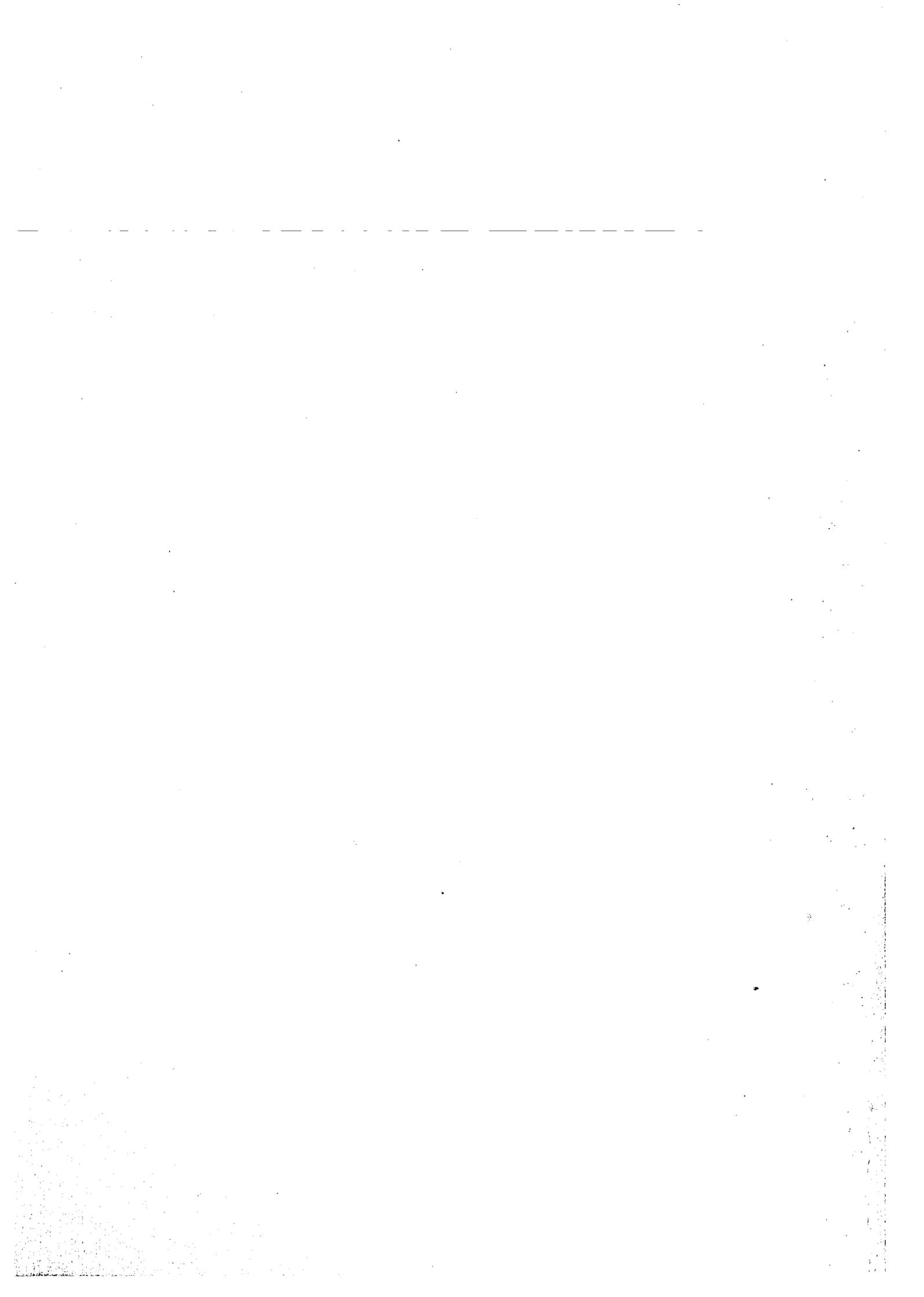


KfK 2658  
Juli 1981

# Über die Simulation des transienten Verhaltens von UO<sub>2</sub>-Stäben mit Hilfe direkt elektrischer Beheizung

A. Alexas  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Schneller Brüter

KfK 2658

Über die Simulation des transienten Verhaltens von  
 $\text{UO}_2$ -Stäben mit Hilfe direkt elektrischer Beheizung

A. Alexas

Dissertation genehmigt von der Fakultät  
Energietechnik der Universität Stuttgart

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH

D 93

### Kurzfassung

Das transiente Verhalten direkt elektrisch beheizter  $UO_2$ -Brennstäbe wurde experimentell untersucht und mathematisch beschrieben. Randbedingungen und Durchführungsmodi der Untersuchungen wurden so gewählt, daß die Ergebnisse mit äquivalenten in-pile-Experimenten, die im Rahmen der Störfallanalyse schneller, natriumgekühlter Brutreaktoren (SBR) durchgeführt werden, verglichen werden konnten. Die Ergebnisse lassen eine teilweise Übertragbarkeit eigener Experimente auf in-pile-Verhältnisse sinnvoll erscheinen.

Ausgehend von der bereits bekannten Theorie und Technik für den Betrieb unter stationären Bedingungen wurden  $UO_2$ -Stäbe quantitativ vorausberechenbaren, elektrischen Leistungstransienten ausgesetzt und ihr Verhalten bis zum Versagen untersucht. Zur mathematischen Formulierung der während der Transienten stattfindenden physikalischen Prozesse (insbesondere derer, die zum Brennstabversagen führen) wurde das Rechenprogramm VESUV entwickelt. Es wurde der Ablauf dreier Unfallketten bis zum Brennstabversagen simuliert. Die Ketten wurden aus dem gesamten Spektrum der möglichen Störfälle mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und schwerwiegenden Konsequenzen ausgewählt.

Aus den experimentellen Ergebnissen wurden einfache Korrelationen zwischen

- elektrischer Leistung und Versagenszeit
- Zeitkonstante und Versagenszeit
- elektrischer Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und Versagenszeit und
- elektrischer Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und Zeitkonstante

abgeleitet.

Durch den Vergleich der Ergebnisse mit einer Reihe experimenteller und theoretischer Resultate aus dem Bereich der nuklearen Störfallanalyse konnte gezeigt werden, daß die abgeleiteten Korrelationen entsprechend modifiziert auch auf nukleare Verhältnisse angewandt werden können.

Abstract: On the simulation of the transient behavior of  
UO<sub>2</sub>-pins by means of direct electrical heating

The transient behavior of UO<sub>2</sub>-pins with direct electric heating was investigated in the experiment and described in mathematical terms. The boundary conditions and modes of implementation of the investigations were chosen in such a way that the results were comparable with the results of equivalent in-pile experiments carried out within the framework of the accident analysis of fast sodium-cooled breeder reactors (FBR). The results make it reasonable to transfer in part our own experiments to in-pile conditions.

Using the theory and technology already known for operation under steady-state conditions, UO<sub>2</sub>-pins were exposed to electric power transients precalculable in quantitative terms and their behavior until failure was investigated. The VESUV computer code was developed in order to be able to formulate mathematically the physical processes taking place during the transient (above all the events leading to fuel pin failure). The sequence of three chains of accidents until fuel pin failure was simulated. The chains were selected from the whole spectrum of possible accidents characterized by a very low probability of occurrence and serious consequences.

Simple correlations existing between the

- electric power and time-to failure
- time constant and time-to-failure
- electric power at the time of failure and time-to-failure
- electric power at the time of failure and time constant

were derived from the experimental results.

By comparison of the results with a number of experimental and theoretical results from nuclear accident analysis it was demonstrated that the derived correlations can be applied also to nuclear conditions after suitable modification.

	<u>Seite</u>
Kurzfassung	1
Inhaltsverzeichnis	3
Nomenklatur	5
Indizes	6
Verzeichnis der Tabellen	7
Verzeichnis der Abbildungen	9
1. Einleitung	15
2. Stand der Kenntnis	19
3. Experimenteller Aufbau	25
3.1 Der Referenzstab	25
3.2 Der Versuchsstand	28
3.2.1 Das Versuchsgefäß	28
3.2.2 Der Kühlkreislauf	29
3.2.3 Die elektrische Heiz- und Exkursionsanlage (ELHEA)	29
3.2.3.1 Grundsätzliches zur elektrischen Be-	29
heizung eines $UO_2$ -Zylinders	
3.2.3.2 Funktionen der Anlage	30
3.3 Meß- und Regeleinrichtungen am Versuchsstand	32
3.3.1 Registrierung und Messung der elektrischen Daten	32
3.3.2 Messung von Gasdurchfluß und Gastemperatur	32
3.3.3 Axialer Druck auf die Pelletsäule	32
3.3.4 Messung der Oberflächentemperatur der Hülle	33
und des Brennstoffs	
3.3.5 Visuelle Beobachtungen und Registrierung des	35
Versuchsablaufs	
3.3.6 Steuerung des experimentellen Versuchsablaufs	35
4. Der elektrische Widerstand der Prüflinge bzw. des $UO_2$	37
5. Theoretische Überlegungen	43
5.1 Die stationäre radiale Temperaturverteilung im $UO_2$ -Brennstab	43
5.1.1 Das Temperaturprofil im Brennstab	43
5.1.2 Der Temperaturverlauf im Spalt Brennstoff - Hülle	46
und der Temperaturabfall in der Hülle	
5.1.3 Anpassung der elektrischen Stableistung an	48
eine nukleare, bei gleicher Zentraltemperatur	

	<u>Seite</u>
5.2 Das thermodynamische Verhalten eines $UO_2$ -Stabes während elektrisch applizierter Leistungstransienten	51
5.2.1 Der Temperaturverlauf	51
5.2.2 Zur Berechnung der Transportkoeffizienten und Stoffdaten	56
5.3 Stoffdaten für $UO_2$ , Helium und Stahl Nr. 4401	59
6. Experimentelle Ergebnisse	63
6.1 Experimente zum Verhalten von direkt elektrisch beheizten $UO_2$ -Stäben beim Ausfallen der Helium-Kühlung (LOF-Experimente)	63
6.2 Experimente zum Verhalten von elektrisch beheizten $UO_2$ -Stäben bei applizierten Leistungsexkursionen (TOP-Experimente)	83
6.3 Experimente zum Verhalten von direkt elektrisch beheizten $UO_2$ -Stäben beim Ausfallen der Kühlung und verzögerten Einleitung von elektrisch applizierten Leistungstransienten (LOF driven TOP-Experimente)	115
7. Diskussion der erzielten Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf nukleare Verhältnisse, Schlußfolgerungen und Fehlerbetrachtung	123
7.1 LOF-Experimente	123
7.2 TOP- und LOF driven TOP-Experimente	126
7.3 Fehlerbetrachtung	136
8. Zusammenfassung	141
9. Literatur	145
Anhang 1: Loss-of-Flow-Experimente	161
Anhang 2: TOP- und LOF driven TOP-Experimente	199

## Nomenklatur

### Häufig verwendete Symbole

$\delta$	$\overline{[cm]}$	Spalt zwischen Brennstoff und Hülle
$\gamma$	$\overline{[kg/m^3]}$	Dichte
$\lambda$	$\overline{[W/m^3]}$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	$\overline{[\Omega \cdot cm]}$ , $\overline{[\Omega \cdot m]}$	spezifischer Widerstand
$\rho$	$\overline{[kg/m^3]}$	Dichte (ab Abschnitt 5.1.2)
$\rho$	$\overline{[\$]}$	Reaktivität
$\dot{\rho}$	$\overline{[\$/s]}$	Reaktivitätsrampe
$\tau$	$\overline{[s]}$	Zeitkonstante (Gl. 6.7 und 6.7a, wenn $t = \tau$ , so $N = N_0 \cdot e$ )
$c_p$	$\overline{[J/kg \cdot K]}$	spezifische Wärmekapazität
$\dot{D}$	$\overline{[g/s]}$	Helium-Durchsatz
$\dot{D}_R$	$\overline{[%/s]}$	Durchsatzabnahme-Rate
$E$	$\overline{[J/g]}$	Dem Brennstab bis zum Versagen zugeführte Energie bezogen auf den stationären Zustand
$E_{Sch}$	$\overline{[J/g]}$	Dem Brennstab bis zum Versagen zugeführte Energie bezogen auf den kalten Zustand
$\Delta H$	$\overline{[J/kg]}$	Brennstoffenthalpie
$I$	$\overline{[A]}$	Strom
$k$		Multiplikationsfaktor
$l$	$\overline{[m]}$	Brennstablänge
$L_V$	$\overline{[W/g]}$	Leistung zum Zeitpunkt des Versagens (Tab. 7.2)
$M_m$	$\overline{[%]}$	Geschmolzenes Material (Tab. 7.2)
$N$	$\overline{[W]}$	elektrische Leistung
$Q$	$\overline{[W/cm^3]}$	Wärmequellendichte
$q$	$\overline{[W/m]}$ , $\overline{[W/cm]}$	lineare Stableistung
$R$	$\overline{[\Omega]}$	Widerstand
$r$	$\overline{[m]}$	Brennstabradius
$R_{index}$	$\overline{[m]}$	Brennstabradius
$T$	$\overline{[K]}$ (seltener in $\overline{[^\circ C]}$ )	Temperatur
$t$	$\overline{[s]}$	Zeit
$U$	$\overline{[V]}$	Spannung

Indizes

A	Anfang
BA	Brennstoff außen
BZ	Brennstoff zentral
e	elektrisch
G	gesamt
H	Hülle
HI	Hülle (innen)
HA	Hülle (außen)
He	Helium
L	Leitung Gl. 5.27
n	nuklear
o	Anfangswert
St	Stahl
ST	Strahlung Gl. 5.27
T	Total
v	Versagen

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	<u>Seite</u>
Tab. 3.1 Wärmeleitfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit einiger Gase und Gasgemische	25
Tab. 3.2 Technische Daten des EPBF- und des SNR-300-Stabes	26
Tab. 4.1 Spezifikation der 5 Stabkategorien zur Untersuchung des UO <sub>2</sub> -Widerstandes am EPBF-Versuchsstand	39
Tab. 6.1 Daten des UO <sub>2</sub> -Stabes im stationären Zustand beim Versuch Nr. 191176	64
Tab. 6.2 Leistung, el. Widerstand, Zentral-, mittlere, Außen- und Hüllentemperatur, Gesamtenergie und Helium-Abnahme beim Versuch Nr. 191176	69
Tab. 6.3 Protokoll-Auszug über die Berechnung der Temperaturverteilung aus dem Heyn-Durchmesser beim Versuch Vs.-Nr. 191176	72
Tab. 6.4 Übersicht über alle LOF-Experimente	73
Tab. 6.5 Eingabe-Daten, Stoffwerte und Enddaten für den Versuch Vs-Nr. 220277	99
Tab. 6.6 Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 220277, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des Stabes	100
Tab. 6.7 Geschmolzene Fraktion, Energie-Zufuhr, Enthalpie, Gesamtenergie und Kühlmittelreduktion während des Versuchs Vs-Nr. 220277	101
Tab. 6.8 Eingabe-Daten, Stoffwerte und End-Daten für den Versuch Vs-Nr. 080277	108
Tab. 6.9 Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 080277, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des Stabes	109

Tab. 6.10	Geschmolzene Fraktion, Energiezufuhr, Enthalpie, Gesamt-Energie und Kühlmittel-Reduktion während des Versuchs Vs-Nr. 080277	110
Tab. 6.11	Überblick über charakteristische Ergebnisse der Serien zur Simulation von TOP-Unfällen	111
Tab. 6.12	Eingabe-Daten, Stoffwerte und End-Daten für den Versuch Vs-Nr. 230377	119
Tab. 6.13	Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 230377, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des Stabes	120
Tab. 6.14	Geschmolzene Fraktion, Energie-Zufuhr, Enthalpie, Gesamt- Energie und Kühlmittelreduktion während des Versuchs Vs-Nr. 230377	121
Tab. 7.1	Vergleich charakteristischer Kenndaten von in-pile- und eigenen (EPBF)-Experimenten	124
Tab. 7.2	Überblick über in-pile-Experimente zur Untersuchung von positiven Reaktivitätsrampen (TREAT-Experimente 0.5, 3, 5 und 10 \$/s).	129

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
Abb. 3.1 Längsschnitt durch zwei EPBF-Versuchsstäbe	27
Abb. 3.2 Montagetechnik am oberen bzw. unteren Ende	27
Abb. 3.3 Blockschaltbild der elektrischen Heizanlage des EPBF-Versuchsstandes	30
Abb. 3.4 Strom (I)-, Spannungs (U)- und Stableistungsverlauf (q) bei einem Reaktivitätsstörfall-Simulationsversuch am EPBF-Stand	31
Abb. 3.5 Eichkurven zur Messung der Hüllen- und $UO_2$ -Temperatur	34
Abb. 3.6 Steueranlage am EPBF-Versuchsstand	36
Abb. 4.1 Spezifischer elektrischer Widerstand von $UO_2$ als Funktion der Temperatur nach/131/	37
Abb. 4.2 Elektrischer Widerstand von $UO_2$ -Stäben als Funktion der Stableistung	38
Abb. 4.3 Spezifischer Widerstand von festem $UO_2$ als Funktion der Temperatur. Vergleich der eigenen Experimente mit Angaben aus der Literatur	42
Abb. 5.1 Korrelation zwischen elektrischer und nuklearer Stableistung nach dem "Enthalpie-Kriterium"	49
Abb. 5.2 Anpassung der stationären Zustände eines elektrisch und eines nuklear betriebenen $UO_2$ -Brennstabes auf der Basis des "Enthalpie-Kriteriums"	50
Abb. 5.3 Brennstabmodell des EPBF-Brennstabes: $r_s$ : Stabunterteilung für stationäre Rechnungen $r_D$ : Stabunterteilung für dynamische Rechnungen	52
Abb. 6.1 Original-Ausdruck des Polycomp-Schreibers, der den Verlauf der He-Temperatur, der Spannung und der Leistung während des Versuchs Vs-Nr. 191176 zeigt	63
Abb. 6.2 Helium-Durchsatz als Funktion der Zeit. Vergleich zwischen Theorie und Experiment beim Versuch Vs.-Nr. 191176	65

	<u>Seite</u>
Abb. 6.3 Temperaturverteilung im $UO_2$ -Stab während des Ablaufs des Versuchs Vs-Nr. 191176	66
Abb. 6.4 Strom- und Spannungsverlauf bis zum Versagen des $UO_2$ -Stabes beim Versuch Vs-Nr. 191176	67
Abb. 6.5 Hüllentemperatur als Funktion der Zeit während des Versuchs Vs-Nr. 191176. Vergleich Theorie/Experiment	68
Abb. 6.5a Zeitverlauf der Zentral-, mittleren, Außen- und Hüllentemperaturen des $UO_2$ -Stabes (TZ, TM, TBA, TC) beim Versuch Vs-Nr. 191176 (theoretisch)	70
Abb. 6.6 Temperaturverteilung im Stab. Vergleich mit Metallurgie	74
Abb. 6.7 Korrelation zwischen der Versagenszeit und der Anfangstableistung. Vergleich der experimentellen und der theoretischen Resultate für alle LOF-Experimente	75
Abb. 6.8 Teilvergrößerung des Schliffes aus Abb. 6.6	78
Abb. 6.9 Der $UO_2$ -Brennstab nach dem LOF-Versuch Vs-Nr. 191176	79
Abb. 6.10 Der $UO_2$ -Brennstab nach dem Versuch K-25 /106/	80
Abb. 6.11 $UO_2$ -Brennstäbe nach den LOF-Versuchen Vs-Nr. 141175 (links) und Vs-Nr. 280676 (rechts)	81
Abb. 6.12 Pellet-Schliff und Brennstab-Aufnahmen nach dem LOF-Versuch VS-Nr. 270876	82
Abb. 6.13 Korrelation zwischen Reaktivitätsrampe und Reaktorperiode für eine Reihe von in-pile-Experimenten (TREAT-Experimente, H- und E-Series)	85
Abb. 6.14 Normierte Leistung als Funktion der Zeit. Gesamtspektrum der eigenen Experimente im Vergleich zu in-pile-Resultaten +) (Rampe in $\$/s$ , 2 = SNR-2 / 300 = SNR-300)	86
Abb. 6.15 Lichtschreiber-Ausdruck während des Versuchs Vs-Nr. 220277. Aufzeichnung von Helium-Durchfluß D, Hüllentemperatur $T_{HA}$ , Spannung U und elektrischem Strom J.	88

	<u>Seite</u>
Abb. 6.16 Leistungsverlauf beim Versuch Vs-Nr. 220277	89
Abb. 6.17 Leistungsverlauf. Vergleich Experiment /Theorie	90
Abb. 6.18 Pellet-Schliff des $UO_2$ -Brennstabes nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 220277	91
Abb. 6.19 Pellet-Schliff nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 220277 (Teilvergrößerung aus der Abbildung 6.18)	92
Abb. 6.20 Pellet-Schliffe nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 220277 (Teil- vergrößerungen aus der Abb. 6.18 zur Verdeutlichung des Phänomens der Diffusion von Hüllenmaterial ins Innere des Brennstabes)	93
Abb. 6.21 Pellet-Schliff nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 080277 (Teil- vergrößerung aus der Abb. 6.22, worauf man auch die "Härte-Test"-Abdrücke - viereckig - erkennen kann)	94
Abb. 6.22 Pellet-Schliffe nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 080277. Links erkennt man Brennstoffmaterial wiedererstartt auf der Brenn- stoffoberfläche; rechts sieht man (oben) wiedererstartetes Brennstoffmaterial und darauf Hüllenmaterial	95
Abb. 6.23 Teilvergrößerung aus der Abb. 6.22. Wiedererstartetes Brennstoffmaterial auf der Brennstoffoberfläche	96
Abb. 6.24 Teilvergrößerung aus der Abb. 6.22 zum Phänomen der Diffusion von Hüllenmaterial ins Innere des Brennstabes	96
Abb. 6.25 Teilvergrößerungen aus der Abbildung 6.22 zur Verdeutlichung der Diffusion Hüllenmaterials ins Stabinnere	97
Abb. 6.26 Temperaturverteilung im Stab während der Transiente	102
Abb. 6.27 Leistungsverlauf U. Geschmolzene Fraktion	102
Abb. 6.28 Gesamtenergie und Enthalpie während der Transiente	103
Abb. 6.29 Temperaturverlauf an charakteristischen Stellen des Stabes	103
Abb. 6.30 Leistungsverlauf während des Versuchs Vs-Nr. 080277	105
Abb. 6.31 Leistungsverlauf. Vergleich Experiment / Theorie	106
Abb. 6.32 Leistungsverlauf U. Geschmolzene Fraktion	106

	<u>Seite</u>	
Abb. 6.33	Temperaturverteilung im Stab während der Transiente	107
Abb. 6.34	Temperaturverlauf an charakteristischen Stellen des Stabes	107
Abb. 6.35	Korrelation zwischen Versagensstableistung $q_v$ und Versagenszeit $t_v$ für alle TOP-Simulationsexperimente Versagenskriterium: Augenblick der ersten $UO_2$ -Ejektionen	112
Abb. 6.36	Korrelation zwischen Versagenszeit und Zeitkonstante mit der Anfangsstableistung $q_0$ als Parameter	113
Abb. 6.36a	Vergleich der Beziehungen 6.16 und 6.16a	114
Abb. 6.37	Leistungsverlauf. Vergleich Experiment / Theorie	116
Abb. 6.38	Temperaturverteilung im Stab während der Transiente	116
Abb. 6.39	Pellet-Schliff nach dem LOF driven TOP-Simulations-Experiment Vs-Nr. 230377	117
Abb. 7.1	Korrelation zwischen Versagenszeit und Anfangsstableistung für in-pile- (TREAT) und eigene (EPBF)-LOF-Simulationsexperimente; dazu Resultate des Programms VESUV mit der Kühlmittelabnahmerate als Parameter	125
Abb. 7.2	Pellet-Schliff nach dem TOP-Versuch Vs-Nr. 101276 zur Verdeutlichung der bei den eigenen Versuchen aufgetretenen maximalen Schmelzfraktionen	127
Abb. 7.3	Normierte Leistung $N_v/N_0$ zum Zeitpunkt des Versagens und Reaktivitätsrampe als Funktionen der Versagenszeit $t_v$ für die beiden deutschen SBR's SNR 300 und SNR 2	128
Abb. 7.4	Korrelation zwischen Reaktivitätsrampe und Versagenszeit. Vergleich zwischen Theorie (SNR 300, SNR 2) und TREAT-Experimenten	130
Abb. 7.4a	Korrelation zwischen Reaktivitätsrampe und Versagenszeit. Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und eigenen Experimenten	131
Abb. 7.5	Korrelation zwischen der normierten Leistung $N_v/N_0$ zum Zeitpunkt des Versagens und der Versagenszeit $t_v$ . Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und eigenen Experimenten	132

	<u>Seite</u>
Abb. 7.6 Korrelation zwischen normierter Leistung $N_v/N_o$ zum Zeitpunkt des Versagens und Zeitkonstante $\tau$ . Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und eigenen Experimenten	133
Abb. 7.7 Charakteristische Ereignisse hinsichtlich des Brennstabversagens während der in-pile-Experimente E8, E7 und F2 und der eigenen Experimente Vs-Nr. 101276 und 141176	134
Abb. 7.8 Pellet-Schliff nach dem in-pile-Test H3 (H-Series)	137
Abb. 7.9 Pellet-Aufnahmen nach dem in-pile-Test H3 (H-Series)	138
Abb. 7.10 Pellet-Aufnahmen nach dem in-pile-Test H3 (H-Series)	139
Abb. 7.11 Pellet-Aufnahmen nach dem eigenen Experiment K-25 /106/	140



## 1. Einleitung

Im Rahmen der Störfallanalyse schneller natriumgekühlter Brutreaktoren nimmt die Untersuchung von Störfällen mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit eine primäre Rolle ein. Darunter sollen solche Störfälle verstanden werden, deren Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner als  $10^{-6}$  pro Reaktorbetriebsjahr ist /1, 2 und 3/ und deren Ablauf mit schwerwiegenden Folgen für den Reaktor bis hin zur völligen Kernzerlegung (Core Disassembly) verbunden sein kann. Das komplizierte neutronenphysikalische und technische System, das die Gesamtheit eines SBR darstellt, erlaubt rein mathematisch eine Reihe von Fehlermechanismen und deren Kombinationen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit  $< 10^{-6}$  pro Reaktorbetriebsjahr ist. Jedoch läßt sich die zu untersuchende Anzahl von Unfallketten erheblich reduzieren, wenn man deren Analyse von folgenden Kriterien abhängig macht:

1. Unfallabläufe, für die man die Initiierung mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausschließen kann, werden nicht untersucht.
2. Mehrere Störfallketten, die in ihrem Ablauf irgendwann zusammenmünden, werden anhand einer einzigen Betrachtung untersucht.
3. Bei Störfallketten mit unterschiedlichem Szenario und unterschiedlichen Folgen wird nur die Kette mit den schwerwiegendsten Konsequenzen bzw. die, die alle anderen abdeckt, untersucht.

Anhand dieser Betrachtung lassen sich die zu untersuchenden Störfallketten auf den sogenannten Kühlmittelausfall und den Reaktivitätsstörfall (loss-of flow- bzw. transient-overpower-accident<sup>\*)</sup>) reduzieren, wie man aus der ausführlichen Darstellung in /14/ für den SNR-2 entnehmen kann. Hinzu wird in einer Reihe amerikanischer Arbeiten /23, 39, 57, 69 und 82/ auch der sog. LOF driven TOP-Unfallablauf intensiv diskutiert.

Die hierbei postulierten Einleitungsmechanismen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Totaler Ausfall aller Kühlmittelpumpen bei gleichzeitigem Versagen der beiden diversitär und redundant ausgelegten Abschaltssysteme (LOF-accident).
2. Einlaufen einer positiven Reaktivitätsrampe bei gleichzeitigem Versagen beider Abschaltssysteme (TOP-accident)

---

<sup>\*)</sup> im weiteren durch LOF bzw. TOP abgekürzt.

3. TOP-Störfall infolge positiver Reaktivitätsbeiträge, die durch das Verhalten von Kühlmittel, Hülle und Brennstoff während eines LOF-Störfalles zustandekommen könnten (LOF driven TOP - Unfall).

Der Ablauf der Gesamtheit der Vorgänge bis hin zu der möglichen Kernzerlegung und darüberhinaus (Abführung der Exkursionsenergie und der Nachwärme, Aerosolerzeugung und -abbau im Reaktorgebäude) wird in einer Reihe von Arbeiten intensiv behandelt /1-41/.

Das Verhalten eines einzelnen Brennstabes nimmt im Rahmen der Untersuchungen eine strategische Schlüsselstellung ein, die daraus resultiert, daß

- der Brennstab, bzw. seine intake Hülle die ersten Barrieren gegen eine unkontrollierte Spaltproduktfreisetzung sind
- sich über das Verhalten eines einzelnen Brennstabes Rückschlüsse auf das Verhalten des gesamten Kerns ziehen lassen (TOP-Störfall)
- das Brennstabversagen eine dominante Stelle in der Unfallkette einnimmt und zusammen mit dem Beginn des Na-Siedens das weitere Störfallszenario charakterisiert
- sich die Art des Versagens bzw. das den Rechnungen zugrundeliegende Versagenskriterium sehr massiv auf die weitere Störfallabwicklung bis hin zum Endergebnis auswirkt.

Die Komplexität der physikalischen Prozesse zum einen und der Mangel an ausreichender experimenteller Erfahrung über den gesamten Bereich zum anderen erschweren jedoch eine logisch konsistente Betrachtung des transienten Brennstabverhaltens. Nach wie vor ist zur Beschreibung der Vorgänge eine Reihe von modelltheoretischen Ansätzen erforderlich, die zunächst die physikalischen Phänomene einzeln beschreibt und danach zusammenhängend nachbildet. Auf diese Weise bleibt die notwendige theoretische Behandlung nur solange sinnvoll, wie sie mit dem Experiment nicht in Konflikt kommt.

Eine weitere experimentelle Abdeckung theoretischer Ansätze wird helfen, die Beschreibung des Brennstabverhaltens konsistenter zu gestalten und dadurch die gesamte Störfallanalyse auf eine noch solidere Basis zu stellen.

Diese erkannte Notwendigkeit der Erweiterung der experimentellen Basis schlägt sich in einer Vielzahl von in-pile- und out-of-pile-Experimenten nieder, die in den letzten 5 Jahren durchgeführt wurden /42 - 89/. Diese Aktivitäten haben den Wissensstand erheblich angehoben, ohne jedoch dazu geführt zu haben, das Problem des transienten Brennstabverhaltens als abgeschlossen betrachten zu können.

Es ist daher Ziel dieser Arbeit, einen Beitrag zu liefern, der helfen soll, die Vorgänge, die sich in einem SBR-Stab während des Ablaufs der drei erwähnten Störfälle abspielen, noch besser zu verstehen. Der jeweilige Unfallablauf wird aufgrund der postulierten Einleitungsmechanismen out-of-pile nachgebildet. Die Prüflinge sind  $UO_2$ -Stäbe mit Incoloy-800 Stahlhülle, die über direkte elektrische Stromzufuhr geheizt und in einem Helium-Loop stationär auf einem beliebigen Temperaturniveau betrieben werden können.

Out-of-pile-Experimente unterliegen selbstverständlich den Nachteilen der nicht direkten Erfassung des Einflusses einer Reihe von Parametern, die nur unter den neutronenphysikalischen Bedingungen eines kritischen oder überkritischen Cores anzutreffen sind. Sie eröffnen jedoch eine Reihe von Möglichkeiten, deren vollständige Ausnutzung Informationen über den Ablauf von Prozessen liefert, die aus in-pile-Experimenten nicht zu erhalten sind.

- Direkte und einfache Instrumentierung und Meßwerterfassung
- vielfache Möglichkeiten zur Parameteränderung
- Zugänglichkeit zur visuellen Erfassungs- und Auswertungsmethode
- einfache Nachuntersuchungen
- Quantität der Experimente (Zeitfaktor)

sind Vorteile gegenüber in-pile-Untersuchungen, die dazu geführt haben, daß vielerorts /105-120/ out-of-pile-Experimente durchgeführt werden, deren Ergebnisse in die sicherheitstechnischen Überlegungen für schnelle natriumgekühlte Reaktoren einfließen.

Die Arbeiten basieren auf der bereits früher /105,106/ angewandten Technik des direkt elektrisch beheizten  $UO_2$ -Brennstabes zur Simulation des Verhaltens eines SBR-Brennstabes unter stationären und transienten Betriebs- und Störfallbedingungen. Hierbei /106/ allerdings waren die Leistungsrampen nicht störfallspezifisch und daher konnten die Ergebnisse nicht auf spezielle Unfall-

situationen angewendet werden. In der vorliegenden Arbeit dagegen werden - ausgehend von einer simulierten Nachbildung der thermodynamischen Verhältnisse im stationären Betrieb eines SBR - elektrisch betriebene  $UO_2$ -Stäbe dynamischen Leistungsexkursionen ausgesetzt, in denen

- LOF-Störfälle
- TOP-Störfälle und
- LOF driven TOP-Störfälle,

wie sie für einen SBR mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit  $< 10^{-6}$  pro Betriebsjahr denkbar sind, simuliert werden.

Die experimentellen Beobachtungen werden mit den theoretischen Rechnungen verglichen und mit entsprechenden Rechnungen aus der Störfallanalyse und aus in-pile-Experimenten ins Verhältnis gesetzt. Die daraus gewonnenen neuen Erkenntnisse werden auf ihre Bedeutung und ihre Konsequenzen für die Störfallanalyse hin diskutiert. Hierbei wird berücksichtigt, daß trotz der Einhaltung einer Reihe von Randbedingungen, die der Unfalltheorie entnommen wurden, jeder Simulation physikalische Restriktionen auferlegt sind, die eine direkte Extrapolation der Ergebnisse auf das simulierte Gesamtsystem immer erschweren.

## 2. Stand der Kenntnis

Die Gesamtheit der Arbeiten auf dem Gebiet des Brennstabverhaltens im Zusammenhang mit der Analyse von SRB-Störfällen sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit läßt sich vom Vorgehen her in drei Kategorien unterteilen:

- a) modelltheoretische Arbeiten
- b) in-pile-Experimente
- c) out-of-pile-Experimente

Die Notwendigkeit der modelltheoretischen Erfassung des Gesamtproblems wurde an anderer Stelle /100/ ausführlich diskutiert. Es ist physikalisch einleuchtend, daß die Identifizierung der Einzelphänomene, deren gegenseitige Beeinflussung und die mathematische Erfassung der Gesamtheit der physikalischen Abläufe während des Störfallzenarios nur auf der Basis von modelltheoretischen Ansätzen und mit Hilfe von umfangreichen Rechenprogrammen erfolgen kann. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch die Entwicklung der Rechenprogramme SATURN /94, 95, 99/, LIFE /97, 98/, BREDA /96, 100/, CMOT /91/, CLAZAS /92/, CLAP /104/ und anderer /93, 102/ zu sehen.

Die dominante Stellung die der Brennstab im Rahmen der Störfallanalyse einnimmt, zwingt jedoch zu versuchen, sovieler physikalische Prozesse experimentell zu untersuchen und abzudecken, bis eine logisch konsistente Koppelung zwischen Theorie und Experiment zustande gekommen ist. Diese Koppelung ist erfolgt für den stationären Betrieb bzw. für das Brennstabverhalten bis zum Versagen, z.B. durch eine Kombination der Rechenprogramme SATURN und BREDA /101/. Allerdings hängt die Nachbildung der Verhältnisse über den Beginn des Versagens hinaus sehr stark vom zugrundegelegten Versagenskriterium ab.

Auf der Basis einer Reihe von experimentellen Untersuchungen (H-Series, E-Series, HOP-Series und HUT-Series) /83/ für Reaktivitätsrampen zwischen  $3 \text{ } \mu\text{/s}$  und  $3 \text{ } \$/\text{s}$  werden heute im wesentlichen folgende Versagensmechanismen diskutiert:

- Kühlmittelsieden an der Hüllenoberfläche,
- Hüllenschmelzen infolge Kontaktes mit geschmolzenem Brennstoff an der Hüllenninnenseite,
- Aufbau von Brennstoffdampfdruck,
- Differentielle thermische Expansion zwischen Hülle und Brennstoff,
- Spaltgasfreisetzung infolge Brennstoffschmelzens,
- Spaltgasfreisetzung vor Beginn des Brennstoffschmelzens,
- Transientes Brennstoffschwellen.

Die relative Bedeutung dieser Versagensmechanismen hängt ab von Brennstab-Design, Abbrandzustand und Details der Reaktivitätsrampe. In den wenigen Fällen ist nur ein einzelner Mechanismus der dominante Versagensgrund, während im allgemeinen das Brennstabversagen aus einer Kombination o.g. Mechanismen resultiert.

In dem Versuch, ein allgemein gültiges Versagenskriterium zu definieren, wurde im Hanford Eng. Dev. Laboratory (HEDL) das empirische "Damage Parameter Correlation"-Kriterium entwickelt /83/, das die für die Störfallinitiation und -entwicklung wesentlichen Einflußgrößen derart korreliert, daß die bei den Experimenten beobachteten Versagenssequenzen zutreffend erfaßt werden. Allerdings wird wegen der dünnen experimentellen Basis bezweifelt, daß diese Korrelation in den Störfallanalysen diskussionslos akzeptiert wird (Ref. in /4/ ).

Eine Bilanz der betrachteten in-pile-Experimente erlaubt folgende Aussagen:

1. Brennstoffbewegung vor dem Brennstabversagen ist möglich, insbesondere für frische Brennstäbe und für Brennstäbe, die unter hohem Leistungsniveau stehen.
2. Bei Leistungsexkursionen sind
  - differentielle thermische Expansion,
  - Spaltgasfreisetzung und
  - Schmelzen der Hülledie vorherrschenden Versagensmechanismen, die zum Brennstabversagen führen.

3. Frische Stäbe zeichnen sich durch hohe Versagensgrenzen aus. Für bestrahlte Brennstäbe existiert eine Abhängigkeit zwischen der Versagensgrenze und der Betriebsgeschichte des Brennstabes.
4. Es existiert eine erkennbare Abhängigkeit zwischen der Versagensgrenze und der Leistungsrampe, wenn es sich um Brennstäbe hoher Leistung ( $> 30.0 \text{ kW/m}$ ) handelt. Diese Abhängigkeit ist nicht so evident für Brennstäbe niedriger Leistung ( $> 30.0 \text{ kW/m}$ ).
5. Geschmolzener Brennstoff neigt dazu, in dem Moment des Hüllversagens aus Hüllenbruchstellen auszufließen.
6. Eine Pin-to-Pin-Versagensfortpflanzung erscheint unwahrscheinlich.
7. Wenn eine Versagensfortpflanzung stattfindet, so wird sie sich selbst begrenzen oder so langsam propagieren, daß ausreichende Zeit für die Ergreifung von Sicherheitsmaßnahmen verbleibt.

Die Tatsache, daß noch vor wenigen Jahren fast keine gezielten in-pile-Experimente zum Brennstabversagen durchgeführt worden waren und die prinzipiellen Grenzen bzw. Schwierigkeiten, die out-of-pile-Experimente mit sich bringen zum anderen führten dazu, daß neue out-of-pile-Experimentiermethoden mit dem Ziel entwickelt wurden, Informationen zum Brennstabverhalten zu erhalten. Eine dieser Techniken ist die Methode des direkt elektrisch beheizten  $\text{UO}_2$ -Stabes, zuerst vorgestellt im Jahre 1970 /105/.

Die Methode basierte auf der Hypothese, daß eine technisch geeignete Ausnutzung der elektrophysikalischen Eigenschaften des  $\text{UO}_2$  ermöglichen würde, einen  $\text{UO}_2$ -Stab durch direkte elektrische Stromzufuhr zu beheizen und stationär zu betreiben. Erste experimentelle Resultate auf der Basis dieser Methode gelangen zuerst 1972 /121, 122/. Sie zeigten, daß es möglich ist, einen  $\text{UO}_2$ -Stab direkt elektrisch zu beheizen und stationär in einem reproduzierbaren Modus zu betreiben /121/. Kurz darauf wurde im Argonne National Laboratory (ANL) die gleiche Methode mit ähnlichem Erfolg ausprobiert /108, 109/.

Ausgehend von diesen ersten Resultaten für den stationären Betrieb wurden 1973 /106, 107/ die ersten TOP-Simulationsexperimente mit elektrisch ausgelösten Leistungstransienten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, daß die Leistungstransienten zum Druckaufbau im Stabinnern führten, der geschmolzenes Brennstoffmaterial aus dem Stabinneren austrieb. Diese Austreibung, die auch durch die Volumenzunahme infolge des Schmelzprozesses verstärkt wird, erfolgte in Abhängigkeit von der Rampensteilheit entweder in axialer Richtung (Brennstofffließen bei flachen Leistungsrampen bzw. großen Zeitkonstanten,  $\tau > 6$  s) oder in radialer Richtung (Brennstoff-Ejektionen bei steilen Leistungsrampen bzw. kleinen Zeitkonstanten,  $\tau < 5$  s). Hierbei wurden für die herausgetriebenen  $UO_2$ -Partikel Geschwindigkeiten gemessen, die mit späteren Nachrechnungen gut übereinstimmten (3-6 m/s /122/ bzw. 6-7 m/s /91/). In diesem Zusammenhang ist zu vermerken, daß es auch beim ANL in-pile-Experiment F 2 /69, 81/ ebenfalls zu Brennstoffejektionen kam, wobei die Partikelgeschwindigkeit allerdings nur bei 0,47 m/s lag.

Bei weiteren out-of-pile Experimenten wurde beobachtet /121/, daß es unter bestimmten Randbedingungen (milde Leistungstransienten) zu einem abrupten Hüllenniederschmelzen kommt. Jedoch wurden diese Versuche ohne Zwangskühlung gefahren, sodaß die Brennstäbe ein relativ flaches Temperaturprofil bei hoher Hüllentemperatur (1000-1050 °C) aufwiesen. Diese Verhältnisse weichen ab von den postulierten Randbedingungen für die bereits erwähnten Störfallabläufe. Jedoch deuteten LOF-Simulations-Experimente unter SNR-300-Bedingungen /123/, darauf hin, daß das Hüllenschmelzen asymmetrisch abläuft im Gegensatz zu bekannten Modellen /91, 92, 93, 102, 104/ aus der Literatur. Insbesondere unter dem Gesichtspunkt neuerer Arbeiten hinsichtlich der Bedeutung der Bewegung des Hüllenmaterials bei LOF driven TOP-Störfällen /60, 90/ kommt diesem Ergebnis besondere Bedeutung zu.

Parallel zu diesen Arbeiten, die ausnahmslos mit unbestrahltem Brennstoff durchgeführt wurden, kam in den USA auch schwach bestrahlter Brennstoff zum Einsatz. Im ANL wurden 1974 zwei Pellets mit einem Abbrand von 3,2 %, die aus dem H 3-Experiment stammten, direkt elektrisch geheizt und einem transienten Zustand ausgesetzt. Die Ergebnisse sind nach Meinung der Autoren /110/ ähnlich denen, die man auch mit unbestrahlten Pellets erzielte.

Hinsichtlich der Versagensgrenzen ist die experimentelle Decke relativ dünn bzw. nicht eindeutig auswertbar. Dies liegt zum einen in den Restriktionen, die die Methode mit sich bringt, zum anderen aber auch an der Tatsache, daß man bislang keine signifikanten SBR-Störfall-Verhältnisse nachbilden konnte. So wird z.B. in /112/ vom Verhalten des Brennstoffes oberhalb und unterhalb der Versagensgrenzen berichtet, wobei es sich allerdings um Brennstäbe ohne Hülle handelt. Ferner wird hierbei der Brennstab lang andauernden Transienten ausgesetzt (11 - 60 s), die bei SBR-typischen TOP's nicht zur Diskussion stehen. An anderer Stelle /113/ wird von denselben Autoren über transiente Experimente berichtet mit der Energiezufuhr pro Gramm Brennstoff und Zeiteinheit als Transienten-Einheit und zeitlich genau zugeordneten Angaben über Beginn des Versagens, Größe der Schmelzfraction sowie Gesamtenergie zum Zeitpunkt des Versagens, jedoch kann man diese Experimente - so exakt sie auch durchgeführt wurden - nicht als besonders hilfreich hinsichtlich einer Übertragbarkeit auf in-pile-Verhältnisse bezeichnen. Es wird zwar eines dieser Experimente mit den Experimenten L-2 und L-3 aus den TREAT-L-Series /44/ verglichen; der Vergleich scheint jedoch riskant: die Experimente waren LOF-Experimente, während jenes out-of-pile-Experiment aus /113/ ein TOP-Experiment ist.

Auf der modelltheoretischen Seite gibt es wenig Information. Lediglich an drei Stellen wird über Rechenprogramme berichtet, die das Verhalten von elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stäben beschreiben /106, 124, 125/. Jedoch sind die Programme z.T. nur stationär und z.T. zwar dynamisch, jedoch zum einen mit einer Reihe von physikalischen und programmiertechnischen Vereinfachungen behaftet, zum anderen verwenden sie Stoffdaten, die sich nach neueren Ergebnissen als falsch herausstellen. Insbesondere ist hierbei der spezifische Widerstand von  $UO_2$  gemeint, der die Rechnung empfindlich beeinflusst und bei hohen Temperaturen recht ungenau bekannt ist /128/.

Faßt man diesen kurzen Überblick über den Stand der Kenntnis zusammen, so läßt sich folgendes feststellen:

- Out-of-pile-Experimente auf der Basis der Methode des direkt elektrisch beheizten (DEH)  $UO_2$ -Brennstabes haben bisher lediglich das grundsätzliche Verhalten von  $UO_2$ -Brennstäben unter stationären und dynamischen Bedingungen geklärt.

- Eine Koppelung zwischen DEH-Modelltheorie und DEH-Experimenten existiert nicht. Bisherige Rechnungen jedoch /124/ lassen SBR-störfallspezifische Experimente mit DEH-UO<sub>2</sub>-Stäben sinnvoll erscheinen.
- Ein Vergleich zwischen DEH-Experimenten und in-pile-Experimenten hat bisher nur auf der Basis der reinen Betrachtung von Pellet-Schliff-Bildern und nur für ein einziges Experiment stattgefunden.
- Bei einem Vergleich zwischen DEH-Experimenten und in-pile-Experimenten kann man davon ausgehen, daß die wirksam werdenden Versagensmechanismen z.T. dieselben sind. Jedoch muß sich ein geeignetes Versagenskriterium finden, das zum einen bei DEH-Experimenten nachweisbar ist und sich zum anderen auf in-pile Verhältnisse extrapolieren läßt.
- Die bisherigen theoretischen Betrachtungen beschreiben nicht das Verhalten von DEH-Brennstäben unter typischen SBR-Leistungstransienten.

Dieser kurze Überblick läßt erkennen, daß trotz einer Reihe von positiven Erkenntnissen die bisherige experimentelle Tätigkeit die sich bietende Möglichkeit der Methode des direkt elektrisch beheizten UO<sub>2</sub>-Stabes noch nicht vollends ausgeschöpft hat. Eine Reihe von erkannten Problemen wurde bisher überhaupt nicht oder nur ungenügend bzw. unspezifisch angegangen. Eine Koppelung zwischen Theorie und Experiment steht noch ganz aus. Ein Vergleich zwischen DEH-Experimenten und in-pile-Experimenten wurde bisher nicht konsistent durchgeführt.

### 3. Experimenteller Aufbau

#### 3.1 Der Referenzstab

Die  $UO_2$ -Versuchsstäbe werden in drei Kategorien unterteilt. Das Aufbauprinzip ist in allen drei Fällen das gleiche. Die Unterschiede liegen in der Höhe der einzelnen Pellets und der Gesamtlänge des Brennstabes.

Bei der ersten Kategorie werden die Stäbe aus einzelnen  $UO_2$ -Pellets aufgebaut, deren Abmessungen denen gleich sind, die im SNR-300 Mark 1-Core eingesetzt werden (Abb. 3.1a). Die zwei letzten Pellets werden mit je einer mit Kragen versehenen Bornitrid-Buchse umhüllt. Das hochtemperaturfeste, elektrisch isolierende Bornitrid vermeidet Kurzschlüsse zwischen der Pelletsäule und dem Canning, das über die Pelletsäule geschoben wird. Der notwendige Minimalspalt zwischen Pelletoberfläche und Hülle ergibt sich aus der Durchschlagsfestigkeit der Atmosphäre, in der die Versuche stattfinden und der für den elektrischen Betrieb erforderlichen Spannung. Die Versuchsart fordert eine inerte, gut wärmeleitende Atmosphäre. Der Tab. 3.1 kann man leicht entnehmen daß Heliumgas eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als andere inerte Gase und Gaskombinationen besitzt, allerdings auch eine niedrige Durchschlagsspannung.

	Wärmeleitfähigkeit ( $0^{\circ}C, 1 \text{ bar}$ ) $10^3 \cdot \left[ \frac{W}{cm^{\circ}C} \right]$	Durchschlagsfestigkeit ( $20^{\circ}C, 1 \text{ bar}$ ) $\left[ \frac{kV}{mm} \right]$
He	1.43	0.4
$N_2$		3.4
$H_2$		1.6
$N_2, H_2$ (80%, 20%)	0.37	
$N_2, H_2$ (92%, 8%)	0.28	2.4 (geschätzt)

Tab 3.1 Wärmeleitfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit einiger Gase und Gasgemische (ref. in /106/).

Die maximal erforderliche Spannung an dem Stab wird von den physikalischen Eigenschaften des  $UO_2$  her bestimmt (s. Abschnitt 3.2.3.1). In Vorversuchen zeigte sich, daß eine Spannung von 500 V ausreicht, um die Beheizung eines  $UO_2$ -Stabes von ca. 10 cm Länge einzuleiten.

Mit Helium als Atmosphäre ergibt sich unter Berücksichtigung des Paschen-schen Gesetzes, das besagt, daß sich die Durchschlagsspannung direkt (zumindest zwischen  $1 \leq p \leq 16$  bar) mit dem Systemdruck  $p$  ansteigt

$$U_D = f(p, d),$$

daß ab einem Systemdruck von 3 bar aufwärts und einem "Kaltspalt" zwischen Brennstoff und Hülle von ca. 550  $\mu m$  keine Überschläge entstehen dürfen. Die Versuche bestätigen diesen Sachverhalt.

Die Stäbe der Kategorien b und c unterscheiden sich lediglich in der Länge der Pellets. Bei der Kategorie b kommt lediglich ein  $UO_2$ -Zylinder mit 8 cm Länge zu Einsatz, bei der Kategorie c wird auf diesen Zylinder ein weiterer von 4 cm Länge gebaut. Tab. 3.2 stellt die wesentlichen Daten eines Versuchsstabes der Kategorie b und eines SNR-300-Stabes gegenüber; Abb. 3.1 zeigt je einen fertig montierten Stab der Kategorien a und b. Abb. 3.2 zeigt die Montagetechnik am oberen (und unteren) Stabende (Verbindung zu den Elektroden).

	EPBF	SNR-300
Stablänge	100 mm	950 mm
Pelletdurchmesser	5.09 mm	5.09 mm
Pelletform	zylindrisch	zylindrisch
Brennstoffdichte	95% th. D.	85% th. D.
Stabdurchmesser	7 mm	6 mm
Hüllen- Material	Incoloy-800	1.4988
Hüllen- Wandstärke	0.40 mm	0.38 mm
Spalt Brennstoff-Hülle	0.55 mm	0.10 mm

Tab. 3.2 Technische Daten des EPBF- und des SNR-300-Stabes

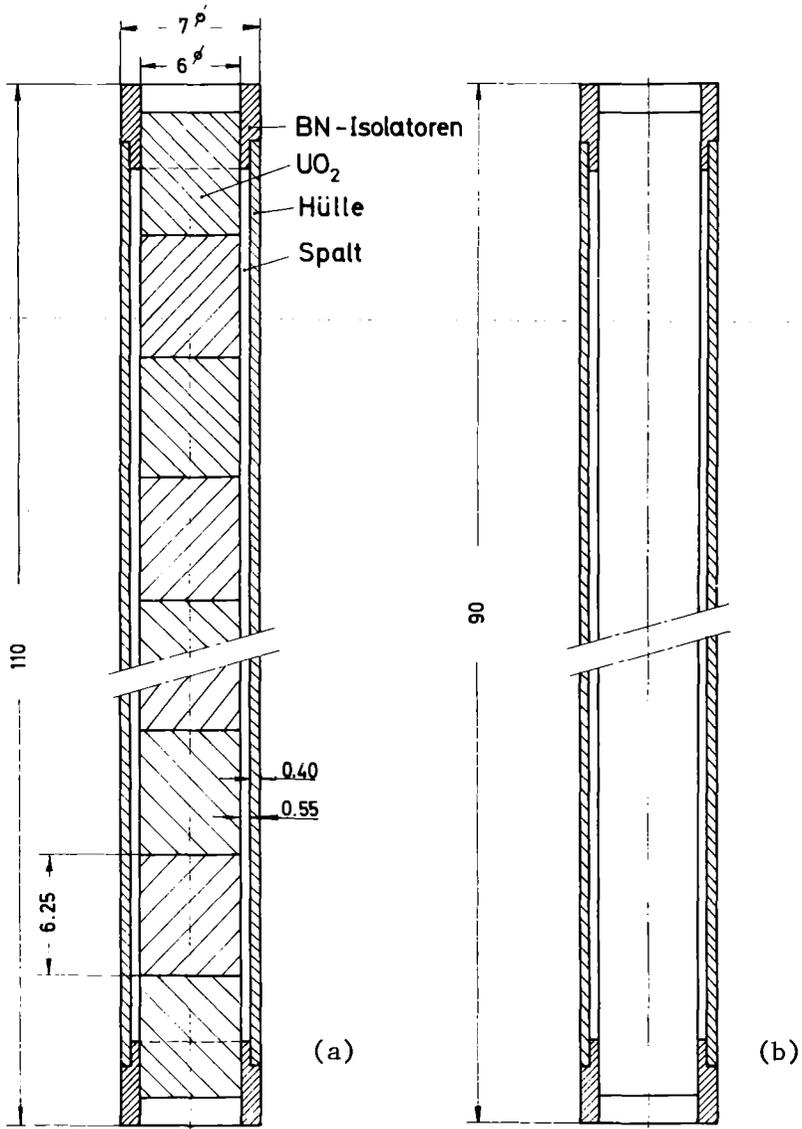


Abb. 3.1 Längsschnitt durch zwei EPBF-Versuchsstäbe

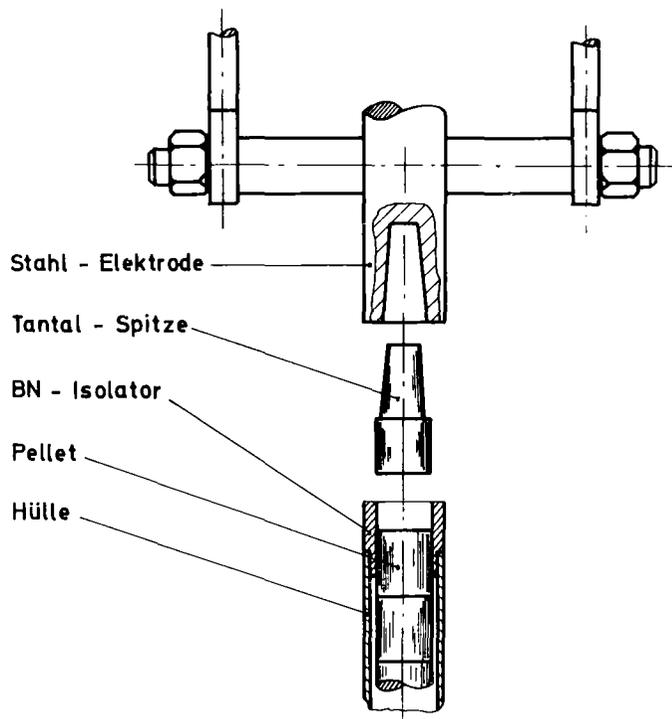


Abb. 3.2 Montagetechnik am oberen bzw. unteren Ende

Der Zusammenbau der Stäbe erfolgt aus technischen Gründen außerhalb des Versuchsgefäßes mit Hilfe einer eigens dazu gebauten Vorrichtung. Der freie Transport und die Montage der Stäbe in das Versuchsgefäß müssen ohne die geringsten Erschütterungen erfolgen, die eine Änderung der Geometrie innerhalb des Stabes mit negativen Folgen für den Versuchsablauf verursachen würden.

### 3.2 Der Versuchsstand

#### 3.2.1 Das Versuchsgefäß

Das Versuchsgefäß ist ein doppelwandiger Kugelbehälter mit einem Innendurchmesser von 600 mm. Eine Wasserkühlung - Wasserdurchlauf zwischen äußerer und innerer Wand - sorgt stets für definierte Temperaturverhältnisse auf der Innenseite des Behälters. In der senkrechten Achse des Gefäßes befinden sich die Einspannvorrichtungen für den Versuchsstab. Sie sind gleichzeitig die Elektroden zur Einführung des elektrischen Stromes und sind in den Zu- bzw. Ableitungsrohren des Heliumkühlkreislaufes fest eingebaut.

An den Kontaktstellen zwischen Elektroden und Brennstoffsäule sind plangeschliffene Tantalspitzen zwischenmontiert, deren fein bearbeitete Oberfläche ermöglicht, den Übergangswiderstand zwischen Elektrode und  $\text{UO}_2$  zu minimalisieren (Abb. 3.2). Die obere Tantalspitze ist mit Hilfe eines pneumatisch betriebenen Kolbens in axialer Richtung verschiebbar. Dies ermöglicht, die Axialkraft auf die Brennstoffsäule kontinuierlich bis zu 10 kp zu verändern, wodurch ein Abbau der während des Versuches auftretenden thermischen Spannungen in axialer Richtung stattfinden kann. Die Spitzen werden nach jedem Versuch erneuert. Die Elektroden sind ohne großen Aufwand austauschbar. Die elektrische Isolation gegen den Stahlmantel erfolgt mit Teflondichtungen. Die notwendigen Versuchsvorbereitungen im Innern des Behälters werden durch vier am Mantel angebrachte Öffnungen vorgenommen. Drei der Öffnungen sind mit Glasscheiben versehen, die den Einsatz visuell arbeitender Meß- und Registriereinrichtungen gestatten (Filmkamera, Fernsehkamera, Pyrometer). Die 4. Öffnung ist mit einem Flansch ausgestattet, der mit Durchführungen für Versorgungsleitungen und Meßinstrumenten bestückt ist. Der Auslegungsdruck des Gefäßes im Betriebszustand beträgt 16 atü.

### 3.2.2 Der Kühlkreislauf

Die Kühlung der Prüfstäbe erfolgt in einem Helium-Loop. Über einem Membrankompressor mit einer maximalen Pumpleistung von 234 Nm<sup>3</sup>/h wird das Helium so umgepumpt, daß es den UO<sub>2</sub>-Brennstab von unten nach oben umströmt. Die dabei vom Helium aufgenommene Wärme wird über einen Rückkühler abgeführt.

Im Bereich des Brennstabes bzw. des Brennelementbündels wird das Kühlmittel durch ein Quarzglasrohr, das den Stab umschließt, geführt. Dieses Quarzglasrohr ermöglicht definierte Strömungsverhältnisse, ohne visuelle Beobachtungen während des Versuchsablaufes zu verhindern. Durch Änderung des hydraulischen Durchmessers läßt sich bei sonst konstant gehaltenen Bedingungen der radiale Temperaturverlauf im Stab zusätzlich variieren. Eine spezielle Vorrichtung gestattet eine Fernbedienung des Quarzglasrohres. So ist es möglich, bei geschlossenem Behälter das Rohr je nach Versuchsbedingungen in Position zu fahren oder zu entfernen.

Der Kreislauf ist mit einer Reihe von Ventilen und einem By-Pass ausgestattet, so daß die Einstellung nahezu jedes beliebigen Durchflusses möglich ist.

### 3.2.3 Die elektrische Heiz- und Exkursionsanlage (ELHEA)

#### 3.2.3.1 Grundsätzliches zur elektrischen Beheizung eines UO<sub>2</sub>-Zylinders

Das Uranoxid ist bei Zimmertemperatur ein schlechter elektrischer Leiter mit einem spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ , der zwischen  $10^3$  und  $10^7 \Omega \text{ cm}$  liegen kann. Ferner ist der Temperaturkoeffizient  $\alpha$ ,

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

des Materials negativ. Ein NTC (Negative Temperature Coefficient)-Widerstand fällt mit wachsender Temperatur. Bei UO<sub>2</sub> von 2000 °C liegt  $\rho$  nunmehr bei ca.  $10^{-2} - 10^{-1} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  mit weiter fallender Tendenz.

Die bei den Experimenten verwendeten UO<sub>2</sub>-Stäbe haben bei Zimmertemperatur einen Gesamtwiderstand von ca. 50 - 250 kOhm. Beim Anlegen einer Spannung von 500 V fließt durch die Probe der Strom

$$J = \frac{500 \text{ V}}{(50-250) 10^3 \text{ Ohm}} = (2-10) \text{ mA.}$$

Wird die in dem Stab erzeugte Wärme nicht abgeführt, so erwärmt sich der  $UO_2$ -Zylinder immer weiter, was schließlich zu einer unkontrollierten Zerstörung (Erreichen des Schmelzpunktes und Veränderung der Stabgeometrie) desselben führt, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

### 3.2.3.2 Funktionen der Anlage

Unter diesen Aspekten ist die ELHEA eine besonders wichtige Komponente des gesamten Versuchsstandes. Sie setzt sich zusammen aus zwei getrennt arbeitenden Teilkomponenten. Der technisch kompliziertere Teil (EHA) übernimmt die Funktion des stationären leistungsgeregelten Beheizens und wurde ausführlich in früheren Arbeiten beschrieben /106/. Seine Funktionsweise sei deshalb an dieser Stelle nur ganz kurz skizziert (vgl. auch Abb. 3.3).

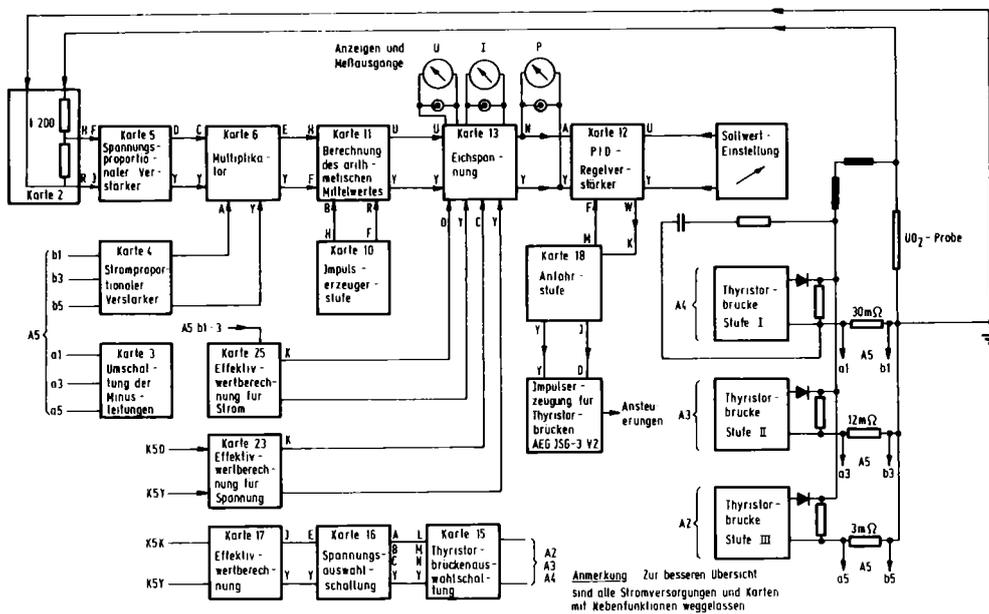


Abb. 3.3 Blockschaltbild der elektrischen Heizanlage (EHA) des EPBF - Versuchsstandes.

Das Hauptmerkmal der Anlage ist, daß sie "leistungsgeregelt" arbeitet, d.h. es kann eine bestimmte Soll-Leistung

$$N = U^2 / R$$

eingestellt werden, die während des Versuchs konstant bleibt.

Die externe (vom Betreiber gestellte) Forderung nach einer bestimmten Leistung führt zunächst dazu, daß die Anlage eine hohe Spannung vorwählt und an die Probe anlegt. Infolgedessen fließt zunächst ein kleiner Strom durch die Probe, die dadurch erwärmt wird, woraufhin sich deren Ohmscher Widerstand erniedrigt und der Strom ständig ansteigt.

Während des Heizens werden die Spannung an dem Stab und der durchfließende Strom gemessen, miteinander multipliziert und über 10 ms integriert. Die momentane Integrationskondensatorspannung wird von einem elektronischen Schalter als Ist-Wert zu einem Spannungsregler geschaltet. Bei einem bestimmten Erwärmungszustand ist die eingestellte Soll-Leistung erreicht. Bei weiterem Stromanstieg greift nun die Regelung ein und stellt die Spannung an der Probe kleiner, so daß die vorgegebene Leistung konstant bleibt. Die maximale Soll-Leistung, die die Anlage ermöglicht, liegt bei 5 kW. Abb. 3.4 zeigt die  $q$ -,  $I$ - und  $U$ -Kennlinien während eines charakteristischen Versuches.

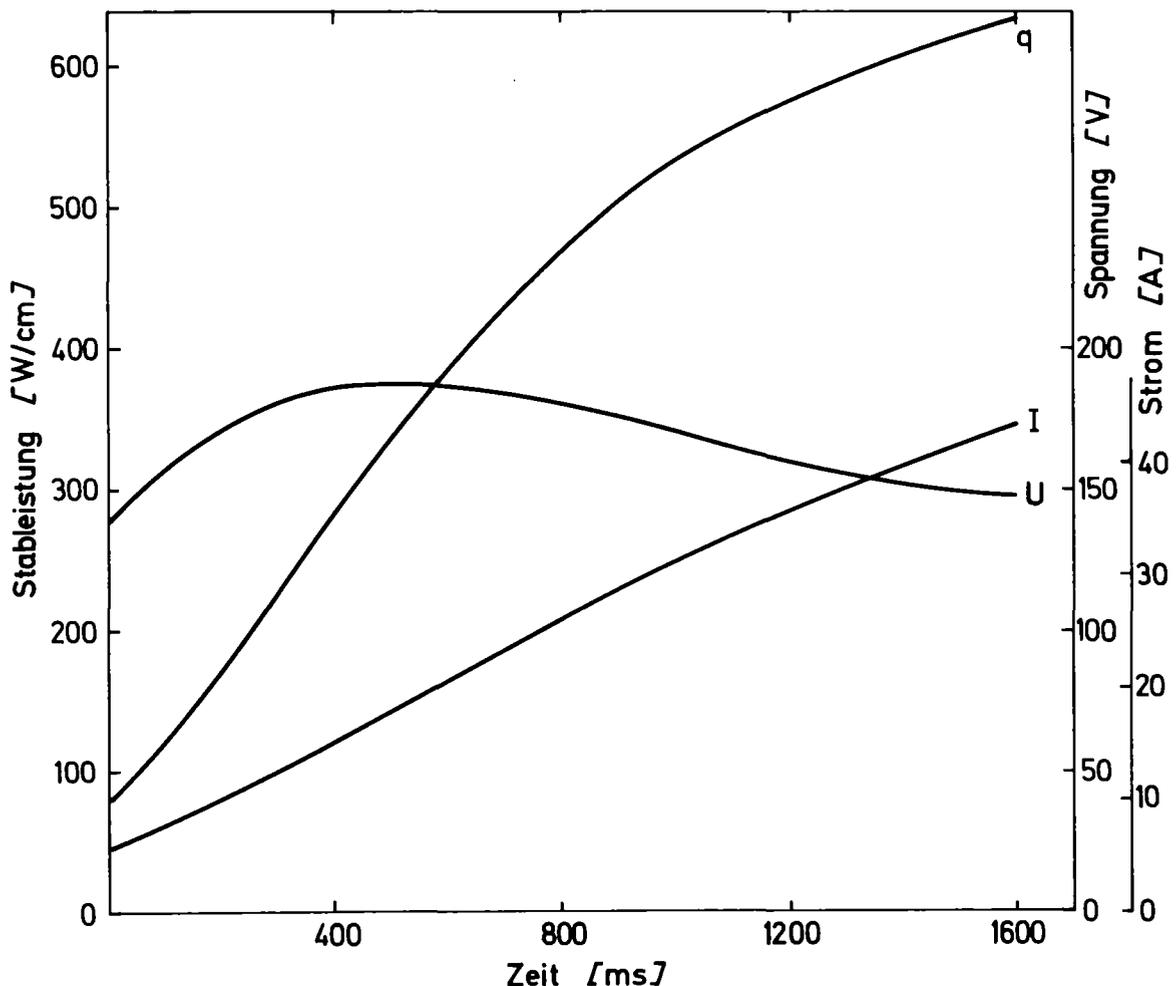


Abb. 3.4 Strom (I)-, Spannungs (U)- und Stableistungsverlauf (q) bei einem Reaktivitätsstörfall-Simulationsversuch am EPBF-Stand

Die Zusatzkomponente EA (Exkursionsanlage) der Anlage, die zur Durchführung der TOP-Versuche eingesetzt wird, ist eine Neuentwicklung. Darin werden die elektrophysikalischen Eigenschaften des  $UO_2$  ausgenutzt. Zu einem vorgegebenen Zeitpunkt wird der im Versuchsbehälter eingesetzte und über die EHA versorgte  $UO_2$ -Stab von ihr entkoppelt und an die EA angeschlossen. Am Stab wird eine neue Spannung angelegt. Gleichzeitig entfällt die Leistungsregelung. Der Versuchsstab wird somit einer elektrischen Leistungsexkursion ausgesetzt, die schließlich seine Zerstörung herbeiführt. Der zeitliche Ablauf des Prozesses hängt bei sonst gleichen Randbedingungen nur von der an der EA eingestellten neuen Spannung ab ("Beschleunigungsspannung") und ist beliebig reproduzierbar.

### 3.3 Meßtechnische und Regeleinrichtungen am Versuchsstand

#### 3.3.1 Registrierung und Messung der elektrischen Daten

Die für die Versuchsauswertung notwendigen elektrischen Daten Strom, Spannung und Gesamtleistung werden im stationären Betrieb mit Hilfe der EHA erfaßt und an der Frontseite der Anlage über fest eingebaute Meßinstrumente angezeigt.

Bei den Exkursionsversuchen werden diese Größen über die EA erfaßt. Ein Lichtschreiber registriert die Werte und deren Änderungen während des transienten Verlaufs. Die Einstellzeit und der Vorschub des Schreibers erlauben eine zeitliche Auflösung der Daten bis hinunter in den Millisekundenbereich.

#### 3.3.2 Messung von Gasdurchfluß und Gastemperatur

Die Messung und Registrierung des Gasdurchflusses läuft über einen Durchflußmesser, dessen Funktionsprinzip Änderungen des Drucks, der Temperatur oder der Viskosität des Gases während des Versuches kompensiert.

Die Erfassung der Temperatur erfolgt an drei Stellen der Kühlstrecke (eine vor, zwei nach dem Stab) mit Eisen - Konstanten-Thermoelementen

Die Meßwertregistrierung erfolgt über Lichtschreiber und Polycomp-Drucker.

#### 3.3.3 Axialer Druck auf die Pelletsäule

Wie bereits erwähnt, (Abschn. 3.2) ist die obere der beiden Stabhalterungen mit einem pneumatischen Kolben versehen. Der Kolbendruck und der Gasdruck im Versuchsgefäß werden mit einem Differenzdruckmanometer gemessen.

Die Kenntnis des Kolbendrucks und die Möglichkeit, ihn zu variieren, ist für die Durchführung der Versuchsserie unerlässlich, denn der Anpreßdruck auf die Pelletsäule beeinflusst den Gesamtwiderstand des Stabes bis zu einer Zehnerpotenz. Somit ist es möglich, durch Erhöhung des Kolbendrucks den Widerstand so weit zu verringern, daß Spannungen um die 500 V ausreichen, den Prüfstab zu erwärmen (vergl. Abschn. 3.2.3.1). Im weiteren Verlauf des Versuches wird diese Kraft wieder verringert (charakteristischer Wert: 4 - 6 kp), damit spezifische Vorgänge nicht durch große Axialkräfte untypisch beeinflusst werden.

#### 3.3.4 Messung der Oberflächentemperatur der Hülle und des Brennstoffes

An die Meßmethode zur Bestimmung der Temperaturen des Cannings und des Brennstoffes während eines Experimentes sind folgende Bedingungen gestellt:

- Meßbereich von 500 °C bis ca. 3000 °C
- das Temperaturprofil des Stabes und die Vorgänge während des Stabversagens dürfen durch Meßfehler nicht gestört werden
- der Meßpunkt muß in axialer Richtung verschiebbar sein, damit evtl. vorhandene axiale Temperaturgradienten am Versuchsstab gemessen werden können
- die Ansprechzeit des verwendeten Meßgerätes muß sehr klein sein, da bei der Durchführung von Leistungstransienten-Experimenten Zeitkonstanten von 1 - 2 ms den Leistungsanstieg bestimmen.

Diese Forderung erfüllt gut ein photoelektrisches Pyrometer <sup>\*)</sup>. Das Gerät ist mit einem Indium-Detektor ausgerüstet. Für Indium-Antimon ist die relative Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 0,5 - 8 µm nicht wie bei anderen Detektoren durch ein ausgeprägtes Maximum sondern durch ein breites Plateau mit einer relativen Empfindlichkeit zwischen 70 % und 90 % gekennzeichnet. Das bedeutet, daß dieses Gerät für den geforderten großen Temperaturbereich gut verwendbar ist. Seine Ansprechzeit beträgt im gesamten Temperaturbereich ca. 1 ms. Der Maximalfehler liegt bei 3000 °C um ca. 10 %. Das Gerät ist an eines der Fenster am Versuchsgefäß montiert, dessen Scheibe aus einem Spezialglas (Arsensulfidglas) mit sehr hoher Durchlässigkeit hergestellt ist. Eine geeignete Vorrichtung ermöglicht Schwenkung und horizontale Verschiebung des Gerätes im mm-Bereich, so daß es möglich ist, den Meßpunkt auf dem Versuchsstab beliebig zu wählen. Die jeweilige Position, bezogen auf die Stablänge,

---

\*) Infrared Research Radiometer, Mod. 12-51113, Barnes Engineering Company

wird elektrisch angezeigt und registriert. Zur Durchführung der Temperaturmessungen während der Experimente war es notwendig das Meßgerät unter Betriebsbedingungen zu eichen. In diese Eichung ging neben dem Emissionsfaktor der Hülle - bzw. des  $UO_2$  - die Adsorbtionswerte des Quarzglasrohres und des Sichtfensterglases am Versuchsstand ein.

