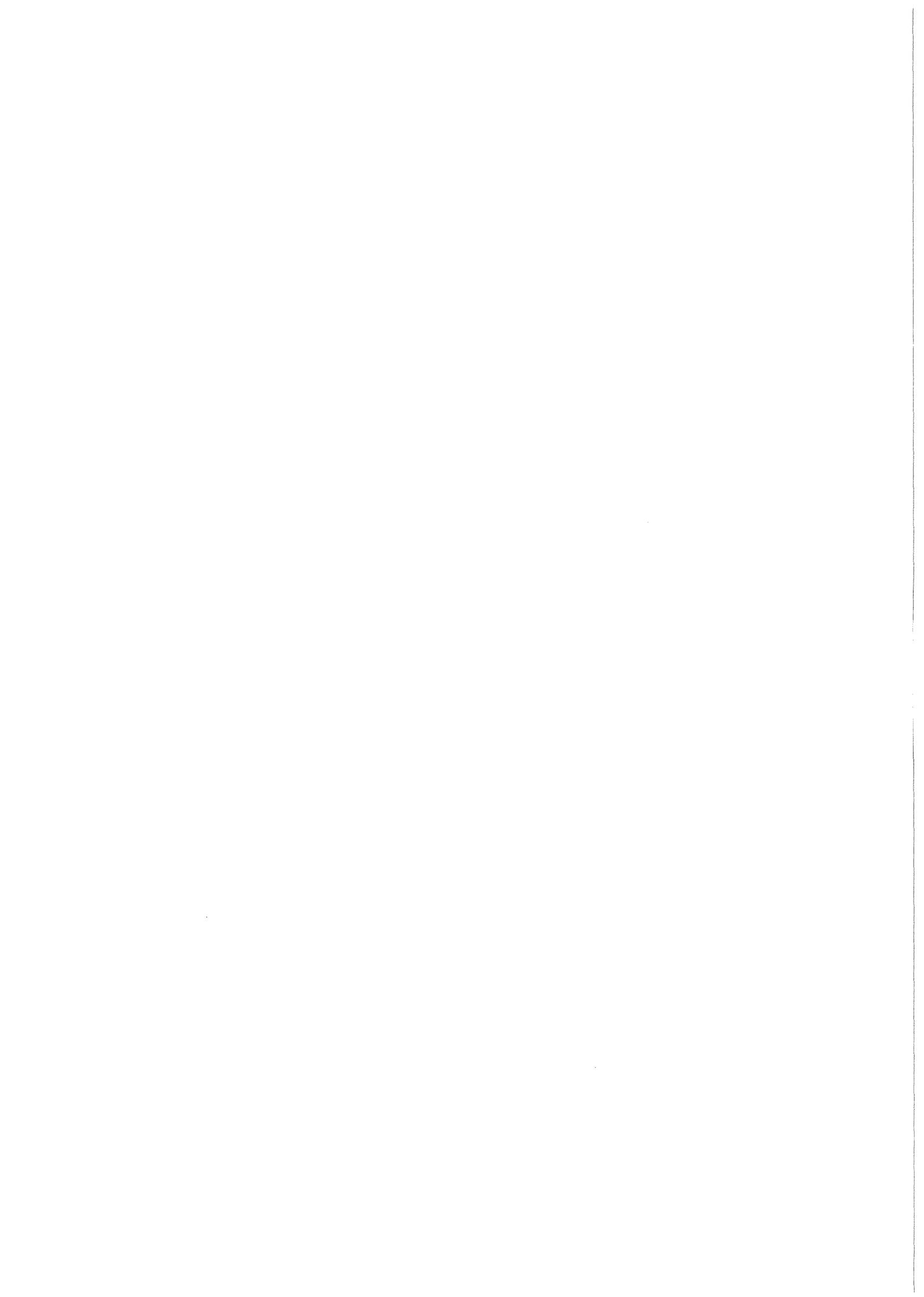


KfK 3944
Juli 1985

Das Bestrahlungsexperiment Mol-18/1A1 des SNR- Betriebstransientenprogramms

D. Freund
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

KfK 3944

Das Bestrahlungsexperiment Mo1-18/1A1 des SNR-Betriebstransientenprogramms

D. Freund

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

K u r z f a s s u n g

Das Bestrahlungsexperiment Mol-18/1A1 des SNR-Betriebstransientenprogramms

Das Bestrahlungsexperiment Mol-18/1A1 ist das erste Experiment dieser Serie des Betriebstransientenprogramms, in welchem Brennstäbe unter nichtstationären Bedingungen nach dem SNR-Transientenkatalog getestet werden.

