

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

Dezember 1975

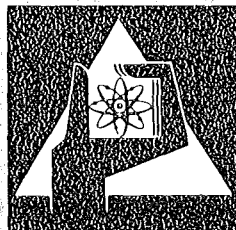
KFK 2197

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**ELEKTRA**

Rechenprogramm für die Temperaturverteilung in einem  
direkt elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stab bei transientem  
Leistungsverlauf

D. Piel



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KFK 2197

ELEKTRA

Rechenprogramm für die Temperaturverteilung in einem direkt  
elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stab bei transientem Leistungsverlauf

D. Piel

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Zusammenfassung

---

Im Institut für Material- und Festkörperforschung werden Versuche zur Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung bei Reaktivitätsstörfällen durch Niederschmelzen elektrisch beheizter Brennstäbe durchgeführt. Für die Planung der Experimentdurchführung muß der Ablauf der Leistungstransiente bekannt sein. Dafür wurde das Fortran-Rechenprogramm ELEKTRA entwickelt, das die Temperatur- und Leistungsdichteverteilung im  $UO_2$ -Brennstab unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes berechnet.

Der Bericht beschreibt das Rechenmodell des Brennstabes und die benutzten thermodynamischen Grundgleichungen. Ferner wird eine neue Beziehung für den Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes von  $UO_2$  angegeben, die auf der Grundlage einer Vielzahl von experimentell gewonnenen Daten errechnet wurde. Schließlich wird anhand eines konkreten Rechenbeispiels die Ein- und Ausgabe des Programmes beschrieben. Die Ergebnisse werden mit den gemessenen Werten des Experimentes verglichen.

ELEKTRA - A Computer Program for Temperature Distribution in a  $UO_2$  Rod with Direct Electric Heating at Transient Overpower

---

## Abstract

---

At the Institute of Materials and Solid State Research experiments are carried out by melting of electrically heated fuel pins, which relate to fuel-sodium interaction during reactivity accidents. The development of the power transient must be known when planning the conduct of the experiment. For this purpose, the FORTRAN computer program ELEKTRA was developed which calculates the distributions of temperature and power density in the  $UO_2$  fuel pin taking into account the temperature dependence of the electric resistance.

The report describes the computation model for the fuel pin and the thermodynamic basic equations used. Besides, a new relation is indicated for the development of the electric resistivity of  $UO_2$  calculated from a multitude of data obtained in experiments. Finally, program input and output are described with an actual arithmetical example. The results are compared with the measured values of the experiment.



Inhalt:

1. Einleitung
2. Beschreibung des elektrisch beheizten Brennstabes
3. Programmorganisation und thermodynamische Grundgleichungen
  - 3.1 Stationärer Programmteil
  - 3.2 Instationärer Programmteil
4. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von  $UO_2$
5. Unterprogramme und Stoffwerte
6. Rechenbeispiel
  - 6.1 Eingabe
  - 6.2 Ausgabe
  - 6.3 Ergebnisse

Verzeichnis der Abbildungen:

Abbildung 1      Zoneneinteilung im Brennstab

Abbildung 2      Vereinfachtes Fließschema der SUBROUTINE TFELD

Abbildung 3      Spezifischer elektrischer Widerstand von  $UO_2$

Abbildung 4      Temperaturverlauf im Brennstab

Abbildung 5      Zeitlicher Verlauf der gerechneten und gemessenen  
elektrischen Werte



## 1. Einleitung

-----

Für die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen geschmolzenem Brennstoff und Natrium bei Reaktivitätsunfällen in Schnellen Reaktoren sind Simulationsexperimente mit elektrisch beheizten Brennstäben unter Natrium von Interesse. Für derartige Experimente wurde im Institut für Material- und Festkörperforschung eine Versuchsanlage erstellt, in der ein  $UO_2$ -Brennstab bzw. ein Bündel von 7 Brennstäben unter strömendem Natrium aus dem stationären Betrieb heraus abgeschmolzen werden kann / 1 /. Die Stäbe werden durch direkte elektrische Beheizung einer scharfen Leistungstransiente unterworfen.

Für die Auslegung der Brennstäbe und der Stromversorgung, sowie für die Planung der Experimentdurchführung ist es notwendig, die örtliche und zeitliche Temperatur- und Leistungsänderung im Brennstab während der Exkursion zu berechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der elektrische Widerstand des  $UO_2$  und damit auch die Leistungsdichte im Brennstoff bei vorgegebener elektrischer Spannung stark temperaturabhängig sind. Für diese Berechnungen wurde das Fortran-Rechenprogramm ELEKTRA ( Temperaturverteilung elektrisch beheizter  $UO_2$ -Stäbe bei transientem Leistungsverlauf ) entwickelt.

Dieses Programm kann wie folgt charakterisiert werden:

Der Brennstab und das ihn umgebende Kühlmittel werden in konzentrische ringförmige Zonen der Höhe  $\Delta Z$  unterteilt. So werden Volumenelemente definiert. Als Ausgangspunkt für die instationäre Rechnung werden das Temperaturfeld bei stationärem Betrieb und die zugehörigen elektrischen Werte errechnet. Mit diesen Daten lassen sich dann in kleinen zeitlichen Schritten die Temperaturänderungen in allen Volumenelementen des Brennstabes und im Kühlmittel während der Exkursion ermitteln, indem jeweils die Summe der eintretenden, ausfließenden und erzeugten Wärmemengen gebildet wird. Der Wärmetransport innerhalb der Brennstabschichten erfolgt nur radial, im Strömungsquerschnitt des Kühlmittels nur axial.

---

Zum Druck eingereicht am 28.11.1975

In gasgefüllten Spalten wird eine Wärmeübergangszahl aus Wärmeleitung und Strahlung definiert, wobei auch die thermische Ausdehnung der Brennstabschichten berücksichtigt wird.

## 2. Beschreibung des elektrisch beheizten Brennstabes

---

Bei den Experimenten zur Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung werden Brennstäbe verwendet, die sich von Brüterbrennstäben prinzipiell dadurch unterscheiden, daß der Brennstoff gegen das Hüllrohr elektrisch isoliert sein muß.

Die Brennstoffzone besteht aus einem  $UO_2$ -Zylinder von 5,0 mm Durchmesser und maximal 160 mm Länge. Der Brennstoff ist gegen das Hüllrohr aus rostfreiem Stahl mit den Abmessungen 7 mm  $\varnothing$  x 0,3 mm thermisch und elektrisch durch einen Gasspalt von 0,4 mm radialer Breite und  $Al_2O_3$  - Hülse mit den Abmessungen 6,4 mm  $\varnothing$  x 0,3 mm isoliert. Der Brennstab ist normalerweise mit Argon gefüllt. Für die Berechnung der Kühlung des Brennstabes wird eine Ringspaltgeometrie angenommen.

Die Leistungserzeugung in der  $UO_2$ -Zone erfolgt durch Anlegen einer elektrischen Spannung mit Hilfe von Elektroden, die auf die Stirnflächen der Brennstoffzylinder aufgepreßt werden.

## 3. Programmorganisation und thermodynamische Grundgleichungen / 2 /

---

( Nomenklatur siehe Tabelle 1 )

Das Fortran-Rechenprogramm ELEKTRA besteht - abgesehen von einer Vielzahl von kleineren Unterprogrammen - aus drei größeren Programmteilen. Im Hauptprogramm wird der gesamte Datenfluß organisiert, sowie die Zoneneinteilung des Brennstabes durchgeführt. Die SUBROUTINE TFELD dient

zur Berechnung des stationären Temperaturfeldes. Die Ermittlung der instationären Temperaturverteilung erfolgt mit der SUBROUTINE TZEIT.

Abbildung 1 zeigt die Schichtung des Brennstabes. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, für das hier anstehende Problem den Brennstoff in 3 bis 4 radiale konzentrische ringförmige Zonen zu unterteilen. Für die Isolierhülsen und das Hüllrohr sind jeweils 2 Zonen ausreichend.

Es handelt sich um ein eindimensionales Rechenverfahren. Das axiale Temperaturgefälle wird also nur durch die Kühlmittelaufheizung berücksichtigt. Wegen der relativ geringen Aufheizspanne genügt es, den Stab in zwei axiale Zonen aufzuteilen.

Mit der Zonenaufteilung

$DR = R(I + 1) - R(I)$  in radialer Richtung und

$DZ = Z(J + 1) - Z(J)$  in axialer Richtung

ergibt sich für die einzelnen Volumenelemente

$$V(I, J) = \left[ (R(I) + DR/2)^2 - (R(I) - DR/2)^2 \right] \pi \cdot \\ \cdot \left[ (Z(J) + DZ/2) - (Z(J) - DZ/2) \right]$$

oder angenähert

$$V(I, J) = 2\pi R(I) \cdot DR \cdot DZ$$

Für die Randzonen in radialer Richtung gilt

$$V(I, J) = 2\pi \left[ R(I) \pm DR/4 \right] \cdot DR/2$$

und in axialer Richtung

$$V ( I, J ) = 2\pi R ( I ) \cdot DR \cdot DZ/2$$

Die Bestimmung der Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Schichten erfolgt durch Lösung der Differentialgleichungen für Wärmeleitung, Wärmeübergang und Wärmetransport. Die Gleichung für den Brennstoff enthält einen Term, der die temperaturabhängige Wärmeerzeugung berücksichtigt. Für die instationäre Rechnung wird ein weiteres Glied hinzugefügt, das die Wärmekapazität der Materialien enthält.

### 3.1 Stationärer Programmteil ( SUBROUTINE TFELD )

-----

Abbildung 2 gibt das vereinfachte Fließschema für die Berechnung der stationären Temperaturverteilung im Brennstab wieder. Wegen der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Werte des Brennstoffes und damit auch der Leistungserzeugung muß iterativ vorgegangen werden. Insgesamt sind mehrere ineinandergreifende Iterationen notwendig, um die vorgegebene stationäre Gesamtleistung des Stabes der Summe der Einzelleistungen in allen Zonen I und J anzupassen.