Zur Eichung der Meßanordnung für Temperaturmessungen auf der Hülle wurde eine leere Hülle in den Versuchsstand montiert und auf der dem oben beschriebenen Pyrometer abgewandten Seite mit einem Längsschlitz versehen. Durch diesen Schlitz wurde ein PtRh/Pt Thermoelement mit 0.2 mm Aderdurchmesser eingeführt und an der Innenwand der Hülle festgeschweißt. Um Konvektionseinflüsse zu vermeiden wurde der Hüllen-Innenraum mit einem hochtemperaturfestem Isolationsmaterial ausgefüllt. In dieser Anordnung wurde die Hülle geheizt und das Meßsignal des Pyrometers als Funktion der Thermospannung des Thermoelements aufgezeichnet (Abb. 3.5)

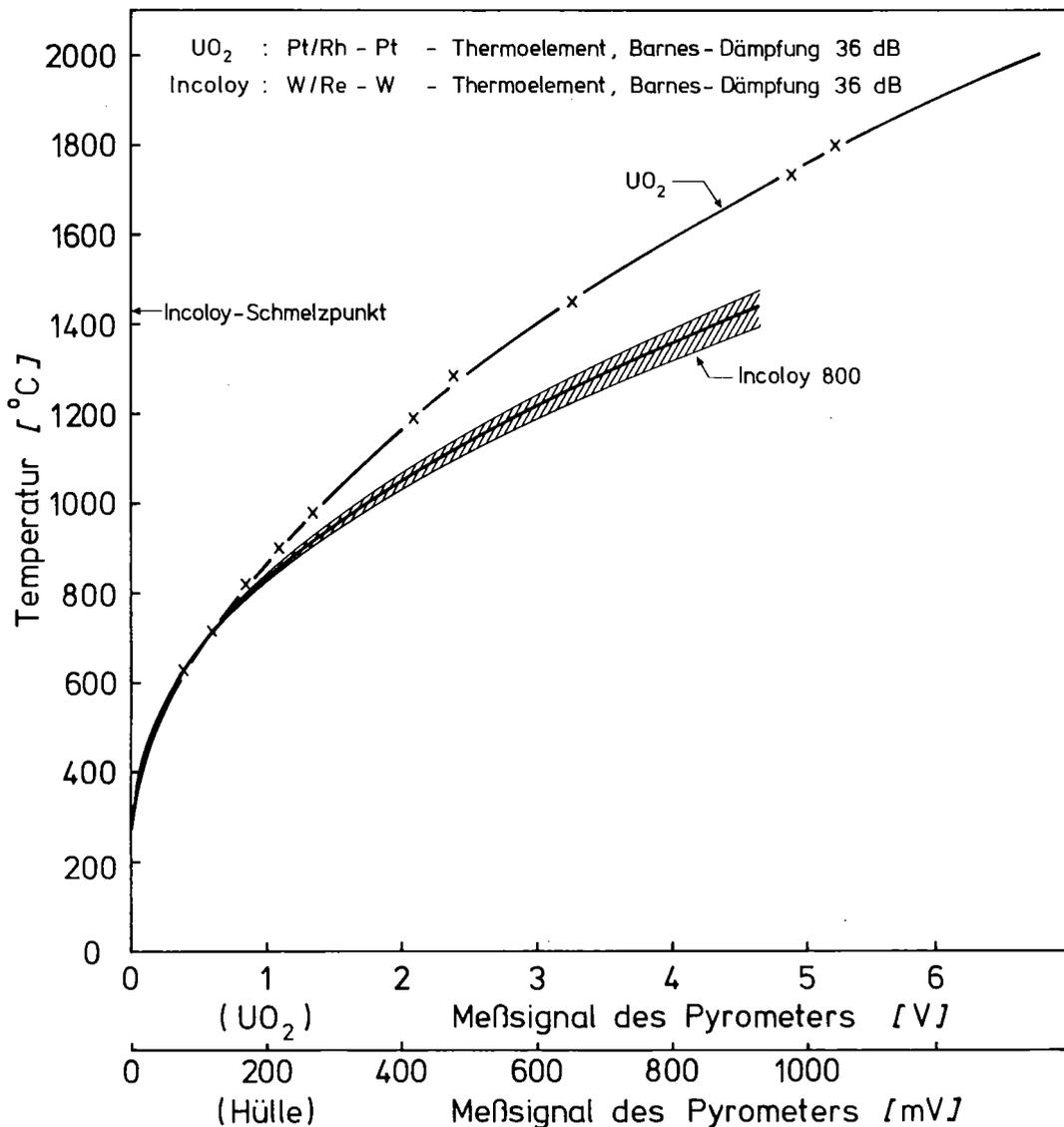


Abb. 3.5 Eichkurven zur Messung der Hüllen- und  $UO_2$ - Temperatur

Durch Langzeitmessungen bei ca. 900 °C wurden Alterungseinflüsse auf der Oberfläche des Cannings eliminiert.

Entsprechend dem Vorgehen bei der Eichung des Pyrometers für Messungen auf der Hüllenoberfläche wurde dieses Mal nur  $\text{UO}_2$  verwendet. Die erhaltene Ausgangsspannung wurde den Meßwerten eines Hochtemperatur-Thermoelementes (WRh/W) zugeordnet. Das Thermoelement wurde in der Mitte eines 40 mm langen  $\text{UO}_2$ -Stabes angebracht. Über eine Feder wurde das Thermoelement fest an den Stab angedrückt. Somit wurde ein guter Kontakt ermöglicht. Eine Vertiefung an der Andruckstelle verhinderte (nicht immer!) ein Abrutschen des Thermoelementes während der Meßserien. Der  $\text{UO}_2$ -Stab durfte selbstverständlich nicht direkt elektrisch beheizt werden, da das Thermoelement potentialfrei sein mußte. Deshalb wurde auf die alte EPBF-Vorheiztechnik zurückgegriffen und der Stab mittels eines StrahlungsOfens hochgeheizt. Damit konnten allerdings Temperaturen nur bis 1800 °C an der Staboberfläche erreicht werden. Es wurden drei Eichmessungen durchgeführt, eine in He-Atmosphäre und zwei in  $\text{N}_2$ -Atmosphäre. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Abb. 3.5 zu sehen. Als "Auswerte-Kurve" wurde die in He-Atmosphäre gemessene - extrapoliert auf 2000 °C - genommen.

### 3.3.5 Visuelle Beobachtungen und Registrierung des Versuchsablaufes

Schon in der Einleitung wurde erwähnt, daß ein wesentlicher Vorteil von out-of-pile-Experimenten darin liegt, einen direkten optischen Zugriff auf das experimentelle Geschehen während des Versuchsablaufes zu haben. Diese Zugriffe werden am Versuchsstand realisiert durch den Einsatz einer FS-Kamera, eines Monitors, eines Video-Recorders, der den Versuchsablauf normal aufzeichnet und einer Hochfrequenz-Filmkamera. Letztere zeichnet das komplette Geschehen im Versuchsbehälter mit einer Geschwindigkeit bis zu 10.000 Bildern/s auf. Bei einer Projektionsgeschwindigkeit von 24 Bildern/s entspricht dies einer Zeitdehnung um ca. den Faktor 400. Dadurch wird eine Analyse der Vorgänge, insbesondere bei Exkursionsversuchen, äußerst bequem und genau. Die stattfindenden Materialbewegungen können sehr gut beobachtet, zeitlich zugeordnet und mit der gleichzeitig aufgenommenen Leistungszeitkennlinie verglichen werden. Der Vergleich mit der Rechnung wird dadurch denkbar einfach.

### 3.3.6 Steuerung des experimentellen Ablaufes

Die Vielzahl der Handgriffe, die zur Einleitung und Steuerung eines LOF- oder TOP-Simulationsexperimentes notwendig sind, kann nur über eine automatische

Regelung erfolgen. Die eigens dazu entwickelte und gebaute Steueranlage (Abb.3.6 läßt mittels eines Handschalters alle übrigen notwendigen Funktionen in einer logischen Reihenfolge ablaufen.

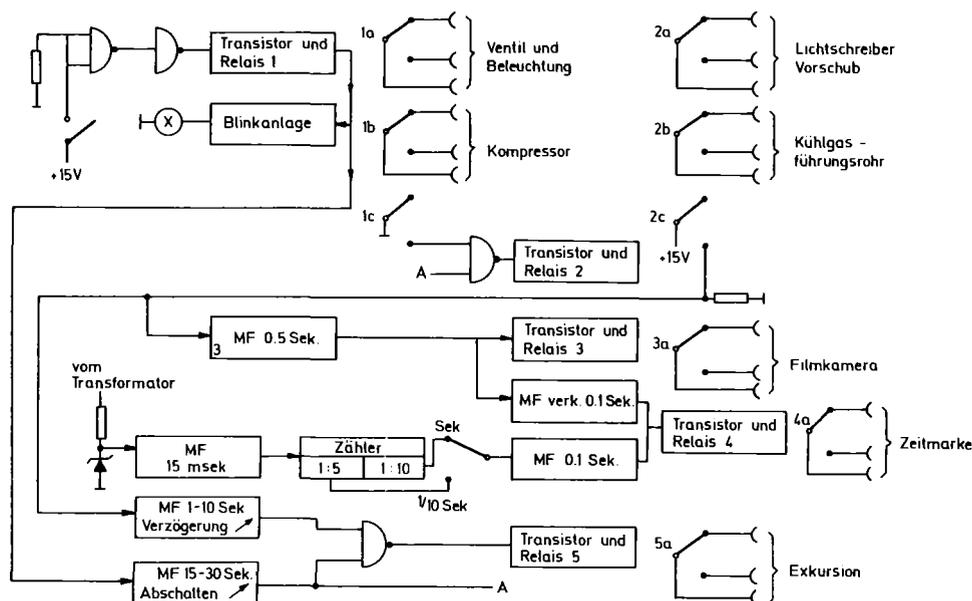


Abb. 3.6 Blockschaltbild der Steueranlage am EPBF-Versuchsstand

Über diesen Handschalter wird ein Relais in Tätigkeit gesetzt. Dieses schaltet den Kompressor aus (beim LOF- bzw. LOF-TOP) und das Quarzglasrohr im Versuchsstand fällt herunter. Gleichzeitig wird der Papiervorschub des Lichtschreibers in Tätigkeit gesetzt, die Hochfrequenz-Kamera läuft an und die erste Zeitmarke wird auf das Papier gedruckt. Weitere Zeitmarken, je nach Bedarf alle 0.1 bzw. 1 s (wahlweise einstellbar), werden durch einen elektrischen Zähler ausgegeben. Durch die Zeitmarken ist es möglich, Bilderfolgen der Kamera als auch Aufzeichnungen des Lichtschreibers zeitlich genau zuzuordnen.

Der Ablauf der Ereignisse ist so zusammengeschaltet, daß beim Ausfall (Störung) irgendeiner Schaltfunktion die nachfolgenden Funktionen nicht mehr ausgeführt werden. Wenn beispielsweise der Lichtschreiberpapiervorschub nicht anläuft, tritt auch die Filmkamera nicht in Tätigkeit und auch die Exkursion findet nicht statt.

Die Exkursion selbst (Entkoppelung des Stabes von der EHA und Anschluß an die EA) findet in einer vorwählbaren Zeit (1-10 s) nach Betätigung des Handschalters statt. Eine Blinkanlage zeigt den eingeschalteten Zustand der Anlage an. Ein besonders einstellbarer Mono-Flop sorgt dafür, daß nach einer bestimmten Zeit die Leistung und auch alle anderen Geräte abgeschaltet werden. Nach vollendetem Versuchsablauf wird der Startschalter per Hand zurückgeschaltet.

#### 4. Der elektrische Widerstand der Prüflinge bzw. des $UO_2$

Die Berechnung des radialen Temperaturprofils der untersuchten Stäbe setzt unter anderem die genaue Kenntnis des spezifischen elektrischen Widerstands des  $UO_2$  voraus.

Das  $UO_2$  zeigt hinsichtlich seiner elektrischen Leitfähigkeit das typische Verhalten eines Halbleiters: durch Temperaturvariationen läßt sich die Ladungsträgerkonzentration und damit die Leitfähigkeit leicht um viele Größenordnungen ändern. Der Temperaturkoeffizient

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (4.1)$$

ist hierbei negativ, d.h.  $\rho$  nimmt mit steigender Temperatur ab.

Die Temperaturabhängigkeit von  $\rho$  wurde bislang vielfach untersucht, wobei die Ergebnisse oft bis zu 4 Größenordnungen voneinander abweichen (Abb. 4.1).

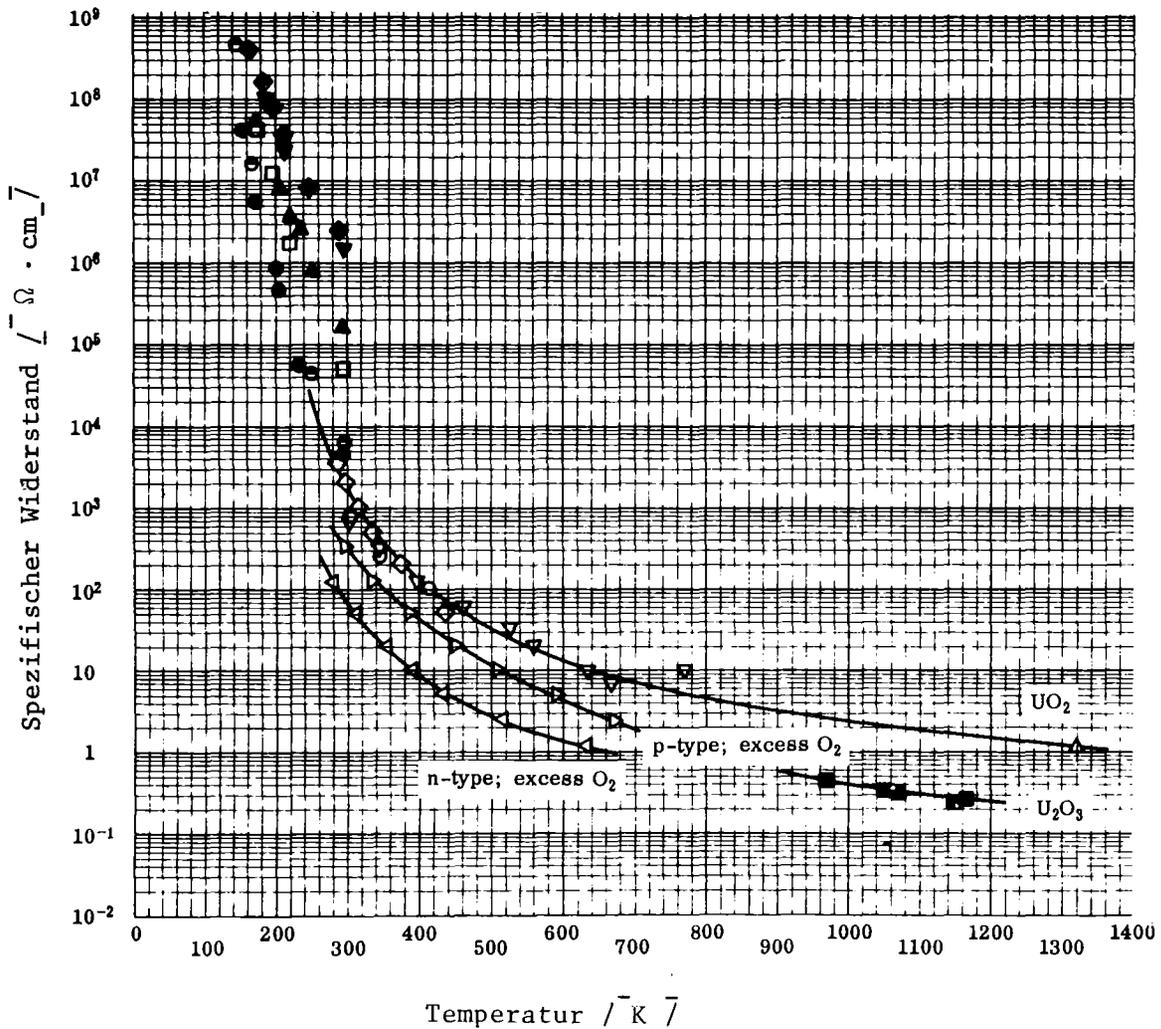


Abb. 4.1 Spezifischer elektrischer Widerstand von  $UO_2$  als Funktion der Temperatur nach /131/.

Über den Widerstand in der flüssigen Phase konnten keine Werte gefunden werden.

Dieser Mangel an zuverlässigen Informationen einerseits und die Notwendigkeit der zahlenmäßigen Erfassung des Gesamtwiderstandes der Prüflinge am Versuchsstand andererseits (Miterfassung des Einflusses der Kontaktstellen zwischen den Pellets) führten zu einer Reihe von Versuchen und Rechnungen mit dem Ziel, den Widerstand eines fertig montierten Prüflings zu bestimmen. Die Messungen wurden so ausgelegt und durchgeführt, daß eine Reihe von weiteren Einflüssen miterfaßt werden konnte. Es wurden insgesamt 5 Stabkonfigurationen (Tab. 4.1) in 58 Versuchen und Versuchsserien untersucht. Die Stäbe wurden (unter Helium-Atmosphäre) elektrisch geheizt. Der elektrische Gesamtwiderstand wurde gemessen im stationären Zustand (keine Änderung der Spannungs- oder Stromanzeige). Auf eine analytische zahlenmäßige Angabe der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet. Abb.4.2 faßt alle experimentellen Werte graphisch zusammen. Hierbei wurden bereits die gemessenen Werte bei den Prüflingen der Kategorien c, d und e auf  $h = 100$  mm linear extrapoliert.

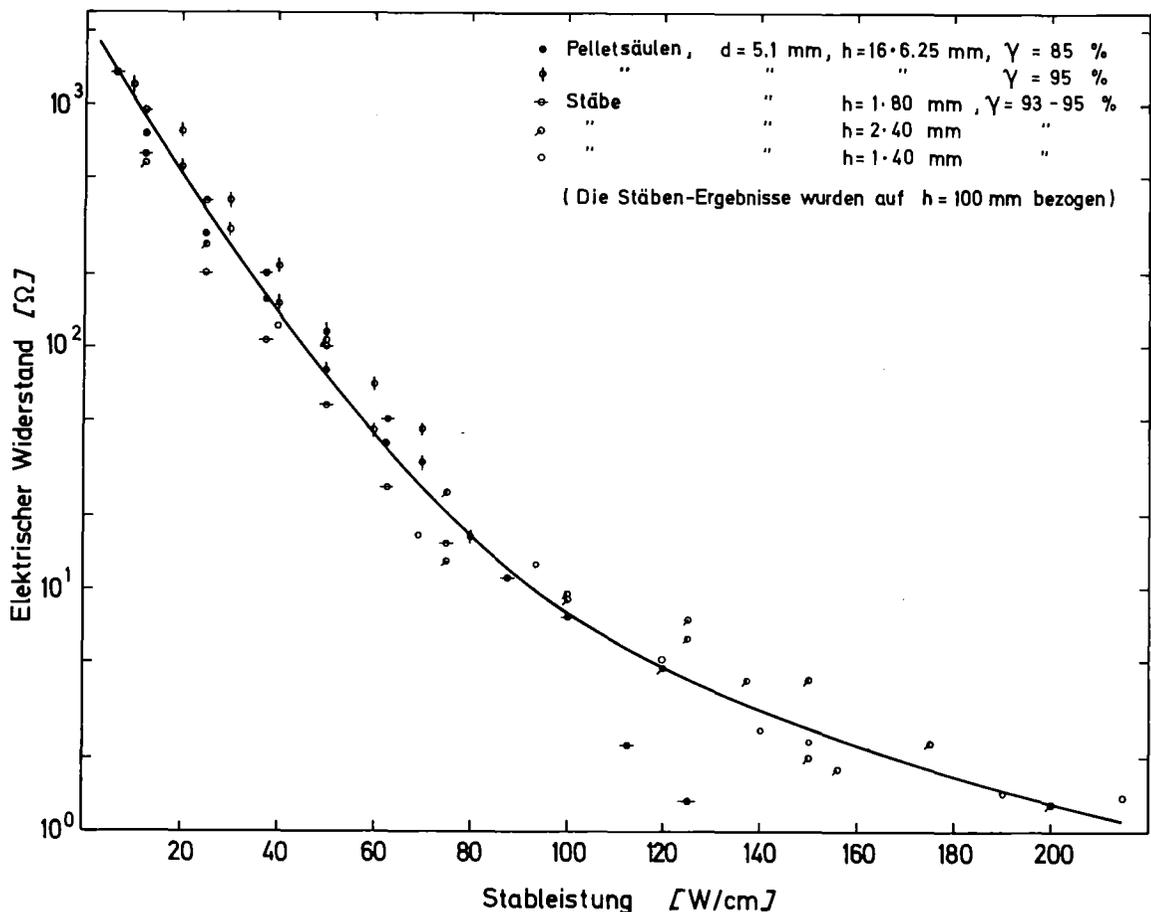


Abb.4.2 Elektrischer Widerstand von  $UO_2$ -Stäben als Funktion der Stableistung

Aufbau	Anzahl der Pellets	Dichte [ %TD ]	Höhe [ mm ]	Durchmesser [ mm ]	Gesamthöhe [ mm ]
a. Pelletsäule	16	95	6.25	5.09	100
b. "	16	85	6.25	5.09	100
c. "	2	93-95	40.00	5.09	80
d. Stab	1	93-95	80.00	5.09	80
e. "	1	93-95	40.00	5.09	40

Tab. 4.1 Spezifikation der 5 Stabkategorien zur Untersuchung des  $UO_2$ -Widerstandes am EPBF-Versuchsstand

Diese Ergebnisse erlauben bereits folgende Aussagen:

- Ein Einfluß der Dichte des  $UO_2$  auf seinen elektrischen Widerstand ist im untersuchten Bereich nicht feststellbar.
- Die Kontaktstellen zwischen den Pellets beeinflussen den Gesamtwiderstand der Prüflinge nicht.
- Der Systemdruck übt im Bereich zwischen 1 und 10 atü keinen Einfluß auf den Widerstand aus (dies wurde in einer der ersten Serien untersucht. Danach wurden die weiteren Versuche bei  $p = 2.5$  atü durchgeführt).

Darüberhinaus können zwei weitere Folgerungen gezogen werden:

1. Der spezifische elektrische Widerstand von  $UO_2$  dürfte für den flüssigen Zustand stark abfallen (die zwei Werte bei ca. 117 W/cm bzw. 125 W/cm wurden bei Prüflingen gemessen, die in der Mitte - wie es sich danach feststellen ließ - bereits geschmolzen waren).
2. Der Einfluß der unterschiedlichen Korngrößen auf den elektrischen Widerstand bei tiefen Temperaturen /139/ verschwindet bei höheren Temperaturen. Es wurden jedenfalls keine Abweichungen wie in /139/ gemessen, obwohl man davon ausgehen kann, daß mindestens zwischen den Kategorien a und b (Lieferant Fa. NUKEM, Hanau) einerseits und d und e (Lieferant Fa. CICA F, Bollène/Frankreich) andererseits Unterschiede im Korngrößenspektrum bestanden. Leider konnten die beiden Firmen keine genauen Angaben diesbezüglich machen, so daß auf eine Zahlenangabe an dieser Stelle verzichtet werden muß.

Die Umrechnung der Ergebnisse der Abb. 4.2 in eine Beziehung der Form

$$\rho = \sum_{n=0}^N a_n \cdot T^n, \quad \rho \text{ in } \Omega \text{ cm, } T \text{ in K,} \quad (4.2)$$

geschah in mehreren Schritten.

Zunächst wurden die experimentellen Ergebnisse in eine Beziehung der Form

$$R = f(q) \quad (4.3)$$

R = Gesamtwiderstand der jeweiligen Probe in Ohm

q = Stableistung in W/cm K

$$\text{mit } f(q) = \exp\left(\sum_{n=0}^4 a_n q^n\right)$$

umgerechnet. Danach wurde die gemessene elektrische Gesamtleistung q in eine Leitungs-, eine Konvektions- und eine Strahlungskomponente aufgeteilt:

$$q_{\text{gesamt}} = q_L + q_N + q_S. \quad (4.4)$$

Die Komponenten  $q_L$  und  $q_N$  lassen sich aus wohlbekannten Wärmeleitungs- und Übergangsbeziehungen /126/ berechnen. Die dazu notwendigen Helium-Stoffdaten wurden aus /127/ entnommen. Die Strahlungskomponente ergibt sich sodann aus Gl. 4.4 und somit läßt sich über das Stefan-Boltzmann-Gesetz bei bekanntem  $\epsilon$  die Brennstoffaußentemperatur  $T_{BA}$  ausrechnen. Der Emissionskoeffizient  $\epsilon$  des  $UO_2$  wurde aus in /128/ enthaltenen Angaben ermittelt. Hierbei wurde mit zwei Ansätzen vorgegangen:

$$\epsilon = 0.9, \quad T \leq 3000 \text{ K} \quad (4.5)$$

und

$$\epsilon = 0.9, \quad T \leq 1900 \text{ K} \quad (4.6)$$

$$\text{bzw. } \epsilon = c_1 + c_2 T, \quad 1900 \text{ K} < T < 3000 \text{ K}$$

$$\text{mit } c_1 = 1.545 \text{ und } c_2 = 3.9215 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Mit bekanntem  $T_{BA}$  und dem Rechenprogramm VESUV ließen sich sodann mittlere Zentraltemperaturen und Gesamtwiderstand der Prüflinge errechnen, wobei zwei aus der Literatur /129, 130/ bekannte  $\rho$ -T-Darstellungen verwendet wurden:

$$\rho = \exp (-9.646 + 2.087 \cdot 10^4 T^{-1} - 1.231 \cdot 10^7 T^{-2} + 6.484 \cdot 10^9 T^{-3}) \quad (4.7)$$

$\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $T$  in  $\text{K}$ , Gültigkeitsbereich:  $300 \text{ K} < T < 2800 \text{ K}$ .

$$\rho = 0.7692 \cdot 10^{-9} (T+273) \exp (1.9 \cdot 10^4 / (T+273)) \quad (4.8)$$

$\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $T$  in  $\text{K}$ , Gültigkeitsbereich:  $1273 \text{ K} < T$ .

Es läßt sich nunmehr eine  $\rho$ - $T$ -Darstellung errechnen, deren Einsetzen in Gl. 4.3 ermöglicht, bei bekannter Prüflingsmethode die Koeffizienten  $a_n$  in Gl. 4.2 anhand der experimentellen Ergebnisse zu berechnen.

Es ergibt sich folgende Darstellung:

$$\rho = \exp (14.47 - 1.7 \cdot 10^{-2} T + 5.55 \cdot 10^{-6} T^2 - 6.52 \cdot 10^{-10} T^3) / (3.05 \cdot 10^{-7} T^2) \quad (4.9)$$

$\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $T$  in  $\text{K}$ , Gültigkeitsbereich:  $1300 \text{ K} < T < 3100 \text{ K}$ .

Bei den Nachrechnungen der TOP-Experimente zeigte es sich jedoch, daß Differenzen z.T. bis Faktor 2 auftraten, wenn man dieselbe  $\rho$ - $T$ -Darstellung für alle Rechnungen verwendete. Dieser Umstand führte dazu, daß man versuchte, eine von der Totzeit (Umschalten zwischen EHA und EA) abhängige  $\rho$ - $T$ -Darstellung einzuführen. Die Abweichungen von der Grundgleichung sind relativ gering und treten nur bei höheren Temperaturen auf (Abb. 4.3). Dieses Verhalten konnte nicht eindeutig geklärt werden. Es wird jedoch vermutet, daß es mit dem Hysterese-Phänomen beim Abkühlen des  $\text{UO}_2$  zusammenhängen muß. Auf jeden Fall konnten alle durchgeführten Experimente theoretisch recht gut durch Variation des spezifischen Widerstands des  $\text{UO}_2$  zwischen den Grenzkurven

$$\rho = \exp (14.47 - 1.7 \cdot 10^{-2} T + 5.55 \cdot 10^{-6} T^2 - 6.62 \cdot 10^{-10} T^3) / (3.4 \cdot 10^{-7} T^2), \quad (4.10)$$

$\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $T$  in  $\text{K}$ , Gültigkeitsbereich:  $1300 \text{ K} \leq T < 3100$

und

$$\rho = \exp (14.47 - 1.7 \cdot 10^{-2} T + 5.55 \cdot 10^{-6} T^2 - 6.62 \cdot 10^{-10} T^3) / (2.6 \cdot 10^{-7} T^2), \quad (4.11)$$

$\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $T$  in  $\text{K}$ , Gültigkeitsbereich:  $1300 \text{ K} < T < 3100$

nachgerechnet werden (Abb. 4.3). Die Fehlerbreite hierbei lag bei  $\pm 13\%$ .

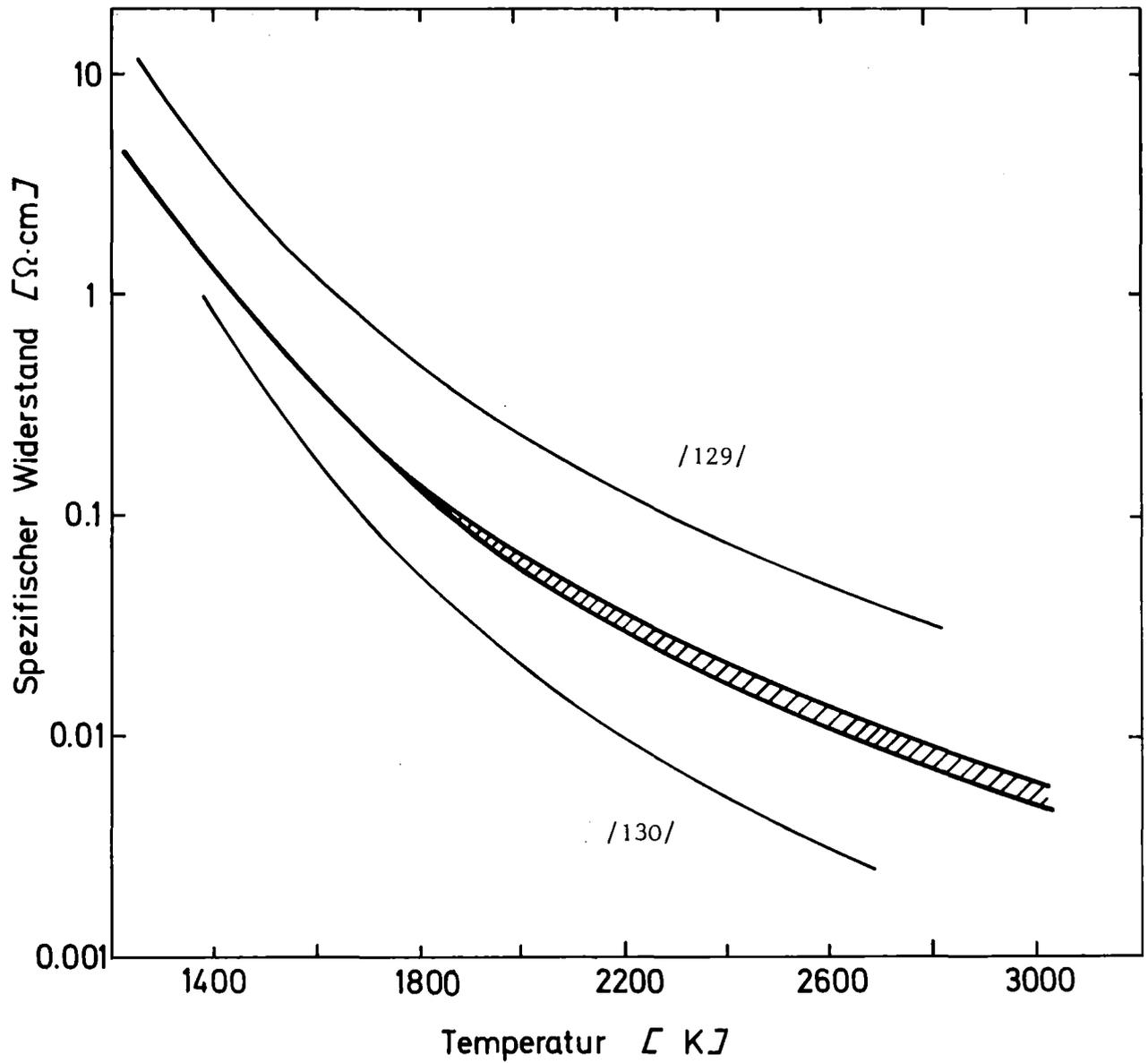


Abb. 4.3 Spezifischer Widerstand von festem  $\text{UO}_2$  als Funktion der Temperatur. Vergleich der eigenen Experimente mit Angaben aus der Literatur.

## 5. Theoretische Überlegungen

### 5.1 Die stationäre radiale Temperaturverteilung im $UO_2$ -Brennstab

#### 5.1.1 Das Temperaturprofil im Brennstoff

Betrachtet man den  $UO_2$ -Brennstab als einen stromdurchflossenen elektrischen Leiter mit wärmeproduzierenden Volumina  $dV$ , so gilt im stationären Fall die Bilanzgleichung

$$\iiint_V Q(r) dV = \iint_F \vec{q}_n dF \quad (5.1)$$

und die Fourier-Gleichung

$$\vec{q} = - \lambda(T) \text{ grad } T . \quad (5.2)$$

Hierbei ist  $V$  das Gesamtvolumen des  $UO_2$ -Stabes und  $F$  dessen Manteloberfläche. Ferner ist  $Q(r)$  die Wärmequell-dichte, d.h. die pro Zeit- und Volumeneinheit produzierte Wärmemenge,  $q$  die Wärmestromdichte, also die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit durch die Flächeneinheit hindurchtritt und  $\vec{q}_n$  ist die Komponente von  $\vec{q}$  in Richtung der Normalen des Flächenelements  $dF$ . Die radiale Abhängigkeit der Wärmequell-dichte folgt einfach aus der radialen Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes. Die Anwendung des Gauß'schen Satzes aus Gl. (5.1) liefert für die Wärmequell-dichte die Beziehung

$$Q(r) = \text{div } \vec{q} \quad (5.3)$$

und aus dem Vergleich zwischen Gl. (5.1), (5.2) und (5.3) ergibt sich schließlich der Ausdruck

$$Q(r) = - \text{div } \lambda(T) \text{ grad } T \quad (5.4)$$

Berücksichtigt man an dieser Stelle die experimentellen Gegebenheiten am Versuchsstand (sehr kleines axiales Temperaturgefälle, kleines Verhältnis ( $\approx 0.025$ ) der Grundflächen zur Manteloberfläche des  $UO_2$ -Stabes), so kann man für die weiteren Betrachtungen annehmen, daß der Wärmestrom nur in radiale Richtung fließt und die gesamte im  $UO_2$ -Stab produzierte Wärmemenge über den äußeren Zylindermantel abfließt. Der Fehler hierbei liegt in der Größenordnung von 2.5%.

Aus Gl. (5.4) erhält man bei eindimensionaler Betrachtung und für Zylinder-

geometrie die Wärmeleitgleichung

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right] + Q(r) = 0 . \quad (5.5)$$

Multipliziert man Gl. (5.5) mit  $4 \pi r$  und integriert von 0 bis  $r^*$ , so folgt:

$$4 \pi \int_0^{r^*} Q(r) r dr = - 4 \pi r^* \lambda(T) \frac{dT}{dr^*} . \quad (5.6)$$

Division durch  $r^*$  und Integration von 0 bis  $R_{BA}$  (= Brennstabradius) liefert die Wärmebilanz für den gesamten  $UO_2$ -Stab:

$$4 \pi \int_0^{R_{BA}} \frac{1}{r^*} \int_0^{r^*} Q(r) r dr dr^* = 4 \pi \int_{T_{BA}}^{T_{BZ}} \lambda(T) dT . \quad (5.7)$$

Eine analytische Behandlung von Gl. (5.7) ist wegen der radialen Abhängigkeit der Wärmequellendichte  $Q(r)$  und der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(T)$  nicht möglich.

Daher wurde bereits in früheren Arbeiten /106,107/ der  $UO_2$ -Stab in  $n$  Koaxialzylinder (Abb. 5.3) derart unterteilt, daß es für den beliebigen Radius  $r_k$  gilt:

$$r_k = R_{BA} \sqrt{k/n} . \quad (5.8)$$

Diese Konstruktion ermöglicht, daß alle  $n$ -Zylinder den gleichen Querschnitt  $FR$  aufweisen:

$$\begin{aligned} FR &= \pi (r_k^2 - r_{k-1}^2) \\ &= \pi \left( R_{BA}^2 \frac{k}{n} - R_{BA}^2 \frac{k-1}{n} \right) \\ &= \pi R_{BA}^2 / n . \end{aligned} \quad (5.9)$$

Man vereinbart nun, daß entlang der Strecke  $\overline{r_{i+1} - r_i}$  sowohl der spezifische Widerstand  $\rho$  als auch die Wärmeleitfähigkeit des  $UO_2$  konstant sind. Dies ist mit einem Fehler von kleiner als 4% ab  $n > 100$  gewährleistet. Bei den eigenen Rechnungen wurde mit  $n = 400$  gerechnet.

Dann gilt für den Ohm'schen Widerstand  $R_i$  des beliebigen  $i$ -ten Koaxialzylinders (dies ist der Zylinder zwischen den Radien  $r_i$  und  $r_{i+1}$ )

$$R_i = \rho_i \ell \cdot n/\pi R_{BA}^2 \quad \text{[Ohm]} \quad (5.10)$$

und für die diesem Zylinder zugeführte elektrische Leistung  $N_i$  entsprechend

$$N_i = U^2 \pi R_{BA}^2 / n \ell \rho_i. \quad (5.11)$$

Die Leistungsbilanz für den äußeren Zylinder  $n$  lautet:

$$N_G = N_n + q_{n-1 \rightarrow n}. \quad (5.12)$$

Dabei ist  $N_n$  die im  $n$ -ten Zylinder erzeugte Joulesche Leistung (vgl. Gl. 5.11),  $q_{n-1 \rightarrow n}$  der durch die Manteloberfläche

$$F_{n-1} = 2 \pi r_{n-1} \ell \quad (5.13)$$

des Zylinders  $n-1$  in den Zylinder  $n$  fließende Wärmestrom und  $N_G$  die dem  $UO_2$ -Stab insgesamt zugeführte elektrische Leistung.

Zur Berechnung des radialen Temperaturprofils wird nun der Wärmestrom  $q_{n-1 \rightarrow n}$  mit Hilfe der Fourier-Gleichung ausgerechnet. Es gilt:

$$q_{n-1 \rightarrow n} = F_{n-1} \lambda_n \frac{T_{n-1} - T_n}{r_n - r_{n-1}}. \quad (5.14)$$

Aus den Gl. (5.11), (5.12) und (5.13) folgt nun unmittelbar

$$T_{n-1} = T_n + \left( N_G - \frac{U^2 \pi R_{BA}^2}{n \ell \rho_n} \right) \frac{r_n - r_{n-1}}{\lambda_n F_{n-1}}. \quad (5.15)$$

Mit

$$N_G - \frac{U^2 \pi R_{BA}^2}{n \ell \rho_n} = N_G - N_n = q_{n-1 \rightarrow n}$$

und

$$r_n - r_{n-1} = \Delta r_n$$

läßt sich Gl. (5.15) wie folgt umschreiben:

$$T_{n-1} = T_n + q_{n-1 \rightarrow n} \frac{\Delta r_n}{\lambda_n F_{n-1}}. \quad (5.16)$$

Die Gleichung (5.16) gestattet nun die Berechnung der Temperatur  $T_{n-1}$  auf der (fiktiven) Oberfläche des Koaxialzylinders n-1.

Entsprechende Überlegungen für die Leistungsbilanz auf der Oberfläche des Zylinders n-1 führen zu der Beziehung

$$q_{n-1 \rightarrow n} = N_{n-1} + q_{n-2 \rightarrow n-1} \quad , \quad (5.17)$$

woraus sich für die Temperatur  $T_{n-2}$  der Ausdruck

$$T_{n-2} = T_{n-1} + q_{n-2 \rightarrow n-1} \frac{\Delta r_{n-1}}{\lambda_{n-1} F_{n-2}} \quad (5.18)$$

ergibt.

Durch diesen iterativen Prozeß erhält man schließlich die Temperatur  $T_1$  auf der Oberfläche des 1. Koaxialzylinders:

$$T_1 = T_2 + q_{1 \rightarrow 2} + \frac{\Delta r_2}{\lambda_2 F_1} \quad . \quad (5.19)$$

Die Zentraltemperatur  $T_{BZ}$  selbst kann bei diesem Iterationsverfahren nicht direkt berechnet werden und wird daher wie folgt gesetzt:

$$T_{BZ} = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{2} \quad . \quad (5.20)$$

### 5.1.2 Der Temperaturverlauf im Spalt Brennstoff-Hülle und der Temperaturabfall in der Hülle

Bekanntlich sind in einem Reaktorbrennstab Brennstoff und Hülle nicht in unmittelbarem Kontakt; vielmehr existiert aus Fertigungsgründen ein mehr oder weniger großer Spalt ( $10 \mu - 100 \mu$ ) zwischen beiden Materialien. Beim EPBF-Referenzstab ist aus elektrisch bedingten Randbedingungen ein theoretischer Spalt von mindestens  $300 \mu - 350 \mu$  notwendig. Aus konstruktiven Gründen beträgt er momentan  $550 \mu$ .

Die Berechnung des Temperaturabfalls im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle und der Temperaturverlauf in der Hülle selbst wurden in /106/ ausführlich diskutiert.

Die Ermittlung des Abfalls im Spalt basiert auf der "allgemeinen Spaltgleichung" /94/

$$\delta = \frac{P_L T_{HI}^{s+1} \left[ \left( 1 + \frac{T_{BA} - T_{HI}}{T_{HI}} \right)^{s+1} - 1 \right]}{2\pi(R_{BA} + \delta) - P_{ST} T_{HI}^4 \left[ \left( 1 + \frac{T_{BA} - T_{HI}}{T_{HI}} \right)^4 - 1 \right]} \quad (5.21)$$

und auf der Beziehung

$$\delta = a \cdot e^{bs} \quad \text{für } 25 < \delta < 650 \mu \quad (5.22)$$

mit

$$P_L = 5.26 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm} \cdot K^{s+1}$$

$$P_{ST} = \sigma \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \left[ \text{W/cm}^2 \cdot K^4 \right]$$

$$= 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot K^4$$

$$a = 0.4545 \mu$$

$$b = 7.8855$$

$$q = \text{Stableistung} \left[ \text{W/m} \right].$$

Die Größe  $s$  ist die gleiche, die in der allgemeinen Beziehung

$$\lambda = \text{const} \cdot T^s \quad (5.23)$$

vorkommt, die die Wärmeleitfähigkeit von Gasen als Funktion der Temperatur darstellt.

Für ideale Gase folgt aus der kinetischen Gastheorie für  $s$  der Wert 0.5. Für Helium fand man in der Literatur verschiedene  $s$ -Werte. So gilt nach /127/

$$s = 0.66,$$

nach Barnes und Jackson (Ref. in /127/)

$$s = 0.58$$

und nach /94/

$$s = 0.79.$$

Diese Streuung führte zu einer Überprüfung des Definitionsbereichs der "allgemeinen Spaltgleichung" und man gelangt mit Hilfe einiger Iterationsrechnungen /106/ zu einer halbempirischen Berücksichtigung der Abhängigkeit von  $s$  von der Spaltbreite  $\delta$  (Gl. 5.22).

Der Verlauf der Temperatur in der Hülle läßt sich einfach nach bekannten

Formalismen berechnen. Es folgt für das Temperaturprofil in der Hülle:

$$T(r_H) = -\frac{a}{b} + \left\{ \left( T + \frac{a}{b} \right)^2 - \frac{q}{\pi b} \ln \frac{r}{r_H} \right\}^{1/2} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]. \quad (5.24)$$

Darin ist berücksichtigt, daß die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Hülle als Funktion der Temperatur über den linearen Ansatz

$$\lambda_H(T) = a + bT \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (5.25)$$

dargestellt werden kann. Für die Konstanten a und b gilt z.B. nach /140/

$$\begin{aligned} a &= 9.248 \cdot 10^{-2} && \text{W/m} \cdot \text{K} \\ b &= 1.571 \cdot 10^{-4} && \text{W/m} . \end{aligned}$$

### 5.1.3 Anpassung der elektrischen Stableistung $q_e$ an eine nukleare Stableistung $q_n$ bei gleicher Zentraltemperatur

Diese einfachen Formalismen (Abschn. 5.1.1 und 5.1.2), auf deren Basis das Programm MASTER-1 /106/ aufgebaut war, wurden auch im Rechenprogramm VESUV beibehalten. Hierbei wurde jedoch die Rechnungsart geändert und die Rechnung selbst verfeinert. So wird im VESUV nicht die Brennstoffaußentemperatur als Eingabe verwendet sondern die experimentell meßbare Hüllenaußentemperatur. Somit verläuft der Iterationsprozeß von ganz außen nach innen. Ferner wird hierbei die Ausdehnung sowohl des Brennstoffes als auch der Hülle und dadurch die damit verbundene Spaltverringerng berücksichtigt. Schließlich wird beim Vergleich zwischen den Zuständen des elektrischen und des nuklearen Betriebs ein neues Kriterium verwendet. Bislang /106, 107/ wurden diese Zustände in dem Moment miteinander verglichen, als Zentral- und Brennstoffaußentemperatur jeweils gleiche Werte erreichten.

In diesem Bericht wird ein anderer Weg gegangen. Als äquivalente Zustände werden diejenigen Zustände definiert, bei denen die Enthalpie-Werte bei gleicher Zentraltemperatur die gleichen sind, d.h. wenn es gilt

$$\int_{T_{BA,e}}^{T_{BZ}} \gamma(T_e(r)) c_p(T_e(r)) dT = \int_{T_{BA,n}}^{T_{BZ}} \gamma(T_n(r)) c_p(T_n(r)) dT \quad (5.26)$$

Das führt naturgemäß dazu, daß die jeweiligen Brennstoffaußentemperaturen unterschiedlich sind, jedoch erscheint die Anpassung auf der Basis dieses Kriteriums als physikalisch sinnvoller. Die Korrelation zwischen elektrischer und nuklearer Stableistung läßt sich mathematisch durch die Beziehung

$$q_e = 0.2775 \cdot q_n^{1.133} \quad (5.27)$$

erfassen (Abb. 5.1). Die Temperaturverteilungen im Brennstoff bzw. im Brennstab für  $q_e = 15 \text{ kW/m} = q_n = 34.5 \text{ kW/m}$  können für diese Anpassungsmethode der Abb. 5.2 entnommen werden.

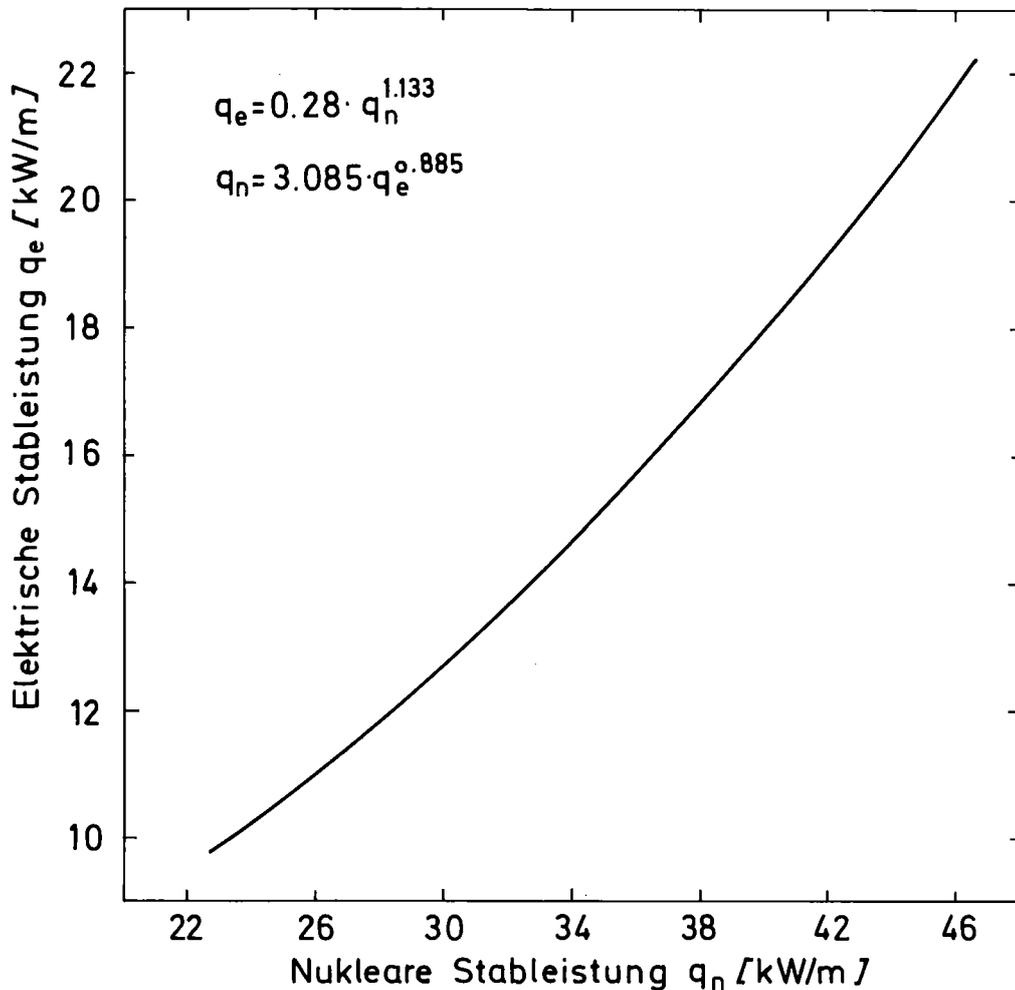
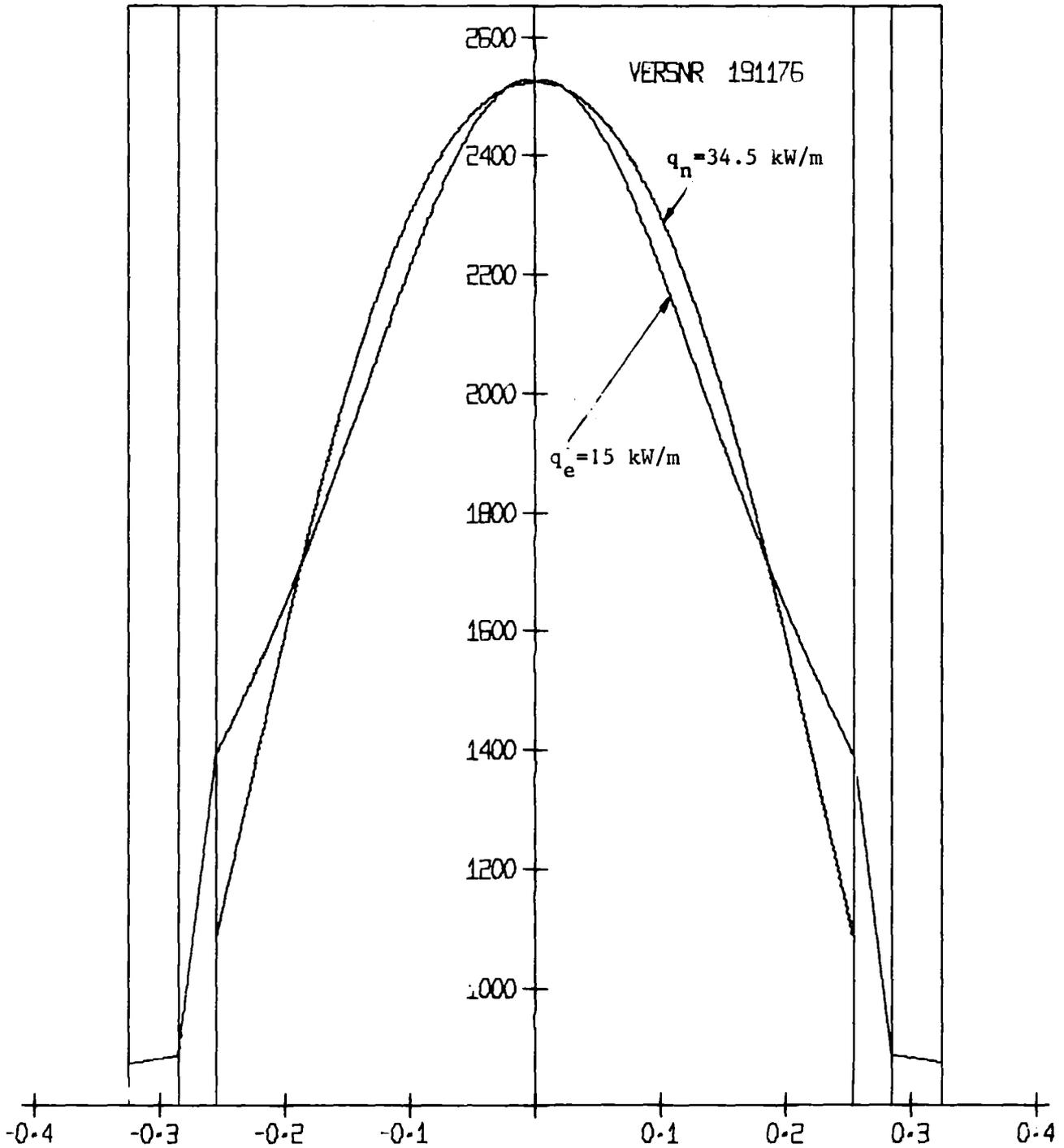


Abb. 5.1 Korrelation zwischen elektrischer und nuklearer Stableistung nach dem "Enthalpie-Kriterium".



TEMPERATURVERTEILUNG IM STATIONÄREN BETRIEB

Abb. 5.2 Anpassung der stationären Zustände eines elektrisch und eines nuklear betriebenen  $\text{UO}_2$ -Brennstabes auf der Basis des "Enthalpie-Kriteriums".

5.2 Das thermodynamische Verhalten eines UO<sub>2</sub>-Stabes bei elektrisch applizierten Leistungstransienten

5.2.1 Der Temperaturverlauf im Brennstab

Die mathematische Erfassung der thermodynamischen Vorgänge im Brennstoff während einer transienten Leistungsänderung erfolgt auf der Basis der in-stationären Wärmeleitgleichung:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right) + Q(r) = c_p(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.28)$$

Sie unterscheidet sich von Gleichung (5.5) lediglich durch den Term auf der rechten Seite.

Mit Q(r) aus Gl. (5.7) und den temperaturabhängigen Größen  $\lambda(T)$ ,  $c_p(T)$  und  $\gamma(T)$  (vgl. Abschn. 5.3) ist eine analytische Darstellung der Lösungen von Gl. (5.28) ebenso wenig möglich, wie bei Gl. (5.5). Daher hat man auch bei der theoretischen Behandlung der Vorgänge während der transienten Leistungsänderung auf eine analytische Behandlung verzichtet und die dynamischen Änderungen numerisch erfaßt.

Hierfür wird der UO<sub>2</sub>-Stab nach dem Ende der stationären Rechnung und der Ermittlung des stationären radialen Temperaturprofils in radialer Richtung neu aufgeteilt. Die neue Aufteilung ist äquidistant. Die Radien werden dabei so gewählt, daß die jeweiligen Temperaturwerte aus der vorangegangenen stationären Rechnung bereits bekannt sind. Dadurch sind auch die thermodynamischen Größen und die Stoffkonstanten bekannt. Im einzelnen sieht die Aufteilung in radialer Richtung wie folgt aus (vgl. auch Abb. 5.3):

Radien für stationäre Rechnungen:  $r_{S,i}$  ,  $i = 0$  bis  $n$

Radien für dynamische Rechnungen:  $r_{D,i}$  ,  $i = 0$  bis  $n$

$r_{D,0} = r_{S,0}$	$= 0$	(Stabmitte)	$\rightarrow T_0$	$\rightarrow \lambda_0, \gamma_0, \rho_0, c_{p0}$
$r_{D,1} = r_{S,1}$	$= R_{BA} \sqrt{1/n}$		$\rightarrow T_1$	$\rightarrow \lambda_1, \gamma_1, \rho_1, c_{p1}$
$r_{D,2} = r_{S,4}$	$= R_{BA} \sqrt{4/n}$	$= 2 r_{D,1}$	$\rightarrow T_2$	$\rightarrow \lambda_2, \gamma_2, \rho_2, c_{p2}$
$r_{D,3} = r_{S,9}$	$= R_{BA} \sqrt{9/n}$	$= 3 r_{D,1}$	$\rightarrow T_3$	$\rightarrow \lambda_3, \gamma_3, \rho_3, c_{p3}$
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
$r_{D,n} = r_{S,n^2}$	$= R_{BA}$	$= nr_{D,1}$	$\rightarrow T_n$	$\rightarrow \lambda_n, \gamma_n, \rho_n, c_{pn}$

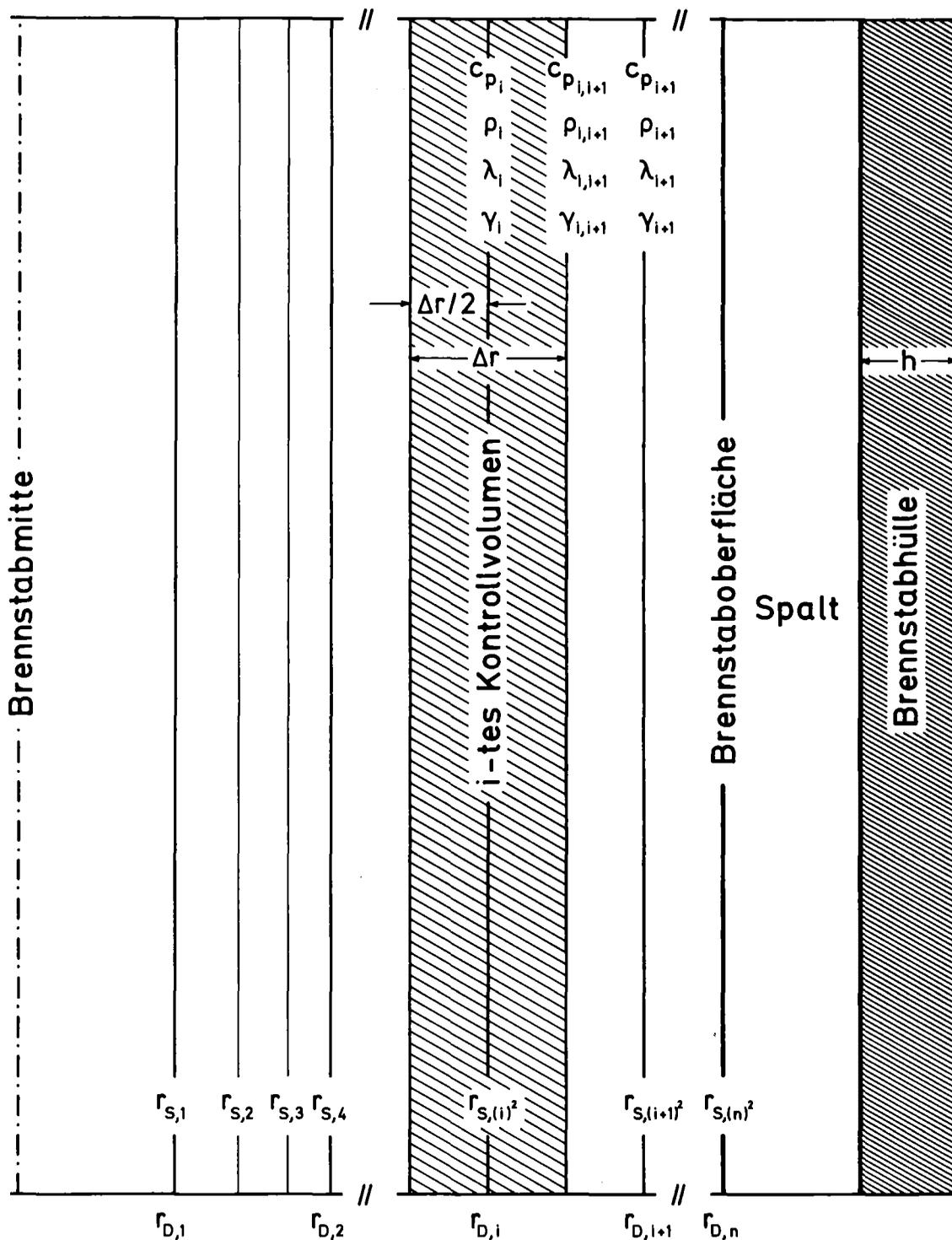


Abb. 5.3 Brennstabmodell des EPBF-Brennstabes :

$r_s$  : Stabunterteilung für stationäre Rechnungen

$r_D$  : Stabunterteilung für dynamische Rechnungen

In axialer Richtung erstrecken sich die Kontrollvolumina ebenso wie bei den stationären Rechnungen über die gesamte Stablänge. Der Fehler liegt auch hier in der Größenordnung von 2,5%. Die Abbildung 5.3 zeigt die o.g. Aufteilung des Stabes für die Modellrechnungen.

In radialer Richtung reicht das erste Kontrollvolumen von der Stabachse  $r_0 = 0$  bis  $r_1/2$ . Die weiteren erstrecken sich jeweils von  $r_i - \frac{\Delta r}{2}$  bis  $r_i + \frac{\Delta r}{2}$ , mit  $i = 1$  bis  $n-1$ . Das letzte Kontrollvolumen im Brennstoff reicht schließlich von  $r_n - \frac{\Delta r}{2}$  bis  $r_n$ .

Für jedes Kontrollvolumen (KV) gilt der Energiesatz:

$$\begin{aligned} \text{Aufheizung} &= \text{Wärmestrom ins KV} \\ &- \text{Wärmestrom aus KV} \\ &+ \text{Wärmeproduktion im KV.} \end{aligned}$$

Diese Bilanz lautet für das erste KV (die oberen Indizes diskreditieren die Temperatur zeitlich, die unteren räumlich):

$$\underbrace{\frac{1}{4} \pi r_1^2 \ell c_{p_{o,1}} \gamma_{o,1} \frac{T_o^1 - T_o^0}{\Delta t}}_{\text{Aufheizung}} = \underbrace{- 2\pi r_1 \ell \lambda_{o,1} \frac{T_o^0 - T_1^0}{\Delta t}}_{\text{Wärmestrom aus dem KV}} + \underbrace{\frac{U^2 \pi r_1^2}{4 \rho_{o,1} \ell}}_{\text{Wärmeproduktion}}, \quad (5.29)$$

wobei natürlich kein Wärmestrom ins KV einfließt.

Aus Gl. (5.34) erhält man leicht ( $\Delta r = r_1 - r_{i-1}$ ):

$$T_o^1 = T_1^0 + \frac{\Delta t}{c_{p_{o,1}} \gamma_{o,1}} \left\{ \frac{4\lambda_{o,1} (T_o^0 - T_1^0)}{\Delta r^2} + \frac{U^2}{\rho_{o,1} \ell^2} \right\}. \quad (5.30)$$

Auf ähnliche Weise erfolgt die Aufstellung der Bilanzgleichung für jedes Kontrollvolumen. Es gilt für das beliebige KV<sub>i</sub> (von  $r_i - \frac{\Delta r}{2}$  bis  $r_i + \frac{\Delta r}{2}$ ) mit dem Querschnitt  $F_i = 2\pi r_i \Delta r$  und dem Volumen  $V = F_i \ell$ :

$$\begin{aligned} 2\pi r_i \ell \Delta r c_{p_i} \gamma_i \frac{T_i^1 - T_i^0}{\Delta t} &= 2\pi (r_i - \frac{\Delta r}{2}) \ell \lambda_{i-1,i} \frac{T_{i-1}^0 - T_1^0}{\Delta r} - \\ &- 2\pi (r_i + \frac{\Delta r}{2}) \ell \lambda_{i,i+1} \frac{T_i^0 - T_{i+1}^0}{\Delta r} + \frac{U^2 2\pi r_i \Delta r}{\rho_i \ell}, \end{aligned} \quad (5.31)$$

woraus sich die neue Temperatur  $T_i^1$  errechnen läßt:

$$T_i^1 = T_i^o + \frac{\Delta t}{c_{p_i} \gamma_i} \left\{ \lambda_{i-1,i} \left( r_i - \frac{\Delta r}{2} \right) \frac{(T_{i-1}^o - T_i^o)}{(r_i \Delta r^2)} - \lambda_{i,i+1} \left( r_i + \frac{\Delta r}{2} \right) \frac{(T_i^o - T_{i+1}^o)}{(r_i \Delta r^2)} + \frac{U^2}{\rho_i \ell^2} \right\} \quad (5.32)$$

Von der Oberfläche des Brennstoffes aus fließt der Wärmestrom nicht mehr infolge Wärmeleitvorgängen im Brennstoff. Mit  $\alpha_{sp}(T)$  als die für den Stab definierte Wärmeübergangszahl und  $T_{HI}$ , die Hüllentemperatur, läßt sich die Bilanzgleichung für das von  $r_n - (\Delta r/2)$  bis  $r_n$  reichende Kontrollvolumen wie folgt schreiben:

$$\pi \left( r_n - \frac{\Delta r}{4} \right) \Delta r \ell c_{p_n} \gamma_n \frac{T_n^1 - T_n^o}{\Delta t} = - \lambda_n 2\pi \left( r_n - \frac{\Delta r}{2} \right) \frac{T_{n-1}^o - T_n^o}{\Delta r} - \alpha_{sp} 2\pi r_n \ell (T_n^o - T_{HI}^o) + \frac{U^2 \pi \left( r_n \Delta r - \frac{\Delta r^2}{4} \right)}{\rho_n \ell} \quad (5.33)$$

Daraus läßt sich  $T_n^1$  errechnen zu:

$$T_n^1 = T_n^o + \frac{\Delta t}{c_{p_n} \gamma_n} \left\{ \frac{2 \lambda_n \left( r_n - \frac{\Delta r}{2} \right) (T_{n-1}^o - T_n^o) / \Delta r}{\left( r_n - \frac{\Delta r}{4} \right) \Delta r} - \frac{\alpha_{sp} 2 r_n (T_n^o - T_{HI}^o)}{\left( r_n - \frac{\Delta r}{4} \right) \Delta r} + \frac{U^2}{\rho_n \ell^2} \right\} \quad (5.34)$$

Entsprechend lassen sich die Bilanzgleichungen für die Stabhülle aufstellen, wobei keine Wärmeproduktion stattfindet. Es bedeuten darin:

$\delta$  = Spaltbreite

$\Delta h$  = Hüllwandstärke

$r_{HI} = r_n + \delta$

$r_{HA} = r_{HI} + \Delta h$

$T_{HM}$  = Temperatur in der Mitte der Hülle (Zweizonenmodell für die Hülle)

$T_{HA}$  = Hüllenaußentemperatur

$\theta_B$  = "Bulk"-Temperatur des Kühlmittels

$\alpha_K$  = Wärmeübergangszahl des Kühlmittels

Hülleninnenseite:

$$\pi (2r_n + \delta) \delta \ell c_{pHe} \gamma_{He} \frac{T_{HI}^1 - T_{HI}^o}{\Delta t} = \alpha_{sp} 2\pi r_n \ell (T_n^o - T_{HI}^o) - 2\pi r_{HI} \ell \lambda_{St} \frac{T_{HI}^o - T_{HM}^o}{\Delta h/2} \quad (5.35)$$

und daraus

$$T_{HI}^1 = T_{HI}^o + \frac{\Delta t}{c_{pHe} \gamma_{He}} \left\{ \frac{2\alpha_{sp} r_n (T_n^o - T_{HI}^o) - 4r_{HI} \lambda_{St} (T_{HI}^o - T_{HM}^o)/\Delta h}{(2r_n + \delta) \delta} \right\} \quad (5.36)$$

Hüllenmitte:

$$\pi (r_{HI} + \frac{\Delta h}{4}) \Delta h \ell c_{pSt} \gamma_{St} \frac{T_{HM}^1 - T_{HM}^o}{\Delta t} = \lambda_{St} 2\pi r_{HI} \ell \frac{T_{HI}^o - T_{HM}^o}{\Delta h/2} - \lambda_{St} 2\pi (r_{HI} + \frac{\Delta h}{2}) \ell \frac{T_{HM}^o - T_{HA}^o}{\Delta h/2} \quad (5.37)$$

und daraus:

$$T_{HM}^1 = T_{HM}^o + \frac{4\lambda_{St} \Delta t \{r_{HI} (T_{HI}^o - T_{HM}^o) - (r_{HI} + \frac{\Delta h}{2}) (T_{HA}^o - T_{HM}^o)\}}{c_{pSt} \gamma_{St} (r_{HI} + \frac{\Delta h}{4}) \Delta h^2} \quad (5.38)$$

Hüllenaußenseite:

$$\pi (r_{HA} - \frac{\Delta h}{4}) \Delta h \ell c_{pSt} \gamma_{St} \frac{T_{HA}^1 - T_{HA}^o}{\Delta t} = \lambda_{St} 2\pi (r_{HI} + \frac{\Delta h}{2}) \ell \frac{T_{HM}^o - T_{HA}^o}{\Delta h/2} - \alpha_K 2\pi r_{HA} \ell (T_{HA}^o - \theta_K) \quad (5.39)$$

und daraus:

$$T_{HA}^1 = T_{HA}^o + \frac{4\lambda_{St} \Delta t \{(r_{HI} + \frac{\Delta h}{2}) (T_{HM}^o - T_{HA}^o)/\Delta h - \alpha_K r_{HA} (T_{HA}^o - \theta_B)\}}{c_{pSt} \gamma_{St} (r_{HA} - \frac{\Delta h}{4}) \Delta h} \quad (5.40)$$

Die Gleichungen (5.35), (5.37), (5.39), (5.41), (5.43) und (5.45) erlauben nunmehr die Berechnung des radialen Temperaturprofils im Brennstab nach der Zeit  $\Delta t = t_1 - t_0$  aus den bereits bekannten Temperaturen an den drei beliebigen

Raumpunkten  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$  zum Zeitpunkt  $t_0$ . Bei diesem Berechnungsverfahren handelt es sich um die sogenannte explizite Methode zur numerischen Behandlung von Differentialgleichungen. Sie zeichnet sich aus durch einen relativ geringen mathematischen Aufwand, erfordert jedoch die Erfüllung gewisser Stabilitätskriterien. Es muß im Brennstoff gelten (Ref. in /32/:

$$\frac{\lambda}{\gamma c_p} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \leq \frac{1}{2} \quad (5.41)$$

für alle Punkte außerhalb des Nullpunktes. Für den Nullpunkt gilt:

$$\frac{\lambda}{\gamma c_p} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \leq \frac{1}{4} \quad (5.42)$$

Für den Spalt und die Hülle läßt sich ein notwendiges Stabilitätskriterium nicht einfach definieren. Jedoch zeigte die Rechnung, daß für charakteristische Heliumstoffdaten das für die Gl. (5.35), (5.37) und (5.39) gewählte  $\Delta t$  ( $< 2$  ms) zu keinen Instabilitäten führt, wenn man es auch bei der Behandlung der Gl. (5.41), (5.43) und (5.45) verwendet.

### 5.2.2 Zur Berechnung der Transportkoeffizienten und Stoffdaten

Bei der Berechnung der Stoffdaten (Abschn. 5.3) während der Leistungstransiente geht man davon aus, daß sie im Zeitintervall  $\Delta t$  konstant geblieben sind bzw. deren Änderung sich noch nicht auf den Wärmetransport ausgewirkt hat. In der Tat liegt der Sinn der gewählten Stabilitätskriterien darin, daß zur Bestimmung der Temperatur am Punkt  $i$  die Kenntnis der Temperatur zu einem früheren Zeitpunkt nur an diesem Punkt und seinen Nachbarpunkten  $i-1$  und  $i+1$  nur dann ausreichend ist, wenn der Einfluß einer Änderung des Wärmestromes noch nicht durch die einsetzende Wärmeleistung wieder abgebaut worden ist.

Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{sp}$  und  $\alpha_k$  erfolgt nach bekannten Formalismen. Unterteilt man den gesamten Wärmestrom, der die Brennstoffsäule verläßt, in zwei Komponenten

$$q = q_1 + q_2, \quad (5.43)$$

so gilt

$$q_1 = \lambda_{sp} \frac{T_n - T_{HI}}{\delta} \quad (5.44)$$

und

$$q_2 = \alpha_{st} (T_n - T_{HI}) \quad (5.45)$$

Mit

$$\frac{\lambda_{sp}}{\delta} = \alpha_L \quad (5.46)$$

ergibt sich die gesamte Wärmeübergangszahl im Spalt zu

$$\alpha_{sp} = \alpha_L + \alpha_{st} \quad (5.47)$$

Dieses System von Gleichungen (5.48 - 5.50) erlaubt bei bekannten  $q$ ,  $\lambda_{sp}$ ,  $\delta$ ,  $T_n$  und  $T_{HI}$  die Berechnung von  $\alpha_{sp}$ . Die dynamische Änderung wird über die Änderung von  $\alpha_{sp}$  und  $\delta$  mit steigender Temperatur berücksichtigt.

Für den Wärmeübergang von der Hüllenoberfläche zum Kühlmittel hin gilt die allgemeine von Newton stammende Wärmeübergangsgleichung

$$q = \alpha_k (T_{HA} - \theta_B), \quad (5.48)$$

bzw. die allgemeine Nusseltgleichung

$$Nu = A Re^m Pr^n \quad (5.49)$$

Die Zahlenwerte der Konstanten  $A$ ,  $m$  und  $n$  (Gl. (5.54) sowie die Bezugstemperatur, bei der die Stoffwerte einzusetzen sind, sind in der Literatur umstritten. Mc Adams (Ref. in /32/ schlägt vor

$$\begin{aligned} A &= 0.023 \\ m &= 0.8 \\ n &= 0.4 \end{aligned}$$

Voll ausgebildete Turbulenz:  $x/D_h > 40$  ( $x$ : Abstand zwischen Kanaleintritt und Meßstelle).

Nach Durham et al. (Ref. in /132/ gilt für Helium

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{x}{D_h}\right)^{-0.1}, \quad (5.50)$$

wobei alle Stoffwerte bei der mittleren (arithmetisches Mittel) Kühlmitteltemperatur einzusetzen sind.

Dalle Donne und Bowditch (Ref. in /133/ schlagen folgende Gleichungen für Helium vor (alle Stoffwerte sind bei der End("Bulk")-Temperatur des Heliums einzusetzen):

$$\text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}})^{- (0.29 + 0.0033 (x/D_{\text{h}}))}, \quad (5.51)$$

$$18 < x/D_{\text{h}} < 316$$

und

$$\text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}})^{- 0.18}, \quad (5.52)$$

$$3 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^4 .$$

Marek und Maubach /133/ konnten 80% ihrer gemessenen Daten bis zu  $\pm 10\%$  durch die Gleichung

$$\text{Nu} = 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}})^{- (0.29 + 0.0019 (x/D_{\text{h}}))}, \quad (5.53)$$

$$6 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 4.3 \cdot 10^4, T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}} \leq 8, x/D_{\text{h}} \leq 77$$

darstellen und alle Werte werden innerhalb  $\pm 5\%$  durch die Beziehung

$$\text{Nu} = 0.019 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}})^{- 0.18}, \quad (5.54)$$

$$10^5 \leq \text{Re} \leq 10^6,$$

$$24 \leq x/D_{\text{h}} \leq 40,$$

$$T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}} \leq 1.82$$

gut repräsentiert.