Nach umfangreichen Tests der Anlage im BR 2 wurden an einem KNK II-typischen Brennstab mehrere Leistungsrampen bis 140 % Nominallast sowie Leistungstransienten im 10 sec-Bereich bis 160 % Ausgangsleistung aufgebracht.

Der Brennstab wurde, wie aus den Nachuntersuchungsergebnissen erkennbar wurde, auf einem zu niedrigen Leistungsniveau gefahren, welches zu einem Endabbrand von ca. 0,7% FIMA anstatt der geforderten 1% führte. Das Experiment erbrachte sowohl im Hinblick auf konstruktive Loopverbesserungen als auch auf modelltheoretische Aspekte der Brennstabanalyse einige wichtige Ergebnisse.

Im vorliegenden Bericht wird nach einer kurzen Darstellung des Betriebstransientenprogramms eine Beschreibung des Loopeinsatzes und des Brennstabs, der Bestrahlung im BR 2 sowie der Nachuntersuchung und der Analyse des Brennstabverhaltens gegeben.

A b s t r a c t

The Irradiation Experiment Mol-18/1A1 of the SNR Operational Transient Program

The irradiation experiment Mol-18/1A1 is the first test of this series in the operational transient program of the German Fast Breeder Project. After extensive testing of the loop and its circuits a KNK II-type fuel pin has been subjected to various power ramps up to 140 % nominal and power transients up to 160 % nominal power in the 10 sec time scale.

PIE results showed that the power level has been too low, leading to about 0.7 at % burnup instead of the envisaged 1 %. However, the experiment resulted in helpful hints concerning loop construction improvements as well as some aspects of fuel pin modelling.

In the report, after a short description of the operational transient program, the experiment is presented from loop construction over irradiation in the BR 2 until post irradiation examination and theoretical analysis.

V o r b e m e r k u n g

Das im Rahmen des Projektes Schneller Brüter durchgeführte experimentelle Programm zur Untersuchung des Verhaltens von Brennstäben bei Betriebs-transienten wird von einem Arbeitskreis mit Beteiligung von Belgonucleaire, Euratom Petten, Interatom, dem CEN Mol sowie dem CEN Petten unter Federführung von KfK bearbeitet.

In dem vorliegenden Bericht wird eine zusammenfassende Darstellung und Interpretation des ersten Experiments Mol-18/1A1 in dem BR 2-VIC-Loopeinsatz (VIC = Variable Irradiation Conditions) gegeben, welche auf einer Vielzahl von Berichten und Notizen der beteiligten Institutionen beruht. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt.

Für die Ausarbeitung der Abbildungen und Diagramme sei den Herren F. Bauer und W. Ernst, für die Reinschrift des Manuskripts und die redaktionelle Hilfe Frau B. Hauth gedankt.

April 1985

I n h a l t

Seite

Einleitung	1
1. Das Betriebstransientenprogramm	2
2. Der Bestrahlungseinsatz Mo1-18/VIC	4
3. Herstellung und Auslegung des Brennstabes	7
4. Die Bestrahlung im BR 2	9
5. Die Bestrahlungsnachuntersuchung	12
6. Modelltheoretische Analyse	17
Zusammenfassung	24
Literaturhinweise	26
Abb. 1 bis 23	27

Einleitung

Zur Beschreibung des Verhaltens von Brennstäben des Schnellen Natriumgekühlten Reaktors werden experimentelle Untersuchungen unter stationären und nichtstationären Betriebsbedingungen durchgeführt. Während das Verhalten bei stationärem Betrieb bereits weitgehend untersucht ist, muß für den instationären Bereich noch eine Reihe von Fragen beantwortet werden.

Im nichtstationären Betriebsbereich wird zunächst unterschieden zwischen Ereignissen, welche die Verfügbarkeit und solchen, die die Sicherheit der Anlage betreffen. Im sogenannten Betriebstransientenprogramm werden Experimente unter nichtstationären Zuständen durchgeführt, die den Fragenkatalog zur Verfügbarkeit betreffen. Weiterhin werden sicherheitsbezogene Untersuchungen durchgeführt, wobei jedoch der Komplex der hypothetischen Störfälle, der in anderen Programmen behandelt wird, bewußt ausgeklammert wurde.

