{el} .

N_i^{el} : Im Zylinder i erzeugte elektrische Leistung.
 $N_{i-1 \rightarrow i}^j$: Wärmestrom von Zylinder $i-1$ nach Zylinder i .

Der Wärmestrom wird durch Gleichung (2) beschrieben:

$$N_{i-1 \rightarrow i}^j = k (\bar{T}_{i,i-1}) \cdot F_{i-1} \cdot \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta r} \quad (13)$$

mit

F_{i-1} = Oberfläche des Zylinders $i-1$
= $2\pi r_{i-1} \cdot l$
 T_{i-1} = (mittlere) Temperatur in Zylinder $i-1$
 T_i = (mittlere) Temperatur in Zylinder i
 Δr = Zylinderwandstärke

$\bar{T}_{i,i-1}$ ist das mit den Wandstärken der Zylinder i und $i-1$ gewichtete arithmetische Mittel der Temperaturen T_i und T_{i-1} .

Die elektrische Leistung N_i^{el} ist die im Zylinder i erzeugte Joulesche Leistung

$$N_i^{el} = \frac{U^2}{R_i} \quad (14)$$

wobei R_i der elektrische Widerstand des i -ten Zylinders ist.

Die Leistungsbilanz für den äußeren Zylinder lautet nun:

$$N_{ges}^{el} = N_n^{el} + N_{n-1 \rightarrow n}^j$$

Hieraus folgt unmittelbar

$$N_{\text{ges}}^{\text{el}} = \frac{U^2}{R_n(T_n)} + k(\overline{T_{n,n-1}}) \cdot 2\pi r_{n-1} \cdot l \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta r} \quad (15)$$

Die Temperatur T_n ist die gemessene Oberflächentemperatur. Durch Auflösen nach T_{n-1} erhält man

$$T_{n-1} = \frac{\Delta r}{k(\overline{T_{n,n-1}}) 2\pi r_{n-1} l} (N_{\text{ges}}^{\text{el}} - \frac{U^2}{R_n(T_n)}) + T_n \quad (16)$$

Für den Zylinder n-1 erhält man

$$N_{n-1 \rightarrow n}^j = N_{n-1}^{\text{el}} + N_{n-2 \rightarrow n-1}^j \quad (17)$$

woraus nun die Temperatur T_{n-2} errechnet werden kann.

Durch einen solchen iterativen Prozeß lassen sich Temperatur, Wärmequell-dichte, Strom und Widerstand als Funktion von r darstellen, welches mit Hilfe eines digitalen Rechenprogramms durchgeführt wird.

Die Eingabedaten für das Rechenprogramm MASTER¹⁾ sind neben Schrittzahl, Proben-geometrie und -dichte die Meßwerte Oberflächentemperatur T_a sowie die elektrische Gesamt-leistung $N_{\text{ges}}^{\text{el}}$.

Auf Grund der Annahme einer konstanten Temperatur in jedem einzelnen Koaxialzylinder und der komplizierten Wärmequell-dichteverteilung wird die Berechnung der Temperaturverteilung schrittabhängig. Je nach der gewünschten Rechengenauigkeit können entsprechende Schrittzahlen gewählt werden.

1) Method of Approximation and Simulation of Temperature Distributions in Nuclear Reactor Fuel by Electrically Heated Rods

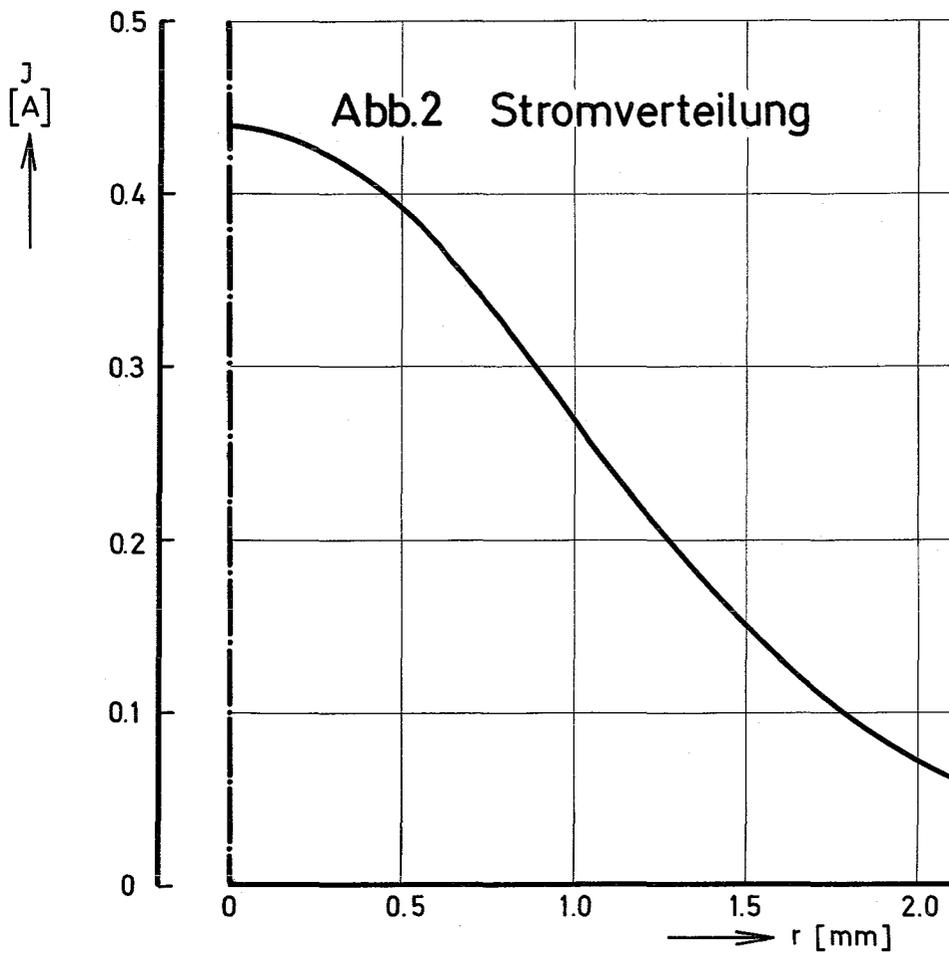
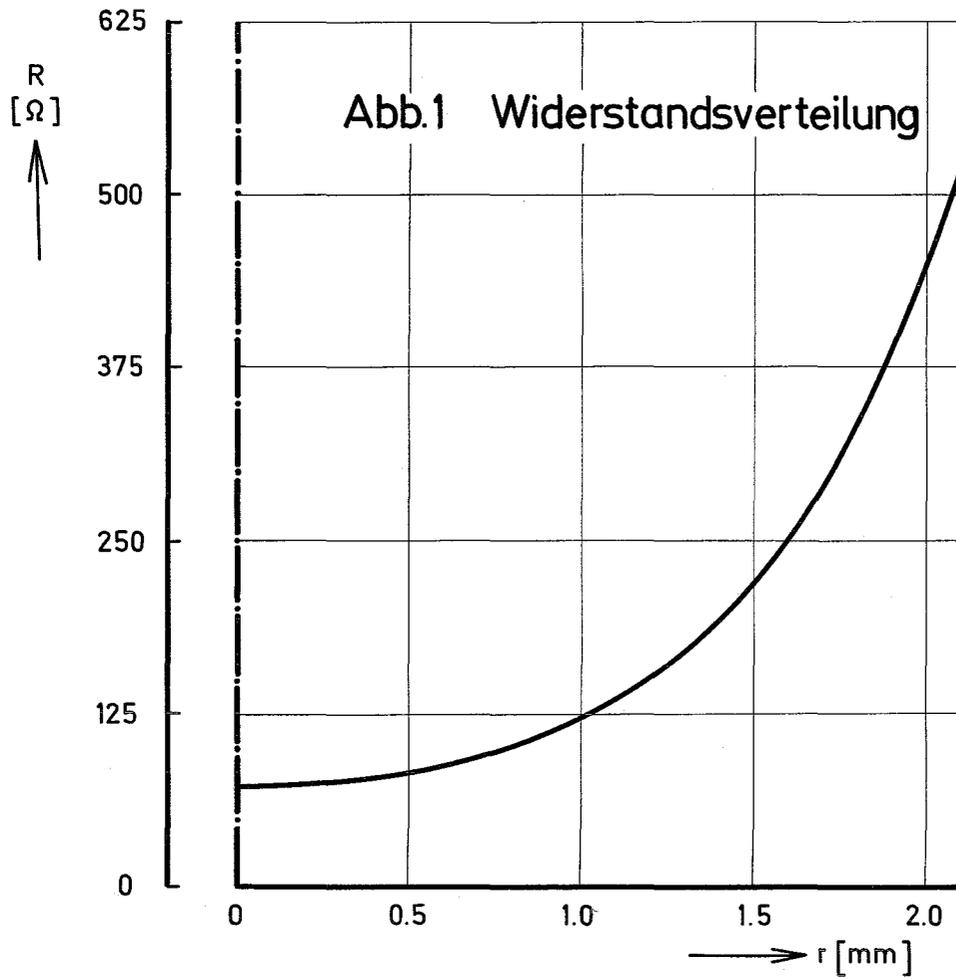


Abb.3

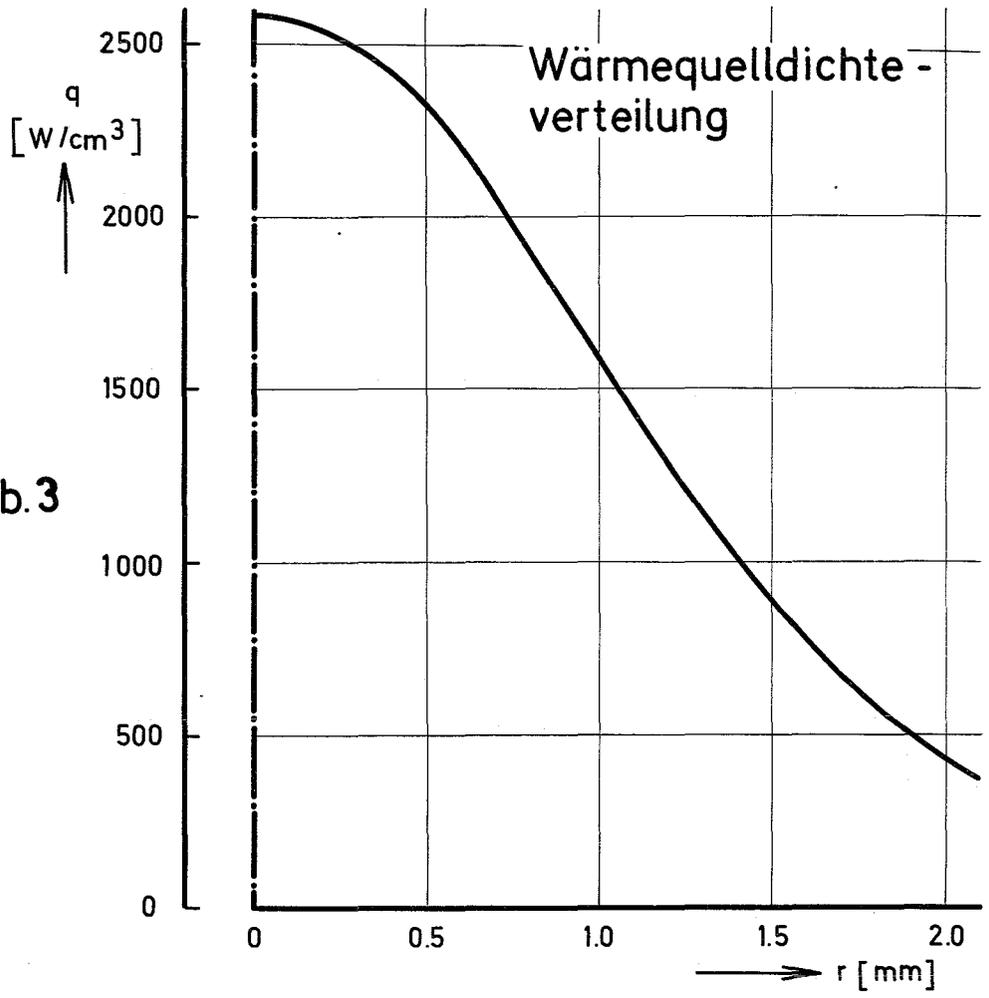
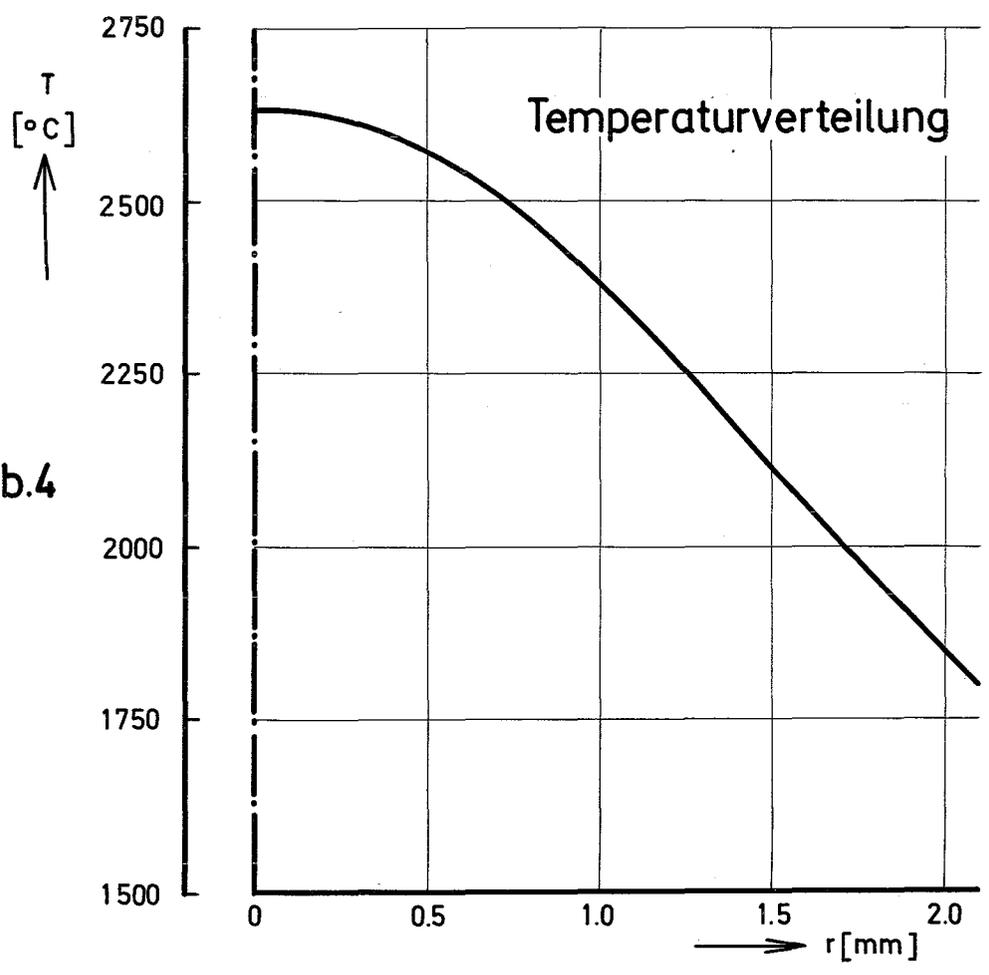


Abb.4



Die in den Abbildungen 1 - 4 dargestellten Rechnungen sind unter bestimmten Annahmen über den spezifischen elektrischen Widerstand ρ , die Wärmeleitfähigkeit k und die Dichte γ durchgeführt worden (vergl. Kap. 2. 2.). Zudem enthalten sie keine Berücksichtigung der Wärmeleitung in axialer Richtung sowie der zeitabhängigen Strukturänderung des Materials unter den vorliegenden Temperaturgradienten.