Die Randbedingungen am Versuchsstand bzw. während der Experimente erfüllen jedoch keine dieser Beziehungen vollständig. Insbesondere die Einhaltung der Bereiche für  $\text{Re}$ ,  $T_{\text{HA}}/\theta_{\text{B}}$  und  $x/D_{\text{h}}$  konnte nicht so optimalisiert werden, daß man sich unbedenklich auf eine der Gleichungen hätte verlassen können. Somit wurde man gezwungen, einen anderen Weg zu gehen. Ausgehend vom stationären Zustand, bei dem die gesamte elektrische Leistung zum einen über das Kühlmittel und zum anderen über Strahlung abgeführt wird, wurde die Bilanzgleichung

$$N_{\text{G}} = \alpha_{\text{K}} (T_{\text{HA}} - \theta_{\text{B}}) + \text{Strahlung} \quad (5.55)$$

aufgestellt. Sodann wurde auf der Basis der McAdams-Gleichung  $\alpha_{\text{K}}$  als Funktion

des Helium-Massendurchsatzes  $\dot{D}$ , des hydraulischen Durchmessers  $D_h$ , der Prandl-Zahl  $Pr$  und der Stoffdaten  $\eta$  und  $\lambda$  dargestellt:

$$\alpha_K = 0.023 \left( \frac{\dot{D}}{D_h \eta} \right)^{0.8} \frac{Pr^{0.4} \lambda}{D_h} \quad (5.56)$$

Nimmt man nun an, daß die Temperaturdifferenz  $T_{HA} - \theta_B$  über das betrachtete Zeitintervall  $t + \Delta t$  konstant bleibt bzw. berücksichtigt man deren Änderung nicht, so läßt sich  $\alpha_K$  aufgrund der Anfangsdaten und über die zeitliche Änderung von  $D$  berechnen. Der iterative Prozeß liefert dann jeweils die neuen  $T_{HA}$  - und  $\theta_B$ -Werte und daraus wiederum das neue  $\alpha_K$ .

Dieses Verfahren erlaubt die schrittweise Berechnung der durch das Kühlmittel und die Strahlung abgeführten Wärmemenge. Die restliche elektrische Energie ist dann der Betrag, der die Temperaturerhöhung im Stab und in der Hülle bewirkt.

### 5.3 Stoffwerte für $UO_2$ , Helium und St-4401

Die in den Rechnungen benutzten Stoffwerte wurden alle - mit Ausnahme des spezifischen Widerstandes von  $UO_2$  - der Literatur entnommen /127, 134/. Im Falle der Dichte des  $UO_2$  wurde anhand von Literaturdaten bereits früher /106/ eine Gleichung entwickelt und auch in diesem Bericht verwendet.

#### $UO_2$ :

##### 1. Wärmeleitfähigkeit, $\lambda$ [ $\bar{W}/cm K$ ]

Die Wärmeleitfähigkeit von  $UO_2$  mit einer Dichte von 95% der theoretischen Dichte ist gegeben durch die Beziehung

$$\lambda_{95} = 1 / (4 + 2.57 \cdot 10^{-2} T) + 0.73 \cdot 10^{-12} T^3, T \text{ in K.}$$

Der Porositätseinfluß wird erfaßt durch die Beziehung

$$\lambda_p = \lambda_{95} (1 - 2.5 p) / 0.875$$

mit  $p = 1$ -Fraktion der theoretischen Dichte.

2a. Spezifische Wärme,  $c_p$  [ $\bar{\text{J/kg K}}$ ]

$$c_p = \left\{ \frac{k_1 \theta^2 e^{\theta/T}}{T^2 (e^{\theta/T} - 1)^2} + 2k_2 T + \frac{k_3 E_D e^{-E_D/RT}}{RT^2} \right\} k_4 .$$

2b. Enthalpie,  $\Delta H_{298}$  [ $\bar{\text{J/kg}}$ ]

$$1. \quad \Delta H_{298} = \left\{ k_1 \theta \left[ (e^{\theta/T} - 1)^{-1} - (e^{\theta/298} - 1)^{-1} \right] + \right. \\ \left. + k_2 \left[ T^2 - 298^2 \right] + k_3 e^{-E_D/RT} \right\} k_4 , \quad 298 \text{ K} \leq T \leq 3137 \text{ K} .$$

$$2. \quad \Delta H_{298} = (32.457 T - 11154) k_4 , \quad T > 3137 \text{ K} .$$

Mit

$$\begin{aligned} k_1 &= 19.14 \text{ cal/mol K} & \theta &= 535 \text{ K} \\ k_2 &= 7.85 \times 10^{-4} \text{ cal/mol K}^2 & E_D &= 37690 \text{ cal/mol} \\ k_3 &= 5.64 \times 10^{+6} \text{ cal/mol} & R &= 1.987 \text{ cal/mol K} \\ k_4 &= 15.51 \text{ (mit diesem Faktor wurden die Original-Beziehungen} \\ & \text{von cal/mol K auf J/kg K bzw. von cal/mol auf J/kg} \\ & \text{umgerechnet) .} \end{aligned}$$

3. Dichte,  $\gamma$  [ $\bar{\text{g/cm}}^3$ ]

$$3a. \quad \gamma = 10.97 - 3.669 \cdot 10^{-4} (T-273) + 6.657 \cdot 10^{-8} (T-273)^2 - 3.59 \cdot 10^{-11} (T-273)^3 , \\ T \leq 3073 \text{ K} .$$

$$3b. \quad \gamma = 10.97 - 8 \cdot 10^{-4} (T-273) , \quad T > 3073 \text{ K} .$$

4. Expansionskoeffizient,  $a_M$  [ $\bar{\text{cm/cm K}}$ ]

$$a_M = 6.8 \cdot 10^{-6} + 2.9 \cdot 10^{-9} (T-273) , \quad 273 \text{ K} \leq T \leq 3073 \text{ K} .$$

5. Dampfdruck,  $p$  [ $\bar{\text{atm}}$ ]

$$\log p = \frac{31284}{T} + 8.61 , \quad T \leq 3073 \text{ K} .$$

Helium:

1. Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda$  [ $\bar{\text{W/cm K}}$ ]

$$\lambda = 3.624 \cdot 10^{-5} T^{0.66}, \quad T \text{ in K}$$

2. Dyn. Zähigkeit,  $\eta$  [ $\bar{\text{kg/cm s}}$ ]

$$\eta = 46.47 \cdot 10^{-8} T^{0.66}, \quad T \text{ in K}$$

3. Spezifische Wärme,  $c_p$  [ $\bar{\text{J/g K}}$ ]

$$c_p = 5.2$$

4. Prandl-Zahl, Pr

$$\text{Pr} = 0.667$$

Stahl, Werkstoff-Nr. 4401

Bei den Versuchen wurde - wie bereits erwähnt - Incoloy-800 als Hüllenmaterial verwendet. Da jedoch die Incoloy-800 gefundenen Daten nicht den ganzen Temperatur-Bereich erfaßten, wurden für die Rechnung die Stoffdaten von St-4401 verwendet. Beide Materialien sind Stahl auf Ni-Cr-Basis, wobei der Nickel-Gehalt in Gew. % von Incoloy-800 bei 30-35 und von St-4401 bei 11-12.5 liegt. Deren restliche Zusammensetzung ist vergleichbar, so daß man davon ausgehen kann, daß bei thermodynamischen Rechnungen der hierbei gemachte Fehler verschwindend klein ist.

1. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $\bar{\text{W/cm K}}$ ]

$$\lambda = 9.248 \cdot 10^{-2} + 1.571 \cdot 10^{-4} T, \quad T \leq 1700 \text{ K.}$$

2. Dichte  $\gamma$  [ $\bar{\text{g/cm}^3}$ ]

$$\gamma = 8.084 - 4.21 \cdot 10^{-4} T - 3.894 \cdot 10^{-8} T^2, \quad T \leq 1700 \text{ K.}$$



## 6. Experimentelle Ergebnisse

### 6.1 Experimente zum Verhalten von direkt elektrisch beheizten

#### UO<sub>2</sub>-Stäben beim Ausfallen der Helium-Kühlung (LOF-Experimente)

Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Versagenszeiten der Prüflinge und deren Korrelation zu charakteristischen Kenndaten im Hinblick auf eine Extrapolation auf nukleare Verhältnisse. Dementsprechend wurden die Randbedingungen so gewählt, daß der Vergleich zu in-pile-Experimenten sinnvoll erscheint.

Der Versuchsablauf begann mit dem Vorheizen der Prüflinge bis zum gewünschten stationären Zustand. Abb. 6.1 zeigt als Beispiel eine Polycomp-Aufzeichnung des Versuchs Vs.-Nr. 191176 <sup>+)</sup> , woraus man den elektrischen Leistungsverlauf und die

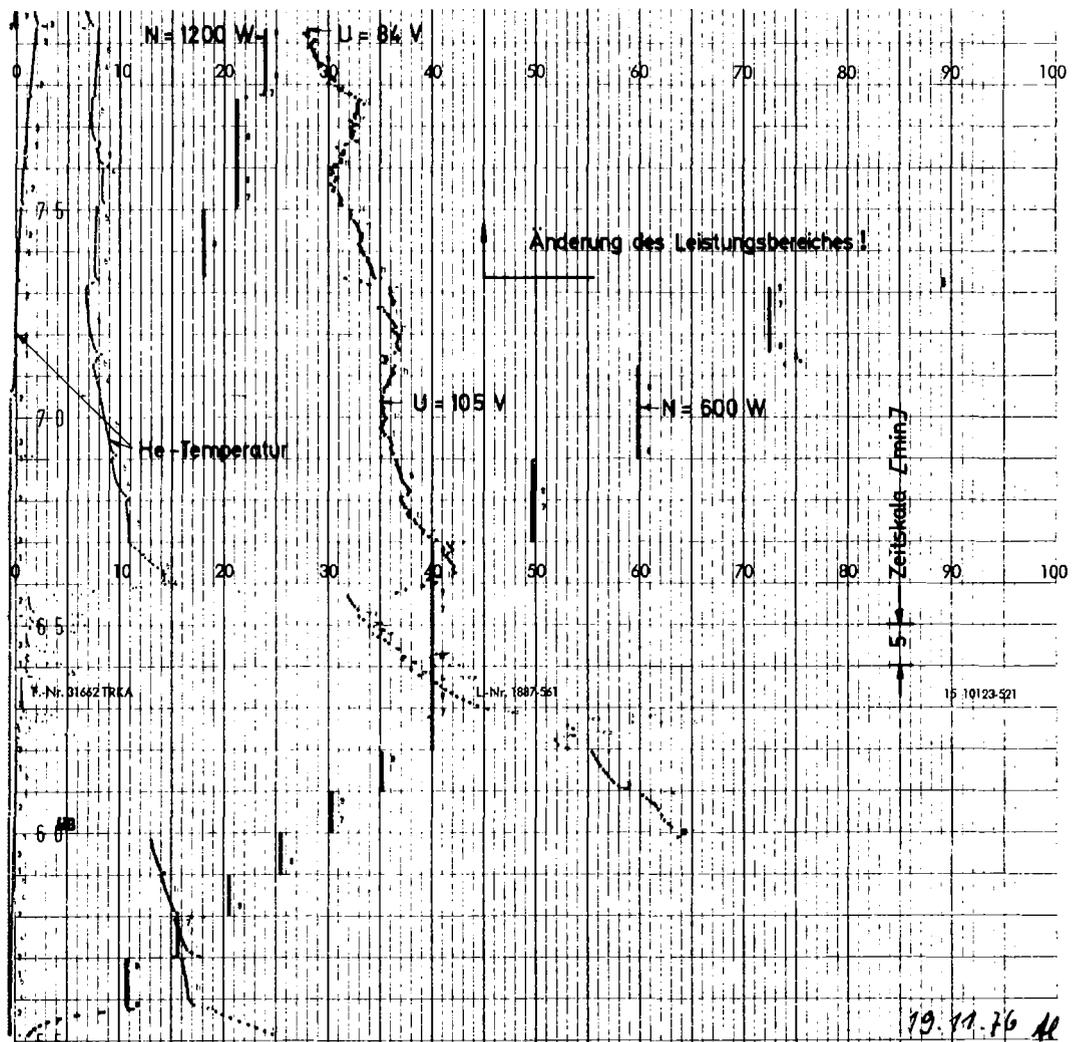


Abb. 6.1 Original-Ausdruck des Polycomp-Schreibers, der den Verlauf der He-Temperatur, der Spannung und der Leistung während des Versuchs Vs.-Nr. 191176 zeigt.

<sup>+)</sup>  Der Versuch 191176 wurde als Demonstrationsversuch ausgewählt und wird im weiteren öfter zitiert.

Spannungsänderung über die gesamte Vorheizzeit bis zur Erreichung der stationären Leistung  $N = 1200 \text{ W}$   $\hat{=} q_e = 15 \text{ kW/m}$  erkennen kann. Die Tabelle 6.1 gibt eine Auskunft über den elektrothermischen stationären Zustand des  $\text{UO}_2$ -Stabes (Ergebnisse des Rechenprogramms VESUV).

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 191176

DER EPRF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONÄREN BETRIEB

SCHRITZAHN	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
PORESITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA	= 1390.8 K	THI	= 883.6 K
THI	= 883.6 K	THA	= 870.0 K
DELTA T	= 507.1 GRAD	DELTA T	= 13.6 GRAD

Tab. 6.1 Daten des  $\text{UO}_2$ -Stabes im stationären Zustand beim Vs.-Nr. 191176

Die Unfallsimulation wird durch das Abschalten der Pumpe zur Förderung des Kühlmittels bei unveränderter Leistung eingeleitet. Gleichzeitig wird eine Reihe von Vorgängen und Funktionen initiiert (vergl. Abschn. 3.3.6), die zum einen den experimentellen Ablauf automatisch steuert und zum anderen die für die Auswertung wichtigen Daten registriert. Durch das Ausfallen der Kühlung (Abb.6.2) bei konstantbleibender Leistung setzt im Stab eine

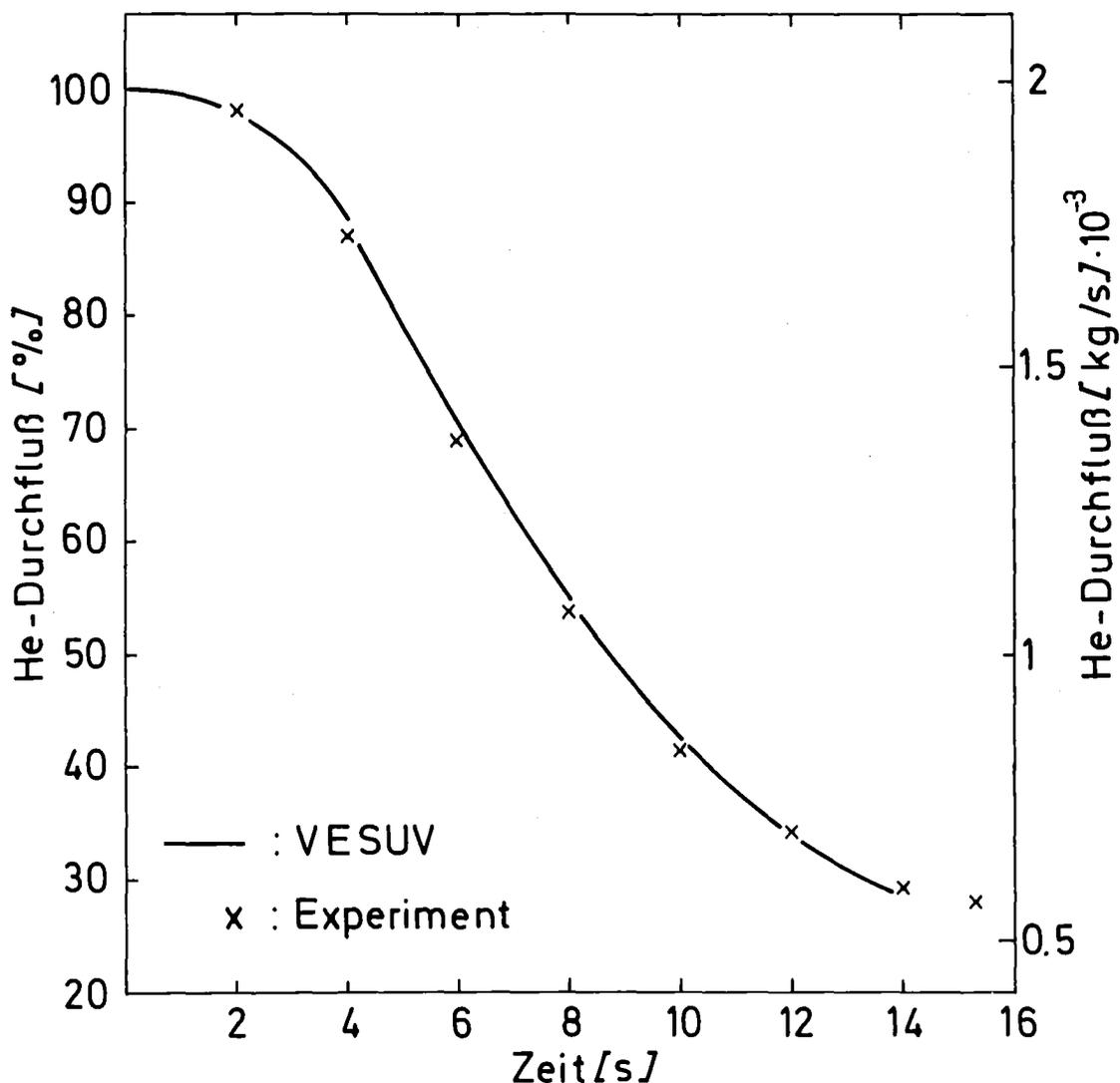


Abb. 6.2 Helium-Durchsatz als Funktion der Zeit. Vergleich zwischen Theorie und Experiment beim Versuch Vs.-Nr. 191176.

Umverteilung der wärmeproduzierenden Stellen ein. Die nach außen hin nicht mehr abgeführte Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung an den äußeren Randzonen und - zunächst - zu einer Temperaturabsenkung in den inneren Stabzonen (Abb.6.3).

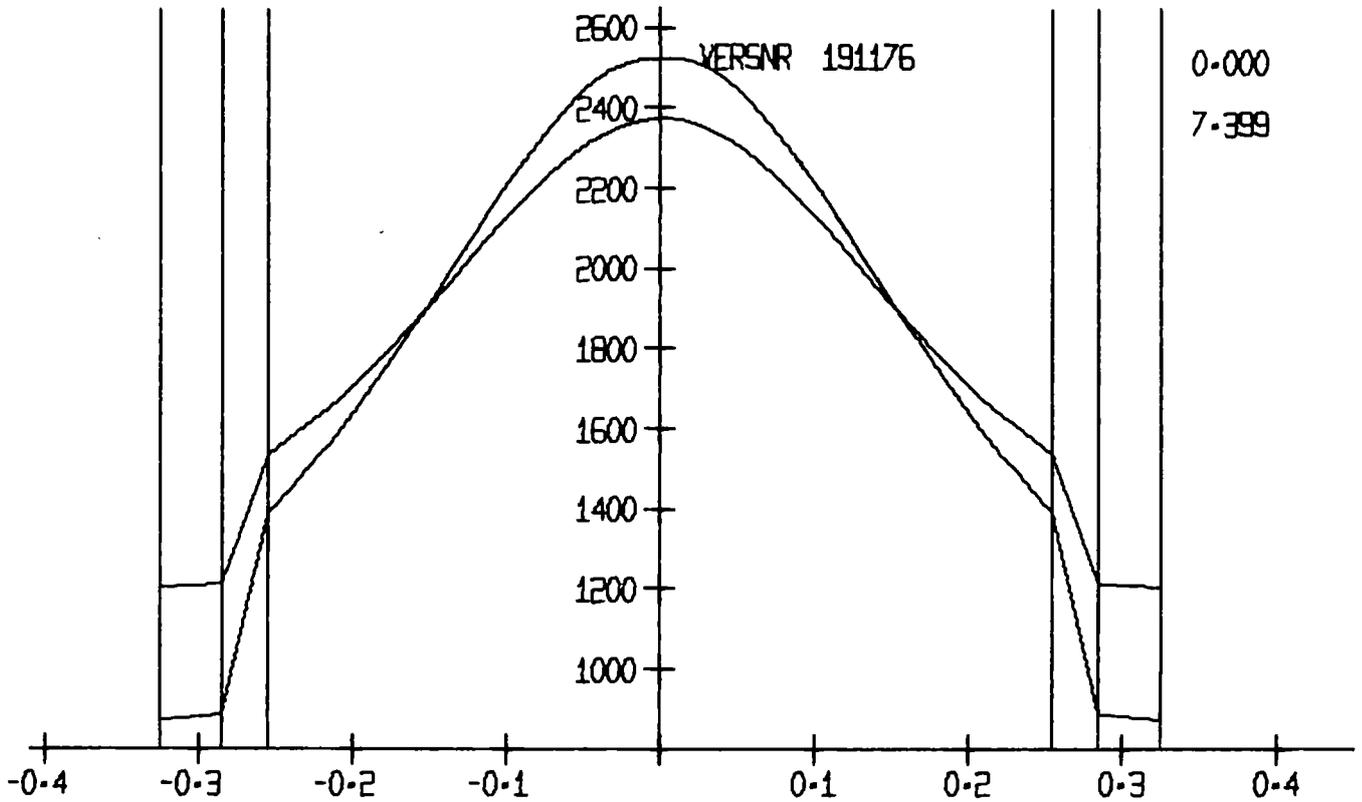


Abb. 6.3 Temperaturverteilung im  $UO_2$ -Stab während des Ablaufs des Versuchs Vs.-Nr. 191176

Eng gekoppelt mit diesen thermodynamischen Vorgängen im Stab sind elektrodynamische Vorgänge im selben. So führt der Temperaturanstieg zu einer Senkung des spezifischen Widerstands des  $\text{UO}_2$  (vgl. Kap. 4) und zu einem höheren Stromdurchgang. Diesen Sachverhalt beantwortet die geregelte Heizanlage mit einer Spannungsreduktion um die Gesamtleistung konstant zu halten (Abb. 6.4).

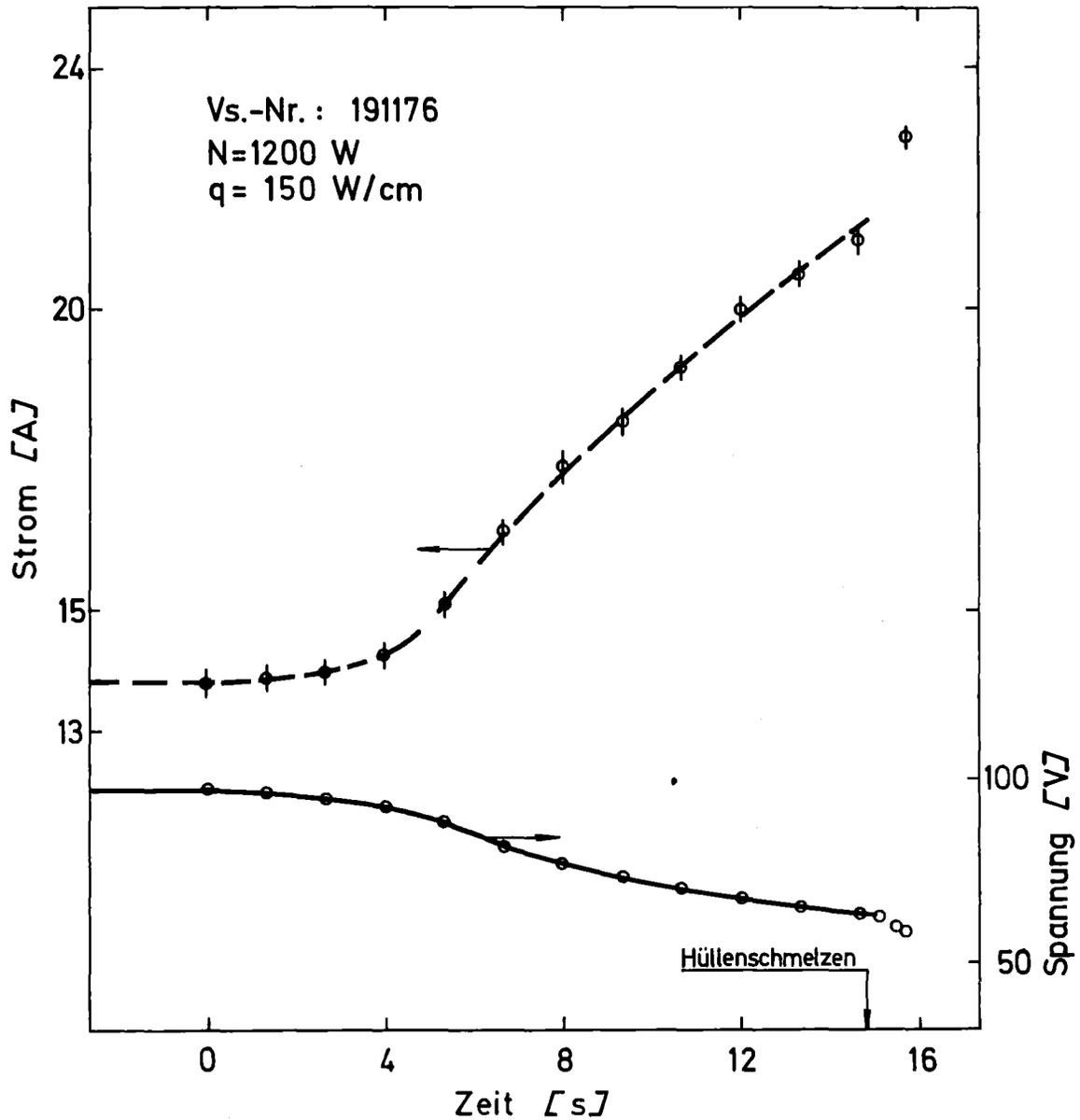


Abb. 6.4 Strom- und Spannungsverlauf bis zum Versagen des  $\text{UO}_2$ -Stabes beim Versuch Vs.-Nr. 191176.

Die weitere Energiezufuhr führt schließlich zum Brennstabversagen durch Hüllenschmelzen. Abb. 6.5 gibt den experimentellen und zum Vergleich auch den theoretischen Temperaturvergleich während des Versuchs wieder.

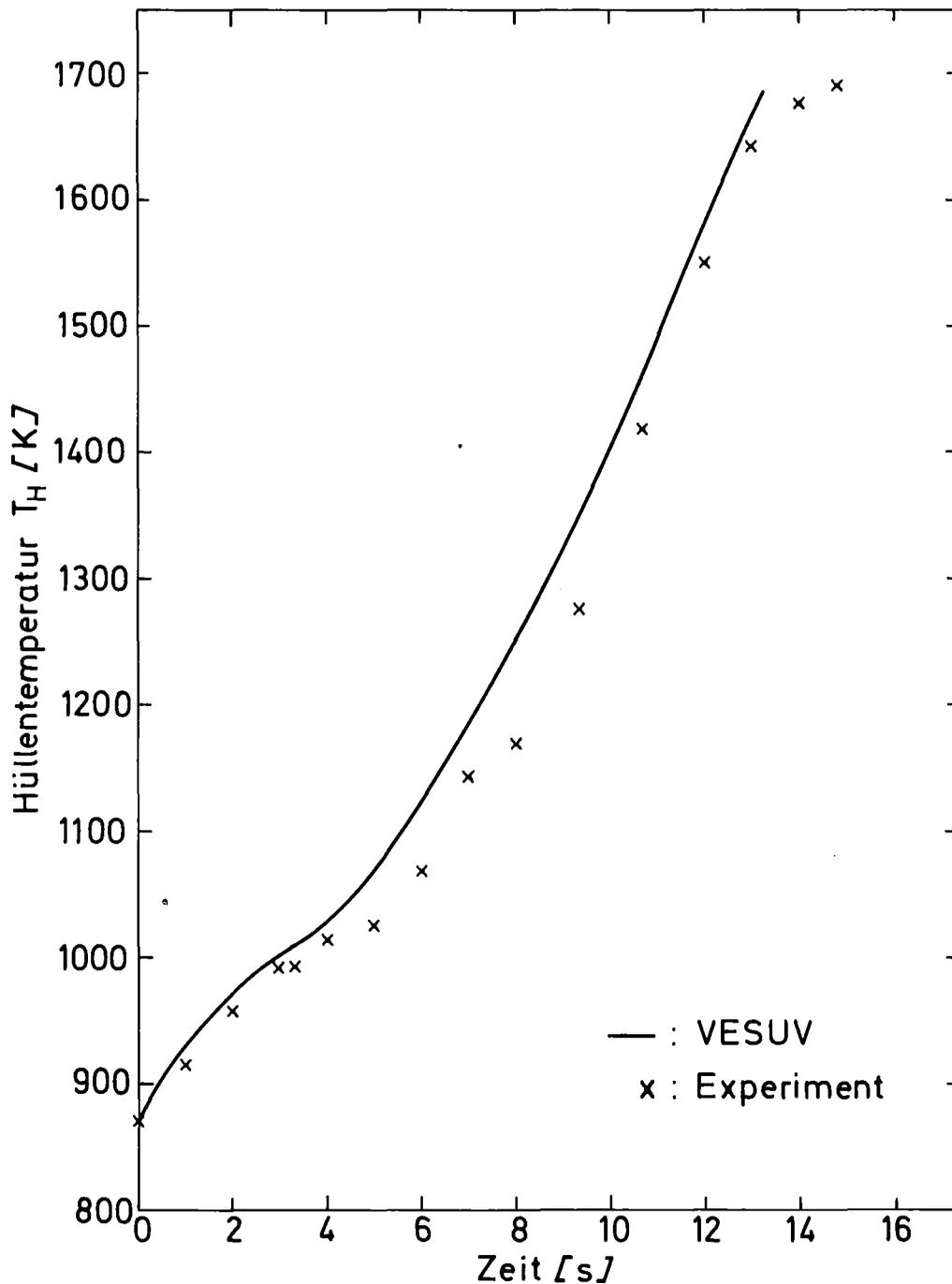


Abb. 6.5 Hüllentemperatur als Funktion der Zeit während des Versuchs Vs.-Nr. 191176. Vergleich Theorie/Experiment.

Schließlich kann man der Tabelle 6.2 und der Abbildung 6.5a Rechenergebnisse des Programms VESUV über alle wichtigen Daten während der Unfallzeit bis zum Versagen entnehmen.

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 191176

ZEIT	PSGES	RGES	TBZ	TBM	TBA	THM	E-TCTAL	HE-AB
/S/	/W/	/O/	/K/	/K/	/K/	/K/	/J/KG/	/%/
0.0	1200.	2.7	2523.	2024.	1391.	877.	550376.	100.0
0.50	1199.	2.9	2502.	2005.	1412.	911.	580541.	99.4
1.00	1199.	3.1	2476.	1990.	1416.	937.	611764.	98.8
1.50	1200.	3.2	2454.	1978.	1419.	956.	644334.	98.2
2.00	1200.	3.4	2436.	1969.	1422.	972.	678046.	96.3
2.50	1200.	3.5	2422.	1963.	1426.	987.	712725.	94.4
3.00	1200.	3.5	2410.	1958.	1430.	1001.	748225.	92.5
3.50	1200.	3.6	2401.	1956.	1435.	1014.	784429.	90.7
4.00	1200.	3.6	2394.	1955.	1440.	1028.	821251.	88.9
4.50	1200.	3.6	2388.	1955.	1447.	1045.	858654.	83.7
5.00	1200.	3.6	2384.	1957.	1456.	1066.	896702.	78.8
5.50	1200.	3.5	2380.	1961.	1468.	1091.	935441.	74.2
6.00	1200.	3.5	2377.	1967.	1483.	1119.	974901.	69.9
6.50	1200.	3.4	2375.	1975.	1500.	1149.	1015104.	65.8
7.00	1200.	3.3	2374.	1985.	1519.	1182.	1056061.	62.0
7.50	1201.	3.2	2373.	1997.	1541.	1217.	1097775.	58.4
8.00	1201.	3.0	2374.	2010.	1565.	1253.	1140236.	55.0
8.50	1201.	2.9	2376.	2026.	1591.	1291.	1183431.	51.8
9.00	1201.	2.7	2380.	2043.	1619.	1330.	1227337.	48.8
9.50	1201.	2.5	2384.	2061.	1649.	1370.	1271931.	45.9
10.00	1201.	2.4	2390.	2082.	1680.	1411.	1317181.	43.2
10.50	1201.	2.2	2398.	2103.	1712.	1453.	1363056.	40.7
11.00	1201.	2.0	2407.	2126.	1746.	1495.	1409520.	38.4
11.50	1201.	1.9	2418.	2149.	1780.	1537.	1456535.	36.1
12.00	1201.	1.7	2430.	2174.	1815.	1579.	1504061.	34.0
12.50	1201.	1.6	2444.	2199.	1850.	1621.	1552057.	32.0
13.00	1201.	1.5	2459.	2225.	1885.	1662.	1600479.	30.2
13.42	1201.	1.4	2473.	2247.	1915.	1696.	1641939.	28.7

Tab. 6.2 Leistung, el. Widerstand, Zentral-, mittlere, Außen- und Hüllentemperatur, Gesamtenergie und Helium-Abnahme beim Vs.-Nr. 191176

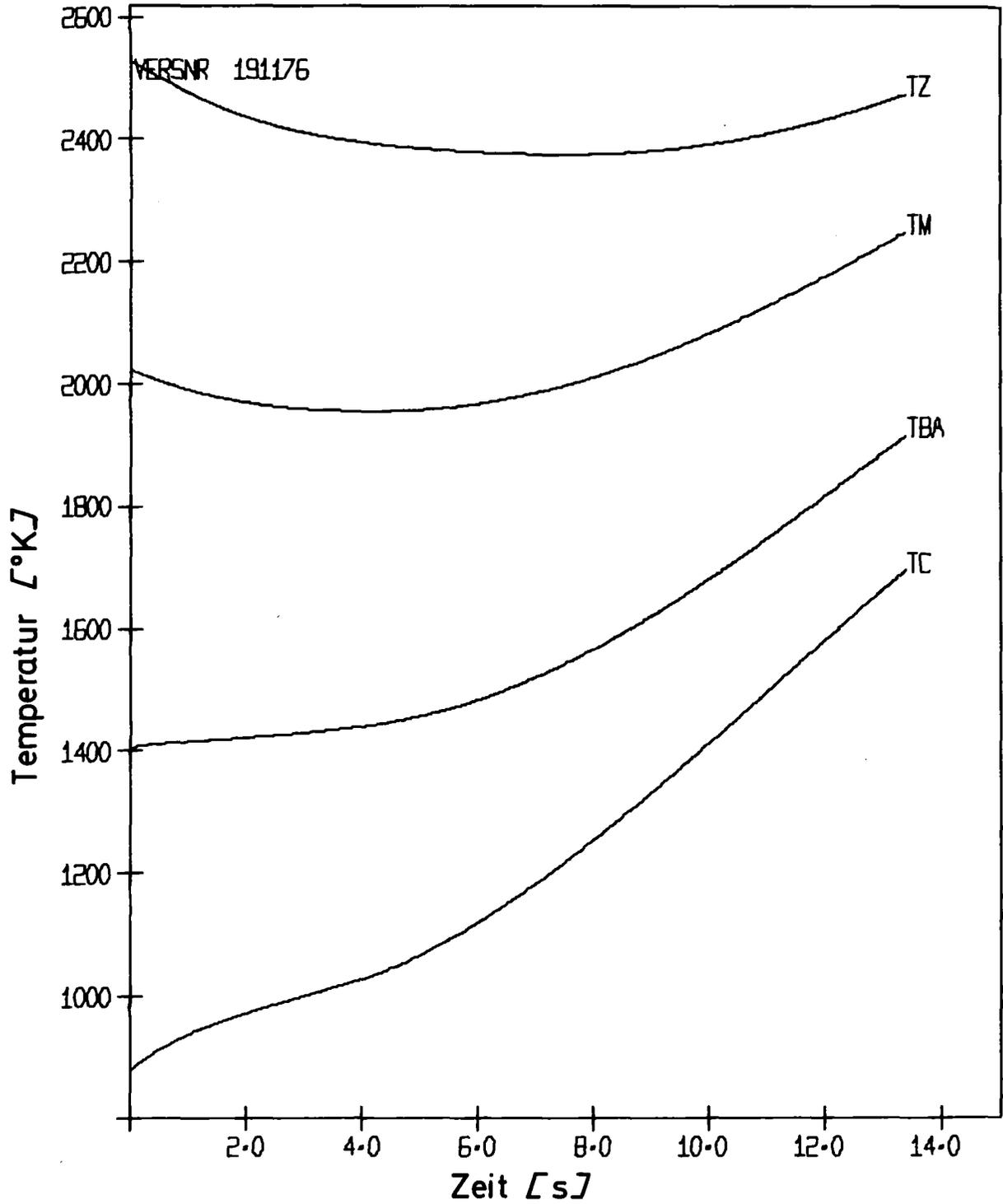


Abb. 6.5a Zeitverlauf der Zentral-, mittleren, Außen- und Hüllentemperaturen des  $UO_2$ -Stabes (TZ, TM, TBA, TC) beim Versuch Vs.-Nr. 191176 (theoretisch).

Ein wichtiger Teil der Auswertung bestand darin, Pellet-Schliffe anzufertigen\*, das Temperaturprofil über das Kornwachstumsspektrum zu ermitteln und dieses Ergebnis mit den Resultaten des Rechenprogramms VESUV zu vergleichen.

Das Kornwachstum beim Rekristallisationsprozeß kann unter Zugrundelegung des allgemeinen Gesetzes

$$D^2 - D_0^2 = k \cdot t^n e^{(-Q/RT)} \quad (6.1)$$

zur Bestimmung der Temperatur des Materials verwendet werden. Im Falle des  $UO_2$  sind jedoch weitaus mehr Restriktionen als sonst üblich bei der Kopplung zwischen theoretischen Gesetzmäßigkeiten und experimenteller Verifikation vorhanden, da bei keramischen Stoffen keine exakte Trennung zwischen Sintern und Kornwachstum erfolgen kann. Zu diesem Problem sei an dieser Stelle lediglich auf weiterführende Literatur /135,136/ hingewiesen.

Bei den eigenen Rechnungen wurden folgende Angaben verwendet:

Anfangskorngröße, $D_0$	= 5.58 $\mu$
Konstante, k	= $10^9$
Konstante, n	= 0.86
Aktivierungsenergie, Q	= 57500 cal/Mol
Gaskonstante, R	= 1.987 cal/K · Mol
Zeit, t	= Minuten

Die Bestimmung von  $D = f(T)$  geschah auf der Basis des Programms ASTM 8509/797\*\*. Nach den Vorschriften von ASTM-Standard E 19-46 bzw. den zugeordneten Nachfolgeblättern der ASTM und des VDEh\*\*\* ist die Anzahl der Körner im Quadratinch bei 100facher Vergrößerung gegeben durch

$$Z_N = 2^{N-1} \quad (6.2)$$

---

\* Die Schliffe wurden in der Abteilung RBT/HZ des Kernforschungszentrums Karlsruhe angefertigt.

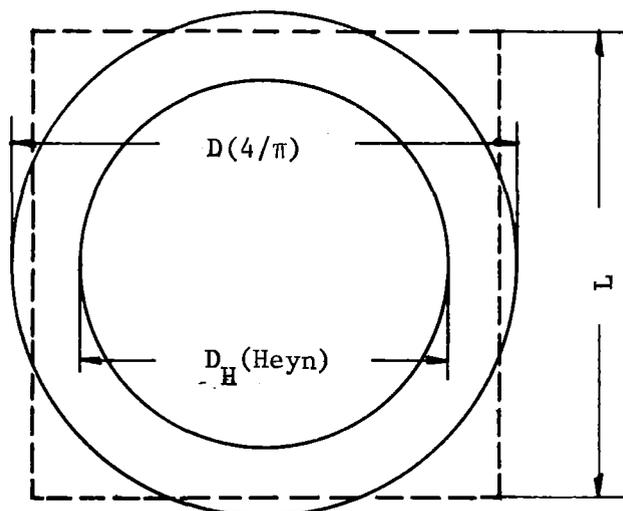
\*\* ASTM: American Society for Testing Materials, 1936 Race Street, Philadelphia 3, Pa

\*\*\* VDEh: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 4000 Düsseldorf 1, Breite Str. 10

Die ASTM-Kennziffer N wiederum ist mit der Länge L bzw. mit dem Durchmesser  $D_H$  (sog. Heyn-Durchmesser) wie folgt gekoppelt (vgl. dazu auch die Skizze):

$$N = 16.98 - 6.64 \lg L \quad (6.3)$$

bzw.  $N = 16.63 - 6.64 \lg D_H \quad (6.4)$



Auf der Basis der Gleichungen 6.1 und 6.4 lassen sich nun die Temperaturprofile aufgrund der Schliffe ermitteln und mit den Rechenergebnissen vergleichen. Tabelle 6.3 zeigt diesen Vergleich für den Versuch Vs.-Nr. 191176.

Probe-Nr. 44A-191176-0-1-3a

14.12.1976

Pos.	ASTM-gem.	ASTM-korr.	$D(L) \sqrt{\text{my}}$	Temp. $\sqrt{\text{K}}$
1	10.10	11.89	5.85	1396.68
2	10.00	11.75	6.13	1442.68
3	9.60	11.21	7.40	1566.57
4	8.20	9.32	14.24	1790.39
5	6.20	6.62	36.33	2071.76
6	5.90	6.22	41.81	2136.92
7	3.80	3.38	117.09	2528.85
8	7.10	7.84	23.84	1941.13
9	7.20	7.97	22.75	1926.57
10	9.00	10.40	9.79	1787.13
11	9.40	10.94	8.12	1607.15
12	10.10	11.89	5.85	1396.15

$D_0 = 5.58 \text{ my}$  ,  $t = 40 \text{ min}$  ,  $Q = 57500 \text{ cal/mol}$

Tab. 6.3 Protokoll-Auszug zur Berechnung des Temperaturprofils im Stab aus dem Heyn-Durchmesser ( Versuch Vs.-Nr. 191176).

Abb. 6.6 zeigt den Pellet-Schliff und die Temperaturprofile, errechnet zum einen mit VESUV und zum anderen über das Kornwachstum. Die Übereinstimmung kann als gut bezeichnet werden.

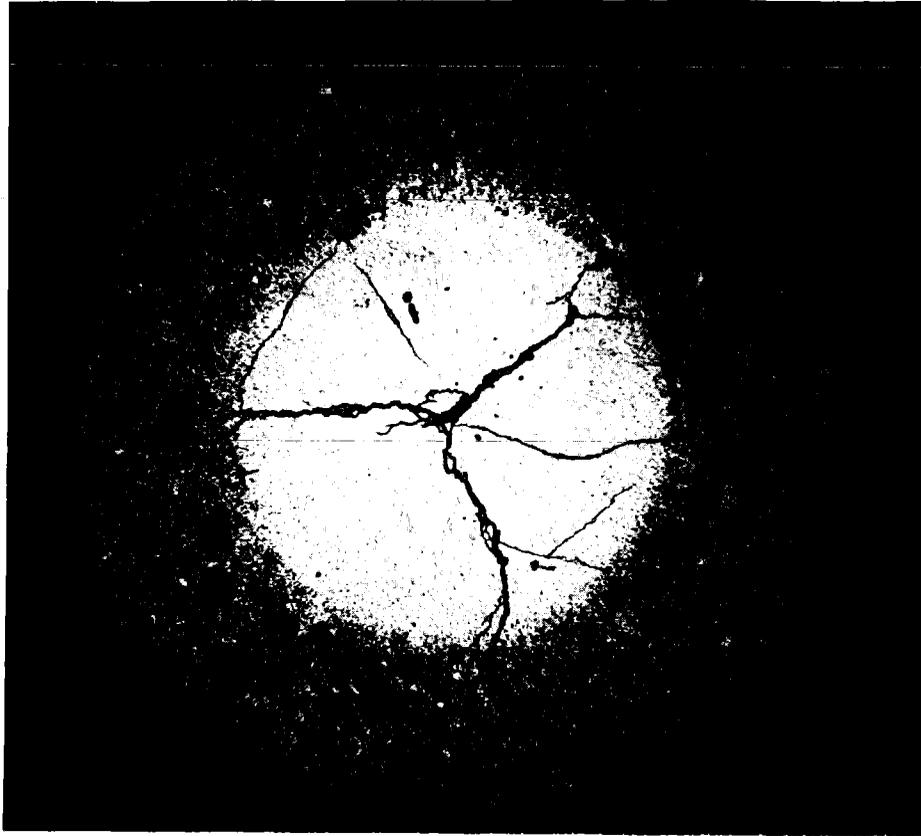
Auf der Basis der bisherigen Ausführungen wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, wobei die elektrisch aufgeprägte Stabileistung variiert wurde. Als Folge dessen mußte der Kühlmittelfluß entsprechend geändert werden, damit die Hüllen-Außentemperatur stets den gleichen Wert (870 K) erreichte. Daten der Experimente kann man der Tabelle 6.4 (alle LOF's) entnehmen.

Versuchsnummer	$q_e$ [kW/m]	$q_n$ [kW/m]	$T_{BZ}$ [K]	$T_{HA}$ [K]	$t_{v,th}$ [s]	$t_{v,ex}$ [s]	$\dot{D}$ [g/s]	$\dot{D}_R$ [%/s]	E [J/g]
270876	10.0	23.1	2020	870	19.23	19.8	1.16	12	720
240876	12.5	29.4	2292	870	16.11	16.8	1.55	12	743
190876	13.75	32.1	2412	870	14.74	14.3	1.75	12	750
280676	15.0	34.5	2522	870	13.42	14.6	1.96	12	752
230376	16.25	36.4	2629	870	12.16	11.7	2.17	12	754
180376	17.5	38.4	2716	870	10.96	10.5	2.38	12	756
020276	18.75	40.8	2811	870	9.92	10	2.60	12	764
021275	20	42.9	2892	870	8.96	9.5	2.82	12	775
141175	22	46.4	3021	870	7.63	7.2	3.18	12	802

1) = gemessen ( $\pm 1\%$ )  
 2) = errechnet  
 \*) = High-speed-Kinematographie-Auswertung

Tab. 6.4 : Übersicht über alle LOF-Experimente

Das auf der Tabelle 6.4 auffallende Ergebnis ist zunächst die Abhängigkeit zwischen der Versagenszeit und der Anfangsstabileistung. Dieser Zusammenhang ist noch deutlicher auf der Abb. 6.7 zu sehen, auf der man gleichzeitig die experimentellen Resultate mit den theoretischen Ergebnissen des Rechenprogramms VESUV vergleichen kann.



HZ-44A-19.11.6.-1/3 20x

1 mm

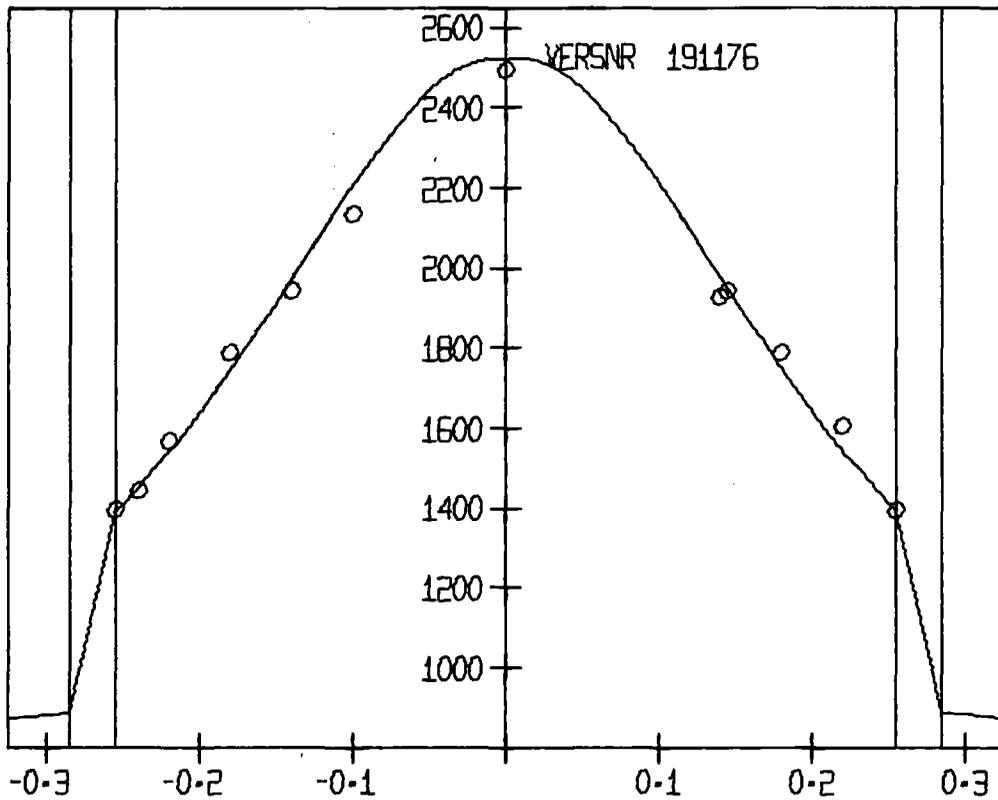


Abb. 6.6 TEMPERATURVERTEILUNG IM STAB- VERGLEICH MIT METALLURGIE

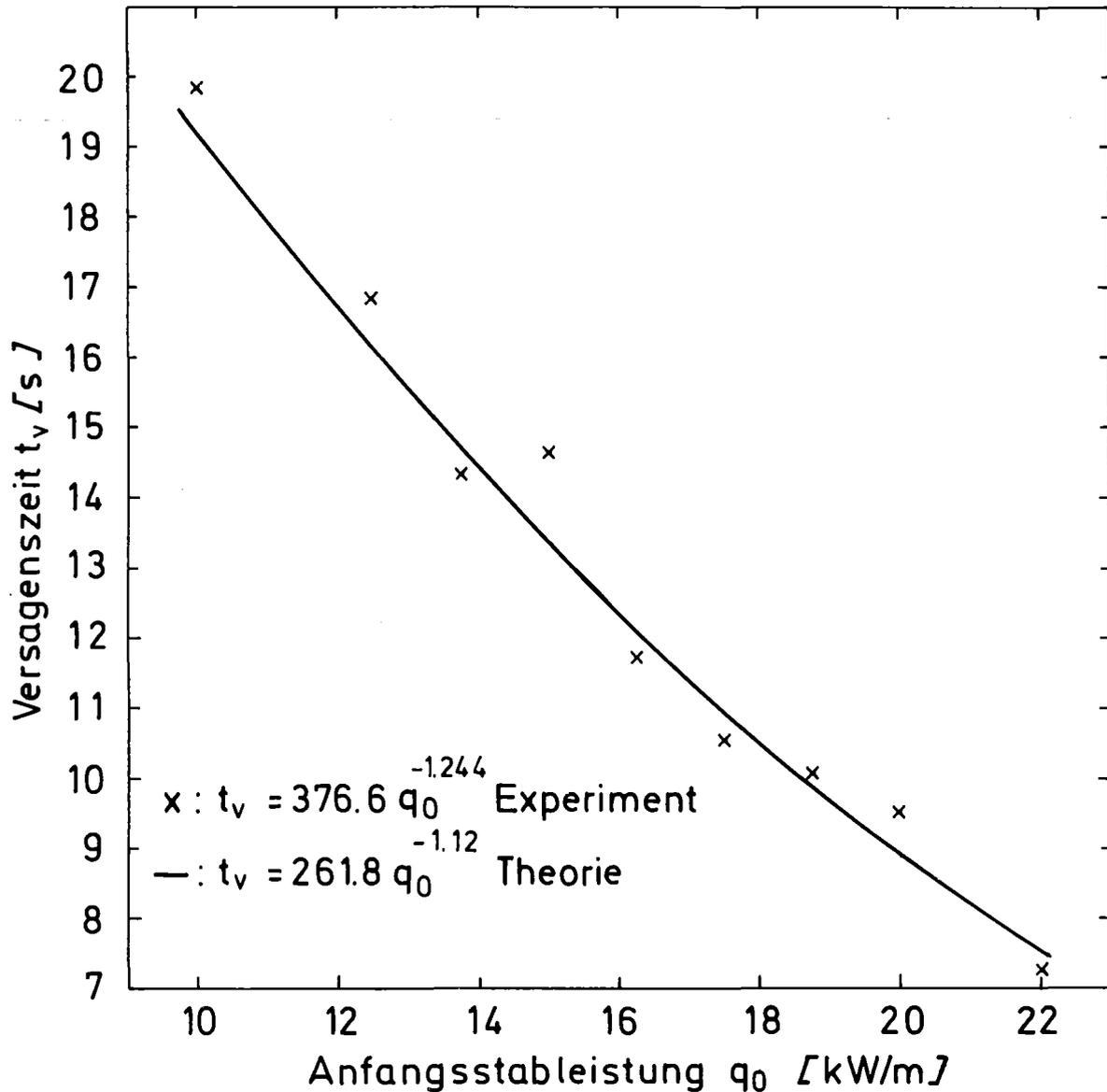


Abb. 6.7 Korrelation zwischen der Versagenszeit und der Anfangsstableistung. Vergleich der experimentellen und der theoretischen Resultate für alle LOF - Experimente.

Aufgrund dieser Ergebnisse läßt sich ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Versagenszeit und der Anfangsstableistung ermitteln. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ergibt sich für die LOF-Experimente im untersuchten Bereich folgende Beziehung :

$$t_{v,exp} = 376.6 q_{e,o}^{-1.244} \quad t \text{ in s, } q \text{ in kW/m} \quad (6.5)$$

mit einer mittleren Abweichung von  $\pm 7.5 \%$ .

Die theoretischen Resultate (VESUV) lassen sich unter der Annahme einer Kühlmittelreduktion von

$$D_R = 12 \text{ \%}/s$$

und bei Anwendung der gleichen Rechenmethode über die Beziehung

$$t_{v,th} = 261,8 q_{n,o}^{-1.12} \quad t \text{ in s, } q_{n,o} \text{ in kW/m} \quad (6.6)$$

wiedergeben.

Ein weiteres Resultat der LOF-Experimente ist die Erkenntnis, daß selbst bei thermisch hochbelasteten Brennstäben die Schmelztemperatur des  $UO_2$  erst nach dem Beginn des Hüllenschmelzens hätte erreicht werden können. Allerdings konnte dieser Gesichtspunkt bei den EPBF-Versuchen nicht nachgebildet werden, da die Experimente mit dem Beginn des Hüllenschmelzens als beendet angesehen wurden. Ein Blick auf Tab. 6.4 läßt erkennen, daß auch theoretisch kein Brennstoffschmelzen auftreten könnte: die letzte Spalte gibt die dem Brennstoff allein zugeführte Energie (Gesamtenergie abzüglich den Beträgen, die auf das Kühlmittel bzw. die Aufheizung der Hülle bis zum Schmelzpunkt entfallen). Vergleicht man die Zahlen mit der zum Schmelzen eines Gramms  $UO_2$  notwendigen Energie,

$$E_{Sch} = 1412.51 \text{ J/g} ,$$

so erkennt man sofort, daß bei homogener Energiezufuhr kein Schmelzen auftreten könnte. In der Tat war die Wärmequellldichte bzw. die Temperaturverteilung nicht homogen, jedoch weitgehend so flach, daß selbst in den heißeren Brennstabzonen der Betrag von 1412.51 J/g nicht erreicht wurde. Auf der Abb. 6.8 sind Panorama-Aufnahmen aus Schliffen von Versuch Vs.-Nr.191176, die das Kornwachstum deutlich erkennen lassen und zeigen, daß es nicht zum Schmelzen kam.

Ein weitaus wichtigeres Ergebnis aus den LOF-Versuchen konnte aus der Auswertung der Hochgeschwindigkeitsfilme gewonnen werden und betrifft die Art des Hüllenschmelzens. Bei allen LOF-Experimenten verlief der Schmelzprozeß anders als man aufgrund von Modellvorstellungen /91, 92,93/ hätte erwarten sollen. Es konnte beobachtet werden, daß nach dem Einsetzen des

Schmelzens auf einer Stelle der Hüllen-Oberfläche die Schmelzfront sich unsystematisch nach allen Seiten hin ausbreitete und gleichzeitig das geschmolzene Material in sich zusammenfiel und nach unten lief. Jedoch verlief dieser Prozeß nicht zylindersymmetrisch sondern in einer Art, die sich durch die bisherigen Modellvorstellungen nicht abdecken läßt. Außer dem am meisten vorgekommenen Fall (Abb. 6.9, 6.10) gab es mitunter rechteigenwillige Endzustände zu sehen (Abb. 6.11, 6.12).

Ein weiterer Punkt, der es in diesem Zusammenhang verdient erwähnt zu werden sind die Beobachtungen hinsichtlich des Verbleibens des geschmolzenen Hüllenmaterials. Im allgemeinen sammelte sich das Meiste am unteren Stabende und erstarrte wieder dort. Es konnten jedoch auch Fälle beobachtet werden, bei denen sich das geschmolzene Hüllenmaterial direkt auf der Brennstoffoberfläche wieder verfestigte (Abb. 6.9, 6.10).

Eine Zusammenfassung und Dokumentation aller LOF-Ergebnisse findet sich im Anhang 1.



Abb. 6.8 Teilvergrößerung des Schliffes aus Abb. 6.6

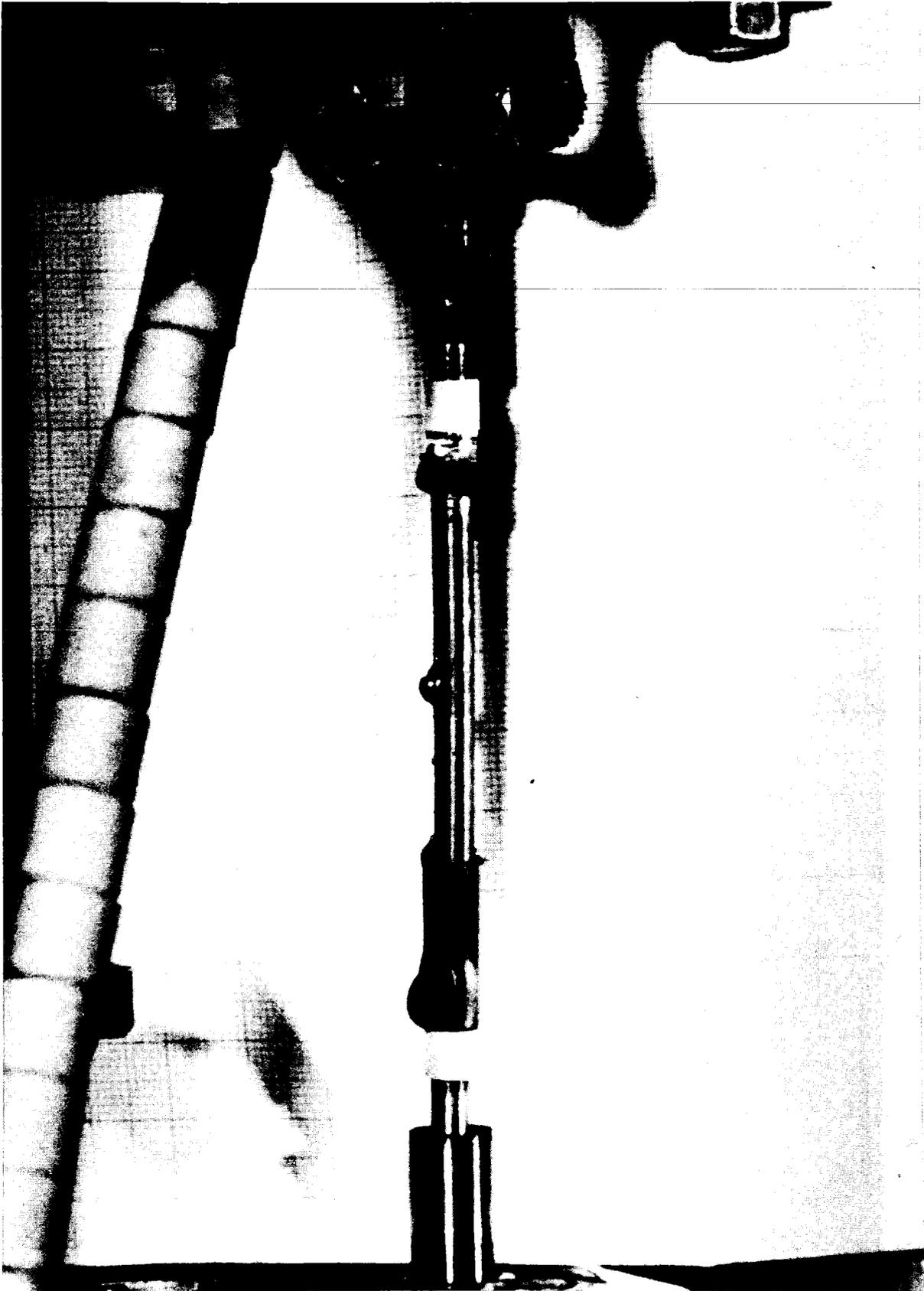


Abb. 6.9 Der  $\text{UO}_2$ -Brennstab nach dem LOF-Versuch Vs.-Nr. 191176

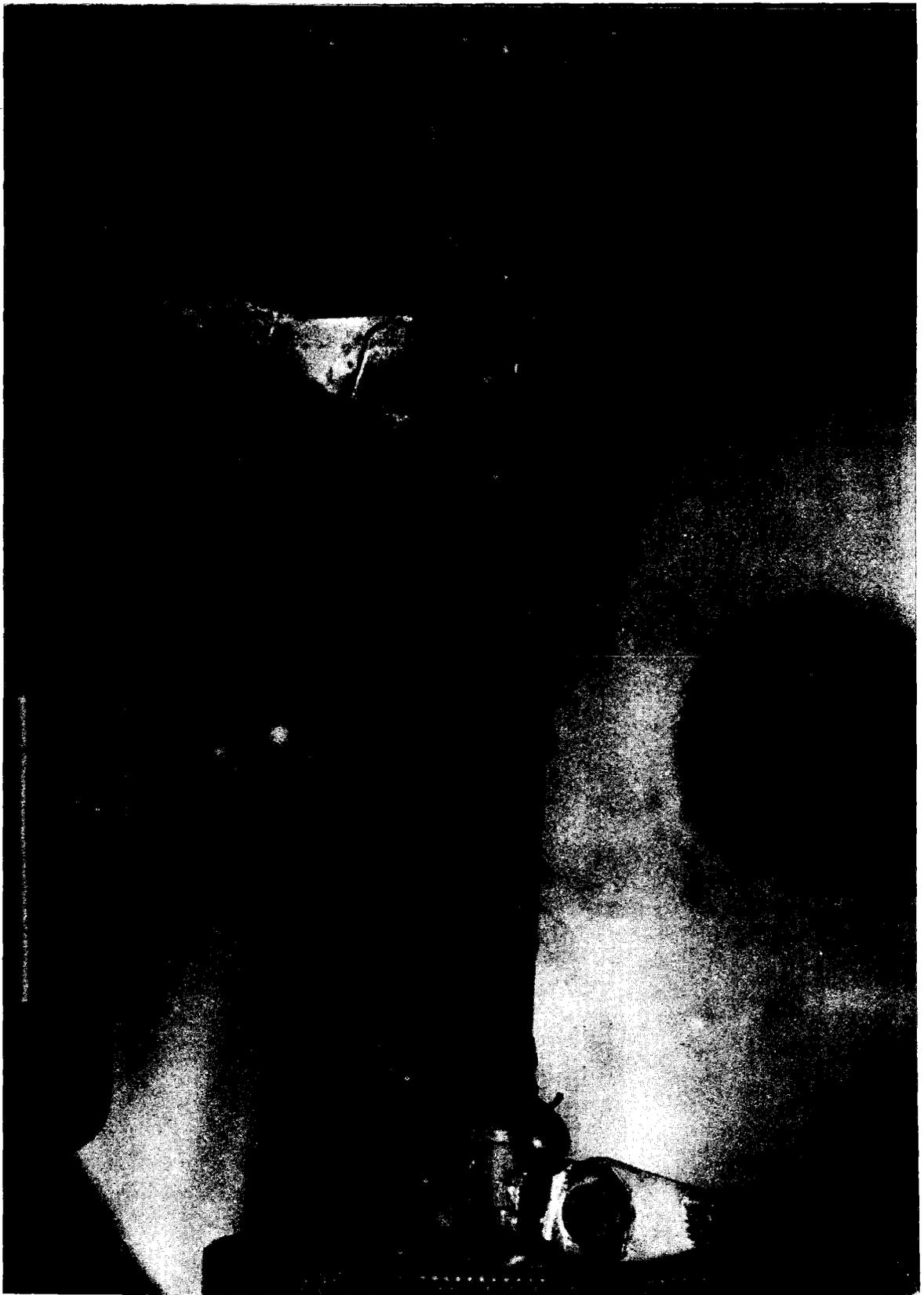


Abb. 6.10 Der  $\text{UO}_2$ -Brennstab nach dem Versuch K-25 /106/.

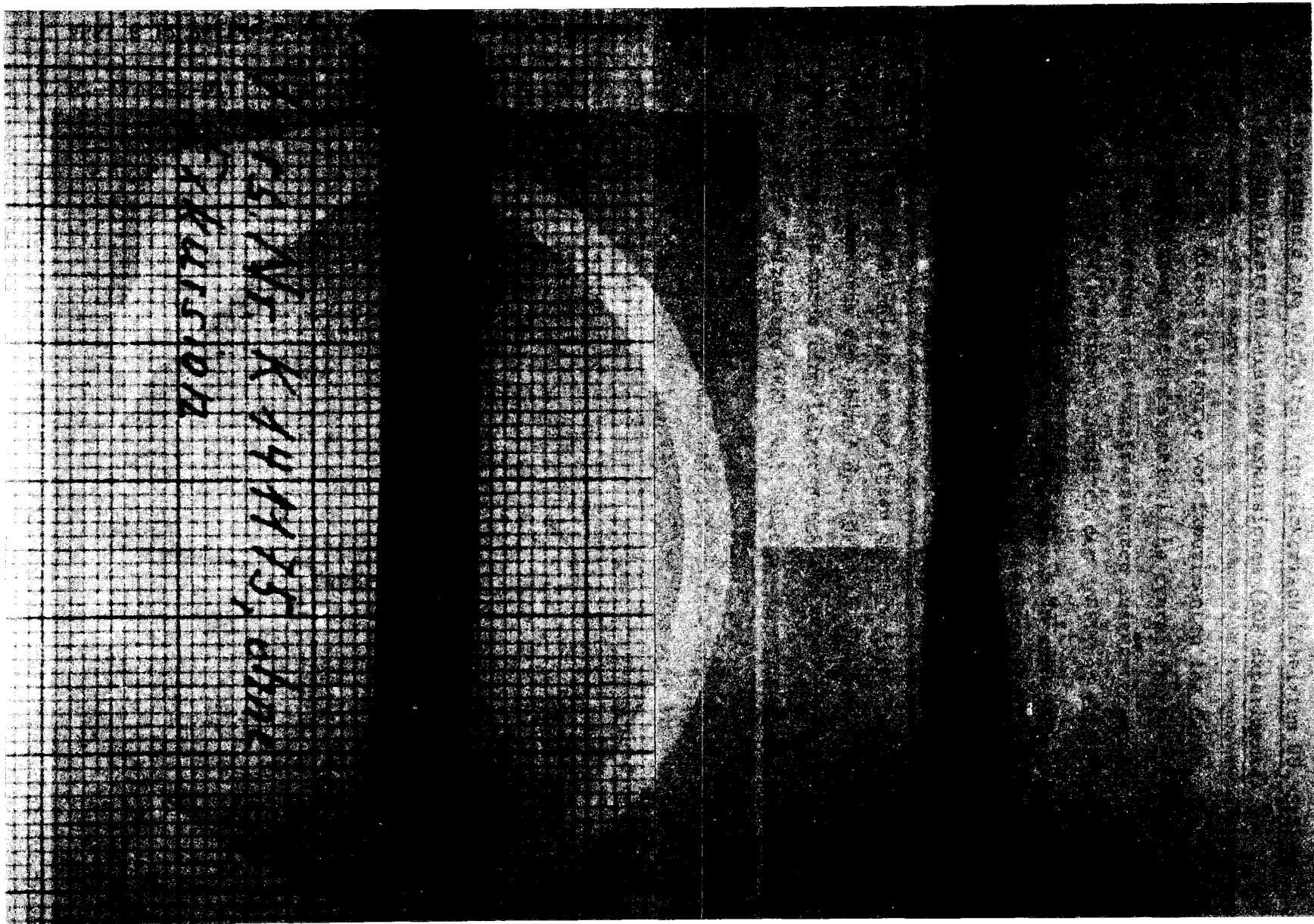
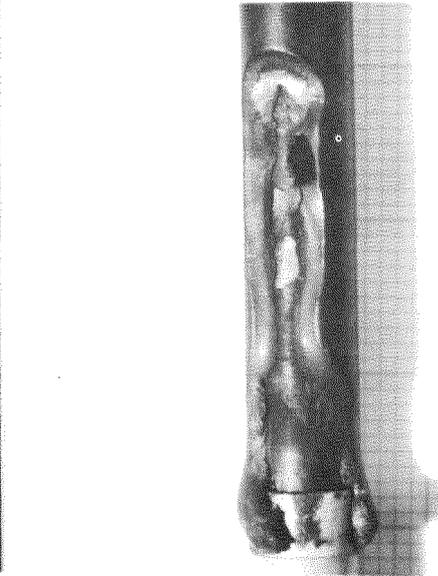
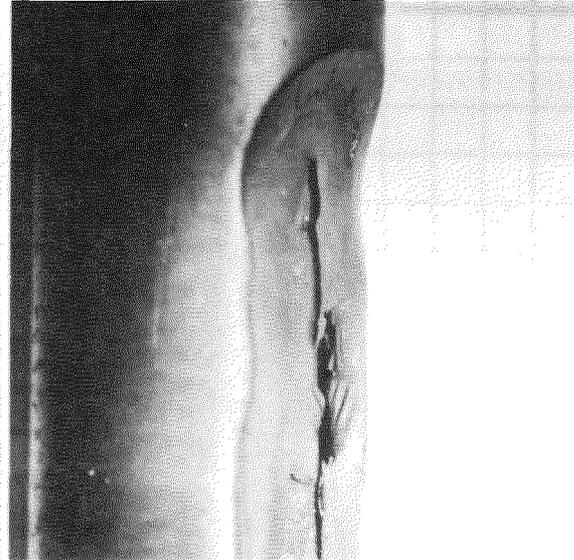
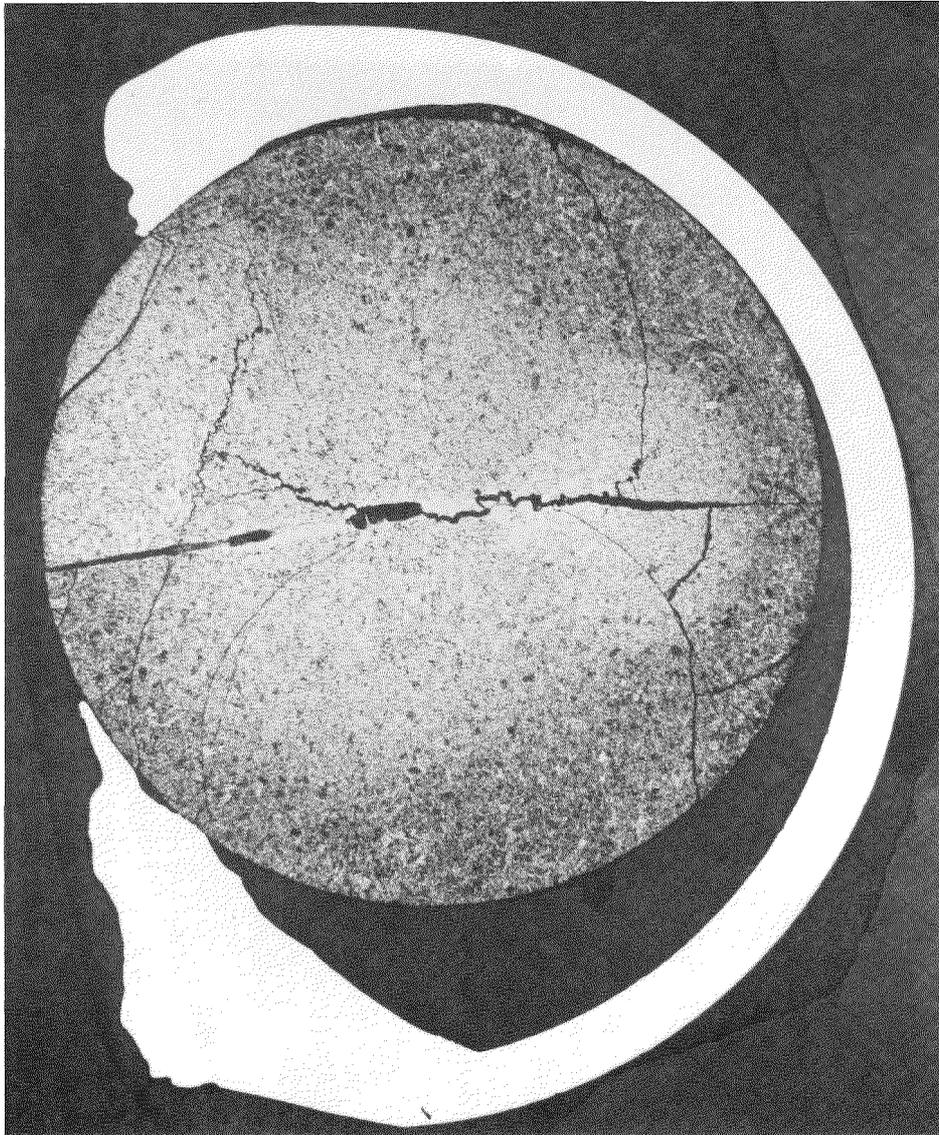


Abb. 6.11 UO<sub>2</sub>-Brennstäbe nach den LOF-Versuchen Vs.-Nr. 141175 (links) und Vs.-Nr. 280676 (rechts)



HZ-44A-0-1-6/1 20 x geätzt

Abb. 6.12 Pellet-Schliff und Brennstab-Aufnahmen nach dem LOF-Versuch Vs.-Nr. 270876.

## 6.2 Experimente zum Verhalten von elektrisch beheizten UO<sub>2</sub>-Stäben bei applizierten Leistungsexkursionen (TOP-Experimente)

Das Hauptziel dieser Kategorie von Experimenten lag darin, die Versagenszeiten von Prüflingen, die unterschiedliche thermische Zustände aufwiesen und variabel ablaufenden Leistungstransienten ausgesetzt wurden, zu ermitteln und mit charakteristischen Kenndaten der Prüflinge zu korrelieren. Entsprechend der Durchführung der LOF-Experimente war man auch bei den TOP-Experimenten stets darauf bedacht, die Randbedingungen so zu gestalten, daß eine Extrapolation bzw. ein Vergleich der Ergebnisse mit in-pile-Experimenten zulässig erscheint.

Der Versuchsablauf glich in der Phase bis zum Erreichen des gewünschten stationären Zustands dem Ablauf der LOF-Experimente. Die sich anschließende Exkursionsphase wurde eingeleitet durch Entkopplung des Prüflings von der "geregelten" Heizanlage (EHA, vgl. Abschn. 4.2.3.2) und dessen Anschließen an die Exkursionsanlage (EA). Durch diesen Vorgang wird an den Brennstab eine höhere Spannung angelegt und gleichzeitig wird die Leistung nicht mehr geregelt. Der Leistungsanstieg wurde bestimmt durch die vorgewählte Spannung an der EA und durch den aktuellen thermischen Zustand der Probe zum Zeitpunkt der Kopplung. Der vorwählbare Spannungsbereich lag zwischen 58 V - 388 V. Die "Totzeit" zwischen Entkopplung von der EHA und Anschließen an die EA lag - konstruktionsbedingt" - zwischen 0.635 s und 0.825 s.

Die durch diese Methode erzielten experimentellen Ergebnisse lassen sich hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs des Leistungsanstiegs ausnahmslos durch Exponentialfunktionen der Art

$$N = N_0 e^{\omega t} \quad (6.7)$$

recht gut wiedergeben. Dieses Ergebnis führte dazu, die Größe

$$\tau = \frac{1}{\omega} \quad (6.7a)$$

als die Zeitkonstante des Leistungsanstiegs zu definieren, wodurch man eine gute Basis für Vergleiche mit in-pile-Experimenten hat. Dieses so definierte  $\tau$  stellt in der Reaktordynamik die sog. Reaktorperiode dar, eine Größe, die sehr oft zur Charakterisierung des Leistungsanstiegs bei "transient-overpower"-Experimenten verwendet wird.