Mit Hilfe der Betriebstransientenexperimente soll also das Verhalten von Brennstäben bei möglichen transienten Belastungen untersucht werden, wobei insbesondere die Frage nach den Versagensschwellen und somit nach den zulässigen Transienten gestellt wird.

Die Experimente des Betriebstransientenprogramms können nach den Anforderungen des Störfallkatalogs in fünf Klassen eingeteilt werden:

- Untersuchung des Anfahrverhaltens frischer Stäbe,
- Betriebsrampen und Lastwechseltests,
- Überlastexperimente,
- Brennstoffschmelzexperimente sowie
- kombinierte Leistungs-Kühlmitteltemperatur-Transientenexperimente.

In diesem Bericht wird das erste Experiment der Versuchsreihe Mol-18, in welcher der Komplex der fünften Klasse behandelt wird, vorgestellt. Bei diesem Versuch mit der Bezeichnung Mol-18/1A1, der von der Auslegung über die Bestrahlung, Nachuntersuchung und Auswertung beschrieben wird, handelt es sich um die erste in-pile Erprobung des VIC-Loops mit einem frischen Brennstab aus der KNK II/1-Fertigung.

1. Das Betriebstransientenprogramm

Der bestimmungsgemäße Betrieb des SNR ist gekennzeichnet durch eine Folge von Lastzyklen über Teil- und Volllastbereiche, die durch entsprechende An- und Abfahrbedingungen bzw. Zyklerrampen eingestellt werden.

Neben diesen Normalbetriebszuständen, die also nichtstationäre Bedingungen beinhalten, können weitere transiente Vorgänge durch nichtbestimmungsgemäßen Betrieb auftreten. Diese Vorgänge werden ausgelöst durch Reaktivitätsänderungen, z.B. durch das Verfahren von Absorberelementen sowie durch Kühlmitteldurchsatzänderungen, hervorgerufen durch geänderte Pumpenleistung, und durch Kombinationen solcher Ereignisse. In Tabelle I sind die Anforderungen an Last- und Kühlmitteltemperaturrampen sowie Leistungs- und Temperaturgrenzwerte aus dem Betriebs- und Störfallkatalog des SNR 300 zusammengefaßt /1/.

Tabelle I: Betriebs- und Störfallbedingungen des SNR 300

Ereignis	$\Delta(\frac{x_{\max}}{x_0})/\Delta t$	x_{\max}/x_0	$\Delta T_{\max}/\Delta t$	T_{\max}
Zyklieren	10 %/min	100 %	$\pm 0,15$ K/sec	650 °C
Betriebsrampe	≥ 10 %/min	100 %	$\pm 0,15$ K/sec	650 °C
Reaktivitätsstörfälle	0,2 %/sec	110 %	0,5 K/sec	< 680 °C
	0,2 %/sec	120 %	0,5 K/sec	750 °C
	4,0 %/sec	120 %	8,0 K/sec	≈ 690 °C
	4,0 %/sec	150 %	8,0 K/sec	≈ 750 °C
Durchsatzstörfälle	-	100 %	50 K/sec	≈ 750 °C
	2 %/sec	110 %	60 K/sec	≈ 950 °C

Im Betriebstransientenprogramm, welches in den Reaktoren BR 2 in Mol, Belgien, und im HFR Petten, Niederlande durchgeführt wird, werden die möglichen Betriebs- und Störfalltransienten und deren Auswirkungen auf das Brennstabverhalten systematisch untersucht /2/. In Tabelle II sind die verschiedenen Versuchsserien mit ihren Zielen und einigen wichtigen Merkmalen zusammengestellt.