Die Abbildungen zeigen die Widerstands-, Strom-, Wärmequell-dichte und Temperaturverteilungen in einem zylindrischen UO_2 -Stab mit einem Durchmesser von 5 mm, 40 mm Länge sowie einer Dichte von 96 % T.D., der stationär mit einer elektrischen Leistung von 600 W, d. h. einer Stableistung von 150 W/cm betrieben wird. Der in einer inerten Atmosphäre geheizte Stab hat eine Oberflächentemperatur von 1800°C .

Auf Grund der vorliegenden Widerstandsverteilung (Abb. 1) besitzen die Stromverteilung (Abb. 2), die Wärmequell-dichteverteilung (Abb. 3) sowie die Temperaturverteilung (Abb. 4) ausgeprägte Wendepunkte.

2. 2. Der Einfluß des spezifischen elektrischen Widerstandes und der Wärmeleitfähigkeit auf die radiale Temperaturverteilung

In der Theorie des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes ist naturgemäß die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ und der Wärmeleitfähigkeit k von der Temperatur von zentraler Bedeutung. Leider sind diese Materialeigenschaften bei hohen Temperaturen nicht sehr genau bekannt. Es wurden daher verschiedene Rechnungen durchgeführt, in denen einige aus der Literatur bekannte Darstellungen von ρ und k angewendet wurden, um ihren Einfluß auf die Temperaturverteilung, vornehmlich jedoch auf die Zentraltemperatur zu erkennen.

Der spezifische elektrische Widerstand von UO_2 ist von J. L. Bates et al. [3] bis zu Temperaturen von ca. $2800^\circ K$ bestimmt worden. Folgende halbempirische Darstellungen werden von den Autoren angegeben:

$$\rho = 0,28 \cdot 10^{-3} e^{1,15 \text{ eV/kT}} \quad T > 1400^\circ K \quad (18)$$

$$\rho = 47,53 T^{-1,4} e^{0,9157 \text{ eV/kT}}, \quad T > 1900^\circ K \quad (19)$$

Weiterhin wird in [3] ein Polynom 3. Grades für den Logarithmus der Leitfähigkeit σ angegeben, welches für den gesamten untersuchten Temperaturbereich gültig ist:

$$\ln \sigma = 9,646 - 2,087 \cdot 10^4 T^{-1} + 1,231 \cdot 10^7 T^{-2} - 6,484 \cdot 10^9 T^{-3} \quad (20)$$

für $300^\circ K \leq T \leq 2800^\circ K$

Gl. (20) ist ein den Meßdaten statistisch angepaßtes Polynom.

Weitere Messungen der elektrischen Leitfähigkeit von UO_2 wurden u. a. von R. A. Wolfe durchgeführt. Aus den Meßwerten wurde der temperaturabhängige spezifische elektrische Widerstand zu

$$\rho = \frac{T}{1,3 \cdot 10^9} e^{\frac{19 \cdot 10^3}{T}} \quad \underline{\underline{[\Omega \text{ cm}]}} \quad (21)$$

für $T > 1000^\circ\text{C}$

bestimmt.

Bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Rechnungen werden die Gleichungen (18), (19), (20) von Bates hauptsächlich benützt, weil diese bis zu relativ hohen Temperaturen verifiziert sind. Gl. (21) dient lediglich als Vergleich, um den Einfluß des spezifischen elektrischen Widerstandes auf die Temperaturverteilung erkennen zu können (s. u.).

Nach [3] wurden bei Untersuchungen an monokristallinem UO_2 mit theoretischer Dichte und polykristallinem UO_2 mit ca. 93 % T.D. keine Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt. Nach Wolfe [4] ist im Temperaturbereich $T < 1000^\circ\text{C}$ ein Einfluß der Korngrößen des gesinterten Materials auf den spezifischen elektrischen Widerstand festzustellen, ein Einfluß der Dichte ist bis ca. 500°C nachweisbar. Für Temperaturen über 1000°C ist der spezifische elektrische Widerstand von stöchiometrischem UO_2 nach Wolfe lediglich temperaturabhängig. Hieraus kann geschlossen werden, daß für höhere Temperaturen der Einfluß von Korngrenzen und Poren - und damit der Einfluß der Dichte - auf die elektrische Leitfähigkeit von UO_2 vernachlässigbar ist. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit der spezifische elektrische Widerstand dichteunabhängig behandelt.

Eine der wichtigsten physikalischen Eigenschaften zur Bestimmung der Temperaturverteilung und der maximal möglichen Stableistung in UO_2 -Brennstäben ist die Wärmeleitfähigkeit k . Eine genaue Kenntnis dieser Größe vor allem für hohe Temperaturen ($T > 2000^\circ\text{C}$) ist erforderlich, um den sicheren Einsatz von Brennelementen auch bei höheren Stableistungen zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit ist im wesentlichen temperatur- und dichteabhängig, die Abhängigkeit vom Verhältnis O/U wird nicht berücksichtigt, da die experimentellen Untersuchungen (vergl. Kap. 4) an stöchiometrischem Uran-dioxid durchgeführt werden.

Die Wärmeleitfähigkeit k von UO_2 als Funktion der Temperatur ist von verschiedenen Autoren untersucht worden. Einen umfassenden Überblick über bisher veröffentlichte Ergebnisse gibt I. Devold [5]. Er empfiehlt eine den Messungen von Vogt et al. angepaßte Funktion der Form

$$k(T) = \frac{46 f}{480 + T} \quad (22)$$

f = Anpassungsfaktor = 1.03

$T > 1500^\circ\text{C}$

Für $T > 1500^\circ\text{C}$ gibt Devold eine nahezu konstante Wärmeleitfähigkeit von $0,024 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ an. Die Dichtekorrektur von Gl. (22) wird nach der Loeb-Formel

$$k_\gamma = k_{100\%} (1 - \alpha P) \quad (23)$$

mit $\alpha \approx 2,6$ für $\gamma > 90\% \text{ T.D.}$

durchgeführt. Die Genauigkeit wird auf $\pm 4\%$ im Bereich bis 1500°C , auf $\pm 10\%$ für Temperaturen bis 2000°C geschätzt.

Eine weitere Darstellung von k stammt von R.R. Asamoto et al. [6]:

$$k(T, \gamma) = 0,013 + \frac{1}{T(0.4848 - 0.4465 \cdot \gamma)} \quad (24)$$

für $800^\circ\text{C} < T < 2000^\circ\text{C}$

$82\% < \gamma < 96\% \text{ T.D.}$

Diese Funktion ist aus Messungen an Proben verschiedener Dichten gewonnen worden. Nach diesen Autoren sind Dichtekorrekturen nach Loeb (Gl. (23)) für die untersuchten Temperaturbereiche ($800 - 2000^\circ\text{C}$), Temperaturgradienten (2000°C/cm) sowie Dichtebereiche ($82 - 96\% \text{ T.D.}$) nicht zulässig. Gl. (24) gilt für stöchiometrisches UO_2 ($\alpha \approx 2.01 \pm 0.005$). Die Genauigkeit der Messungen wird auf $\pm 10\%$ geschätzt.

Gl. (24) wird auf Grund ihrer allgemeineren (T, γ) -Darstellung sowie ihrer Gültigkeitsbereiche in dieser Arbeit hauptsächlich benutzt. Obwohl Gl. (24) nur für die oben angegebenen Temperatur- und Dichtebereiche gilt, wird sie in dieser Arbeit auch für höhere Temperaturen und Dichten angewendet. Diese Extrapolation erscheint dann zulässig, wenn keine Änderungen in der Mikrostruktur der Probe auftreten. Gl. (22) wird wie im Fall des spezifischen Widerstandes zur Bestimmung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit auf die Temperaturverteilung (s. u.) angewendet. Einen graphischen Vergleich der verschiedenen Darstellungen von Wärmeleitfähigkeit und spezifischem Widerstand von UO_2 zeigen die Abbildungen 5 und 6.

In Abb. 7 sind die Temperaturverteilungen dargestellt, die man durch Anwendung von Gl. (19), (20) und (21) erhält. In allen drei Rechnungen wurde die Wärmeleitfähigkeit nach Gl. (24) benutzt. Aus Gl. (19) und (20) resultieren nahezu identische Temperaturverteilungen, Gl. (21) liefert eine steilere Flanke und damit eine um ca. 70° höhere Zentraltemperatur.

Wie die folgenden Abbildungen zeigen, ist der Einfluß der Wärmeleitfähigkeit auf die Temperaturverteilung und damit vor allem auf die Zentraltemperatur beträchtlich. Die in Abb. 8 dargestellten Temperaturverteilungen sind für $\gamma = 96\%$ T.D. sowie für ρ nach Gl. (19) berechnet. Kurve 1 gilt für k nach Gl. (24), Kurve 2 und 3 für konstante Wärmeleitfähigkeit von $0,022$ bzw. $0,024$ $W/cm^\circ C$. (Eine konstante Wärmeleitfähigkeit von $0,024$ $W/cm^\circ C$ für $T > 1200^\circ C$ wird in [4] empfohlen.) Die Differenz der Axialtemperaturen beträgt für Kurve 1 und 2 etwa $50^\circ C$, für Kurve 1 und 3 ca. $130^\circ C$. Die Ungenauigkeit der Wärmeleitfähigkeit in diesen Temperaturbereichen von ca. 10% führt zu Unsicherheiten in der Berechnung der Axialtemperaturen von etwa $3 - 5\%$, welches bei Zentraltemperaturen von $2700^\circ C$ bereits $80 - 140^\circ$ ausmacht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß die Unsicherheiten in ρ und k bei der Berechnung der Temperaturverteilung nach obigem Modell zu Gesamtfehlern in der Zentraltemperatur von ca. $5 - 8\%$ bzw. $140 - 220^\circ C$ (bei $2800^\circ C$ Zentraltemperatur) führen. Eine Überprüfung der theoretischen Temperaturverteilung ist daher erforderlich.

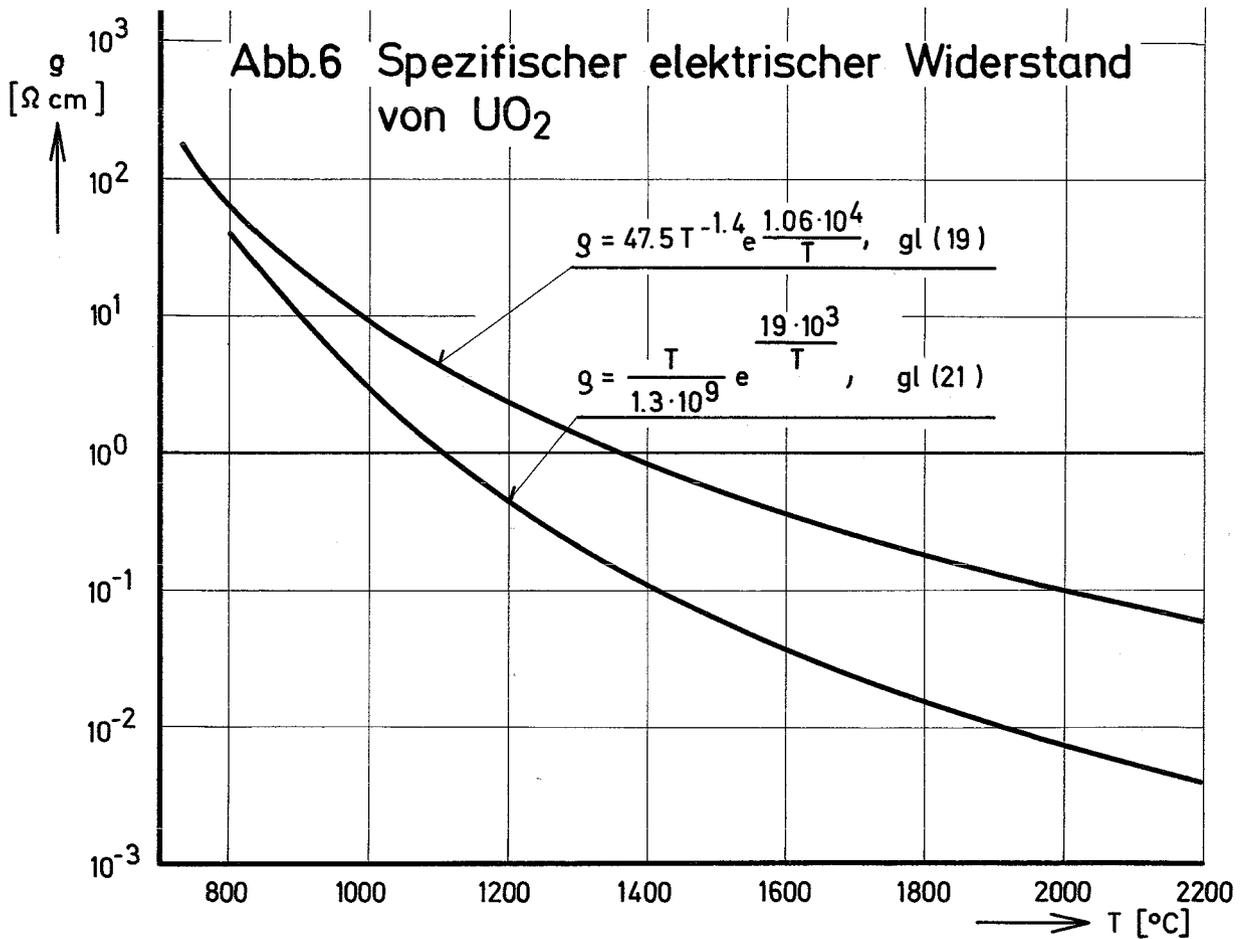
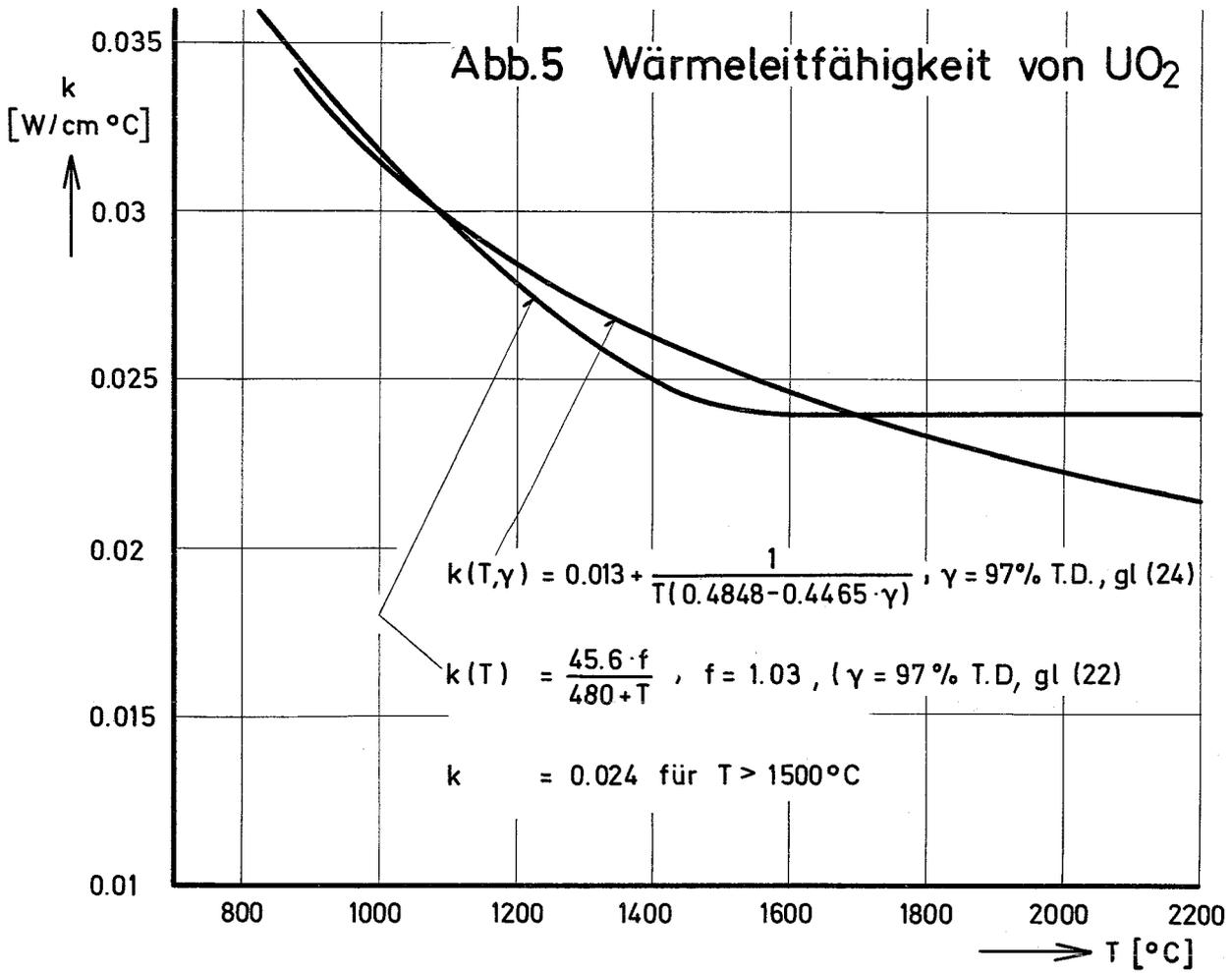