In der Tat läßt sich auf der Basis der punktkinetischen Gleichung und unter Berücksichtigung der verzögerten Neutronen die Reaktivität, für die definitionsgemäß

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad \overline{[\beta]} \quad (6.8)$$

gilt, umschreiben. Das Ergebnis, wohlbekannt als Reaktivitätsgleichung, lautet für alle 6 Neutronengruppen

$$\rho = \frac{\omega \ell_p}{1 + \omega \ell_p} + \frac{\omega}{1 + \omega \ell_p} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\omega + \lambda_i} \quad (6.9)$$

mit

$$\frac{1}{\omega} = \tau$$

$\ell_p$  = Neutronenlebensdauer

$\beta_i$  = Fraktion der verzögerten Neutronen der i-ten Gruppe

$\lambda_i$  = Halbwertszeit der Neutronen der i-ten Gruppe

Für schnelle Neutronen liegt  $\ell_p$  in der Größenordnung von  $\sim 10^{-7}$  s, so daß sich Gl. 6.9 für schnelle Reaktoren vereinfachen läßt. Es gilt dann:

$$\rho = \omega \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\omega + \lambda_i} \quad \overline{[\beta]} \quad (6.10)$$

Läßt man in einen Reaktor einen linearen, positiven Reaktivitätsbeitrag, eine sogenannte Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$

$$\rho(t) = \rho_0 + \dot{\rho} t \quad \overline{[\beta]} \quad (6.11)$$

einlaufen, so gilt für den Zusammenhang zwischen  $\dot{\rho}$  und der dadurch erwirkenden Reaktorperiode  $\tau$  folgender Zusammenhang /138/:

$$\dot{\rho} = \frac{\ell_p}{\tau} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \tau} - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i e^{-t(\lambda_i + 1)/\tau}}{1 + \lambda_i \tau} \quad \overline{[\beta/s]} \quad (6.12)$$

Ein übersichtlicheres Bild dieser Zuordnung erhält man aus Abb. 6.13, auf der eine Reihe von in-pile-Experimenten (TREAT - Series) mit Angaben über  $\dot{\rho}$  und  $\tau$  zusammengefaßt wurden.

Die mathematische Auswertung der experimentellen Ergebnisse mit der Methode der kleinsten Quadrate liefert als Ergebnis für den Zusammenhang zwischen  $\dot{\rho}$  und  $\tau$  folgende Beziehung:

$$\dot{\rho} = 193 \cdot \tau^{-0.85} \text{ \$/s, } \tau \text{ in ms.} \quad (6.13)$$

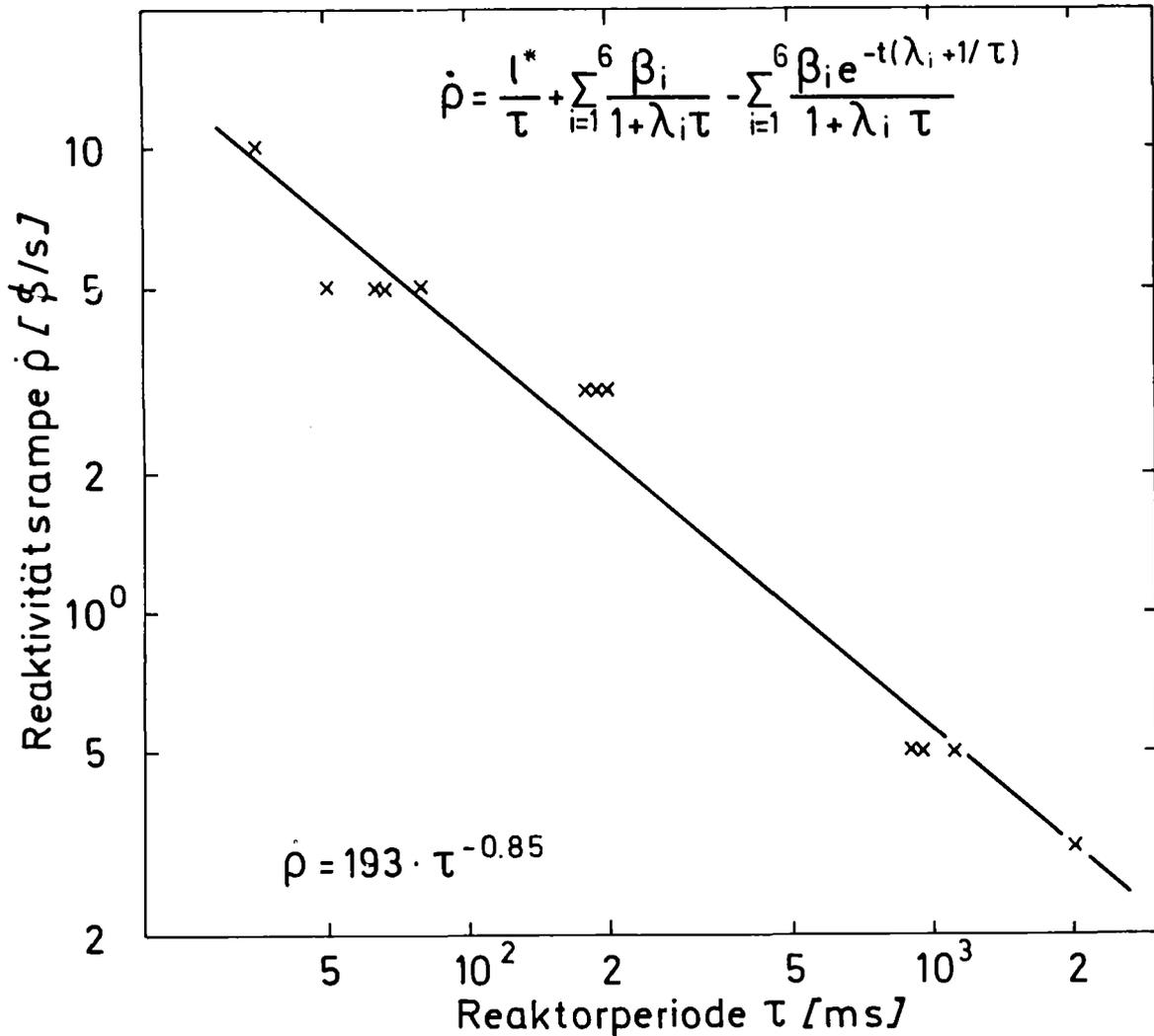


Abb. 6.13 Korrelation zwischen Reaktivitätsrampe und Reaktorperiode für eine Reihe von in-pile-Experimenten (TREAT H-,E-Series)

Auf der Basis dieser Vergleiche zwischen in-pile-Experimente wurden die eigenen Experimente aufgebaut. Sie wurden so durchgeführt, daß die erzielten Zeitkonstanten bzw. Zeit - Leistungs - Verläufe ein breites Spektrum der in-pile-Experimente abgedeckt haben. Dies wird auf der Abb. 6.14 verdeutlicht. In der Abbildung zeigt der schraffierte Bereich das Spektrum der eigenen Experimente aufgetragen in der einheitlichen Form "Normierte Leistung als

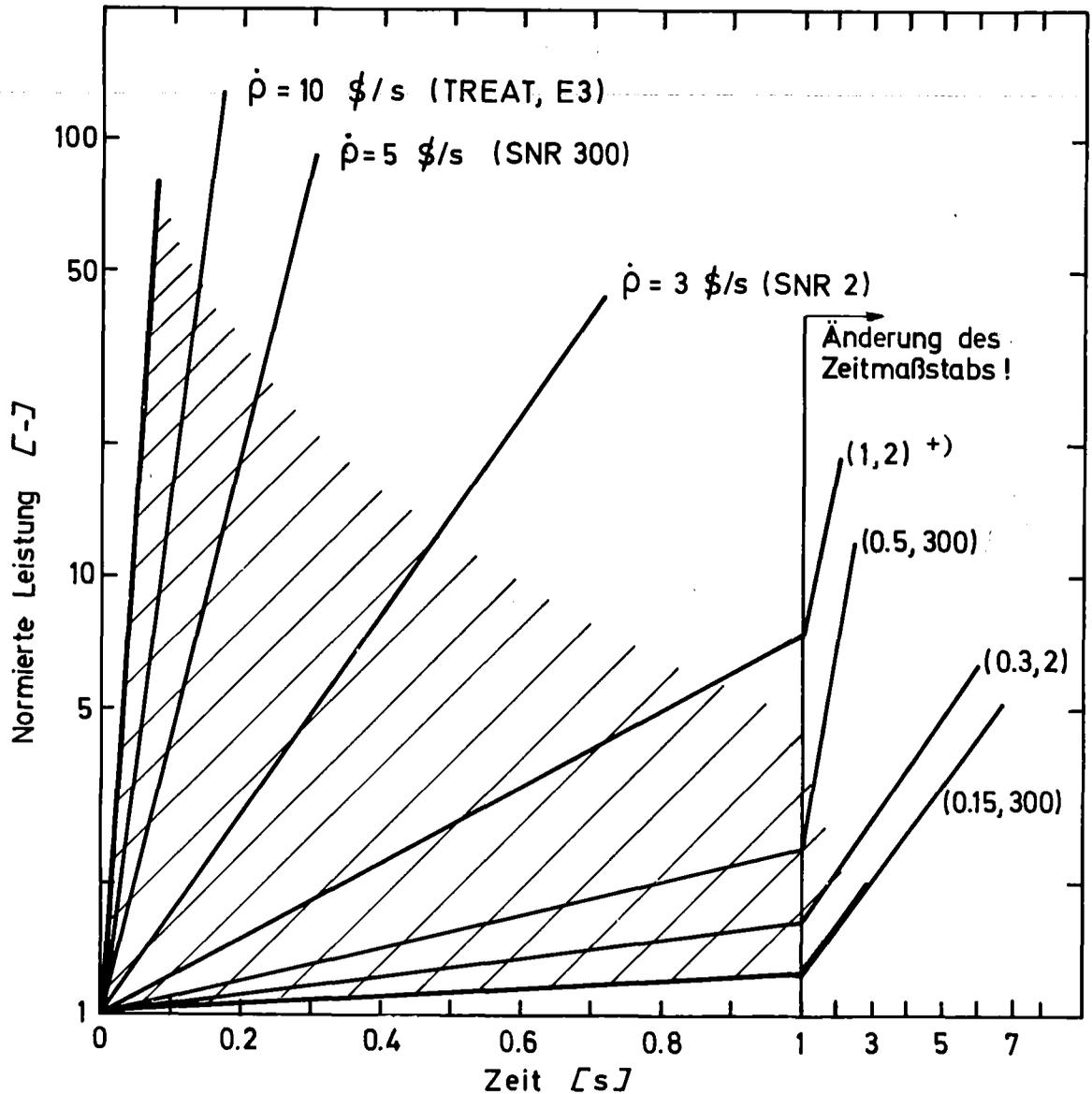


Abb. 6.14 Leistungsverlauf als Funktion der Zeit für alle EPBF-Experimente (schraffierter Bereich) im Vergleich zu in-pile Experimenten und Rechnungen (durchgez. Linien)  
 +) erste Zahl: Rampe in  $\$/s$ , zweite Zahl: SNR 2 bzw. SNR 300

Funktion der Zeit". Das gedachte Einhüllen dieses Bereiches markiert gleichzeitig das Ende des Experiments und definiert somit die Versagenszeit. Zum Vergleich wurden auch einzelne Leistungs - Zeit - Verläufe, die zum einen aus in-pile Experimenten (TREAT-Series) und zum anderen aus Rechnungen für den SNR 2 bzw. für den SNR 300 entnommen wurden. Als Ergebnis dieses Vergleiches läßt sich feststellen, daß durch die eigenen Experimente nahezu der gesamte Bereich abgedeckt wurde, der bei der Störfallanalyse von Rampenreaktivitäts-Störfällen zur Diskussion steht.

Das generelle Vorgehen soll anhand einer detaillierten Darstellung des Simulationsexperiments Vs.-Nr. 220277 erläutert werden.

Beim Experiment 220277 erreichte man ca. 1 Stunde nach Beginn den angestrebten stationären Zustand mit

$$q_e = 13.75 \text{ kW/m} \hat{=} q_N = 31.95 \text{ kW/m}$$

$$T_{HA} = 870 \text{ K}$$

bei einem Helium-Durchfluß von  $\dot{D} = 0.00175 \text{ kg/s}$ .

Nach ca. 1 weiteren Stunde wurde die Exkursion eingeleitet durch Entkopplung des Brennstabes von der EHA und Anschließung an die EA, an der bereits die vorgewählte Spannung (Exkursionsspannung) von

$$U = 158 \text{ V}$$

eingestellt worden war. Gleichzeitig wurde die Helium-Pumpe ausgeschaltet und die gesamte "Registrier-Peripherie" in Gang gesetzt.

Das erste registrierte Ergebnis zeigt Abb. 6.15. Es ist eine Original-Aufzeichnung des Lichtschreibers, die spiegelbildlich entwickelt wurde und die Helium-Durchfluß,  $\dot{D}$ , Hüllentemperatur,  $T_H$ , Strom,  $I$  und Spannung  $U$  während des Versuchs zeigt. Daraus kann man zunächst erkennen, daß der Umschaltvorgang nach ca. 0.72 s beendet war und zu diesem Zeitpunkt die Exkursion begann. Den Endpunkt kann man auch eindeutig erkennen. Er liegt bei  $t = 1.251 \text{ s}$ .

Anhand der der Abb. 6.15 entnommenen Strom- und Spannungsverläufe läßt sich der Leistungsverlauf errechnen. Er ist auf der Abb. 6.16 grafisch dargestellt. Die durchgezogene Linie entspricht der Beziehung

$$N = N_o \cdot e^{t/\tau} \text{ W}$$

mit

$$N_o = 153 \text{ W}, \tau = 0.253 \text{ s} \text{ und } t \text{ in s}$$

und wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate anhand der experimentellen Punkte errechnet. In dieser Form wurde diese Beziehung als das experimentelle Ergebnis angesehen und mit der Theorie verglichen (Rechenprogramm VESUV, Abb. 6.17). Der Wert  $\tau = 0.253 \text{ s}$  der Zeitkonstante des exponentiellen Leistungsanstiegs entspricht (vgl. Abb. 6.13) einer Reaktivitätsrampe von ca.  $\dot{\rho} = 1.8 \text{ \$/s}$ .

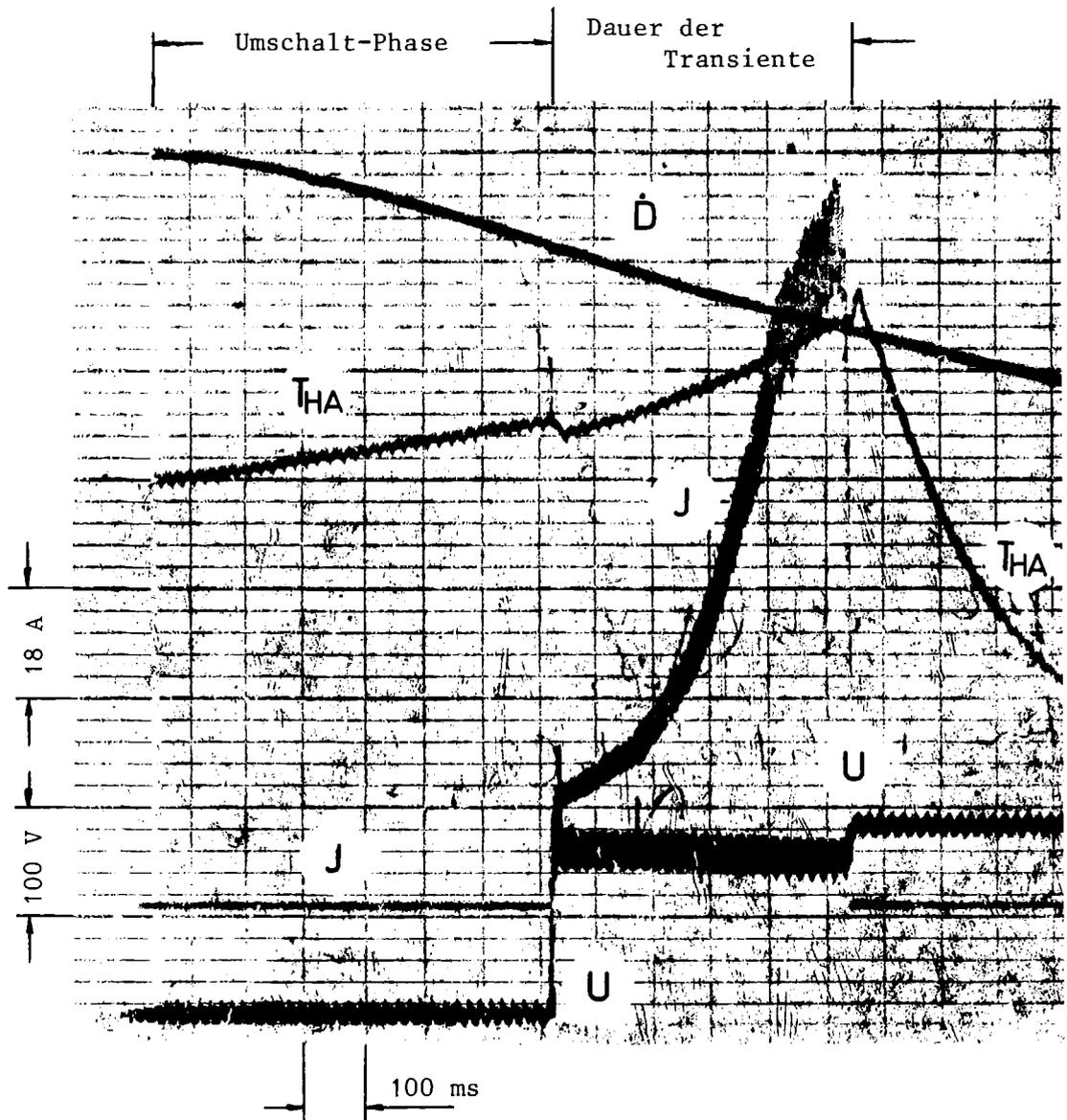


Abb. 6.15 Lichtschreiber-Ausdruck während des Versuchs Vs.-Nr. 220277. Aufzeichnung von Helium-Durchfluß  $D$ , Hüllentemperatur  $T_{HA}$ , Spannung  $U$  und elektrischem Strom  $J$ .

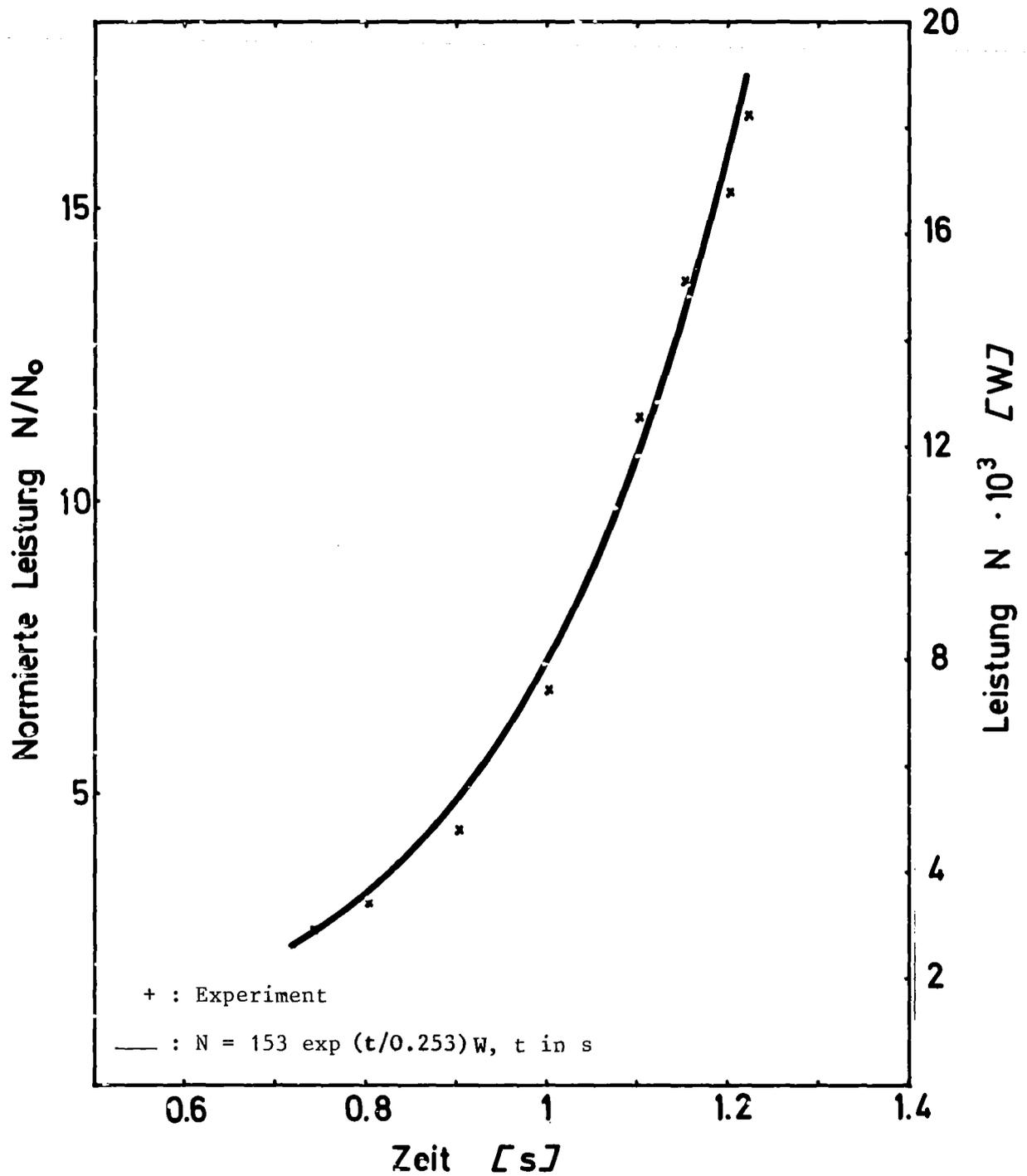


Abb. 6.16 Leistungsverlauf beim Versuch Vs.-Nr. 220277.

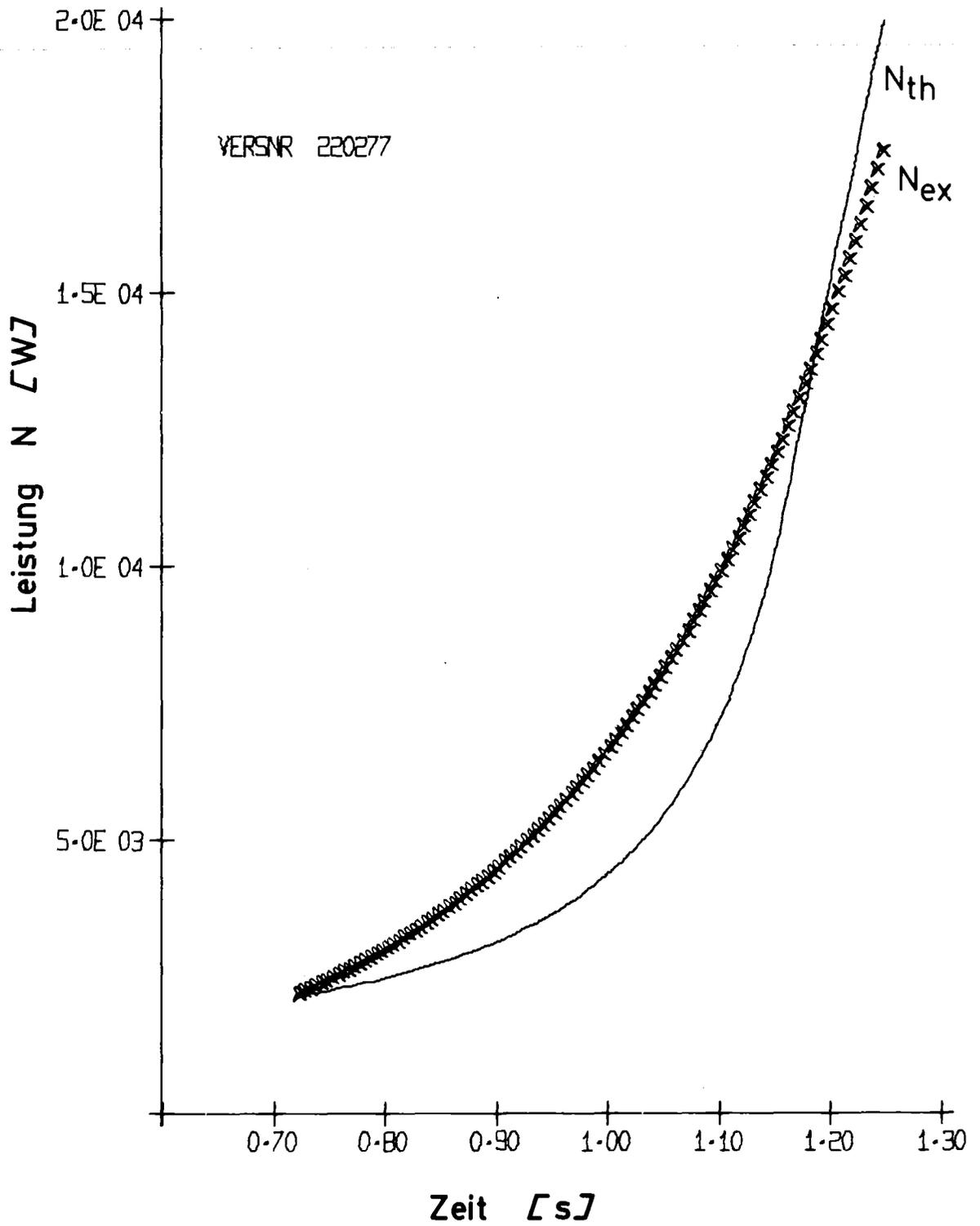
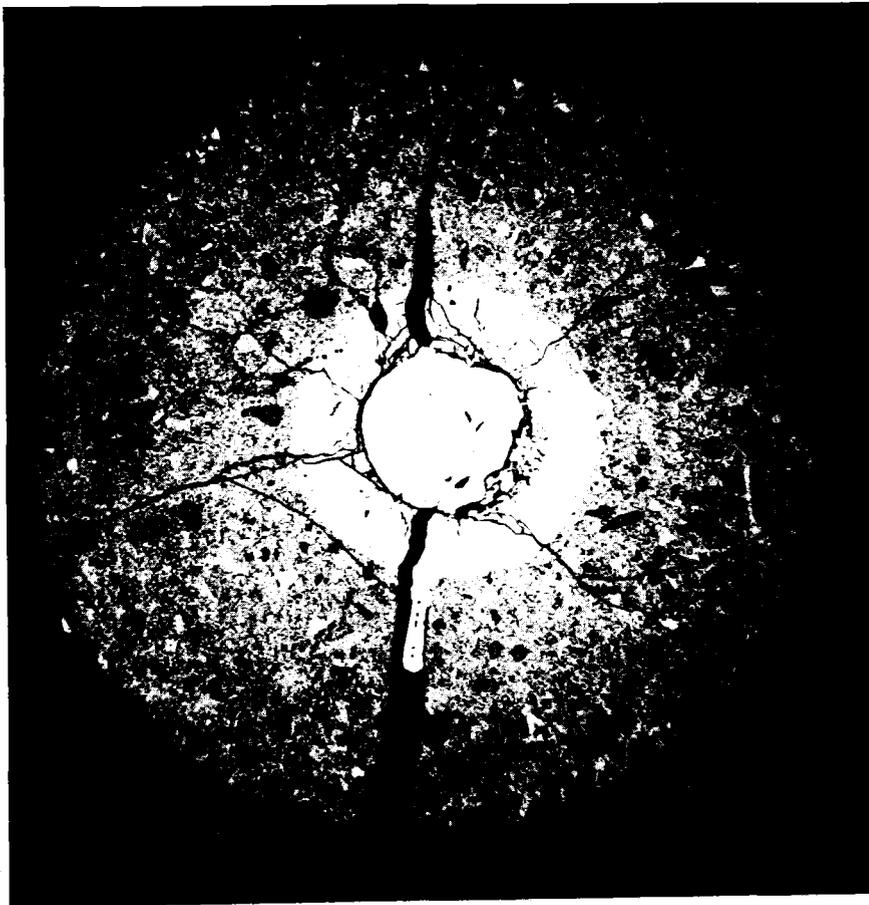


Abb. 6.17 Leistungsverlauf beim Versuch Vs.-Nr. 220277. Vergleich zwischen Experiment ( $N_{ex}$ ) und Rechenprogramm VESUV ( $N_{th}$ ).

Die Auswirkungen dieser Leistungsrampe auf den Prüfling wurden sowohl aufgrund der Auswertung des während des Versuchs aufgenommenen Hochgeschwindigkeitsfilms als auch über die Pellet-Schliffe nach dem Versuch untersucht.

Demnach versagte der Stab 0.53 s nach Beginn der Transiente (Beobachtung der ersten Ejektionen). Die ejizierte Brennstoffmenge wurde auf ca. 1 g  $\text{UO}_2 \approx 6\%$  abgeschätzt. Die Hülle war im wesentlichen intakt. Lediglich am oberen Drittel des Stabes war sie an der Stelle, an der die Ejektionen erfolgten, durchgeschmolzen.

Weitere Resultate kann man den Schliffen entnehmen. Der Abb. 6.18 kann man das Ausmaß der Schmelzfraktion entnehmen; es liegt bei ca. 2.0 g  $\approx 12\%$ . Ebenfalls deutlich erkennt man den Riß, aus dem geschmolzenes Material ejektierte.



HZ-44A-22.2.7.-5/3 20x

1 mm

Abb. 6.18 Pellet-Schliff des  $\text{UO}_2$ -Brennstabes nach dem TOP-Versuch Vs.-Nr. 220277.

Auf der Abb. 6.18 erkennt man ferner (unten links) auf der Brennstoff-Oberfläche erstarrtes Material, bei dem es sich um Hüllen-Material handelt, wie sog. "Härte-Tests" zeigten.

Ein weiteres Phänomen wird erkennbar bei der Betrachtung der stärker vergrößerten Schliff-Ausschnitte auf den Abb. 6.19-6.20. Dort ist eine Reihe von weißen Flecken zu erkennen, bei denen es sich um in den Brennstoff hineindiffundiertes Hüllenmaterial handeln muß /137/. Ganz deutlich ist hierbei zu erkennen, daß der geschmolzene Brennstoff in die Risse hineinlief, während das Hüllenmaterial statistisch verteilt in Erscheinung tritt.

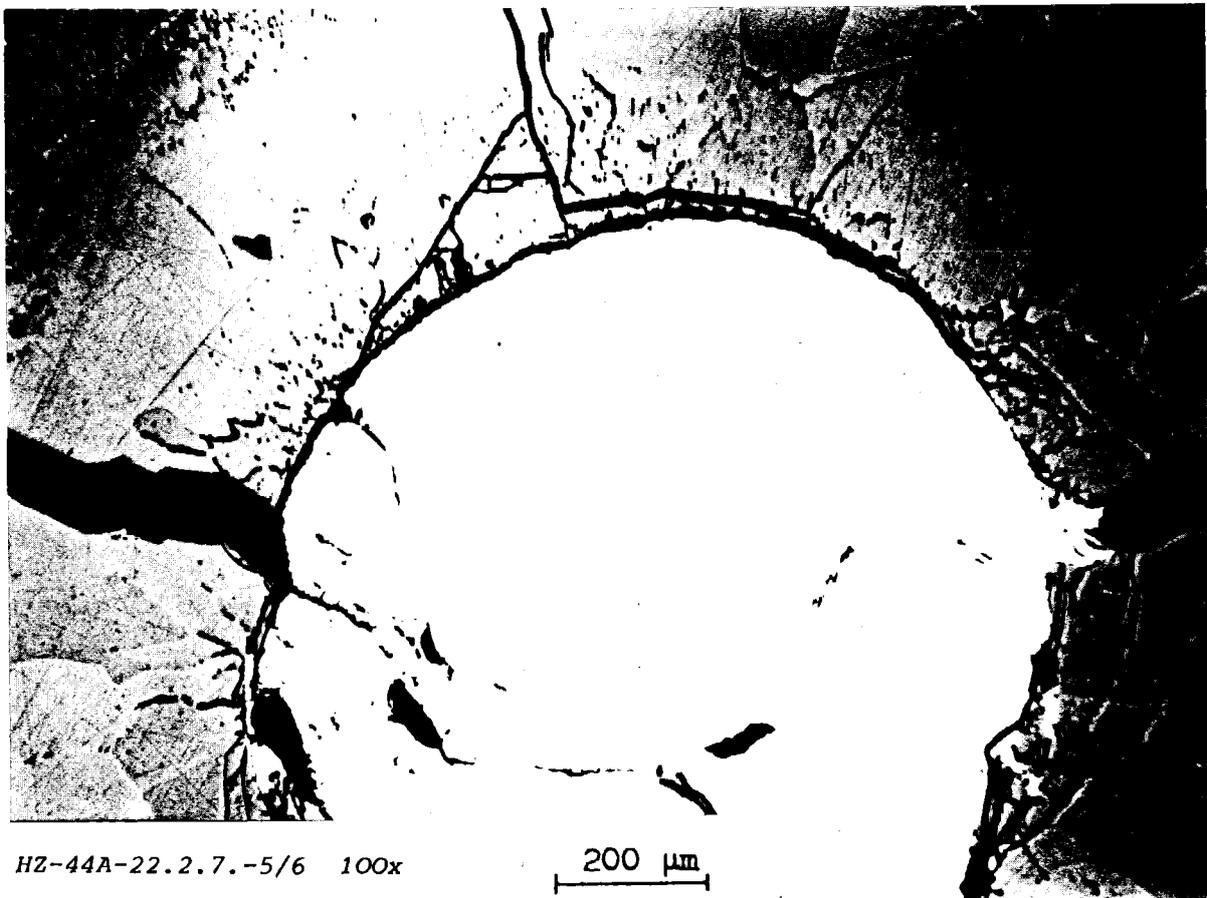


Abb. 6.19 Pellet-Schliff nach dem TOP-Versuch Vs.-Nr. 220277  
(Teilvergrößerung aus der Abbildung 6.18).



HZ-44A-22.2.7.-5/9 500x

100  $\mu\text{m}$



HZ-44A-22.2.7.-5/7 200x

100  $\mu\text{m}$

Abb. 6.20 Pellet-Schliffe nach dem TOP-Versuch Vs.-Nr. 220277 (Teilvergrößerungen aus der Abbildung 6.18 zur Verdeutlichung des Phänomens der Diffusion von Hüllen-Material ins Innere des Brennstabes).

Diese beiden Phänomene konnten bei allen Auswertungsschliffen beobachtet werden. Die Abb. 6.21-6.25 zeigen Schliffe aus dem Versuch Nr. 110277. Auf der Teilvergrößerung in der Abb. 6.21 ist ganz deutlich zunächst geschmolzenes  $UO_2$ -Material, wiedererstartet auf der Brennstab-Oberfläche, und dazu noch Hüllenmaterial, ebenfalls wiedererstartet - allerdings auf dem ehemals geschmolzenen  $UO_2$ -Material - zu sehen. Die schwarzen, viereckigen Flächen darauf sind die Abdrücke, die beim Härte-Test entstanden sind. Der Test ergab an diesen Stellen folgende Werte:

festes $UO_2$ :	770 $kp/mm^2$
geschmolzenes und wiedererstartetes $UO_2$ :	825 $kp/mm^2$
" " " Hüllenmaterial:	274 $kp/mm^2$

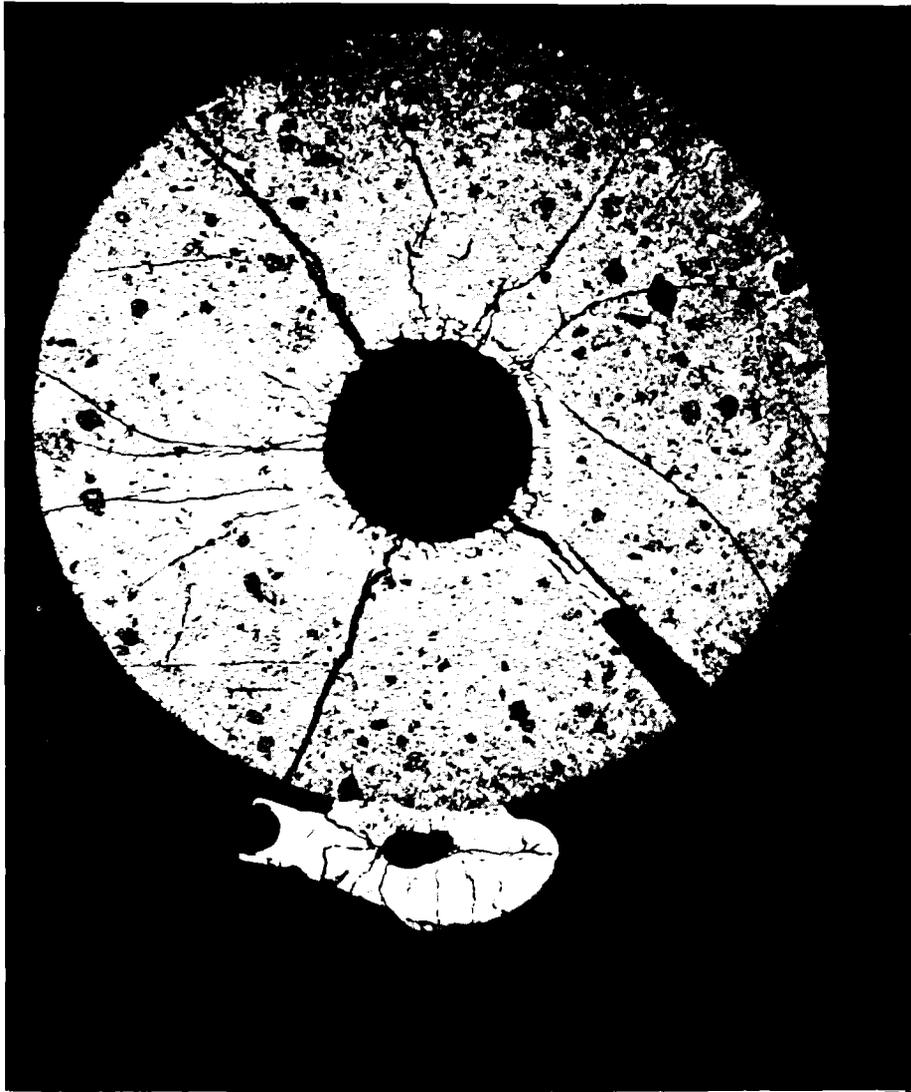
Das Phänomen der Diffundierung geschmolzenen Hüllen-Materials in Brennstoff hinein erkennt man auch in diesem Fall ganz deutlich auf den starken Vergrößerungen in den Abbildungen 6.24 und 6.25



HZ-44A-11.2.7.-2a/B 100x

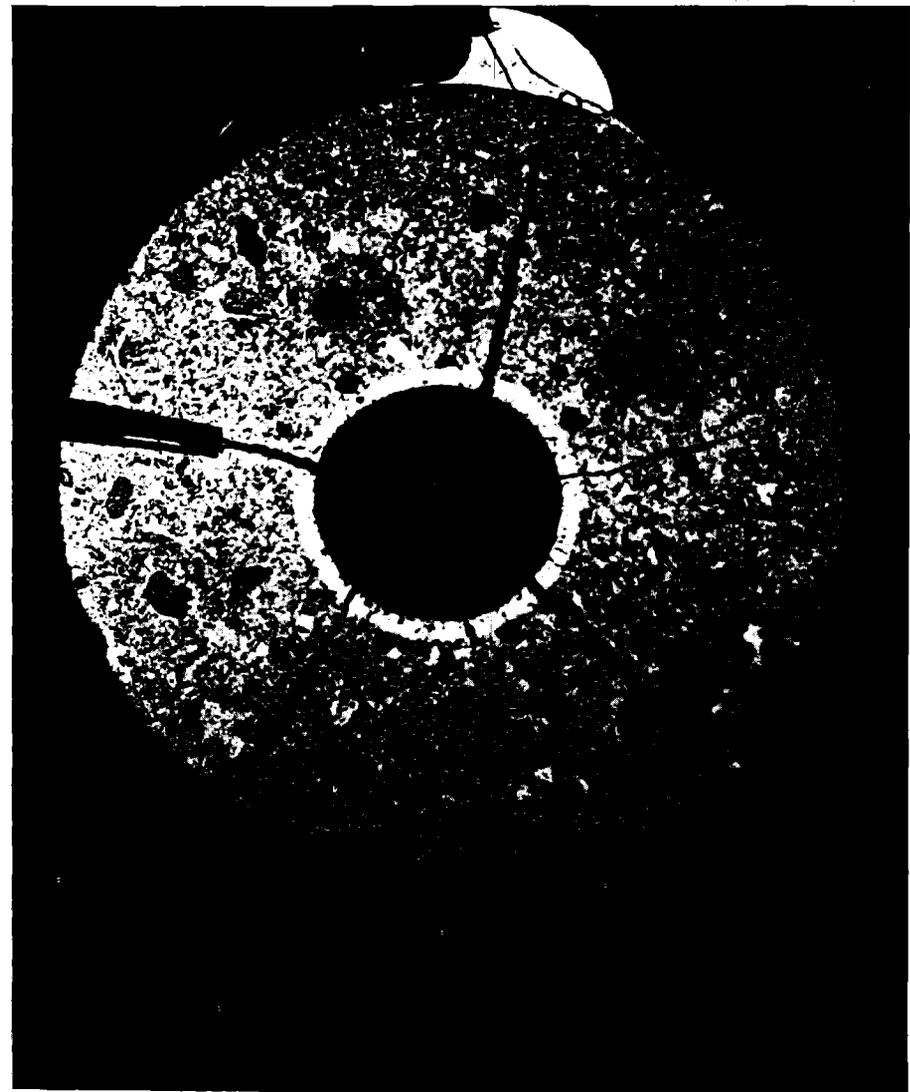
200  $\mu m$

Abb. 6.21 Pellet-Schliff nach dem TOP-Versuch Vs.-Nr. 080277 (Teilvergrößerung aus der Abbildung 6.22, worauf man auch die "Härte-Test" Abdrücke - viereckig - erkennen kann).



HZ-44A-11.2.7.-2/3 20x

1 mm



HZ-44A-11.2.7.-2a/3 20x

1 mm

Abb.6.22 Pellet-Schliffe nach dem TOP-Versuch Vs.-Nr. 080277. Links erkennt man Brennstoffmaterial wiedererstart auf der Brennstoffoberfläche. Rechts sieht man (oben) wiedererstartetes Brennstoffmaterial und dadrauf Hüllenmaterial.

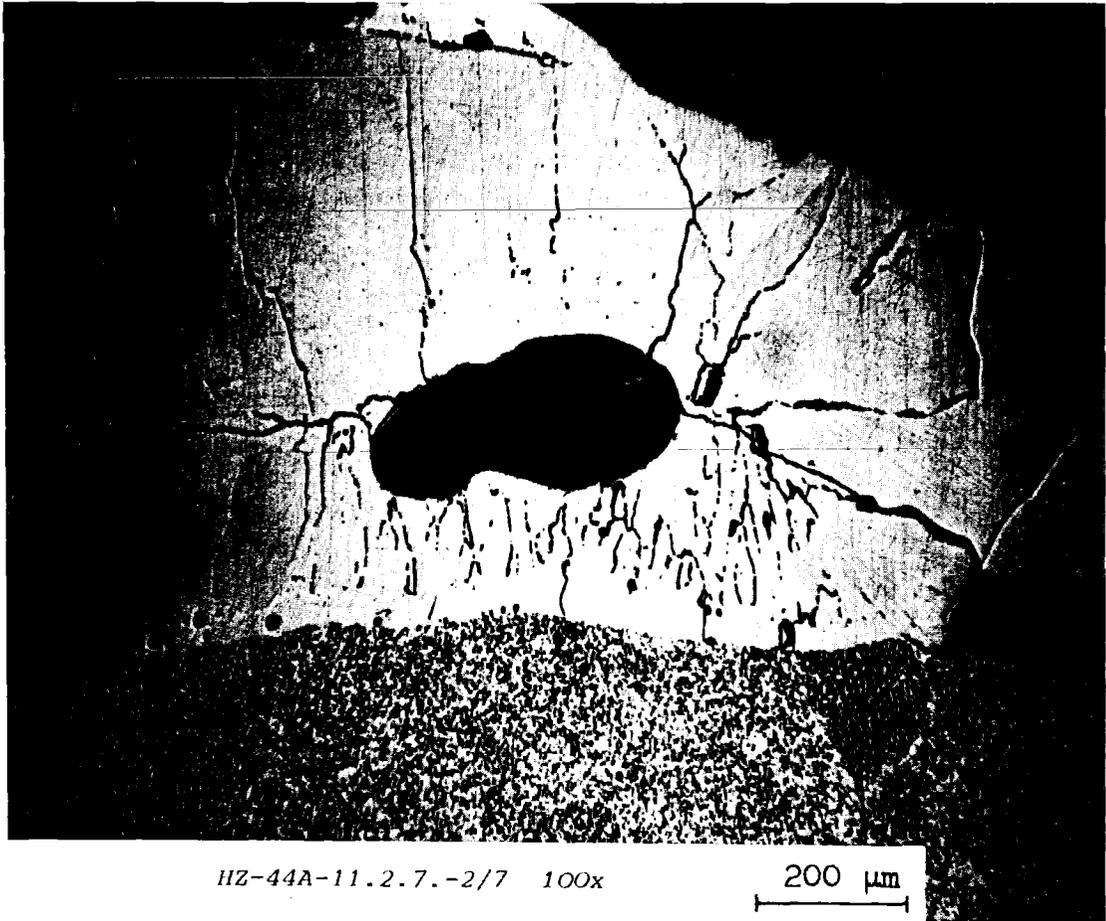


Abb. 6.23 Teilvergrößerung aus der Abbildung 6.22. Wiedererstartetes Brennstoffmaterial auf der Brennstoffoberfläche.

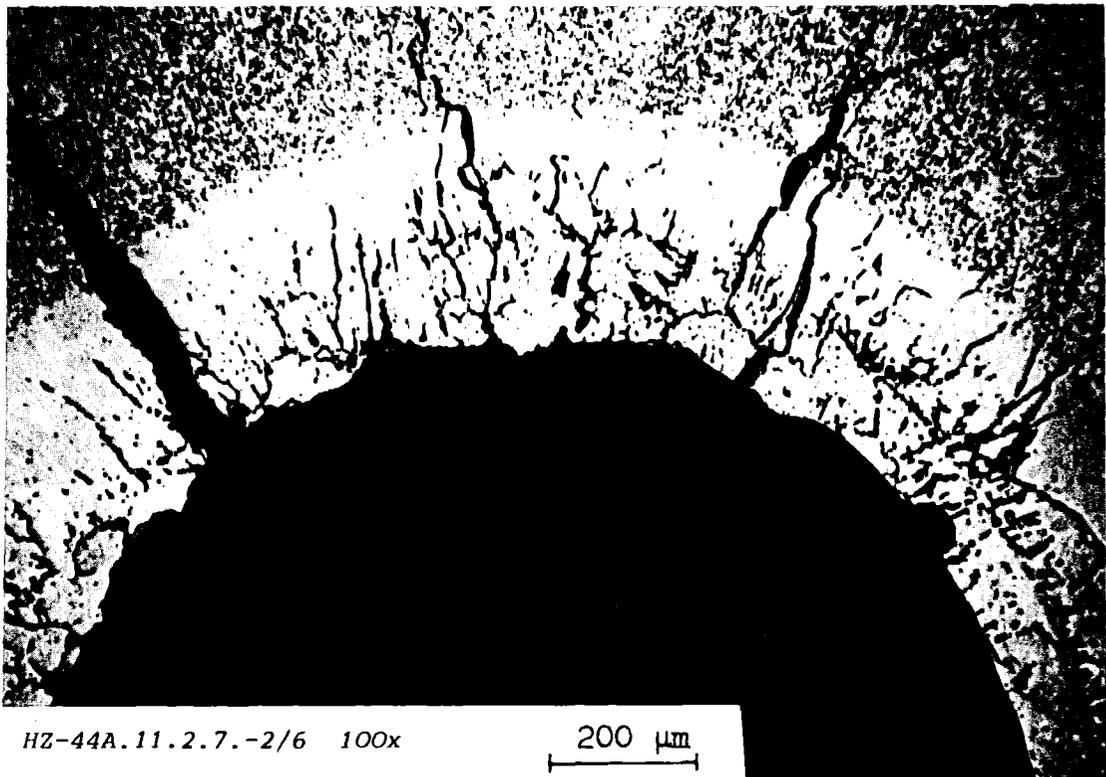
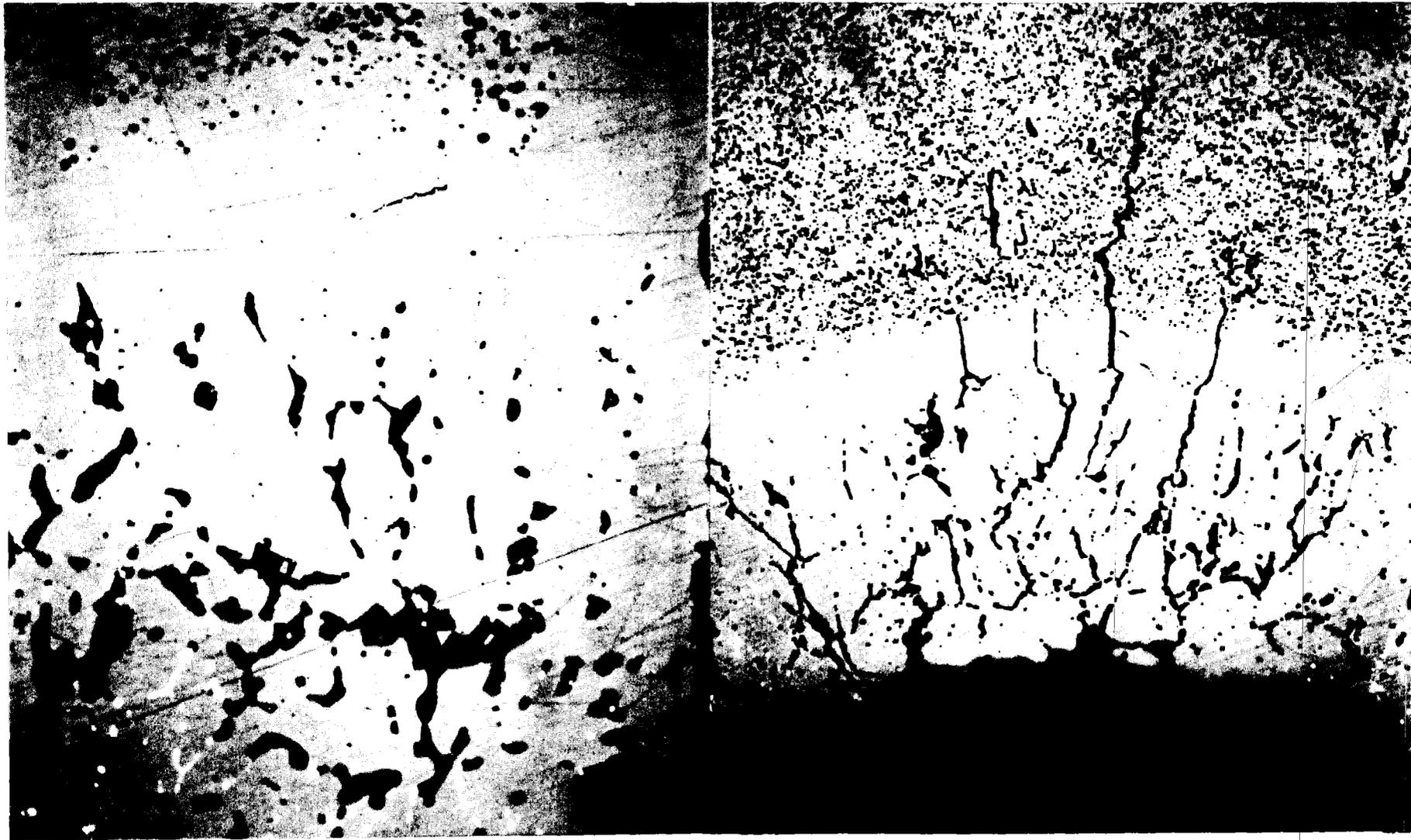


Abb. 6.24 Teilvergrößerung aus der Abbildung 6.22 zum Phänomen der Diffusion von Hüllenmaterial ins Innere des Brennstabes.



HZ-44A-11.2.7.-2/9 500x

100 μm

HZ-44A-11.2.7.-2/10 200x

100 μm

Abb.6.25 Teilvergrößerungen aus der Abbildung 6.22 zur Verdeutlichung der Diffusion Hüllenmaterials ins Stabinnere.

Weitere Informationen über den Ablauf des Experiments 220270 bzw. über das Verhalten des Brennstabes während der transienten Leistungsänderung kann man den Tab. 6.5 - 6.7 und den Abb. 6.29 - 6.32 entnehmen. Demnach begann 1.165 - 0.72 = 0.445 s nach Einleitung der Transiente das Brennstoffschmelzen im Zentrum des Stabes. Die Leistung von diesem Zeitpunkt betrug ca. 656 W/g (theor.) bzw. 895 W/g (exp.). Die normierte Leistung lag bei 10. Die theoretische Beschreibung endet nach  $(1.251 - 0.72) \text{ s} = 0.531 \text{ s}$  in dem Moment, als die ersten Ejektionen beobachtet wurden. Die theoretische Schmelzfraction zu diesem Zeitpunkt betrug nur 6.25% (experimentell:  $\approx 12\%$ ). Diese scheinbare Diskrepanz läßt sich leicht erklären, wenn man sich vorstellt, daß der Prozeß des Schmelzens im Experiment über den Beginn der ersten Ejektionen hinausandauert, sich jedoch im Rahmen des Programms VESUV mathematisch nicht erfassen läßt. Die gesamte Brennstoffenergie betrug zum Zeitpunkt des Versagens ca. 1000 J/g -  $\text{UO}_2$ . Die allein der geschmolzenen Fraction zugeführte Energie lag allerdings weit höher und betrug ca. 1972 J/g - geschmolzenen Materials. Die theoretische Zeitkonstante von  $\tau_{\text{th}} = 0.238 \text{ s}$  läßt sich mit dem experimentellen Wert von  $\tau_{\text{ex}} = 0.253 \text{ s}$  sehr gut in Einklang bringen. Auch der Vergleich zwischen theoretischem und experimentellem Leistungsverlauf (Tab. 6.6, Abb. 6.17) läßt sich im Rahmen der Restriktionen, die die exakte Ermittlung des elektrischen Widerstands des  $\text{UO}_2$  bei hohen Temperaturen mit sich bringt, als befriedigend einstufen.

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 220277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.80090E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21991E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13613E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.11000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.78947E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12467E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.15800E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.21064E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.65982E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.17273E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.13714E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.13412E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.12366E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26450E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.44873E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.50988E-04	G/CM**3
HFLIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76987E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58497E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.24640E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.23815E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.25300E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.12510E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.11650E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.19727E+04	J/G

Tab. 6.5 Eingabe-Daten, Stoffwerte und End-Daten für den Versuch Vs-Nr. 220277

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 220277

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2410.	1943.	1361.	876.
0.100	0.	0.	0.0	2343.	1909.	1373.	883.
0.200	0.	0.	0.0	2275.	1876.	1373.	889.
0.300	0.	0.	0.0	2213.	1845.	1370.	895.
0.400	0.	0.	0.0	2155.	1814.	1367.	900.
0.500	0.	0.	0.0	2101.	1784.	1362.	904.
0.600	0.	0.	0.0	2051.	1756.	1357.	907.
0.700	0.	0.	0.0	2004.	1729.	1350.	909.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.720	2171.	2174.	2.0	1995.	1724.	1349.	910.
0.730	2200.	2262.	2.0	2002.	1727.	1349.	910.
0.755	2295.	2497.	2.1	2024.	1736.	1349.	910.
0.780	2400.	2756.	2.2	2049.	1745.	1348.	911.
0.805	2519.	3042.	2.3	2075.	1756.	1349.	911.
0.830	2654.	3358.	2.4	2103.	1767.	1349.	912.
0.855	2807.	3707.	2.6	2134.	1779.	1349.	912.
0.880	2983.	4092.	2.7	2168.	1793.	1349.	913.
0.905	3187.	4517.	2.9	2205.	1807.	1350.	913.
0.930	3425.	4986.	3.1	2246.	1824.	1350.	913.
0.955	3706.	5504.	3.4	2292.	1842.	1351.	914.
0.980	4042.	6076.	3.7	2344.	1862.	1352.	914.
1.005	4447.	6707.	4.0	2403.	1885.	1353.	915.
1.030	4942.	7404.	4.5	2469.	1910.	1354.	915.
1.055	5559.	8173.	5.1	2546.	1940.	1355.	916.
1.080	6338.	9021.	5.8	2634.	1974.	1357.	916.
1.105	7347.	9958.	6.7	2737.	2013.	1358.	917.
1.130	8691.	10993.	7.9	2858.	2059.	1360.	918.
1.155	10566.	12134.	9.6	3004.	2114.	1362.	918.
1.180	13089.	13395.	11.9	3080.	2170.	1364.	919.
1.205	15625.	14786.	14.2	3080.	2212.	1367.	920.
1.230	18118.	16322.	16.5	3357.	2285.	1370.	921.
1.251	20187.	17734.	18.4	3502.	2356.	1372.	921.

Tab. 6.6 Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 220277, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des Stabes

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 220277

ZFIT	PSTHE	MOLTEN	E-ZUFUHR	ENTHALPIE	E-TOTAL	HELIUM
/S/	/W/	/%/	/J/KG/	/J/KG/	/J/KG/	/%/
0.0	0.	0.0	0.	518114.	518114.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	504888.	504888.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	492192.	492192.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	480293.	480293.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	469103.	469103.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	458547.	458547.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	448561.	448561.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	439093.	439093.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.720	2171.	0.0	134.	437257.	437390.	99.1
0.730	2200.	0.0	135.	438239.	439718.	99.1
0.755	2295.	0.0	141.	441382.	446322.	99.1
0.780	2400.	0.0	148.	444784.	453340.	99.1
0.805	2519.	0.0	155.	448481.	460829.	99.0
0.830	2654.	0.0	164.	452518.	468854.	99.0
0.855	2807.	0.0	173.	456950.	477500.	99.0
0.880	2983.	0.0	184.	461845.	486864.	98.9
0.905	3187.	0.0	197.	467287.	497072.	98.9
0.930	3425.	0.0	212.	473380.	508276.	98.9
0.955	3706.	0.0	229.	480260.	520672.	98.9
0.980	4042.	0.0	250.	488097.	534508.	98.8
1.005	4447.	0.0	276.	497117.	550105.	98.8
1.030	4942.	0.0	307.	507617.	567890.	98.8
1.055	5559.	0.0	346.	520000.	588430.	98.7
1.080	6338.	0.0	395.	534824.	612508.	98.7
1.105	7347.	0.0	459.	552886.	641235.	98.7
1.130	8691.	0.0	544.	575386.	676256.	98.6
1.155	10566.	0.0	664.	604282.	720219.	98.6
1.180	13089.	1.00	825.	634908.	769520.	98.6
1.205	15625.	2.25	988.	657047.	814402.	98.6
1.230	18118.	4.00	1172.	730319.	914770.	98.5
1.251	20187.	6.25	1319.	789471.	1000116.	98.5

Tab. 6.7 Geschmolzene Fraktion, Energie-Zufuhr, Enthalpie, Gesamtenergie und Kühlmittelreduktion während des Versuchs Vs-Nr. 220277

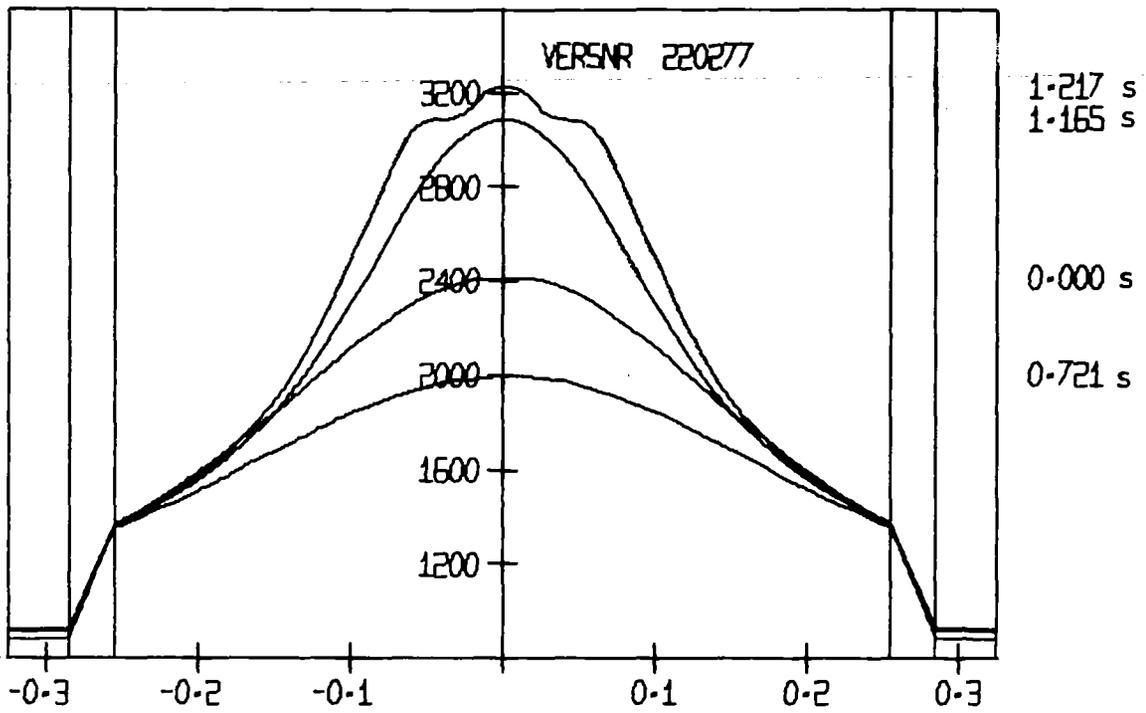


Abb. 6.26 Temperaturverteilung im Stab während des Leistungsanstiegs beim Versuch Vs.-Nr. 220277 (Rechenergebnisse, VESUV).

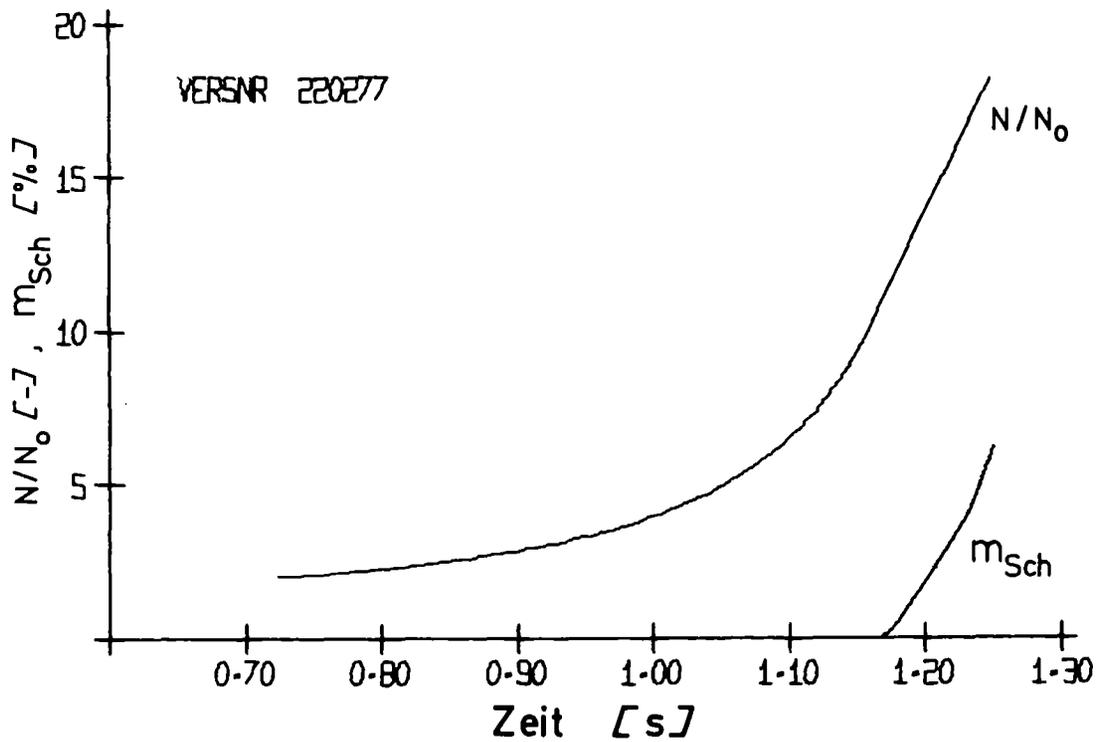


Abb. 6.27 Leistungsverlauf ( $N/N_0$ ) und geschmolzene Fraktion ( $m_{Sch}$ ) beim Versuch Vs.-Nr. 220277 (Rechenergebnisse, VESUV).

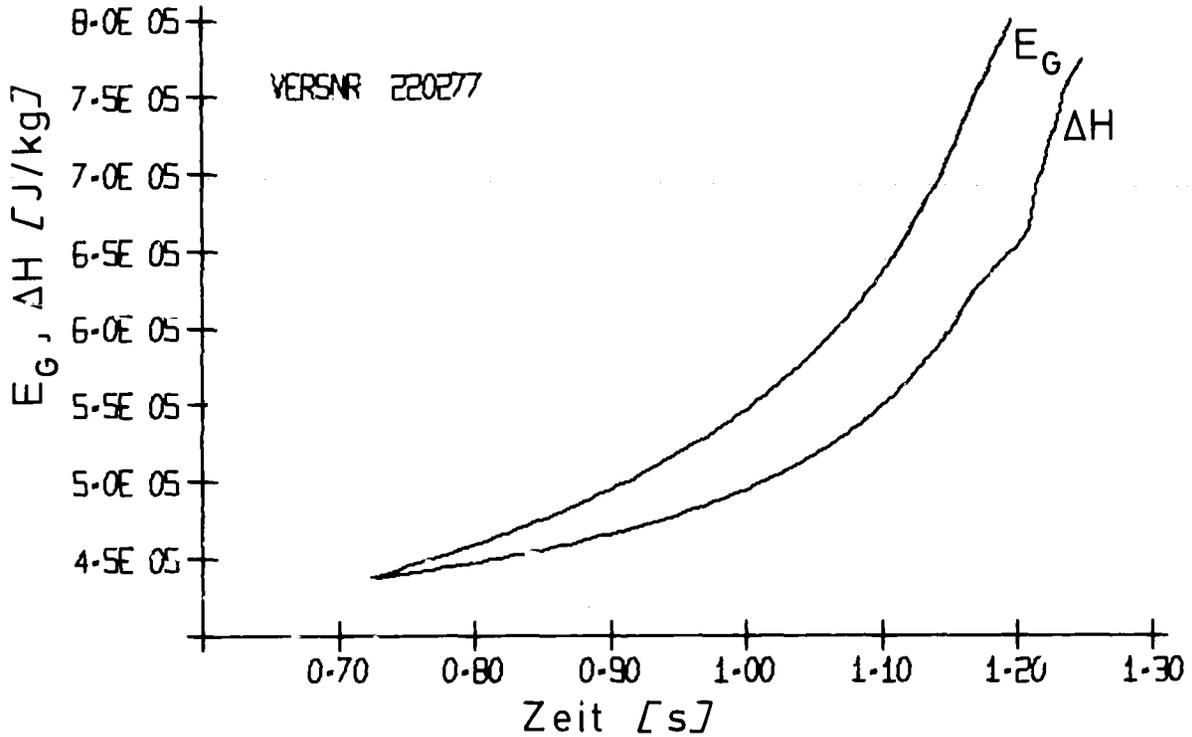


Abb. 6.28 Gesamtenergie- ( $E_G$ ) und -Enthalpieverlauf ( $\Delta H$ ) während des Leistungsanstiegs beim Versuch Vs.-Nr. 220277.

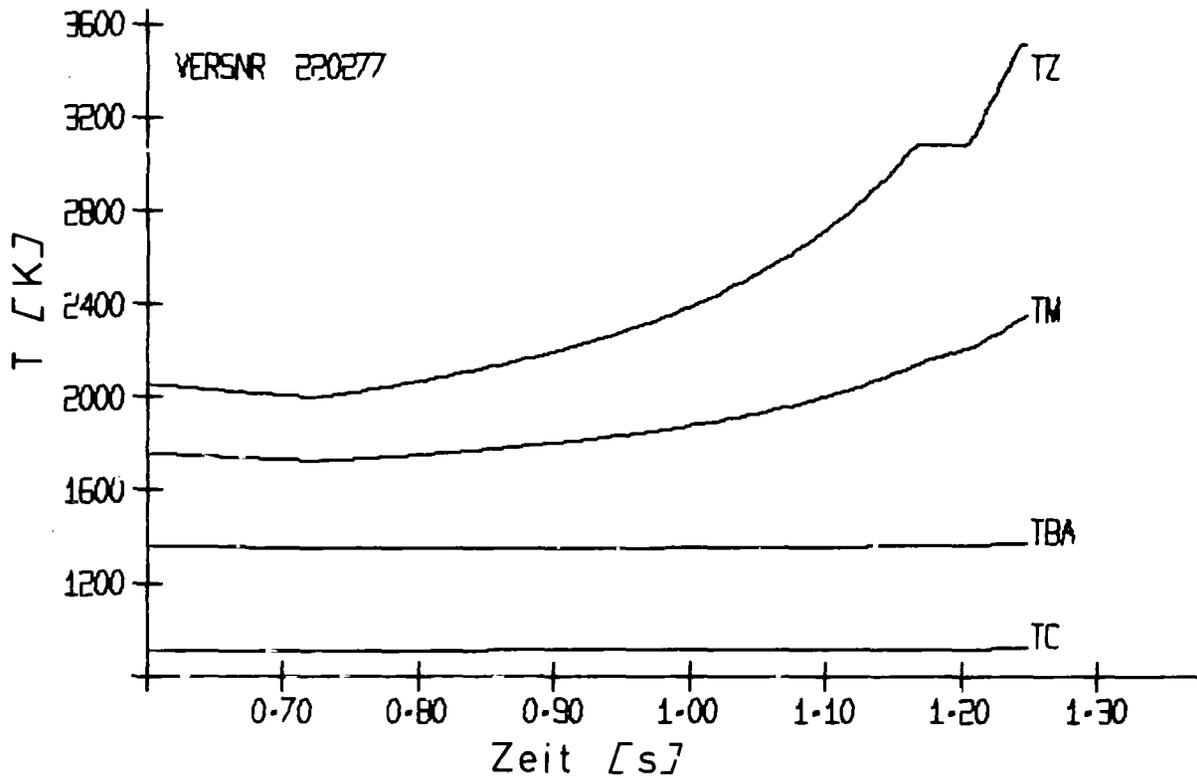


Abb. 6.29 Temperaturverlauf an charakteristischen Stellen des Stabes - Zentral- (TZ), mittlere (TM), Außen- (TBA) und Hüllen- Temperatur (TC) - beim Versuch Vs.-Nr. 220277.

Wie bereits erwähnt, ließ sich die Zeitkonstante des exponentiellen Leistungsanstieges durch Änderung der vorgewählten "Beschleunigungsspannung" variieren. Die kleinste Zeitkonstante erreichte man bei Versuch Vs.-Nr. 080277. Das Experiment verlief im Prinzip ähnlich wie der Versuch Vs.-Nr. 220277. Nach Erreichung des stationären Zustands von

$$q_e = 15 \text{ kW/m} \hat{=} q_n = 34.7 \text{ kW/m}$$

$$T_{HA} = 870 \text{ K}$$

bei einem Kühlmittelfluß von  $\dot{D} = 0.00196 \text{ kg/s}$  wurde die Exkursion mit einer "Beschleunigungsspannung" von

$$U = 325 \text{ V}$$

eingeleitet. Der Leistungsverlauf bis zu den ersten Ejektionen entspricht der Beziehung

$$N = 0.452 \cdot 10^{-7} e^{t/0.0315} \text{ W, } t \text{ in s}$$

und kann der Abbildung 6.33 entnommen werden. Der Vergleich zwischen Experiment und Theorie hinsichtlich des Leistungsverlaufes (Abb. 6.34) zeigt Abweichungen von lediglich 20%. Die errechnete Zeitkonstante von  $\tau = 0.036 \text{ s}$  weicht vom experimentellen Wert -  $\tau = 0.0315 \text{ s}$  - um ca. 13% ab. Der Leistungsverlauf entspricht dem Leistungsverlauf in einem SBR nach dem Einleiten einer Reaktivitätsrampe von ca.  $\dot{\rho} = 10 \text{ } \$/\text{s}$ , wenn man zum Vergleich die Korrelation nach Gl. 6.13 heranzieht. Weitere Einzelheiten über den Ablauf dieses Versuches kann man den Abbildungen 6.35 - 6.37 und den Tabellen 6.8 - 6.10 entnehmen. Der Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Leistungsverlauf und den Rechenresultaten des Programms VESUV liefert auch bei diesem Experiment recht befriedigende Ergebnisse, die man auf der Abbildung 6.34 grafisch dargestellt sehen kann.