Tabelle II: Versuchsreihen des Betriebstransientenprogramms

Versuchsreihe	Reaktor	Z i e l	Anzahl Exp./ Stabzahl	Stabdurchm. (mm)	Brennstoff		
					Dichte (%)	$\frac{Pu}{U+Pu}$	U_5/U
DUELL I	HFR	Anfahrverhalten	5/10	6,0	86,5	27	83
DUELL II	HFR	Anfahrverhalten	4/8	7,6	95	25	0,7
KAKADU I	HFR	Lastwechsel	2/4	6,0	86,5	27	83
KAKADU I _b	HFR	Lastwechsel (vorbestrahlte Stäbe)	2/4	6,0	86,5	27	83
KAKADU II	HFR	Lastwechsel	2/4	7,6	95	25	0,7
POTOM	HFR	Schmelzexperimente	3/9	7,6	95	15/20 25/30	62/ 80
OPOST	HFR	Überlast	2/6	7,6	95	20/30	80
Mol-18/1A1	BR 2	Leistungstrans. (Loop-Erprobng.)	1/1	6,0	86,5	30	83
Mol-18/1A2 _b	BR 2	Leistungs-Kühlmitteltrans. (vorbestr. Stäbe)	1/1	6,0	86,5	30	93
Mol-18/1B3	BR 2	Leistungs-Kühlmitteltrans.	1/1	7,6	95	25	66
RELIEF	HFR	Längenänderungsmessung in-pile	2/4	7,6	95	20	0,7
MEDINA	HFR	Durchmesseränderungsmessung in-pile	1/1	7,6	95	20	0,7

Im Gegensatz zu den HFR-Experimenten, die sämtlich in verschiedenartigen Bestrahlungskapseln mit stagnierendem Kühlmittel durchgeführt werden, werden die Mol-18-Experimente in einem Einsatz mit eigenem regelbarem Na-Kreislauf durchgeführt, der Kühlmitteldurchsatzvariationen gestattet. Die Leistungs-transienten werden durch einen sogenannten He 3-Schirm, ähnlich dem in den CABRI-Versuchen, ermöglicht.

In der Serie Mol-18 wurden drei Experimente mit den Bezeichnungen Mol-18/1A1, Mol-18/1A2_b und Mol-18/1B3 durchgeführt. In dem ersten Versuch Mol-18/1A1 kam ein frischer KNK II/1-Brennstab zum Einsatz, in den Folgeexperimenten wurde ein vorbestrahlter KNK II/1-Stab (Mol-18/1A2_b) sowie ein frischer Brennstab der KNK II/2-Serie (Mol-18/1B3) bestrahlt.

Die Aufgabenstellung für das erste Experiment Mol-18/1A1 lag in der in-pile-Erprobung des VIC-Loops. Neben dem Nachweis der Funktionsfähigkeit des Loops mit seiner gesamten in-pile -und out-of-pile-Installation, insbesondere des He 3-Schirms, des Na-Kreislaufs und der gesamten meßtechnischen und Datenverarbeitungseinrichtungen, sollten erste Leistungsrampen und -transienten an einem Brennstab erfolgen.

2. Der Bestrahlungseinsatz Mol-18/VIC

Das Loop Mol-18/VIC des BR 2 wurde speziell für Experimente mit Schnellbrüterbrennstäben unter transienten Betriebsbedingungen entwickelt. Bei dem Einsatz handelt es sich um ein kompaktes integriertes Loop mit Na-Zwangsumlaufkühlung. Aus den Anforderungen des Betriebstransientenkatalogs resultierte eine Loopkonstruktion mit den in Tabelle III zusammengestellten Charakteristika /3,4,5/.

Tabelle III: Mol-18/VIC-Auslegungsmerkmale

Merkmal	Auslegungsbereich
Brennstab, frisch oder vorbestrahlt:	
Stabdurchmesser	6 - 7,6 mm
Gesamtlänge	bis 200 cm
Brennstoffsäulenlänge	bis 65 cm
Brennstoffanreicherung:	
Pu/U+Pu	bis 30 %
U-235/U	bis 93 %
Stationäre Betriebsbedingungen:	
Stableistung	400 - 600 W/cm
Na-Durchsatz	50 - 200 g/sec
Na-Geschwindigkeit am Stab	1 - 5 m/sec
Na-Druck	≤ 10 bar
Na-Eintrittstemperatur	350 - 500 °C
Na-Austrittstemperatur	< 850 °C
He 3-Druck, abs.	1,2 - 38 bar

Transiente Betriebsbedingungen:	
Überlast N/N_0	bis 2,2 (für thermischen Fluß ca. $2 \cdot 10^{14}$ n/cm ²)
Laständerungsgeschwindigkeit	bis 15 %/sec
Temperaturänderungsrate	bis 80 K/sec