Die Berechnung erfolgt vom Kühlmittel zum Brennstoffzentrum hin. Dabei ergeben sich folgende Gleichungen:

Wärmetransport im Kühlmittel:

$$T ( I, J + 1 ) - T ( I, J ) = QWI ( J ) / ( G \cdot CP )$$

Wärmeübergang an den Oberflächen:

$$T ( I, J ) - T ( I + 1, J ) = QWI ( J ) / ( 2 \cdot \pi \cdot R ( I ) \cdot DZ \cdot ALFA )$$

mit

ALFA = ALFAK für den Wärmeübergang an das Kühlmittel

und

ALFA = ALFASP für den Wärmedurchgang durch die Gasspalte

Wärmeleitung im Strukturmaterial:

$$T(I, J) - T(I + 1, J) = QWI(J) / (2 \cdot \pi \cdot WLAM \cdot DZ) \cdot \ln(R(I + 1) / R(I))$$

Wärmeleitung im Brennstoff:

Für die Innenzone gilt

$$T(I, J) - T(I + 1, J) = QWB / (2 \cdot \pi \cdot WLAM \cdot DZ) \cdot \ln(R(I + 1) / R(I)) - QL(I, J) / (2 \cdot WLAM) \cdot \{ (R(I + 1))^2 \cdot \ln(R(I + 1) / R(I)) - [ (R(I + 1))^2 - (R(I))^2 ] / 2 \}$$

Für das Zentrum gilt

$$T(I, J) - T(I + 1, J) = QL(I, J) / (4 \cdot WLAM) \cdot (R(I + 1))^2$$

### 3.2 Instationärer Programmteil ( SUBROUTINE TZEIT )

-----

Ausgangspunkt für die instationäre Rechnung ist das stationäre Temperaturfeld.

Dieses kann vorher mit dem Unterprogramm TFELD berechnet werden. Es kann auch isotherm sein ( Anfahrvorgang ).

Zu jedem Zeitpunkt werden für alle Zonen I und J die Temperaturänderungen berechnet und so das Temperaturfeld für den nächsten Zeitpunkt bestimmt.

Bei Erreichen der Schmelztemperatur im Brennstoff wird die Schmelzwärme berücksichtigt. Die Stoffwerte werden für alle Volumenelemente zu jedem Zeitpunkt neu errechnet.

Der instationäre Programmteil ist vor allem für die Berechnung des Temperaturfeldes im Brennstab bei scharfen Leistungstransienten infolge von sprunghaften Änderungen der elektrischen Spannung geeignet. Das Programm kann aber auch benutzt werden, wenn als Störgröße eine schnelle Änderung der Kühlbedingungen ( Kühlmitteldurchsatz oder -temperatur ) vorliegt.

Zur Lösung der Differentialgleichungen muß die Ableitung nach der Zeit in Differenzenquotienten umgeformt werden. Dafür kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage, von denen für dieses Problem die explizite Methode gewählt wurde. Beim expliziten Rechenverfahren werden aus den bekannten Temperaturen zum Zeitpunkt  $t$  die Temperaturen für den Zeitpunkt  $t + \Delta t$  berechnet.

Die Lösung der so entstehenden Differenzgleichungen ist mit relativ geringem numerischem Aufwand möglich. Jedoch sind gewisse Stabilitätskriterien einzuhalten, d. h. die Zeitschritte  $\Delta t$  sind im Verhältnis zur räumlichen Schrittweite begrenzt. Bei lange andauernden Vorgängen könnten dadurch sehr lange Rechenzeiten entstehen. Bei schnellen Leistungsänderungen jedoch mit einer resultierenden Problemzeit von wenigen 100 msec und Zeitschritten in der Größenordnung von 1 msec ist das explizite Rechenverfahren nicht sehr aufwendig.

Für jedes Volumenelement ergibt sich nun folgende Grundgleichung für die zeitliche Temperaturänderung

$$T_{I, J} ( t + \Delta t ) - T_{I, J} ( t ) = ZLA / ( GAM \cdot CP ) \cdot \Delta t$$

mit

$$ZLA = WSA + WSI + QL$$

Die Berechnung von QL ist in Abschnitt 5 ( Subroutine ELLEVE ) beschrieben. Im folgenden wird nur auf die einfließenden ( WSI ) bzw. abfließenden ( WSA ) Wärmeströme pro Volumeneinheit für die einzelnen Zonen eingegangen, die jeweils in Unterprogrammen bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt vom Brennstoffzentrum zum Kühlmittel hin.

Brennstoffzentrum

$$WSI = 0$$

$$WSA = - 4 \cdot WLAM \cdot ( T ( I, J ) - T ( I + 1, J ) ) / DR^2$$

Innenzonen ( Brennstoff und Strukturmaterial )

$$WSI = - ( R ( I ) - DR / 2 ) / ( R ( I ) \cdot DR ) \cdot WLAM \cdot \\ \cdot ( T ( I, J ) - T ( I - 1, J ) ) / DR$$

$$WSA = - ( R ( I ) + DR / 2 ) / ( R ( I ) \cdot DR ) \cdot WLAM \cdot \\ \cdot ( T ( I, J ) - T ( I + 1, J ) ) / DR$$

Außenrand ( Brennstoff und Strukturmaterial )

$$WSI = - ( R ( I ) - DR / 2 ) / \left[ ( R ( I ) - DR / 4 ) \cdot DR / 2 \right] \cdot WLAM \cdot \\ \cdot ( T ( I, J ) - T ( I - 1, J ) ) / DR$$

$$WSA = - R ( I ) / \left[ ( R ( I ) - DR / 4 ) \cdot DR / 2 \right] \cdot ALFA \cdot \\ \cdot ( T ( I, J ) - T ( I + 1, J ) )$$

mit ALFA = ALFASP für den Wärmedurchgang in den Spalten und  
ALFA = ALFAK für den Wärmeübergang an das Kühlmittel

Innenrand ( Strukturmaterial )

$$\text{WSI} = - R ( I ) / \left[ ( R ( I ) + DR / 4 ) \cdot DR / 2 \right] \cdot \text{ALFASP} \cdot \\ \cdot ( T ( I, J ) - T ( I - 1, J ) )$$

$$\text{WSA} = - ( R ( I ) + DR / 2 ) / \left[ ( R ( I ) + DR / 4 \cdot DR / 2 \right] \cdot \text{WLAM} \cdot \\ \cdot T ( I, J ) - T ( I + 1, J ) ) / DR$$

Kühlmittel

$$\text{WSI} = - 2 \pi R ( I - 1 ) / FK \cdot \text{ALFAK} \cdot ( T ( I, J ) - T ( I - 1, J ) )$$

$$\text{WSA} = - W \cdot CP \cdot \text{GAM} \cdot ( T ( I, J + 1 ) - T ( I, J - 1 ) ) / ( 2 \text{ DZ } )$$

4. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von  $\text{UO}_2$   
-----

Der elektrische Widerstand des  $\text{UO}_2$  nimmt mit steigender Temperatur sehr stark ab. Dem gesamten Temperaturbereich von  $600^\circ\text{C}$  bis zum Schmelzpunkt, der für die Rechnung von Bedeutung ist, entspricht eine Widerstandsänderung von wenigstens 3 Zehnerpotenzen. Daraus geht hervor, daß eine gute Kenntnis des Widerstandsverlaufes für die Genauigkeit der Temperaturberechnung sehr wichtig ist.

In / 4 / sind für den spezifischen elektrischen Widerstand von  $\text{UO}_2$  als Funktion der Temperatur die folgenden Beziehungen aufgeführt:

$$( 1 ) \quad \rho = \exp ( - 9,646 + 2,087 \cdot 10^4 T^{-1} - 1,231 \cdot 10^7 T^{-2} + 6,484 \cdot \\ \cdot 10^9 \cdot T^{-3} ) \quad [ \Omega \text{cm} ]$$

$$300 \text{ K} \leq T \leq 2800 \text{ K}$$



$$( 2 ) \quad \rho = \frac{T}{1,3 \cdot 10^9} \cdot \exp \left( \frac{1,9 \cdot 10^4}{T} \right) \quad [ \Omega \text{cm} ]$$

$$T > 1.000^{\circ}\text{C}$$

Diese Beziehungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Daneben sind in Abb. 3 eigene Meßergebnisse eingetragen, die zu folgender Beziehung führten.

$$( 3 ) \quad \rho = \exp ( 7,150 - 12,51 \cdot X + 10,41 \cdot X^2 - 6,033 \cdot X^3 + 1,803 \cdot X^4 - 0,2082 \cdot X^5 ) \quad [ \Omega \text{cm} ]$$

$$\text{mit } X = T \cdot 10^{-3}$$

$$100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2800^{\circ}\text{C}$$

Die Meßpunkte im Bereich bis  $600^{\circ}\text{C}$  konnten direkt gewonnen werden, indem Brennstäbe in einer Natriumkapsel isotherm betrieben wurden.

Die Meßwerte im oberen Temperaturbereich wurden mit Hilfe des Rechenprogramms ELEKTRA iterativ ermittelt. Grundlage für die Rechnungen waren die elektrischen Betriebsdaten von Brennstäben, die stationär bei verschiedenen Stab-längenleistungen betrieben wurden.

Ausgehend von Beziehung ( 1 ) wurde für jeden Brennstab ein Temperaturprofil im Brennstoff berechnet. Aus dem zugehörigen mittleren Gesamtwiderstand ergab sich auf der Grundlage der angenommenen Widerstandscharakteristik die mittlere Brennstofftemperatur. Dieser Brennstofftemperatur wurde der gemessene mittlere spezifische Widerstand des Brennstoffes zugeordnet, so daß sich eine neue Widerstandsbeziehung entwickeln ließ. Mit dieser Beziehung als Ausgangspunkt wurde die Rechnung so lange iterativ durchgeführt, bis die Abweichung der Meßwerte vom angenommenen Widerstandslauf ein Minimum erreichte.

Es soll erwähnt werden, daß es sich bei allen Brennstoffproben um stranggepreßte  $UO_2$ -Stäbe von 80 mm bzw. 50 mm Länge und 5 mm Durchmesser handelte. Die Dichte der  $UO_2$ -Stäbe betrug 92,2 bis 93,3 th.D. Die Streuung der Meßwerte zeigt, daß auch innerhalb einer einzelnen Lieferung Abweichungen auftreten, die wahrscheinlich auf verschiedene Faktoren, wie z. B. Verunreinigungen, Sauerstoffgehalt, Dichteschwankungen usw. zurückgeführt werden müssen.