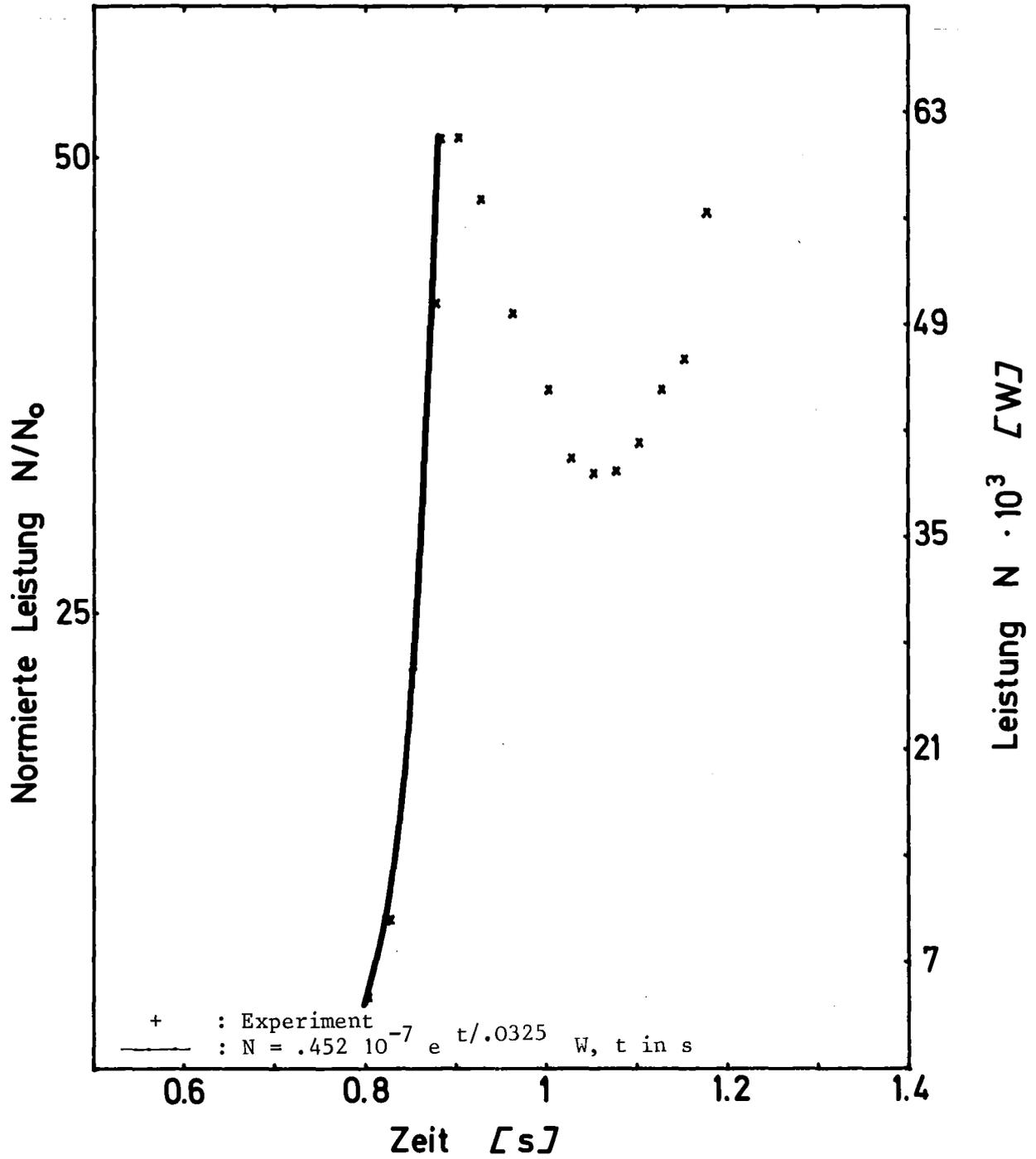


Abb. 6.30 LEISTUNGSVERLAUF WÄHREND DES VERSUCHS VS.-NR.080277

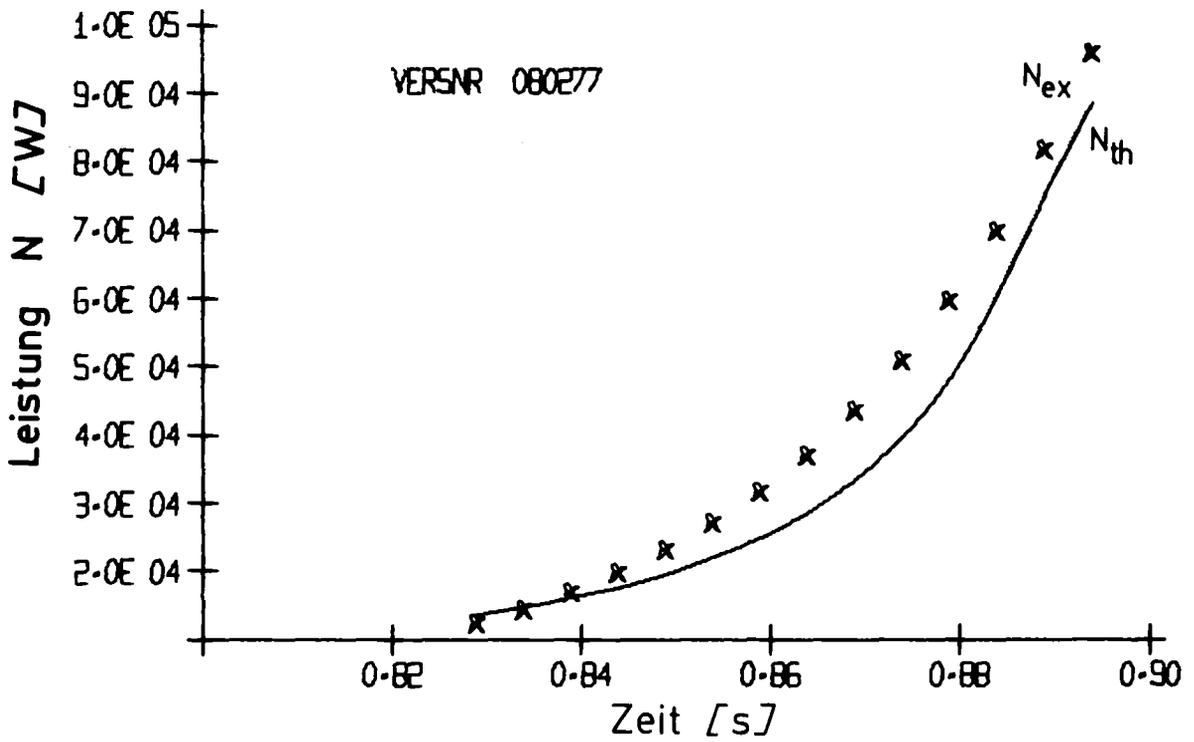


Abb 6.31 Leistungsverlauf beim Versuch Vs.-Nr. 080277. Vergleich zwischen Experiment ( $N_{ex}$ ) und Rechenprogramm VESUV ( $N_{th}$ ).

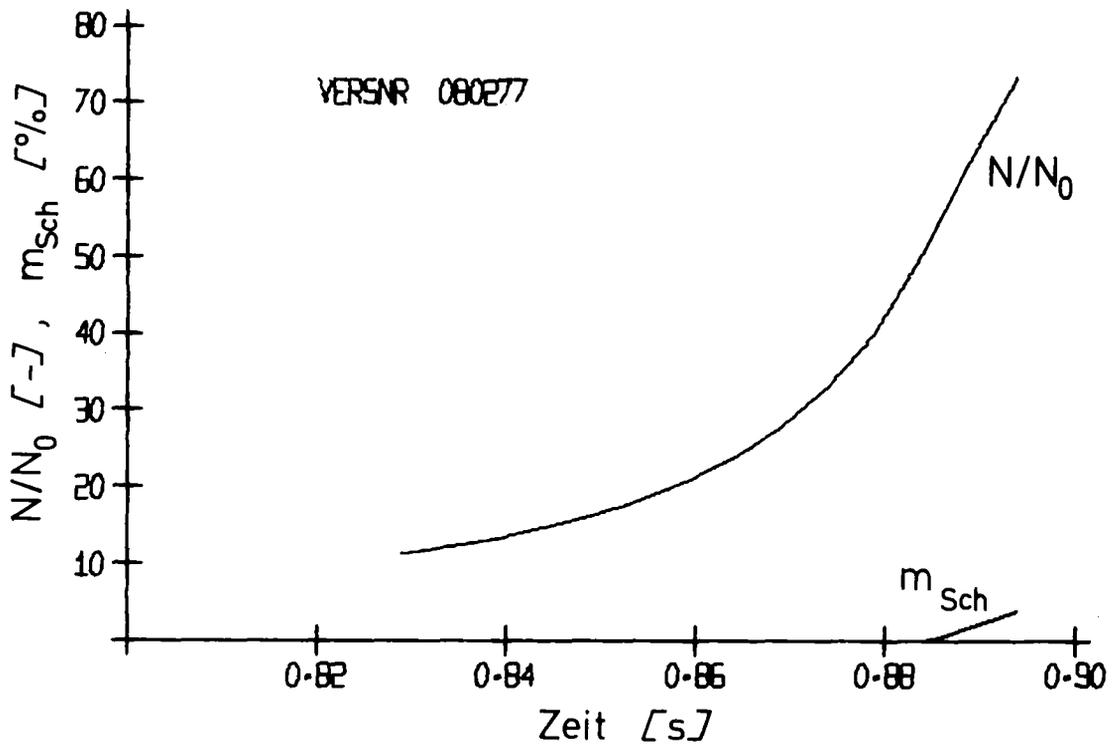


Abb. 6.32 Leistungsverlauf ( $N/N_0$ ) und geschmolzene Fraktion ( $m_{Sch}$ ) beim Versuch Vs.-Nr. 080277. (Rechenergebnisse, VESUV).

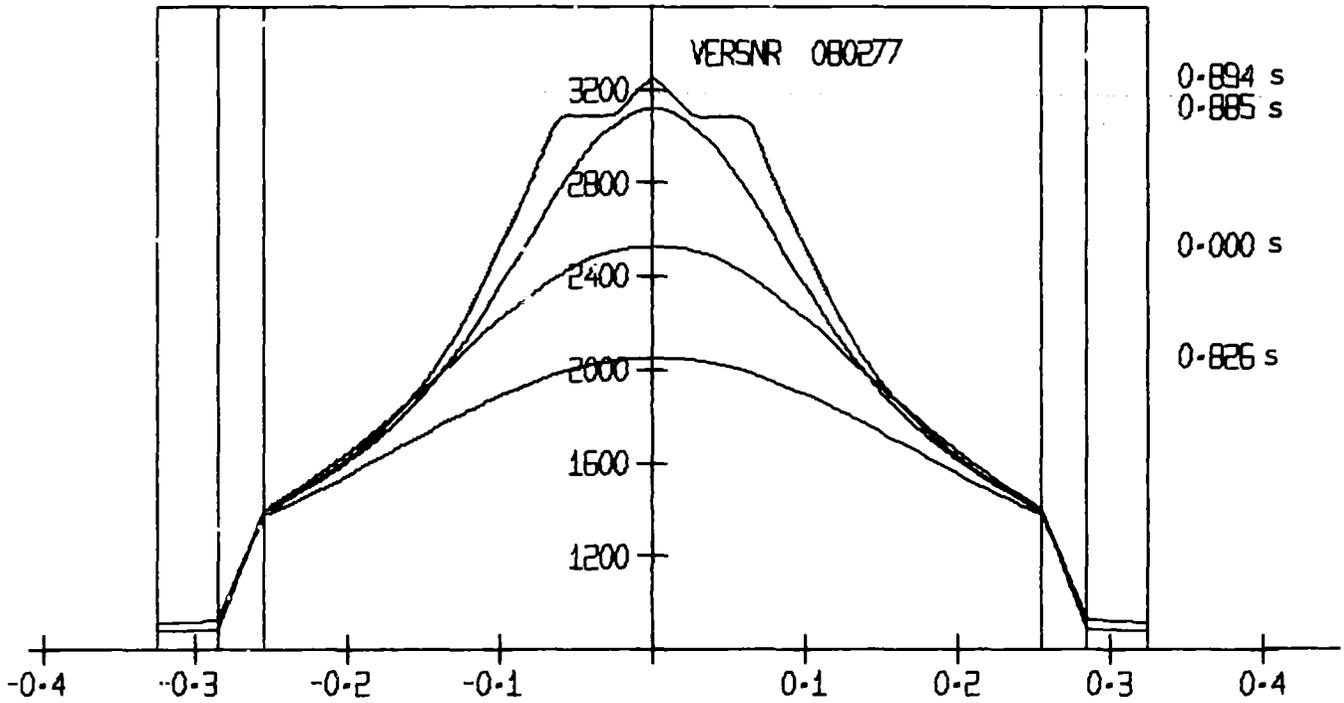


Abb. 6.33 Temperaturverteilung im Stab während des Leistungsanstiegs beim Versuch Vs.-Nr. 080277 (Rechenergebnisse, VESUV).

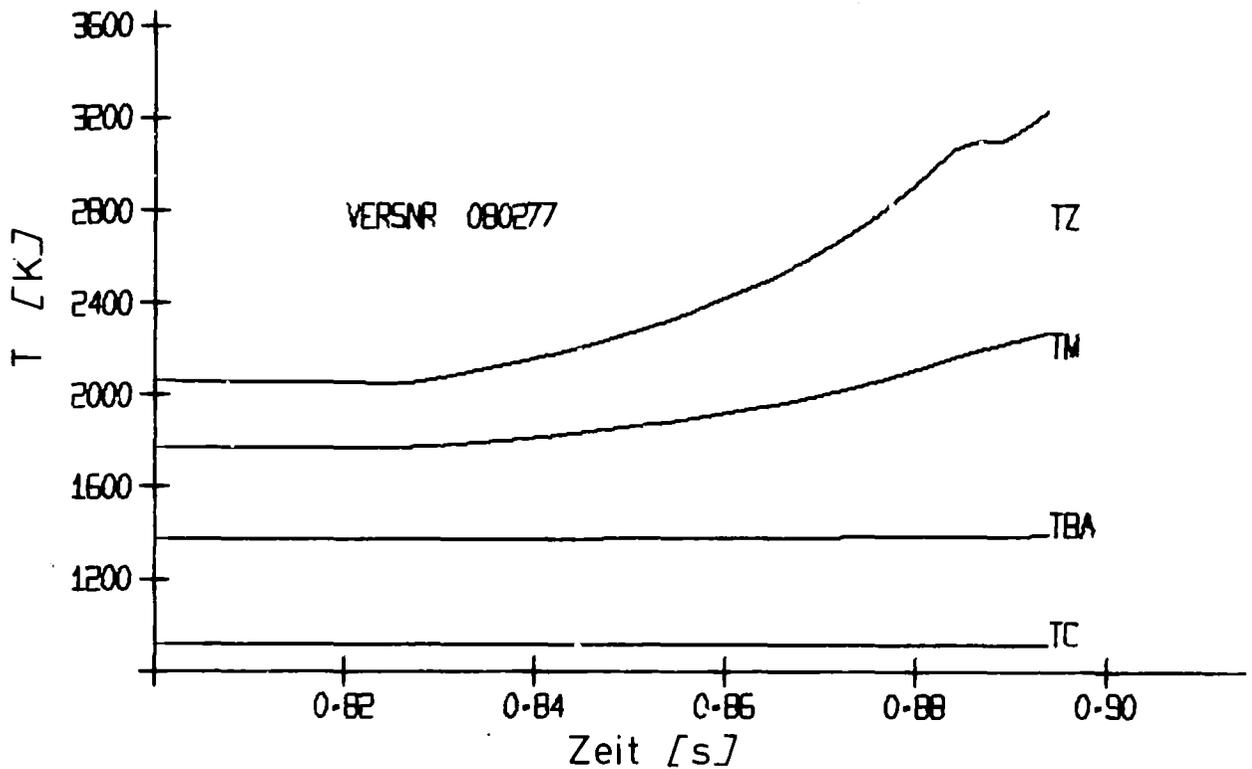


Abb. 6.34 Temperaturverlauf an charakteristischen Stellen des Stabes beim Versuch Vs.-Nr. 080277. Nomenklatur wie auf Abb. 6.29.

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 080277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	=	0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	=	0.77435E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	=	0.22256E-01	CM
CLADDING - STAERKE	=	0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	=	0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	=	0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	=	0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	=	0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	=	0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	=	0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.71075E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.11279E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	=	0.32500E+03	V
ZEITSCHRITT	=	0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	=	0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	=	0.14802E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	=	0.50104E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	=	0.19381E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	=	0.10705E+04	J
HE-AB ENERGIE	=	0.10493E+04	J
FLEKTR. WIDERSTAND	=	0.11934E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	=	0.26762E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	=	0.46096E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	=	0.51233E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	=	0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	=	0.77012E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	=	0.58419E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	=	0.14341E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	=	0.36068E-01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	=	0.31500E-01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	=	0.89400E+00	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	=	0.88401E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	=	0.17381E+04	J/G

Tab. 6.8 Eingabe-Daten, Stoffwerte und End-Daten für den Versuch Vs-Nr. 080277

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 080277

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2455.	1989.	1404.	884.
0.200	0.	0.	0.0	2387.	1956.	1404.	891.
0.300	0.	0.	0.0	2323.	1923.	1402.	897.
0.400	0.	0.	0.0	2263.	1891.	1398.	902.
0.500	0.	0.	0.0	2208.	1860.	1393.	907.
0.600	0.	0.	0.0	2155.	1830.	1387.	910.
0.700	0.	0.	0.0	2106.	1802.	1381.	913.
0.800	0.	0.	0.0	2059.	1774.	1374.	914.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.825	13066.	10703.	10.9	2048.	1767.	1372.	915.
0.830	13867.	12544.	11.6	2077.	1780.	1373.	915.
0.835	15044.	14702.	12.5	2118.	1799.	1374.	915.
0.840	16433.	17231.	13.7	2164.	1819.	1375.	915.
0.845	18092.	20196.	15.1	2216.	1842.	1377.	915.
0.850	20100.	23670.	16.7	2275.	1867.	1378.	915.
0.855	22563.	27741.	18.8	2344.	1895.	1300.	915.
0.860	25631.	32514.	21.4	2424.	1927.	1381.	915.
0.865	29518.	38107.	24.6	2517.	1964.	1383.	915.
0.870	34539.	44662.	28.8	2627.	2007.	1385.	915.
0.875	41190.	52344.	34.3	2757.	2057.	1387.	916.
0.880	50336.	61349.	41.9	2914.	2115.	1388.	916.
0.885	63801.	71902.	53.2	3109.	2185.	1390.	916.
0.890	78052.	84271.	65.0	3109.	2234.	1392.	916.
0.894	88505.	95682.	73.8	3241.	2276.	1394.	916.

Tab. 6.9 Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 080277, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des States

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 080277

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	550002.	550002.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	535833.	535833.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	522183.	522183.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	509345.	509345.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	497234.	497234.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	485772.	485772.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	474901.	474901.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	464566.	464566.	99.2
0.800	0.	0.0	0.	454723.	454723.	99.0
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.825	13066.	0.0	806.	452335.	453140.	99.0
0.830	13867.	0.0	856.	457024.	461978.	99.0
0.835	15044.	0.0	929.	463602.	473049.	99.0
0.840	16433.	0.0	1016.	470969.	485315.	99.0
0.845	18092.	0.0	1119.	479298.	499024.	99.0
0.850	20100.	0.0	1245.	488815.	514505.	99.0
0.855	22563.	0.0	1399.	499826.	532190.	99.0
0.860	25631.	0.0	1592.	512740.	552662.	99.0
0.865	29518.	0.0	1837.	528128.	576721.	99.0
0.870	34539.	0.0	2155.	546796.	605494.	99.0
0.875	41190.	0.0	2577.	569935.	640621.	99.0
0.880	50336.	0.0	3160.	599417.	684657.	98.9
0.885	63801.	0.25	4025.	638572.	742056.	98.9
0.890	78052.	2.25	4940.	664875.	791273.	98.9
0.894	88505.	4.00	5692.	710753.	858776.	98.9

Tab. 6.10 Geschmolzene Fraktion, Energiezufuhr, Enthalpie, Gesamt-  
Energie und Kühlmittel-Reduktion während des Versuchs  
Vs-Nr. 080277

Auf der Basis dieser prinzipiellen Vorgehensweise wurden insgesamt 16 auswertbare Versuche durchgeführt. Tabelle 6.11 gibt einen zusammenfassenden Überblick über charakteristische Kenndaten und Ergebnisse. Versucht man,

Versuchs- Nummer	$q_A$ 1)	$q_E$ 2)	$\tau$ 1)	$t_v$ 1)	$\rho$ 2)	$E_T$	$E_{Sch}$	$\Delta H$
	$[\bar{kW/m}]$	$[\bar{kW/m}]$	$[\bar{s}]$	$[\bar{s}]$	$[\bar{\$/s}]$	$[\bar{J/g}]$	$[\bar{J/g}]$	$[\bar{J/g}]$
141176	18.75	181	0.340	0.455	1.36	1076	1856	856
081276	17.5	154	0.38	0.575	1.24	1060	1881	829
101276	17.5	236	0.290	0.48	1.56	1218	2110	927
070177	17.5	107	0.79	1.26	0.66	1088	1858	812
200177	18.75	43	1.423	1.3	0.40	798	1858	634
080277	15.0	975	0.032	0.07	10.15	858	1738	710
110277	15.0	572	0.104	0.24	3.72	1063	2076	840
170277	14.4	414	0.078	0.22	4.72	961	1921	777
220277	13.75	268	0.253	0.53	1.75	1000	1972	789
110377	20.0	64	4.55	5.35	0.15	1302	1945	852
150477	13.75	780	0.038	0.08	8.67	825	1770	686
190477	18.75	750	8.08	0.125	4.66	1177	1947	930
260477	15.0	285	0.16	0.29	2.58	925	1819	750
280477	21.25	57	2.25	2.25	0.27	1201	1863	836
030577	16.25	122	0.46	0.740	1.05	890	1669	700
060577	15	280	0.17	0.285	3.4	784	1530	655

1) gemessen  $\pm$  5%

2) errechnet

Tab. 6.11 Überblick über charakteristische Ergebnisse der Serien zur Simulation von TOP-Unfällen

diese Resultate zu korrelieren, so ergibt sich zunächst ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Stabileistung (bzw. der Gesamtleistung) zum Zeitpunkt des Auftretens der ersten Ejektionen und dem Zeitabschnitt von der Einleitung der Transiente bis zu diesem Zeitpunkt. Dieser Zusammenhang läßt sich

anhand der experimentellen Ergebnisse mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate mathematisch darstellen. Es gilt (vgl. auch Abb. 6.35)

$$q_v = \text{const.} / t_v \quad (6.14)$$

mit

$q_v$  : Versagensstableistung in kW/m

$t_v$  : Versagenszeit in ms

const.: 90234.5 kW/m .

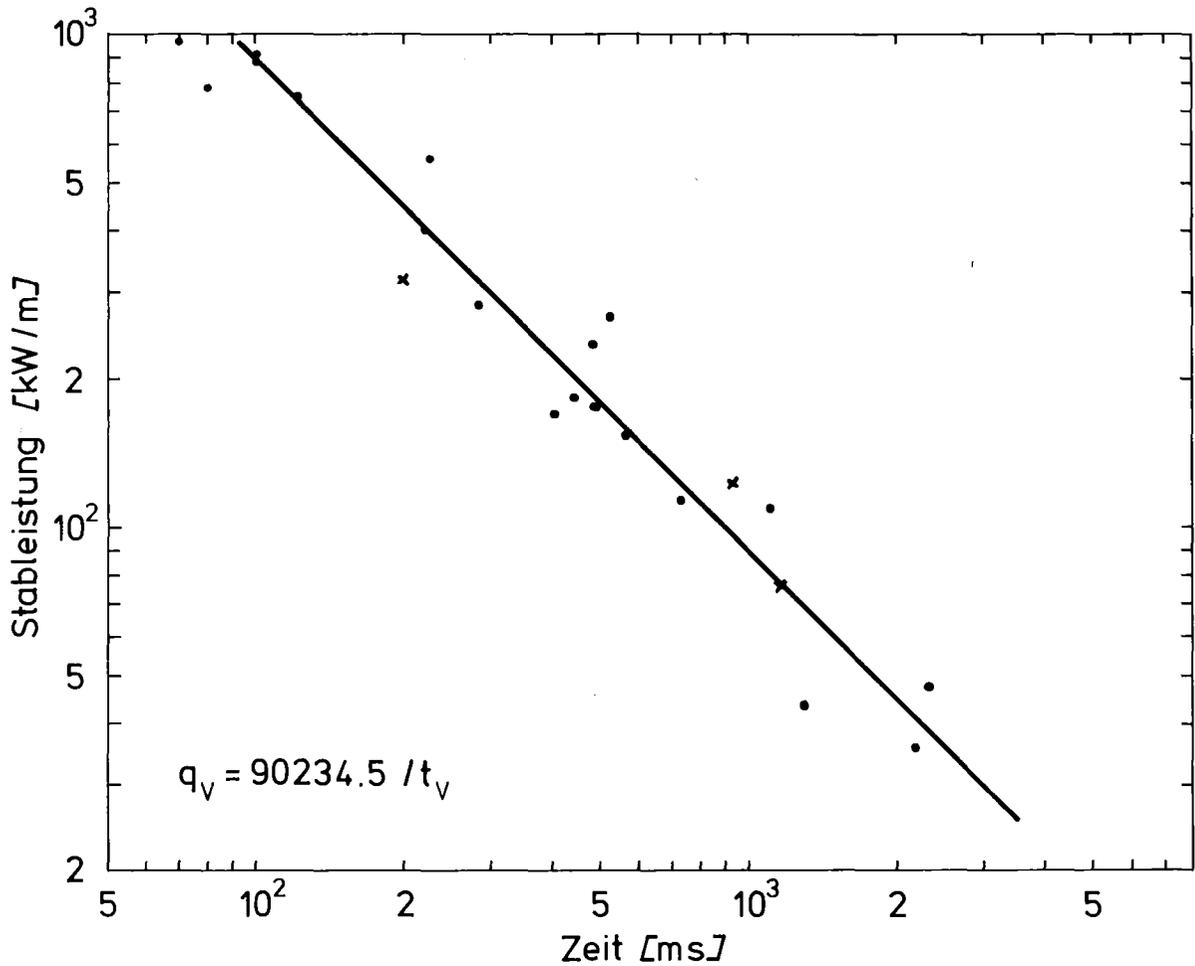


Abb. 6.35 Korrelation zwischen Versagensleistung  $q_v$  und Versagenszeit  $t_v$ , wie sie sich aus den eigenen TOP-Simulationsexperimenten ergibt. Versagenskriterium : Beginn der ersten  $UO_2$  - Ejektionen.

Dieser Zusammenhang gewinnt an Bedeutung, wenn man Gl. 6.7 und 6.14 mit einander vergleicht. Aus diesem Vergleich ergibt sich zunächst der Zusammenhang zwischen Anfangsleistung  $q_o$  und Versagensleistung  $q_v$ , der lautet

$$q_v = q_o e^{t_v/\tau} \quad (6.15)$$

Der Vergleich zwischen Gl. 6.14 und Gl. 6.15 liefert sodann einen mathematischen Zusammenhang für die Abhängigkeit der Versagenszeit  $t_v$  von der Zeitkonstante  $\tau$ , der die Vorausberechnung von  $t_v$  gestattet, wenn  $\tau$  und  $q_0$  bekannt sind. Dieser Zusammenhang lautet

$$\tau = t_v / \ln(\text{const.}/q_0 t_v), \quad \tau \text{ und } t_v \text{ in ms, } q_0 \text{ in kW/m} \quad (6.16)$$

und ist auf der Abb. 6.36 für drei verschiedene  $q_0$ -Werte grafisch dargestellt.

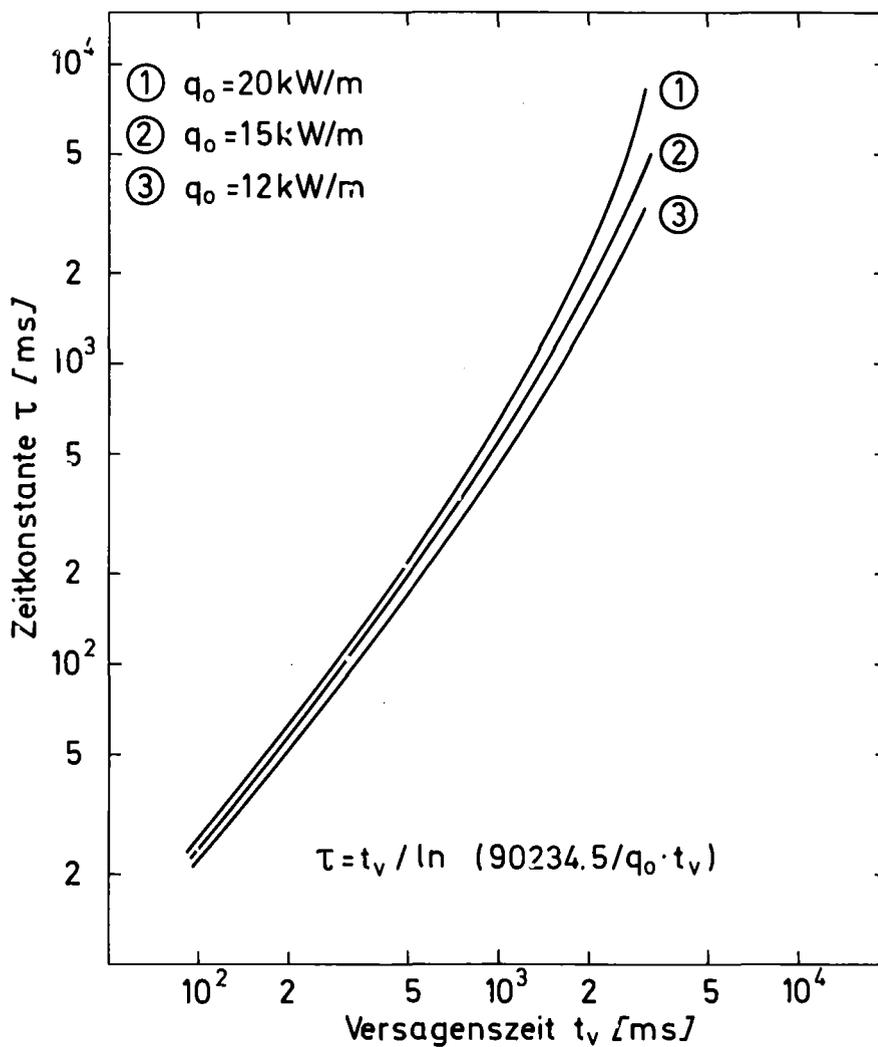


Abb. 6.36 Korrelation zwischen Versagenszeit  $t_v$  und Zeitkonstante  $\tau$  mit  $q_0$  als Parameter.

Diese implizite Darstellung wurde der besseren Übersicht wegen für  $q_0 = 20 \text{ kW/m}$  und durch den Ansatz  $\tau = a t_v^b$  auf die Form

$$\tau = 4.89 \cdot 10^{-3} t_v^{1.74}, \quad \tau \text{ und } t_v \text{ in ms} \quad (6.16a)$$

gebracht, woraus sich dann für  $t_v$  die übersichtliche Beziehung

$$t_v = 132 \tau^{0.574}, \quad t_v \text{ und } \tau \text{ in ms} \quad (6.16b)$$

ableiten läßt. Das Maß der Übereinstimmung der Beziehungen 6.16 und 6.16a kann man der Abb. 6.36a entnehmen.

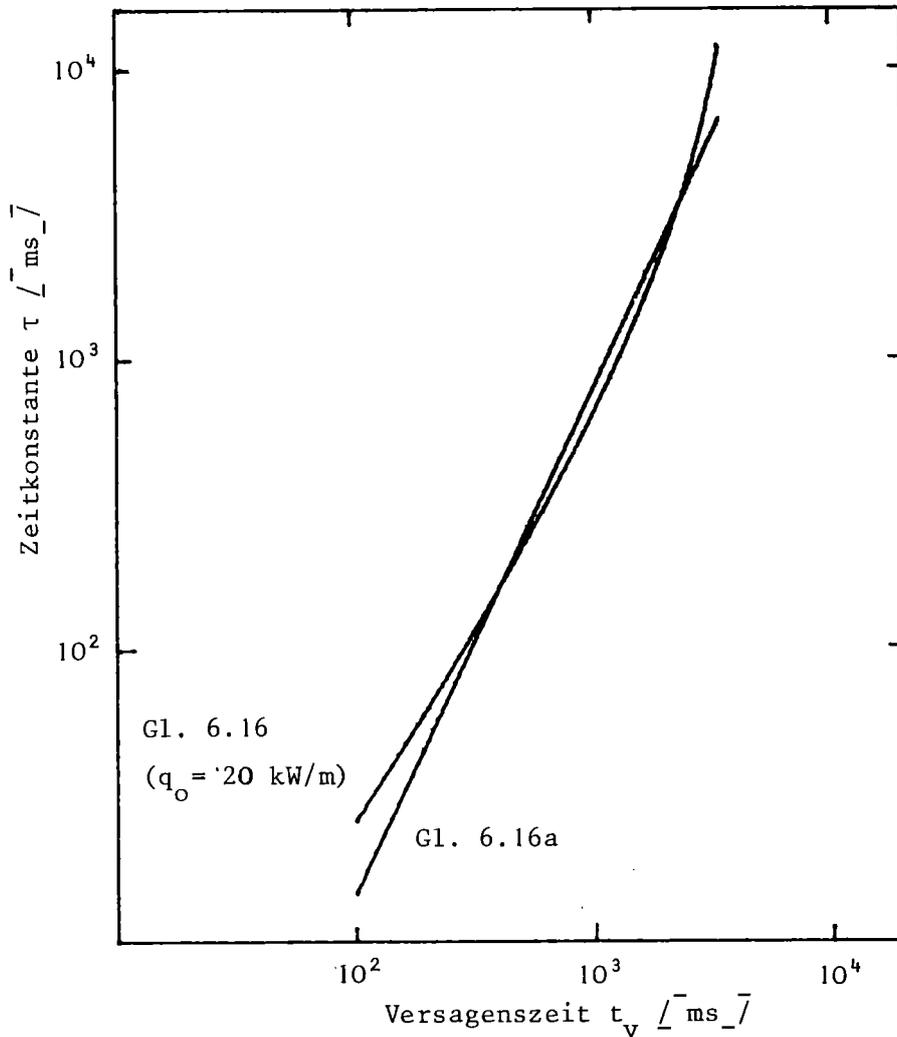


Abb. 6.36a Vergleich der Beziehungen 6.16 und 6.16a

Aus den Gleichungen 6.13 und 6.16 läßt sich nun eine Korrelation zwischen der Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  und der sich daraus ergebenden Versagenszeit  $t_v$  ableiten, in der nur noch die Anfangsstableistung  $q_0$  als Parameter vorkommt:

$$\dot{\rho} = 193 \{t_v / \ln(\text{const.}/q_0 t_v)\}^{-0.85} \text{ \$/s, } t_v \text{ in ms, } q_0 \text{ in kW/m.} \quad (6.17)$$

Aus dem Vergleich zwischen 6.13 und 6.16a lassen sich ebenfalls einfachere Beziehungen ableiten:

$$\dot{\rho} = 17.75 \cdot 10^3 t_v^{-1.48} \text{ \$/s, } t_v \text{ in ms} \quad (6.17a)$$

bzw.

$$t_v = 743 \dot{\rho}^{-0.675} \text{ ms, } \dot{\rho} \text{ in \$/s.} \quad (6.17b)$$

Eine zusammenfassende Dokumentation aller TOP-Experimente findet man im Anhang 2.

6.3 Experimente zum Verhalten von direkt elektrisch beheizten  
UO<sub>2</sub>-Stäben beim Ausfallen der Kühlung und verzögerten Ein-  
leitung von elektrisch applizierten Leistungstransienten  
(LOF-driven TOP-Experimente)

Ziel dieser Kategorie von Experimenten war die Ermittlung von Versagenszeiten von UO<sub>2</sub>-Stäben, die sich infolge des Unterbleibens der Helium-Kühlung im Augenblick der Einleitung der Leistungstransiente auf einem thermisch flacheren Niveau befanden (außen wärmer, innen kälter) als bei einem TOP-Unfall. In der nuklearen Störfallanalyse beschreibt der LOF-driven TOP-Unfall die Situation, die in einem SBR entsteht, wenn während eines LOF-Unfalls positive Reaktivitätsbeiträge - entstanden durch den Natrium-Verlust und die Hüllenmaterialbewegung - das Core schließlich oberhalb des prompt-kritischen Zustands in eine hydrodynamische Zerlegungsphase führen /39/. Bei der Simulation am EPBF-Versuchsstand war die Nachbildung dieses Zustands nicht möglich. Es wurde jedoch davon ausgegangen, daß sich durch die unten beschriebene Vorgehensweise wertvolle Informationen hinsichtlich der Auswirkungen von nuklearen LOF driven TOP-Störfälle auf noch intakte Stäbe im Core ergeben.

Der Versuchsablauf war bis zum Erreichen des stationären Zustands identisch mit dem Ablauf bei den LOF- und TOP-Experimenten. Danach ließ man bei konstanter Leistung die Helium-Kühlung ausfallen. Ein paar Sekunden später wurde dann die Exkursionsphase eingeleitet. Beim Versuch VS.-Nr. 230377 wurde 4 s nach dem Ausfallen der Kühlung die TOP-Phase eingeleitet. Der Umschaltvorgang war nach weiteren 0.66 s abgeschlossen und der transiente Leistungsanstieg begann.

Die Beschleunigungsspannung betrug

$$U = 88 \text{ V.}$$

Der Leistungsanstieg folgte der Beziehung

$$N = 1400 e^{t/0.6} \text{ W.}$$

In der Abb. 6.37 kann man den theoretischen und experimentellen Verlauf der Leistung über die Zeit nach der Einleitung der Exkursion grafisch dargestellt sehen.

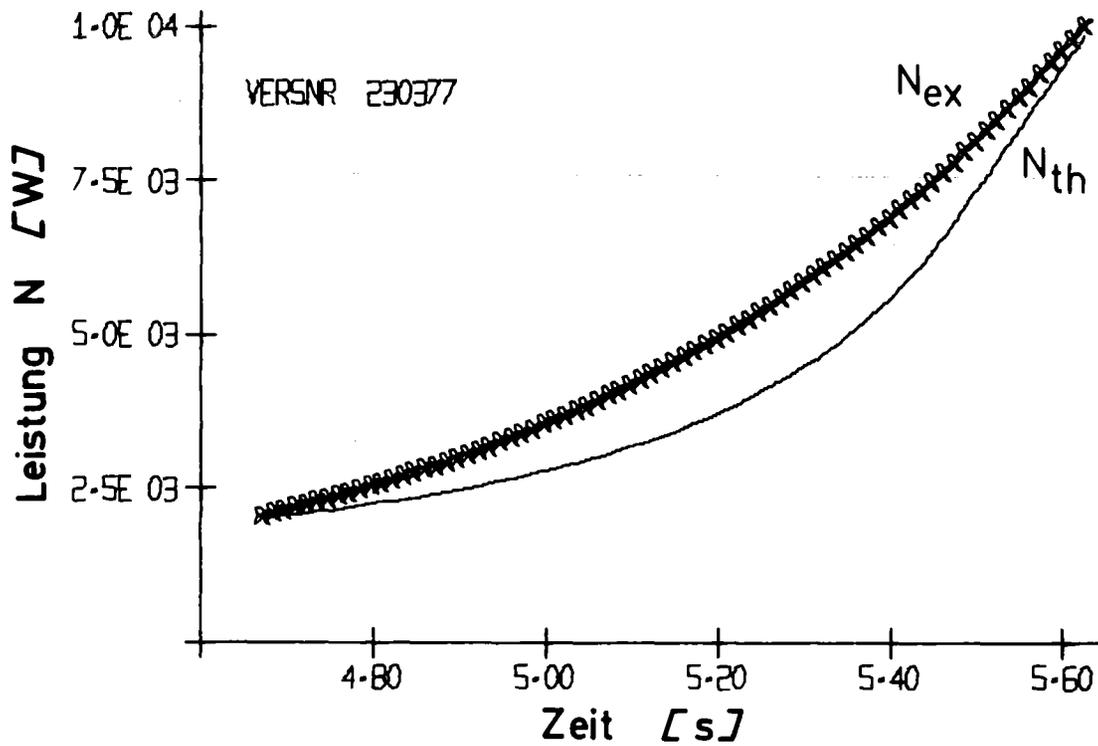


Abb. 6.37 LEISTUNGSVERLAUF - VERGLEICH EXPERIMENT / THEORIE

Auf der Abb. 6.38 sind die radialen Temperaturprofile im Stab für verschiedene Zeitpunkte während der Transiente zu sehen.

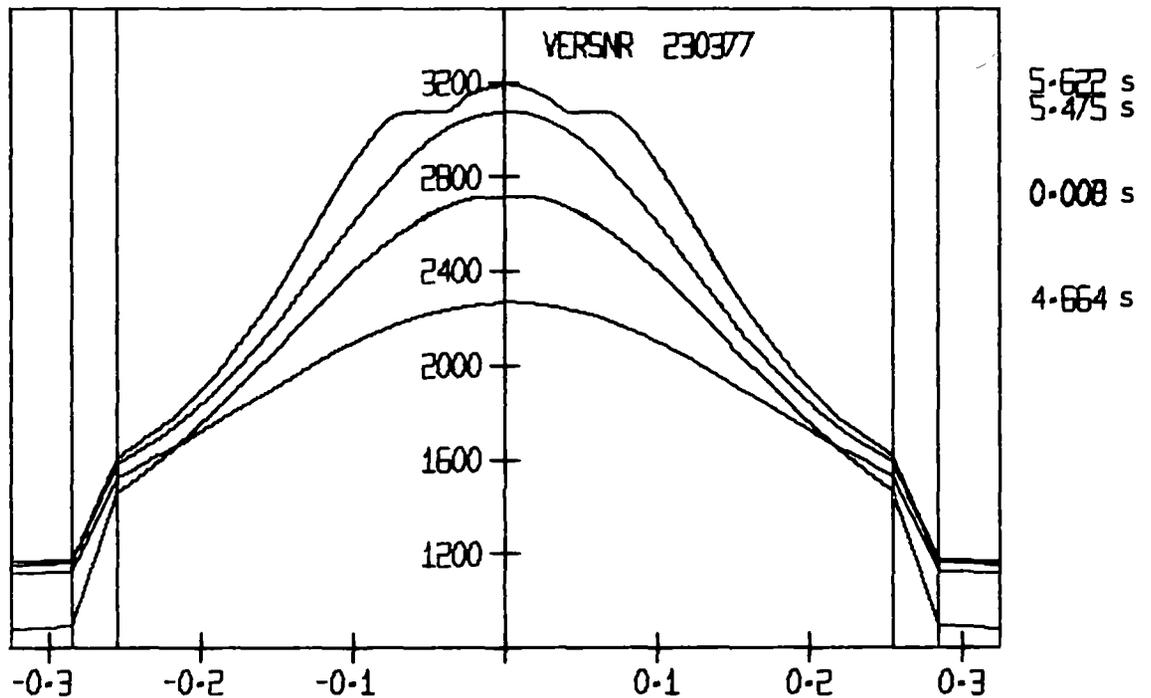


Abb. 6.38 TEMPERATURVERTEILUNG IM STAB WAHREND DER TRANSIENTE

Die experimentelle Zeitkonstante von  $\tau = 0.6$  entspricht einer Reaktivitätsrampe von  $\dot{\rho} = 0.84 \text{ \$/s}$  (vgl. Abb. 6.13). Nach VESUV begann das Brennstoffschmelzen 0.81 s nach Einleitung der Transiente. Die ersten Ejektionen geschmolzenen Brennstoffs und somit das Brennstoffversagen wurden nach 0.995 s beobachtet. Eine Auskunft über das Ausmaß der ejektierten Brennstoffmenge -

$$M_e \approx 0.23 \text{ g} \hat{=} 1.35 \% -$$

und der geschmolzenen Fraktion gibt die Übersichts-Aufnahme eines Pellet-Schliffes (Abb. 6.39). Allerdings ist letztere nicht eindeutig auf dem Bild erkennbar. Jedenfalls sieht es so aus, als wäre der Schmelzprozeß nicht zylindersymmetrisch verlaufen, denn man erkennt in der Mitte des Stabes Stellen, an denen das  $\text{UO}_2$  nicht zum Schmelzen kam (Mitte des Bildes).



HZ-44A-23.3.7.-4/3 20x

1 mm

Abb. 6.39 Pellet-Schliff nach dem LOF driven TOP -  
Simulations - Experiment Vs.-Nr. 230377.

Weitere Informationen über den Ablauf des Experiments kann man den Tab. 6.12. - 6.14 entnehmen.

Hinsichtlich der Korrelation zwischen Versagensstableistung  $q_v$  und Versagenszeit  $t_v$  erfüllen die ersten drei LOF d. TOP-Versuche genau Gl. 6.17 (vgl. Abb. 6.38 - Kreuz-Punkte). In Anbetracht dieser Tatsache wurde auf weitere Versuche verzichtet.

Eine Dokumentation der durchgeführten Experimente findet sich im Anhang 2 nach den TOP-Versuchen.

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 230377

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.84861E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21514E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.81308E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12743E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.88000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.25000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.60879E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.35193E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.17429E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.74405E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.72013E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.78348E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27157E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.50437E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.75953E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.61783E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.13096E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.60110E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.60000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.56225E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.54725E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17574E+04	J/G

Tab. 6.12 Eingabe-Daten, Stoffwerte und End-Daten für den Versuch  
Vs-Nr. 230377

SIMULATIONSEXPERIMENT : VS.-NR. : 230377

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	1400.	1.0	2712.	2174.	1456.	878.
0.500	1400.	1400.	1.0	2701.	2162.	1477.	920.
1.000	1400.	1400.	1.0	2684.	2154.	1486.	952.
1.500	1400.	1400.	1.0	2668.	2148.	1494.	979.
2.000	1400.	1400.	1.0	2655.	2145.	1503.	1002.
2.500	1400.	1400.	1.0	2645.	2143.	1512.	1025.
3.000	1400.	1400.	1.0	2637.	2144.	1522.	1047.
3.500	1400.	1400.	1.0	2630.	2146.	1534.	1070.
4.000	0.	0.	0.0	2625.	2150.	1546.	1092.
4.500	0.	0.	0.0	2341.	2004.	1533.	1112.
BEGINN DER TRANSIENTE							
4.665	2010.	2033.	1.4	2265.	1959.	1524.	1116.
4.670	2018.	2050.	1.4	2267.	1961.	1524.	1117.
4.720	2102.	2228.	1.5	2293.	1972.	1525.	1118.
4.770	2196.	2422.	1.6	2321.	1985.	1525.	1119.
4.820	2301.	2632.	1.6	2350.	1998.	1526.	1120.
4.870	2418.	2861.	1.7	2381.	2013.	1527.	1121.
4.920	2551.	3110.	1.8	2415.	2029.	1529.	1123.
4.970	2702.	3380.	1.9	2450.	2046.	1531.	1124.
5.020	2874.	3674.	2.1	2489.	2064.	1533.	1126.
5.070	3072.	3993.	2.2	2531.	2085.	1536.	1128.
5.120	3300.	4340.	2.4	2576.	2107.	1539.	1130.
5.170	3566.	4717.	2.5	2626.	2132.	1543.	1132.
5.220	3878.	5127.	2.8	2680.	2160.	1547.	1135.
5.270	4250.	5572.	3.0	2740.	2190.	1551.	1138.
5.320	4696.	6057.	3.4	2807.	2224.	1557.	1141.
5.370	5241.	6583.	3.7	2881.	2263.	1563.	1144.
5.420	5921.	7155.	4.2	2966.	2306.	1569.	1148.
5.470	6795.	7777.	4.9	3063.	2356.	1577.	1152.
5.520	7801.	8453.	5.6	3074.	2400.	1585.	1156.
5.570	8806.	9187.	6.3	3074.	2439.	1595.	1161.
5.620	9833.	9986.	7.0	3175.	2487.	1606.	1167.
5.622	9884.	10027.	7.1	3184.	2490.	1607.	1167.

Tab. 6.13 Theoretischer, experimenteller und normierter (theoretisch) Leistungsverlauf (PSTHEO, PSEXPE, PSNORM) beim Versuch Vs-Nr. 230377, dazu der Temperaturverlauf im Zentrum, im Mittel, an der Oberfläche und in der Hülle (TBZ, TBM, TBA, THM) des Stabes

SIMULATIONSEXPERIMENT : VS.-NR. : 230377

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	220.	613462.	613682.	100.0
0.500	1400.	0.0	220.	608490.	652707.	99.4
1.000	1400.	0.0	220.	604486.	692673.	98.8
1.500	1400.	0.0	220.	601675.	733811.	98.2
2.000	1400.	0.0	220.	599881.	775954.	96.3
2.500	1400.	0.0	220.	598989.	818990.	94.4
3.000	1400.	0.0	220.	598894.	862821.	92.5
3.500	1400.	0.0	220.	599511.	907363.	90.7
4.000	0.	0.0	0.	600770.	952339.	88.9
4.500	0.	0.0	0.	539199.	890768.	83.7
BEGINN DER TRANSIENTE						
4.665	2010.	0.0	312.	522172.	874366.	82.0
4.670	2018.	0.0	314.	522605.	875426.	82.0
4.720	2102.	0.0	327.	527137.	886366.	81.5
4.770	2196.	0.0	342.	532052.	897970.	81.0
4.820	2301.	0.0	358.	537401.	910323.	80.5
4.870	2418.	0.0	377.	543246.	923523.	80.1
4.920	2551.	0.0	398.	549660.	937690.	79.6
4.970	2702.	0.0	422.	556729.	952961.	79.1
5.020	2874.	0.0	449.	564560.	969506.	78.6
5.070	3072.	0.0	480.	573279.	987527.	78.2
5.120	3300.	0.0	517.	583042.	1007269.	77.7
5.170	3566.	0.0	559.	594043.	1029038.	77.2
5.220	3878.	0.0	609.	606525.	1053213.	76.8
5.270	4250.	0.0	669.	620800.	1080275.	76.3
5.320	4696.	0.0	740.	637272.	1110848.	75.8
5.370	5241.	0.0	828.	656490.	1145763.	75.4
5.420	5921.	0.0	938.	679218.	1186168.	74.9
5.470	6795.	0.0	1080.	706588.	1233730.	74.5
5.520	7801.	2.25	1244.	730496.	1280962.	74.0
5.570	8806.	4.00	1408.	750233.	1327287.	73.6
5.620	9833.	6.25	1598.	799836.	1407020.	73.2
5.622	9884.	6.25	1607.	813081.	1421872.	73.1

Tab. 6.14 Geschmolzene Fraktion, Energie-Zufuhr, Enthalpie, Gesamtenergie und Kühlmittelreduktion während des Versuchs Vs-Nr. 230377



## 7. Diskussion der erzielten Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf nukleare Verhältnisse, Schlußfolgerungen und Fehlerbetrachtung

### 7.1 LOF - Experimente

Die eigenen experimentellen Ergebnisse und deren theoretische Nachrechnung erlauben folgende eindeutige Aussagen hinsichtlich des Ablaufes eines mit elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stäben simulierten LOF-Unfalls:

- Als Versagenskriterium ist das Durchschmelzen der Hülle anzusehen.
- Auf der Basis dieses Kriteriums ergab sich zwischen der aktuellen, über die gesamte Unfallzeit konstant gehaltenen Stableistung des  $UO_2$ -Stabes und der Versagenszeit bei einer Kühlmitteldrosselung von 12 %/s folgender Zusammenhang:

$$t_v = 376.6 q_o^{-1.244}$$

- Unter der Randbedingung einer über die gesamte Unfallzeit konstanten Leistung wird die Schmelztemperatur des Brennstoffs nicht erreicht.
- Der Schmelzprozeß der Hülle verläuft derart asymmetrisch, daß eine generelle mathematische Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war. Der Rekristallisationsprozeß des geschmolzenen Hüllmaterials kann - je nach  $UO_2$ -Oberflächentemperatur - auch auf der  $UO_2$ -Oberfläche stattfinden.

Ein Vergleich der eigenen Resultate mit in-pile-Experimenten erscheint zunächst riskant. Der Versuch wurde jedoch unternommen und zum Vergleich wurden die TREAT-Experimente aus den Serien R (R3 - R8) und L (L2 - L4) herangezogen. In der Tab. 7.1 wurden die markantesten Resultate aufgelistet. Rechnet man nun die elektrische Stableistung der EPBF-Experimente auf der Basis des Enthalpie-Kriteriums in die äquivalente nukleare Stableistung um, so kann man Stableistung und Versagenszeit der in-pile- und der EPBF-Experimente miteinander korrelieren. Dieses Ergebnis ist auf der Abb. 7.1 zu sehen. Es zeigt, daß zwei der eigenen Versuche (190876 und 230376) recht gut mit den TREAT-Experimenten R 3 bzw. L 2 in Einklang zu bringen sind. Darüberhinaus kann man der Abb. 7.1 entnehmen, daß generell bei den EPBF-Experimenten Hüllen-Versagen später auftrat als bei den TREAT-Experimenten. Schließlich sieht man, daß für einen Teil dieser

in - pile - Experimente ein qualitativ ähnlicher Zusammenhang nährlich

$$t_v = a q^b$$

existiert, wie bei den eigenen (EPBF)-Experimenten festgestellt wurde.

	$q_e$ [kW/m]	$q_n$ [kW/m]	$t_v$ [s]	$\dot{D}_R$ [%/s]	$E_G$ [J/g]
R 3		31.7	14.4	12	1030
R 4		31	8.1	12	880
R 5		31	7.75	12	890
R 6		31	7.83	12	-
R 7		30.5	8.26	28	-
R 8		35	10.5	12	-
L 2		35.8	11.3	12	-
L 3		30.5	13.4	?	-
L 4		32.8	11	?	-
270876	10	→ 23.1	19.8	12	720
240876	12.5	→ 29.3	16.8	12	743
190876	13.75	→ 32.1	14.3	12	750
280676	15	→ 34.7	14.6	12	752
230376	16.25	→ 36.4	11.7	12	754
180376	17.5	→ 38.4	10.5	12	756
020276	18.75	→ 40.8	10	12	764
021275	20	→ 42.8	9.5	12	775
141175	22	→ 46.4	7.2	12	802

Tab. 7.1 Vergleich charakteristischer Kenndaten von in-pile und eigenen (EPBF) - Experimenten.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Simulationsexperimente zum LOF-Unfall recht befriedigende Resultate geliefert haben. Der Beginn des Hüllen-Durchschmelzens erwies sich als ein Versagenskriterium, das erlaubt, den Versagenszeitpunkt aufgrund der aufgeprägten Anfangstableistung recht genau vorzuberechnen. Die aufgrund der eigenen experimentellen Resultate ermittelte Korrelation

$$t_v = f(q)$$

ließe sich unter Berücksichtigung verschiedener Reaktor-spezifischer Randbedingungen sicherlich auch auf nukleare Verhältnisse übertragen.

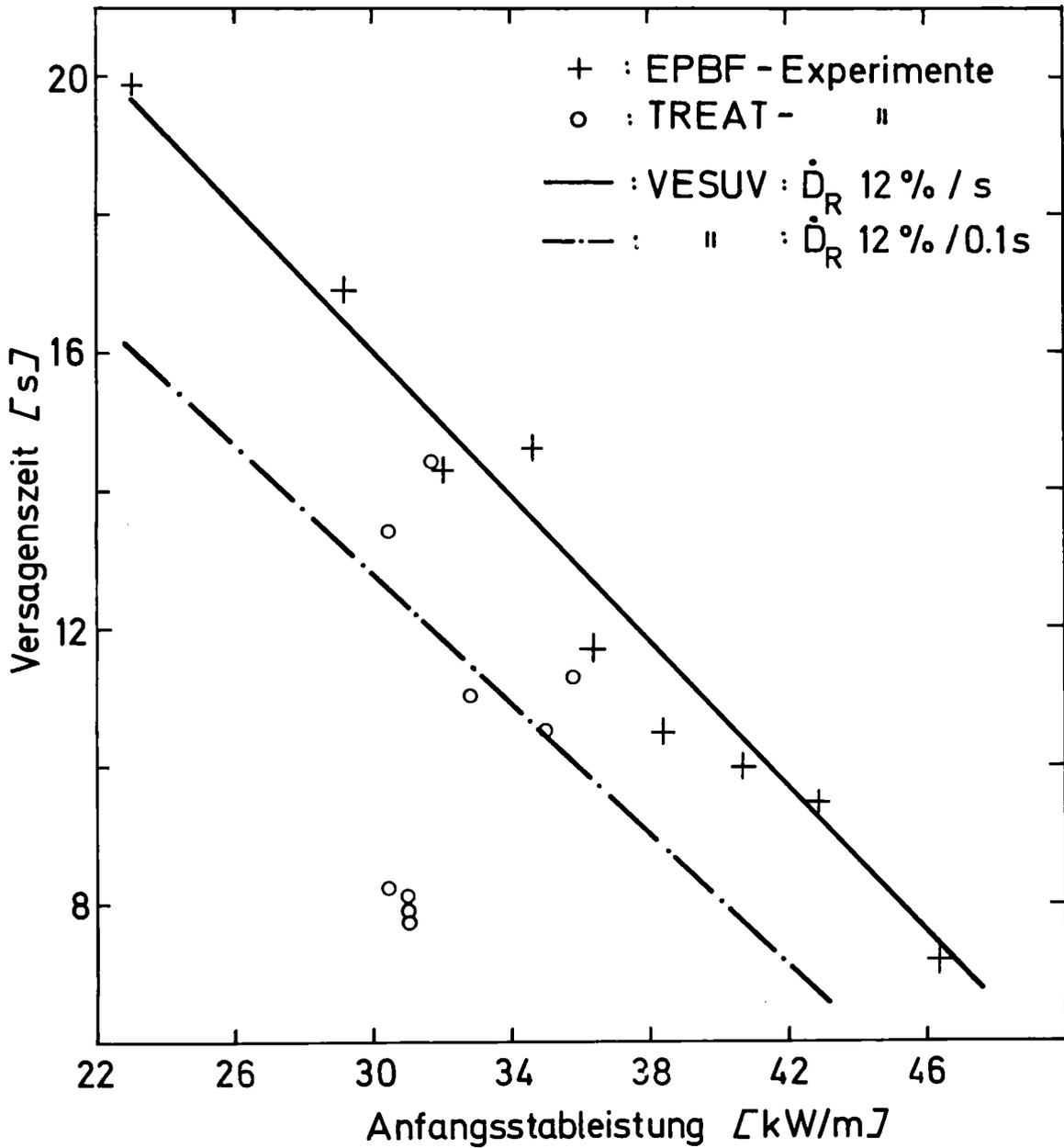


Abb. 7.1 Korrelation zwischen Versagenszeit und Anfangsstableistung für in-pile (TREAT) und eigene (EPBF) LOF-Simulationsexperimente. Dazu Resultate des Programms VESUV mit der Kühlmittelabnahmerate als Parameter.

## 7.2 TOP- und LOF driven TOP-Experimente

Bereits im Abschnitt 6.2 wurde erwähnt, daß zur Kennzeichnung des Zeitpunkts des Versagens eines Brennstabs der Augenblick der Registrierung der ersten Ejektionen geschmolzenen Brennstoffs gewählt wurde. Dieses Kriterium zeichnet sich dadurch aus, daß es experimentell stets registrierbar ist (Hochfrequenz-Kinematographie) und somit als ein sehr guter Bezugspunkt für das theoretische Ende der Transiente dargestellt ist. Darüberhinaus ist es reaktorphysikalisch notwendig, einen Brennstab als "versagt" anzusehen, wenn sein Brennstoff auf der Hüllen-Oberfläche erscheint. Im Sinne der Unfallanalyse wäre dieses Kriterium als leicht optimistisch anzusehen, nachdem bereits als Versagenskriterium das Schmelzen der Hülle diskutiert wird.

- Auf der Basis des "Ejektionen-Kriteriums" versagen elektrisch applizierten Leistungstransienten ausgesetzte  $UO_2$ -Stäbe nach einer Zeit  $t_v$ , die mit der Zeitkonstante  $\tau$  des exponentiellen Leistungsanstiegs und der Anfangstableistung  $q_0$  wie folgt gekoppelt ist:

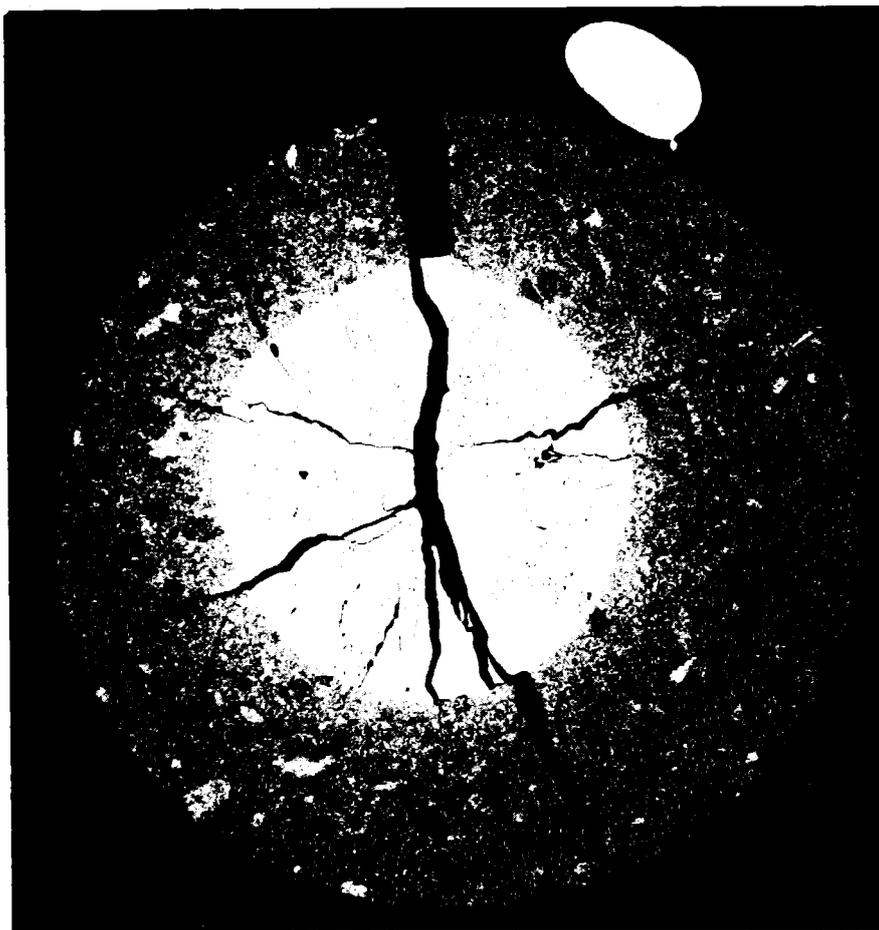
$$\tau = t_v / \ln (90234.5 / q_0 \cdot t_v) \text{ ms, } t_v \text{ in ms, } q_0 \text{ in kW/m}$$

- Die hierbei ejizierten Brennstoffpartikel erreichen Geschwindigkeiten in der Größenordnung von

$$v = 150 - 250 \text{ cm/s}$$

- Die ejektierte Brennstoffmenge blieb stets unterhalb 5% der gesamten Brennstoffmenge
- Die geschmolzene Brennstoffmasse blieb stets unter 30%. Dieser maximale Wert wurde beim Versuch Vs-Nr. 101276 erreicht (Abb. 7.2). Allerdings muß hierbei betont werden, daß diese Schmelzfraktionen nicht zum Zeitpunkt des Versagens nach dem Ejektionen-Kriterium ermittelt wurden sondern anhand von metallurgischen Nachuntersuchungen. Dies bedeutet, daß die Schmelzfraktionen zum Zeitpunkt des Versagens kleiner waren; Größenordnung: 10 - 20%
- Aufgrund der metallurgischen Nachuntersuchungen konnte gezeigt werden, daß während eines TOP-Unfalls Hüllen-Material in den Brennstoff hineindiffundiert. Dieses Phänomen wurde im Rahmen dieser Abhandlung nicht weiter verfolgt, da seine Feststellung mit dem Abschluß der Arbeiten

zusammenfiel. Weitere Untersuchungen dieses Phänomens könnten jedoch von Interesse hinsichtlich des Dispersionsverhaltens des Brennstoffs sein. Da bei einem SBR-Störfall die Aufheizung des Brennstoffs über den Zeitpunkt des Versagens eines Einzelstabs hinaus andauert, kann das im Brennstoff eingeschlossene Hüllenmaterial Auswirkungen auf dessen Dispersionsverhalten haben. Diese Behauptung basiert darauf, daß der Stahl einen größeren linearen Ausdehnungskoeffizienten aufweist als das  $UO_2$  (bei 3000 K liegt der Faktor 2 dazwischen). Daher werden die Kräfte, die den Brennstoff auseinanderzutreiben versuchen zusätzlich verstärkt.



HZ-44A-O-1-4/1 10 x geätzt 1 mm

Abb. 7.2 Pellet-Schliff nach dem TOP - Versuch  
Vs.-Nr. 101276 zur Verdeutlichung der bei  
den eigenen Versuchen maximal aufgetre-  
tenen Brennstoff-Schmelzfraktion.

Mit diesen Bemerkungen wurde bereits damit begonnen, die eigenen Versuche und Ergebnisse auf nukleare Verhältnisse zu übertragen. Diese Betrachtungsweise konnte dadurch konsistent gestaltet werden, daß beiden Kategorien von Experimenten und Analysen (out-of-pile und in-pile) gemeinsame Bezugspunkte und gemeinsame Größen-Korrelationen physikalisch sinnvoll zugeordnet werden konnten.

Ausgehend von der Annahme, daß es infolge einer Leistungstransiente sowohl unter in-pile- als auch unter out-of-pile-Bedingungen zum Brennstabversagen kommen wird, wurde zuerst die Frage nach dem Zeitpunkt des Versagens in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Einleitung der Transiente gestellt. Zu **Beantwortung** der Frage wurden der Literatur Angaben über Randbedingungen von in-pile-Experimenten und -Rechnungen, die zu diesem Zweck durchgeführt wurden entnommen und **unter den speziellen Gesichtspunkten** dieser Arbeit ausgewertet. Das erste Resultet dieser Literatur-Auswertung bezog sich auf den Zusammenhang zwischen Reaktivitätsrampe und Reaktorperiode bzw. Zeitkonstante des Leistungsanstiegs und wurde bereits auf der Abb. 6.13 gezeigt. Ein weiteres Ergebnis ist auf der Abb. 7.3 zu sehen. Es zeigt den Zusammenhang zwischen der Versagenszeit  $t_v$  und der Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  für rechnerisch simulierte TOP-Störfälle für die deutschen SBR's SNR-300 und SNR-2. Dazu die jeweils für den Zeitpunkt des Versagens ermittelte normierte Reaktorleistung  $N_v/N_0$ .

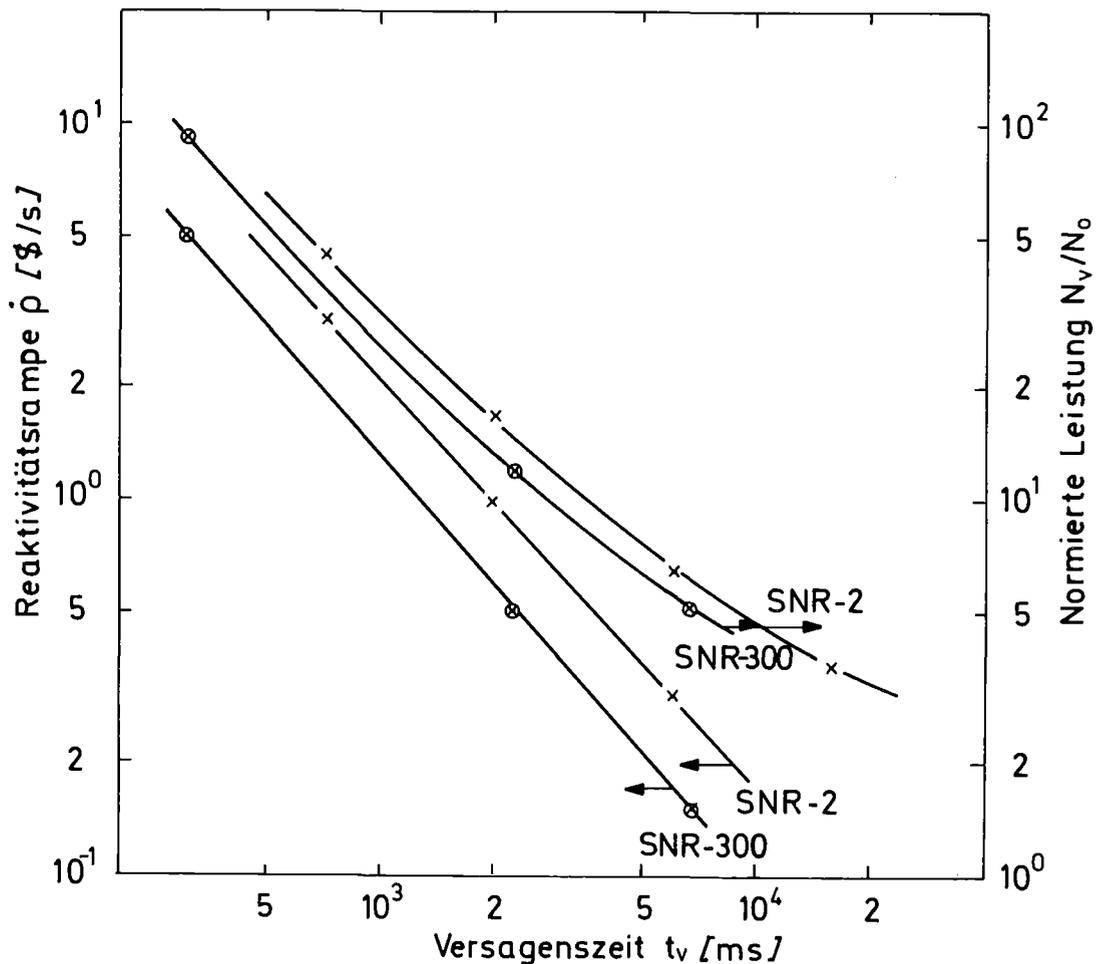


Abb. 7.3 Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  und normierte Leistung  $N_v/N_0$  zum Zeitpunkt des Versagens in Abhängigkeit von der Versagenszeit  $t_v$  anhand von Rechnungen für SNR-300 und SNR-2

	$q_o$	$q_o$	$\dot{\rho}$	$\tau$	$t_v$	$L_v$	$M_m$	$E_v$	$T_H$
	$[\bar{W}/\bar{g}]$	$[\bar{kW}/\bar{m}]$	$[\bar{\$/s}]$	$[\bar{s}]$	$[\bar{s}]$	$[\bar{W}/\bar{g}]$	$[\bar{\%}]$	$[\bar{J}/\bar{g}]$	$[\bar{K}]$
H3	141.5	26.5	0.5	0.9	**	670		607	
H 4	177.2	33.2	0.5	1.28	1.28	1025	22.8	795	1029
H 5	153.8	28.8	0.5	1.1	1.90	920	16.7	753	1021
HUT 5-5B	88.6	16.9	0.5		4.80		49 *		1208
" 5-3A	144.1	27.5	0.5		3.20		47 *		1097
" 5-1B	200.8	38.3	0.5		3.68		65 *		1190
" 5-5A	89.6	17.1	0.5		**		31		1033
" 5-1A	198.1	37.8	0.5		**		55		1116
E 6	191.7	35.9	3	0.188	0.68	3670	78	1202	1172
E 7	170.4	31.9	3	0.180	0.58		32	988	900
E 8	149.0	27.9	3	0.200	0.52		69	1092	
HUT 3-5 B	94.9	18.1	3		0.8		61	1163	
3-3 A	147.3	28.1	3		0.58		53	1088	
3-1 A	200.8	38.3	3		0.70		73	1103	
HOP 3-3 C	145.2	27.7	3		0.80	2080	34	1027	
H 2	frisch		5	0.080	0.42		25	1193	
E 1	"		5	0.064	**		80	1591	
E 2	"		5	0.05	0.40		92	1800	
E 4	"		5	0.066	0.48			1424	
E 3	"		10	0.035	0.17		0	942	
* : errechnet zum Zeitpunkt des Versagens									
** : kein Versagen									

Tab. 7.2 Überblick über in-pile-Experimente zur Untersuchung der Auswirkungen von positiven Reaktivitätsrampen (TREAT-Series,  $\dot{\rho} = 0.5-10 \text{ \$/s}$ ).

Ein weiteres Ergebnis erhält man durch den Vergleich von in-pile-Experimenten mit rechnerischen Resultaten. Tab. 7.2 enthält eine Zusammenstellung von Daten aus mehreren in-pile-Experimenten, die zur Simulation von TOP-Störfällen mit Reaktivitätsrampen zwischen 0.5  $\beta/s$  und 10  $\beta/s$  durchgeführt wurden. Den Vergleich mit entsprechenden rechnerischen Resultaten erhält man durch die Abb. 7.4. Die durchgezogenen Linien stellen die Rechenergebnisse für den Zusammenhang zwischen Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  und Versagenszeit  $t_v$  für den SNR-300 und den SNR-2. Die Kreise entsprechen den Angaben über  $\dot{\rho}$  und  $t_v$  für die experimentellen Ergebnisse aus Tab 7.2. Die Abbildung verdeutlicht zwar, daß sowohl experimentell als auch theoretisch die Versagenszeit mit abnehmender Reaktivitätsrampe sich hinauszieht, zeigt aber auch, daß die experimentelle Streuung breit und die Abweichung von der Theorie teilweise groß ist. Zum letzteren Punkt ist jedoch zu sagen, daß bei den in-pile Experimenten die Angabe des Zeitpunkts des Versagens auf unterschiedliche Meßmethoden und Auswertungstechniken basiert. Es war leider nicht möglich, diese Angaben zu vereinheitlichen und zu einem über alle Experimente normiertes Versagenskriterium zu gelangen.

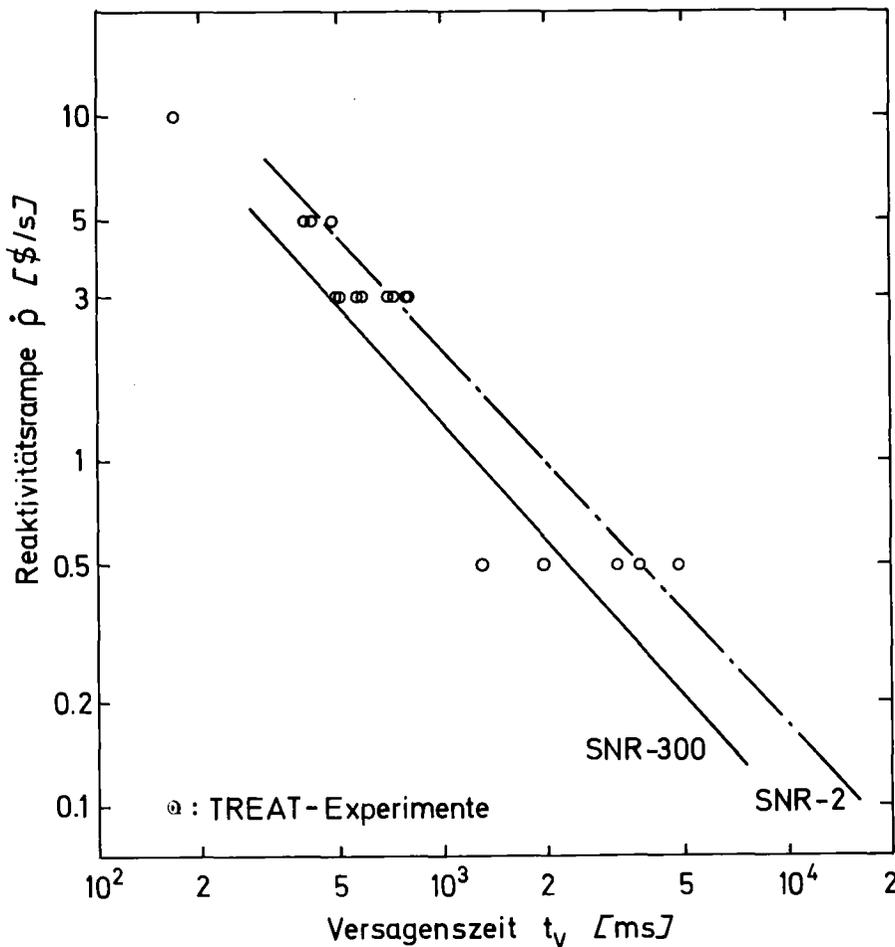


Abb. 7.4 Korrelation zwischen Reaktivitätsrampe  $\rho$  und Versagenszeit  $t_v$ . Vergleich zwischen Theorie (SNR - 300, SNR - 2) und TREAT - Experimenten

Zu einem konsistenten Vergleich zwischen den in-pile-Resultaten (Rechnungen und Experimenten) kommt man, wenn man sich der Gleichung 6.17,

$$\dot{\rho} = 193 \{t_v / \ln(90234.5/q_0 t_v)\}^{-0.85},$$

bedient. Auf der Abb. 7.4a ist dieser  $\dot{\rho} - t_v$  - Zusammenhang als Ergänzung der Abb. 7.4 eingetragen. Vergleicht man die auf der Abb. 7.4a dargestellten Resultate miteinander, so erhält man eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit. Aus dem Vergleich geht hervor, daß die eigenen out-of-pile-Experimente sowohl mit den theoretischen Resultate für das SNR-300 Mark 1A-Core als auch mit einer Reihe von in-pile-Experimenten (TREAT-Series) recht gute Übereinstimmung zeigen. Die SNR-2 -  $\dot{\rho} - t_v$  - Korrelation weicht deshalb ab, weil das den Rechnungen zu grunde gelegte (Schmelzfraction-)Versagens-Kriterium - bezogen auf die stärkeren SNR-2-Core-Stäbe (durchmesser ca. 7.6 mm) - naturgemäß zu längeren Versagenszeiten führt..