Abb. 1 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung des Loops mit einigen wichtigen Instrumentierungsdetails. Der Brennstab befindet sich im unteren Loopteil, umgeben von dem nach oben strömenden Natrium, der doppelwandigen gasgefüllten Kühlkanalbegrenzung, dem Na-Rückführungskanal, dem He 3-Spalt, dem BR 2-Kühlwasserspalt sowie dem äußeren Stopfen, der für die Aufnahme eines Cd-Schirms ausgebildet ist (siehe auch Abb. 2). Im oberen Loopteil befinden sich der Wärmetauscher Natrium-Kühlwasser sowie die elektromagnetische Na-Pumpe, an deren Ende das Natrium zum Rückfluß umgeleitet wird. Durch einen Spalt mit einer Wassersäule einstellbarer Höhe kann die Kühlkapazität des Wärmetauschers so eingestellt werden, daß bei unterschiedlichen Stableistungen die Na-Eintrittstemperatur konstant gehalten werden kann. Der Na-Durchsatz wird durch die Pumpenspannung eingestellt und entsprechend den geforderten Kühlmitteltemperaturen bzw. -aufheizspannen variiert.

Die Änderung der Stableistung wird durch Druckänderung in dem thermische Neutronen absorbierenden He 3-Schirm bewirkt: Durch Druckabbau wird eine Leistungssteigerung bewirkt und umgekehrt. Durch eine out-of-pile-Anlage VNS (Variabler Neutronen-Schirm) kann automatisch eine He 3-Druckänderung, die zu den gewünschten Leistungsänderungen führt, eingeleitet werden.

Die Instrumentierung des Loops besteht aus mehreren Komponenten. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, sind axial über den gesamten Einsatz 32 Thermoelemente angeordnet, die neben der Messung der Kühlmitteltemperaturen im Brennstoffbereich sowie im Ein- und Auslaß der eigentlichen Teststrecke die verschiedenen Temperaturbereiche oberhalb erfassen, die zur Regelung und Überwachung des Gesamtsystems erforderlich sind. Drei integrierte Permanentmagnet-Durchflußmesser sind zwischen Wärmetauscher und Na-Pumpe zur Messung des Na-Durchflusses im Na-Rückflußringkanal angebracht. Zur Erfassung schneller Leistungsänderungen dienen zwei sogenannte SPN-Detektoren (self powered neutron d.), die sich an der Kühlkanalwand in Brennstoffsäulenmitte befinden.

Schließlich werden über Druckaufnehmer der He 3-Druck, der Na-Schutzgasdruck sowie der Kühlmitteldruck erfaßt.

Zwei digitale Datenerfassungssysteme sind zur Erfassung und Speicherung der stationären und transienten Meßdaten an das System angeschlossen. Bei stationärem Betrieb werden bis zu 100 Meßwerte von der Test- und Prozeßinstrumentierung alle 20 Sekunden aufgenommen und von einem Rechner, welcher mittelbare Ergebnisse wie z.B. die Stabileistung bestimmt, in regelmäßigen Intervallen (z.B. alle 2 Stunden) auf einem Magnetband gespeichert. Zu gewünschten Zeiten können Tabellen bzw. graphische Darstellungen abgerufen werden. Parallel hierzu und besonders während der transienten Betriebsphasen werden über einen weiteren Rechner die Meßwerte der eigentlichen Testinstrumentierung bis zu 100 mal je Sekunde für 32 Kanäle bis zu 1 Stunde Gesamtdauer aufgenommen und gespeichert.

Das out-of-pile-Kontrollsystem besteht aus fünf Haupteinheiten, mit denen über die Einstellung des Wasserniveaus im Wärmetauscher, verschiedener Gasdrücke, Heiz- und Pumpenversorgungsniveaus das VIC-Loop unter nominalen und transienten Bedingungen gefahren werden kann. Auf eine eingehende Darstellung dieser Kontroll-, Regel- und Sicherheitssysteme soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

In Abb. 3 ist der axiale Temperaturverlauf des Kühlmittels unter Nominalbedingungen zur Veranschaulichung dargestellt.

Zur Bestimmung der Bestrahlungsposition im BR 2, in welcher die spezifizierten Leistungsrampen gefahren werden können, wurden neutronenphysikalische Rechnungen durchgeführt. Ausgehend von einer maximalen Längenleistung von 450 W/cm wurden die maximal möglichen Leistungshübe für einen Aluminium- sowie für einen Stahlstopfen (siehe Abb. 2) als Funktion des Ausgangsdrucks im He 3-Schirm für verschiedene Neutronenflußbereiche bestimmt. Aufgrund der höheren Absorption von thermischen Neutronen durch den Stahlstopfen liegt der maximale Leistungshub in diesem Fall bei 160 %, während bei Verwendung eines Aluminiumstopfens Leistungstransienten bis zu über 200 % der Ausgangsleistung erreicht werden können. Abb. 4 zeigt eine Gegenüberstellung der Leistungsüberhöhung für einen Al-Stopfen bei einem ungestörten thermischen Neutronenfluß von $1,13 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ sowie für einen Stahlstopfen bei einem Fluß von $1,25 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ /4/. Für einen Al-Füllstopfen können somit vorgesehene Leistungstransienten bis zu 180 %, d.h. von 450 W/cm auf 810 W/cm durch einen He 3-Druckabbau von 34 bar auf 1 bar in dem obigen Flußbereich durchgeführt werden.