#### 5. Unterprogramme und Stoffwerte

Im folgenden werden die wesentlichen Unterprogramme, die für die Rechnungen benutzt werden, kurz beschrieben.

##### FUNCTION ROELUO

Die Function ROELUO berechnet abhängig von der Temperatur den spezifischen elektrischen Widerstand von  $UO_2$  nach Beziehung ( 3 ) in Abschnitt 4.

##### SUBROUTINE ELLEVE

Die Subroutine ELLEVE berechnet den elektrischen Widerstand und die Leistung der Brennstoff-Volumenelemente. Außerdem wird die Wärmequellichte bestimmt. Es werden folgende Beziehungen benützt:

$$REL = ROEL \cdot DZ / FI$$

$$QW = DUEL^2 / REL$$

$$QL = QW / ( FI \cdot DZ )$$

##### SUBROUTINE ALFAK

Die Subroutine ALFAK berechnet die Wärmeübergangszahl vom Kühlmittel zum Brennstab. Es werden die Wärmeübergangsbeziehungen für Ringspaltgeometrie benutzt. Als Kühlmittel sind Na, He, Ar und  $N_2$  in das Programm aufgenommen worden.

Für Natrium gilt: [ 2 ]

$$Nu = 4,8 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$$

Bei Gaskühlung wird angenommen: [ 5 ]

$$Nu = 0,037 \cdot (1 + d / L)^{2/3} \cdot (Re^{0,75} - 180) Pr^{0,42} \cdot (\eta_{f1} / \eta_w)^{0,14} \cdot 0,9 (Da / Di)^{0,45}$$

### FUNCTION ALFASP

Die Function ALFASP dient zur Berechnung der Wärmedurchgangszahl für die engen Gasspalte innerhalb des Brennstabes. In dieser Function wird zunächst mit Hilfe des Temperaturprofils in den dem Spalt benachbarten Strukturteilen deren Wärmedehnung berechnet. Diese Berechnung erfolgt mit Hilfe weiterer Unterprogramme. Dabei wird für die jeweilige Schicht die Temperatur auf dem mittleren Radius als Bezugstemperatur zugrunde gelegt. Auf diese Weise ergibt sich eine Spaltbreite  $\delta$  für den heißen Stab.

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  setzt sich aus einem Wärmeleitungsanteil  $\alpha_L$  und einem Strahlungsanteil  $\alpha_{St}$  zusammen.

$$\alpha = \alpha_L + \alpha_{St}$$

Der Wärmeleitungsanteil läßt sich mit Hilfe der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Füllgases im Spalt berechnen zu

$$\alpha_L = \lambda_{sp} / \delta$$

Die Wärmeübertragung durch Strahlung folgt der Beziehung:

$$\alpha_{St} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_i^2 + T_a^2) (T_i + T_a)$$

mit dem Emmissionsverhältnis

$$\epsilon = 1 / ( 1 / \epsilon_i + 1 / \epsilon_a - 1 )$$

und der Strahlungszahl des schwarzen Körpers

$$\sigma = 5,77 \cdot 10^{-12} \left[ W / cm^2 K^4 \right]$$

### Stoffwerte

In das Programm sind die Stoffwerte folgender Materialien integriert:

Für den Brennstoff:	UO <sub>2</sub> ( später vorgesehen auch UC )
Für das Hüllrohr:	Austenitischer Stahl ( 1.4988 )
Für die Isolierhülsen:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ThO <sub>2</sub>
Für das Füllgas:	Ar, Xe, N <sub>2</sub> , He
Für das Kühlmittel:	Na, He, N <sub>2</sub> , Ar

Das Programmsystem MABLIB / 3 / liefert die Funktionen für UO<sub>2</sub>, Stahl, Natrium und Helium. Für die anderen Materialien wurden die Stoffdaten aus / 6 / und / 7 / entnommen. Aus diesen punktweise vorgegebenen funktionellen Zusammenhängen wurden nach dem Prinzip der Summe der kleinsten Fehlerquadrate Polynome aproximiert, die als Unterprogramme in das Programm eingebaut wurden. Dort wo die in der Literatur angegebenen Temperaturbereiche überschritten werden, wird mit dem konstanten Grenzwert weitergerechnet. Dies betrifft insbesondere die Stoffwerte nach Überschreiten der Schmelztemperatur.

## 6. Rechenbeispiel

Als Rechenbeispiel wird das Experiment VS05.SN01 gewählt. So lassen sich experimentelle und rechnerische Ergebnisse vergleichen.

Das Experiment wurde in einem Natriumkreislauf durchgeführt. Die Brennstoffzone hatte bei 5 mm Durchmesser eine Länge von 80 mm. Die stationäre Leistung vor der Exkursion betrug 712 W bzw. 79 W/cm. Die Natriumdurchsatzmenge war 830 kg/h bei einer Eintrittstemperatur von 540°C. Der ringförmige Kühlkanal hatte die Abmessungen 12 mm / 7 mm.

Der Brennstab wird radial in 4 Brennstoffzonen und in je 2 Zonen für das Zwischenrohr und das Hüllrohr eingeteilt. Es werden zunächst die stationären Daten für die Kühlung, die elektrischen Werte und das stationäre Temperaturfeld gerechnet. Durch eine sprunghafte Erhöhung der elektrischen Spannung auf ca. 220 V wird die Leistungsexkursion eingeleitet. Sie dauert ca. 400 ms an. In Reihe mit dem Brennstab ist ein Vorwiderstand von  $R_{VW} = 0,5 \Omega$  geschaltet, der im Laufe der Transiente einen Spannungsabfall bewirkt. Die Rechnung für die Transiente wird nach einer Problemzeit von 500 ms abgebrochen.

### 6.1 Eingabe

Die Eingabe umfaßt 2 Eingabeblocke mit maximal 14 Karten, die hier kurz erläutert werden. Der 2. Eingabeblock wird nur benötigt für Folgerechnungen, z. B. Beginn der instationären Rechnung aus dem stationären Zustand heraus, oder Folgerechnungen eines angelaufenen instationären Problems. Es ist zweckmäßig, den Eingabeblock 2 durch Stanzausgabe einer vorhergehenden Rechnung herzustellen. Dadurch ist es möglich ein Problem in mehrere Schritte aufzuteilen und so den Rechenablauf zu kontrollieren.

1. Eingabeblock

1. Karte: ITEXT

Format: 10A4

ITEXT beliebiger 40 Byte-Text

2. Karte: RB, RHI, RHA, RKK, BSTL, ISTA, MA1

Format: 6G12.6,2A4

RB Brennstoffradius [ mm ]

RHI Hüllrohrradius innen [ mm ]

RHA Hüllrohrradius außen [ mm ]

RKK Kühlkanalradius [ mm ]

BSTL Brennstofflänge [ cm ]

ISTA Steuerfaktor für Stanzausgabe

ISTA = 0 keine Stanzausgabe

ISTA = n n-tes Zeitintervall liefert Stanzausgabe und  
Druckausgabe des Temperaturfeldes

MA1 Material der zentralen Schichtung

8 Byte-Text, rechtsbündig: z. B. UØ2

3. Karte: NBZ, NHZ, NZZ, NZWR, IZVWR, LEX, MA2

Format: 6G12.6,2A4

NBZ Anzahl der Brennstoffzonen

NHZ Anzahl der Hüllrohrzonen

NZZ Anzahl der axialen Zonen

NZWR Steuerfaktor für Druckausgabe des Temperaturprofils der  
axialen Zonen

NZWR = n n-te axiale Zone liefert Druckausgabe

IZVWR Steuerfaktor für Druckausgabe der Brennstabdaten  
( siehe Tabelle 10 )

IZVWR = n n-tes Zeitintervall wird ausgedruckt

LEX Steuerfaktor für Transiente

LEX = 0 keine Exkursionsrechnung

LEX > 0 Fortsetzung einer begonnenen Rechnung,  
2. Eingabeblock erforderlich

MA2 Material des Hüllrohres  
8 Byte-Text, rechtsbündig: z. B. 4988

4. Karte: TETAES, DSMKGH, IZTWR, ZTMAX, IAVER, IQER  
Format: 6G12.6

TETAES Kühlmittelintrittstemperatur [grd C]

DSMKGH Durchsatzmenge [ kg/h ]

IZTWR Steuerfaktor für Druckausgabe des zeitlichen Temperaturfeldes

IZTWR = n n-tes Zeitintervall liefert Druckausgabe des Temperaturfeldes

ZTMAX Maximale Problemzeit [ msec ]

IAVER Steuerfaktor für Druckausgabe der axialen Widerstandsverteilung

IAVER = 0 keine Druckausgabe

IQER Steuerfaktor für Druckausgabe der Wärmequellverteilung

IQER = 0 keine Druckausgabe

5. Karte: PØRVØL, PKAT, D3, D4, D5, D6, MA4  
Format: 6G12.6,2A4

PØRVØL Anteil des Porenvolumens im Brennstoff

PKAT Kühlmitteldruck [ kg/cm<sup>2</sup> ]

D3

D4

D5

D6

Dummies

MA4 Material des Kühlmediums

8 Byte-Text, rechtsbündig: z. B. NATRIUM

6. Karte: ANSP, STLE, TETAAN, NSCH, ISTAT, DZT, MA5  
Format: 6G12.6,2A4

ANSP Elektrische Spannung bei isothermer Kühlmitteltemperatur [ V ]

STLE Stationäre Leistung [ W ]

TETAAN Kühlmitteltemperatur beim Anfahrvorgang [ grd C ]  
TETAAN > 0. Berechnung des Anfahrvorganges

NSCH Anzahl der Brennstabschichten  
NSCH = 3 kein Zwischenrohr, Eingabekarte 7 entfällt  
NSCH = 5 mit Zwischenrohr

ISTAT Steuerfaktor für stationäre Rechnung  
ISTAT = 0 instationäre Rechnung als Folgerechnung,  
2. Eingabeblock erforderlich  
ISTAT > 0 stationäre Rechnung