Abb.7 Temperaturverteilung für verschiedene elektrische Widerstände

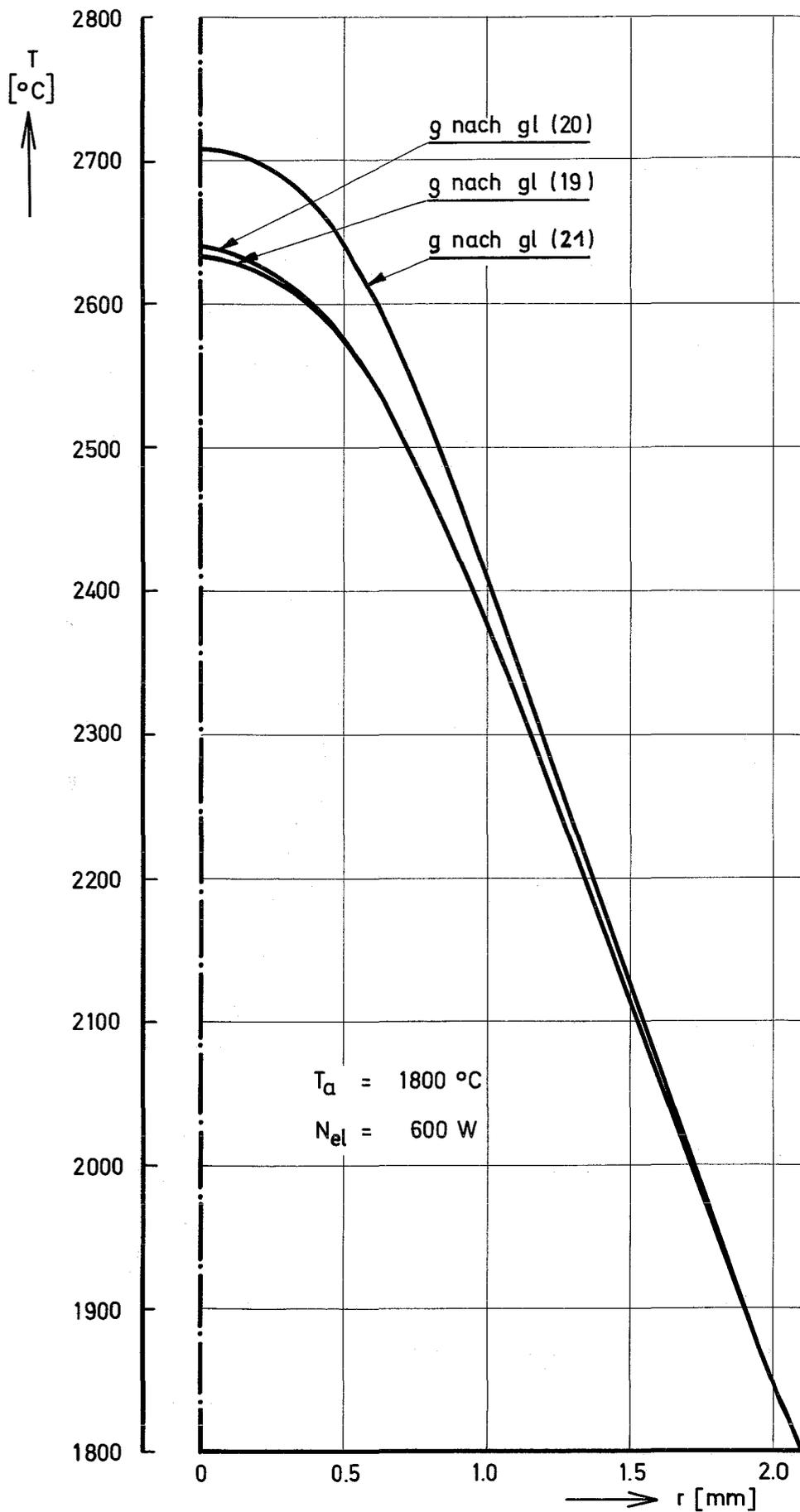
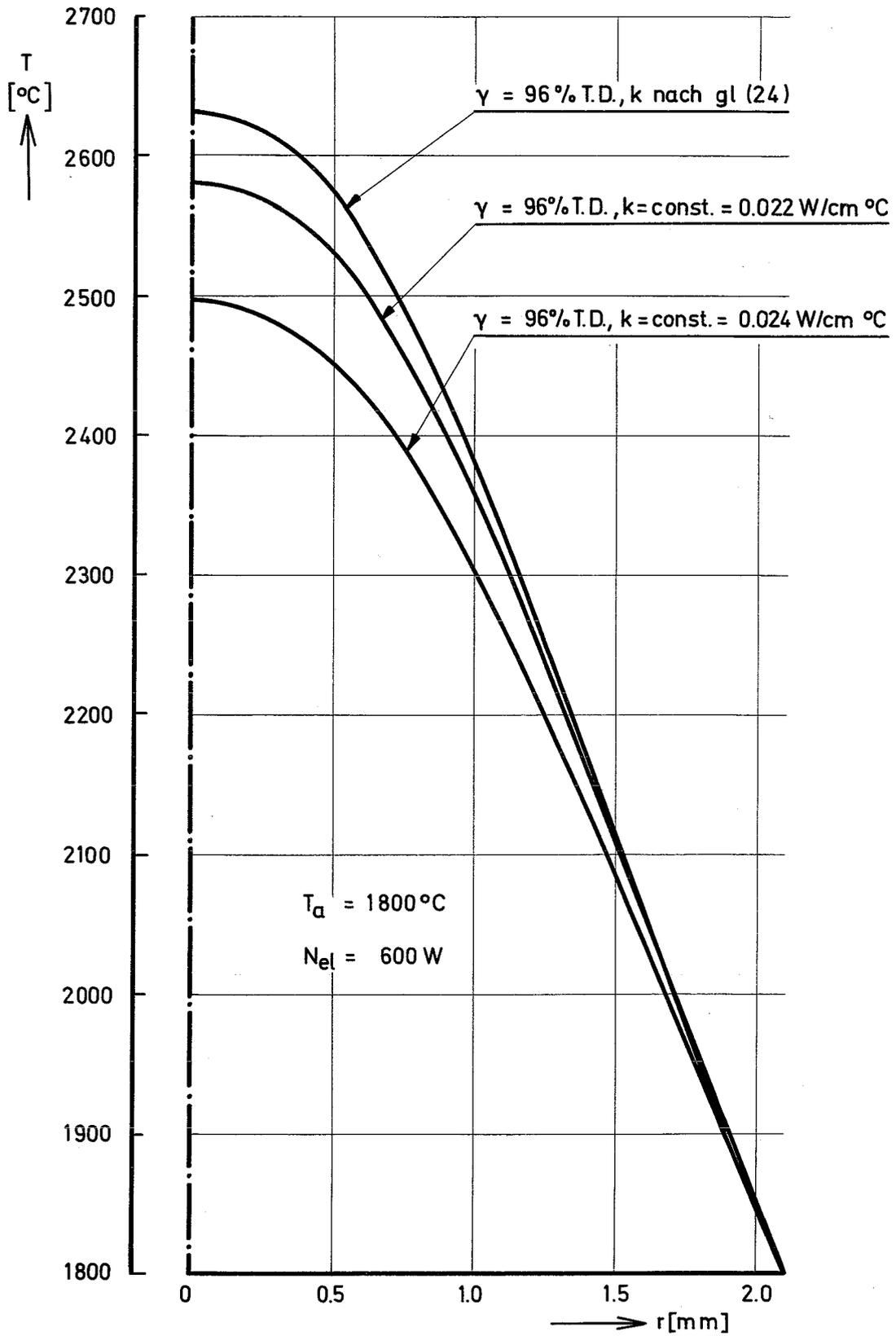


Abb.8 Temperaturverteilung im UO₂ - Brennstab



Eine Möglichkeit dazu bietet die recht gut bekannte Schmelztemperatur von UO_2 . Wird laut Rechnung für einen bestimmten stationären Zustand in der Probenachse Schmelztemperatur erreicht, so kann dies leicht durch Radialschliffe nachgeprüft werden. In bestimmtem Maße kann die berechnete Temperaturverteilung auch experimentell durch direkte Temperaturmessung an der Probe verifiziert und u. U. korrigiert werden. Auf diese Möglichkeiten wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

2. 3. Vergleich des elektrischen und des nuklearen UO₂-Brennstabes

Wie in der Einleitung dargelegt wurde, soll der elektrisch direkt geheizte UO₂-Brennstab u. a. Aussagen über das Versagen von UO₂-Brennstäben bei Störfällen und zum Verhalten des Brennstabes unter stationären Bedingungen des Reaktorbetriebes liefern.

Um diese Aussagen machen zu können, ist zunächst ein Vergleich zwischen elektrisch und nuklear stationär betriebenen Brennstab erforderlich.

Die Temperaturverteilung zwischen nuklear und elektrisch betriebenem Brennstab ist von vornherein zunächst verschieden. Dies beruht auf den unterschiedlichen Wärmequell-dichte-Verteilungen. Die Wärmequell-dichte-Verteilung im nuklearen Brennstab ist abhängig vom Neutronenfluß im Reaktor. In einem schnellen Reaktor ist die Annahme einer radialunabhängigen Wärmequell-dichte q_0 gerechtfertigt, in thermischen Reaktoren hingegen ist die Wärmequell-dichte radialabhängig und je nach Geometrie der Brennelement-Zelle verschieden. Der folgende Vergleich befaßt sich mit der radialunabhängigen Wärmequell-dichte q_0 in schnellen Reaktoren, ein Vergleich mit Brennstäben thermischer Reaktoren wird in einer späteren Arbeit durchgeführt.

Da die nuklearen Brennstäbe grundsätzlich gekühlt sind, gelten die folgenden Überlegungen auch für einen gekühlten elektrisch stationär betriebenen Brennstab.