3. Herstellung und Auslegung des Brennstabes

In dem Experiment Mol-18/1A1 wurde ein frischer Brennstab aus der KNK II/1-Fertigung bestrahlt. Die Herstellung erfolgte nach der Brennstoff- und Brennstabspezifikation für das KNK II-Erstcore. In Tabelle IV sind die Herstellungsdaten für den Stab mit der Nummer A1-4156 zusammengestellt, Abb. 5 zeigt den Stabaufbau. Bei dem Brennstoff handelt es sich um niederdichtes Mischoxid mit einem Pu-Anteil von ca. 30 % und einer U-235-Anreicherung von 83 %. Bei einer Brennstoffdichte von $9,722 \text{ g/cm}^3$, welches bei der angegebenen Brennstoffzusammensetzung etwa 88,5 % der theoretischen Dichte ($10,983 \text{ g/cm}^3$) entspricht, beträgt die Schmierdichte 82,9 % th.D. Die Hülle des Prüflings besteht aus dem austenitischen Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4981 mit einem Außendurchmesser von 6,0 mm und einer Wandstärke von 0,38 mm. Die Brennstoffsäule, oben und unten von UO_2 -Brutstoffsäulen mit je 200 mm Länge begrenzt, hat eine Länge von 600 mm.

Das Bestrahlungsprogramm und die daraus resultierende Brennstabauslegung wurden unter dem Aspekt der Looperprobung und dem eines Experiments nach dem Transientenkatalog festgelegt. Das Bestrahlungsprogramm umfaßte nach mehreren Änderungen aus technischen Gründen (siehe Kap. 4) zwei Bestrahlungszyklen, wovon der erste den reinen Looptests vorbehalten war, der erste Teil des zweiten Zyklus zur Eichung der Kollektors für die Stabileistungsbestimmung diente und schließlich der zweite Teil die vorgesehenen Betriebstransienten beinhaltete.

Während der erste Zyklus bis auf die Bestrahlung in den letzten 5 Tagen bei Nominallast zur Prädiktionierung des Brennstoffs nicht näher spezifiziert wurde, war die Fahrweise im zweiten Zyklus vorgegeben. In Abb. 6 ist der Bestrahlungsablauf dargestellt, eingetragen sind weiterhin die Zeitpunkte, an denen die Rampen bzw. Transienten gefahren wurden.

Die Auslegung des Brennstabs für die obigen Betriebsbedingungen wurde mit den Rechenprogrammen IAMBUS und TRANSIENT durchgeführt /6,7/. Da die Bestrahlung auf einer Reflektorposition des BR 2 mit einem sehr hohen Anteil thermischer Neutronen stattfindet, muß bei den Rechnungen eine starke Flußdepression im Brennstoff berücksichtigt werden. Bei der hohen U-235-Anreicherung und einem thermischen Anteil aus Neutronenfluß von 90 % geht die Leistungsabsenkung auf ca. 10 % gegenüber dem Brennstoffrand zurück (Abb.7) Da die Bestrahlung unter dem He 3-Schirm stattfindet, wird aufgrund

der Absorption thermischer Neutronen das Spektrum wieder härter und die Leistungsdepression wird geringer. Vorgreifend auf die Ergebnisse der Nachuntersuchung (Kap. 5) liegt die Flußabsenkung etwa im Bereich von 30 %.