DZT Zeitschritt für die instationäre Rechnung [ ms ]

MA5 Füllgas im Brennstab  
8 Byte-Text, rechtsbündig: z. B. ARGØN

7. Karte: RZRI, RZRA, NZRZ, MA3  
Format: 6G12.6,2A4

RZRI Zwischenrohrradius innen [ mm ]

RZRA Zwischenrohrradius außen [ mm ]

NZRZ Anzahl der Zwischenrohrzonen

D4 }  
D5 } Dummies  
D6 }

MA3 Material des Zwischenrohres  
8 Byte-Text, rechtsbündig: z. B. AL2Ø3

2. Eingabeblock ( nicht erforderlich bei stationärer Rechnung )

8. Karte: mit Folgekarten: ( ( T ( I, J ), I = 1, IMAX ), J = 1, JMAX  
Format: 6G12.6

T ( I, J ) Temperaturen [ grd C ]



9. Karte mit Folgekarten: ( SRELI ( J ), J = 1, JMAX )  
Format: 6G12.6

SRELI ( J ) Elektrischer Widerstand der Zone J [  $\Omega$  ]

10. Karte: MZT, IZT, ICON, DZT, DSM  
Format: 6G12.6

MZT Zählindex für die Anzahl der Zeitintervalle total  
IZT Zählindex für die Anzahl der Zeitintervalle bis IZTWR  
ICON Steuerfaktor für die elektrische Spannung beim Anfahrvorgang

$$\text{ICON} = 1 \quad \text{UEL} = \text{SQRT} ( \text{STLE} \cdot \text{SREL} )$$

$$\text{ICON} = 0 \quad \text{UEL} = \text{ANSP} - \text{RVW} \cdot \text{SELST}$$

DZT Zeitintervall [ ms ]  
ZT Zeitpunkt nach MZT Zeitintervallen [ ms ]  
DSM Kühlmitteldurchsatzmenge [ kg/sec ]

11. Karte: UEL, SELST, SREL, SQW, TJE, IEX  
Format: 6G12.6

UEL Elektrische Spannung [ V ]  
SELST Elektrischer Strom [ A ]  
SREL Elektrischer Gesamtwiderstand [  $\Omega$  ]  
SQW Gesamtleistung [ W ]  
TJE Kühlmittelintrittstemperatur [ grad C ]  
IEX Steuerfaktor für die Spannung während der Transiente

} zum Zeitpunkt ZT

$$\text{IEX} = 1 \quad \text{UEL} = \text{SREL} \cdot \text{SELST}$$

$$\text{IEX} = 0 \quad \text{UEL} = \text{EXSP} - \text{RVW} \cdot \text{SELST}$$

12. Karte mit Folgekarten: ( ( QLST ( I, J ), I = 1, NB ), J = 1, JMAX )  
( NB = IMAX für Brennstoff )  
Format: 6G12.6

QLST ( I, J ) Leistung / Volumeneinheit [  $\text{W}/\text{cm}^3$  ], die nach Erreichen der Schmelztemperatur bis zum Zeitpunkt ZT zum Aufschmelzen des Brennstoffvolumens VIJ verbraucht ist.

$$QLST ( t ) = QLST ( t - \Delta t ) + ZLA$$

QLST < QLS: keine Temperaturänderung mit QLS = Leistung / Volumeneinheit [ W/cm<sup>3</sup> ], die zum Aufschmelzen des Brennstoffvolumens VIJ erforderlich ist.

13. Karte: SEN

Format G12.6

SEN Die bis zum Zeitpunkt ZT aufsummerierte Gesamtenergie im Brennstab [ kWs ]

14. Karte: EXSP, SELSTM

Format: 2G12.6

EXSP Elektrische Spannung zu Beginn der Leistungstransiente [ V ]

SELSTM Strombegrenzung während der Exkursion [ A ]

## 6.2 Ausgabe

-----

Die Ausgabe läßt sich durch mehrere Steuerfaktoren beeinflussen ( siehe 6.1 ). Für das genannte Rechenbeispiel wurde die Druckausgabe für die axiale Widerstandsverteilung und für die Wärmequellverteilung unterdrückt. Es wurde zunächst die stationäre Rechnung mit Stanzausgabe für den Eingabeblock 2 ausgeführt mit dem als Folgerechnung die Leistungstransiente gerechnet wurde.

Die Ausgabe dieser Rechnungen ist in Tabelle 2 bis 10 wiedergegeben.

Tabelle 2: Auflistung der wichtigsten Eingabedaten

Tabelle 3: Stationäre Kühlungsverhältnisse für die mittlere axiale Zone und stationäre elektrische Werte des Stabes.

Tabelle 4: Stationäre Temperaturverteilung zum Zeitpunkt ZT = 0.

Tabelle 5-9: Instationäre Temperaturverteilung zu den Zeitpunkten 100, 200, 300, 400 und 500 msec.

Tabelle 10: Zeitliche Verläufe der Brennstabdaten.

Darüber hinaus kann das instationäre Temperaturprofil über alle Schichten in der Form der Tabelle 10 ausgedruckt werden.

### 6.3 Ergebnisse

-----

In Abbildung 4 ist das zeitliche und örtliche Temperaturfeld im Brennstab dargestellt. Kurz vor dem Zeitpunkt 200 ms wird im Zentrum die Schmelztemperatur erreicht. Erst etwa 120 ms später steigt die Zentraltemperatur weiter an, nachdem die Schmelzwärme zugeführt wurde. Nach 400 ms - etwa zu diesem Zeitpunkt kam es bei diesem Experiment zur Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung - befindet sich nur noch eine äußere Brennstoffschicht von 0,6 mm Stärke unterhalb der Schmelztemperatur, während die Zentraltemperatur auf annähernd  $3.100^{\circ}\text{C}$  angestiegen ist. In Abbildung 5 ist der zeitliche Verlauf der gerechneten und gemessenen elektrischen Werte dargestellt. Der der Rechnung zugrunde gelegte Stabwiderstand während des stationären Betriebes ( Beziehung 3 in Abbildung 3 ) war höher als der gemessene Wert. Dadurch ergab sich während der Transiente ein weniger steiler Anstieg des elektrischen Stromes und der elektrischen Leistung. Die während der Transiente zugeführte Energie betrug zum Zeitpunkt des Stabversagens ( etwa nach 370 ms ) nach den Messungen ca. 8,5 kJ. Nach der Rechnung wird dieser Wert nach etwa 400 ms erreicht. Außerdem zeigen die Meßwerte schon etwa ab 300 ms einen stärkeren Abfall von Spannung und Leistung, was auf nachlassende Isolierwirkung zu Beginn des Stabversagens zurückzuführen ist.

Literatur

- / 1 / Deckers e. al.:  
KFK-Bericht 2196: Natrium-Loopanlage zur Untersuchung der  
Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung mit  
elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stäben
- / 2 / D. Smidt:  
Reaktortechnik
- / 3 / U. Schumann:  
KFK-Bericht 1253: MAPLIB, ein Programmsystem zur Bereitstellung  
von Stoffdaten für Rechenprogramme
- / 4 / D. Freund, W. Schikarski:  
KFK-Bericht 1031: Der direkt elektrisch geheizte  $UO_2$ -  
Brennstab
- / 5 / VDJ - Wärmeetlas
- / 6 / Y.S. Touloukian:  
Thermophysical Properties of Matter
- / 7 / Y.S. Touloukian:  
Thermophysical Properties of High Temperatur Solid  
Materials

Tabelle 1: Nomenklatur

I	Index der radialen Zonen
J	Index der axialen Zonen
ALFAK	Wärmeübergangszahl an das Kühlmittel
ALFASP	Wärmedurchgangszahl für Gasspalte
CP	Spezifische Wärme
DQW	Korrekturwert für Leistung der Zone J
DQWI	Korrekturwert für Spannungsabfall der Zone J
DR	Breite der Ringzone
DUEL ( J )	Spannungsabfall der Zone J
DZ	Höhe des Volumenelementes
EXSP	Elektrische Spannung während der Leistungstransiente
FI	Querschnittsfläche des Volumenelementes
FK	Querschnittsfläche des Kühlkanals
G	Kühlmitteldurchsatzmenge
GAM	Dichte
QL ( I, J )	Leistungsdichte in einem Brennstoff-Volumenelement
QWB	Wärmestrom im Brennstoff an der Stelle R ( I )
QW ( I, J )	Leistung des Volumenelementes
QWI ( J )	Angenommene Leistung der Zone J
R ( I )	Radius an der Stelle I
REL ( I, J )	Elektrischer Widerstand eines Brennstoff-Volumenelementes
ROEL	Spezifischer elektrischer Widerstand
RVW	Vorschaltwiderstand
SELST	Elektrischer Gesamtstrom durch den Brennstab
SQW	Gesamtleistung des Brennstabes
SQWI ( J )	Errechnete Leistung der Zone J
SREL	Gesamtwiderstand des Brennstabes
SRELI ( J )	Elektrischer Gesamtwiderstand der Zone J

STLE	Stationäre Gesamtleistung
SUEL	Gesamtspannungsabfall im Brennstab
T ( I, J )	Temperatur des Volumenelementes
VIJ	Rauminhalt des Volumenelementes
W	Kühlmittelgeschwindigkeit
WLAM	Wärmeleitfähigkeit
WSA ( I, J )	Wärmestrom / Volumeneinheit aus dem Volumenelement
WSI ( I, J )	Wärmestrom / Volumeneinheit in das Volumenelement