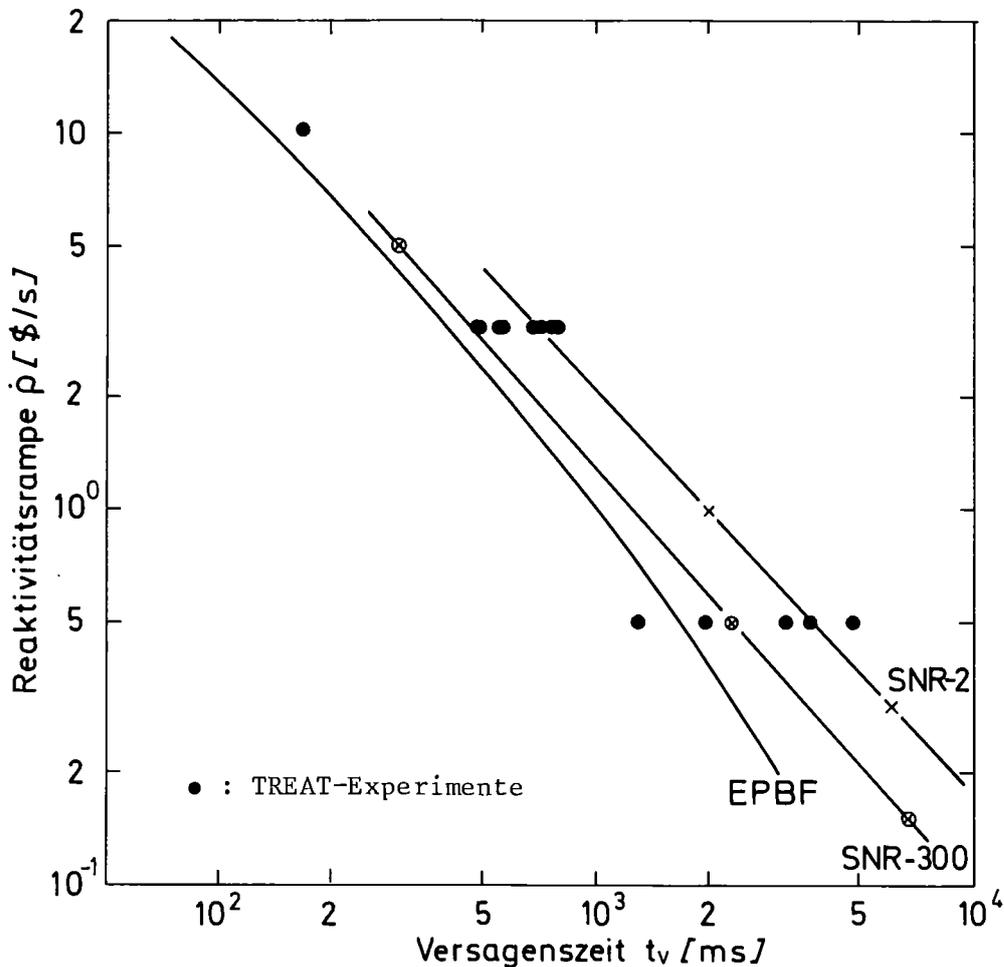


Abb. 7.4a Korrelation zwischen der Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  und der Versagenszeit  $t_v$ . Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und den eigenen Experimenten.

Weitere Vergleichsmöglichkeiten kann man den Abbildungen 7.5 und 7.6 entnehmen. Beiden Darstellungen liegen Vervollständigung von Literatur-Angaben und die eigenen Ergebnisse zugrunde. Auf der Abb. 7.5 ist der Zusammenhang zwischen der normierten Leistung zum Zeitpunkt des Versagens  $N_V/N_0$  und der bis dahin verstrichenen Versagenszeit  $t_V$  für die eigenen Experimente, eine Reihe von in-pile-Experimenten sowie für den SNR-300 (theoretische Ergebnisse) zu sehen. Abb. 7.6 zeigt für die gleichen Experimente sowie für den SNR-300 und den SNR-2 (theoretische Ergebnisse) den Zusammenhang zwischen der normierten Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und der Zeitkonstante  $\tau$ , die in der Zeit  $t_V$  zum Versagen der Prüflinge führte. Der Vergleich auf beiden Abbildungen liefert eine gute Übereinstimmung zwischen den in-pile-Experimenten und den eigenen Resultaten. Dagegen weichen die Rechenergebnisse sowohl für den SNR-300 als auch für den SNR-2 sehr stark von den Experimenten ab.

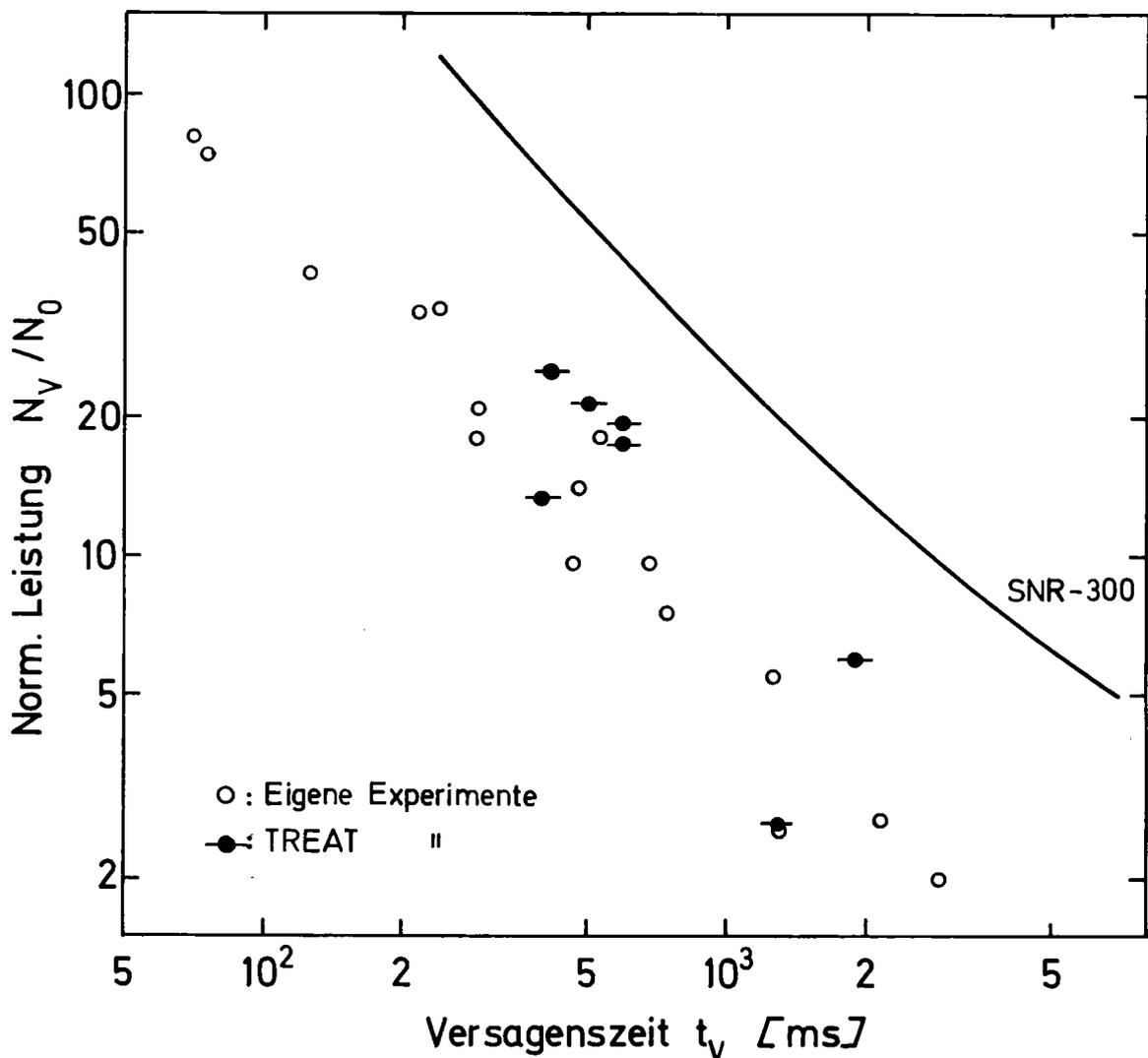


Abb. 7.5 Korrelation zwischen der normierten Leistung zum Zeitpunkt des Versagens  $N_V/N_0$  und der Versagenszeit  $t_V$ . Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und den eigenen Experimenten.

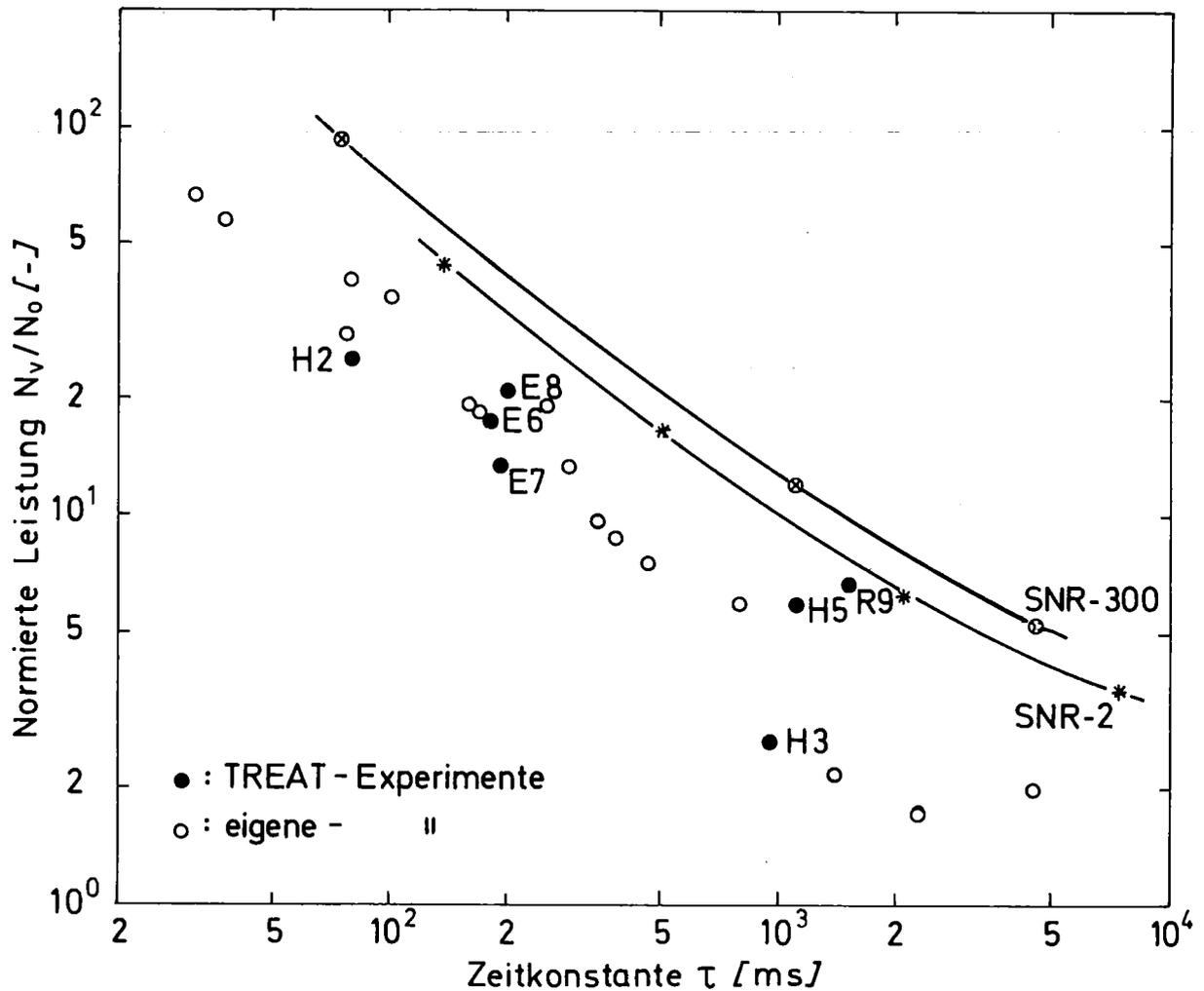


Abb. 7.6 Korrelation zwischen normierter Leistung zum Zeitpunkt des Versagens  $N_v/N_0$  und der entsprechenden Zeitkonstante  $\tau$ . Vergleich zwischen in-pile-Verhältnissen und eigenen Experimenten.

Diese Betrachtungen und Erkenntnisse hinsichtlich der Übertragbarkeit der eigenen Resultate auf in-pile-Verhältnisse, die bislang anhand der Auswertung der gesamten experimentellen Serien möglich waren, konnten auch bei der Verfolgung der Ereignisse von Einzelversuchen beobachtet werden. Als Beispiele werden der Ablauf der Ereignisse während der Experimente

- E 7 : TREAT-TOP-Experiment,
- E 8 : " " " ,
- F 2 : LOF d. TOP-Experiment /81/,
- Vs.-Nr. 141176 : (eigenes) out-of-pile TOP-Simulationsexperiment und
- Vs.-Nr. 101276 : " " " "

diskutiert (vgl. auch Abb. 7.7) und Ergebnisse aus Schliffen-Bildern präsentiert;

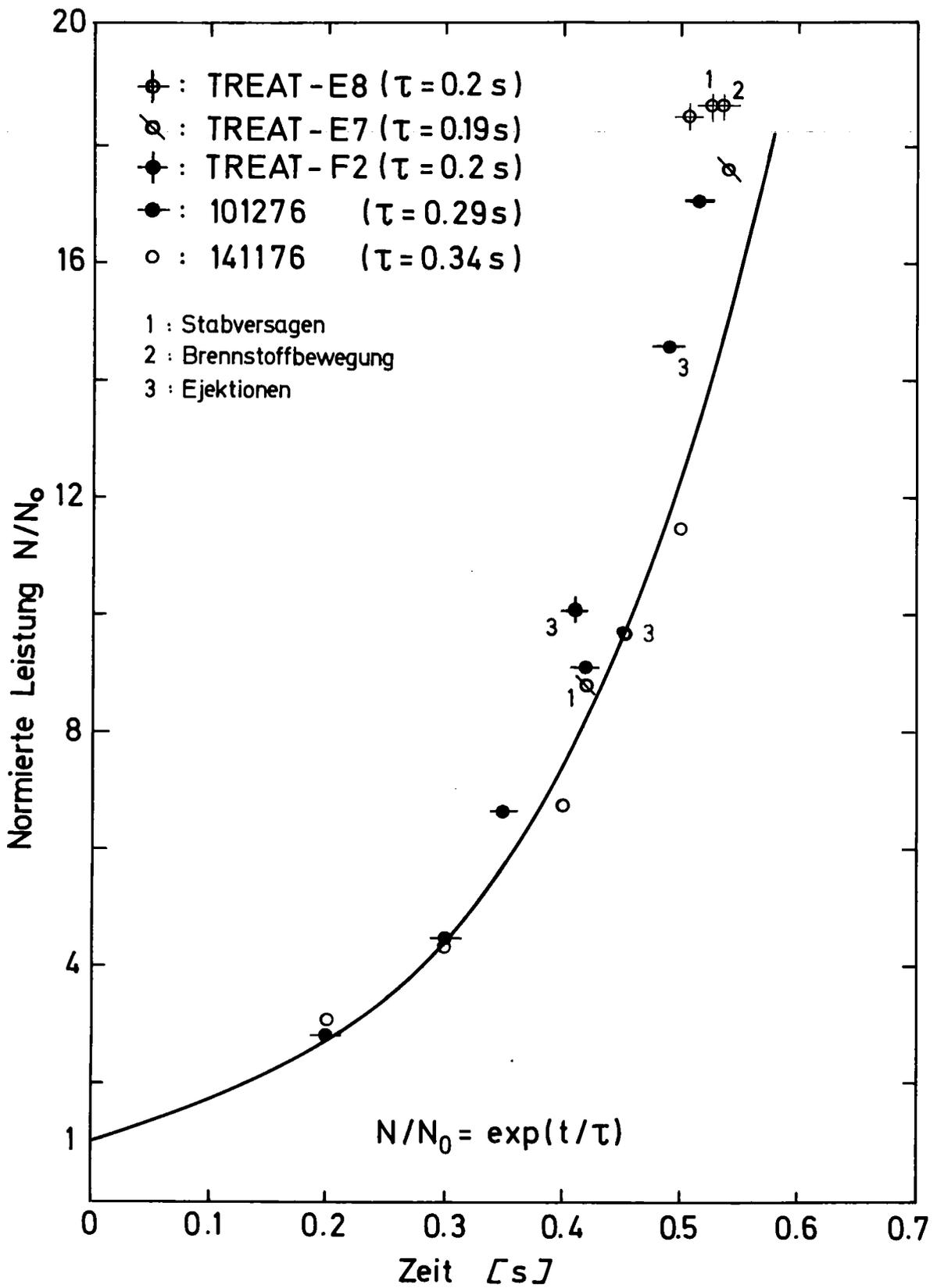


Abb. 7.7 Charakteristische Ereignisse hinsichtlich des Brennstabversagens während der in-pile Experimente E8, E7 und F2 und der eigenen Experimente Vs.-Nr. 101276 und 141176.

Drei wichtige Ergebnisse lassen sich der Abb. 7.7 entnehmen:

1. Versagenszeit und normierte Leistung zum Zeitpunkt des Versagens stimmen bei den Experimenten E 7, F 2 und 141176 jeweils sehr gut miteinander überein.
2. Beim LOF driven TOP - Experiment F 2 wurden Brennstoffejektionen beobachtet - der einzige Fall bei in-pile-Experimenten - etwa zur gleichen Zeit und bei der gleichen normierten Leistung wie beim eigenen out-of-pile-Experiment 141176.
3. Die Versagenszeiten bei den Experimenten E 8 und 101276 stimmen gut miteinander überein, wobei allerdings die normierte Leistung bei E 8 einen höheren Wert aufweist.

Eine weitere wichtige Information erhielt man bei Vergleich von Pellet-Schliffen aus dem TREAT-Experiment H 3 <sup>+)</sup>  mit Schliffen-Bildern aus den eigenen Versuchen. Der Vergleich zwischen den Photos auf den Abbildungen 6.41 und 7.8 deutet darauf, daß das Ausmaß der Schmelzfraktion nach dem eigenen Experiment 230377 und nach dem H 3-Experiment fast das Gleiche ist. Ferner kann man den Abbildungen 7.8, 7.9 und 7.10 entnehmen, daß auch bei in-pile-Experimenten die Lage der Schmelzzone radial verschoben sein kann, wie das bei einigen der eigenen Experimente der Fall war. Schließlich zeigt die Struktur des Brennstoffs auf den Abbildungen 7.9 und 7.10 (H 3-Experiment) Ähnlichkeit mit der des Brennstoffs auf der Abbildung 7.11 (Versuch Nr. 25, bereits früher durchgeführt /106/), was auf eine ähnlich thermodynamische Beanspruchung schließen läßt.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse und Überlegungen lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Die mit direkt elektrisch beheizten  $UO_2$ -Stäben durchgeführten out-of-pile-Experimente zur Simulation von TOP-Störfällen lassen sich hinsichtlich des thermodynamischen Verhaltens einzelner Brennstäbe recht befriedigend auf in-pile-Verhältnisse übertragen.
- Die auf der Basis des "Ejektionen-Kriteriums" ermittelten Korrelationen zwischen

---

<sup>+)</sup> Herrn L.W. Deitrich, Argon.Nat. Lab., der mir Abzüge der Schliffen-Bilder aus dem H 3-Experiment zur Verfügung stellte, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

- a) Reaktivitätsrampe und Zeitkonstante
- b) Reaktivitätsrampe und Versagenszeit
- c) normierter Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und Zeitkonstante und
- d) normierter Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und Versagenszeit

liefern sowohl für in-pile- als auch für out-of-pile-Verhältnisse die gleichen quantitativen Resultate.

- Aufgrund der durchgeführten Experimente und Rechnungen kann die Beziehung

$$\dot{\rho} = 193 \{t_v / \ln(90234.5/q_0 t_v)\}^{-0.85},$$

$$\dot{\rho} \text{ in } \$/s, t_v \text{ in ms, } q_0 \text{ in kW/m,}$$

die sich für  $q_0 = \text{const.}$ , beispielsweise  $q_0 = 20 \text{ kW/m}$ , auf die einfachere Ziehungen

$$\dot{\rho} = 17.75 \cdot 10^3 t_v^{-1.48}$$

bzw.  $t_v = 743 \dot{\rho}^{-0.675}$

reduzieren läßt, als eine experimentell wohl abgesicherte Information hinsichtlich des Eintretens des Brennstabversagens als Folge einer Reaktivitätsrampe zwischen  $\dot{\rho} = 0.2 \text{ } \$/s$  und  $\dot{\rho} = 10 \text{ } \$/s$  empfohlen werden.

### 7.3 Fehlerbetrachtung

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Ergebnisse weisen einen relativ geringen Fehler auf, der hauptsächlich bei der Bestimmung des spezifischen Widerstandes des  $UO_2$  auftrat und in der Größenordnung von insgesamt  $\pm 20 \%$  liegt. Dagegen weisen die in-pile-Experimente eine wesentlich breitere Streuung auf. Teilweise weichen die verschiedenen Angaben um den Faktor 4 voneinander ab (vgl. z.B. Abb. 7.1 und 7.4). Von daher wurde als nicht relevant gehalten, die gesamten eigenen Experimenten einer konsistenten und aufwendigen Fehlerrechnung zu unterwerfen. Man hat sich lediglich darauf beschränkt, an markanten Stellen im Text die jeweilige Fehlerbreite anzugeben und somit die Fehlergrößenordnung global bestimmt.

Die in diesem Kapitel gezogenen Schlußfolgerungen wurden durch diese Vorgehensweise keinesfalls beeinflusst. Eine aufwendige Fehlerrechnung würde die Argumentation und die Aussagen in keinsten Weise beeinträchtigen.

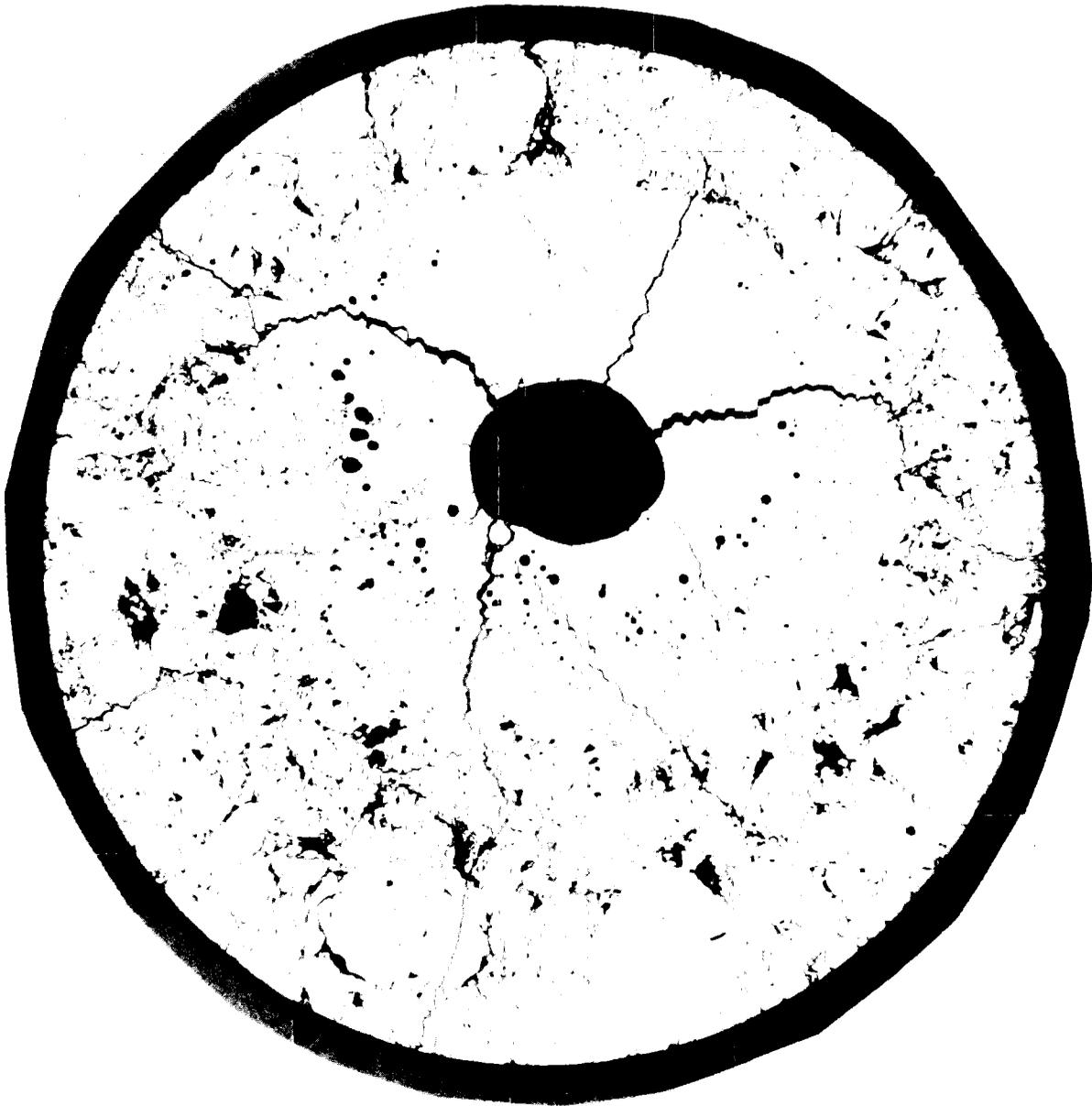


Abb. 7.8 Pellet - Schliff nach dem in-pile Test H3 ( H - Series )

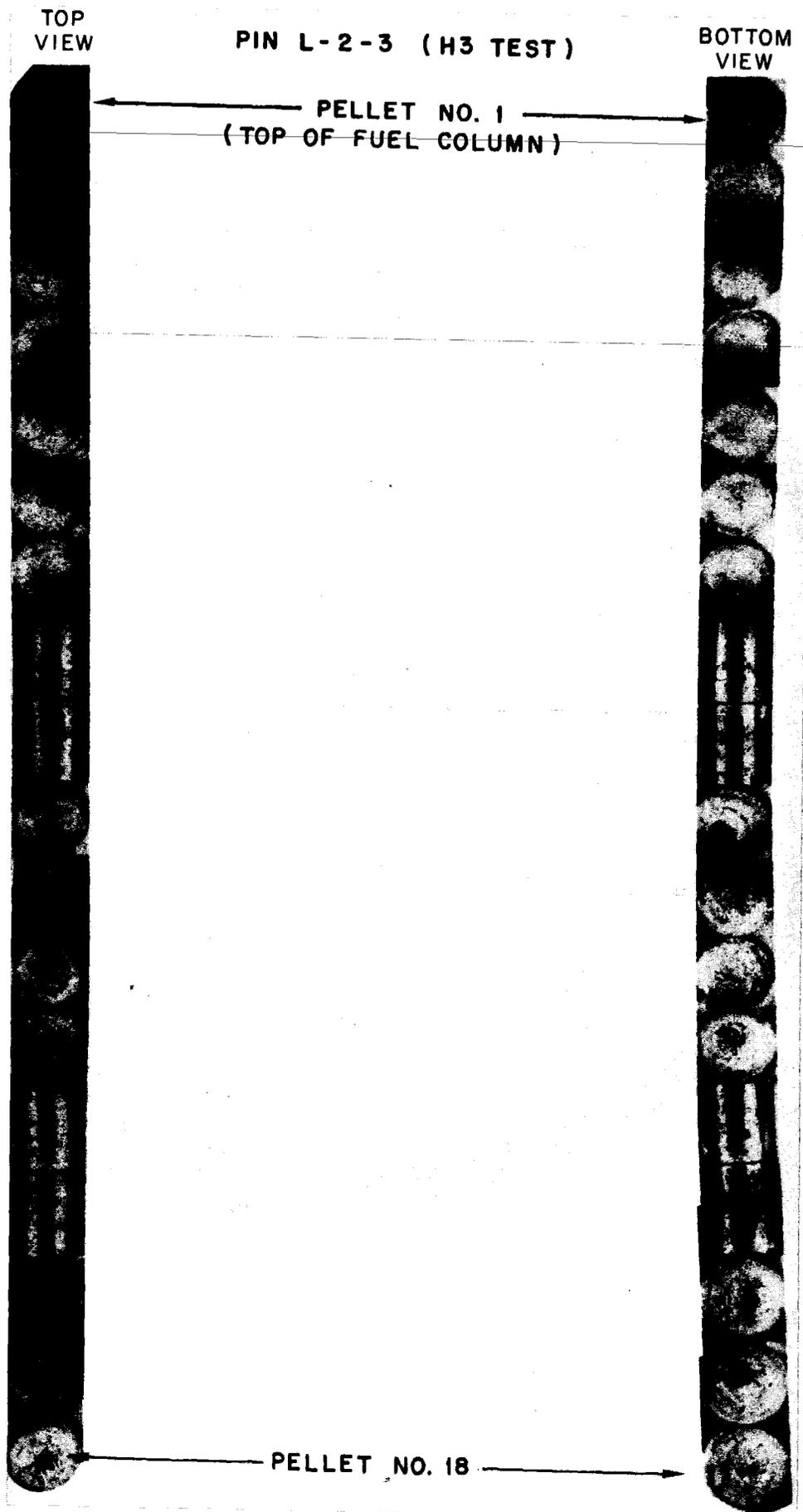


Abb. 7.9 Pellet - Aufnahmen nach dem in-pile Test H3 (H-Series).

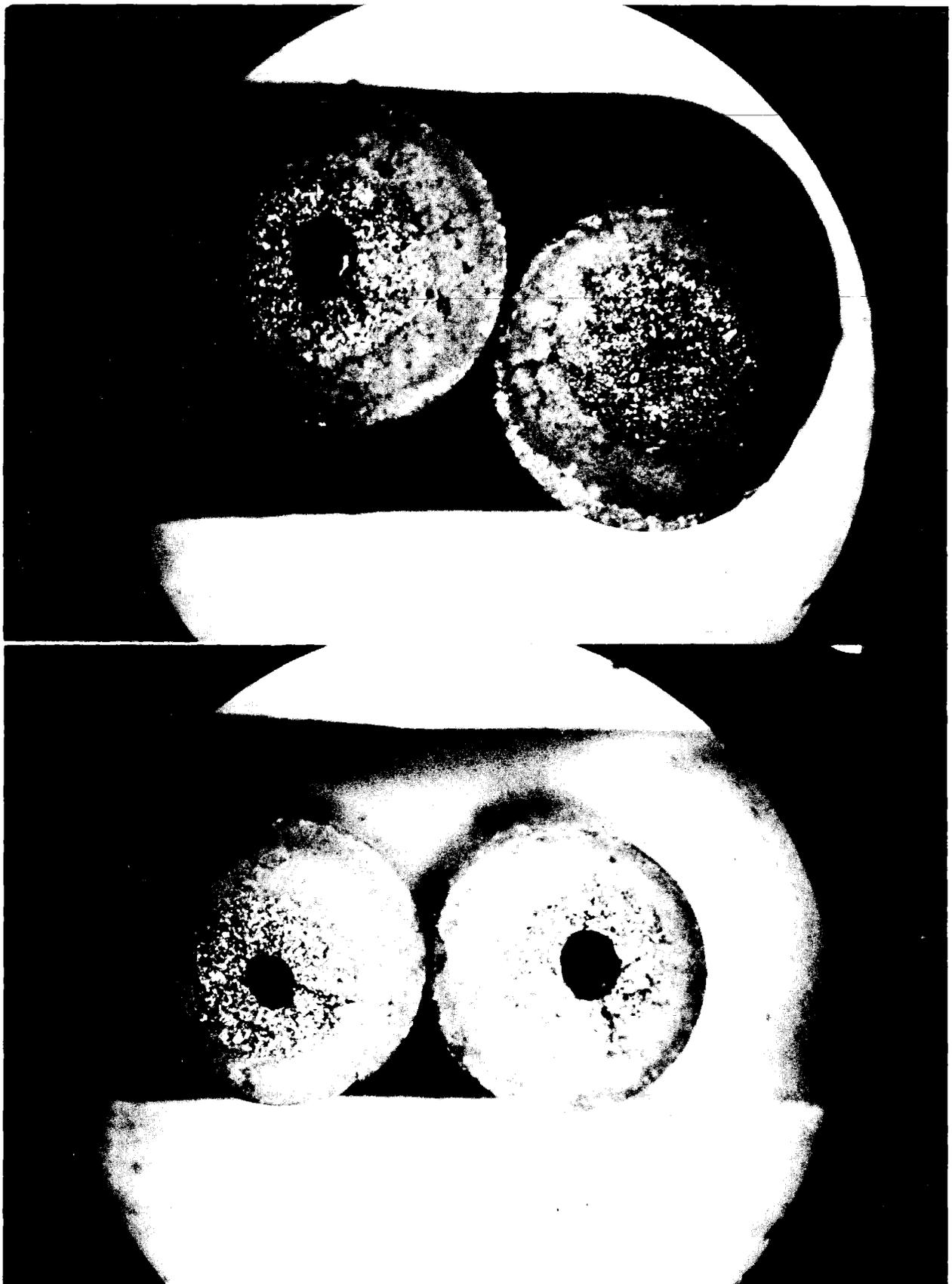


Abb. 7.10 Pellet - Aufnahmen nach dem in-pile Test H3 (H - Series).

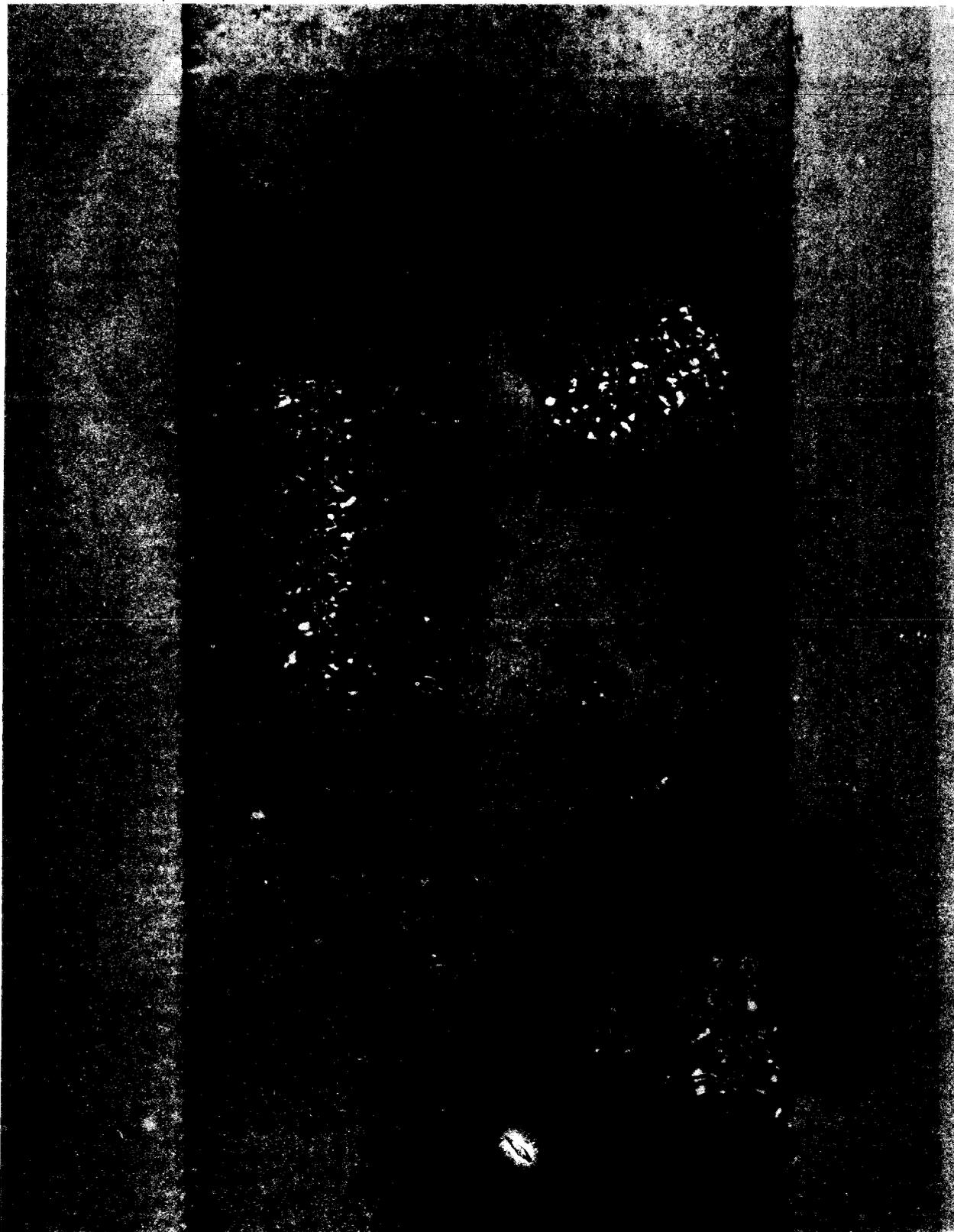


Abb. 7.11 Pellet - Aufnahmen nach dem eigenen Experiment K-25 /106/.

## 8. Zusammenfassung

Das transiente Verhalten direkt elektrisch beheizter  $\text{UO}_2$ -Brennstäbe wurde experimentell untersucht und mathematisch beschrieben. Randbedingungen und Durchführungsmodi der Untersuchungen wurden so gewählt, daß die Ergebnisse mit äquivalenten in-pile Experimenten, die im Rahmen der Unfallanalyse schneller, natriumgekühlter Brutreaktoren (SBR) durchgeführt werden, verglichen werden konnten. Die Ergebnisse lassen eine teilweise Übertragbarkeit eigener Experimente auf in-pile Verhältnisse sinnvoll erscheinen.

Ausgehend von der bereits bekannten Theorie und Technik für deren Betrieb unter stationären Bedingungen wurden  $\text{UO}_2$ -Stäbe quantitativ vorausberechenbaren, elektrischen Leistungstransienten ausgesetzt und ihr Verhalten bis zu deren Versagen untersucht. Zur mathematischen Formulierung der während der Transienten stattfindenden physikalischen Prozesse (insbesondere die, die zum Brennstabversagen führen) wurde das Rechenprogramm VESUV entwickelt. Es wurde der Ablauf dreier Unfallketten bis zum Brennstabversagen simuliert. Die Ketten wurden aus dem gesamten Spektrum der möglichen Störfälle mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und schwerwiegenden Konsequenzen nach folgenden Kriterien ausgesucht:

1. Ihre Eintrittswahrscheinlichkeit ist kleiner als  $10^{-6}$  pro Reaktorbetriebsjahr.
2. Ihre Auswirkungen könnten zu einer Kernzerlegung führen.
3. Durch ihre Betrachtung wird eine Reihe von denkbaren Störfällen mit ähnlich kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit und ähnlich schwerwiegenden Konsequenzen abgedeckt.
4. Ihre Out-pile-Nachbildung liefert im Rahmen der Restriktionen, die jeder Simulation auferlegt werden, sinnvolle Ergebnisse.

Dadurch wurden die Arbeiten begrenzt auf Untersuchungen zum Verhalten von frischen  $\text{UO}_2$ -Brennstäben mit Incoloy-800-Hülle bei der Nachbildung folgender Störfälle:

- a) Kühlmittelmassendurchsatz-Störfälle (LOF-accidents)

- b) Reaktivitätsstörfälle (TOP-accidents)
- c) LOF-Unfälle, die zu TOP-Unfällen führen (LOV driven TOP accidents).

Im ersten Hauptabschnitt der Arbeit (Kap. 5) werden die theoretischen Voraussetzungen beschrieben, unter denen das Rechenprogramm VESUV\* erstellt wurde.

Im zweiten Hauptabschnitt (Kap. 6) werden Durchführung - anhand einzelner Experimente - und Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserien vorgestellt und mit den Rechenresultaten verglichen.

In Kap. 7 schließlich werden die experimentellen Resultate mit einer Reihe von in-pile Experimenten und Rechnungen verglichen und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf in-pile-Verhältnisse diskutiert.

Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich wie folgt unterteilen und zusammenfassen:

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### A) LOF - Experimente

- Als Brennstabversagenskriterium ist der Beginn des Hüllenschmelzens zu betrachten.
- Aus den Simulationsexperimenten ergibt sich zwischen Versagenszeit  $t_v$  und elektrischer Stabileistung  $q_e$  folgende Korrelation:

$$t_v = 376.6 q_e^{-1.244}, \quad t_v \text{ in ms, } q_e \text{ in kW/m.}$$

- Der Prozeß des Hüllenschmelzens verläuft asymmetrisch, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

#### B) TOP - Experimente und LOF driven TOP - Experimente

- Als Brennstabversagenskriterium ist der Beginn der Ejektionen geschmolzenen Brennstoffmaterials zu betrachten ("Ejektions-Kriterium").

---

\*VESUV: Verhalten elektrisch betriebener UO<sub>2</sub> - Stäbe unter simulierten Unfallbedingungen bis zum Versagen

- Aus den Simulationsexperimenten ergibt sich zwischen Versagenszeit  $t_v$ , Zeitkonstante  $\tau$  und elektrischer Anfangsleistung  $q_{e,o}$  folgende Korrelation:

$$\tau = \frac{t_v}{\ln\left(\frac{90234.5}{q_{e,o} t_v}\right)}, \quad \tau \text{ und } t_v \text{ in ms, } q_{e,o} \text{ in kW/m.}$$

Für  $q_{e,o} = \text{const.}$ , beispielsweise  $q_{e,o} = 20 \text{ kW/m}$ , ergeben sich die vereinfachten Beziehungen

$$\tau = 4.89 \cdot 10^{-3} t_v^{1.74}$$

bzw.  $t_v = 132 \tau^{0.574}$

- Metallurgische Nachuntersuchungen zeigten, daß Hüllen-Material ins Brennstabinnere diffundierte.

## 2. Vergleich mit in-pile-Verhältnissen

- Die aus den eigenen Experimenten ermittelten Korrelationen zwischen
  - a) Anfangsstableistung und Versagenszeit (LOF-Experimente)
  - b) Zeitkonstante und Versagenszeit
  - c) normierter Leistung zum Zeitpunkt des Versagens und Versagenszeit und
  - d) normierter Leistung und Zeitkonstante

lassen sich sowohl qualitativ als auch quantitativ recht gut mit in-pile-Resultaten vergleichen.

- Auf der Basis der experimentellen Ergebnisse und des Vergleichs mit in-pile-Angaben ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Versagenszeit  $t_v$ , Reaktivitätsrampe  $\dot{\rho}$  und Anfangsleistung  $q_o$ :

$$\dot{\rho} = 193 \left\{ t_v / \ln(90234.5 / q_o t_v) \right\}^{-0.85}$$

$\dot{\rho}$  in  $\$/s$ ,  $t_v$  in ms,  $q_o$  in kW/m.

Für  $q_o = \text{const.}$ , beispielsweise  $q_o = 20 \text{ kW/m}$ , ergeben sich die vereinfachten Beziehungen:

$$\dot{\rho} = 17.75 \cdot 10^3 t_v^{-1.48}$$

bzw.

$$t_v = 743 \dot{\rho}^{-0.675}$$

- Für die Anwendung dieser Beziehungen auf nukleare Verhältnisse muß die

Korrelation

$$q_e = 0.2775 q_n^{1.133}$$

zwischen elektrischer und nuklearer Stableistung berücksichtigt werden.

9. Literatur

- / 1/ H.K. Fauske  
The Role of Core-Disruptive Accidents in Design and Licensing of LMFBRs  
Nuclear Safety, Vol. 17, No. 5, September-October 1976, pp 550-567
- / 2/ Graham, J. and Strawbridge, L.E.,  
Design Margin Approach in LMFBR Nuclear Safety  
Proc. Eur. Nucl. Conf., 5, Pergamon Press, (1976)
- / 3/ G. Keßler et. al.  
Safety of the Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor and Aspects  
of its Fuel Cycle  
IAEA-CN-36/572 (IV. 2), (1977)
- / 4/ D. Struwe  
Das Verhalten des Kerns eines schnellen natriumgekühlten Brutreaktors  
von 2000 MW<sub>e</sub> bei Störfällen sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit  
KFK-2400 (1977)
- / 5/ J.C. Carter et al.  
SAS 1A-- A Computer Code for the Analysis of Fast Reactor Power and  
Flow Transients  
ANL 7607, 1970
- / 6/ F.E. Dunn et al.  
The SAS 2A-LMFBR Accident Analysis Code  
ANS Topical Meeting, Idaho Falls, 1971
- / 7/ M.G. Stevenson et al.  
Current Status and Experimental Basis of the SAS LMFBR Accident  
Analysis Code System  
Conf.-740401-P3, Beverley Hills, pp 1303-1321, 1974
- / 8/ D.R. Ferguson et al.  
The SAS4A LMFBR Accident Analysis Code Systems  
Int. Mtg. Fast Reac. Saf. Rel. Physics, Chicago, Oct. 1976

- / 9/ W. Kastenbergl, E.T. Rumble  
On the Analysis of the Predisassembly Phase of the Unprotected  
Overpower Transient Accidents for LMFBR's  
Nucl. Eng. and Design, 25, pp. 248-256, 1973
- /10/ D. Struwe  
Das dynamische Verhalten schneller Natrium-Brutreaktoren  
Reaktortagung Karlsruhe, 10.-13. April 1973, ZAED S. 205-208
- /11/ G. Heusener et al.  
Analysis of Hypothetical Accidents for SNR-300  
KFK 1934, 1973
- /12/ G. Grötzbach et al.  
Verhalten des Kerns eines schnellen natriumgekühlten Reaktors  
nach schweren hypothetischen Unfällen  
KFK 1928, 1974
- /13/ G. Angerer  
Transport von Kernmaterialien während Unfällen in schnellen  
natriumgekühlten Brutreaktoren  
KFK 1935, 1974
- /14/ R. Fröhlich et al.  
Analysis of Transient Overpower Accidents for the SNR-300 Mark-1  
and Mark-1A Cores  
KFK 2115, 1975
- /15/ R. Fröhlich et al.  
Analyse schwerer hypothetischer Störfälle für den SNR-300 Mark 1A  
Reaktorkern  
KFK 2310, 1976
- /16/ E.T. Rumble et al.  
Sensitivity Analysis of an LMFBR to Whole-Core Overpower Excursions  
Trans. of ANS, 19, 252 (1974)
- /17/ G. Angerer et al.  
Simulation des gleichzeitigen Ausfalls aller Kühlmittelpumpen in  
einem natriumgekühlten schnellen Brutreaktor  
KFK 1931, S. 213, (1974)

- /18/ P. Royl et al.  
Simulation eines wilden, unkontrollierten Störfalls im SNR-300  
mit dem SAS 3A Programmsystem  
KFK 1931, S. 221, (1974)
- /19/ D. Struwe et al.  
CAPRI - A Computer Code for the Analysis of HCDAs in the  
Predisassembly Phase  
Conf-740401-P3, Beverly Hills, 1525, (1974)
- /20/ H. Jordan, Ch. Sack  
PARADISEKO III - A Computer Code for Determining the Behavior  
of Contained Nuclear Aerosols  
KFK 2151, 1975
- /21/ W.O. Schikarski  
On the State of the Art in Aerosol Modelling for LMFBR Safety  
Analysis  
Int. Mtg. Fast Reac. Saf. Rel. Physics, Chicago, Oct. 1976
- /22/ D. Struwe et al.  
Thermal-Hydraulic Core Debris Behavior in the SNR-300 Reactor  
Vessel After HCDAs,  
Trans of ANS, 20, 545 (1975)
- /23/ T.P. Speis et al.  
Studies of Core Disruptive Accidents and Licensing Aspects of  
Fast Breeder Reactors,  
Trans of ANS, 20, 547 (1975)
- /24/ R. Fröhlich et al.  
Analysis of Loss-of-Flow Accidents for the SNR-300 Mark 1A Core,  
Trans of ANS, 21, 297 (1975)
- /25/ C.P. Tzanos et al.  
Evaluation of Unprotected Loss-of-Flow Transients in Large LMFBRs  
with Extended Pump Coastdown  
Trans of ANS, 23, 331 (1976)

- /26/ P.M. Haas et al.  
Analysis of Low Ramp TOP Accidents in the EOEC Core of the Clinch  
River Breeder Reactor  
Trans of ANS, 23, 334 (1976)
- /27/ C. Müller et al.  
A Closed-Form Methodology for LMFBR Accident Analysis  
Trans of ANS, 23, 336, (1976)
- /28/ Robert D. Burns III,  
Accident Simulation for Probabilistic LMFBR Safety Evaluation  
Trans of ANS, 23, 337, (1976)
- /29/ T.P. Henry et al.  
Analysis of Transient Overpower Accidents in the BOL Core of the CRBR  
Trans of ANS, 24, 258, (1976)
- /30/ R.J. Henninger et al.  
An Analysis of Unprotected Loss-of-Flow Accidents for the CRBRP  
with a Radial Parfait Core  
Trans of ANS, 24, 260, (1976)
- /31/ C.K. Chan et al.  
An Alternative Accident Scenario for LMFBR Core Disruption  
Trans of ANS, 26, 350, (1977)
- /32/ D.C. Albright et al.  
Pipe Rupture Studies in the Clinch River Breeder Reactor  
Trans of ANS, 26, 353, (1977)
- /33/ Patrick D. O'Reilly et al.  
Assessment of CRBRP Containment Response to a Hypothetical  
Core Melt-Through Accident  
Trans of ANS, 26, 354, (1977)
- /34/ S.J. Rhee et al.  
On the Natural-Convective Cooling of a Bed of Fuel Debris  
Trans of ANS, 26, 355, (1977)

- / 35/ J.N. Castle et al.  
On the Heat Transfer from a Pool of Molten  $UO_2$  to a Concrete Slab  
Trans of ANS, 26, 356, (1977)
- / 36/ T. Ginsberg et al.  
Consequences of Fuel Immobility in CRBRP Overpower Transients  
Trans of ANS, 22, 376, (1975)
- / 37/ William E. Kastenberg et al.  
Preliminary Analysis of the Transient Overpower Accident for  
CRBRP with BOC 1 Fuel,  
Trans of ANS, 22, 378, (1975)
- /38/ W.R. Bohl et al.  
Some comments on CRBRP LOF Analyses Using SAS3A  
Trans of ANS, 22, 401, (1975)
- /39/ R.E. Alcouffe et al.  
Further Considerations on the LOF-Driven TOP Accidents for LMFBRs  
Trans of ANS, 22, 402, (1975)
- /40/ D.B. Atcheson et al.  
A Mechanistic Approach to LMFBR Cladding Failure Prediction in  
Transient Overpower Experiments  
Trans of ANS, 21, 302, (1975)
- /41/ H.H. Hummel et al.  
Loss-of-Flow Calculations for the CRBR Demonstration Plant  
Trans of ANS, 22, 401, (1975)
- /42/ L.W. Deitrich et al.  
A Loss-of-Flow Simulation with Fresh FFTF-Type Fuel Pins  
Trans of ANS, 16, 182, (1973)
- /43/ A.B. Rotmann et al.  
Review of TREAT Experiments in Support of Transient Overpower  
(TOP) Analysis for Fast Reactor Safety  
Conf.-740401-P1, Beverly Hills, 205, (1974)

- /44/ L.W. Deitrich et al.  
Fuel Dynamics Experiments Supporting FTR Loss-of-Flow Analysis  
Conf.-740401-P1, Beverly Hills, 239, (1974)
- /45/ M.A. Grolmes et al.  
R-Series Loss-of-Flow Safety Experiment in TREAT  
Conf.-740401-P1, Beverly Hills, 239, (1974)
- /46/ A.E. Wright et al.  
In-Pile Failure Threshold Experiment (H5) with Pre-Irradiated  
FFTF-Type Fuel  
Trans of ANS, 18, 211, (1974)
- /47/ R.C. Doerner, A. De Volpi  
A Failure Experiment at High-Power FFTF-Type Fuel in a Transient  
Overpower Accident (Test E7)  
Trans of ANS, 18, 212, (1974)
- /48/ G. Höppner et al.  
TREAT R5 Loss-of-Flow Experiment in Comparison with SAS Pretest  
Analysis  
Trans of ANS, 18, 213, (1974)
- /49/ A.E. Wright et al.  
Transient-Overpower Test H4 on FFTF-Type High-Power-Irradiated Fuel  
Trans of ANS, 19, 259, (1974)
- /50/ C.C. McPheeters et al.  
Calibration of F-Series Test Fuel with Respect to TREAT Power  
Trans of ANS, 19, 259, (1974)
- /51/ F.L. Yaggee  
An Analysis of Fuel-Element Failure in the L5 TREAT Transient Test  
Simulating a Loss-of-Coolant-Flow Accident in an FTR-Type Reactor  
Trans of ANS, 19, 261, (1974)
- /52/ F.L. Yaggee, G. Dragel  
An Ultrasonic Trepanning Technique for Radial Sampling Ceramic  
Fuel Pellets for Fission Analysis  
Trans of ANS, 19, 263, (1974)

- /53/ C.E. Dickerman et al.  
Recent Results from TREAT Tests on Fuel, Cladding, and Coolant Motion  
Trans of ANS, 20, 534, (1975)
- /54/ S. Jacobi et al.  
Local Failure Propagation in LMFBRs  
Trans of ANS, 20, 543, (1975)
- /55/ B.W. Spencer et al.  
TREAT Loss-of-Flow Safety Experiment R6  
Trans of ANS, 21, 287, (1975)
- /56/ A. De Volpi et al.  
Fuel Movement in R3, R5, and R6 Loss-of-Coolant Simulations in TREAT  
Trans of ANS, 21, 288, (1975)
- /57/ R. Simms et al.  
Loss-of-Flow Test L5 on FFTF-Type Irradiated Fuel  
Trans of ANS, 21, 289, (1975)
- /58/ R. Simms et al.  
Transient Overpower Test E8 on FFTF-Type Low-Power Irradiated Fuel  
Trans of ANS, 21, 290, (1975)
- /59/ K.N. Prasad et al.  
An Analysis of the Consequences of an Overpower Pin in FFTF  
Trans of ANS, 22, 383, (1975)
- /60/ M. DiMonte, T.G. Theofanous  
Cladding Relocation Dynamics: Incoherency Effects  
Trans of ANS, 22, 405, (1975)
- /61/ M. Ishii et al.  
Prediction of Molten Cladding Motion in Loss-of-Flow Accidents in LMFBRs  
Trans of ANS, 22, 406, (1975)
- /62/ R.E. Holtz et al.  
TREAT Loss-of-Flow Safety Experiment R7  
Trans of ANS, 22, 424, (1975)

- /63/ R. Simms et al.  
Post-Test Evaluation of Transient-Overpower TREAT Test E8 on  
Preirradiated FFTF-Type Fuel  
Trans of ANS, 22, 425, (1975)
- /64/ R.G. Palm et al.  
Loss-of-Flow Test F1 on an FFTF-Type Fuel Element  
Trans of ANS, 22, 427, (1975)
- /65/ J.C. Sonnichsen et al.  
MELT-III Analysis of the TREAT E- and H-Series Experiments  
Trans of ANS, 22, 428, (1975)
- /66/ H.U. Wider, A.E. Wright  
Analysis of a Sodium Reentry Event in the H<sup>4</sup> TREAT Test  
Trans of ANS, 22, 428, (1975)
- /67/ A. De Volpi et al.  
Comparative Fuel Motion Effects of Fresh and Preirradiated Pins  
in Loss-of-Flow Simulations  
Trans of ANS, 22, 430, (1975)
- /68/ R.W. Ostensen et al.  
Wetting of Molten Steel on Oxide Fuel  
Trans of ANS, 23, 343, (1976)
- /69/ R.G. Palm et al.  
F2 Phenomenological Test on Fuel Motion  
Trans of ANS, 23, 354, (1976)
- /70/ R.C. Doerner et al.  
Fuel Failure Sequence for TREAT Test E7  
Trans of ANS, 23, 356, (1976)
- /71/ G.S. Stanford et al.  
Fuel Motion in Transient Overpower Test H5  
Trans of ANS, 23, 356, (1976)

- /72/ R. Simms et al.  
Post-Test Evaluation of Loss-of-Flow TREAT Test L5 on  
Preirradiated FFTF-Type Fuel  
Trans of ANS, 23, 357, (1976)
- /73/ R.E. Holtz et al.  
Summary of Fuel Motion Resulting from the R-Series Loss-of-Flow  
Experiments  
Trans of ANS, 23, 358, (1976)
- /74/ R.N. Koopman et al.  
TREAT Transient Overpower Experiment R9  
Trans of ANS, 24, 269, (1976)
- /75/ B.W. Spencer et al.  
TREAT Loss-of-Flow Safety Test R8 with Pressurized FTR Fuel Pins  
Trans of ANS, 24, 269, (1976)
- /76/ C.L. Fink et al.  
Fuel Motion During In-Reactor Transient Overpower Test H4  
Trans of ANS, 24, 271, (1976)
- /77/ G.S. Stanford et al.  
Fuel Motion in TREAT Transient Overpower Test E8  
Trans of ANS, 24, 272, (1976)
- /78/ R.E. Baars et al.  
Failure Threshold Correlation for Fast Reactor Transient Overpower  
Accident Analysis  
Trans of ANS, 21, 303, (1975)
- /79/ J.B. van Erp et al.  
Pin-to-Pin Failure Propagation in Liquid-Metal-Cooled Fast Breeder  
Reactor Fuel Subassemblies  
Nucl. Saf. 16, 3, 291, (1975)
- /80/ B.W. Spencer et al.  
Summary and Evaluation of R-Series Loss-of-Flow Safety Tests in TREAT  
Conf-761001, Chicago, (1975), pp 1647-1657

- /81/ A.B. Rothman et al.  
Results of Recent TOP and LOF-Experiments in TREAT  
Conf.-761001, Chicago, 1976, pp 1625-1646
- /82/ D. Majumdar, A.M. Judd  
Failure of Irradiated LMFBR Fuel Pins in a Transient Overpower  
Accident  
Trans of ANS, 21, 302, (1975)
- /83/ R.E. Baars et al.  
Base Technology FSAR Support Document - Prefailure Transient  
Behavior and Failure Threshold  
HEDL-TME 75-47, VOL 1 - 3, UC 79b, p
- /84/ P.K. Mast, I.H. Scott  
Fuel Pin Failure Models and Fuel-Failure Thresholds for Core  
Disruptive Accident Analysis  
Conf.-761001, Vol. III, 1015, Chicago, (1976)
- /85/ N.P. Wilburn et al.  
Sensitivity of LMFBR Accident Analysis to Variations in an  
Empirical Pin Failure Criterion  
Conf.-761001, Vol. III, 988, Chicago, (1976)
- /86/ T.H. Hikido et al.  
HEDL Experimental Transient Overpower Program  
Conf.-761001, Vol. IV, 1599, Chicago (1976)
- /87/ R.E. Baars et al.  
HEDL Empirical Correlation of Fuel Pin TOP Failure Thresholds -  
Status 1976  
Conf.-761001, Vol. IV, 1673, Chicago (1976)
- /88/ D.B. Atcheson et al.  
Cladding Failure in TREAT Overpower Experiments: A Mechanistic  
Interpretation on its Implications for LMFBR Safety Analysis  
Conf.-761001, Vol. IV, 1679, Chicago (1976)
- /89/ H. Kwast  
The Behaviour of Fast Reactor Fuel Pins under Loss of Coolant  
Flow Conditions  
RCN-74-043, Restricted Distribution

- /90/ T.G. Theofanous et al.  
Cladding Relocation Rate Effects on the CRBRP LOF-Accidents  
Trans. of ANS 23, 346 (1976)
- /91/ G. Angerer  
Computational Simulation of Cladding Motion After Melting Including  
Resolidification Processes  
Trans. 3rd SMIRT Conf., London, 1, C3/6 (1975)
- /92/ W.R. Bohl, T.J. Heames  
CLAZAS: The SAS 3 A Clad Motion Model  
ANL/RAS 74-15, Argonne National Laboratory (Aug. 1975)
- /93/ M. Ishii et al.  
Molten Clad Motion Model for Fast Reactor Loss-of-Flow Accidents  
Nucl. Sc. Eng. 60, 435-451 (1976)
- /94/ H. Kämpf, G. Karsten  
The SATURN Code - A Theoretical Analysis of Fuel Pin Behavior  
and Fuel Void Dynamics  
KFK-1088, Nov. 1969
- /95/ H. Kämpf et al.  
Das Rechenprogramm SATURN 1a für Brennstäbe  
KFK-1575, Sept. 1972
- /96/ B. Kuczera  
BREDA- Ein Rechenmodell für die Verformung des Brennstabes eines  
natriumgekühlten schnellen Brutreaktors unter transien-ter Belastung  
KFK-1729, Nov. 1969
- /97/ Y.Z. Jankns, R.W. Weeks  
LIFE-I, a FORTRAN-IV Computer Code for the Prediction of  
Fast-Reactor-Fuel-Element Behavior  
ANL-7736, 1970
- /98/ Y.Z. Jankns, R.W. Weeks  
LIFE-II, A Computer Analysis of Fast-Reactor-Fuel-Element Behavior  
as a Function of Reactor Operating History  
Nucl. Eng. Design, 18, pp. 83-96, (1972)

- /99 / H. Fiedler  
Stabversion SATURN 2  
KFK-1273/2 (112), 1973
- /100/ B. Kuczera  
Modelltheoretische Untersuchungen zum transienten Verhalten von  
natriumgekühlten Schnellbrüter-Brennstäben unter Einbeziehung  
spezieller Abbrandeinflüsse  
KFK 1964
- /101/ B. Kuczera, H. Elbel  
Fuel Pin Modelling Related to LMFBR Safety Analysis  
Trans of ANS, 20, 525, (1975)
- /102/ G. Angerer  
unveröffentlichter Bericht des KfK
- /103/ H. Elbel, J.L. Jiménez  
Ein Beitrag zur Analyse des thermischen Verhaltens von  
Schnellbrüter-Brennstäben mit  $UO_2$ - $PuO_2$ -Brennstoff  
KFK 2216
- /104/ W.R. Bohl  
CLAP: A Cladding Action Program for LMFBR HCDA LOF Analysis  
Trans. of ANS, 23, 348 (1976)
- /105/ D. Freund, W. Schikarski  
The Direct Electrically Heated  $UO_2$  Fuel Rod  
(Englisch translation of KFK-1031)  
EURFNR-773, Karlsruhe Nuclear Research Center (1970)
- /106/ A. Alexas, W. Lindner  
Investigations on the Behavior of  $UO_2$  Pins Heated Electrically  
in a Direct Manner under Simulated Reactor-Power Transient  
KFK 2152, Karlsruhe Nuclear Research Center (1975)
- /107/ A. Alexas, W. Lindner, W. Schikarski  
Out-of-Pile Simulation of Fuel Pin Behavior in Sodium Cooled  
Fast Reactor Safety  
Mtg. Beverly Hills, California, April 1974  
CONF-740401, pp. 535-549, U.S. Atomic Energy Commission (1974)

- /108/ B.J. Wrona, J.T.A. Roberts  
Apparatus to Simulate In-Reactor Transient Heating Conditions  
in Oxide Fuel Columns  
Trans. Am. Nucl. Soc., 16, 77 (1973)
- /109/ B.J. Wrona et al.  
First Report on Apparatus to Simulate In-Reactor Transient  
Heating Conditions in Oxide Fuel Columns  
Nucl. Technol., 20, 114 (1973)
- /110/ J.T.A. Roberts et al.  
Observations of Irradiated Fuel Behavior under Simulated  
Accident Heating Conditions  
Nucl. Technol. 27, 267 (1975)
- /111/ B.J. Wrona, E. Johanson  
Development of Direct-Electrical-Heating Apparatus to Study  
Nuclear Meltdown Accidents  
Trans of ANS, 21, 196 (1975)
- /112/ B.J. Wrona, T.M. Galvin  
Fuel Behavior Slightly Above or Below the Failure Threshold  
Trans of ANS, 21, 306 (1975)
- /113/ B.J. Wrona, T.M. Galvin  
Out-of-Reactor Fuel-Motion Studies Utilizing Direct Electrical  
Heating  
Trans of ANS, 21, 307 (1975)
- /114/ B.J. Wrona et al.  
Apparatus to Simulate In-Reactor Heating Conditions in  
Advanced Fuels  
Trans of ANS, 22, 220 (1975)
- /115/ B.J. Wrona et al.  
Thermal-Shock Cracking in  $UO_2$  During Power Transients  
Trans of ANS, 22, 419 (1975)
- /116/ B.J. Wrona  
Transient Response of Clad  $UO_2$   
Trans of ANS, 22, 420 (1975)

- /117/ G. Bandyopadhyay et al.  
Fission Gas Behavior Under Simulated Thermal Transient Conditions  
Trans of ANS, 23, 340 (1976)
- /118/ B.J. Wrona et al.  
Effect of Pellet Density and Axial Restraint on Failure Threshold  
Trans of ANS, 26, 376 (1977)
- /119/ B.J. Wrona, E. Johanson  
Development of Direct-Electrical-Heating Apparatus to Study the  
Response of Nuclear Fuels to Applied Transients  
Nucl. Techn., 29, 433 (1976)
- /120/ H. Kwast  
The Behaviour of Fast Reactor Fuel Pins under Loss of Coolant Flow  
Conditions  
RCN-74-043, Restricted Distribution
- /121/ A. Alexas, H. Sauter, W. Schikarski  
Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Abschmelzverhalten  
von SNR-Brennstäben, Reaktortagung Karlsruhe, 10.-13. April 1973,  
ZAED S. 71-74
- /122/ A. Alexas et al.  
Experimentelle Untersuchungen zum Brennstabversagen, KFK-1272/4, 1972
- /123/ A. Alexas, W. Lindner  
On the Simulation of LOF-Accidents with DEH-UO<sub>2</sub>-pins, Intern. Mtg.  
on Fast Reactor Safety and Rel. Physics, Chicago, 1976,  
Conf. 761001, Vol. IV, 1658-1662
- /124/ A. Alexas  
Theoretische Überlegungen zum dynamischen Verhalten des elektrisch  
beheizten UO<sub>2</sub>-Brennstabes (EPBF), KFK-1274/2, 1974
- /125/ D. Piel  
ELEKTRA: Rechenprogramm für die Temperaturverteilung in einem direkt  
elektrisch beheizten UO<sub>2</sub>-Stab bei transientem Leistungsverlauf

- /126/ VDI-Wärmeatlas
- /127/ H.J. Pfriem  
unveröffentlichter Bericht des KfK (1970)
- /128/ G. Neuer et al.  
Wärmeleitfähigkeit und Emissionsgrad von festem  $UO_2$  -  
Literaturstudie, Bericht SB 3, Hrsgb. IRS, Köln, 1973
- /129/ J.L. Bates et al.  
Electrical Conductivity of  $UO_2$   
I.Am.Cer. Soc. 50 (1967), 652 .
- /130/ R.A. Wolfe  
The electrical conductivity and thermoelectric power of  $UO_2$   
WARD-270, TID-4500, 1963
- /131/ Y.S. Touloukian et al.  
Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials  
Vol. 4, 1967
- /132/ D. Smidt  
Reaktortechnik, Bd. 1 + 2, G. Braun-Verlag, Karlsruhe 1971
- /133/ J. Marek, K. Maubach  
Ergebnisse von Wärmeübergangs- und Druckverlustmessung mit  
Helium an einem Rohrbündel  
KfK 1482, Karlsruhe 1971
- /134/ L. Leibowitz et al.  
Properties for LMFBR Safety Analysis  
ANL-CEN-RSD-76-1, 1976
- /135/ I. Höchel et al.  
Strukturveränderungen in kurzzeitig behandeltem  $UO_2$  mit und  
ohne Neutronenbestrahlung  
I. of Nucl. Mat. 33 (1969) 225-241

- /136/ D. Freund, G. Sari  
unveröffentlichter Bericht des KfK (1974)
- /137/ R. Pejša,  
Persönliche Information
- /138/ R.L. Murray et al.  
Reactor Kinetic Analysis by an Inverse Method  
Nucl. Sci. Eng. 18, 481-490 (1964)
- /139/ G. Ondracek, W. Schikarski  
Measurements about the Effect of Grain Boundaries on the  
Electrical Resistance of Uranium Dioxide  
I. Nucl.Mat. 45, 171-173 (1972/1973)
- /140/ Properties for LMFBR Safety Analysis  
ANL-CEN-RSD-76-1, 1976
- /141/ Rev. Gen. Electric, 77 (1968) 6, pp. 593-609

Anhang 1 : Loss-of-Flow-Experimente

Loss-of-Flow-Experimente

Jedes Experiment umfaßt 4 Seiten:

Seite 1 : der  $UO_2$ -Brennstab im stationären Betrieb

Seite 2 : radiale Temperaturverteilung im Stab unter der  
Annahme nuklearer Betriebsbedingungen

Seite 3 : charakteristische Daten vor und am Ende des  
Experiments

Seite 4 : elektrischer Widerstand, Gesamtenergie, Helium -  
Abnahme-Rate und charakteristische Temperaturen  
(Zentral-, mittlere, Außen- und Hüllentemperatur)  
als Funktion der Zeit bis zum Beginn des Hüllens-  
schmelzens



SIMULATIONSEXPERIMENT : LCF VS.-NR. : 131175

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 40.7 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 43.3 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 0.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1760.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 220.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1551.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2412.5 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTS SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	RT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.4873	19.8	3018.9	4835.3	0.0
4	.0221	85.2	.4773	19.4	3010.1	4705.2	36.5
9	.0361	90.0	.4523	18.4	2982.7	4453.1	131.5
16	.0494	97.4	.4177	17.0	2942.1	4113.1	256.1
25	.0625	107.8	.3773	15.4	2889.9	3715.0	402.3
36	.0754	122.1	.3333	13.6	2826.5	3283.5	562.0
49	.0883	140.9	.2887	11.7	2753.7	2843.4	727.2
64	.1012	166.1	.2450	10.0	2672.6	2413.4	890.6
81	.1140	199.8	.2036	8.3	2584.4	2006.1	1046.2
100	.1269	246.0	.1654	6.7	2490.6	1629.1	1189.2
121	.1397	310.8	.1309	5.3	2392.4	1289.0	1315.9
144	.1525	403.0	.1010	4.1	2292.0	994.3	1424.5
169	.1653	538.1	.0756	3.1	2190.3	744.6	1514.3
196	.1780	737.5	.0552	2.2	2089.9	543.0	1586.0
225	.1908	1041.2	.0391	1.6	1990.7	384.7	1641.4
256	.2036	1506.5	.0270	1.1	1894.7	265.8	1682.8
289	.2164	2228.5	.0183	0.7	1802.6	179.7	1713.0
324	.2291	3356.9	.0121	0.5	1714.8	119.3	1734.4
361	.2419	5147.2	.0079	0.3	1631.0	77.8	1749.4
400	.2547	7985.8	.0051	0.2	1551.8	50.7	1759.6
401	.2550	7995.1	.0051	0.2	1551.6	0.0	1759.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1551.6 K  
 THI = 889.9 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 889.9 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 661.7 GRAD

DELTA T = 19.9 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 131175

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.89798E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21020E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.15516E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.17600E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.82251E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12779E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.31323E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.80214E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.86029E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.56844E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.18304E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12389E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.11553E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.55747E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27928E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.55302E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHTE	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHTE	= 0.73737E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68828E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.13751E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.76300E+01	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LCF VS.-NR. : 131175

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1760.	0.9	3019.	2412.	1552.	881.	729279.	100.0
0.50	1760.	0.9	3011.	2415.	1584.	935.	785570.	99.4
1.00	1760.	0.9	3000.	2420.	1606.	983.	842916.	98.8
1.50	1760.	0.9	2992.	2426.	1629.	1027.	901292.	98.2
2.00	1760.	0.9	2986.	2435.	1653.	1071.	960528.	96.3
2.50	1760.	0.8	2981.	2445.	1678.	1115.	1020583.	94.4
3.00	1760.	0.8	2977.	2456.	1705.	1160.	1081413.	92.5
3.50	1761.	0.8	2975.	2469.	1733.	1206.	1142978.	90.7
4.00	1761.	0.8	2973.	2483.	1762.	1253.	1205240.	88.9
4.50	1761.	0.7	2973.	2498.	1794.	1304.	1268220.	83.7
5.00	1761.	0.7	2973.	2515.	1829.	1361.	1332054.	78.8
5.50	1761.	0.7	2974.	2533.	1867.	1421.	1396797.	74.2
6.00	1761.	0.7	2976.	2553.	1908.	1484.	1462460.	69.9
6.50	1761.	0.6	2979.	2574.	1952.	1548.	1529043.	65.8
7.00	1761.	0.6	2983.	2597.	1997.	1613.	1596527.	62.0
7.50	1761.	0.6	2988.	2620.	2043.	1677.	1664883.	58.4
7.63	1761.	0.6	2990.	2626.	2055.	1694.	1682793.	57.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 021275

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 44.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 36.1 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.2 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1600.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 200.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1509.2 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2309.2 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.4122	18.3	2888.5	4466.4	0.0
4	.0221	110.0	.4040	18.0	2879.9	4351.3	33.8
9	.0361	115.9	.3833	17.0	2852.9	4123.0	121.7
16	.0494	125.4	.3543	15.7	2812.7	3809.2	237.0
25	.0625	138.9	.3198	14.2	2760.9	3439.5	372.4
36	.0754	157.2	.2826	12.6	2699.3	3038.9	520.3
49	.0883	182.0	.2441	10.8	2628.4	2624.9	673.0
64	.1012	215.5	.2061	9.2	2549.6	2216.3	823.6
81	.1140	261.5	.1699	7.5	2464.2	1827.0	966.0
100	.1269	325.1	.1367	6.1	2374.4	1469.5	1095.7
121	.1397	415.2	.1070	4.8	2281.0	1150.4	1209.5
144	.1525	544.3	.0816	3.6	2186.5	877.3	1305.9
169	.1653	732.7	.0606	2.7	2091.9	651.8	1384.8
196	.1780	1012.8	.0439	1.9	1998.3	471.6	1447.4
225	.1908	1428.8	.0311	1.4	1907.9	334.2	1495.5
256	.2036	2063.9	.0215	1.0	1819.9	231.5	1531.5
289	.2164	3021.8	.0147	0.7	1736.6	158.1	1557.9
324	.2291	4495.1	.0099	0.4	1656.8	106.3	1576.9
361	.2419	6764.5	.0066	0.3	1581.0	70.7	1590.3
400	.2547	10255.9	.0043	0.2	1509.4	47.1	1599.6
401	.2550	10268.3	.0043	0.2	1509.2	0.0	1599.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1509.2 K  
 THI = 888.1 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 888.1 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 621.1 GRAD