Tabelle IV: Mo1-18/1A1 Brennstabherstellungsdaten

A. Materialdaten		Brennstoff	Brutstoff	Hülle
Materialbezeichnung		(U,Pu)O ₂	UO ₂	1.4981
Innendurchmesser	(mm)	-	-	5,240
Außendurchmesser	(mm)	5,072	5,054	6,000
Rauhigkeit R _a	(µm)	1,00	1,00	1,00
Dishing	(Vol.%)	2,00	-	Ch 52737
Korndurchmesser	(µm)	6,00	6,00	MW
Porendurchmesser	(µm)	20,00	6,00	
Herstellungsdichte	(g/cm ³)	9,722	10,510	
theoretische Dichte	(g/cm ³)	10,983	10,959	
Herstellungsporosität	(%)	11,484	4,101	
Herstellungs-O/Me		1,978	2,000	
Gasgehalt	(Ncm ³ /g)	0,018	0,019	
U-235-Anteil	(%)	82,860	0,206	
Pu-Anteil	(%)	29,930	-	
Pu-Vektor (%) :	Pu-238	0,720	-	
	Pu-239	77,930	-	
	Pu-240	14,280	-	
	Pu-241	5,800	-	
	Pu-242	1,260	-	
B. Stabdaten		Stab-Nr.: A1-4156		
Stab-Geometrie:		Brennstab-Physik:		
Untere Plenumlänge	(mm) 477,00	Leervolumen	(cm ³) 10,825	
Unt.Brutstoffsäule	(mm) 200,00	Plenumdruck (RT)(bar)	1,000	
Brennstoffsäule	(mm) 599,88	Gaskonzentrationen (Vol.-%)		
Ob. Brutstoffsäule	(mm) 200,00	Plenumgas		
Obere Plenumlänge	(mm) 41,62	He:	95,00	
		Ar:	5,00	
		Kr:	-	
		Xe:	-	
		N ₂ :	-	

Um nun unter diesen Bedingungen eine Temperaturverteilung einzustellen, die dem Zustand im schnellen Fluß bei der Referenzleistung von 380 W/cm entspricht, muß die Leistung auf etwa 500 W/cm für die stationäre Bestrahlung angehoben werden. In Abb. 8 /7/ sind die Temperaturprofile für die verschiedenen Leistungen und Flüsse wiedergegeben.

Als weiteres Beispiel der Auslegungsrechnungen ist in Abb 9 der Brennstofftemperaturzustand bei einer Leistungstransiente von 160 % nach 32 sec dargestellt /6,7/: Unter Schnellflußbedingungen übersteigen die Zentraltemperaturen die Schmelzgrenze, während mit Flußabsenkung die Temperaturen lediglich 2400 °C erreichen. Die Diskrepanzen bei den verschiedenen Rechnungen sind auf unterschiedliche Beschreibung des Brennstabs vor der Transiente zurückzuführen wie beispielsweise die Berechnung des Spalts Brennstoff-Hülle und dem daraus resultierenden Wärmedurchgang, der den Temperatursprung im Spalt und die Brennstoffoberflächentemperatur bestimmt.

Ein wesentliches Auslegungsmerkmal für die vorgesehenen Betriebsbedingungen ist die Bestimmung der mechanischen Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle bei Spaltschluß und Kontaktdruckaufbau während der Transiente. Die Größe des Kontaktdruckes wird dem kälteren wechselwirkungsfähigen Brennstoffbereich mit Temperaturen unterhalb der Plastizitätstemperatur zugeschrieben. Bei Plastizitätstemperaturen von ca. 1750 °C liegt der maximale Kontaktdruck bei einer 60 %-Überlastrampe zwischen 2 MPa (TRANSIENT) und 9 MPa (IAMBUS) bei 380 W/cm im schnellen Neutronenfluß, zwischen 10 und 25 MPa für 500 W/cm im thermischen Fluß. Dies ist eine unmittelbare Konsequenz der unterschiedlichen radialen Temperaturverteilungen und daraus resultierenden verschiedenen Plastizitätsradien des Brennstoffs. Im unteren Stabbereich mit größerer thermischer Überschußdehnung des Brennstoffs wird nach TRANSIENT die Fließgrenze des Hüllrohres überschritten, welches unter den gegebenen Bedingungen zu einer plastischen Hülldehnung von 0,13 % $\Delta d/d$ führt.

Insgesamt wird aus den Analysen deutlich, daß Simulationen von SNR-Brennstabbelastungen thermischer oder mechanischer Art in thermischen Reaktoren schwierig sind und das zu untersuchende Problem nur teilweise abdecken.

4. Die Bestrahlung im BR 2

Die Bestrahlung des Testeinsatzes Mol-18/1A1 begann am 9. Juli 1981 mit dem BR 2-Zyklus 5/81 in der Corerandposition L 120. Dieser erste Reaktorzyklus

wurde am 10.07. durch eine Leistungsumkehrung (reactor reverse) mit anschließender Abschaltung, nach Wiederanfahren (14.07.) am 26.07.1981 durch Reaktorschnellschluß und schließlich nach erneutem Anfahren am 29.07.1981 nach weiteren 5 Tagen am 03.08.1981 beendet (Abb. 10) /8,9/.