Tabelle 2

-----  
 VERSUCH NR. VS05.SN01 (STATIONAERE RECHN)  
 26.09.75 10.01.24  
 -----

-----  
 AUFLISTUNG DER EINGABEDATEN  
 -----

BRENNSTOFFRADIUS, AUSSEN	2.50	MM
HUELLROHRRADIUS, INNEN	3.18	MM
HUELLROHRRADIUS, AUSSEN	3.50	MM
KUEHLKANALRADIUS, INNEN	6.00	MM
BRENNSTOFFLAENGE	8.00	CM
STEUERFAKTOR F. STANZAUSGABE (ISTA)	1	
BRENNSTOFF	U02	
ANZAHL DER BRENNSTOFFZONEN	4	
ANZAHL DER HUELLROHRZONEN	2	
ANZAHL DER AXIALEN ZONEN	2	
AX. WRITE-INTERV. D. T.-PROFILS (NZWR)	1	
WRITE-INTERV. D. BRENNSTABDAT. (IZVWR)	0	
STEUERFAKTOR F. EXKURS.-RECHNG. (LEX)	0	
WERKSTOFF DES HUELLROHRES	4988	
KUEHLMITTEL-EINTRITTS-TEMPERATUR	540.00	GRD C
KUEHLMITTELDURCHSATZMENGE	830.00	KG/H
ZTL. WRITE-INTERV. D. T.-FELD. (IZTWR)	1	
MAX. ZEITABSCHNITT, INSTATIONAER	0.0	MS
WRITE-BEF. F. AX. WIDERST. VERT. (IAVER)	0	
WRITE-BEF. F. AX. WAERMEQ. VERT. (IQVER)	0	
PORENVOLUMEN IM BRENNSTOFF (PORVOL)	0.07	
KUEHLMITTELDRUCK	2.00	ATA
IDENTIFIZ. D. GLEICHUNG F. ROELUO (NGL)	12	
VORSCHALTWIDERSTAND (RVW)	0.50	OHM
KUEHLMEDIUM	NATRIUM	

Tabelle 2 ( Fortsetzung )

VERSUCH NR.VS05.SN01 ( STATIONAERE RECHN)  
26.09.75 10.01.24

AUFLISTUNG DER EINGABEDATEN

ELEKTR.SPANNUNG, ANFAHRVORGANG	0.0	V
STATIONAERE LEISTUNG	712.00	W
KUEHLMITTELTEMP., ANFAHRVORGANG	0.0	GRD C
ANZAHL DER BRENNSTABSCHICHTUNG	5	
STEUERFAKTOR F.STATION.RECH.(ISTAT)	1	
ZEITINTERVALL	0.0	MS
GASFUELLUNG IM BRENNSTAB	ARGON	
ZWISCHENROHRRADIUS, INNEN	2.86	MM
ZWISCHENROHRRADIUS, AUSSEN	3.16	MM
ANZAHL DER ZWISCHENROHRZONEN	2	
WERKSTOFF DES ZWISCHENROHRES	AL203	



Tabelle 3

---

 STATIONAERE KUEHLUNGSVERHAELTNISSE
 

---

26.09.75 10.01.26

KUEHLMITTEL-DURCHSATZMENGE	830.00	KG/H
KUEHLM.-EINTR.-TEMPERATUR	540.00	GRD C
KUEHLKANAL-DURCHMESSER	12.00	MM
BRENNSTAB-DURCHMESSER	7.00	MM
HYDRAUL. DURCHMESSER	5.00	MM
KUEHLMITTEL-DICHTE	822.19	KG/M**3
KUEHLMITTEL-DRUCK	2.00	KG/CM**2
STROEMUNGSFLAECHE	74.61	MM**2
MITTL. AXIALE ZONE	2	
MITTL. KUEHLMITTEL-TEMPERATUR	541.84	GRD C
MITTL. BRENNSTAB-OBERFL.-TEMP.	545.88	GRD C
MITTL. HUELLROHR-TEMPERATUR	548.76	GRD C
MITTL. ZWISCHENROHR-TEMPERATUR	940.96	GRD C
MITTL. BRENNSTOFF-TEMPERATUR	2152.67	GRD C
MITTL. STROEMUNGSGESCHWINDIGKEIT	3.76	M/S
MITTL. REYNOLDSZAHL	0.6937E+05	
MITTL. PECLETZAHL	299.44	
MITTL. NUSSELTZAHL	7.71	
MITTL. WAERMEUEBERG.-ZAHL	0.1002E+06	W/M**2 GRD

---

 ELEKTRISCHE VERHAELTNISSE
 

---

ELEKTR. WIDERSTAND	3.57	OHM
SPEZIFISCHER ELEKTR. WIDERSTAND	0.8759E-01	OHM*CM
ELEKTR. LEISTUNG	711.59	WATT
ELEKTR. SPANNUNG (ICON = 1)	50.39	VOLT
ELEKTR. STROM	14.12	AMPERE

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
0.0	1	0.0	1	0.0	2276.7
0.0	1	0.0	2	0.62	2244.1
0.0	1	0.0	3	1.25	2152.3
0.0	1	0.0	4	1.87	2015.0
0.0	1	0.0	5	2.50	1851.7
0.0	1	0.0	6	2.86	944.0
0.0	1	0.0	7	3.01	933.1
0.0	1	0.0	8	3.16	923.1
0.0	1	0.0	9	3.18	550.7
0.0	1	0.0	10	3.34	547.5
0.0	1	0.0	11	3.50	544.5
0.0	1	0.0	12	3.66	540.6
0.0	2	4.0	1	0.0	2276.9
0.0	2	4.0	2	0.62	2244.4
0.0	2	4.0	3	1.25	2152.7
0.0	2	4.0	4	1.87	2015.5
0.0	2	4.0	5	2.50	1852.3
0.0	2	4.0	6	2.86	951.9
0.0	2	4.0	7	3.01	941.0
0.0	2	4.0	8	3.16	930.8
0.0	2	4.0	9	3.18	551.9
0.0	2	4.0	10	3.34	548.8
0.0	2	4.0	11	3.50	545.8
0.0	2	4.0	12	3.66	541.9
0.0	3	8.0	1	0.0	2276.9
0.0	3	8.0	2	0.62	2244.4
0.0	3	8.0	3	1.25	2152.7
0.0	3	8.0	4	1.87	2015.6
0.0	3	8.0	5	2.50	1852.4
0.0	3	8.0	6	2.86	952.5
0.0	3	8.0	7	3.01	941.6
0.0	3	8.0	8	3.16	931.4
0.0	3	8.0	9	3.18	552.5
0.0	3	8.0	10	3.34	549.4
0.0	3	8.0	11	3.50	546.4
0.0	3	8.0	12	3.66	542.5

Tabelle 4

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
100.0	1	0.0	1	0.0	2544.2
100.0	1	0.0	2	0.62	2501.9
100.0	1	0.0	3	1.25	2381.8
100.0	1	0.0	4	1.87	2201.9
100.0	1	0.0	5	2.50	1987.7
100.0	1	0.0	6	2.86	956.7
100.0	1	0.0	7	3.01	942.4
100.0	1	0.0	8	3.16	931.1
100.0	1	0.0	9	3.18	550.6
100.0	1	0.0	10	3.34	547.2
100.0	1	0.0	11	3.50	544.1
100.0	1	0.0	12	3.66	540.0
100.0	2	4.0	1	0.0	2544.1
100.0	2	4.0	2	0.62	2501.8
100.0	2	4.0	3	1.25	2381.9
100.0	2	4.0	4	1.87	2202.3
100.0	2	4.0	5	2.50	1988.4
100.0	2	4.0	6	2.86	963.9
100.0	2	4.0	7	3.01	949.5
100.0	2	4.0	8	3.16	938.1
100.0	2	4.0	9	3.18	552.0
100.0	2	4.0	10	3.34	548.6
100.0	2	4.0	11	3.50	545.4
100.0	2	4.0	12	3.66	541.3
100.0	3	8.0	1	0.0	2544.1
100.0	3	8.0	2	0.62	2501.8
100.0	3	8.0	3	1.25	2381.9
100.0	3	8.0	4	1.87	2202.3
100.0	3	8.0	5	2.50	1988.5
100.0	3	8.0	6	2.86	964.6
100.0	3	8.0	7	3.01	950.2
100.0	3	8.0	8	3.16	938.8
100.0	3	8.0	9	3.18	553.2
100.0	3	8.0	10	3.34	549.8
100.0	3	8.0	11	3.50	546.6
100.0	3	8.0	12	3.66	542.5

Tabelle 5

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
200.0	1	0.0	1	0.0	2842.5
200.0	1	0.0	2	0.62	2795.3
200.0	1	0.0	3	1.25	2639.3
200.0	1	0.0	4	1.87	2411.5
200.0	1	0.0	5	2.50	2138.6
200.0	1	0.0	6	2.86	979.8
200.0	1	0.0	7	3.01	961.8
200.0	1	0.0	8	3.16	949.0
200.0	1	0.0	9	3.18	551.1
200.0	1	0.0	10	3.34	547.6
200.0	1	0.0	11	3.50	544.2
200.0	1	0.0	12	3.66	540.0
200.0	2	4.0	1	0.0	2842.1
200.0	2	4.0	2	0.62	2795.0
200.0	2	4.0	3	1.25	2639.2
200.0	2	4.0	4	1.87	2411.8
200.0	2	4.0	5	2.50	2139.3
200.0	2	4.0	6	2.86	986.3
200.0	2	4.0	7	3.01	968.3
200.0	2	4.0	8	3.16	955.2
200.0	2	4.0	9	3.18	552.6
200.0	2	4.0	10	3.34	549.0
200.0	2	4.0	11	3.50	545.6
200.0	2	4.0	12	3.66	541.3
200.0	3	8.0	1	0.0	2842.0
200.0	3	8.0	2	0.62	2794.9
200.0	3	8.0	3	1.25	2639.2
200.0	3	8.0	4	1.87	2411.9
200.0	3	8.0	5	2.50	2139.5
200.0	3	8.0	6	2.86	987.1
200.0	3	8.0	7	3.01	969.0
200.0	3	8.0	8	3.16	956.0
200.0	3	8.0	9	3.18	553.8
200.0	3	8.0	10	3.34	550.3
200.0	3	8.0	11	3.50	546.9
200.0	3	8.0	12	3.66	542.6