In Abb. 9 ist die Temperaturverteilung für konstante Wärmequell-dichte q_0 (für schnelle Reaktoren) und für radialabhängige Wärmequell-dichte $q_{e1}(r)$ aufgetragen. Die Berechnung von $T(r)$ für q_0 wird nach folgendem Formalismus durchgeführt [7]:

$$\pi r_p^2 \cdot q_0 = 4\pi \int_{T_a}^{T_i} k(T) dT, \quad (25)$$

mit $k(T)$ nach Gl. (24),

bzw.

$$\pi r^2 q_0 = 4\pi \int_{T(r)}^{T_i} k(T) dT \quad (26)$$

Abb.9 Temperaturverteilung im elektrischen und nuklearen Brennstab bei gleicher Stableistung und gleicher Oberflächentemp. ($\chi = 200 \text{ W/cm}$, $T_a = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)

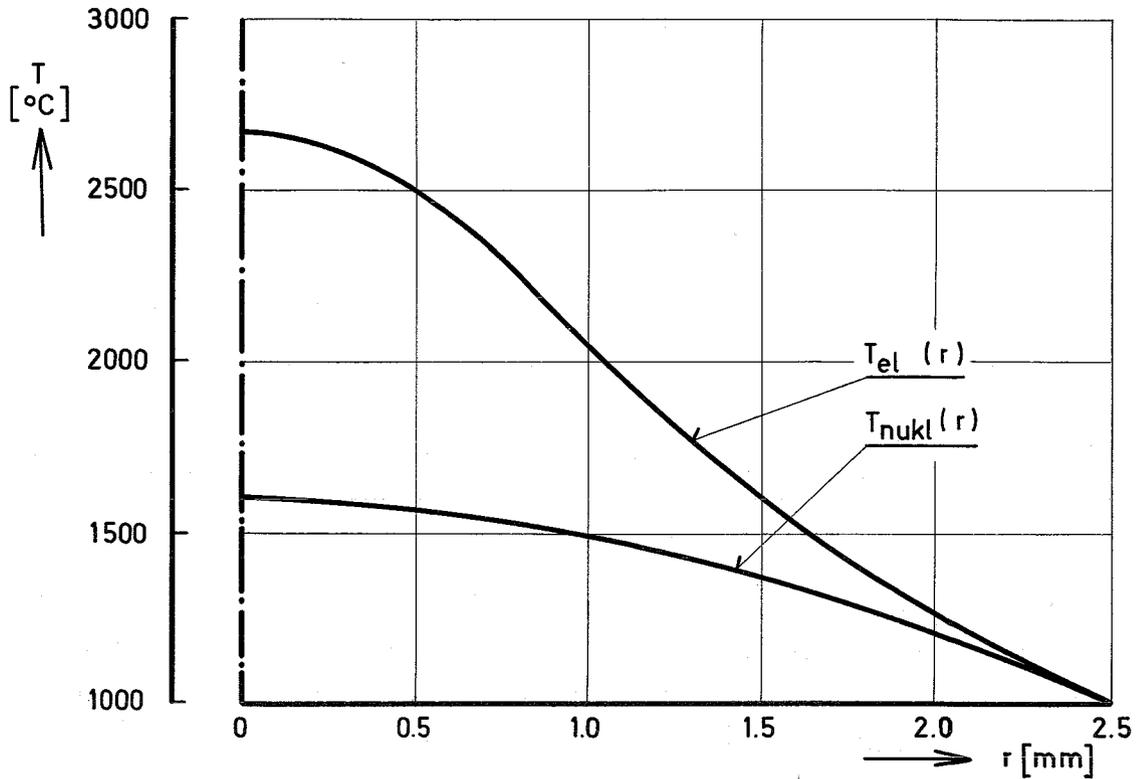
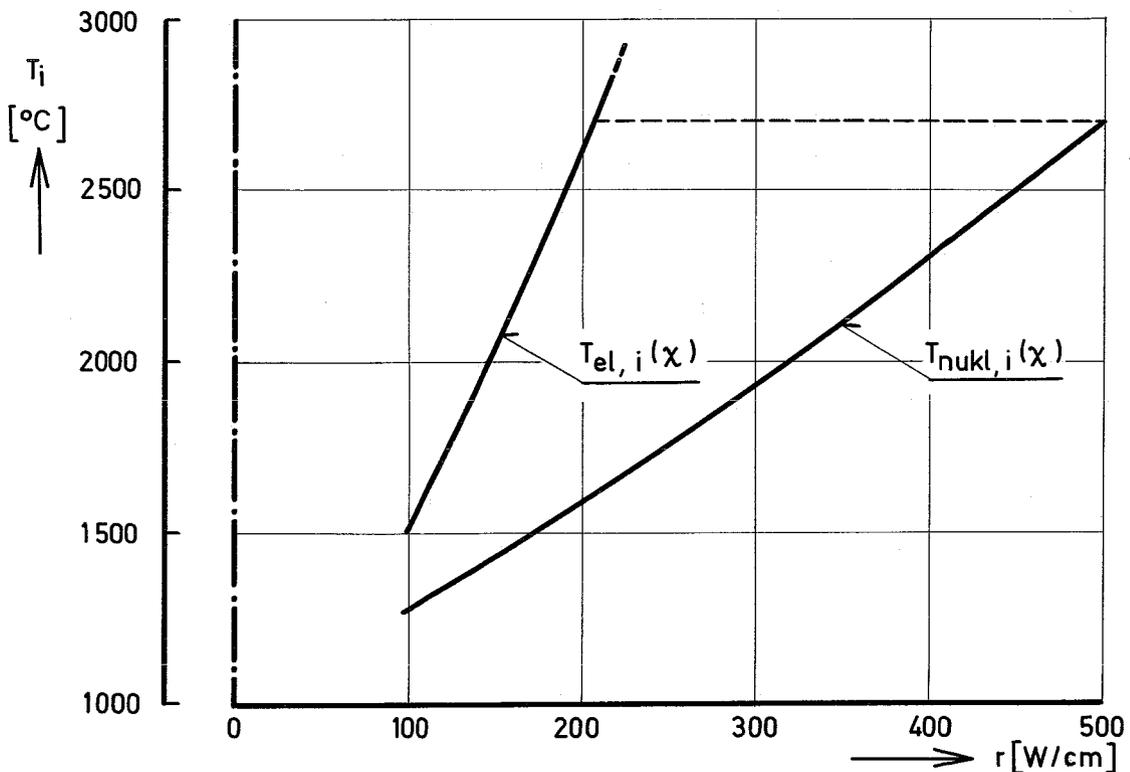


Abb.10 Zentraltemperatur des elektrischen und nuklearen Brennstabs als Funktion der Stableistung bei konstanter Oberflächentemperatur ($T_a = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)



Es bedeutet r_p = Probenradius
 r = Radius, der der Temperatur $T(r)$ zugeordnet ist.

Aus (24), (25) und (26) folgen die transzendenten Gleichungen zur Bestimmung von T_i und $T(r)$:

$$\frac{\chi_o}{4\pi \cdot 0,013} + T_a + \frac{\ln T_a}{0,013(0,4848-0,4465 \cdot \gamma)} = T_i + \frac{\ln T_i}{0,013(0,4848-0,4465 \cdot \gamma)} \quad (27)$$

und

$$-\frac{r^2 \chi_o}{4\pi r_p^2 \cdot 0,013} + T_i + \frac{\ln T_i}{0,013(0,4848-0,4465 \cdot \gamma)} = T(r) + \frac{\ln T(r)}{0,013(0,4848-0,4465 \cdot \gamma)}, \quad (28)$$

die mit einem digitalen Rechenprogramm gelöst werden. Hierbei wird die gleiche Aufteilung der Probe in Koaxialzylinder wie bei der Berechnung der Temperaturverteilung im elektrisch geheizten UO_2 -Brennstab verwendet, um einen unmittelbaren Vergleich durchführen zu können. Die Stableistung χ_o ist mit der Wärmequellldichte q_o durch folgende Gleichung verknüpft:

$$\chi_o = q_o \cdot \pi r_p^2 \quad (29)$$

Der in Abb. 9 dargestellten Verteilung für den elektrisch geheizten Stab liegt Gl. (20) für den spezifischen elektrischen Widerstand zugrunde. Der Durchmesser des hier betrachteten UO_2 -Brennstabes beträgt 5,1 mm. Die Brennstoffoberflächentemperaturen werden für beide Stäbe mit $1000^\circ C$ angenommen.

In Abb. 9 sind Oberflächentemperatur und Stableistung in beiden Fällen gleich. Im Sinne einer Anpassung der beiden Temperaturverteilungen $T_{el}(r)$ und $T_{nukl}(r)$ sollen nun Außen- und Innentemperatur des nuklear und elektrisch stationär betriebenen UO_2 -Stabes gleichgesetzt werden. Eine Parameterrechnung (Abb. 10) zeigt die Innentemperatur T_i als Funktion der Stableistung. Die Außentemperatur sowie die Probengeometrie wird konstant gehalten. Aus Abb. 10 folgt die im elektrischen Fall einzustellende Stableistung χ_{el} für eine der Stableistung χ_{nukl} ent-

Abb.11 Temperaturverteilung im elektrisch und nuklear betriebenen UO_2 - Brennstab bei gleicher Zentral - und Oberflächentemperatur

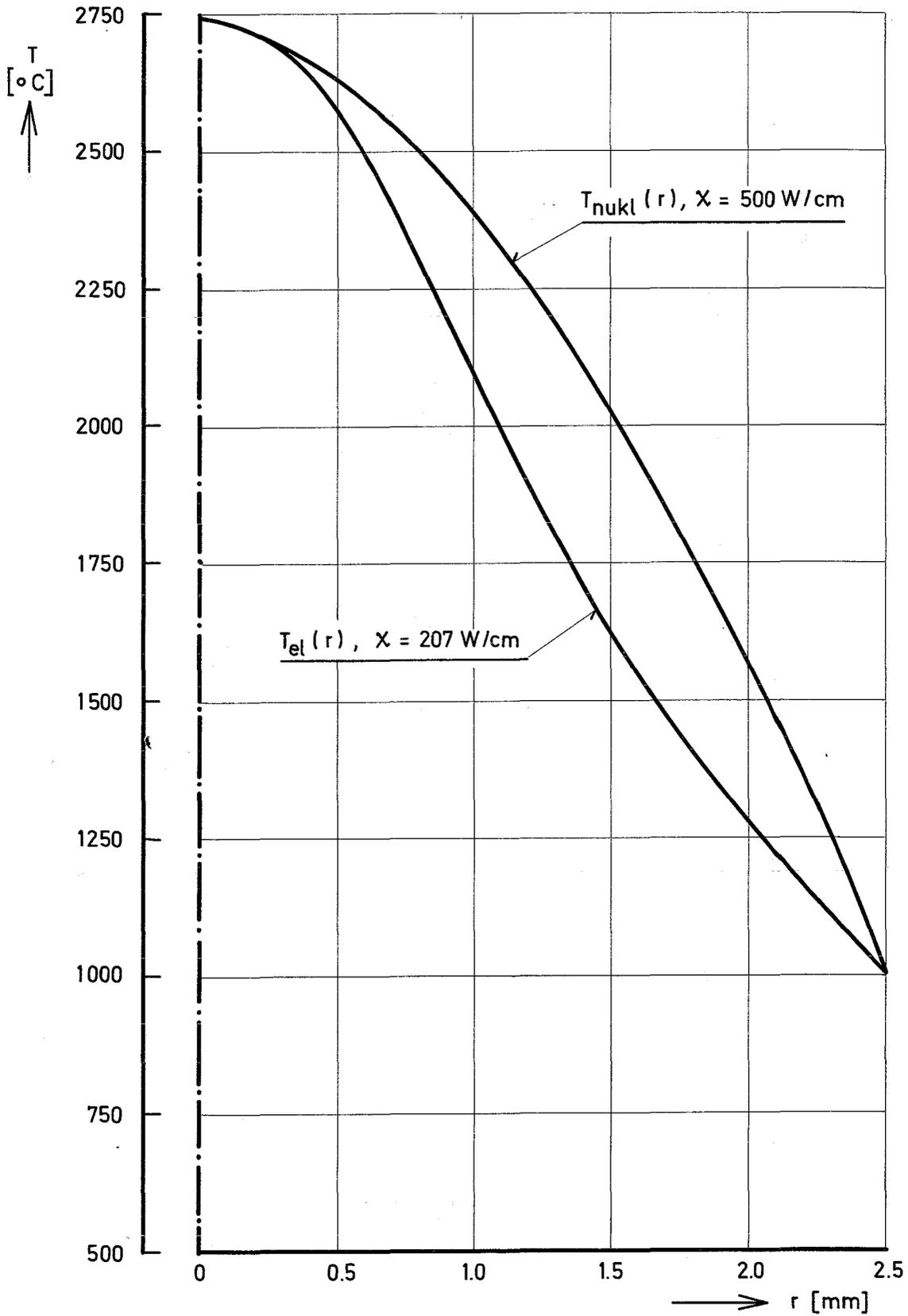


Abb.12 Anpassung der Temperaturverteilung des elektrisch betriebenen UO_2 -Stabes an die des nuklearen Stabes mit konstanter Wärmequell-dichte

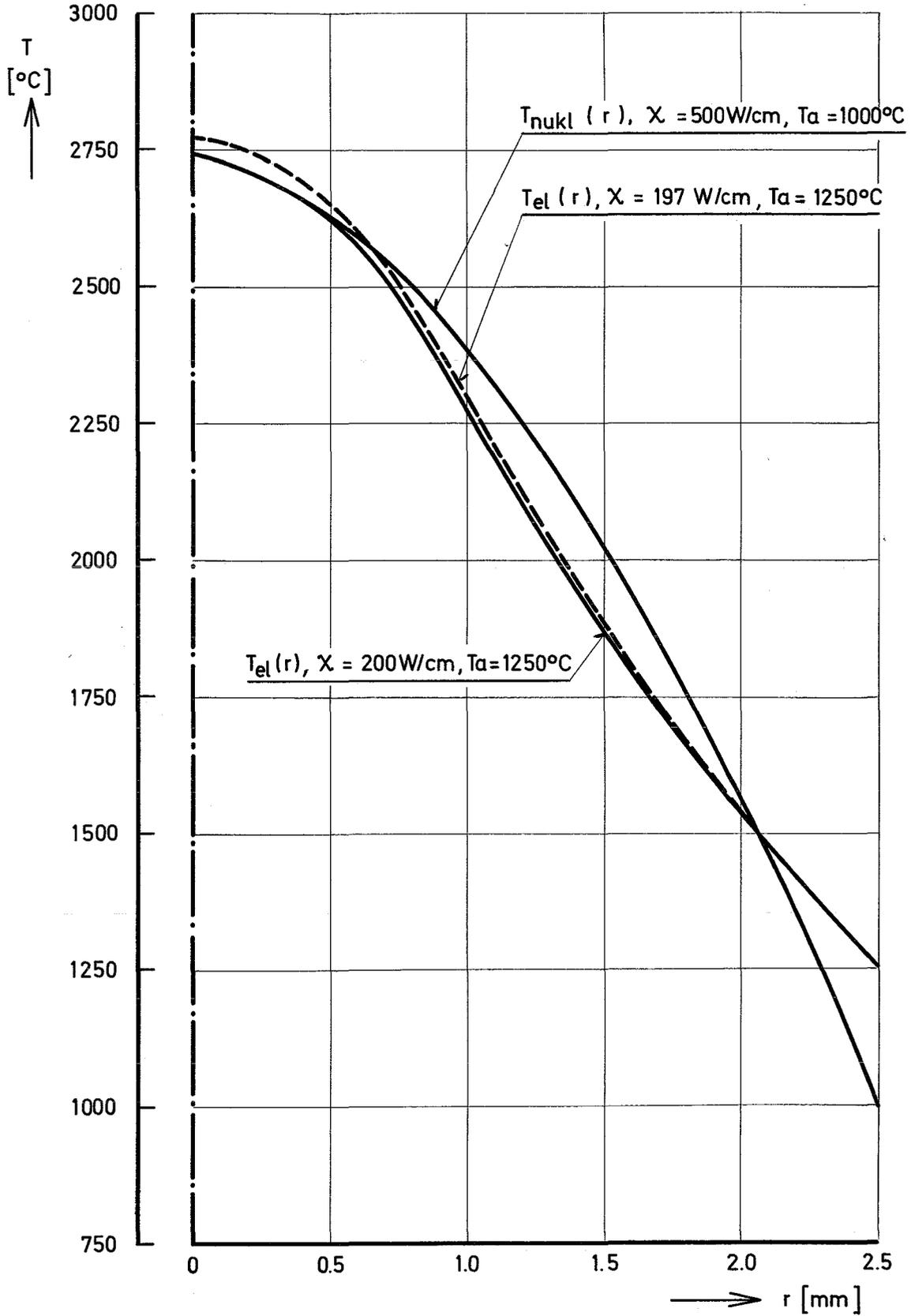


Abb.13 Anpassung der Temperaturverteilung des elektrisch betriebenen UO_2 -Stabes an die des nuklear betriebenen mit konstanter Wärmequell-dichte