DELTA T = 18.1 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 021275

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.85922E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21408E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.15092E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.16000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.76300E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.11937E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.33717E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.77457E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.91136E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.61933E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.13829E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12709E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.11755E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.71054E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26768E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.51090E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73730E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68849E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.14708E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.89600E+01	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 021275

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /D/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1600.	1.2	2888.	2309.	1509.	880.	677114.	100.0
0.50	1600.	1.2	2879.	2305.	1537.	927.	725447.	99.4
1.00	1600.	1.2	2866.	2304.	1552.	967.	774795.	98.8
1.50	1600.	1.2	2855.	2305.	1567.	1003.	825229.	98.2
2.00	1600.	1.2	2846.	2308.	1584.	1036.	876586.	96.3
2.50	1600.	1.2	2839.	2313.	1601.	1069.	928792.	94.4
3.00	1600.	1.2	2833.	2319.	1620.	1103.	981784.	92.5
3.50	1600.	1.1	2829.	2327.	1640.	1138.	1035504.	90.7
4.00	1600.	1.1	2826.	2337.	1661.	1173.	1089903.	88.9
4.50	1600.	1.1	2824.	2347.	1684.	1212.	1144992.	83.7
5.00	1601.	1.0	2823.	2360.	1710.	1257.	1200889.	78.8
5.50	1601.	1.0	2823.	2374.	1740.	1306.	1257651.	74.2
6.00	1601.	1.0	2823.	2390.	1773.	1359.	1315301.	69.9
6.50	1601.	0.9	2824.	2408.	1809.	1413.	1373846.	65.8
7.00	1601.	0.9	2826.	2427.	1847.	1470.	1433279.	62.0
7.50	1601.	0.8	2829.	2448.	1887.	1527.	1493582.	58.4
8.00	1601.	0.8	2833.	2471.	1929.	1585.	1554728.	55.0
8.50	1601.	0.8	2839.	2494.	1972.	1642.	1616682.	51.8
8.96	1601.	0.7	2846.	2516.	2012.	1694.	1674356.	49.0

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 020276

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 47.2 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 31.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.5 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1500.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 187.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1481.5 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2242.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3714	17.5	2804.2	4274.8	0.0
4	.0221	129.8	.3636	17.2	2795.2	4158.6	33.5
9	.0361	137.0	.3446	16.3	2768.0	3937.5	117.6
16	.0494	148.4	.3182	15.0	2728.0	3633.4	227.7
25	.0625	164.5	.2869	13.5	2677.0	3276.9	356.8
36	.0754	186.9	.2525	11.9	2615.7	2884.4	497.5
49	.0883	217.3	.2172	10.3	2545.9	2481.1	642.2
64	.1012	258.8	.1824	8.6	2468.7	2083.0	784.2
81	.1140	316.2	.1493	7.0	2385.5	1704.5	917.6
100	.1269	396.2	.1191	5.6	2299.3	1360.5	1038.2
121	.1397	509.8	.0926	4.4	2208.6	1057.3	1143.3
144	.1525	672.2	.0702	3.3	2118.4	801.6	1231.7
169	.1653	909.5	.0519	2.5	2028.4	592.6	1303.6
196	.1780	1260.6	.0374	1.8	1939.8	427.4	1360.4
225	.1908	1778.0	.0265	1.3	1854.6	303.1	1404.0
256	.2036	2558.6	.0184	0.9	1772.1	210.6	1436.8
289	.2164	3721.9	.0127	0.6	1693.9	144.9	1460.9
324	.2291	5474.4	.0086	0.4	1619.5	98.6	1478.3
361	.2419	8130.6	.0058	0.3	1548.7	66.4	1490.8
400	.2547	12146.6	.0039	0.2	1481.7	44.8	1499.6
401	.2550	12161.6	.0039	0.2	1481.5	0.0	1499.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1481.5 K  
 THI = 887.0 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 887.0 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 594.5 GRAD

DELTA T = 17.0 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 020276

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	=	0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	=	0.83496E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	=	0.21650E-01	CM
CLADDING - STAERKE	=	0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	=	0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	=	0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	=	0.14815E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	=	0.15000E+04	W
SCHMELZPUNKT	=	0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	=	0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.72812E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.11438E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	=	0.35338E+02	V
ZEITSCHRITT	=	0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	=	0.76371E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	=	0.94195E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	=	0.65326E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	=	0.11349E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	=	0.12819E+05	J
HE-AB ENERGIE	=	0.11780E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	=	0.83250E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	=	0.26138E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	=	0.48677E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	=	0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	=	0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	=	0.73725E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	=	0.68866E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	=	0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	=	0.15198E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	=	0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	=	0.99250E+01	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LCF VS.-NR. : 020276

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /C/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1500.	1.4	2804.	2242.	1482.	879.	645183.	100.0
0.50	1500.	1.4	2792.	2234.	1506.	923.	688713.	99.4
1.00	1500.	1.5	2777.	2229.	1518.	959.	733259.	98.8
1.50	1500.	1.5	2764.	2227.	1530.	989.	778941.	98.2
2.00	1500.	1.5	2753.	2227.	1542.	1017.	825587.	96.3
2.50	1500.	1.5	2744.	2228.	1555.	1045.	873108.	94.4
3.00	1500.	1.5	2738.	2232.	1569.	1072.	921420.	92.5
3.50	1500.	1.4	2732.	2237.	1584.	1100.	970454.	90.7
4.00	1500.	1.4	2728.	2243.	1601.	1129.	1020154.	88.9
4.50	1500.	1.4	2725.	2251.	1619.	1161.	1070517.	87.7
5.00	1500.	1.4	2723.	2261.	1640.	1199.	1121653.	78.8
5.50	1500.	1.3	2722.	2272.	1665.	1241.	1173617.	74.2
6.00	1501.	1.3	2721.	2286.	1693.	1287.	1226438.	69.9
6.50	1501.	1.2	2721.	2301.	1723.	1335.	1280127.	65.8
7.00	1501.	1.2	2722.	2318.	1757.	1386.	1334683.	62.0
7.50	1501.	1.1	2724.	2337.	1792.	1438.	1390095.	58.4
8.00	1501.	1.1	2727.	2357.	1830.	1491.	1446342.	55.0
8.50	1501.	1.0	2732.	2379.	1869.	1544.	1503394.	51.8
9.00	1501.	0.9	2738.	2402.	1910.	1597.	1561216.	48.8
9.50	1501.	0.9	2745.	2426.	1951.	1651.	1619767.	45.9
9.92	1501.	0.8	2753.	2447.	1986.	1695.	1670073.	43.6

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 18C376

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 50.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 27.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.8 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM**MM	EL. LEISTUNG	PS = 1400.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 175.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1455.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2173.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTS SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3304	16.7	2712.5	4062.4	0.0
4	.0221	155.7	.3238	16.3	2704.1	3955.2	30.4
9	.0361	164.3	.3068	15.5	2677.7	3743.0	110.3
16	.0494	178.2	.2829	14.3	2638.5	3451.0	214.9
25	.0625	198.2	.2543	12.8	2588.1	3100.8	337.5
36	.0754	225.8	.2232	11.3	2528.5	2722.0	470.5
49	.0883	263.9	.1910	9.6	2460.3	2328.9	606.8
64	.1012	316.1	.1595	8.0	2385.5	1944.6	739.9
81	.1140	388.6	.1297	6.5	2305.6	1581.6	864.1
100	.1269	490.0	.1029	5.2	2222.2	1254.6	975.7
121	.1397	634.4	.0795	4.0	2136.6	969.1	1072.4
144	.1525	840.1	.0600	3.0	2051.2	731.5	1153.2
169	.1653	1138.3	.0443	2.2	1966.6	540.1	1218.8
196	.1780	1576.0	.0320	1.6	1883.7	390.0	1270.6
225	.1908	2213.5	.0228	1.1	1804.1	277.8	1310.5
256	.2036	3159.2	.0160	0.8	1727.3	194.7	1340.6
289	.2164	4567.2	.0110	0.6	1653.7	134.8	1362.9
324	.2291	6639.5	.0076	0.4	1584.3	92.8	1379.3
361	.2419	9732.4	.0052	0.3	1518.2	63.3	1391.1
400	.2547	14297.6	.0035	0.2	1455.8	43.5	1399.6
401	.2550	14315.6	.0035	0.2	1455.6	0.0	1399.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1455.6 K  
 THI = 885.6 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 885.9 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 569.7 GRAD

DELTA T = 15.9 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 180376

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.81102E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21890E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.69536E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10965E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.37035E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.75591E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.96684E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.68633E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.91774E-03	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12818E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.11686E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.97969E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.25590E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.46473E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73721E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68877E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.15564E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.10965E+02	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LDF VS.-NR. : 180376

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1400.	1.7	2712.	2174.	1456.	879.	613902.	100.0
0.50	1399.	1.8	2701.	2162.	1477.	920.	652909.	99.4
1.00	1400.	1.8	2683.	2154.	1486.	953.	692867.	98.8
1.50	1400.	1.9	2668.	2148.	1494.	979.	734003.	98.2
2.00	1400.	1.9	2655.	2145.	1503.	1003.	776150.	96.3
2.50	1400.	1.9	2645.	2143.	1512.	1025.	819194.	94.4
3.00	1400.	1.9	2637.	2144.	1523.	1048.	863038.	92.5
3.50	1400.	1.9	2630.	2146.	1534.	1070.	907595.	90.7
4.00	1400.	1.9	2625.	2150.	1546.	1093.	952802.	88.9
4.50	1400.	1.8	2621.	2155.	1560.	1119.	998645.	83.7
5.00	1400.	1.8	2619.	2162.	1576.	1151.	1045221.	78.8
5.50	1400.	1.8	2616.	2171.	1596.	1187.	1092582.	74.2
6.00	1400.	1.7	2615.	2182.	1619.	1226.	1140760.	69.9
6.50	1401.	1.7	2614.	2194.	1645.	1268.	1189769.	65.8
7.00	1401.	1.6	2614.	2209.	1673.	1312.	1239616.	62.0
7.50	1401.	1.5	2615.	2226.	1704.	1358.	1290293.	58.4
8.00	1401.	1.4	2617.	2244.	1737.	1405.	1341784.	55.0
8.50	1401.	1.4	2621.	2264.	1772.	1453.	1394066.	51.8
9.00	1401.	1.3	2626.	2285.	1809.	1503.	1447109.	48.8
9.50	1401.	1.2	2632.	2307.	1846.	1552.	1500876.	45.9
10.00	1401.	1.1	2640.	2331.	1885.	1601.	1555330.	43.2
10.50	1401.	1.0	2650.	2356.	1924.	1650.	1610426.	40.7
10.96	1401.	1.0	2660.	2379.	1961.	1695.	1662199.	38.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 230376

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHN	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 54.5 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 23.9 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.3 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1300.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 162.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1424.2 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2099.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2940	16.0	2617.7	3908.4	0.0
4	.0221	189.6	.2877	15.7	2609.1	3799.1	30.0
9	.0361	200.6	.2719	14.8	2582.7	3585.5	106.7
16	.0494	218.5	.2496	13.6	2543.5	3290.9	206.8
25	.0625	244.3	.2232	12.2	2493.7	2942.7	323.4
36	.0754	280.4	.1945	10.6	2434.7	2563.7	449.3
49	.0883	330.3	.1651	9.0	2368.1	2176.1	577.3
64	.1012	399.6	.1365	7.4	2295.2	1799.0	701.1
81	.1140	495.7	.1100	6.0	2218.2	1449.7	815.7
100	.1269	630.8	.0864	4.7	2138.4	1139.5	917.6
121	.1397	823.1	.0663	3.6	2057.2	873.5	1005.0
144	.1525	1096.7	.0497	2.7	1976.6	655.4	1077.7
169	.1653	1490.1	.0366	2.0	1897.5	482.6	1136.4
196	.1780	2062.8	.0264	1.4	1820.1	348.6	1182.7
225	.1908	2888.2	.0189	1.0	1746.1	249.2	1218.3
256	.2036	4091.4	.0133	0.7	1675.1	175.9	1245.4
289	.2164	5848.4	.0093	0.5	1607.3	123.1	1265.7
324	.2291	8408.6	.0065	0.4	1542.9	85.7	1280.6
361	.2419	12115.5	.0045	0.2	1482.2	59.5	1291.6
400	.2547	17513.5	.0031	0.2	1424.4	41.5	1299.7
401	.2550	17536.6	.0031	0.2	1424.2	0.0	1299.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1424.2 K  
 THI = 884.7 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 884.7 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 539.4 GRAD

DELTA T = 14.7 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 230376

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	=	0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	=	0.78729E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	=	0.22127E-01	CM
CLADDING - STAERKE	=	0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	=	0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	=	0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	=	0.14242E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	=	0.13000E+04	W
SCHMELZPUNKT	=	0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	=	0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.66448E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	=	0.10517E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	=	0.38825E+02	V
ZEITSCHRITT	=	0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	=	0.75374E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	=	0.99107E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	=	0.72065E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	=	0.72365E-03	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	=	0.12743E+05	J
HE-AB ENERGIE	=	0.11511E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	=	0.11595E+01	CHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	=	0.25121E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	=	0.44473E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	=	0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	=	0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	=	0.73718E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	=	0.68888E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	=	0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	=	0.15964E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	=	0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	=	0.12160E+02	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LCF VS.-NR. : 230376

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1300.	2.1	2618.	2099.	1424.	878.	581610.	100.0
0.50	1299.	2.2	2603.	2084.	1445.	915.	616219.	99.4
1.00	1299.	2.3	2583.	2072.	1450.	944.	651750.	98.8
1.50	1300.	2.4	2564.	2064.	1456.	966.	688522.	98.2
2.00	1300.	2.5	2549.	2057.	1461.	986.	726355.	96.3
2.50	1300.	2.5	2537.	2053.	1467.	1004.	765113.	94.4
3.00	1300.	2.5	2527.	2051.	1474.	1021.	804672.	92.5
3.50	1300.	2.6	2519.	2051.	1482.	1039.	844937.	90.7
4.00	1300.	2.6	2513.	2052.	1490.	1057.	885829.	88.9
4.50	1300.	2.5	2509.	2055.	1500.	1078.	927330.	83.7
5.00	1300.	2.5	2505.	2059.	1513.	1104.	969517.	78.8
5.50	1300.	2.5	2502.	2065.	1528.	1134.	1012443.	74.2
6.00	1300.	2.4	2500.	2073.	1547.	1167.	1056137.	69.9
6.50	1300.	2.3	2498.	2084.	1568.	1202.	1100622.	65.8
7.00	1301.	2.3	2498.	2096.	1591.	1241.	1145906.	62.0
7.50	1301.	2.2	2498.	2110.	1617.	1281.	1191987.	58.4
8.00	1301.	2.1	2499.	2126.	1646.	1322.	1238853.	55.0
8.50	1301.	1.9	2502.	2143.	1676.	1365.	1286488.	51.8
9.00	1301.	1.8	2506.	2163.	1709.	1410.	1334864.	48.8
9.50	1301.	1.7	2511.	2183.	1742.	1455.	1383953.	45.9
10.00	1301.	1.6	2518.	2205.	1778.	1500.	1433721.	43.2
10.50	1301.	1.5	2526.	2228.	1814.	1546.	1484130.	40.7
11.00	1301.	1.4	2536.	2253.	1851.	1592.	1535139.	38.4
11.50	1301.	1.3	2548.	2278.	1888.	1637.	1586706.	36.1
12.00	1301.	1.2	2561.	2303.	1925.	1682.	1638783.	34.0
12.16	1301.	1.2	2565.	2312.	1937.	1696.	1655548.	33.4

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 280676

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K  
  
 DELTA T = 507.1 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K  
  
 DELTA T = 13.6 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 280676

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.76462E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22354E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.63630E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10105E+C5	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.40583E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.75243E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.10056E+C7	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.75234E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.56150E-C3	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12537E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.11193E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.13725E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.24742E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.42733E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73714E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68900E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.16627E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.13425E+C2	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LCF VS.-NR. : 280676

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1200.	2.7	2523.	2024.	1391.	877.	550376.	100.0
0.50	1199.	2.9	2502.	2005.	1412.	911.	580541.	99.4
1.00	1199.	3.1	2476.	1990.	1416.	937.	611764.	98.8
1.50	1200.	3.2	2454.	1978.	1419.	956.	644334.	98.2
2.00	1200.	3.4	2436.	1969.	1422.	972.	678046.	96.3
2.50	1200.	3.5	2422.	1963.	1426.	987.	712725.	94.4
3.00	1200.	3.5	2410.	1958.	1430.	1001.	748225.	92.5
3.50	1200.	3.6	2401.	1956.	1435.	1014.	784429.	90.7
4.00	1200.	3.6	2394.	1955.	1440.	1028.	821251.	88.9
4.50	1200.	3.6	2388.	1955.	1447.	1045.	858654.	83.7
5.00	1200.	3.6	2384.	1957.	1456.	1066.	896702.	78.8
5.50	1200.	3.5	2380.	1961.	1468.	1091.	935441.	74.2
6.00	1200.	3.5	2377.	1967.	1483.	1119.	974901.	69.9
6.50	1200.	3.4	2375.	1975.	1500.	1149.	1015104.	65.8
7.00	1200.	3.3	2374.	1985.	1519.	1182.	1056061.	62.0
7.50	1201.	3.2	2373.	1997.	1541.	1217.	1097775.	58.4
8.00	1201.	3.0	2374.	2010.	1565.	1253.	1140236.	55.0
8.50	1201.	2.9	2376.	2026.	1591.	1291.	1183431.	51.8
9.00	1201.	2.7	2380.	2043.	1619.	1330.	1227337.	48.8
9.50	1201.	2.5	2384.	2061.	1649.	1370.	1271931.	45.9
10.00	1201.	2.4	2390.	2082.	1680.	1411.	1317181.	43.2
10.50	1201.	2.2	2398.	2103.	1712.	1453.	1363056.	40.7
11.00	1201.	2.0	2407.	2126.	1746.	1495.	1409520.	38.4
11.50	1201.	1.9	2418.	2149.	1780.	1537.	1456535.	36.1
12.00	1201.	1.7	2430.	2174.	1815.	1579.	1504061.	34.0
12.50	1201.	1.6	2444.	2199.	1850.	1621.	1552057.	32.0
13.00	1201.	1.5	2459.	2225.	1885.	1662.	1600479.	30.2
13.42	1201.	1.4	2473.	2247.	1915.	1696.	1641939.	28.7

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 190876

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 65.7 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 16.7 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 3.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1100.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 137.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1361.3 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1943.2 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2218	14.6	2410.1	3548.8	0.0
4	.0221	304.4	.2159	14.2	2400.9	3429.0	28.9
9	.0361	324.9	.2023	13.3	2374.7	3208.7	98.0
16	.0494	357.8	.1836	12.1	2336.9	2912.0	187.3
25	.0625	405.8	.1619	10.6	2289.5	2567.5	290.1
36	.0754	473.7	.1387	9.1	2233.9	2200.2	399.3
49	.0883	567.7	.1157	7.6	2172.5	1835.5	508.4
64	.1012	699.3	.0940	6.2	2106.1	1490.5	612.1
81	.1140	882.7	.0744	4.9	2036.9	1181.4	706.3
100	.1269	1138.7	.0577	3.8	1966.6	915.6	788.9
121	.1397	1496.6	.0439	2.9	1896.4	697.0	858.9
144	.1525	1999.7	.0329	2.2	1827.2	522.1	916.8
169	.1653	2708.0	.0243	1.6	1759.8	385.5	963.6
196	.1780	3711.9	.0177	1.2	1694.4	281.6	1000.7
225	.1908	5113.6	.0128	0.8	1632.2	204.5	1029.7
256	.2036	7090.1	.0093	0.6	1572.7	147.5	1052.1
289	.2164	9866.4	.0067	0.4	1515.9	106.1	1069.3
324	.2291	13788.9	.0048	0.3	1461.5	76.0	1082.3
361	.2419	19297.1	.0034	0.2	1409.7	54.3	1092.2
400	.2547	26804.0	.0025	0.2	1361.5	39.4	1099.7
401	.2550	26841.2	.0024	0.2	1361.3	0.0	1099.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1361.3 K  
 THI = 882.5 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 882.5 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 478.8 GRAD

DELTA T = 12.5 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 190876

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.74317E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22568E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13613E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.11000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.61080E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.97297E+04	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.42236E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.74964E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.10084E+07	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.77764E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.42892E-03	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12203E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.10735E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.16217E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.24448E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.41249E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73712E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68906E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.17497E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.14745E+02	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 190876

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1100.	3.6	2410.	1943.	1361.	877.	518456.	100.0
0.50	1099.	4.0	2388.	1922.	1380.	908.	544753.	99.4
1.00	1099.	4.3	2359.	1904.	1382.	931.	572048.	98.8
1.50	1099.	4.5	2334.	1890.	1383.	948.	600764.	98.2
2.00	1100.	4.8	2313.	1879.	1385.	961.	630678.	96.3
2.50	1100.	4.9	2297.	1871.	1386.	973.	661589.	94.4
3.00	1100.	5.1	2284.	1865.	1389.	984.	693327.	92.5
3.50	1100.	5.2	2273.	1861.	1391.	995.	725765.	90.7
4.00	1100.	5.2	2265.	1858.	1395.	1006.	758799.	88.9
4.50	1100.	5.3	2258.	1857.	1399.	1019.	792390.	83.7
5.00	1100.	5.3	2253.	1857.	1406.	1037.	826585.	78.8
5.50	1100.	5.3	2249.	1860.	1415.	1058.	861423.	74.2
6.00	1100.	5.2	2246.	1864.	1427.	1081.	896932.	69.9
6.50	1100.	5.1	2243.	1870.	1441.	1107.	933134.	65.8
7.00	1100.	4.9	2242.	1878.	1457.	1135.	970040.	62.0
7.50	1100.	4.8	2241.	1887.	1475.	1165.	1007652.	58.4
8.00	1101.	4.6	2242.	1899.	1495.	1197.	1045967.	55.0
8.50	1101.	4.3	2243.	1912.	1517.	1230.	1084970.	51.8
9.00	1101.	4.1	2247.	1928.	1541.	1264.	1124646.	48.8
9.50	1101.	3.8	2251.	1944.	1567.	1300.	1164970.	45.9
10.00	1101.	3.6	2257.	1963.	1595.	1336.	1205916.	43.2
10.50	1101.	3.3	2265.	1982.	1623.	1374.	1247456.	40.7
11.00	1101.	3.1	2274.	2003.	1653.	1412.	1289558.	38.3
11.50	1101.	2.8	2284.	2025.	1684.	1450.	1332189.	36.1
12.00	1101.	2.6	2296.	2048.	1716.	1488.	1375313.	34.0
12.50	1101.	2.4	2309.	2072.	1748.	1527.	1418895.	32.0
13.00	1101.	2.2	2324.	2097.	1781.	1566.	1462895.	30.2
13.50	1101.	2.0	2339.	2122.	1814.	1604.	1507275.	28.4
14.00	1101.	1.8	2356.	2148.	1846.	1641.	1551996.	26.7
14.50	1101.	1.7	2374.	2174.	1879.	1678.	1597016.	25.2
14.74	1101.	1.6	2383.	2187.	1895.	1696.	1619174.	24.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 240876

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 73.8 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 13.5 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 5.4 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1000.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 125.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1329.0 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1859.8 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, FL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.1825	13.5	2289.0	3282.0	0.0
4	.0221	415.7	.1776	13.1	2280.6	3167.5	26.2
9	.0361	445.3	.1658	12.2	2255.8	2954.8	90.0
16	.0494	491.9	.1501	11.1	2220.8	2673.2	172.2
25	.0625	561.4	.1315	9.7	2176.2	2342.5	266.3
36	.0754	659.3	.1120	8.3	2124.4	1994.2	365.7
49	.0883	796.0	.0928	6.8	2067.0	1652.5	464.4
64	.1012	985.5	.0749	5.5	2005.8	1335.4	557.5
81	.1140	1246.9	.0592	4.4	1942.7	1055.3	641.9
100	.1269	1609.9	.0459	3.4	1878.5	818.0	715.6
121	.1397	2115.7	.0349	2.6	1814.3	622.9	778.2
144	.1525	2810.0	.0263	1.9	1751.9	469.1	830.0
169	.1653	3785.0	.0195	1.4	1690.5	348.7	872.2
196	.1780	5116.3	.0144	1.1	1632.1	258.0	905.9
225	.1908	6959.3	.0106	0.8	1576.0	189.8	932.6
256	.2036	9502.4	.0078	0.6	1522.2	139.1	953.5
289	.2164	13037.8	.0057	0.4	1470.4	101.4	969.8
324	.2291	17859.4	.0041	0.3	1421.4	74.0	982.5
361	.2419	24341.9	.0030	0.2	1375.4	54.4	992.2
400	.2547	33704.6	.0022	0.2	1329.2	39.5	999.7
401	.2550	33753.2	.0022	0.2	1329.0	0.0	999.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1329.0 K  
 THI = 881.4 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 881.4 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 447.7 GRAD

DELTA T = 11.4 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 240876

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.72340E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22766E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13290E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.10000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.58823E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.93956E+04	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENSTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.43632E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.74318E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.99789E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.79685E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.32236E-03	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.11757E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.10145E+05	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.19037E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.24234E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.40020E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73709E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68917E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.18861E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.16110E+02	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 240876

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	1000.	5.0	2289.	1860.	1329.	876.	486713.	100.0
0.50	999.	5.6	2265.	1837.	1348.	905.	509417.	99.4
1.00	999.	6.1	2232.	1817.	1348.	927.	533058.	98.8
1.50	999.	6.6	2204.	1801.	1349.	942.	558200.	98.2
2.00	999.	7.0	2181.	1789.	1349.	953.	584598.	96.3
2.50	1000.	7.3	2163.	1779.	1349.	964.	612021.	94.4
3.00	1000.	7.6	2148.	1772.	1351.	973.	640282.	92.5
3.50	1000.	7.8	2137.	1767.	1352.	981.	669235.	90.7
4.00	1000.	7.9	2128.	1763.	1354.	990.	698774.	88.9
4.50	1000.	8.0	2121.	1761.	1358.	1001.	728844.	83.7
5.00	1000.	8.1	2115.	1761.	1363.	1016.	759482.	78.8
5.50	1000.	8.0	2110.	1762.	1370.	1034.	790719.	74.2
6.00	1000.	8.0	2107.	1765.	1379.	1054.	822576.	69.9
6.50	1000.	7.8	2104.	1769.	1391.	1077.	855074.	65.8
7.00	1000.	7.6	2103.	1776.	1404.	1101.	888224.	62.0
7.50	1000.	7.4	2102.	1784.	1420.	1127.	922028.	58.4
8.00	1000.	7.1	2103.	1794.	1437.	1155.	956482.	55.0
8.50	1001.	6.7	2105.	1806.	1456.	1184.	991572.	51.8
9.00	1001.	6.4	2108.	1820.	1477.	1215.	1027284.	48.8
9.50	1001.	6.0	2113.	1835.	1500.	1246.	1063595.	45.9
10.00	1001.	5.6	2120.	1851.	1524.	1278.	1100483.	43.2
10.50	1001.	5.1	2128.	1869.	1549.	1312.	1137921.	40.7
11.00	1001.	4.7	2137.	1889.	1576.	1346.	1175879.	38.3
11.50	1001.	4.4	2147.	1909.	1603.	1380.	1214329.	36.1
12.00	1001.	4.0	2160.	1930.	1631.	1415.	1253238.	34.0
12.50	1001.	3.7	2173.	1953.	1661.	1450.	1292574.	32.0
13.00	1001.	3.3	2187.	1976.	1690.	1485.	1332302.	30.2
13.50	1001.	3.0	2203.	2000.	1720.	1520.	1372391.	28.4
14.00	1001.	2.8	2220.	2024.	1750.	1555.	1412803.	26.7
14.50	1001.	2.5	2238.	2049.	1781.	1589.	1453505.	25.2
15.00	1001.	2.3	2256.	2074.	1811.	1623.	1494461.	23.7
15.50	1001.	2.1	2276.	2100.	1841.	1657.	1535637.	22.3
16.00	1001.	1.9	2295.	2125.	1871.	1690.	1576998.	21.0
16.11	1001.	1.9	2300.	2131.	1877.	1697.	1586119.	20.8

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 270876

DER EPBF-UG-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BFTRIEB

SCHRITTZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 101.0 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 7.9 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 12.7 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 800.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 100.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1257.7 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1674.7 K

FL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.1047	10.6	2010.5	2575.3	0.0
4	.0221	991.8	.1019	10.3	2004.1	2484.1	19.5
9	.0361	1066.0	.0948	9.6	1984.3	2308.8	69.5
16	.0494	1183.6	.0853	8.6	1956.3	2078.5	133.6
25	.0625	1358.1	.0744	7.5	1920.7	1811.7	206.7
36	.0754	1601.6	.0631	6.4	1879.7	1536.6	283.4
49	.0883	1937.2	.0521	5.3	1834.5	1270.6	359.4
64	.1012	2388.4	.0423	4.3	1787.1	1031.7	431.1
81	.1140	2998.9	.0337	3.4	1738.2	821.8	496.4
100	.1269	3822.3	.0264	2.7	1688.6	645.7	554.2
121	.1397	4918.5	.0205	2.1	1639.6	502.0	604.0
144	.1525	6383.8	.0158	1.6	1591.4	387.0	646.1
169	.1653	8337.1	.0121	1.2	1544.4	296.5	681.3
196	.1780	10923.4	.0092	0.9	1499.0	226.5	710.3
225	.1908	14365.3	.0070	0.7	1455.0	172.3	734.1
256	.2036	19024.2	.0053	0.5	1411.8	130.3	753.4
289	.2164	24877.4	.0041	0.4	1372.2	99.6	769.0
324	.2291	32879.9	.0031	0.3	1332.7	75.4	781.5
361	.2419	43093.8	.0023	0.2	1295.7	57.5	791.6
400	.2547	57394.5	.0018	0.2	1257.9	43.4	799.6
401	.2550	57483.5	.0018	0.2	1257.7	0.0	799.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA =	1257.7 K	THI =	879.1 K
THI =	879.1 K	THA =	870.0 K
DELTA T =	378.6 GRAD	DELTA T =	9.1 GRAD



SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 270876

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.68844E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.23116E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.12577E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.80000E+03	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.55036E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.88308E+04	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.45347E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.50000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.71968E+03	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.94723E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.82042E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.16644E-03	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.10668E+05	J
HE-AB ENERGIE	= 0.86674E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.25704E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.23994E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.38175E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.73705E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.68930E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.24078E+05	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.0	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.19235E+02	S

SIMULATIONSEXPERIMENT : LOF VS.-NR. : 270876

ZEIT /S/	PSGES /W/	RGES /O/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/	E-TOTAL /J/KG/	HE-AB /%/
0.0	800.	11.6	2010.	1675.	1258.	875.	420541.	100.0
0.50	799.	13.5	1983.	1650.	1277.	899.	437126.	99.4
1.00	799.	15.2	1944.	1630.	1277.	917.	454592.	98.8
1.50	799.	16.7	1912.	1613.	1277.	929.	473661.	98.2
2.00	800.	17.9	1887.	1601.	1277.	939.	494021.	96.3
2.50	800.	18.9	1868.	1592.	1277.	947.	515397.	94.4
3.00	800.	19.7	1853.	1585.	1277.	954.	537572.	92.5
3.50	800.	20.3	1842.	1580.	1278.	961.	560394.	90.7
4.00	800.	20.7	1833.	1576.	1280.	968.	583744.	88.9
4.50	800.	21.0	1826.	1574.	1282.	977.	607562.	83.7
5.00	800.	21.1	1821.	1574.	1286.	988.	631862.	78.8
5.50	800.	21.0	1818.	1574.	1292.	1003.	656666.	74.2
6.00	800.	20.8	1815.	1577.	1299.	1019.	681984.	69.9
6.50	800.	20.4	1813.	1581.	1308.	1037.	707833.	65.8
7.00	800.	19.8	1813.	1586.	1319.	1056.	734217.	62.0
7.50	800.	19.1	1814.	1593.	1331.	1077.	761134.	58.4
8.00	800.	18.2	1817.	1602.	1345.	1099.	788577.	55.0
8.50	800.	17.3	1821.	1612.	1360.	1122.	816533.	51.8
9.00	801.	16.3	1826.	1623.	1376.	1147.	844987.	48.8
9.50	801.	15.2	1833.	1636.	1394.	1172.	873918.	45.9
10.00	801.	14.1	1841.	1650.	1413.	1197.	903307.	43.2
10.50	801.	13.0	1850.	1665.	1432.	1224.	933127.	40.7
11.00	801.	11.9	1861.	1682.	1453.	1250.	963358.	38.3
11.50	801.	10.9	1873.	1699.	1474.	1278.	993972.	36.1
12.00	801.	10.0	1886.	1717.	1497.	1305.	1024943.	34.0
12.50	801.	9.1	1900.	1736.	1520.	1333.	1056247.	32.0
13.00	801.	8.2	1915.	1756.	1543.	1362.	1087858.	30.2
13.50	801.	7.5	1931.	1777.	1567.	1390.	1119748.	28.4
14.00	801.	6.7	1948.	1798.	1591.	1418.	1151892.	26.7
14.50	801.	6.1	1966.	1820.	1616.	1446.	1184264.	25.2
15.00	801.	5.5	1984.	1842.	1640.	1474.	1216840.	23.7
15.50	801.	5.0	2003.	1864.	1665.	1502.	1249593.	22.3
16.00	801.	4.6	2022.	1886.	1690.	1530.	1282501.	21.0
16.50	801.	4.1	2042.	1909.	1714.	1557.	1315538.	19.8
17.00	801.	3.8	2062.	1932.	1739.	1584.	1348682.	18.7
17.50	801.	3.5	2082.	1954.	1763.	1610.	1381912.	17.6
18.00	801.	3.2	2102.	1977.	1787.	1636.	1415205.	16.5
18.50	801.	2.9	2123.	2000.	1811.	1661.	1448542.	15.6
19.00	801.	2.7	2143.	2022.	1834.	1686.	1481904.	14.7
19.23	801.	2.6	2153.	2032.	1845.	1697.	1497587.	14.3

Anhang 2 : TOP- und LOF driven TOP-Experimente

TOP- und LOF driven TOP-Experimente

Jedes Experiment umfaßt 4 Seiten:

Seite 1 : der  $\text{UO}_2$ -Brennstab im stationären Betrieb

Seite 2 : charakteristische Daten vor und am Ende  
des Experiments

Seite 3 : theoretischer und experimenteller Leistungs-  
verlauf sowie charakteristische Temperaturen  
(Zentral-, mittlere, Außen- und Hüllentempe-  
ratur) als Funktionen der Zeit bis zum Ver-  
sagen

Seite 4 : theoretischer Leistungsverlauf, geschmolzene  
Brennstoff-Fraktion, Energiezufuhr, Gesamt-  
enthalpie, Gesamtenergie und Helium-Abnahme-  
rate als Funktionen der Zeit bis zum Versagen



SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 141176

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 47.2 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 31.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.5 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1500.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 187.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1481.5 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2242.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3714	17.5	2804.2	4274.8	0.0
4	.0221	129.8	.3636	17.2	2795.2	4158.6	33.5
9	.0361	137.0	.3446	16.3	2768.0	3937.5	117.6
16	.0494	148.4	.3182	15.0	2728.0	3633.4	227.7
25	.0625	164.5	.2869	13.5	2677.0	3276.9	356.8
36	.0754	186.9	.2525	11.9	2615.7	2884.4	497.5
49	.0883	217.3	.2172	10.3	2545.9	2481.1	642.2
64	.1012	258.8	.1824	8.6	2468.7	2083.0	784.2
81	.1140	316.2	.1493	7.0	2385.5	1704.5	917.6
100	.1269	396.2	.1191	5.6	2298.3	1360.5	1038.2
121	.1397	509.8	.0926	4.4	2208.6	1057.3	1143.3
144	.1525	672.2	.0702	3.3	2118.4	801.6	1231.7
169	.1653	909.5	.0519	2.5	2028.4	592.6	1303.6
196	.1780	1260.6	.0374	1.8	1939.8	427.4	1360.4
225	.1908	1778.0	.0265	1.3	1854.6	303.1	1404.0
256	.2036	2558.6	.0184	0.9	1772.1	210.6	1436.8
289	.2164	3721.9	.0127	0.6	1693.9	144.9	1460.9
324	.2291	5474.4	.0086	0.4	1619.5	98.6	1478.3
361	.2419	8130.6	.0058	0.3	1548.7	66.4	1490.8
400	.2547	12146.6	.0039	0.2	1481.7	44.8	1499.6
401	.2550	12161.6	.0039	0.2	1481.5	0.0	1499.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1481.5 K  
 THI = 887.0 K  
 DELTA T = 594.5 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 887.0 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 17.0 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 141176

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.85948E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21405E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14815E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.15000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.85637E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.13397E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIEN TE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.99000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.22014E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.72470E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.25667E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.16470E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.16193E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.67406E+00	CHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26801E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.48762E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT E	= 0.49784E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT E	= 0.76904E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58763E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.18255E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.33248E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.33950E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.11010E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.96101E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18560E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 141176

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2804.	2242.	1482.	879.
0.100	0.	0.	0.0	2743.	2209.	1454.	888.
0.200	0.	0.	0.0	2677.	2175.	1494.	896.
0.300	0.	0.	0.0	2615.	2141.	1451.	904.
0.400	0.	0.	0.0	2555.	2109.	1487.	911.
0.500	0.	0.	0.0	2499.	2076.	1483.	917.
0.600	0.	0.	0.0	2445.	2044.	1477.	921.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.645	3689.	3926.	2.5	2421.	2030.	1474.	923.
0.650	3714.	3984.	2.5	2426.	2032.	1474.	923.
0.675	3906.	4289.	2.6	2459.	2047.	1474.	924.
0.700	4118.	4616.	2.7	2495.	2063.	1474.	925.
0.725	4356.	4969.	2.9	2533.	2080.	1474.	926.
0.750	4622.	5349.	3.1	2574.	2098.	1475.	927.
0.775	4921.	5758.	3.3	2617.	2118.	1476.	928.
0.800	5260.	6198.	3.5	2664.	2139.	1477.	929.
0.825	5645.	6671.	3.8	2714.	2162.	1478.	930.
0.850	6086.	7181.	4.1	2767.	2187.	1480.	931.
0.875	6596.	7730.	4.4	2825.	2214.	1481.	932.
0.900	7192.	8321.	4.8	2889.	2244.	1483.	933.
0.925	7896.	8956.	5.3	2958.	2276.	1485.	934.
0.950	8744.	9641.	5.8	3035.	2312.	1488.	935.
0.975	9739.	10378.	6.5	3075.	2347.	1491.	936.
1.000	10714.	11171.	7.1	3075.	2375.	1494.	937.
1.025	11671.	12024.	7.8	3075.	2400.	1497.	939.
1.050	12623.	12943.	8.4	3103.	2426.	1501.	940.
1.075	13579.	13932.	9.1	3237.	2468.	1506.	942.
1.100	14503.	14997.	9.7	3367.	2517.	1511.	944.
1.101	14540.	15041.	9.7	3372.	2519.	1511.	944.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 141176

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	644709.	644709.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	628335.	628335.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	612367.	612367.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	597189.	597189.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	582730.	582730.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	568922.	568922.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	555710.	555710.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.645	3689.	0.0	230.	549947.	550177.	99.2
0.650	3714.	0.0	232.	550779.	552163.	99.2
0.675	3906.	0.0	244.	557064.	564397.	99.2
0.700	4118.	0.0	257.	563889.	577491.	99.2
0.725	4356.	0.0	272.	571320.	591550.	99.1
0.750	4622.	0.0	289.	579441.	606698.	99.1
0.775	4921.	0.0	308.	588346.	623082.	99.1
0.800	5260.	0.0	330.	598152.	640875.	99.0
0.825	5645.	0.0	355.	608996.	660287.	99.0
0.850	6086.	0.0	383.	621050.	681570.	99.0
0.875	6596.	0.0	416.	634526.	705038.	99.0
0.900	7192.	0.0	454.	649694.	731089.	98.9
0.925	7896.	0.0	500.	666909.	760235.	98.9
0.950	8744.	0.0	555.	686654.	793166.	98.9
0.975	9739.	1.00	619.	706528.	827743.	98.8
1.000	10714.	2.25	683.	721454.	858981.	98.8
1.025	11671.	4.00	745.	734693.	890105.	98.8
1.050	12623.	6.25	814.	748477.	923361.	98.7
1.075	13579.	6.25	886.	806514.	1002668.	98.7
1.100	14503.	9.00	954.	855297.	1074475.	98.7
1.101	14540.	9.00	957.	856372.	1076507.	98.7

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 081276

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 50.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 27.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.8 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1400.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 175.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1455.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2173.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTEN SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3304	16.7	2712.5	4062.4	0.0
4	.0221	155.7	.3238	16.3	2704.1	3955.2	30.4
9	.0361	164.3	.3068	15.5	2677.7	3743.0	110.3
16	.0494	178.2	.2829	14.3	2638.5	3451.0	214.9
25	.0625	198.2	.2543	12.8	2588.1	3100.8	337.5
36	.0754	225.8	.2232	11.3	2528.5	2722.0	470.5
49	.0883	263.9	.1910	9.6	2460.3	2328.9	606.8
64	.1012	316.1	.1595	8.0	2385.5	1944.6	739.9
81	.1140	388.6	.1297	6.5	2305.6	1581.6	864.1
100	.1269	490.0	.1029	5.2	2222.2	1254.6	975.7
121	.1397	634.4	.0795	4.0	2136.6	969.1	1072.4
144	.1525	840.1	.0600	3.0	2051.2	731.5	1153.2
169	.1653	1138.3	.0443	2.2	1966.6	540.1	1218.8
196	.1780	1576.0	.0320	1.6	1883.7	390.0	1270.6
225	.1908	2213.5	.0228	1.1	1804.1	277.8	1310.5
256	.2036	3159.2	.0160	0.8	1727.3	194.7	1340.6
289	.2164	4567.2	.0110	0.6	1653.7	134.8	1362.9
324	.2291	6639.5	.0076	0.4	1584.3	92.8	1379.3
361	.2419	9732.4	.0052	0.3	1518.2	63.3	1391.1
400	.2547	14297.6	.0035	0.2	1455.8	43.5	1399.6
401	.2550	14315.6	.0035	0.2	1455.6	0.0	1399.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1455.6 K  
 THI = 885.9 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 885.9 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 569.7 GRAD

DELTA T = 15.9 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 081276

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.84686E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21531E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	g DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.82964E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.13006E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENSTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.99000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.23072E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.78931E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.23471E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.17597E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.17278E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.72961E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26691E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.47915E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHTe	= 0.49873E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHTe	= 0.76906E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58754E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.19298E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.37400E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.38000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.12610E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.11130E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18810E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : C81276

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2712.	2174.	1456.	878.
0.100	0.	0.	0.0	2651.	2140.	1467.	887.
0.200	0.	0.	0.0	2585.	2106.	1467.	895.
0.300	0.	0.	0.0	2522.	2073.	1464.	902.
0.400	0.	0.	0.0	2463.	2040.	1460.	909.
0.500	0.	0.	0.0	2407.	2008.	1455.	914.
0.600	0.	0.	0.0	2353.	1976.	1449.	919.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.675	2804.	2807.	2.0	2314.	1953.	1444.	921.
0.680	2817.	2844.	2.0	2317.	1954.	1444.	922.
0.705	2926.	3037.	2.1	2342.	1965.	1444.	922.
0.730	3045.	3244.	2.2	2369.	1976.	1444.	923.
0.755	3176.	3465.	2.3	2396.	1988.	1444.	924.
0.780	3319.	3700.	2.4	2426.	2000.	1444.	924.
0.805	3478.	3952.	2.5	2456.	2013.	1444.	925.
0.830	3653.	4220.	2.6	2489.	2028.	1444.	926.
0.855	3847.	4507.	2.7	2524.	2043.	1445.	927.
0.880	4064.	4814.	2.9	2561.	2059.	1445.	927.
0.905	4307.	5141.	3.1	2600.	2076.	1446.	928.
0.930	4579.	5491.	3.3	2642.	2095.	1447.	929.
0.955	4887.	5864.	3.5	2687.	2115.	1448.	929.
0.980	5238.	6263.	3.7	2735.	2137.	1449.	930.
1.005	5639.	6689.	4.0	2787.	2160.	1451.	931.
1.030	6101.	7144.	4.4	2844.	2186.	1453.	932.
1.055	6641.	7630.	4.7	2905.	2214.	1454.	933.
1.080	7280.	8149.	5.2	2972.	2244.	1456.	934.
1.105	8048.	8703.	5.7	3047.	2278.	1459.	935.
1.130	8928.	9294.	6.4	3076.	2310.	1461.	936.
1.155	9791.	9927.	7.0	3076.	2336.	1464.	937.
1.180	10654.	10602.	7.6	3076.	2360.	1467.	938.
1.205	11522.	11322.	8.2	3119.	2387.	1471.	939.
1.230	12355.	12092.	8.8	3247.	2426.	1474.	941.
1.255	13236.	12915.	9.5	3369.	2471.	1479.	942.
1.261	13433.	13120.	9.6	3399.	2484.	1480.	942.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 081276

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	613462.	613462.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	597890.	597890.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	582712.	582712.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	568311.	568311.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	554622.	554622.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	541577.	541577.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	529123.	529123.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.675	2804.	0.0	174.	520143.	520318.	99.2
0.680	2817.	0.0	175.	520664.	521712.	99.2
0.705	2926.	0.0	182.	524817.	530330.	99.2
0.730	3045.	0.0	190.	529264.	539423.	99.1
0.755	3176.	0.0	198.	534036.	549039.	99.1
0.780	3319.	0.0	207.	539169.	559232.	99.1
0.805	3478.	0.0	217.	544705.	570066.	99.0
0.830	3653.	0.0	228.	550691.	581615.	99.0
0.855	3847.	0.0	240.	557183.	593963.	99.0
0.880	4064.	0.0	254.	564246.	607209.	98.9
0.905	4307.	0.0	269.	571958.	621468.	98.9
0.930	4579.	0.0	287.	580403.	636876.	98.9
0.955	4887.	0.0	306.	589704.	653592.	98.9
0.980	5238.	0.0	329.	599977.	671811.	98.8
1.005	5639.	0.0	355.	611387.	691767.	98.8
1.030	6101.	0.0	384.	624135.	713753.	98.8
1.055	6641.	0.0	419.	638473.	738136.	98.7
1.080	7280.	0.0	460.	654736.	765392.	98.7
1.105	8048.	0.0	510.	673375.	796159.	98.7
1.130	8928.	1.00	567.	691183.	827453.	98.6
1.155	9791.	2.25	623.	705001.	856170.	98.6
1.180	10654.	4.00	679.	717597.	885066.	98.6
1.205	11522.	4.00	742.	732048.	917251.	98.6
1.230	12355.	6.25	805.	787903.	992453.	98.5
1.255	13236.	9.00	869.	822551.	1048009.	98.5
1.261	13433.	9.00	883.	829641.	1060361.	98.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 101276

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHN	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 50.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 27.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.8 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1400.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 175.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1455.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2173.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3304	16.7	2712.5	4062.4	0.0
4	.0221	155.7	.3238	16.3	2704.1	3955.2	30.4
9	.0361	164.3	.3068	15.5	2677.7	3743.0	110.3
16	.0494	178.2	.2829	14.3	2638.5	3451.0	214.9
25	.0625	198.2	.2543	12.8	2588.1	3100.8	337.5
36	.0754	225.8	.2232	11.3	2528.5	2722.0	470.5
49	.0883	263.9	.1910	9.6	2460.3	2328.9	606.8
64	.1012	316.1	.1595	8.0	2385.5	1944.6	739.9
81	.1140	388.6	.1297	6.5	2305.6	1581.6	864.1
100	.1269	490.0	.1029	5.2	2222.2	1254.6	975.7
121	.1397	634.4	.0795	4.0	2136.6	969.1	1072.4
144	.1525	840.1	.0600	3.0	2051.2	731.5	1153.2
169	.1653	1138.3	.0443	2.2	1966.6	540.1	1218.8
196	.1780	1576.0	.0320	1.6	1883.7	390.0	1270.6
225	.1908	2213.5	.0228	1.1	1804.1	277.8	1310.5
256	.2036	3159.2	.0160	0.8	1727.3	194.7	1340.6
289	.2164	4567.2	.0110	0.6	1653.7	134.8	1362.9
324	.2291	6639.5	.0076	0.4	1584.3	92.8	1379.3
361	.2419	9732.4	.0052	0.3	1518.2	63.3	1391.1
400	.2547	14297.6	.0035	0.2	1455.8	43.5	1399.6
401	.2550	14315.6	.0035	0.2	1455.6	0.0	1399.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA	= 1455.6 K	THI	= 885.9 K
THI	= 885.9 K	THA	= 870.0 K
DELTA T	= 569.7 GRAD	DELTA T	= 15.9 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 101276

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.88942E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21106E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.92756E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.14429E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.11200E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.29066E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.72358E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.23500E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.16137E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.15848E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.61215E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26470E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.47595E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.49906E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76910E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58742E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.24847E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.27606E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.29000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.11560E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.98401E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.21099E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 101276

ZEIT /S/	PSTHEQ /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2712.	2174.	1456.	878.
0.100	0.	0.	0.0	2651.	2140.	1467.	887.
0.200	0.	0.	0.0	2585.	2106.	1467.	895.
0.300	0.	0.	0.0	2522.	2073.	1464.	902.
0.400	0.	0.	0.0	2463.	2040.	1460.	909.
0.500	0.	0.	0.0	2407.	2008.	1455.	914.
0.600	0.	0.	0.0	2353.	1976.	1449.	919.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.675	3588.	3592.	2.6	2314.	1953.	1444.	921.
0.680	3616.	3655.	2.6	2319.	1955.	1444.	922.
0.705	3830.	3984.	2.7	2355.	1971.	1444.	922.
0.730	4071.	4343.	2.9	2394.	1988.	1445.	923.
0.755	4346.	4734.	3.1	2436.	2007.	1445.	924.
0.780	4661.	5160.	3.3	2482.	2027.	1446.	925.
0.805	5023.	5624.	3.6	2532.	2049.	1447.	925.
0.830	5442.	6131.	3.9	2586.	2073.	1448.	926.
0.855	5932.	6683.	4.2	2645.	2099.	1449.	927.
0.880	6510.	7284.	4.7	2710.	2128.	1451.	928.
0.905	7199.	7940.	5.1	2782.	2160.	1452.	929.
0.930	8033.	8655.	5.7	2862.	2195.	1454.	930.
0.955	9062.	9434.	6.5	2951.	2235.	1457.	931.
0.980	10368.	10283.	7.4	3053.	2280.	1459.	932.
1.005	11877.	11209.	8.5	3076.	2320.	1462.	933.
1.030	13339.	12218.	9.5	3076.	2353.	1466.	934.
1.055	14784.	13318.	10.6	3117.	2386.	1469.	935.
1.080	16205.	14518.	11.6	3295.	2442.	1473.	937.
1.105	17592.	15825.	12.6	3471.	2507.	1478.	938.
1.130	19029.	17249.	13.6	3506.	2564.	1483.	940.
1.155	20432.	18802.	14.6	3506.	2607.	1490.	942.
1.156	20492.	18867.	14.6	3506.	2609.	1490.	942.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 101276

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	613462.	613462.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	597890.	597890.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	582712.	582712.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	568311.	568311.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	554622.	554622.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	541577.	541577.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	529123.	529123.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.675	3588.	0.0	223.	520143.	520366.	99.2
0.680	3616.	0.0	225.	520977.	522319.	99.2
0.705	3830.	0.0	238.	527249.	534382.	99.2
0.730	4071.	0.0	254.	534139.	547423.	99.1
0.755	4346.	0.0	271.	541741.	561584.	99.1
0.780	4661.	0.0	291.	550168.	577037.	99.1
0.805	5023.	0.0	314.	559559.	593990.	99.0
0.830	5442.	0.0	340.	570086.	612698.	99.0
0.855	5932.	0.0	372.	581962.	633480.	99.0
0.880	6510.	0.0	408.	595457.	656731.	98.9
0.905	7199.	0.0	453.	610921.	682963.	98.9
0.930	8033.	0.0	506.	628819.	712850.	98.9
0.955	9062.	0.0	572.	649801.	747315.	98.9
0.980	10368.	0.0	657.	674819.	787695.	98.8
1.005	11877.	1.00	755.	697072.	827646.	98.8
1.030	13339.	4.00	849.	714260.	864935.	98.8
1.055	14784.	6.25	952.	732002.	905163.	98.7
1.080	16205.	6.25	1057.	808590.	1006896.	98.7
1.105	17592.	9.00	1158.	852924.	1078971.	98.7
1.130	19029.	12.25	1264.	893129.	1149531.	98.6
1.155	20432.	12.25	1367.	926566.	1215850.	98.6
1.156	20492.	12.25	1371.	927560.	1218216.	98.6

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 070177

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 50.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 27.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.8 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1400.0 WATT
PORCSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 175.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1455.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2173.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3304	16.7	2712.5	4062.4	0.0
4	.0221	155.7	.3238	16.3	2704.1	3955.2	30.4
9	.0361	164.3	.3068	15.5	2677.7	3743.0	110.3
16	.0494	178.2	.2829	14.3	2638.5	3451.0	214.9
25	.0625	198.2	.2543	12.8	2588.1	3100.8	337.5
36	.0754	225.8	.2232	11.3	2528.5	2722.0	470.5
49	.0883	263.9	.1910	9.6	2460.3	2328.9	606.8
64	.1012	316.1	.1595	8.0	2385.5	1944.6	739.9
81	.1140	388.6	.1297	6.5	2305.6	1581.6	864.1
100	.1269	490.0	.1029	5.2	2222.2	1254.6	975.7
121	.1397	634.4	.0795	4.0	2136.6	969.1	1072.4
144	.1525	840.1	.0600	3.0	2051.2	731.5	1153.2
169	.1653	1138.3	.0443	2.2	1966.6	540.1	1218.8
196	.1780	1576.0	.0320	1.6	1883.7	390.0	1270.6
225	.1908	2213.5	.0228	1.1	1804.1	277.8	1310.5
256	.2036	3159.2	.0160	0.8	1727.3	194.7	1340.6
289	.2164	4567.2	.0110	0.6	1653.7	134.8	1362.9
324	.2291	6639.5	.0076	0.4	1584.3	92.8	1379.3
361	.2419	9732.4	.0052	0.3	1518.2	63.3	1391.1
400	.2547	14297.6	.0035	0.2	1455.8	43.5	1399.6
401	.2550	14315.6	.0035	0.2	1455.6	0.0	1399.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1455.6 K  
 THI = 885.9 K  
 DELTA T = 569.7 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 885.9 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 15.9 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 070177

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.83661E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21634E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.81289E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12765E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.78000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.27503E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.12118E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.22998E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.26918E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.26411E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.76154E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26876E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.48570E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.49251E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76850E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58933E+00	J/G*K
UC-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.15471E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.82743E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.79000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.19360E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.17090E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18586E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 070177

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2712.	2174.	1456.	878.
0.100	0.	0.	0.0	2651.	2140.	1467.	887.
0.200	0.	0.	0.0	2585.	2106.	1467.	895.
0.300	0.	0.	0.0	2522.	2073.	1464.	902.
0.400	0.	0.	0.0	2463.	2040.	1460.	909.
0.500	0.	0.	0.0	2407.	2008.	1455.	914.
0.600	0.	0.	0.0	2353.	1976.	1449.	919.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.675	1740.	1742.	1.2	2314.	1953.	1444.	921.
0.680	1742.	1753.	1.2	2315.	1953.	1444.	922.
0.720	1776.	1844.	1.3	2332.	1959.	1443.	923.
0.760	1813.	1940.	1.3	2348.	1965.	1442.	924.
0.800	1853.	2041.	1.3	2366.	1971.	1441.	925.
0.840	1896.	2147.	1.4	2383.	1977.	1440.	926.
0.880	1942.	2259.	1.4	2401.	1984.	1439.	926.
0.920	1992.	2376.	1.4	2420.	1991.	1438.	927.
0.960	2046.	2499.	1.5	2439.	1998.	1438.	928.
1.000	2104.	2629.	1.5	2459.	2006.	1437.	929.
1.040	2167.	2766.	1.5	2480.	2015.	1437.	929.
1.080	2236.	2909.	1.6	2501.	2024.	1437.	930.
1.120	2311.	3060.	1.7	2524.	2033.	1437.	931.
1.160	2393.	3219.	1.7	2547.	2043.	1437.	931.
1.200	2482.	3386.	1.8	2572.	2054.	1437.	932.
1.240	2581.	3562.	1.8	2598.	2065.	1438.	933.
1.280	2690.	3747.	1.9	2625.	2078.	1439.	933.
1.320	2810.	3942.	2.0	2654.	2091.	1439.	934.
1.360	2944.	4147.	2.1	2684.	2105.	1440.	935.
1.400	3093.	4362.	2.2	2717.	2120.	1442.	935.
1.440	3261.	4589.	2.3	2752.	2137.	1443.	936.
1.480	3449.	4827.	2.5	2789.	2155.	1445.	937.
1.520	3663.	5078.	2.6	2829.	2174.	1447.	938.
1.560	3908.	5341.	2.8	2873.	2195.	1449.	939.
1.600	4190.	5619.	3.0	2920.	2218.	1451.	940.
1.640	4517.	5911.	3.2	2971.	2243.	1454.	941.
1.680	4904.	6218.	3.5	3027.	2271.	1457.	943.
1.720	5362.	6540.	3.8	3073.	2300.	1461.	944.
1.760	5833.	6880.	4.2	3073.	2325.	1464.	946.
1.800	6309.	7238.	4.5	3073.	2348.	1469.	948.
1.840	6799.	7613.	4.9	3073.	2371.	1474.	950.
1.880	7294.	8009.	5.2	3160.	2402.	1479.	952.
1.920	7791.	8425.	5.6	3252.	2438.	1485.	955.
1.936	7989.	8597.	5.7	3285.	2454.	1488.	956.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 070177

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	613462.	613462.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	597890.	597890.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	582712.	582712.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	568311.	568311.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	554622.	554622.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	541577.	541577.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	529123.	529123.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.675	1740.	0.0	108.	520143.	520252.	99.2
0.680	1742.	0.0	108.	520242.	520891.	99.2
0.720	1776.	0.0	110.	522474.	527498.	99.1
0.760	1813.	0.0	113.	524826.	534315.	99.1
0.800	1853.	0.0	115.	527306.	541358.	99.0
0.840	1896.	0.0	118.	529927.	548646.	99.0
0.880	1942.	0.0	121.	532703.	556200.	98.9
0.920	1992.	0.0	124.	535647.	564045.	98.9
0.960	2046.	0.0	127.	538776.	572205.	98.9
1.000	2104.	0.0	131.	542109.	580711.	98.8
1.040	2167.	0.0	135.	545667.	589596.	98.8
1.080	2236.	0.0	139.	549471.	598894.	98.7
1.120	2311.	0.0	144.	553550.	608648.	98.7
1.160	2393.	0.0	149.	557933.	618905.	98.6
1.200	2482.	0.0	155.	562652.	629717.	98.6
1.240	2581.	0.0	161.	567748.	641143.	98.5
1.280	2690.	0.0	168.	573264.	653253.	98.5
1.320	2810.	0.0	176.	579252.	666127.	98.4
1.360	2944.	0.0	185.	585772.	679856.	98.4
1.400	3093.	0.0	194.	592893.	694548.	98.3
1.440	3261.	0.0	205.	600699.	710329.	98.3
1.480	3449.	0.0	217.	609287.	727348.	98.2
1.520	3663.	0.0	231.	618777.	745785.	98.1
1.560	3908.	0.0	246.	629315.	765858.	98.0
1.600	4190.	0.0	264.	641081.	787836.	97.8
1.640	4517.	0.0	286.	654307.	812057.	97.7
1.680	4904.	0.0	311.	669290.	838957.	97.5
1.720	5362.	0.25	340.	685697.	868378.	97.4
1.760	5833.	1.00	371.	698781.	895693.	97.2
1.800	6309.	2.25	402.	710756.	923129.	97.0
1.840	6799.	4.00	433.	722281.	951363.	96.9
1.880	7284.	4.00	471.	762898.	1010109.	96.7
1.920	7791.	6.25	508.	793177.	1059965.	96.6
1.936	7989.	6.25	521.	812891.	1087918.	96.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 200177

DER EPBF-UD-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHN	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 47.2 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 31.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.5 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1500.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 187.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1481.5 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2242.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELDDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3714	17.5	2804.2	4274.8	0.0
4	.0221	129.8	.3636	17.2	2795.2	4158.6	33.5
9	.0361	137.0	.3446	16.3	2768.0	3937.5	117.6
16	.0494	148.4	.3182	15.0	2728.0	3633.4	227.7
25	.0625	164.5	.2869	13.5	2677.0	3276.9	356.8
36	.0754	186.9	.2525	11.9	2615.7	2884.4	497.5
49	.0883	217.3	.2172	10.3	2545.9	2481.1	642.2
64	.1012	258.8	.1824	8.6	2468.7	2083.0	784.2
81	.1140	316.2	.1493	7.0	2385.5	1704.5	917.6
100	.1269	396.2	.1191	5.6	2298.3	1360.5	1038.2
121	.1397	509.8	.0926	4.4	2208.6	1057.3	1143.3
144	.1525	672.2	.0702	3.3	2118.4	801.6	1231.7
169	.1653	909.5	.0519	2.5	2028.4	592.6	1303.6
196	.1780	1260.6	.0374	1.8	1939.8	427.4	1360.4
225	.1908	1778.0	.0265	1.3	1854.6	303.1	1404.0
256	.2036	2558.6	.0184	0.9	1772.1	210.6	1436.8
289	.2164	3721.9	.0127	0.6	1693.9	144.9	1460.9
324	.2291	5474.4	.0086	0.4	1619.5	98.6	1478.3
361	.2419	8130.6	.0058	0.3	1548.7	66.4	1490.8
400	.2547	12146.6	.0039	0.2	1481.7	44.8	1499.6
401	.2550	12161.6	.0039	0.2	1481.5	0.0	1499.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1481.5 K  
 THI = 887.0 K  
 DELTA T = 594.5 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 887.0 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 17.0 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 200177

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.75457E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22454E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14815E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.15000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.63453E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10095E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.65000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.16388E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.12841E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.25087E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.29055E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.28542E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.14919E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26114E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.45106E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.49658E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76888E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58811E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.22337E+01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.14230E+01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.19510E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.0	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18586E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 200177

ZEIT /S/	PSTHED /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2804.	2242.	1482.	879.
0.100	0.	0.	0.0	2743.	2209.	1494.	888.
0.200	0.	0.	0.0	2677.	2175.	1494.	896.
0.300	0.	0.	0.0	2615.	2141.	1491.	904.
0.400	0.	0.	0.0	2555.	2109.	1487.	911.
0.500	0.	0.	0.0	2499.	2076.	1483.	917.
0.600	0.	0.	0.0	2445.	2044.	1477.	921.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.650	1582.	1390.	1.1	2418.	2028.	1473.	923.
0.660	1583.	1400.	1.1	2420.	2029.	1473.	924.
0.730	1608.	1470.	1.1	2438.	2033.	1470.	926.
0.800	1635.	1544.	1.1	2456.	2039.	1468.	928.
0.870	1665.	1622.	1.1	2474.	2044.	1466.	930.
0.940	1697.	1704.	1.1	2492.	2050.	1465.	931.
1.010	1733.	1790.	1.2	2510.	2056.	1463.	932.
1.080	1771.	1880.	1.2	2528.	2063.	1462.	933.
1.150	1814.	1975.	1.2	2547.	2070.	1461.	934.
1.220	1860.	2075.	1.2	2566.	2077.	1461.	935.
1.290	1912.	2179.	1.3	2587.	2086.	1460.	936.
1.360	1969.	2289.	1.3	2607.	2095.	1460.	937.
1.430	2032.	2404.	1.4	2629.	2104.	1460.	938.
1.500	2102.	2526.	1.4	2652.	2115.	1461.	939.
1.570	2181.	2653.	1.5	2677.	2126.	1462.	939.
1.640	2269.	2787.	1.5	2703.	2139.	1463.	940.
1.710	2369.	2927.	1.6	2730.	2153.	1464.	941.
1.780	2482.	3075.	1.7	2760.	2168.	1466.	943.
1.850	2611.	3230.	1.7	2793.	2185.	1469.	944.
1.920	2759.	3393.	1.8	2828.	2203.	1471.	946.
1.951	2832.	3468.	1.9	2844.	2212.	1473.	947.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 200177

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	644709.	644709.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	628335.	628335.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	612367.	612367.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	597189.	597189.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	582730.	582730.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	568922.	568922.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	555710.	555710.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.650	1582.	0.0	99.	549313.	549412.	99.2
0.660	1583.	0.0	99.	549458.	550543.	99.2
0.730	1608.	0.0	100.	551636.	559690.	99.1
0.800	1635.	0.0	102.	553936.	569075.	99.0
0.870	1665.	0.0	104.	556373.	578723.	99.0
0.940	1697.	0.0	106.	558966.	588665.	98.9
1.010	1733.	0.0	108.	561733.	598932.	98.8
1.080	1771.	0.0	111.	564699.	609562.	98.7
1.150	1814.	0.0	113.	567889.	620597.	98.6
1.220	1860.	0.0	116.	571333.	632083.	98.5
1.290	1912.	0.0	120.	575062.	644073.	98.5
1.360	1969.	0.0	123.	579115.	656626.	98.4
1.430	2032.	0.0	127.	583535.	669813.	98.3
1.500	2102.	0.0	132.	588371.	683714.	98.2
1.570	2181.	0.0	137.	593680.	698421.	97.9
1.640	2269.	0.0	142.	599531.	714044.	97.7
1.710	2369.	0.0	149.	606003.	730707.	97.4
1.780	2482.	0.0	156.	613191.	748563.	97.1
1.850	2611.	0.0	164.	621210.	767792.	96.8
1.920	2759.	0.0	174.	630198.	788612.	96.6
1.951	2832.	0.0	179.	634531.	798408.	96.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 080277

DER EPRF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	C.C	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K  
 DELTA T = 507.1 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 13.6 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 080277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.77435E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22256E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.71075E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.11279E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENSTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.32500E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.14802E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.50104E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.19381E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.10705E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.10493E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.11934E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26762E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.46096E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.51233E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.77012E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58419E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.14341E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.36068E-01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.31500E-01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.89400E+00	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.88401E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17381E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : C80277

ZEIT /S/	PSTHEG /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2455.	1989.	1404.	884.
0.200	0.	0.	0.0	2387.	1956.	1404.	891.
0.300	0.	0.	0.0	2323.	1923.	1402.	897.
0.400	0.	0.	0.0	2263.	1891.	1398.	902.
0.500	0.	0.	0.0	2208.	1860.	1393.	907.
0.600	0.	0.	0.0	2155.	1830.	1387.	910.
0.700	0.	0.	0.0	2106.	1802.	1381.	913.
0.800	0.	0.	0.0	2059.	1774.	1374.	914.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.825	13066.	10703.	10.9	2048.	1767.	1372.	915.
0.830	13867.	12544.	11.6	2077.	1780.	1373.	915.
0.835	15044.	14702.	12.5	2118.	1799.	1374.	915.
0.840	16433.	17231.	13.7	2164.	1819.	1375.	915.
0.845	18092.	20196.	15.1	2216.	1842.	1377.	915.
0.850	20100.	23670.	16.7	2275.	1867.	1378.	915.
0.855	22563.	27741.	18.8	2344.	1895.	1380.	915.
0.860	25631.	32514.	21.4	2424.	1927.	1381.	915.
0.865	29518.	38107.	24.6	2517.	1964.	1383.	915.
0.870	34539.	44662.	28.8	2627.	2007.	1385.	915.
0.875	41190.	52344.	34.3	2757.	2057.	1387.	916.
0.880	50336.	61349.	41.9	2914.	2115.	1388.	916.
0.885	63801.	71902.	53.2	3109.	2185.	1390.	916.
0.890	78052.	84271.	65.0	3109.	2234.	1392.	916.
0.894	88505.	95682.	73.8	3241.	2276.	1394.	916.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 080277

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	550002.	550002.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	535833.	535833.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	522183.	522183.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	509345.	509345.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	497234.	497234.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	485772.	485772.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	474901.	474901.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	464566.	464566.	99.2
0.800	0.	0.0	0.	454723.	454723.	99.0
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.825	13066.	0.0	806.	452335.	453140.	99.0
0.830	13867.	0.0	856.	457024.	461978.	99.0
0.835	15044.	0.0	929.	463602.	473049.	99.0
0.840	16433.	0.0	1016.	470969.	485315.	99.0
0.845	18092.	0.0	1119.	479298.	499024.	99.0
0.850	20100.	0.0	1245.	488815.	514505.	99.0
0.855	22563.	0.0	1399.	499826.	532190.	99.0
0.860	25631.	0.0	1592.	512740.	552662.	99.0
0.865	29518.	0.0	1837.	528128.	576721.	99.0
0.870	34539.	0.0	2155.	546796.	605494.	99.0
0.875	41190.	0.0	2577.	569935.	640621.	99.0
0.880	50336.	0.0	3160.	599417.	684657.	98.9
0.885	63801.	0.25	4025.	638572.	742056.	98.9
0.890	78052.	2.25	4940.	664875.	791273.	98.9
0.894	88505.	4.00	5652.	710753.	858776.	98.9

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 11C277

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
FORCSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 507.1 GRAD

DELTA T = 13.6 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 110277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.82979E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21702E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.84012E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.13207E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.17800E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.22320E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.59742E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.19340E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12756E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.12500E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.78123E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26326E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.45169E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.51050E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76997E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58466E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.25150E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.11067E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.10400E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.10660E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.10080E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.20761E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 110277

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2455.	1989.	1404.	884.
0.200	0.	0.	0.0	2387.	1956.	1404.	891.
0.300	0.	0.	0.0	2323.	1923.	1402.	897.
0.400	0.	0.	0.0	2263.	1891.	1398.	902.
0.500	0.	0.	0.0	2208.	1860.	1393.	907.
0.600	0.	0.	0.0	2155.	1830.	1387.	910.
0.700	0.	0.	0.0	2106.	1802.	1381.	913.
0.800	0.	0.	0.0	2059.	1774.	1374.	914.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.825	4595.	4515.	3.8	2048.	1767.	1372.	915.
0.830	4672.	4737.	3.9	2056.	1771.	1372.	915.
0.840	4893.	5215.	4.1	2080.	1781.	1372.	915.
0.850	5137.	5742.	4.3	2105.	1792.	1373.	915.
0.860	5409.	6321.	4.5	2132.	1804.	1373.	915.
0.870	5713.	6959.	4.8	2162.	1816.	1374.	915.
0.880	6055.	7662.	5.0	2193.	1830.	1375.	915.
0.890	6440.	8435.	5.4	2228.	1844.	1375.	915.
0.900	6878.	9286.	5.7	2266.	1860.	1376.	916.
0.910	7378.	10223.	6.1	2307.	1877.	1377.	916.
0.920	7954.	11255.	6.6	2353.	1896.	1378.	916.
0.930	8620.	12391.	7.2	2403.	1916.	1379.	916.
0.940	9399.	13642.	7.8	2458.	1938.	1380.	916.
0.950	10316.	15019.	8.6	2520.	1962.	1381.	916.
0.960	11406.	16534.	9.5	2588.	1989.	1382.	917.
0.970	12715.	18203.	10.6	2665.	2019.	1383.	917.
0.980	14309.	20040.	11.9	2751.	2052.	1384.	917.
0.990	16285.	22063.	13.6	2849.	2089.	1386.	917.
1.000	18798.	24290.	15.7	2960.	2131.	1387.	918.
1.010	22111.	26741.	18.4	3077.	2179.	1388.	918.
1.020	25662.	29440.	21.4	3077.	2215.	1390.	918.
1.030	29042.	32412.	24.2	3077.	2246.	1392.	918.
1.040	32360.	35683.	27.0	3261.	2294.	1393.	919.
1.050	35494.	39284.	29.6	3487.	2360.	1395.	919.
1.060	38771.	43249.	32.3	3510.	2415.	1397.	919.
1.066	40557.	45818.	33.8	3510.	2439.	1398.	920.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 110277

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	550002.	550002.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	535833.	535833.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	522183.	522183.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	509345.	509345.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	497234.	497234.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	485772.	485772.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	474901.	474901.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	464566.	464566.	99.2
0.800	0.	0.0	0.	454723.	454723.	99.0
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.825	4595.	0.0	283.	452335.	452618.	99.0
0.830	4672.	0.0	288.	453638.	455349.	99.0
0.840	4893.	0.0	302.	457306.	461973.	99.0
0.850	5137.	0.0	317.	461242.	469010.	99.0
0.860	5409.	0.0	334.	465480.	476511.	99.0
0.870	5713.	0.0	353.	470059.	484533.	99.0
0.880	6055.	0.0	374.	475028.	493148.	98.9
0.890	6440.	0.0	398.	480444.	502437.	98.9
0.900	6878.	0.0	426.	486376.	512502.	98.9
0.910	7378.	0.0	457.	492907.	523460.	98.9
0.920	7954.	0.0	493.	500140.	535459.	98.9
0.930	8620.	0.0	535.	508199.	548676.	98.9
0.940	9399.	0.0	584.	517241.	563333.	98.9
0.950	10316.	0.0	642.	527463.	579707.	98.9
0.960	11406.	0.0	711.	539113.	598146.	98.9
0.970	12715.	0.0	794.	552516.	619100.	98.8
0.980	14309.	0.0	895.	568101.	643162.	98.8
0.990	16285.	0.0	1021.	586460.	671140.	98.8
1.000	18798.	0.0	1182.	608453.	704190.	98.8
1.010	22111.	0.25	1394.	634954.	743626.	98.8
1.020	25662.	2.25	1622.	654595.	778454.	98.8
1.030	29042.	4.00	1839.	670499.	811752.	98.8
1.040	32360.	4.00	2084.	731823.	892801.	98.8
1.050	35494.	6.25	2307.	776500.	959555.	98.7
1.060	38771.	9.00	2542.	815826.	1023323.	98.7
1.066	40557.	9.00	2675.	840120.	1063323.	98.7

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 170277

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 62.5 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 18.4 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 3.4 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1150.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 143.7 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1375.3 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1981.9 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2398	15.0	2463.6	3654.8	0.0
4	.0221	267.5	.2339	14.6	2454.6	3538.2	29.1
9	.0361	284.8	.2196	13.7	2428.3	3318.9	100.4
16	.0494	312.3	.2003	12.5	2390.5	3025.2	192.9
25	.0625	353.0	.1772	11.1	2342.1	2676.1	299.8
36	.0754	410.2	.1525	9.5	2285.5	2302.7	413.7
49	.0883	490.4	.1276	8.0	2221.9	1925.7	528.1
64	.1012	601.4	.1040	6.5	2153.7	1570.7	637.0
81	.1140	756.7	.0827	5.2	2082.1	1248.6	736.5
100	.1269	975.3	.0641	4.0	2008.8	969.2	823.8
121	.1397	1282.6	.0488	3.1	1935.4	736.8	898.0
144	.1525	1715.3	.0365	2.3	1863.2	551.3	959.2
169	.1653	2332.3	.0268	1.7	1792.4	405.8	1008.5
196	.1780	3203.4	.0195	1.2	1724.4	295.5	1047.5
225	.1908	4452.1	.0140	0.9	1658.6	212.6	1077.8
256	.2036	6228.2	.0100	0.6	1595.9	152.1	1101.1
289	.2164	8742.7	.0072	0.4	1536.3	108.4	1118.8
324	.2291	12271.9	.0051	0.3	1480.1	77.3	1132.2
361	.2419	17225.7	.0036	0.2	1426.9	55.1	1142.2
400	.2547	24323.8	.0026	0.2	1375.5	39.3	1149.7
401	.2550	24357.4	.0026	0.2	1375.3	0.0	1149.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA	= 1375.3 K	THI	= 883.1 K
THI	= 883.1 K	THA	= 870.0 K
DELTA T	= 492.3 GRAD	DELTA T	= 13.1 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 170277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.80175E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21983E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13753E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.11500E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.77681E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12268E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.22200E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.18428E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.52422E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.18343E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.11071E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.10841E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.12900E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26384E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.44858E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.51225E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.77009E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58427E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.25358E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.10225E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.78600E-01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.96500E+00	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.92401E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.19209E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 170277