Tabelle 6

-----

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
300.0	1	0.0	1	0.0	2842.5
300.0	1	0.0	2	0.62	2843.0
300.0	1	0.0	3	1.25	2842.5
300.0	1	0.0	4	1.87	2630.8
300.0	1	0.0	5	2.50	2294.9
300.0	1	0.0	6	2.86	1015.5
300.0	1	0.0	7	3.01	992.9
300.0	1	0.0	8	3.16	977.8
300.0	1	0.0	9	3.18	552.1
300.0	1	0.0	10	3.34	548.2
300.0	1	0.0	11	3.50	544.6
300.0	1	0.0	12	3.66	540.0
300.0	2	4.0	1	0.0	2842.1
300.0	2	4.0	2	0.62	2842.6
300.0	2	4.0	3	1.25	2842.3
300.0	2	4.0	4	1.87	2631.1
300.0	2	4.0	5	2.50	2295.7
300.0	2	4.0	6	2.86	1021.5
300.0	2	4.0	7	3.01	998.8
300.0	2	4.0	8	3.16	983.5
300.0	2	4.0	9	3.18	553.6
300.0	2	4.0	10	3.34	549.8
300.0	2	4.0	11	3.50	546.1
300.0	2	4.0	12	3.66	541.4
300.0	3	8.0	1	0.0	2842.0
300.0	3	8.0	2	0.62	2842.6
300.0	3	8.0	3	1.25	2842.3
300.0	3	8.0	4	1.87	2631.2
300.0	3	8.0	5	2.50	2295.8
300.0	3	8.0	6	2.86	1022.3
300.0	3	8.0	7	3.01	999.6
300.0	3	8.0	8	3.16	984.3
300.0	3	8.0	9	3.18	555.0
300.0	3	8.0	10	3.34	551.1
300.0	3	8.0	11	3.50	547.5
300.0	3	8.0	12	3.66	542.8

Tabelle 7

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
400.0	1	0.0	1	0.0	3065.8
400.0	1	0.0	2	0.62	3007.2
400.0	1	0.0	3	1.25	2842.5
400.0	1	0.0	4	1.87	2842.1
400.0	1	0.0	5	2.50	2457.8
400.0	1	0.0	6	2.86	1065.4
400.0	1	0.0	7	3.01	1036.9
400.0	1	0.0	8	3.16	1018.7
400.0	1	0.0	9	3.18	553.6
400.0	1	0.0	10	3.34	549.2
400.0	1	0.0	11	3.50	545.2
400.0	1	0.0	12	3.66	540.0
400.0	2	4.0	1	0.0	3062.9
400.0	2	4.0	2	0.62	3006.7
400.0	2	4.0	3	1.25	2842.3
400.0	2	4.0	4	1.87	2842.3
400.0	2	4.0	5	2.50	2458.6
400.0	2	4.0	6	2.86	1070.8
400.0	2	4.0	7	3.01	1042.2
400.0	2	4.0	8	3.16	1023.9
400.0	2	4.0	9	3.18	555.2
400.0	2	4.0	10	3.34	550.9
400.0	2	4.0	11	3.50	546.8
400.0	2	4.0	12	3.66	541.6
400.0	3	8.0	1	0.0	3062.8
400.0	3	8.0	2	0.62	3006.6
400.0	3	8.0	3	1.25	2842.3
400.0	3	8.0	4	1.87	2842.4
400.0	3	8.0	5	2.50	2458.7
400.0	3	8.0	6	2.86	1071.7
400.0	3	8.0	7	3.01	1043.1
400.0	3	8.0	8	3.16	1024.8
400.0	3	8.0	9	3.18	556.7
400.0	3	8.0	10	3.34	552.4
400.0	3	8.0	11	3.50	548.3
400.0	3	8.0	12	3.66	543.1

Tabelle 8

TEMPERATURVERTEILUNG

ZEIT (MS)	J	Z(J) (CM)	I	R(I) (MM)	T(I,J) GRD C
500.0	1	0.0	1	0.0	3317.0
500.0	1	0.0	2	0.62	3257.8
500.0	1	0.0	3	1.25	3080.1
500.0	1	0.0	4	1.87	2842.1
500.0	1	0.0	5	2.50	2611.6
500.0	1	0.0	6	2.86	1130.2
500.0	1	0.0	7	3.01	1094.6
500.0	1	0.0	8	3.16	1072.5
500.0	1	0.0	9	3.18	555.6
500.0	1	0.0	10	3.34	550.6
500.0	1	0.0	11	3.50	546.0
500.0	1	0.0	12	3.66	540.0
500.0	2	4.0	1	0.0	3314.6
500.0	2	4.0	2	0.62	3257.2
500.0	2	4.0	3	1.25	3079.8
500.0	2	4.0	4	1.87	2842.3
500.0	2	4.0	5	2.50	2612.4
500.0	2	4.0	6	2.86	1135.2
500.0	2	4.0	7	3.01	1099.5
500.0	2	4.0	8	3.16	1077.3
500.0	2	4.0	9	3.18	557.5
500.0	2	4.0	10	3.34	552.5
500.0	2	4.0	11	3.50	547.8
500.0	2	4.0	12	3.66	541.8
500.0	3	8.0	1	0.0	3314.5
500.0	3	8.0	2	0.62	3257.1
500.0	3	8.0	3	1.25	3079.8
500.0	3	8.0	4	1.87	2842.4
500.0	3	8.0	5	2.50	2612.5
500.0	3	8.0	6	2.86	1136.2
500.0	3	8.0	7	3.01	1100.5
500.0	3	8.0	8	3.16	1078.3
500.0	3	8.0	9	3.18	559.2
500.0	3	8.0	10	3.34	554.2
500.0	3	8.0	11	3.50	549.5
500.0	3	8.0	12	3.66	543.6

Tabelle 9

ZEITLICHE VERLAEUFE

ZEIT	GESU	GESI	GESR	GESN	T (I, NZ)	SEN
(MS)	(V)	(A)	(OHM)	(W)	(GRD C)	(KWS)
10.0	0.219E+03	0.630E+02	0.345E+01	0.138E+05	2302.1	0.153E+00
20.0	0.217E+03	0.652E+02	0.332E+01	0.142E+05	2327.3	0.294E+00
30.0	0.216E+03	0.675E+02	0.319E+01	0.147E+05	2353.0	0.439E+00
40.0	0.215E+03	0.698E+02	0.307E+01	0.151E+05	2379.1	0.588E+00
50.0	0.214E+03	0.722E+02	0.295E+01	0.155E+05	2405.6	0.741E+00
60.0	0.213E+03	0.747E+02	0.284E+01	0.160E+05	2432.5	0.898E+00
70.0	0.212E+03	0.772E+02	0.273E+01	0.164E+05	2459.8	0.106E+01
80.0	0.210E+03	0.798E+02	0.262E+01	0.168E+05	2487.5	0.123E+01
90.0	0.209E+03	0.825E+02	0.252E+01	0.173E+05	2515.6	0.140E+01
100.0	0.208E+03	0.852E+02	0.243E+01	0.177E+05	2544.1	0.157E+01
110.0	0.206E+03	0.880E+02	0.233E+01	0.182E+05	2572.9	0.175E+01
120.0	0.205E+03	0.908E+02	0.225E+01	0.187E+05	2602.1	0.194E+01
130.0	0.203E+03	0.938E+02	0.216E+01	0.191E+05	2631.7	0.213E+01
140.0	0.202E+03	0.968E+02	0.208E+01	0.196E+05	2661.7	0.232E+01
150.0	0.200E+03	0.999E+02	0.200E+01	0.201E+05	2692.1	0.252E+01
160.0	0.199E+03	0.103E+03	0.192E+01	0.205E+05	2722.9	0.272E+01
170.0	0.197E+03	0.106E+03	0.185E+01	0.210E+05	2754.3	0.293E+01
180.0	0.195E+03	0.110E+03	0.177E+01	0.215E+05	2786.2	0.314E+01
190.0	0.194E+03	0.113E+03	0.170E+01	0.220E+05	2818.7	0.336E+01
200.0	0.192E+03	0.117E+03	0.164E+01	0.225E+05	2842.0	0.358E+01
210.0	0.190E+03	0.120E+03	0.157E+01	0.230E+05	2842.0	0.381E+01
220.0	0.188E+03	0.124E+03	0.152E+01	0.233E+05	2842.0	0.404E+01
230.0	0.187E+03	0.126E+03	0.148E+01	0.237E+05	2842.0	0.428E+01
240.0	0.186E+03	0.129E+03	0.143E+01	0.240E+05	2842.0	0.452E+01
250.0	0.184E+03	0.132E+03	0.139E+01	0.244E+05	2842.0	0.476E+01
260.0	0.183E+03	0.135E+03	0.135E+01	0.247E+05	2842.0	0.500E+01
270.0	0.181E+03	0.138E+03	0.131E+01	0.251E+05	2842.0	0.525E+01
280.0	0.180E+03	0.140E+03	0.128E+01	0.253E+05	2842.0	0.551E+01
290.0	0.179E+03	0.142E+03	0.126E+01	0.255E+05	2842.0	0.576E+01
300.0	0.178E+03	0.144E+03	0.124E+01	0.256E+05	2842.0	0.602E+01
310.0	0.177E+03	0.145E+03	0.122E+01	0.258E+05	2842.0	0.627E+01
320.0	0.177E+03	0.147E+03	0.120E+01	0.260E+05	2847.9	0.653E+01
330.0	0.176E+03	0.149E+03	0.118E+01	0.262E+05	2876.8	0.679E+01
340.0	0.175E+03	0.150E+03	0.116E+01	0.264E+05	2904.7	0.706E+01
350.0	0.174E+03	0.152E+03	0.114E+01	0.265E+05	2931.8	0.732E+01
360.0	0.173E+03	0.154E+03	0.112E+01	0.267E+05	2958.6	0.759E+01
370.0	0.172E+03	0.156E+03	0.110E+01	0.269E+05	2985.1	0.786E+01
380.0	0.171E+03	0.159E+03	0.107E+01	0.272E+05	3011.3	0.813E+01
390.0	0.170E+03	0.161E+03	0.105E+01	0.274E+05	3037.2	0.840E+01
400.0	0.169E+03	0.162E+03	0.104E+01	0.274E+05	3062.8	0.867E+01
410.0	0.169E+03	0.162E+03	0.104E+01	0.274E+05	3088.3	0.895E+01
420.0	0.169E+03	0.163E+03	0.104E+01	0.274E+05	3113.7	0.922E+01
430.0	0.169E+03	0.163E+03	0.103E+01	0.275E+05	3139.0	0.950E+01
440.0	0.168E+03	0.163E+03	0.103E+01	0.275E+05	3164.3	0.977E+01
450.0	0.168E+03	0.164E+03	0.103E+01	0.275E+05	3189.5	0.100E+02
460.0	0.168E+03	0.164E+03	0.102E+01	0.276E+05	3214.7	0.103E+02
470.0	0.168E+03	0.165E+03	0.102E+01	0.276E+05	3239.7	0.106E+02
480.0	0.167E+03	0.165E+03	0.101E+01	0.277E+05	3264.7	0.109E+02
490.0	0.167E+03	0.165E+03	0.101E+01	0.277E+05	3289.7	0.112E+02