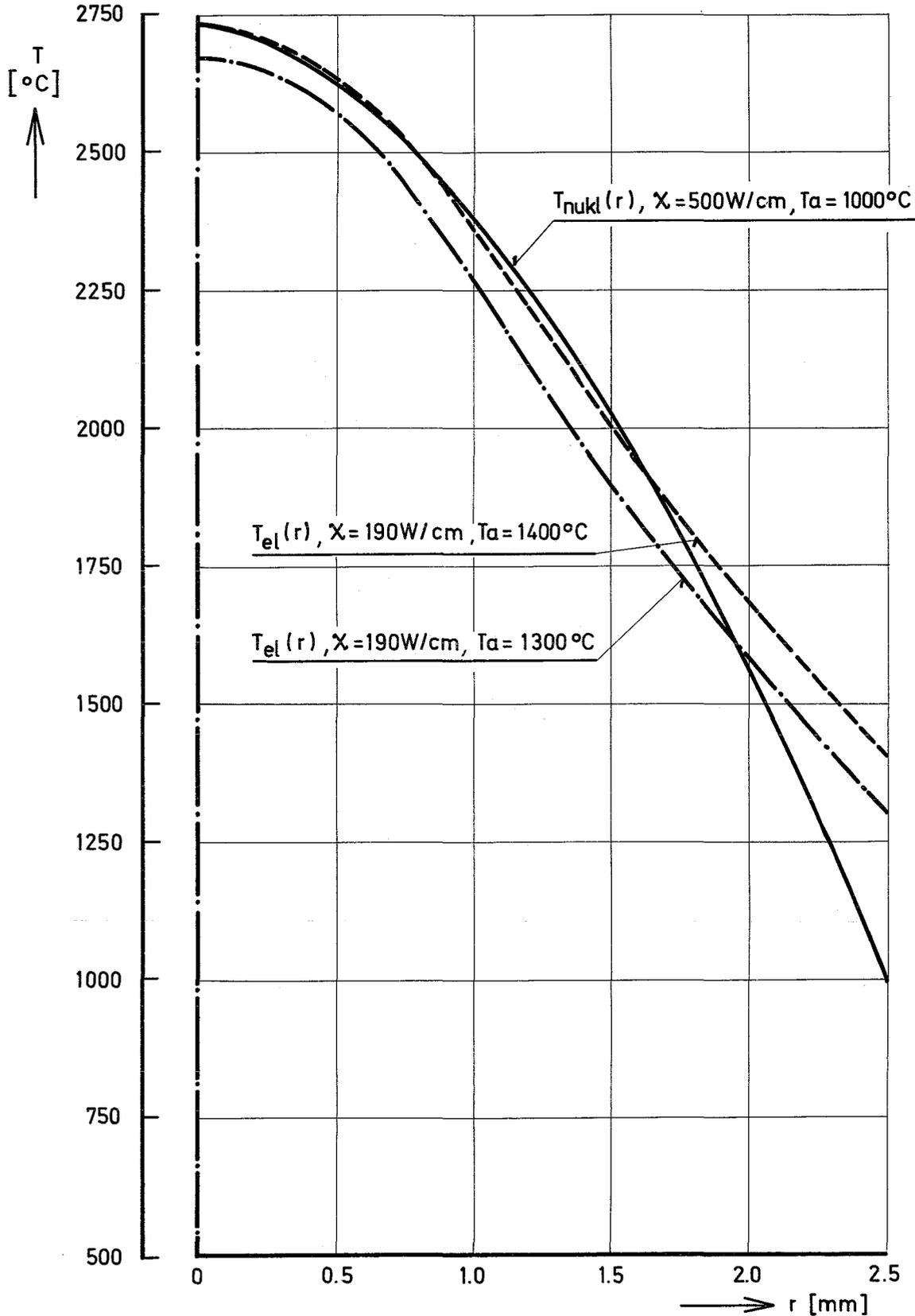
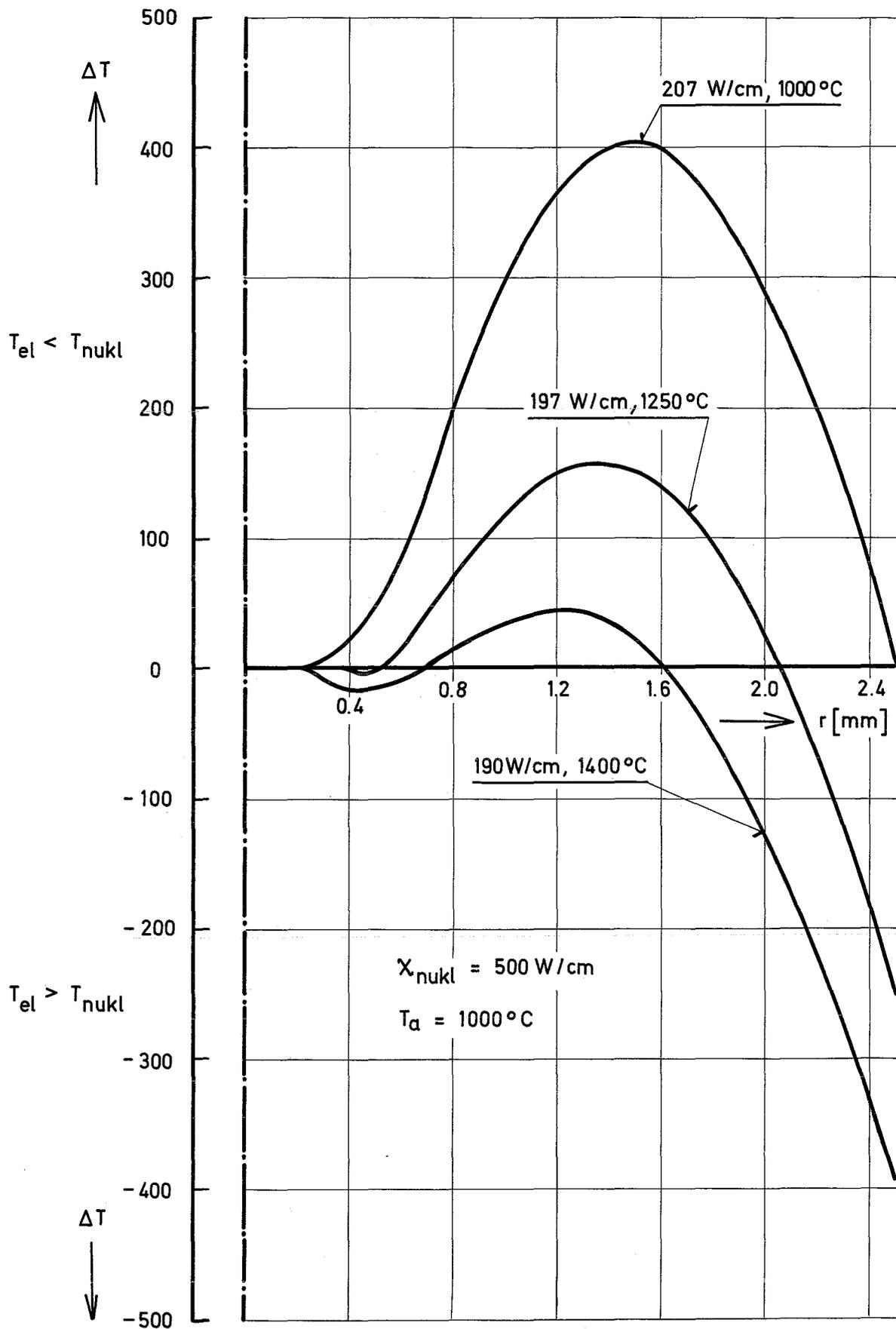


Abb. 14 Temperaturdifferenzen in den Temperaturverteilungen des elektrisch und nuklear betriebenen UO_2 - Stabes



sprechende Zentraltemperatur T_i . Die den Stableistungen χ_{el} und χ_{nukl} entsprechenden Temperaturverteilungen sind in Abb. 11 dargestellt. Die Abweichungen sind noch immer beträchtlich, sie betragen einige hundert Grad über ein recht großes Radiusintervall für den Fall $T_i^{nukl} = T_i^{el}$ und $T_a^{nukl} = T_a^{el}$. Da aber die Außentemperatur zunächst nicht wesentlich für das Stabverhalten verantwortlich ist (hierbei soll von den Forderungen an die Brennstoffoberflächentemperatur auf Grund des Hüllmaterials abgesehen werden), sondern lediglich die hohen Temperaturen im Stabinnern für Strukturänderungen zuständig sind, ist es wichtig, die Temperaturverteilung des elektrisch betriebenen Brennstabs der des nuklearen Brennstabs im Hinblick auf die Zentraltemperatur und die Flanke richtig anzupassen. Eine Reihe von Rechnungen zeigt, daß diese Anpassung gut möglich ist, wenn man die Stableistung χ_{el} und die Oberflächentemperatur geeignet variiert (Abb. 12 und 13).

In Abb. 12 beträgt die Außentemperatur für den nuklearen Stab 1000°C , für den elektrisch betriebenen 1250°C . Die Axialtemperatur von 2740°C des nuklearen Stabes ($\chi = 500 \text{ W/cm}$) wird in einem elektrisch beheizten Stab mit einer Stableistung von 197 W/cm mit obiger Oberflächentemperatur erreicht. Durch Erhöhung der Stableistung bei festgehaltenem T_a wird die Flanke steiler, damit steigt die Zentraltemperatur. Durch Erhöhung der Oberflächentemperatur auf 1400°C bei einer Stableistung von 190 W/cm wird die Temperaturverteilung des elektrischen Stabes der des nuklearen recht gut im Inneren angepaßt (Abb. 12). Durch Verschiebung der Oberflächentemperatur erreicht man bei konstanter Stableistung eine ungefähre Parallelverschiebung der Temperaturverteilung. Der Begriff der optimalen Anpassung der Temperaturverteilungen muß also in diesem Fall übergehen in die optimale radialabhängige Anpassung. Um dies deutlich zu machen, sind in Abb. 14 die Temperaturunterschiede der Temperaturverteilungen des nuklear und elektrisch betriebenen UO_2 -Stabes über dem Radius aufgetragen. Hierbei handelt es sich um einen Vergleich der elektrisch betriebenen Stäbe mit 207 W/cm , 1000°C (Abb. 11); 197 W/cm , 1250°C (Abb. 12) sowie 190 W/cm , 1400°C (Abb. 13) mit dem nuklear betriebenen Brennstab mit 500 W/cm sowie 1000°C Oberflächentemperatur. Einer relativ guten Anpassung der unteren Kurve im Bereich $0 \leq r \leq 1,8 \text{ mm}$ folgt eine der erhöhten Oberflächentemperatur (1400°C gegenüber 1000°C des nuklearen Stabes) entsprechende hohe Abweichungen im äußeren Probenbereich.

Dieselbe Art der Anpassung ist für Brennstäbe in thermischen Reaktoren, die im Gegensatz zum schnellen Reaktor eine ausgeprägte Wärmequellendichte besitzen, möglich, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht behandelt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß eine einfache Normierung über T_i oder T_a nicht unbedingt zu einer optimalen Anpassung führt. Vielmehr muß je nach dem zu untersuchenden Problem eine optimale Anpassung zunächst rechnerisch ermittelt werden. Für die Untersuchung der Porenwanderung ist beispielsweise die Anpassung der Temperaturgradienten erheblich wichtiger als die der Axial- oder Oberflächentemperatur, wohingegen im Falle der Untersuchung eines Versagensmechanismus' das wichtigere Kriterium T_i oder T_a sein dürfte.

2. 4. Der Einfluß nuklearer und thermischer Effekte auf das Brennstabverhalten

Die bisherigen Überlegungen zur Simulation des nuklear betriebenen Reaktorbrennstabes durch den direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstab gehen vom homogenen, unbestrahlten Stab für den nuklearen Fall aus, so daß sich beispielsweise auch die Anpassung der Temperaturverteilung auf den Anfangszustand im Reaktor bezieht. Nach den in [4] zusammengestellten Untersuchungen ändern sich thermische Brennstoffparameter wie die Wärmeleitfähigkeit k und Schmelztemperatur T in Abhängigkeit von der Betriebszeit des Reaktorbrennstabes. Ein Teil dieser Änderungen ist auf die Neutronen- und Strahlungs-dosis sowie auf die Spaltprodukterzeugung zurückzuführen. Ein anderer Teil beruht jedoch lediglich auf thermischen Effekten, z. B. Korngrößenwachstum, hervorgerufen durch hohe Temperaturen, Porenwanderung auf Grund von hohen Temperaturgradienten, Änderung der Dichteverteilung sowie der Bildung von Säulenkristallen. Diese rein thermischen Effekte lassen sich mit der Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes nachbilden. Auf diese Weise ist es möglich, den Einfluß der thermischen Effekte von den nuklearen Effekten getrennt zu untersuchen.

Die Methode ist besonders geeignet, thermodynamische Vorgänge (cycling) und die damit verbundenen Materialeffekte (thermal ratcheting) unabhängig von nuklearen Einflüssen zu simulieren.

Der Einfluß von Spaltprodukten auf die thermischen Eigenschaften des UO_2 -Brennstabes kann durch geeignete Zugabe von Spaltproduktelementen zu dem Brennstabmaterial in gewissem Umfang simuliert werden. Außerdem ist es möglich, das Verhalten von Spaltprodukten unter einem hohen Temperaturgradienten zu untersuchen. Grundsätzlich können Brennstäbe mit Spaltproduktverteilung aus Reaktoren zusätzlich einer elektrischen Behandlung unterzogen werden. Weiterhin gestattet die Methode die Untersuchung festkörperphysikalischer Vorgänge wie Plastizität und Wärmeausdehnung von UO_2 unter nahezu beliebig einstellbaren Temperaturgradienten.

Aus diesen Bemerkungen kann man ableiten, daß der Nachteil, die nuklearen Effekte nicht simulieren zu können, den Vorteil mit sich bringt, erstmals thermische und nukleare Effekte voneinander trennen und damit zum Verständnis der elementaren Prozesse beitragen zu können.