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2464.	1982.	1375.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2398.	1948.	1388.	883.
0.200	0.	0.	0.0	2330.	1915.	1387.	890.
0.300	0.	0.	0.0	2266.	1882.	1385.	895.
0.400	0.	0.	0.0	2208.	1851.	1381.	900.
0.500	0.	0.	0.0	2153.	1821.	1377.	905.
0.600	0.	0.	0.0	2101.	1792.	1371.	908.
0.700	0.	0.	0.0	2053.	1764.	1365.	910.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.750	4666.	7560.	4.1	2030.	1750.	1361.	911.
0.760	4864.	7888.	4.2	2051.	1759.	1362.	911.
0.770	5116.	8230.	4.4	2076.	1770.	1362.	911.
0.780	5397.	8586.	4.7	2104.	1782.	1363.	912.
0.790	5713.	8958.	5.0	2134.	1795.	1363.	912.
0.800	6070.	9346.	5.3	2167.	1809.	1364.	912.
0.810	6475.	9751.	5.6	2202.	1824.	1365.	912.
0.820	6940.	10174.	6.0	2242.	1840.	1366.	912.
0.830	7476.	10614.	6.5	2285.	1857.	1366.	913.
0.840	8098.	11074.	7.0	2333.	1876.	1367.	913.
0.850	8828.	11554.	7.7	2386.	1898.	1368.	913.
0.860	9690.	12054.	8.4	2446.	1921.	1369.	913.
0.870	10721.	12577.	9.3	2512.	1947.	1370.	914.
0.880	11965.	13121.	10.4	2587.	1976.	1372.	914.
0.890	13486.	13690.	11.7	2672.	2008.	1373.	914.
0.900	15379.	14485.	13.4	2769.	2044.	1374.	914.
0.910	17787.	16450.	15.5	2880.	2086.	1376.	915.
0.920	20957.	18682.	18.2	3009.	2133.	1377.	915.
0.930	25008.	21217.	21.7	3084.	2180.	1379.	915.
0.940	28884.	24096.	25.1	3084.	2215.	1380.	916.
0.950	32672.	27365.	28.4	3186.	2254.	1382.	916.
0.960	36399.	31077.	31.7	3437.	2324.	1384.	916.
0.965	38205.	33119.	33.2	3513.	2358.	1385.	917.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 170277

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	533286.	533286.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	519649.	519649.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	506499.	506499.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	494142.	494142.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	482499.	482499.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	471498.	471498.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	461076.	461076.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	451183.	451183.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.750	4666.	0.0	287.	446419.	446706.	99.1
0.760	4864.	0.0	300.	449625.	452846.	99.1
0.770	5116.	0.0	316.	453556.	459860.	99.1
0.780	5397.	0.0	333.	457799.	467353.	99.1
0.790	5713.	0.0	353.	462399.	475390.	99.1
0.800	6070.	0.0	375.	467408.	484046.	99.0
0.810	6475.	0.0	400.	472890.	493414.	99.0
0.820	6940.	0.0	429.	478923.	503607.	99.0
0.830	7476.	0.0	463.	485604.	514760.	99.0
0.840	8098.	0.0	502.	493049.	527044.	99.0
0.850	8828.	0.0	548.	501408.	540667.	99.0
0.860	9690.	0.0	602.	510869.	555895.	99.0
0.870	10721.	0.0	667.	521673.	573065.	99.0
0.880	11965.	0.0	745.	534132.	592610.	98.9
0.890	13486.	0.0	842.	548662.	615105.	98.9
0.900	15379.	0.0	962.	565830.	641326.	98.9
0.910	17787.	0.0	1115.	586448.	672371.	98.9
0.920	20957.	0.0	1318.	611760.	709898.	98.9
0.930	25008.	1.00	1578.	638208.	750945.	98.9
0.940	28884.	2.25	1826.	656355.	786248.	98.9
0.950	32672.	4.00	2099.	701124.	850748.	98.9
0.960	36399.	6.25	2361.	760428.	932523.	98.9
0.965	38205.	6.25	2495.	776808.	961090.	98.8

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 220277

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 65.7 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 16.7 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 3.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1100.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STARLEISTUNG	CHI = 137.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1361.3 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1943.2 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2218	14.6	2410.1	3548.8	0.0
4	.0221	304.4	.2159	14.2	2400.9	3429.0	28.9
9	.0361	324.9	.2023	13.3	2374.7	3208.7	98.0
16	.0494	357.8	.1836	12.1	2336.9	2912.0	187.3
25	.0625	405.8	.1619	10.6	2289.5	2567.5	290.1
36	.0754	473.7	.1387	9.1	2233.9	2200.2	399.3
49	.0883	567.7	.1157	7.6	2172.5	1835.5	508.4
64	.1012	699.3	.0940	6.2	2106.1	1490.5	612.1
81	.1140	882.7	.0744	4.9	2036.9	1181.4	706.3
100	.1269	1138.7	.0577	3.8	1966.6	915.6	788.9
121	.1397	1496.6	.0439	2.9	1896.4	697.0	858.9
144	.1525	1999.7	.0329	2.2	1827.2	522.1	916.8
169	.1653	2708.0	.0243	1.6	1759.8	385.5	963.6
196	.1780	3711.9	.0177	1.2	1694.4	281.6	1000.7
225	.1908	5113.6	.0128	0.8	1632.2	204.5	1029.7
256	.2036	7090.1	.0093	0.6	1572.7	147.5	1052.1
289	.2164	9866.4	.0067	0.4	1515.9	106.1	1069.3
324	.2291	13788.9	.0048	0.3	1461.5	76.0	1082.3
361	.2419	19297.1	.0034	0.2	1409.7	54.3	1092.2
400	.2547	26804.0	.0025	0.2	1361.5	39.4	1099.7
401	.2550	26841.2	.0024	0.2	1361.3	0.0	1099.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA =	1361.3 K	THI =	882.5 K
THI =	882.5 K	THA =	870.0 K
DELTA T =	478.8 GRAD	DELTA T =	12.5 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 220277

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.80090E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21991E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13613E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.11000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.78947E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12467E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.15800E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.21064E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.65982E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.17273E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.13714E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.13412E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.12366E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26450E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.44873E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.50988E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76987E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58497E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.24640E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.23815E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.25300E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.12510E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.11650E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.19727E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 220277

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /—/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2410.	1943.	1361.	876.
0.100	0.	0.	0.0	2343.	1909.	1373.	883.
0.200	0.	0.	0.0	2275.	1876.	1373.	889.
0.300	0.	0.	0.0	2213.	1845.	1370.	895.
0.400	0.	0.	0.0	2155.	1814.	1367.	900.
0.500	0.	0.	0.0	2101.	1784.	1362.	904.
0.600	0.	0.	0.0	2051.	1756.	1357.	907.
0.700	0.	0.	0.0	2004.	1729.	1350.	909.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.720	2171.	2634.	2.0	1995.	1724.	1349.	910.
0.730	2200.	2740.	2.0	2002.	1727.	1349.	910.
0.755	2295.	3025.	2.1	2024.	1736.	1349.	910.
0.780	2400.	3339.	2.2	2049.	1745.	1348.	911.
0.805	2519.	3686.	2.3	2075.	1756.	1349.	911.
0.830	2654.	4069.	2.4	2103.	1767.	1349.	912.
0.855	2807.	4491.	2.6	2134.	1779.	1349.	912.
0.880	2993.	4958.	2.7	2168.	1793.	1349.	913.
0.905	3187.	5473.	2.9	2205.	1807.	1350.	913.
0.930	3425.	6041.	3.1	2246.	1824.	1350.	913.
0.955	3706.	6668.	3.4	2292.	1842.	1351.	914.
0.980	4042.	7361.	3.7	2344.	1862.	1352.	914.
1.005	4447.	8126.	4.0	2403.	1885.	1353.	915.
1.030	4942.	8969.	4.5	2469.	1910.	1354.	915.
1.055	5559.	9901.	5.1	2546.	1940.	1355.	916.
1.080	6338.	10929.	5.8	2634.	1974.	1357.	916.
1.105	7347.	12065.	6.7	2737.	2013.	1358.	917.
1.130	8691.	13318.	7.9	2858.	2059.	1360.	918.
1.155	10566.	14701.	9.6	3004.	2114.	1362.	918.
1.180	13089.	16228.	11.9	3080.	2170.	1364.	919.
1.205	15625.	17913.	14.2	3080.	2212.	1367.	920.
1.230	18118.	19773.	16.5	3357.	2285.	1370.	921.
1.251	20187.	21485.	18.4	3502.	2356.	1372.	921.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 220277

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	518114.	518114.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	504888.	504888.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	492192.	492192.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	480293.	480293.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	469103.	469103.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	458547.	458547.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	448561.	448561.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	439093.	439093.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.720	2171.	0.0	134.	437257.	437390.	99.1
0.730	2200.	0.0	135.	438239.	439718.	99.1
0.755	2295.	0.0	141.	441382.	446322.	99.1
0.780	2400.	0.0	148.	444784.	453340.	99.1
0.805	2519.	0.0	155.	448481.	460829.	99.0
0.830	2654.	0.0	164.	452518.	468854.	99.0
0.855	2807.	0.0	173.	456950.	477500.	99.0
0.880	2983.	0.0	184.	461845.	486864.	98.9
0.905	3187.	0.0	197.	467287.	497072.	98.9
0.930	3425.	0.0	212.	473380.	508276.	98.9
0.955	3706.	0.0	229.	480260.	520672.	98.9
0.980	4042.	0.0	250.	488097.	534508.	98.8
1.005	4447.	0.0	276.	497117.	550105.	98.8
1.030	4942.	0.0	307.	507617.	567890.	98.8
1.055	5559.	0.0	346.	520000.	588430.	98.7
1.080	6338.	0.0	395.	534824.	612508.	98.7
1.105	7347.	0.0	459.	552886.	641235.	98.7
1.130	8691.	0.0	544.	575386.	676256.	98.6
1.155	10566.	0.0	664.	604282.	720219.	98.6
1.180	13089.	1.00	825.	634908.	769520.	98.6
1.205	15675.	2.25	988.	657047.	814402.	98.6
1.230	18118.	4.00	1172.	730319.	914770.	98.5
1.251	20187.	6.25	1319.	789471.	1000116.	98.5

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 110377

DER EPBF-UG-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 44.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 36.1 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.2 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1600.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 200.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1509.2 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2309.2 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.4122	18.3	2888.5	4466.4	0.0
4	.0221	110.0	.4040	18.0	2879.9	4351.3	33.8
9	.0361	115.9	.3833	17.0	2852.9	4123.0	121.7
16	.0494	125.4	.3543	15.7	2812.7	3809.2	237.0
25	.0625	138.9	.3198	14.2	2760.9	3439.5	372.4
36	.0754	157.2	.2826	12.6	2699.3	3038.9	520.3
49	.0883	182.0	.2441	10.8	2628.4	2624.9	673.0
64	.1012	215.5	.2061	9.2	2549.6	2216.3	823.6
81	.1140	261.5	.1699	7.5	2464.2	1827.0	966.0
100	.1269	325.1	.1367	6.1	2374.4	1469.5	1095.7
121	.1397	415.2	.1070	4.8	2281.0	1150.4	1209.5
144	.1525	544.3	.0816	3.6	2186.5	877.3	1305.9
169	.1653	732.7	.0606	2.7	2091.9	651.8	1384.8
196	.1780	1012.8	.0439	1.9	1998.3	471.6	1447.4
225	.1908	1428.8	.0311	1.4	1907.9	334.2	1495.5
256	.2036	2063.9	.0215	1.0	1819.9	231.5	1531.5
289	.2164	3021.8	.0147	0.7	1736.6	158.1	1557.9
324	.2291	4495.1	.0099	0.4	1656.8	106.3	1576.9
361	.2419	6764.5	.0066	0.3	1581.0	70.7	1590.3
400	.2547	10255.9	.0043	0.2	1509.4	47.1	1599.6
401	.2550	10268.3	.0043	0.2	1509.2	0.0	1599.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1509.2 K  
 THI = 888.1 K

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 888.1 K  
 THA = 870.0 K

DELTA T = 621.1 GRAD

DELTA T = 18.1 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 110377

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.87056E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21294E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.15092E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.16000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.85284E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.13315E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.60000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.44999E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.24890E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.25485E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.56170E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.55116E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.69880E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27078E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.50569E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76538E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.59925E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.14854E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.24234E+01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.45500E+01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.36010E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.30930E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.19458E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 110377

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2888.	2309.	1509.	879.
0.100	0.	0.	0.0	2828.	2276.	1522.	889.
0.200	0.	0.	0.0	2764.	2243.	1522.	898.
0.300	0.	0.	0.0	2702.	2210.	1519.	907.
0.400	0.	0.	0.0	2644.	2177.	1516.	914.
0.500	0.	0.	0.0	2587.	2144.	1511.	920.
0.600	0.	0.	0.0	2534.	2112.	1505.	926.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.650	1524.	1526.	1.0	2507.	2096.	1502.	928.
0.660	1524.	1529.	1.0	2508.	2096.	1502.	928.
0.760	1539.	1563.	1.0	2526.	2099.	1498.	932.
0.860	1555.	1598.	1.0	2542.	2103.	1495.	935.
0.960	1572.	1634.	1.0	2558.	2107.	1492.	937.
1.060	1591.	1670.	1.0	2573.	2110.	1489.	939.
1.160	1613.	1707.	1.0	2588.	2115.	1487.	940.
1.260	1636.	1745.	1.0	2603.	2119.	1486.	941.
1.360	1662.	1784.	1.0	2617.	2124.	1484.	942.
1.460	1691.	1823.	1.1	2632.	2130.	1483.	943.
1.560	1722.	1864.	1.1	2647.	2136.	1483.	944.
1.660	1758.	1905.	1.1	2662.	2142.	1483.	944.
1.760	1797.	1948.	1.1	2678.	2149.	1483.	945.
1.860	1841.	1991.	1.2	2695.	2157.	1483.	946.
1.960	1890.	2035.	1.2	2712.	2166.	1484.	947.
2.060	1946.	2080.	1.2	2731.	2175.	1485.	948.
2.160	2009.	2127.	1.3	2751.	2186.	1487.	950.
2.260	2081.	2174.	1.3	2773.	2198.	1489.	952.
2.360	2163.	2222.	1.4	2797.	2211.	1491.	954.
2.460	2258.	2271.	1.4	2823.	2226.	1495.	957.
2.560	2367.	2322.	1.5	2852.	2242.	1498.	959.
2.660	2495.	2374.	1.6	2883.	2261.	1503.	963.
2.760	2645.	2426.	1.7	2919.	2282.	1508.	967.
2.860	2824.	2480.	1.8	2958.	2305.	1514.	971.
2.960	3038.	2535.	1.9	3003.	2332.	1521.	976.
3.060	3301.	2592.	2.1	3054.	2363.	1530.	982.
3.160	3612.	2649.	2.3	3073.	2395.	1539.	988.
3.260	3936.	2708.	2.5	3073.	2424.	1550.	996.
3.360	4271.	2768.	2.7	3085.	2453.	1563.	1004.
3.460	4623.	2830.	2.9	3169.	2492.	1578.	1014.
3.560	4997.	2893.	3.1	3228.	2533.	1595.	1025.
3.601	5152.	2919.	3.2	3262.	2550.	1603.	1031.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 110377

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	676607.	676607.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	659552.	659552.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	642870.	642870.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	626984.	626984.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	611820.	611820.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	597307.	597307.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	583389.	583389.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.650	1524.	0.0	95.	576640.	576735.	99.2
0.660	1524.	0.0	95.	576658.	577707.	99.2
0.760	1539.	0.0	96.	578380.	589014.	99.1
0.860	1555.	0.0	97.	580168.	600485.	99.0
0.960	1572.	0.0	98.	582037.	612144.	98.9
1.060	1591.	0.0	100.	584002.	624017.	98.7
1.160	1613.	0.0	101.	586087.	636140.	98.6
1.260	1636.	0.0	103.	588312.	648546.	98.5
1.360	1662.	0.0	104.	590702.	661273.	98.4
1.460	1691.	0.0	106.	593284.	674363.	98.3
1.560	1722.	0.0	108.	596086.	687867.	98.0
1.660	1758.	0.0	110.	599145.	701842.	97.6
1.760	1797.	0.0	113.	602499.	716349.	97.2
1.860	1841.	0.0	116.	606191.	731461.	96.8
1.960	1890.	0.0	119.	610273.	747262.	96.4
2.060	1946.	0.0	122.	614804.	763848.	96.0
2.160	2009.	0.0	126.	619851.	781332.	95.7
2.260	2081.	0.0	131.	625496.	799846.	95.3
2.360	2163.	0.0	136.	631836.	819548.	94.9
2.460	2258.	0.0	142.	638587.	840628.	94.5
2.560	2367.	0.0	149.	647089.	863316.	94.1
2.660	2495.	0.0	158.	656318.	887893.	93.8
2.760	2645.	0.0	167.	666891.	914710.	93.4
2.860	2824.	0.0	179.	679088.	944212.	93.0
2.960	3038.	0.0	193.	693270.	976972.	92.6
3.060	3301.	0.0	210.	709927.	1013753.	92.3
3.160	3612.	0.25	230.	726827.	1052666.	91.9
3.260	3936.	2.25	251.	741512.	1091426.	91.5
3.360	4271.	2.25	276.	756094.	1132255.	91.2
3.460	4623.	4.00	301.	800444.	1205423.	90.8
3.560	4997.	6.25	327.	844828.	1281184.	90.4
3.601	5152.	6.25	338.	852837.	1302830.	90.3

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 150477

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN RETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 65.7 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 16.7 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 3.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1100.0 WATT
POPOSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 137.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1361.3 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 1943.2 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2218	14.6	2410.1	3548.8	0.0
4	.0221	304.4	.2159	14.2	2400.9	3429.0	28.9
9	.0361	324.9	.2023	13.3	2374.7	3208.7	98.0
16	.0494	357.8	.1836	12.1	2336.9	2912.0	187.3
25	.0625	405.8	.1619	10.6	2289.5	2567.5	290.1
36	.0754	473.7	.1387	9.1	2233.9	2200.2	399.3
49	.0883	567.7	.1157	7.6	2172.5	1835.5	508.4
64	.1012	699.3	.0940	6.2	2106.1	1490.5	612.1
81	.1140	882.7	.0744	4.9	2036.9	1181.4	706.3
100	.1269	1138.7	.0577	3.8	1966.6	915.6	788.9
121	.1397	1496.6	.0439	2.9	1896.4	697.0	858.9
144	.1525	1999.7	.0329	2.2	1827.2	522.1	916.8
169	.1653	2708.0	.0243	1.6	1759.3	385.5	963.6
196	.1780	3711.9	.0177	1.2	1694.4	281.6	1000.7
225	.1908	5113.6	.0128	0.8	1632.2	204.5	1029.7
256	.2036	7090.1	.0093	0.6	1572.7	147.5	1052.1
289	.2164	9866.4	.0067	0.4	1515.9	106.1	1069.3
324	.2291	13788.9	.0048	0.3	1461.5	76.0	1082.3
361	.2419	19297.1	.0034	0.2	1409.7	54.3	1092.2
400	.2547	26804.0	.0025	0.2	1361.5	39.4	1099.7
401	.2550	26841.2	.0024	0.2	1361.3	0.0	1099.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA =	1361.3 K	THI =	882.5 K
THI =	882.5 K	THA =	870.0 K
DELTA T =	478.8 GRAD	DELTA T =	12.5 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 150477

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.75371E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22463E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13613E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.11000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.68609E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10920E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIFNTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.32500E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.13901E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.47208E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.17347E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.98241E+03	J
HE-AB ENERGIE	= 0.96132E+03	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.13022E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26634E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.44817E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.51437E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.77024E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58380E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.14238E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.39393E-01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.38500E-01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.89500E+00	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.88501E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17705E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 150477

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2410.	1943.	1361.	876.
0.100	0.	0.	0.0	2343.	1909.	1373.	883.
0.200	0.	0.	0.0	2275.	1876.	1373.	889.
0.300	0.	0.	0.0	2213.	1845.	1370.	895.
0.400	0.	0.	0.0	2155.	1814.	1367.	900.
0.500	0.	0.	0.0	2101.	1784.	1362.	904.
0.600	0.	0.	0.0	2051.	1756.	1357.	907.
0.700	0.	0.	0.0	2004.	1729.	1350.	909.
0.800	0.	0.	0.0	1960.	1703.	1343.	911.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.815	10096.	10109.	9.2	1953.	1699.	1342.	911.
0.820	10604.	11511.	9.6	1976.	1709.	1343.	911.
0.825	11339.	13107.	10.3	2007.	1723.	1344.	911.
0.830	12186.	14925.	11.1	2041.	1738.	1345.	911.
0.835	13174.	16995.	12.0	2080.	1755.	1346.	911.
0.840	14338.	19352.	13.0	2123.	1773.	1347.	911.
0.845	15727.	22036.	14.3	2173.	1794.	1349.	911.
0.850	17404.	25092.	15.8	2230.	1817.	1350.	912.
0.855	19462.	28571.	17.7	2295.	1842.	1351.	912.
0.860	22026.	32534.	20.0	2372.	1872.	1353.	912.
0.865	25280.	37045.	23.0	2462.	1905.	1354.	912.
0.870	29494.	42183.	26.8	2568.	1944.	1356.	912.
0.875	35083.	48033.	31.9	2695.	1989.	1357.	912.
0.880	42757.	54694.	38.9	2848.	2043.	1359.	912.
0.885	53927.	62279.	49.0	3038.	2107.	1361.	912.
0.890	68488.	70916.	62.3	3082.	2165.	1362.	913.
0.895	81116.	80750.	73.7	3236.	2218.	1364.	913.
0.895	81116.	80750.	73.7	3236.	2218.	1364.	913.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 150477

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	518114.	518114.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	504888.	504888.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	492192.	492192.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	480293.	480293.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	469103.	469103.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	458547.	458547.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	448561.	448561.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	439093.	439093.	99.2
0.800	0.	0.0	0.	430093.	430093.	99.0
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.815	10096.	0.0	621.	428781.	429402.	99.0
0.820	10604.	0.0	652.	432266.	436067.	99.0
0.825	11339.	0.0	698.	437103.	444299.	99.0
0.830	12186.	0.0	751.	442422.	453263.	99.0
0.835	13174.	0.0	812.	448312.	463087.	99.0
0.840	14338.	0.0	884.	454892.	473938.	99.0
0.845	15727.	0.0	971.	462310.	486032.	99.0
0.850	17404.	0.0	1076.	470765.	499648.	99.0
0.855	19462.	0.0	1204.	480524.	515160.	99.0
0.860	22026.	0.0	1365.	491949.	533074.	99.0
0.865	25280.	0.0	1569.	505545.	554086.	99.0
0.870	29494.	0.0	1834.	522028.	579182.	99.0
0.875	35083.	0.0	2188.	542457.	609800.	99.0
0.880	42757.	0.0	2675.	568474.	648150.	98.9
0.885	53927.	0.0	3388.	602914.	697981.	98.9
0.890	68488.	2.25	4319.	635022.	749846.	98.9
0.895	81116.	4.00	5201.	686091.	825098.	98.9
0.895	81116.	4.00	5201.	686091.	825098.	98.9

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 19C477

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENS PANNUNG	U = 47.2 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 31.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.5 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1500.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 187.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1481.5 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2242.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTEN SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3714	17.5	2804.2	4274.8	0.0
4	.0221	129.8	.3636	17.2	2795.2	4158.6	33.5
9	.0361	137.0	.3446	16.3	2768.0	3937.5	117.6
16	.0494	148.4	.3182	15.0	2728.0	3633.4	227.7
25	.0625	164.5	.2869	13.5	2677.0	3276.9	356.8
36	.0754	186.9	.2525	11.9	2615.7	2884.4	497.5
49	.0883	217.3	.2172	10.3	2545.9	2481.1	642.2
64	.1012	258.8	.1824	8.6	2468.7	2083.0	784.2
81	.1140	316.2	.1493	7.0	2385.5	1704.5	917.6
100	.1269	396.2	.1191	5.6	2298.3	1360.5	1038.2
121	.1397	509.8	.0926	4.4	2208.6	1057.3	1143.3
144	.1525	672.2	.0702	3.3	2118.4	801.6	1231.7
169	.1653	909.5	.0519	2.5	2028.4	592.6	1303.6
196	.1780	1260.6	.0374	1.8	1939.8	427.4	1360.4
225	.1908	1778.0	.0265	1.3	1854.6	303.1	1404.0
256	.2036	2558.6	.0184	0.9	1772.1	210.6	1436.8
289	.2164	3721.9	.0127	0.6	1693.9	144.9	1460.9
324	.2291	5474.4	.0086	0.4	1619.5	98.6	1478.3
361	.2419	8130.6	.0058	0.3	1548.7	66.4	1490.8
400	.2547	12146.6	.0039	0.2	1481.7	44.8	1499.6
401	.2550	12161.6	.0039	0.2	1481.5	0.0	1499.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE		TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE	
SPALTBREITE =	0.03 CM	HUELLENDICKE =	0.04 CM
TBA =	1481.5 K	THI =	887.0 K
THI =	887.0 K	THA =	870.0 K
DELTA T =	594.5 GRAD	DELTA T =	17.0 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 190477

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.89284E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21072E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14815E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.15000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.93093E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.14478E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.18800E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.24683E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.53975E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.25754E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12277E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.12077E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.60477E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26467E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.47723E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHTE	= 0.50402E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHTE	= 0.76958E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58590E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.25501E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.81461E-01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.80000E-01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.82000E+00	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.76901E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.19947E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 190477

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPF /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TEA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2804.	2242.	1482.	879.
0.100	0.	0.	0.0	2743.	2209.	1494.	888.
0.200	0.	0.	0.0	2677.	2175.	1494.	896.
0.300	0.	0.	0.0	2615.	2141.	1491.	904.
0.400	0.	0.	0.0	2555.	2109.	1487.	911.
0.500	0.	0.	0.0	2499.	2076.	1483.	917.
0.600	0.	0.	0.0	2445.	2044.	1477.	921.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.695	12598.	12612.	8.4	2395.	2014.	1470.	925.
0.700	13076.	13425.	8.7	2418.	2025.	1471.	925.
0.710	14465.	15213.	9.6	2481.	2055.	1472.	925.
0.720	16126.	17238.	10.8	2552.	2088.	1474.	926.
0.730	18135.	19534.	12.1	2631.	2125.	1476.	926.
0.740	20599.	22135.	13.7	2720.	2166.	1478.	926.
0.750	23673.	25082.	15.8	2822.	2213.	1481.	927.
0.760	27609.	28421.	18.4	2939.	2266.	1483.	927.
0.770	32865.	32206.	21.9	3077.	2326.	1486.	928.
0.780	38676.	36494.	25.8	3077.	2373.	1489.	928.
0.790	44002.	41353.	29.3	3077.	2410.	1492.	929.
0.800	48876.	46859.	32.6	3263.	2468.	1496.	930.
0.810	53669.	53098.	35.8	3515.	2554.	1500.	930.
0.820	58442.	60168.	39.0	3515.	2617.	1504.	931.
0.820	58442.	60168.	39.0	3515.	2617.	1504.	931.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 190477

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	644709.	644709.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	628335.	628335.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	612367.	612367.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	597189.	597189.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	582730.	582730.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	568922.	568922.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	555710.	555710.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.695	12598.	0.0	785.	543670.	544455.	99.2
0.700	13076.	0.0	816.	548105.	552890.	99.2
0.710	14465.	0.0	904.	560592.	574004.	99.2
0.720	16126.	0.0	1009.	574897.	597910.	99.1
0.730	18135.	0.0	1137.	591445.	625234.	99.1
0.740	20599.	0.0	1295.	610800.	656800.	99.1
0.750	23673.	0.0	1492.	633740.	693736.	99.1
0.760	27609.	0.0	1746.	661401.	737663.	99.1
0.770	32865.	0.0	2088.	695588.	791098.	99.1
0.780	38676.	2.25	2465.	721707.	840195.	99.1
0.790	44002.	6.25	2811.	741340.	886415.	99.1
0.800	48876.	9.00	3191.	808148.	983487.	99.0
0.810	53669.	12.25	3560.	875367.	1084670.	99.0
0.820	58442.	16.00	3913.	930926.	1177751.	99.0
0.820	58442.	16.00	3913.	930926.	1177751.	99.0

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 26C477

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K  
 DELTA T = 507.1 GRAD

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 13.6 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 260477

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.79312E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22069E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.74976E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.11858E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.16800E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.17535E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.58341E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.19346E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12459E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.12209E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.11104E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26621E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.45930E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.50995E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76992E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58480E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.17278E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.15105E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.16000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.10410E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.99201E+00	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18188E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 260477

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /—/	TBZ /K/	IBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2455.	1989.	1404.	884.
0.200	0.	0.	0.0	2387.	1956.	1404.	891.
0.300	0.	0.	0.0	2323.	1923.	1402.	897.
0.400	0.	0.	0.0	2263.	1891.	1398.	902.
0.500	0.	0.	0.0	2208.	1860.	1393.	907.
0.600	0.	0.	0.0	2155.	1830.	1387.	910.
0.700	0.	0.	0.0	2106.	1802.	1381.	913.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.750	3702.	3707.	3.1	2082.	1788.	1377.	914.
0.760	3808.	3946.	3.2	2097.	1794.	1377.	914.
0.785	4157.	4613.	3.5	2144.	1814.	1378.	914.
0.810	4584.	5393.	3.8	2198.	1837.	1379.	915.
0.835	5114.	6306.	4.3	2261.	1863.	1380.	915.
0.860	5784.	7372.	4.8	2334.	1893.	1381.	916.
0.885	6652.	8619.	5.5	2421.	1929.	1383.	916.
0.910	7802.	10076.	6.5	2525.	1970.	1385.	917.
0.935	9372.	11780.	7.8	2651.	2020.	1387.	917.
0.960	11602.	13773.	9.7	2805.	2081.	1389.	918.
0.985	14983.	16102.	12.5	3001.	2157.	1392.	919.
1.010	19772.	18825.	16.5	3076.	2231.	1395.	920.
1.035	24408.	22009.	20.3	3251.	2304.	1399.	921.
1.041	25418.	22850.	21.2	3345.	2331.	1400.	921.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 260477

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	550002.	550002.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	535833.	535833.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	522183.	522183.	99.8 <sup>a</sup>
0.300	0.	0.0	0.	509345.	509345.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	497234.	497234.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	485772.	485772.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	474901.	474901.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	464566.	464566.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.750	3702.	0.0	228.	459586.	459814.	99.1
0.760	3808.	0.0	235.	461886.	464431.	99.1
0.785	4157.	0.0	257.	469184.	477880.	99.1
0.810	4584.	0.0	284.	477594.	493046.	99.0
0.835	5114.	0.0	317.	487416.	510372.	99.0
0.860	5784.	0.0	359.	499071.	530469.	99.0
0.885	6652.	0.0	413.	513159.	554202.	98.9
0.910	7802.	0.0	486.	530557.	582829.	98.9
0.935	9372.	0.0	585.	552603.	618240.	98.9
0.960	11602.	0.0	727.	581449.	663442.	98.9
0.985	14983.	0.0	943.	620944.	723710.	98.8
1.010	19772.	2.25	1251.	661749.	792072.	98.8
1.035	24408.	4.00	1572.	736125.	901776.	98.8
1.041	25418.	6.25	1648.	749765.	925117.	98.8

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 280477

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSPIANNUNG	U = 41.9 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 40.6 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.0 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1700.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 212.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1538.5 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2375.8 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.4566	19.2	2970.5	4671.5	0.0
4	.0221	93.7	.4478	18.8	2962.1	4552.2	34.6
9	.0361	98.7	.4248	17.8	2935.1	4313.2	126.6
16	.0494	106.8	.3927	16.5	2894.9	3986.7	247.3
25	.0625	118.3	.3547	14.9	2842.7	3600.3	389.0
36	.0754	133.6	.3139	13.2	2780.5	3187.1	543.9
49	.0883	154.3	.2718	11.4	2708.6	2760.3	704.1
64	.1012	181.9	.2306	9.7	2628.6	2341.3	862.7
81	.1140	219.3	.1913	8.0	2541.8	1942.3	1013.5
100	.1269	270.9	.1548	6.5	2449.2	1571.7	1151.7
121	.1397	343.0	.1223	5.1	2353.3	1241.3	1273.8
144	.1525	446.4	.0940	3.9	2254.9	953.4	1378.2
169	.1653	596.6	.0703	2.9	2156.3	713.4	1464.3
196	.1780	820.5	.0511	2.1	2058.1	518.8	1532.9
225	.1908	1156.9	.0363	1.5	1962.3	367.7	1585.8
256	.2036	1670.3	.0251	1.1	1869.6	254.9	1625.5
289	.2164	2460.6	.0170	0.7	1780.6	172.9	1654.5
324	.2291	3701.1	.0113	0.5	1695.0	115.1	1675.1
361	.2419	5614.4	.0075	0.3	1614.8	75.9	1689.6
400	.2547	8621.6	.0049	0.2	1538.7	49.9	1699.6
401	.2550	8631.8	.0049	0.2	1538.5	0.0	1699.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1538.5 K  
 THI = 889.3 K  
 DELTA T = 649.2 GRAD

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 889.3 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 19.3 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 280477

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.86921E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21308E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	g DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.15385E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.17000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.83665E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.13067E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.58000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.36520E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.20677E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.28358E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.47720E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.46868E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.72549E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27024E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.50532E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76553E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.59878E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.13183E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.22359E+01	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.22500E+01	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.28510E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.23740E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.18636E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 280477

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2971.	2376.	1538.	880.
0.100	0.	0.	0.0	2911.	2343.	1551.	891.
0.200	0.	0.	0.0	2848.	2310.	1551.	901.
0.300	0.	0.	0.0	2787.	2277.	1549.	910.
0.400	0.	0.	0.0	2729.	2245.	1545.	918.
0.500	0.	0.	0.0	2674.	2212.	1541.	925.
0.600	0.	0.	0.0	2620.	2180.	1535.	931.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.635	1721.	1723.	1.0	2602.	2169.	1533.	933.
0.640	1720.	1727.	1.0	2602.	2169.	1533.	933.
0.740	1748.	1805.	1.0	2623.	2174.	1529.	937.
0.840	1778.	1887.	1.0	2644.	2181.	1527.	941.
0.940	1812.	1973.	1.1	2664.	2187.	1525.	944.
1.040	1850.	2062.	1.1	2684.	2194.	1523.	947.
1.140	1893.	2156.	1.1	2704.	2202.	1522.	949.
1.240	1940.	2254.	1.1	2724.	2211.	1522.	951.
1.340	1993.	2357.	1.2	2746.	2220.	1522.	953.
1.440	2053.	2464.	1.2	2767.	2231.	1523.	955.
1.540	2120.	2576.	1.2	2791.	2242.	1524.	957.
1.640	2197.	2693.	1.3	2815.	2255.	1526.	959.
1.740	2284.	2815.	1.3	2841.	2268.	1528.	962.
1.840	2384.	2943.	1.4	2869.	2284.	1531.	965.
1.940	2500.	3077.	1.5	2899.	2301.	1535.	968.
2.040	2634.	3217.	1.5	2933.	2321.	1539.	971.
2.140	2792.	3363.	1.6	2969.	2342.	1544.	975.
2.240	2978.	3516.	1.8	3010.	2367.	1551.	980.
2.340	3202.	3675.	1.9	3056.	2394.	1558.	985.
2.440	3463.	3842.	2.0	3073.	2422.	1567.	991.
2.540	3732.	4017.	2.2	3073.	2448.	1577.	998.
2.640	4010.	4200.	2.4	3073.	2473.	1588.	1007.
2.740	4301.	4390.	2.5	3127.	2505.	1602.	1016.
2.840	4602.	4590.	2.7	3183.	2539.	1618.	1026.
2.851	4637.	4613.	2.7	3188.	2544.	1620.	1028.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 280477

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	709626.	709626.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	691866.	691866.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	674481.	674481.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	657904.	657904.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	642058.	642058.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	626867.	626867.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	612273.	612273.	99.3
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.635	1721.	0.0	108.	607297.	607405.	99.2
0.640	1720.	0.0	108.	607268.	607916.	99.2
0.740	1748.	0.0	110.	610176.	621720.	99.1
0.840	1778.	0.0	112.	613285.	635911.	99.0
0.940	1812.	0.0	114.	616619.	650535.	98.9
1.040	1850.	0.0	116.	620216.	665652.	98.8
1.140	1893.	0.0	119.	624115.	681328.	98.6
1.240	1940.	0.0	122.	628360.	697639.	98.5
1.340	1993.	0.0	126.	633007.	714673.	98.4
1.440	2053.	0.0	129.	638118.	732532.	98.3
1.540	2120.	0.0	134.	643764.	751338.	98.1
1.640	2197.	0.0	139.	650031.	771228.	97.7
1.740	2284.	0.0	144.	657021.	792369.	97.3
1.840	2384.	0.0	151.	664854.	814958.	96.9
1.940	2500.	0.0	158.	673677.	839233.	96.5
2.040	2634.	0.0	167.	683669.	865486.	96.1
2.140	2792.	0.0	177.	695056.	894079.	95.7
2.240	2978.	0.0	189.	708126.	925472.	95.3
2.340	3202.	0.0	204.	723253.	960256.	95.0
2.440	3463.	0.25	221.	738482.	996740.	94.6
2.540	3732.	1.00	239.	751668.	1032910.	94.2
2.640	4010.	2.25	257.	764313.	1070329.	93.8
2.740	4301.	4.00	280.	781267.	1114137.	93.5
2.840	4602.	4.00	301.	834084.	1195952.	93.1
2.851	4637.	4.00	304.	836648.	1201845.	93.0

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 030577

DER EPBF-UO-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 54.5 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 23.9 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.3 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM**MM	EL. LEISTUNG	PS = 1300.0 WATT
PORCSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 162.5 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1424.2 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2099.1 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2940	16.0	2617.7	3908.4	0.0
4	.0221	189.6	.2877	15.7	2609.1	3799.1	30.0
9	.0361	200.6	.2719	14.8	2582.7	3585.5	106.7
16	.0494	218.5	.2496	13.6	2543.5	3290.9	206.8
25	.0625	244.3	.2232	12.2	2493.7	2942.7	323.4
36	.0754	280.4	.1945	10.6	2434.7	2563.7	449.3
49	.0883	330.3	.1651	9.0	2368.1	2176.1	577.3
64	.1012	399.6	.1365	7.4	2295.2	1799.0	701.1
81	.1140	495.7	.1100	6.0	2218.2	1449.7	815.7
100	.1269	630.8	.0864	4.7	2138.4	1139.5	917.6
121	.1397	823.1	.0663	3.6	2057.2	873.5	1005.0
144	.1525	1096.7	.0497	2.7	1976.6	655.4	1077.7
169	.1653	1490.1	.0366	2.0	1897.5	482.6	1136.4
196	.1780	2062.8	.0264	1.4	1820.1	348.6	1182.7
225	.1908	2888.2	.0189	1.0	1746.1	249.2	1218.3
256	.2036	4091.4	.0133	0.7	1675.1	175.9	1245.4
289	.2164	5848.4	.0093	0.5	1607.3	123.1	1265.7
324	.2291	8408.6	.0065	0.4	1542.9	85.7	1280.6
361	.2419	12115.5	.0045	0.2	1482.2	59.5	1291.6
400	.2547	17513.5	.0031	0.2	1424.4	41.5	1299.7
401	.2550	17536.6	.0031	0.2	1424.2	0.0	1299.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1424.2 K  
 THI = 884.7 K  
 DELTA T = 539.4 GRAD

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 884.7 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 14.7 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 030577

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.78933E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22107E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14242E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.13000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.70047E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.11083E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.99000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.18963E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.86585E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.21311E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.18913E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.18548E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.10026E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27793E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.50341E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.50362E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76943E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58637E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.11099E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.46759E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.46000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.14610E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.13800E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.16687E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 030577

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2618.	2099.	1424.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2554.	2065.	1436.	885.
0.200	0.	0.	0.0	2487.	2031.	1436.	892.
0.300	0.	0.	0.0	2424.	1998.	1433.	899.
0.400	0.	0.	0.0	2364.	1966.	1429.	905.
0.500	0.	0.	0.0	2308.	1934.	1424.	910.
0.600	0.	0.	0.0	2254.	1903.	1418.	914.
0.700	0.	0.	0.0	2204.	1873.	1412.	917.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.720	2004.	2007.	1.5	2194.	1867.	1410.	917.
0.730	2019.	2051.	1.6	2199.	1869.	1410.	918.
0.770	2100.	2237.	1.6	2225.	1879.	1409.	918.
0.810	2191.	2440.	1.7	2253.	1890.	1408.	919.
0.850	2294.	2662.	1.8	2283.	1901.	1408.	920.
0.890	2409.	2904.	1.9	2315.	1914.	1407.	921.
0.930	2540.	3167.	2.0	2349.	1928.	1407.	921.
0.970	2690.	3455.	2.1	2385.	1943.	1407.	922.
1.010	2862.	3769.	2.2	2425.	1959.	1407.	923.
1.050	3061.	4112.	2.4	2468.	1977.	1408.	923.
1.090	3293.	4485.	2.5	2515.	1997.	1408.	924.
1.130	3566.	4893.	2.7	2567.	2019.	1409.	925.
1.170	3890.	5337.	3.0	2625.	2044.	1411.	925.
1.210	4279.	5822.	3.3	2688.	2072.	1412.	926.
1.250	4753.	6351.	3.7	2760.	2103.	1414.	927.
1.290	5340.	6928.	4.1	2841.	2138.	1416.	928.
1.330	6085.	7557.	4.7	2933.	2179.	1419.	929.
1.370	7061.	8244.	5.4	3040.	2226.	1422.	930.
1.410	8252.	8993.	6.3	3073.	2271.	1425.	931.
1.450	9449.	9810.	7.3	3073.	2308.	1430.	933.
1.461	9776.	10047.	7.5	3073.	2318.	1431.	933.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : C30577

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	581202.	581202.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	566360.	566360.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	551947.	551947.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	538321.	538321.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	525411.	525411.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	513149.	513149.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	501477.	501477.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	490348.	490348.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.720	2004.	0.0	124.	488184.	488308.	99.1
0.730	2019.	0.0	125.	488882.	490251.	99.1
0.770	2100.	0.0	130.	492651.	499124.	99.1
0.810	2191.	0.0	136.	496750.	508543.	99.0
0.850	2294.	0.0	142.	501225.	518580.	99.0
0.890	2409.	0.0	150.	506133.	529324.	98.9
0.930	2540.	0.0	158.	511539.	540877.	98.9
0.970	2690.	0.0	167.	517527.	553364.	98.8
1.010	2862.	0.0	178.	524194.	566936.	98.8
1.050	3061.	0.0	191.	531663.	581776.	98.7
1.090	3293.	0.0	205.	540083.	598112.	98.7
1.130	3566.	0.0	222.	549644.	616226.	98.6
1.170	3890.	0.0	243.	560587.	636476.	98.6
1.210	4279.	0.0	268.	573223.	659323.	98.6
1.250	4753.	0.0	298.	587965.	685374.	98.5
1.290	5340.	0.0	336.	605380.	715447.	98.5
1.330	6085.	0.0	383.	626271.	750697.	98.4
1.370	7061.	0.0	446.	651861.	792845.	98.4
1.410	8252.	1.00	523.	676352.	836756.	98.3
1.450	9449.	2.25	600.	695589.	878490.	98.3
1.461	9776.	4.00	621.	700469.	890102.	98.3

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 060577

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
PORCSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STRCM, FL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZCNENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.9	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K  
 DELTA T = 507.1 GRAD

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 13.6 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 060577

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.75483E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22452E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.65566E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10429E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.14200E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.10000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.12856E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.59742E+06	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.19340E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.12756E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.12500E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.11285E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27355E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.47789E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.51050E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76996E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.58468E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.11213E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.17134E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.11720E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.10660E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.10510E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.15305E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 060577

ZEIT /S/	PSTHED /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	0.	0.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.100	0.	0.	0.0	2455.	1989.	1404.	884.
0.200	0.	0.	0.0	2387.	1956.	1404.	891.
0.300	0.	0.	0.0	2323.	1923.	1402.	897.
0.400	0.	0.	0.0	2263.	1891.	1398.	902.
0.500	0.	0.	0.0	2208.	1860.	1393.	907.
0.600	0.	0.	0.0	2155.	1830.	1387.	910.
0.700	0.	0.	0.0	2106.	1802.	1381.	913.
BEGINN DER TRANSIENTE							
0.780	3366.	2989.	2.8	2068.	1779.	1375.	914.
0.790	3451.	3142.	2.9	2082.	1785.	1375.	914.
0.800	3556.	3304.	3.0	2097.	1792.	1375.	914.
0.810	3668.	3474.	3.1	2114.	1799.	1375.	915.
0.820	3789.	3652.	3.2	2132.	1806.	1376.	915.
0.830	3919.	3840.	3.3	2150.	1814.	1376.	915.
0.840	4059.	4037.	3.4	2169.	1822.	1376.	915.
0.850	4210.	4244.	3.5	2190.	1831.	1376.	915.
0.860	4374.	4462.	3.6	2211.	1840.	1377.	915.
0.870	4551.	4692.	3.8	2234.	1849.	1377.	915.
0.880	4744.	4933.	4.0	2258.	1859.	1378.	916.
0.890	4955.	5186.	4.1	2284.	1870.	1378.	916.
0.900	5186.	5450.	4.3	2311.	1881.	1378.	916.
0.910	5440.	5936.	4.5	2340.	1892.	1379.	916.
0.920	5719.	6465.	4.8	2370.	1905.	1379.	916.
0.930	6027.	7040.	5.0	2403.	1918.	1380.	916.
0.940	6368.	7667.	5.3	2438.	1932.	1381.	917.
0.950	6749.	8350.	5.6	2476.	1947.	1381.	917.
0.960	7173.	9094.	6.0	2516.	1963.	1382.	917.
0.970	7650.	9904.	6.4	2559.	1980.	1383.	917.
0.980	8187.	10786.	6.8	2605.	1999.	1383.	918.
0.990	8796.	11747.	7.3	2655.	2018.	1384.	918.
1.000	9490.	12793.	7.9	2709.	2040.	1385.	918.
1.010	10286.	13933.	8.6	2767.	2063.	1386.	918.
1.020	11209.	15174.	9.3	2831.	2087.	1387.	918.
1.030	12290.	16525.	10.2	2900.	2114.	1388.	919.
1.040	13576.	17997.	11.3	2977.	2144.	1389.	919.
1.050	15135.	19600.	12.6	3062.	2176.	1390.	919.
1.060	16859.	21346.	14.0	3080.	2204.	1391.	920.
=====							
1.066	17868.	22467.	14.9	3080.	2219.	1392.	920.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 060577

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	0.	550002.	550002.	100.0
0.100	0.	0.0	0.	535833.	535833.	99.9
0.200	0.	0.0	0.	522183.	522183.	99.8
0.300	0.	0.0	0.	509345.	509345.	99.6
0.400	0.	0.0	0.	497234.	497234.	99.5
0.500	0.	0.0	0.	485772.	485772.	99.4
0.600	0.	0.0	0.	474901.	474901.	99.3
0.700	0.	0.0	0.	464566.	464566.	99.2
BEGINN DER TRANSIENTE						
0.780	3366.	0.0	208.	456655.	456862.	99.1
0.790	3451.	0.0	213.	458652.	460961.	99.1
0.800	3556.	0.0	219.	461085.	465560.	99.0
0.810	3668.	0.0	227.	463640.	470348.	99.0
0.820	3789.	0.0	234.	466326.	475339.	99.0
0.830	3919.	0.0	242.	469154.	480551.	99.0
0.840	4059.	0.0	251.	472136.	486003.	99.0
0.850	4210.	0.0	260.	475288.	491714.	99.0
0.860	4374.	0.0	271.	478624.	497709.	99.0
0.870	4551.	0.0	282.	482163.	504014.	99.0
0.880	4744.	0.0	294.	485926.	510659.	98.9
0.890	4955.	0.0	307.	489935.	517677.	98.9
0.900	5186.	0.0	321.	494217.	525107.	98.9
0.910	5440.	0.0	337.	498802.	532992.	98.9
0.920	5719.	0.0	355.	503726.	541384.	98.9
0.930	6027.	0.0	374.	509028.	550339.	98.9
0.940	6368.	0.0	396.	514754.	559924.	98.9
0.950	6749.	0.0	420.	520960.	570216.	98.9
0.960	7173.	0.0	446.	527707.	581304.	98.9
0.970	7650.	0.0	477.	535071.	593296.	98.8
0.980	8187.	0.0	511.	543140.	606313.	98.8
0.990	8796.	0.0	549.	552020.	620506.	98.8
1.000	9490.	0.0	593.	561840.	636053.	98.8
1.010	10286.	0.0	644.	572758.	653175.	98.8
1.020	11209.	0.0	703.	584973.	672143.	98.8
1.030	12290.	0.0	772.	598742.	693307.	98.8
1.040	13576.	0.0	854.	614405.	717126.	98.8
1.050	15135.	0.0	954.	632437.	744231.	98.7
1.060	16859.	1.00	1065.	648055.	770003.	98.7
1.066	17868.	1.00	1130.	655658.	784217.	98.7

SIMULATIONSEXPERIMENT : VS.-NR. : 230377

DER EPBF-UD-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSANNUNG	U = 50.4 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 27.8 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 1.8 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1400.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 175.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1455.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2173.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTS SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.3304	16.7	2712.5	4062.4	0.0
4	.0221	155.7	.3238	16.3	2704.1	3955.2	30.4
9	.0361	164.3	.3068	15.5	2677.7	3743.0	110.3
16	.0494	178.2	.2829	14.3	2638.5	3451.0	214.9
25	.0625	198.2	.2543	12.8	2588.1	3100.8	337.5
36	.0754	225.8	.2232	11.3	2528.5	2722.0	470.5
49	.0883	263.9	.1910	9.6	2460.3	2328.9	606.8
64	.1012	316.1	.1595	8.0	2385.5	1944.6	739.9
81	.1140	388.6	.1297	6.5	2305.6	1581.6	864.1
100	.1269	490.0	.1029	5.2	2222.2	1254.6	975.7
121	.1397	634.4	.0795	4.0	2136.6	969.1	1072.4
144	.1525	840.1	.0600	3.0	2051.2	731.5	1153.2
169	.1653	1138.3	.0443	2.2	1966.6	540.1	1218.8
196	.1780	1576.0	.0320	1.6	1883.7	390.0	1270.6
225	.1908	2213.5	.0228	1.1	1804.1	277.8	1310.5
256	.2036	3159.2	.0160	0.8	1727.3	194.7	1340.6
289	.2164	4567.2	.0110	0.6	1653.7	134.8	1362.9
324	.2291	6639.5	.0076	0.4	1584.3	92.8	1379.3
361	.2419	9732.4	.0052	0.3	1518.2	63.3	1391.1
400	.2547	14297.6	.0035	0.2	1455.8	43.5	1399.6
401	.2550	14315.6	.0035	0.2	1455.6	0.0	1399.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-HUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1455.6 K  
 THI = 885.9 K  
 DELTA T = 569.7 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 885.9 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 15.9 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 230377

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.84861E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.21514E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	g DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.14556E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.14000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.81308E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.12743E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENSTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.88000E+02	V
ZEITSCHRITT	= 0.25000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.60879E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.35193E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.17429E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.74405E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.72013E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.78348E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27157E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.50437E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHTe	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHTe	= 0.75953E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.61783E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.13096E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.60110E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.60000E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.56225E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.54725E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17524E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 230377

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	1400.	1.0	2712.	2174.	1456.	878.
0.500	1400.	1400.	1.0	2701.	2162.	1477.	920.
1.000	1400.	1400.	1.0	2684.	2154.	1486.	952.
1.500	1400.	1400.	1.0	2668.	2148.	1494.	979.
2.000	1400.	1400.	1.0	2655.	2145.	1503.	1002.
2.500	1400.	1400.	1.0	2645.	2143.	1512.	1025.
3.000	1400.	1400.	1.0	2637.	2144.	1522.	1047.
3.500	1400.	1400.	1.0	2630.	2146.	1534.	1070.
4.000	0.	0.	0.0	2625.	2150.	1546.	1092.
4.500	0.	0.	0.0	2341.	2004.	1533.	1112.
BEGINN DER TRANSIENTE							
4.665	2010.	2033.	1.4	2265.	1959.	1524.	1116.
4.670	2018.	2050.	1.4	2267.	1961.	1524.	1117.
4.720	2102.	2228.	1.5	2293.	1972.	1525.	1118.
4.770	2196.	2422.	1.6	2321.	1985.	1525.	1119.
4.820	2301.	2632.	1.6	2350.	1998.	1526.	1120.
4.870	2418.	2861.	1.7	2381.	2013.	1527.	1121.
4.920	2551.	3110.	1.8	2415.	2029.	1529.	1123.
4.970	2702.	3380.	1.9	2450.	2046.	1531.	1124.
5.020	2874.	3674.	2.1	2489.	2064.	1533.	1126.
5.070	3072.	3993.	2.2	2531.	2085.	1536.	1128.
5.120	3300.	4340.	2.4	2576.	2107.	1539.	1130.
5.170	3566.	4717.	2.5	2626.	2132.	1543.	1132.
5.220	3878.	5127.	2.8	2680.	2160.	1547.	1135.
5.270	4250.	5572.	3.0	2740.	2190.	1551.	1138.
5.320	4696.	6057.	3.4	2807.	2224.	1557.	1141.
5.370	5241.	6583.	3.7	2881.	2263.	1563.	1144.
5.420	5921.	7155.	4.2	2966.	2306.	1569.	1148.
5.470	6795.	7777.	4.9	3063.	2356.	1577.	1152.
5.520	7801.	8453.	5.6	3074.	2400.	1585.	1156.
5.570	8806.	9187.	6.3	3074.	2439.	1595.	1161.
5.620	9833.	9986.	7.0	3175.	2487.	1606.	1167.
5.622	9884.	10027.	7.1	3184.	2490.	1607.	1167.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 230377

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	220.	613462.	613682.	100.0
0.500	1400.	0.0	220.	608450.	652707.	99.4
1.000	1400.	0.0	220.	604486.	692673.	98.8
1.500	1400.	0.0	220.	601675.	733811.	98.2
2.000	1400.	0.0	220.	599881.	775954.	96.3
2.500	1400.	0.0	220.	598989.	818990.	94.4
3.000	1400.	0.0	220.	598894.	862821.	92.5
3.500	1400.	0.0	220.	599511.	907363.	90.7
4.000	0.	0.0	0.	600770.	952339.	88.9
4.500	0.	0.0	0.	539199.	890768.	83.7
BEGINN DER TRANSIENTE						
4.665	2010.	0.0	312.	522172.	874366.	82.0
4.670	2018.	0.0	314.	522605.	875426.	82.0
4.720	2102.	0.0	327.	527137.	886366.	81.5
4.770	2196.	0.0	342.	532052.	897970.	81.0
4.820	2301.	0.0	358.	537401.	910323.	80.5
4.870	2418.	0.0	377.	543246.	923523.	80.1
4.920	2551.	0.0	398.	549660.	937690.	79.6
4.970	2702.	0.0	422.	556729.	952961.	79.1
5.020	2874.	0.0	449.	564560.	969506.	78.6
5.070	3072.	0.0	480.	573279.	987527.	78.2
5.120	3300.	0.0	517.	583042.	1007269.	77.7
5.170	3566.	0.0	559.	594043.	1029038.	77.2
5.220	3878.	0.0	609.	606525.	1053213.	76.8
5.270	4250.	0.0	669.	620800.	1080275.	76.3
5.320	4696.	0.0	740.	637272.	1110848.	75.8
5.370	5241.	0.0	828.	656450.	1145763.	75.4
5.420	5921.	0.0	938.	679218.	1186168.	74.9
5.470	6795.	0.0	1080.	706588.	1233730.	74.5
5.520	7801.	2.25	1244.	730456.	1280962.	74.0
5.570	8806.	4.00	1408.	750233.	1327287.	73.6
5.620	9833.	6.25	1598.	799836.	1407020.	73.2
5.622	9884.	6.25	1607.	813081.	1421872.	73.1

SIMULATIONSEXPERIMENT : VS.-NR. : 190577

DER EPBF-UC-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 40.7 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 43.3 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 0.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1760.0 WATT
PORCSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 220.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1551.6 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2412.5 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLDICHTHE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.4873	19.8	3018.9	4835.3	0.0
4	.0221	85.2	.4773	19.4	3010.1	4705.2	36.5
9	.0361	90.0	.4523	18.4	2982.7	4453.1	131.5
16	.0494	97.4	.4177	17.0	2942.1	4113.1	256.1
25	.0625	107.8	.3773	15.4	2889.9	3715.0	402.3
36	.0754	122.1	.3333	13.6	2826.5	3283.5	562.0
49	.0883	140.9	.2887	11.7	2753.7	2843.4	727.2
64	.1012	166.1	.2450	10.0	2672.6	2413.4	890.6
81	.1140	199.8	.2036	8.3	2584.4	2006.1	1046.2
100	.1269	246.0	.1654	6.7	2490.6	1629.1	1189.2
121	.1397	310.8	.1309	5.3	2392.4	1289.0	1315.9
144	.1525	403.0	.1010	4.1	2292.0	994.3	1424.5
169	.1653	538.1	.0756	3.1	2190.3	744.6	1514.3
196	.1780	737.5	.0552	2.2	2089.9	543.0	1586.0
225	.1908	1041.2	.0391	1.6	1990.7	384.7	1641.4
256	.2036	1506.5	.0270	1.1	1894.7	265.8	1682.8
289	.2164	2228.5	.0183	0.7	1802.6	179.7	1713.0
324	.2291	3356.9	.0121	0.5	1714.8	119.3	1734.4
361	.2419	5147.2	.0079	0.3	1631.0	77.8	1749.4
400	.2547	7985.8	.0051	0.2	1551.8	50.7	1759.6
401	.2550	7995.1	.0051	0.2	1551.6	0.0	1759.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1551.6 K  
 THI = 889.9 K  
 DELTA T = 661.7 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 889.9 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 19.9 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 190577

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.92200E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.20780E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.15516E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.17600E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.91050E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.14087E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENSTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.11200E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.25000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.66730E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.36114E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.25564E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.82761E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.79932E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.50121E+00	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.27898E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.54701E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHTe	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHTe	= 0.75312E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.63822E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.13381E+03	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.21557E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.25300E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.48475E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.47600E+01	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17361E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 190577

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TEA /K/	THM /K/
0.0	0.	1760.	1.0	3019.	2412.	1552.	881.
0.500	1760.	1760.	1.0	3011.	2415.	1584.	934.
1.000	1760.	1760.	1.0	3000.	2420.	1606.	982.
1.500	1760.	1760.	1.0	2992.	2426.	1629.	1027.
2.000	1760.	1760.	1.0	2986.	2435.	1653.	1070.
2.500	1760.	1760.	1.0	2981.	2445.	1678.	1115.
3.000	1760.	1760.	1.0	2977.	2456.	1704.	1160.
3.500	1760.	1760.	1.0	2975.	2469.	1733.	1206.
4.000	0.	0.	0.0	2973.	2483.	1762.	1252.
4.500	0.	0.	0.0	2734.	2349.	1756.	1293.
BEGINN DER TRANSIENTE							
4.645	9783.	10011.	5.6	2673.	2311.	1750.	1301.
4.650	9981.	10211.	5.7	2686.	2319.	1751.	1301.
4.660	10400.	10623.	5.9	2714.	2335.	1754.	1301.
4.670	10848.	11051.	6.2	2743.	2352.	1756.	1302.
4.680	11329.	11496.	6.4	2774.	2370.	1759.	1303.
4.690	11846.	11960.	6.7	2805.	2388.	1762.	1303.
4.700	12404.	12442.	7.0	2838.	2407.	1766.	1304.
4.710	13008.	12944.	7.4	2872.	2427.	1769.	1305.
4.720	13663.	13466.	7.8	2908.	2448.	1773.	1306.
4.730	14377.	14008.	8.2	2946.	2469.	1776.	1306.
4.740	15159.	14573.	8.6	2986.	2492.	1780.	1307.
4.750	16020.	15161.	9.1	3027.	2515.	1784.	1308.
4.760	16974.	15772.	9.6	3072.	2540.	1788.	1309.
4.770	17962.	16408.	10.2	3083.	2562.	1793.	1310.
4.780	18936.	17069.	10.8	3083.	2580.	1797.	1312.
4.790	19867.	17758.	11.3	3083.	2597.	1802.	1313.
4.800	20787.	18474.	11.8	3083.	2613.	1807.	1314.
4.810	21713.	19218.	12.3	3083.	2628.	1813.	1316.
4.820	22606.	19993.	12.8	3083.	2642.	1818.	1317.
4.830	23493.	20799.	13.3	3083.	2656.	1824.	1319.
4.840	24354.	21638.	13.8	3141.	2677.	1830.	1320.
4.847	25027.	22289.	14.2	3198.	2697.	1835.	1321.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 190577

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	281.	728718.	728998.	100.0
0.500	1760.	0.0	281.	728878.	785281.	99.4
1.000	1760.	0.0	281.	730090.	842613.	98.8
1.500	1760.	0.0	281.	732319.	900973.	98.2
2.000	1760.	0.0	281.	735388.	960190.	96.3
2.500	1760.	0.0	281.	739250.	1020224.	94.4
3.000	1760.	0.0	281.	743858.	1081031.	92.5
3.500	1760.	0.0	281.	749165.	1142572.	90.7
4.000	0.	0.0	0.	755130.	1204526.	88.9
4.500	0.	0.0	0.	684627.	1134023.	83.7
BEGINN DER TRANSIENTE						
4.645	9783.	0.0	1547.	666669.	1119162.	82.2
4.650	9981.	0.0	1579.	670425.	1126060.	82.2
4.660	10400.	0.0	1647.	678238.	1140359.	82.1
4.670	10848.	0.0	1720.	686479.	1155369.	82.0
4.680	11329.	0.0	1798.	695184.	1171147.	81.9
4.690	11846.	0.0	1882.	704391.	1187755.	81.8
4.700	12404.	0.0	1973.	714147.	1205266.	81.7
4.710	13008.	0.0	2072.	724502.	1223759.	81.6
4.720	13663.	0.0	2180.	735518.	1243329.	81.5
4.730	14377.	0.0	2297.	747261.	1264080.	81.4
4.740	15159.	0.0	2425.	759816.	1286139.	81.3
4.750	16020.	0.0	2567.	773278.	1309654.	81.2
4.760	16974.	0.0	2725.	787766.	1334800.	81.1
4.770	17962.	1.00	2888.	800201.	1358546.	81.0
4.780	18936.	4.00	3049.	810643.	1380943.	80.9
4.790	19867.	4.00	3202.	819819.	1402694.	80.8
4.800	20787.	6.25	3354.	828428.	1424494.	80.7
4.810	21713.	9.00	3507.	836732.	1446600.	80.6
4.820	22606.	9.00	3655.	844439.	1468701.	80.5
4.830	23493.	12.25	3802.	851862.	1491118.	80.4
4.840	24354.	12.25	4001.	876055.	1531068.	80.3
4.847	25027.	16.00	4136.	910502.	1577803.	80.3

SIMULATIONSEXPERIMENT : VS.-NR. : 250577

DER EPBF-UD-2-BRENNSTAB IM STATIONAEREN BETRIEB

SCHRITZAHL	I = 400	PROBENSCHNITT	U = 59.3 VOLT
PROBENLAENGE	PL = 8.00 CM	GESAMTSTROM	J = 20.2 AMPERE
PROBENRADIUS	RP = 2.55 MM	GESAMTWIDERSTAND	R = 2.9 OHM
ZONENQUERSCHNITT	Q = 0.05 MM*MM	EL. LEISTUNG	PS = 1200.0 WATT
POROSITAET	P = 0.05	STABLEISTUNG	CHI = 150.0 W/CM
AUSSENTEMPERATUR	TA = 1390.8 K	MITTL. TEMPERATUR	TM = 2023.6 K

EL. WIDERSTAND, EL. STROM, EL. LEISTUNG, WAERMESTROM, WAERMEQUELLEDICHTE SOWIE BRENNSTOFFTEMPERATUR ALS FUNKTIONEN DES PROBENRADIUS BZW. DER ZONENAUFTEILUNG

I	RP /CM/	R /OHM/	J /A/	PS /W/	BT /K/	Q /W/CM**3/	PJ /W/
1	.0	0.0	.2609	15.5	2523.1	3769.6	0.0
4	.0221	233.9	.2537	15.1	2512.9	3641.2	32.4
9	.0361	249.2	.2382	14.1	2485.1	3415.5	105.8
16	.0494	273.0	.2174	12.9	2445.5	3115.7	201.0
25	.0625	307.7	.1929	11.4	2396.5	2764.8	311.2
36	.0754	356.3	.1666	9.9	2338.5	2387.4	429.1
49	.0883	423.9	.1400	8.3	2273.5	2007.2	547.9
64	.1012	518.0	.1146	6.8	2203.2	1642.0	661.6
81	.1140	649.0	.0914	5.4	2129.4	1310.7	765.7
100	.1269	833.3	.0712	4.2	2053.6	1021.2	857.5
121	.1397	1093.5	.0543	3.2	1977.4	778.5	935.7
144	.1525	1464.1	.0405	2.4	1901.8	581.3	1000.4
169	.1653	1988.9	.0298	1.8	1828.4	428.3	1052.4
196	.1780	2748.1	.0216	1.3	1756.7	310.2	1093.5
225	.1908	3820.2	.0155	0.9	1688.7	223.2	1125.3
256	.2036	5363.9	.0111	0.7	1623.3	159.0	1149.7
289	.2164	7571.1	.0078	0.5	1561.1	112.7	1168.0
324	.2291	10731.8	.0055	0.3	1501.9	79.6	1181.8
361	.2419	15264.0	.0039	0.2	1445.5	56.0	1192.1
400	.2547	21887.6	.0027	0.2	1391.0	39.3	1199.7
401	.2550	21917.0	.0027	0.2	1390.8	0.0	1199.8

TEMPERATURABFALL IM SPALT BRENNSTOFF-FUELLE

TEMPERATURABFALL IN DER HUELLE

SPALTBREITE = 0.03 CM  
 TBA = 1390.8 K  
 THI = 883.6 K  
 DELTA T = 507.1 GRAD

HUELLENDICKE = 0.04 CM  
 THI = 883.6 K  
 THA = 870.0 K  
 DELTA T = 13.6 GRAD

SIMULATIONSEXPERIMENT VS.-NR.: 250577

EINGABE-DATEN UND STOFFWERTE

PELLET-RADIUS	= 0.25500E+00	CM
RADIUSZUNAHME	= 0.74316E-02	CM
SPALT PELLET - HUELLE	= 0.22568E-01	CM
CLADDING - STAERKE	= 0.40000E-01	CM
BRENNSTABLAENGE	= 0.80000E+01	CM
ANFANGSDICHTE	= 0.95000E+00	% DER TD
AUSSENTEMP. DES UO-2	= 0.13908E+04	K
STAT. EL. LEISTUNG	= 0.12000E+04	W
SCHMELZPUNKT	= 0.30730E+04	K
LATENTE WAERME	= 0.27800E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.62995E+06	J/KG
CP(T)*DT-INTEGRAL	= 0.10037E+05	J/PIN

STOFFDATEN AM ENDE DER TRANSIENTE

EXKURSIONSSPANNUNG	= 0.10600E+03	V
ZEITSCHRITT	= 0.25000E-02	MS
BRENNSTOFFENERGIE	= 0.0	J/G
TRANSIENTEN-ENERGIE	= 0.47827E+06	J/KG
GESAMT-ENTHALPIE	= 0.32770E+07	J/KG
HE-DURCHFLUSS	= 0.13946E-02	KG/S
HE+STRAHLUNG ABFUHR	= 0.65684E+04	J
HE-AB ENERGIE	= 0.63607E+04	J
ELEKTR. WIDERSTAND	= 0.17885E+01	OHM
WAERMELEITFAEHIGKEIT	= 0.26463E-01	W/CM*K
SPEZIFISCHE WAERME	= 0.45436E+03	J/KG*K
HELIUM - DICHT	= 0.19220E-04	G/CM**3
HELIUM - SP. WAERME	= 0.52000E+01	J/G*K
STAHL - DICHT	= 0.76340E+01	G/CM**3
STAHL - SP. WAERME	= 0.60554E+00	J/G*K
UO-2 - GESCHWINDIGKEIT	= 0.0	CM/S
MITTL. ZEITKONSTANTE	= 0.75216E+00	S
EXPER. ZEITKONSTANTE	= 0.77800E+00	S
ALLES ZUM ZEITPUNKT	= 0.58475E+01	S

WERTE ZUM ZEITPUNKT DES VERSAGENS

BEGINN DES SCHMELZENS	= 0.0	S
ENERGIE / SCHMELZGRAMM	= 0.17361E+04	J/G

SIMULATIONSEXPERIMENT : TOP VS.-NR. : 250577

ZEIT /S/	PSTHEO /W/	PSEXPE /W/	PSNORM /-/	TBZ /K/	TBM /K/	TBA /K/	THM /K/
0.0	0.	1200.	1.0	2523.	2024.	1391.	877.
0.500	1200.	1200.	1.0	2502.	2005.	1412.	911.
1.000	1200.	1200.	1.0	2476.	1990.	1415.	937.
1.500	1200.	1200.	1.0	2454.	1978.	1419.	956.
2.000	1200.	1200.	1.0	2436.	1969.	1422.	972.
2.500	1200.	1200.	1.0	2422.	1963.	1426.	986.
3.000	1200.	1200.	1.0	2410.	1958.	1430.	1000.
3.500	1200.	1200.	1.0	2401.	1956.	1435.	1014.
4.000	0.	0.	0.0	2394.	1955.	1440.	1028.
4.500	0.	0.	0.0	2095.	1810.	1425.	1040.
BEGINN DER TRANSIENTE							
4.675	1322.	1336.	1.1	2020.	1767.	1415.	1042.
4.680	1325.	1345.	1.1	2021.	1768.	1415.	1042.
4.730	1357.	1434.	1.1	2036.	1773.	1415.	1042.
4.780	1391.	1529.	1.2	2052.	1779.	1414.	1043.
4.830	1429.	1631.	1.2	2068.	1785.	1414.	1043.
4.880	1471.	1739.	1.2	2085.	1792.	1414.	1044.
4.930	1516.	1854.	1.3	2102.	1799.	1414.	1044.
4.980	1567.	1977.	1.3	2121.	1807.	1414.	1045.
5.030	1623.	2108.	1.4	2140.	1815.	1414.	1046.
5.080	1685.	2248.	1.4	2161.	1824.	1415.	1047.
5.130	1755.	2398.	1.5	2183.	1833.	1415.	1048.
5.180	1833.	2557.	1.5	2207.	1844.	1416.	1049.
5.230	1922.	2727.	1.6	2233.	1855.	1417.	1050.
5.280	2024.	2908.	1.7	2261.	1867.	1419.	1051.
5.330	2141.	3101.	1.8	2292.	1881.	1420.	1052.
5.380	2276.	3306.	1.9	2326.	1896.	1422.	1054.
5.430	2433.	3526.	2.0	2364.	1913.	1424.	1055.
5.480	2619.	3760.	2.2	2406.	1932.	1426.	1057.
5.530	2841.	4009.	2.4	2453.	1953.	1429.	1059.
5.580	3108.	4276.	2.6	2507.	1977.	1432.	1060.
5.630	3434.	4559.	2.9	2567.	2005.	1435.	1063.
5.680	3839.	4862.	3.2	2637.	2036.	1439.	1065.
5.730	4351.	5185.	3.6	2717.	2072.	1443.	1067.
5.780	5013.	5529.	4.2	2810.	2115.	1448.	1070.
5.830	5899.	5896.	4.9	2921.	2165.	1453.	1073.
5.847	6282.	6030.	5.2	2965.	2184.	1455.	1074.

SIMULATIONSEXPERIMENT : TCP VS.-NR. : 250577

ZEIT /S/	PSTHE /W/	MOLTEN /%/	E-ZUFUHR /J/KG/	ENTHALPIE /J/KG/	E-TOTAL /J/KG/	HELIUM /%/
0.0	0.	0.0	187.	550002.	550189.	100.0
0.500	1200.	0.0	187.	542789.	580386.	99.4
1.000	1200.	0.0	187.	536653.	611628.	98.8
1.500	1200.	0.0	187.	531881.	644208.	98.2
2.000	1200.	0.0	187.	528263.	677923.	96.3
2.500	1200.	0.0	187.	525621.	712601.	94.4
3.000	1200.	0.0	187.	523805.	748098.	92.5
3.500	1200.	0.0	187.	522698.	784294.	90.7
4.000	0.	0.0	0.	522207.	820917.	88.9
4.500	0.	0.0	0.	467686.	766396.	83.7
BEGINN DER TRANSIENTE						
4.675	1322.	0.0	204.	452609.	751930.	81.9
4.680	1325.	0.0	204.	452799.	752528.	81.9
4.730	1357.	0.0	209.	454763.	758627.	81.4
4.780	1391.	0.0	215.	456848.	764950.	80.9
4.830	1429.	0.0	220.	459069.	771522.	80.4
4.880	1471.	0.0	227.	461442.	778371.	80.0
4.930	1516.	0.0	234.	463989.	785530.	79.5
4.980	1567.	0.0	242.	466732.	793034.	79.0
5.030	1623.	0.0	251.	469659.	800928.	78.5
5.080	1685.	0.0	260.	472920.	809262.	78.1
5.130	1755.	0.0	271.	476433.	818094.	77.6
5.180	1833.	0.0	284.	480282.	827493.	77.1
5.230	1922.	0.0	297.	484518.	837543.	76.7
5.280	2024.	0.0	313.	489206.	848342.	76.2
5.330	2141.	0.0	332.	494422.	860013.	75.8
5.380	2276.	0.0	353.	500263.	872703.	75.3
5.430	2433.	0.0	378.	506847.	886597.	74.8
5.480	2619.	0.0	407.	514327.	901926.	74.4
5.530	2841.	0.0	442.	522894.	918984.	74.0
5.580	3108.	0.0	484.	532800.	938151.	73.5
5.630	3434.	0.0	535.	544377.	959926.	73.1
5.680	3839.	0.0	599.	558072.	984976.	72.6
5.730	4351.	0.0	681.	574507.	1014220.	72.2
5.780	5013.	0.0	786.	594573.	1048962.	71.8
5.830	5899.	0.0	928.	619628.	1091156.	71.3
5.847	6282.	0.0	990.	629947.	1108214.	71.2