Tabelle 10



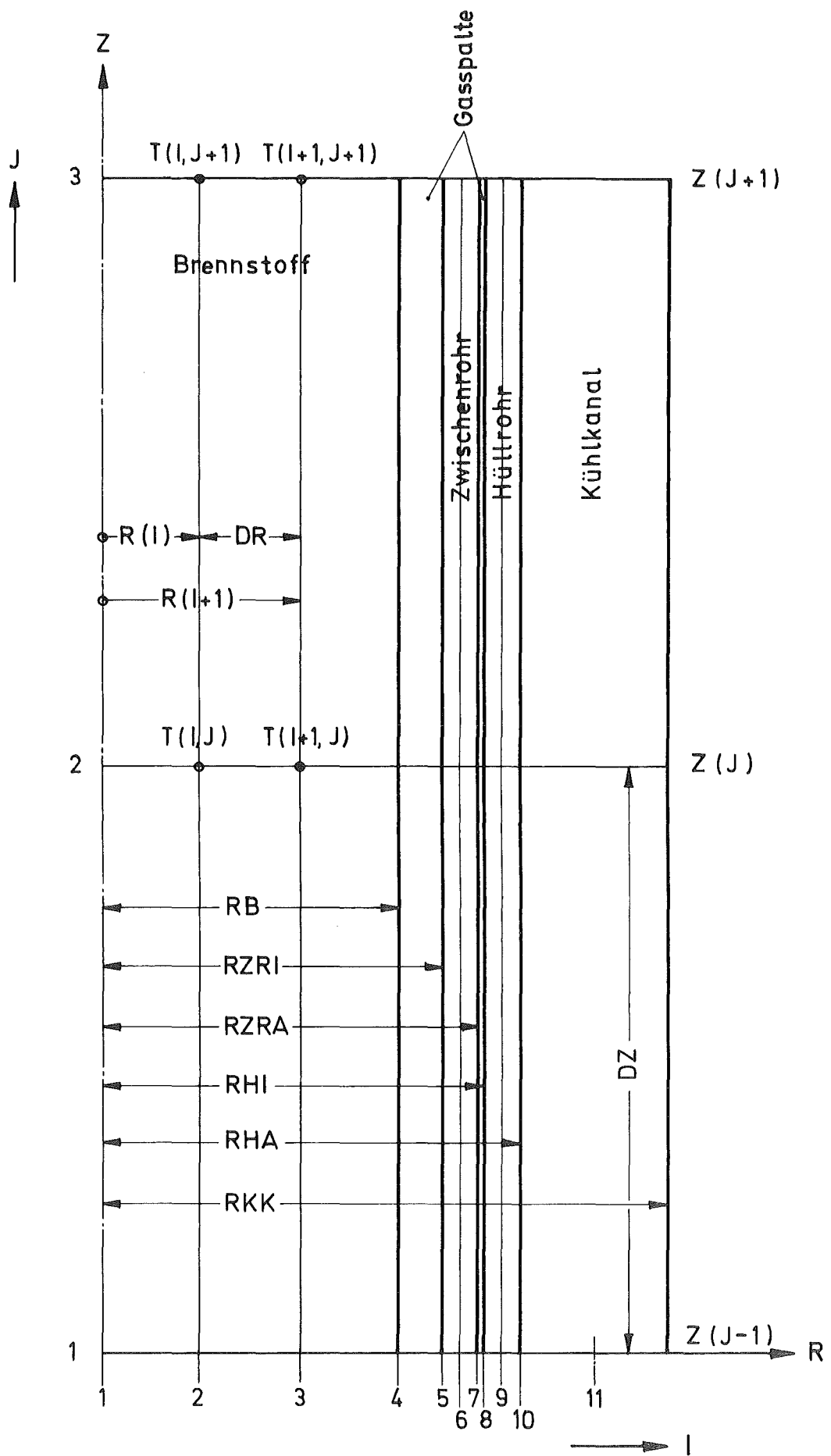


Abb. 1: Zoneneinteilung im Brennstab

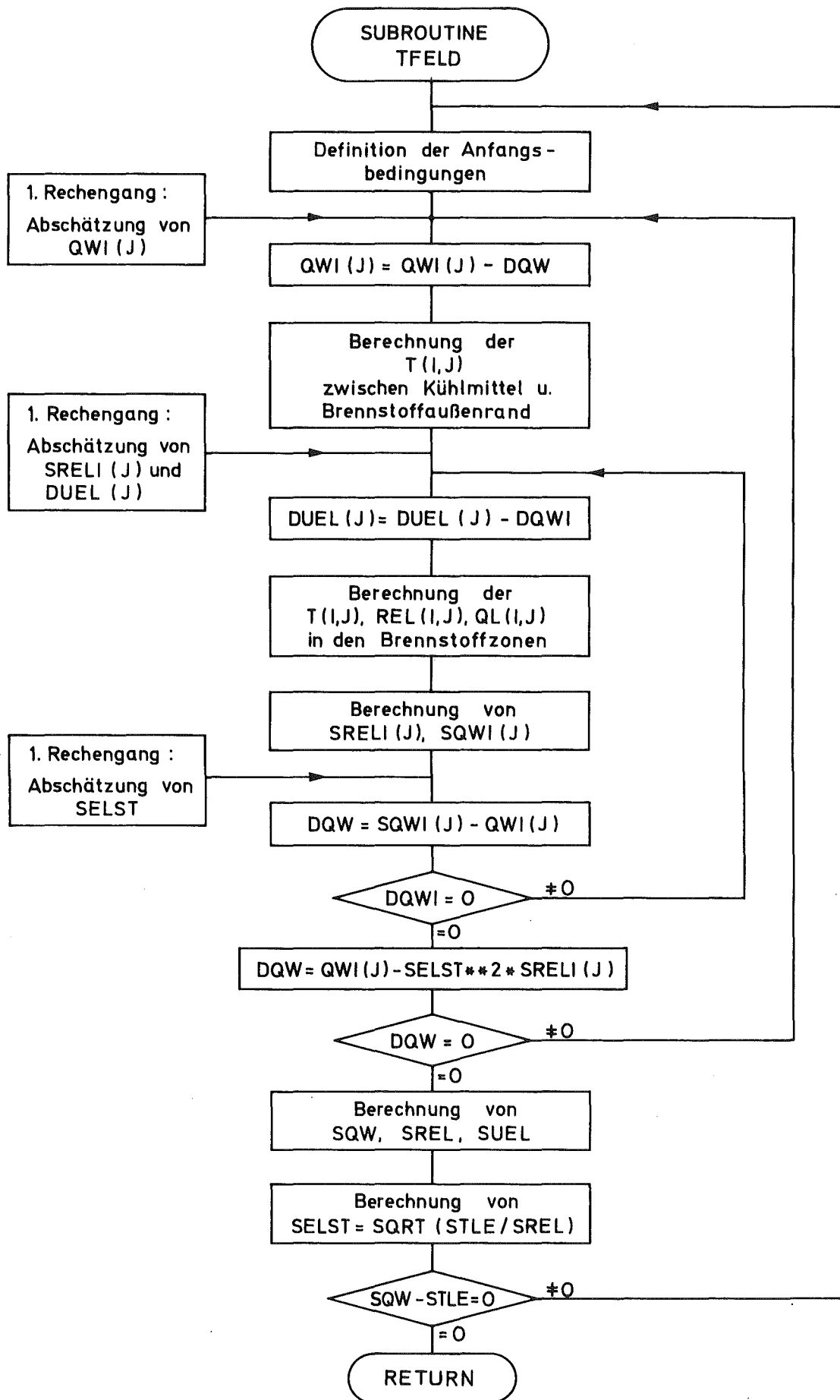


Abb. 2: Vereinfachtes Fließschema der Subroutine TFELD

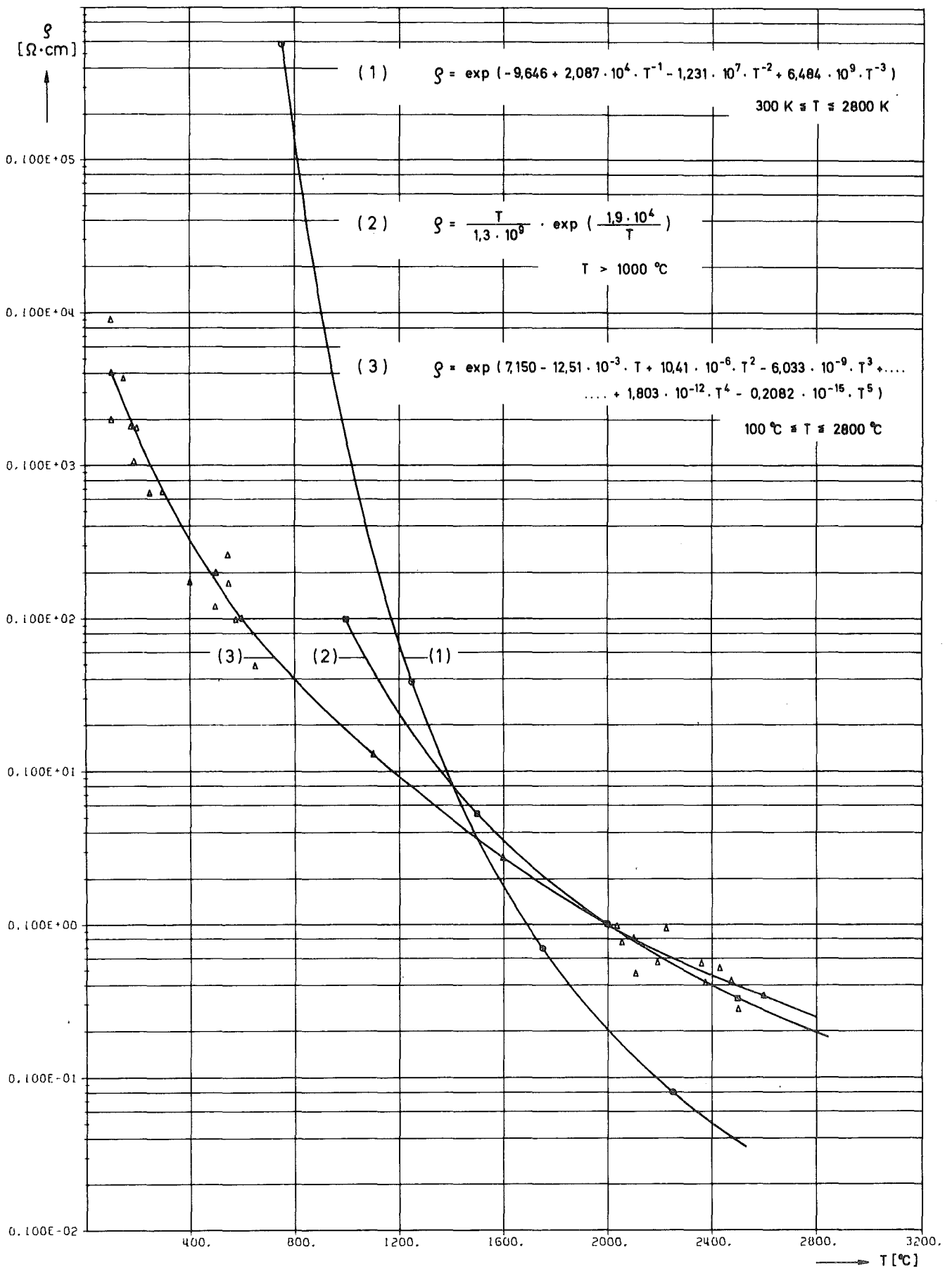