Abb. 15

Laborversuchsstand
mit geheiztem UO₂-Brennstab

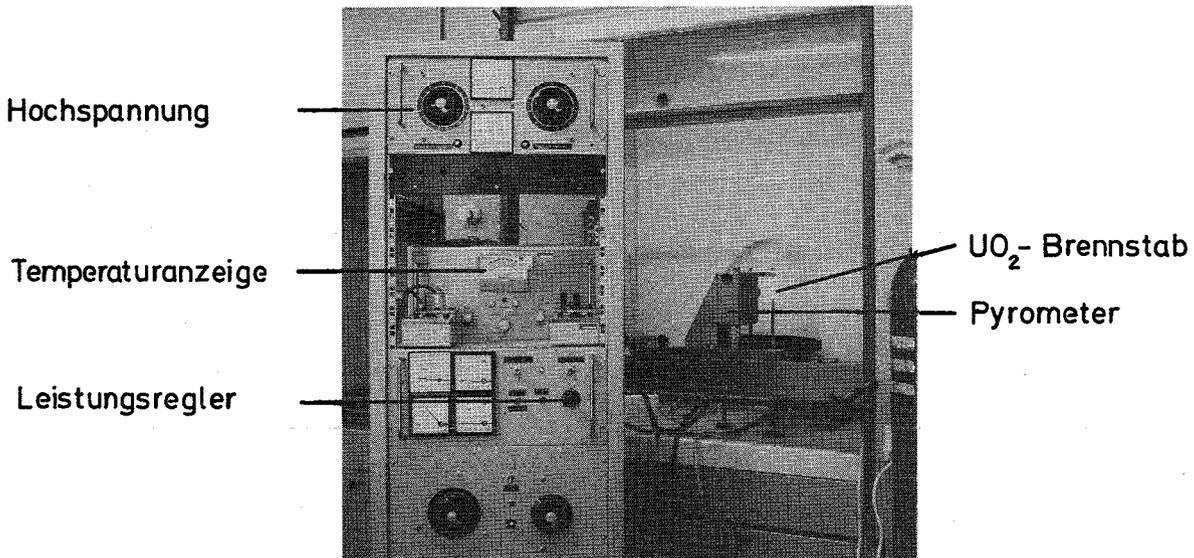
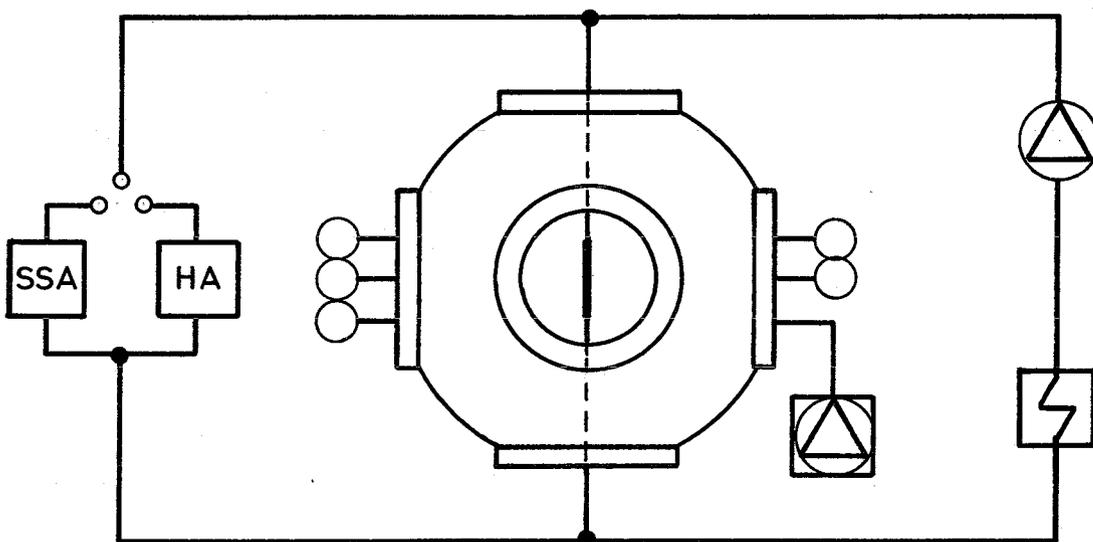


Abb. 16

Prinzipskizze des
EPBF - Versuchstandes
mit He-Gaskreislauf etc.



SSA - Stoßstromanlage

HA - Heizaggregat

3. Der Betrieb des UO_2 -Brennstabes

3. 1. Versuchsaufbau

Um den direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstab betreiben zu können, sind an den Versuchsaufbau einige Forderungen zu stellen. Die wichtigsten sind neben den Anforderungen an den Brennstab selbst die Atmosphäre, in der der UO_2 -Brennstab betrieben wird, die Halterung und die Kühlung.

Die Aufheizung von UO_2 muß zur Vermeidung von Oxydation des Brennstoffs zu höheren Oxyden in einer inerten Atmosphäre durchgeführt werden. Der UO_2 -Brennstab kann daher in einem mit Stickstoff oder Helium gefüllten Gefäß betrieben werden. Da beim nuklearen Brennstab meistens eine Helium-Atmosphäre innerhalb der Hülle vorliegt, ist es zweckmäßig, die Simulation mit Helium vorzunehmen.

Die hohe Temperatur des UO_2 -Brennstabes erfordert geeignete Vorrichtungen zur Halterung des UO_2 -Brennstabes. Je nach den Anforderungen werden Stahl- oder Tantal-Elektroden verwendet. Grundsätzlich ist es so möglich, auch Bündel von UO_2 -Brennstäben in guter Simulation der Bündel-Geometrie im Reaktorkern anzuordnen. Auch die relativ dicht angeordneten Stabbündel in schnellen Reaktoren [8] lassen sich nachbilden.

Bei den bisher durchgeführten Versuchen mit einzelnen UO_2 -Brennstäben wurde die stationäre Leistung durch Strahlung, natürliche Konvektion und in geringem Maße durch die Wärmeleitung über die Elektroden abgeführt. In Abb. 15 ist ein dermaßen stationär geheizter UO_2 -Brennstab in einem Laborversuch dargestellt. Dabei können nur in begrenztem Umfang die Stableistungen, Temperaturen und Temperaturgradienten eingestellt werden, die dem nuklearen Brennstab entsprechen (siehe Kap. 2). Zur richtigen Einstellung von Zentral- und Oberflächentemperaturen, wie sie dem Reaktorbetrieb entsprechen, muß der UO_2 -Brennstab gekühlt werden. Dies geschieht durch einen Helium-Gaskreislauf (Abb. 16).

Ein gewisses Problem stellt die Simulation der Brennstab-Hülle dar, da die Metallhülle vom Brennstoff elektrisch getrennt angeordnet sein muß. Durch geeignete Isolation und Geometrie kann jedoch auch die Hülle in gewissem Umfang simuliert werden.

3.2. Elektrische Aufheizung der UO_2 -Proben

Urandioxid ist in kaltem Zustand ein Nichtleiter. Infolge seiner negativen Widerstandscharakteristik wird es bei hohen Temperaturen leitfähig. Um UO_2 in der oben beschriebenen Versuchsanordnung leitfähig zu machen, bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Hochheizen durch Vorheizen mit einem Strahlungssofen
- Hochheizen durch Anlegen einer Hochspannung

Im ersten Fall wird um den UO_2 -Brennstab ein beweglicher Strahlungssofen gelegt, der die Probe auf ca. $800 - 1000^\circ\text{C}$ hochheizt. Die Probe hat hierbei zunächst eine konstante radiale Temperatur bei Einschalten der direkten elektrischen Heizung.

Im zweiten Fall wird an die kalte Probe eine regelbare Spannung gelegt. Für typische Probengeometrien von 40 mm Länge und 5 mm \varnothing benötigt man dabei eine maximale Spannung von ca. 0,8 - 1,2 kV. Die Spannung kann entsprechend der Kennlinie (I, U) für Heißeiter (Abb. 17) kontinuierlich hochgefahren werden, bevor der Strom exponentiell anwächst. Bei Erreichen einer gewissen Stromstärke wird dann wie im ersten Fall auf einen geregelten Stromkreis umgeschaltet, der die weitere

Heizung übernimmt. Dieser zweite Heizvorgang erlaubt damit die Regelung von Zimmertemperatur bis Endtemperatur auf rein elektrischem Wege und gestattet eine Automatisierung, die den Aufheizvorgang reproduzierbar macht.

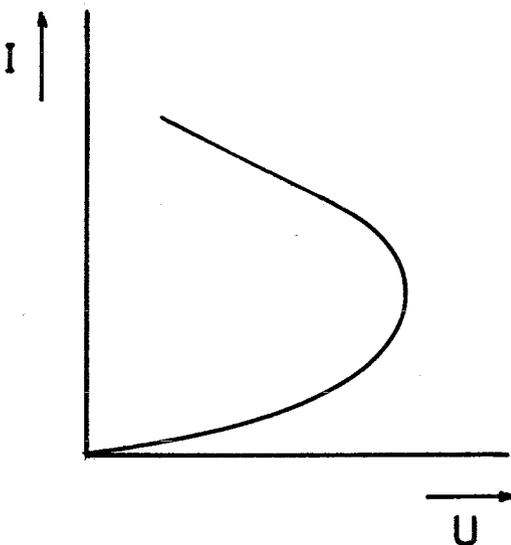


Abb. 17

Der stationäre Heizbetrieb muß mit einem geregelten Stromkreis durchgeführt werden, da auf Grund der negativen Widerstandscharakteristik der Strom unkontrolliert hochlaufen (elektrische Exkursion) und die Probe zerstören würde. Zur Unterdrückung der elektrischen Exkursion während des Aufheizvorganges

wird daher eine Leistungsregelung durchgeführt. Mittels einer Potentiometer-gesteuerten Phasenbrücke wird ein Phasenanschnitt der zum Aufheizen benutzten 50 Hz-Netzspannung bewirkt, der von $0 - 180^\circ$ einstellbar ist. Ein nachgeschalteter Impulsformer bereitet die Zündimpulse für zwei antiparallelgeschaltete Thyristoren, die den Strompfad öffnen bzw. schließen [9]. Auf diese Weise kann die UO_2 -Probe stationär mit einer konstanten Leistung geheizt werden.

Aus einem beliebigen stationären Zustand heraus können der Probe über eine Kondensatorbank Stoßströme zugeführt werden, um auf diese Weise Reaktorexkursionen in UO_2 -Brennstäben zu simulieren. Durch geeignete Wahl der Induktivitäten von $10 \mu H$ bis $40 mH$ läßt sich die elektrische Energie aus den Kondensatoren in Zeitbereiche von ca. $100 \mu sec$ bis etwa $100 msec$ in die Probe einbringen. Die Größe der wirksamen Energien hängt vom Wirkungsgrad des Gesamtsystems sowie von der Entladefrequenz der Stoßstromanlage ab. Bei den bisher verwendeten Proben lassen sich einige kWsec bei Entladefrequenzen von ca. $40 Hz$ in einem UO_2 -Stab applizieren.

Die Methode der direkten elektrischen Heizung gestattet die Registrierung der Temperatur-Geschichte eines Brennstabs, die in einem Reaktor in dem Maße nicht möglich ist. Mit Hilfe einer Heizautomatik ist die vollständige Darstellung des Verhaltens von UO_2 -Stäben in einem hohen Temperaturgradienten unter stationären und dynamischen Bedingungen möglich. Neben dem reproduzierbaren Aufheizvorgang kann die Abkühlung des Brennstabes in gleicher Weise kontrolliert werden, welches ebenfalls in einem Reaktor nicht ohne weiteres möglich ist.

3. 3. Meßtechnik

Die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes gestattet die direkte Messung von Größen, die die Temperaturverteilung als wichtigstes Charakteristikum des stationär oder dynamisch betriebenen Stabes erzeugen bzw. beeinflussen. Bei diesen Größen handelt es sich um Strom, Spannungsabfall an der Probe, in der Probe applizierter Leistung und Energie sowie der Brennstoffoberflächentemperatur. Neben diesen Versuchsparametern ist die Temperaturverteilung direkt abhängig von der Wärmeleitfähigkeit, dem spezifischen elektrischen Widerstand, der bereits implizit in die Größen Strom, Spannung bzw. Leistung eingeht, sowie den keramischen Eigenschaften des Brennstoffs (Korngrößen-, Porenverteilung und deren Änderungen im Temperaturfeld) (vergl. Kap. 4. 2.).

Die Messung der elektrischen Größen im stationären Heizbetrieb wird mit üblichen konventionellen Meßgeräten durchgeführt. Wird jedoch der Probe mittels einer Stoßstromentladung Energie zugeführt (vergl. Kap. 4.4.2.), so müssen auf Grund der dabei auftretenden hohen Ströme und Spannungen andere Meßmethoden angewandt werden. Der Strom wird mit Hilfe einer Rogowskispule mit nachgeschaltetem passiven Integrierglied, der Spannungsabfall an der Probe über einen Spannungsteiler am Kondensatorausgang unter Berücksichtigung des induktiven und ohmschen Anteils der Stoßstromanlage sowie der Zuführungskabel gemessen $\int 10 \text{ } \overline{\text{7}}$. Diese Werte sowie die daraus durch analoge Multiplikation bzw. Integration entstehende Leistung bzw. Energie werden über einen Kathodenstrahloszillographen registriert.

Die Messung der Probenoberflächentemperatur wird mit einem photoelektronischen SEV-Spektralpyrometer durchgeführt. Schnelle Änderungen dieser Temperatur im Verlauf einer Stoßstromentladung werden mit einem Radiometer mit InSb-Detektor geringer Ansprechzeit gemessen.

4. Anwendungen

4. 1. Untersuchung der Temperaturverteilung

Die experimentelle Bestimmung der Temperaturverteilung in einem UO_2 -Brennstab mit genau bestimmbaren Brennstabparametern wie Oberflächentemperatur und Stabileistung ist im Reaktorbetrieb nicht ohne weiteres möglich. Im Rahmen der Vergleichsmöglichkeit zwischen elektrisch und nuklear betriebenen UO_2 -Brennstab ist durch die Methode des elektrisch direkt geheizten UO_2 -Brennstabs die Möglichkeit gegeben, die radiale und axiale Temperaturverteilung im zylindrischen UO_2 -Brennstab experimentell zu bestimmen.

Die radiale Temperaturverteilung kann durch geeignete Radial- oder Axialbohrungen direkt gemessen werden. Hierbei ist zu beachten, daß die Bohrung die Widerstands- und Wärmeleitverhältnisse lokal stört. Bei größeren Probedurchmessern und kleinen Bohrungen wird jedoch der Einfluß der Störung gering werden.

Die radiale Temperaturverteilung wird bei längerem Betrieb durch Strukturänderungen im Probeninneren (Kornwachstum, Dichteänderung) beeinflusst werden. Durch Versuche mit Brennzeiten, in denen sich solche Strukturänderungen ausbilden können, kann der Einfluß dieser Effekte auf die Temperaturverteilung durch Messung der zeitlichen Temperaturänderung untersucht werden.

Die Messung der axialen Temperaturverteilung bietet keine wesentlichen Schwierigkeiten. Durch Entlangfahren des Pyrometermeßkopfes an der Probe kann diese Temperaturverteilung unmittelbar gemessen werden. Weiterhin erlauben mit Thermoelementen ausgestattete Elektroden die Messung des Temperaturgradienten zwischen Probe und Elektroden. Mit Hilfe dieser Daten ist dann neben der Berechnung der radialen auch die der axialen Temperaturverteilung möglich.

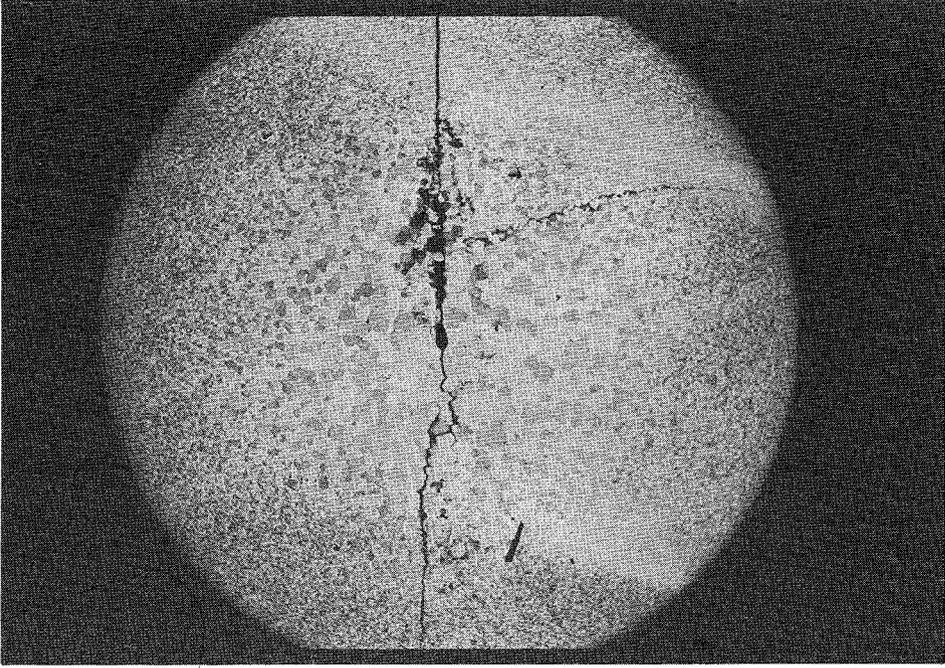
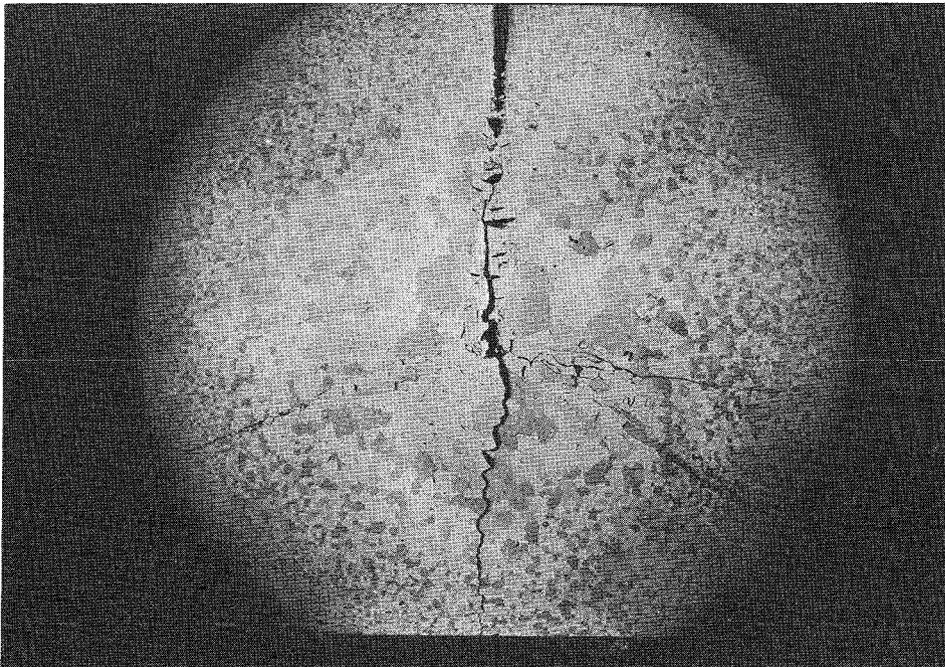


Abb. 17

Abb. 18



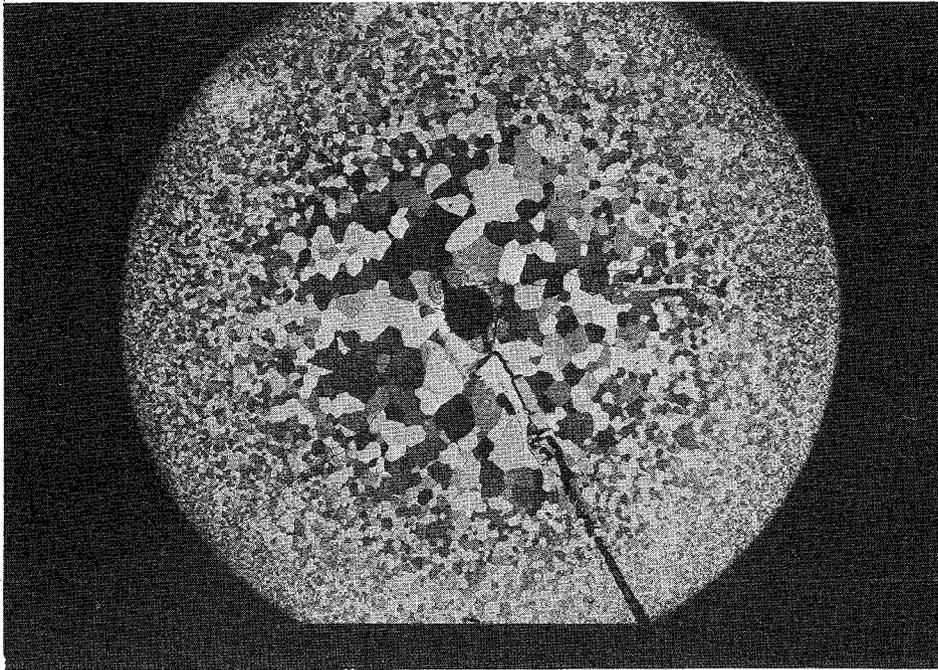
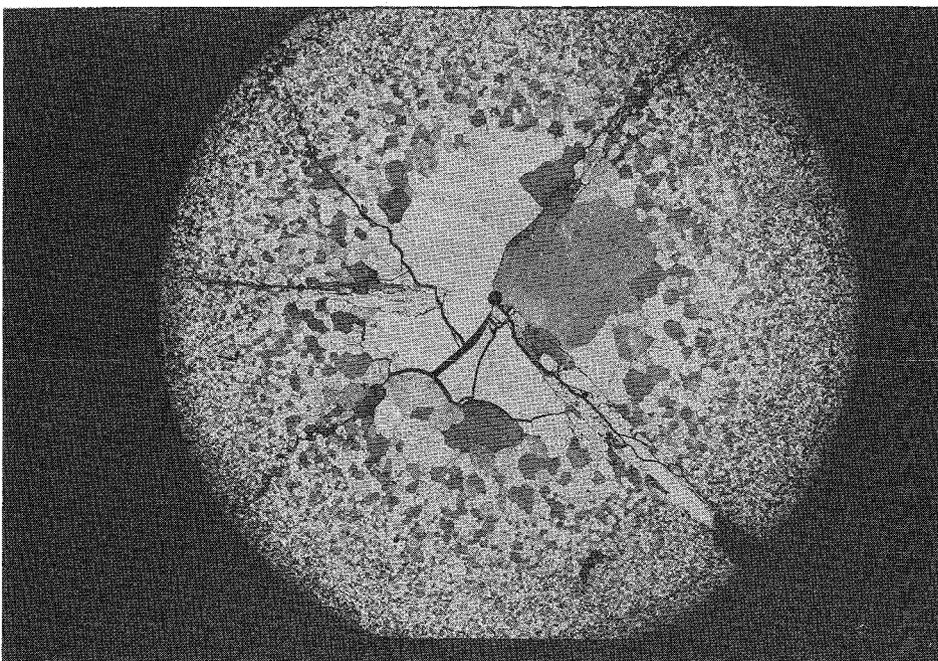


Abb. 19

Abb. 20



4. 2. Untersuchung der temperaturabhängigen Brennstoffstruktur und Brennstoffeigenschaften

Auf Grund der reinen thermischen Belastung des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes können erstmals Untersuchungen über den Einfluß hoher Temperaturgradienten, getrennt von nuklearen Effekten, mit entsprechenden Temperaturverteilungen durchgeführt werden.

Infolge der guten Reproduzierbarkeit des gesamten Heizprozesses können Untersuchungen der Änderung der Korngrößen- und Porenverteilungen in Abhängigkeit von Temperaturgradienten, Heizdauer etc. angestellt werden. Durch Auswertung von Radial- und Axialschliffen können die Strukturänderungen als Funktion der Versuchsparameter bestimmt werden. Die Einfachheit der Methode erlaubt die schnelle Durchführung von Versuchsserien.

Die folgenden Abbildungen zeigen Radialschliffe von stranggepreßten, zylindrischen UO_2 -Stäbchen von 4,2 mm \emptyset , 40 mm Länge, 96 % T.D., die in ersten Versuchen stationär geheizt wurden. Die stationäre Leistung wurde durch Strahlung und Naturkonvektion und in geringem Maße durch Wärmeleitung über die Elektroden abgeführt. Die Versuche wurden in Stickstoff durchgeführt.

Abb. 17 und 18 zeigen Schliffe von Versuchen gleicher Stableistung und gleicher Oberflächentemperatur (125 W/cm, 1750°C), jedoch unterschiedlicher Heizdauer (2 resp. 10 min). Abb. 18 zeigt deutlich das fortgeschrittenere Kornwachstum sowie die Bildung von Stengelkristallen. Weiterhin wurde der Beginn eines Zentralkanals gefunden (Abb. 19). Durch Erhöhung der Stableistung auf 160 - 165 W/cm (Oberflächentemperatur ca. 1800 - 1850°C) erreicht man Schmelztemperatur (ca. 2800°C) im Probeninneren (Abb. 20). Da bei diesen ersten Versuchen der Heizvorgang noch nicht automatisiert war, war eine gesteuerte Abkühlung nicht möglich. Die beobachteten Rißbildungen können so gedeutet werden. Die Automatisierung des gesamten Heiz- und Abkühlvorganges kann hier wegen der Möglichkeit exakter reproduzierbarer Temperaturen jedoch gezielt eingesetzt werden, um derartige Brennstoff-Phänomene zu untersuchen.

4. 3. Untersuchung des UO₂-Stabes unter dynamischen Bedingungen

4. 3. 1. Cycling

Während des Reaktorbetriebes treten neben den Ein- und Abschaltvorgängen weitere Änderungen des stationären Reaktorzustandes auf. Es handelt sich um Leistungsschwankungen, die, periodisch oder aperiodisch, Einfluß auf die Geometrie der Stäbe haben.

Auf Grund der Leistungsschwankungen tritt im Brennstoff eine schrittweise plastische Dehnung, das sogenannte "thermal ratcheting", auf, wenn der plastische Abbau von Spannungsspitzen auf mehrere Leistungsphasen (Anfahr- und Abschaltvorgänge bzw. Leistungszyklen) verteilt wird [11, 12]. Da jeder Spannungsabbau mit einer bleibenden Dehnung verbunden ist, ergibt sich daraus eine schrittweise Aufweitung des Brennstoffs und damit schließlich des Hüllrohres.

Mit Hilfe der beschriebenen Methode können nun Untersuchungen an UO₂-Brennstoff, der solchen Leistungsschwankungen unterworfen wird, in bezug auf das "thermal ratcheting" durchgeführt werden. Besonders ist darauf hinzuweisen, daß hier das Schwellen des Brennstoffs (swelling), ein rein nuklearer Effekt, ausgeschaltet werden kann.

Die während eines cycling-Betriebes im Brennstoff entstehenden Risse können während eines folgenden stationären Betriebes wieder ausheilen. Diese zeitlich bedingten Ausheilungsprozesse können gleichermaßen untersucht werden. Der Vorteil der Methode besteht bei diesen Untersuchungen darin, daß die Versuchsparameter wie Leistungsschwankungen, Ein- und Abschaltvorgänge, Heizdauer etc. reproduzierbar in beliebiger Weise variiert werden können.

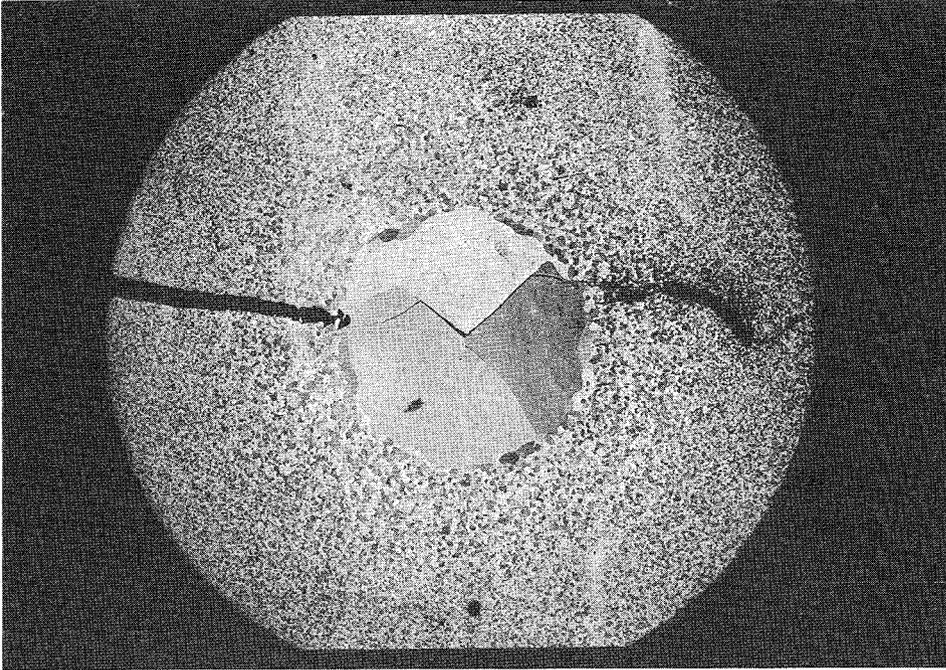
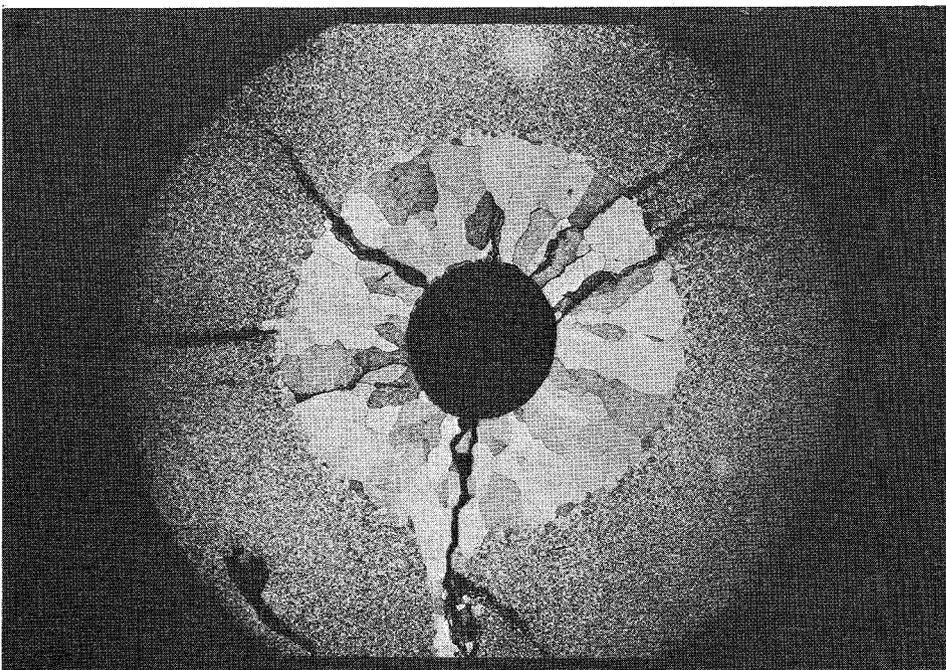