Abb. 3: Spezifischer elektrischer Widerstand von  $\text{UO}_2$

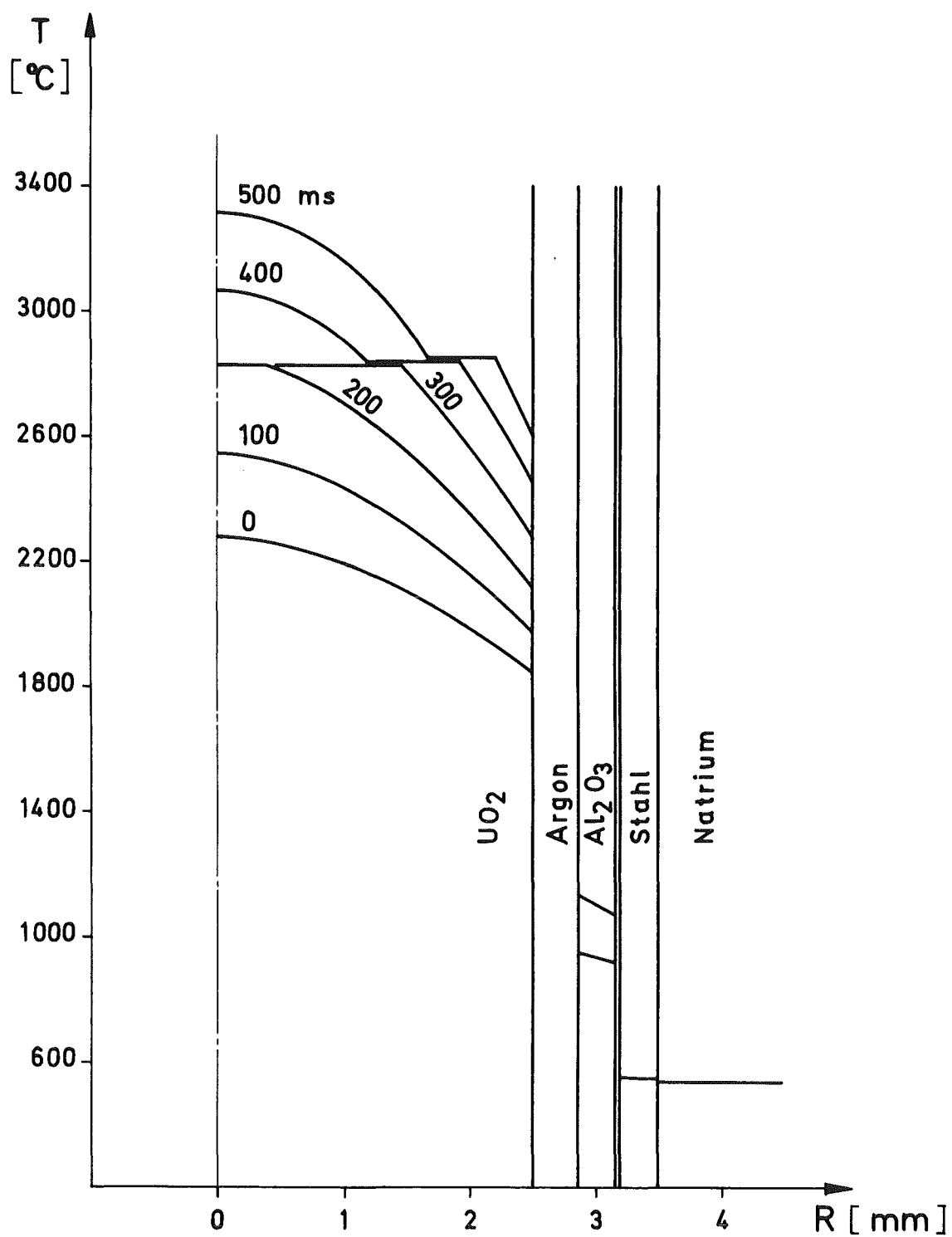


Abb. 4: Temperaturverlauf im Brennstab

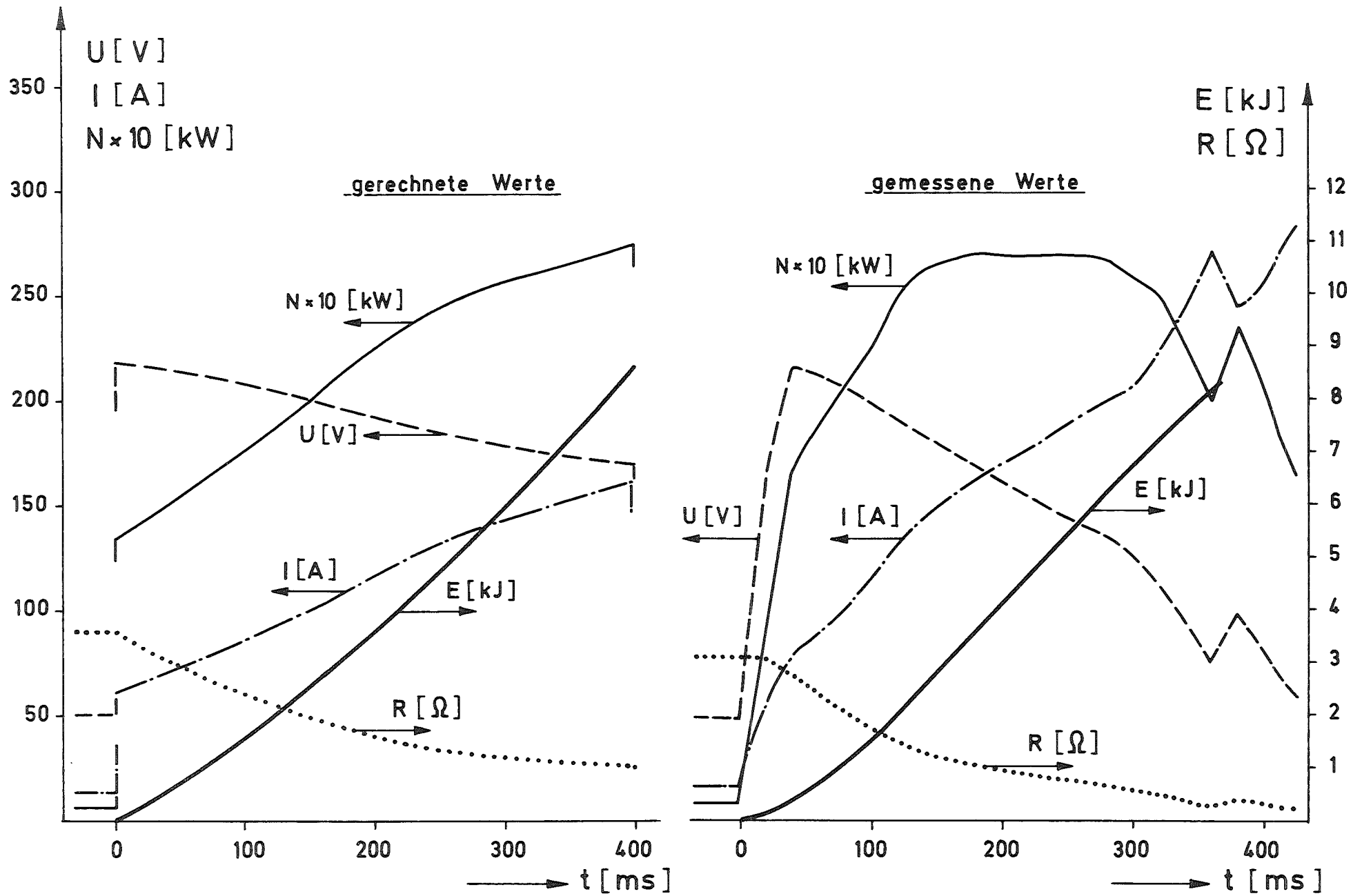


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der gerechneten und gemessenen elektrischen Werte