Abb. 21

Abb. 22



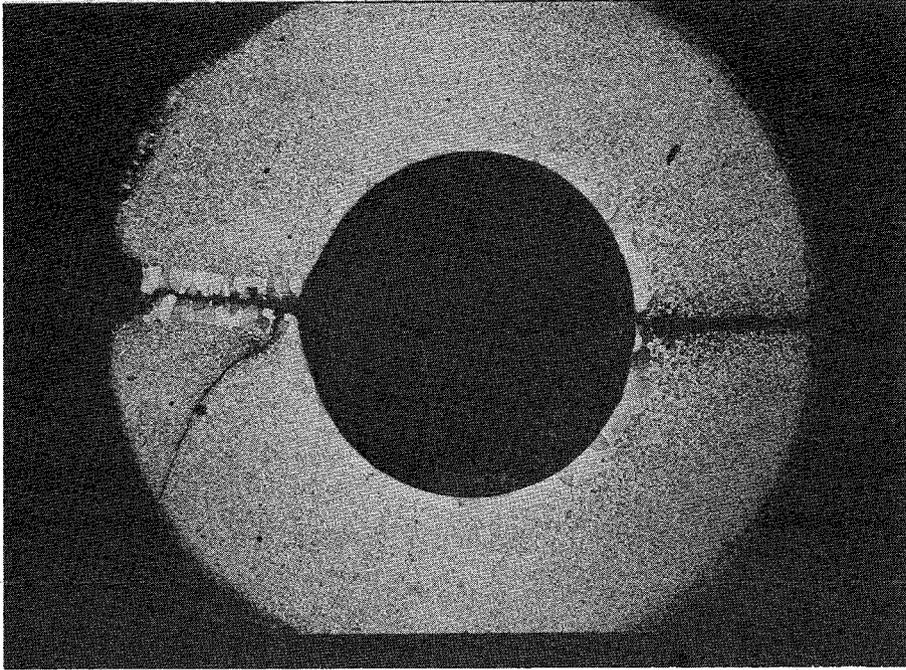
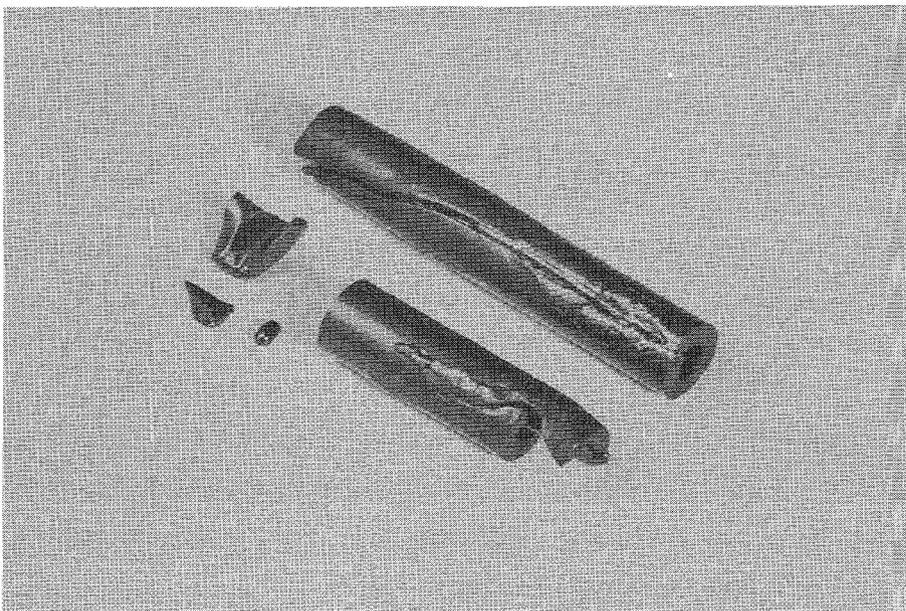


Abb. 23

Abb. 24



4. 3. 2. Exkursionen

Die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabs gestattet in gewissen Grenzen die Simulation von nuklearen Exkursionen. Unter nuklearen Exkursionen werden instationäre Zustände des Reaktors verstanden, bei denen im Brennstoff Energien erzeugt werden, die diesen schmelzen oder verdampfen können.

Dem elektrisch stationär geheizten UO_2 -Brennstab kann durch Kondensatorentladung elektrische Energie zugeführt werden. Die Dauer der elektrischen Exkursion wird durch Zuschalten verschiedener Induktivitäten bestimmt und kann in Zeitbereichen von 100 μ sec - 100 msec variiert werden. Nukleare Exkursionen, wie sie für schnelle Reaktoren nach dem Bethe-Tait-Formalismus diskutiert werden, laufen in Zeitbereichen von 50 - 100 msec ab [13]. Die in der Probe applizierte elektrische Energie kann exakt gemessen werden (vergl. Kap. 3. 3.).

Wie erste Versuche an stranggepreßten UO_2 -Sinterkörpern von 40 mm Länge, 4,2 mm \emptyset sowie Dichten von 96 % T.D. zeigen, können durch derartige Stoßstromentladungen (exploding wire technique) Untersuchungen zum Verhalten von UO_2 -Brennstäben im Falle einer Reaktorexkursion durchgeführt werden [14]. Abb. 21 stellt den Schliff eines UO_2 -Stäbchens dar, dem etwa 900 Wsec in 10 msec zugeführt wurden. Es bildete sich eine zentrale Schmelzzone von 1,4 mm \emptyset . Durch Erhöhung der Energie wird die Schmelzzone größer, außerdem bildet sich ein Kanal (Abb. 22). Die Energie betrug 1,6 kWsec bei diesem Versuch. Weitere Erhöhung der Energie erbrachte eine weitere Zunahme des inneren Kanals (1,9 mm \emptyset), jedoch keine Verbreiterung der Schmelzzone (Abb. 23). Bei diesen Versuchen zerplatzte die UO_2 -Probe in einige große Bruchstücke (Abb. 24). Weiterhin entstanden größere Aerosolmengen [15].

Diese ersten Ergebnisse zeigen, daß die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes geeignet ist, Aussagen auch über das Verhalten von UO_2 -Stäben bei Reaktorexkursionen zu machen.

Insbesondere kann die Methode eine sinnvolle und aussichtsreiche Ergänzung von Experimenten zum Brennstabversagen in nuklearen dynamischen Test-Reaktoren (wie z. B. TREAT¹⁾) darstellen, da in dynamischen Testreaktoren zur Zeit nur relativ langsame Exkursionen erzeugt werden können.

¹⁾ Transient Reactor Test Facility

4. 3. 3. Brennstabversagen (pin-failure)

Eine der wichtigsten Fragen beim Betrieb eines Reaktors ist die Frage nach der Versagensgrenze der Brennstäbe bei instationärem Reaktorverhalten, d. h. bei Überlastschwingungen bzw. Kühlungsstörungen. Diese mehr technologische Frage ist die Konsequenz aus der Ungenauigkeit, mit der die wichtigen Brennstoffparameter, wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme sowie die aus den Temperaturbedingungen, denen der Brennstoff unterworfen ist, resultierenden Strukturänderungen bei hohen Temperaturen noch behaftet sind. Eine Vorhersage des Brennstabverhaltens unter instationären Bedingungen ist daher nur qualitativ durchführbar.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit erläuterten Methode ist es möglich, einige Antworten auf die Frage des Brennstabversagens zu bekommen. Auf Grund der Zugänglichkeit des elektrisch geheizten Brennstabs, der genau meßbaren Versuchsparameter wie Temperatur, Leistung, Energie etc. kann der UO_2 -Brennstab auf elektrische Weise an der Grenze seiner Stabilität untersucht werden.

Dies ist z. B. unter den Bedingungen einer Überlast möglich. Die UO_2 -Probe wird durch den elektrischen Strom bis zu einem Punkt hochgeheizt, an dem sie instabil wird. Die Veränderungen (Rißbildung, Aufplatzen, Schmelzen von Brennstoff und Hülle) können unmittelbar beobachtet und registriert werden. Auch lokale Störungen in der Brennstab-Oberflächentemperatur, wie sie für das Problem der Kühlkanalverstopfung bei schnellen Na-gekühlten Reaktoren wichtig sind, können simuliert und Art und Ausmaß von Kühlungsstörungen untersucht werden. In gleicher Weise kann das Verhalten von Brennstäben bei vollständigem Ausfall der Kühlung nachgebildet werden.

Eine unmittelbare Folge des Brennstabversagens in Na-gekühlten Reaktoren ist die Brennstoff-Kühlmittel-Wechselwirkung, zu deren Klärung ebenfalls die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes herangezogen werden und durch simulierende Experimente beitragen kann.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über eine neue Methode berichtet, mit der UO_2 -Brennstäbe durch direkten Strom, also ohne Zuhilfenahme zentraler Metalldrähte, geheizt werden können. Zunächst wird die Methode theoretisch untersucht und ein Vergleich mit dem im schnellen Reaktor betriebenen Brennstab angestellt. Das hierzu entwickelte digitale Rechenprogramm zur Berechnung der radialen Temperaturverteilung wird erläutert. Die Berechnung beruht auf der radialen Leistungsbilanz zwischen den einzelnen Bereichen des in Koaxialzylinder aufgeteilten Brennstabes. Der Vergleich zwischen elektrisch und nuklear stationär betriebenen UO_2 -Brennstab zeigt, daß mit der Methode des elektrisch direkt geheizten Brennstabes eine gute Simulation des stationär in einem Reaktor betriebenen UO_2 -Brennstabes erreicht werden kann. Die Anforderungen an die Versuchsanordnung sowie die elektrische Meßtechnik werden beschrieben. Der stationäre Betrieb des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes geschieht über einen Thyristor-gesteuerten Stromkreis, der dynamische Betrieb durch eine Stoßstromanlage.

Die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes gestattet eine Reihe von Untersuchungen, die zum Verständnis des thermischen und thermodynamischen Verhaltens von UO_2 -Brennstäben beitragen. Es können Strukturänderungen und brennstoffphysikalische Vorgänge des UO_2 -Stabes mit variablen und reproduzierbaren Temperaturverteilungen als Funktion der Zeit simuliert werden.

Die Probleme des Brennstabverhaltens unter dynamischen Bedingungen, soweit sie thermisch bedingt sind, lassen sich für Einzelbrennstäbe und Brennstabbündel untersuchen. Insbesondere wird der Einfluß des Energietransports sowie der Zeitskala beim Brennstabversagen einer Untersuchung zugänglich.

Über erste Versuche mit stranggepreßten UO_2 -Stäben wird berichtet.

Die Methode des direkt elektrisch geheizten UO_2 -Brennstabes stellt damit eine sinnvolle Ergänzung zu in-pile-Untersuchungen an Reaktor-brennstäben dar.

6. Literatur

- [1] H. Beißwenger
"Entwicklung von Brennelementen schneller Brutreaktoren",
Beitrag XI : Die Auslegung und Durchführung von Brennelement-
Bestrahlungsexperimenten
KFK 700, Dezember 1967
- [2] H. Kämpf
"Einfluß der inneren Geometrie auf die radiale Temperaturver-
teilung von Schnellbrüter-Brennelementen"
KFK 751, Februar 1968
- [3] J.L. Bates, C.A. Hinman, T. Kawada
"Electrical Conductivity of Uranium Dioxide"
Journal of the American Ceramic Society
Vol. 50, No. 12, p. 652, Dezember 1967
- [4] R.A. Wolfe
"The Electrical Conductivity and Thermoelectric Power of
Uranium Dioxide"
WAPD-270, TID-4500 (8. Ed.), 1963
- [5] I. Devold
"A Study of the Temperature Distribution in UO_2 Reactor
Fuel Elements"
Aktiebolaget Atomenergi, AE-318, May 1968
- [6] R.R. Asamoto, F.L. Anselin, A.E. Conti
"The Effect of Density on the Thermal Conductivity of Uranium
Dioxide"
Journal of Nuclear Materials 29, 1969, 67-81.

- [7] H. Kämpf
"Entwicklung von Brennelementen schneller Brutreaktoren",
Beitrag IV: Die Temperaturverteilung im Brennelement
KFK 700, Dezember 1967
- [8] K. Gast, E.G. Schlechtendahl
"Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2"
KFK 660, Oktober 1967
- [9] Produkt Information T 14
Mai 1965, Transistor A.G., Zürich
- [10] F. Will
"Die Messung großer Stoßströme"
KFK 896, Oktober 1968
- [11] H.J. Laue
"Die mechanische Beanspruchung der Brennelementhülle"
Beitrag VIII in KFK 700, Dezember 1967
- [12] D. Burgreen
"Structural Growth Induced by Thermal Cycling"
Journal of Baric Engineering, Dec. 1968
- [13] D. Braess, K. Thurnay
"Theoretische Behandlung hypothetischer, schwerer
Unfälle bei schnellen Leistungsreaktoren"
KFK 813, Juli 1968
- [14] D. Freund, W. Schikarski
"Experimentelle Untersuchungen zum Brennstab-Versagen
(pin failure)"
Vortrag, gehalten auf der Reaktortagung 1969,
Frankfurt/Main, 15. - 18. April 1969

[15]

W. Schikarski, H. Wild

"Das Verhalten von UO_2 -Aerosolen in geschlossenen Systemen"

KFK 1032, Dezember 1969