Während der Aufheizphase des Natriums fielen die Thermolemente 12 bis 15 (siehe Abb. 1) durch Masseschluß aus. Im Verlaufe der Bestrahlung schließlich wurde eine Abnahme der elektrischen Isolierung der Thermolemente 4, 6, 9 und 11 festgestellt, welches zu fehlerhaften Temperaturmessungen führte. Der Verlauf von relativer Stabileistung, Durchsatz und der verbleibenden Temperaturmeßwerte ist in den Abb. 11 und 12 wiedergegeben.

Nach dem Abschluß des 1. Bestrahlungszyklus am 03.08.1981 wurde im Abluftsystem des BR 2 eine über dem Normalwert liegende Tritiumaktivität gemessen, als deren Ursache nach einer umfangreichen Suchaktion die im VIC-Einsatz montierten Schnellkupplungen festgestellt wurden. Infolge der Tritiumkontamination konnte die Reparatur nur unter erschwerten und zeitraubenden Bedingungen durchgeführt werden, so daß mit der Weiterbestrahlung des Einsatzes erst mit Beginn des Zyklus 1/82 am 20.01.1982 begonnen wurde. Die Bestrahlung endete am 09.02.1982, Abb. 13 zeigt den gleichmäßigen stationären Betrieb in diesem Zyklus /10,11 /.

Nach den umfangreichen Tests aller Kreisläufe, Meß- und Regelstrecken sowie der Datenerfassungsanlagen wurde der spezifizierte instationäre Betrieb am 25.01.1982 mit der ersten Leistungsrampe auf 110 % der Ausgangsleistung eingeleitet. Nach jeweils einer Halteperiode auf dem neuen Leistungsniveau von 24 Stunden wurden hintereinander Leistungshübe auf 120 %, 130 % und 140 % gefahren. Nach der letzten Haltezeit wurde die Leistung wieder auf den Ausgangswert zurückgenommen (siehe Abb. 6). Während der Rampen wurde der Na-Durchfluß so geregelt, daß Ein- und Austrittstemperaturen konstant blieben. In den Abb. 14 und 15 sind die jeweiligen Verläufe von relativer Stabileistung und Kühlmitteldurchsatz bzw. die Temperaturen an den verschiedenen Höhenknoten dargestellt.

Zur Bestimmung des axialen Leistungsverlaufes dienen neben Informationen des Reaktorbetriebes die den axialen Thermolementpositionen entsprechenden Abbrandwerte. In Tabelle V sind die auf den Maximalwert in Brennstoffsäulenmitte normierten relativen Abbrände nach verschiedenen Betriebszeiten zusammengestellt.

Tabelle V: Mo1-18/1A1 Relative axiale Abbrandverteilung

t (h)	Z _{Brennstoff} (mm)	0	150	300	450	600
21		0,311	0,788	1	0,881	0,547
409		0,312	0,791	1	0,876	0,541
429		0,312	0,790	1	0,876	0,541
475		0,305	0,776	1	0,900	0,571
905		0,308	0,782	1	0,889	0,558
$\overline{A/A}_{\max}$		0,310	0,785	1	0,884	0,552

In Abb. 16 sind die normierten Verläufe aus relativen Stableistungen aus dem ersten Zyklus und den mittleren relativen Abbränden nach Tabelle V dargestellt: Mit zunehmendem Abbrand verschiebt sich das Flußprofil in Richtung oberes Säulenende.

Zur Bestimmung der Flußabsenkung im Brennstoff werden die in Tabelle VI aus /9/ und /11/ zusammengestellten 3-Gruppenflüsse für die Bestrahlungsposition L 120 verwendet.

Tabelle VI: Maximale ungestörte Neutronenflüsse im Kanal L 120 des BR 2

Zyklus	ϕ_{th}		ϕ_{epi}		ϕ_s	
	(n/cm ² sec)	(% ϕ_{ges})	(n/cm ² sec)	(% ϕ_{ges})	(n/cm ² sec)	(% ϕ_{ges})
5/81	$1,47 \cdot 10^{14}$	67	$0,16 \cdot 10^{14}$	7	$0,56 \cdot 10^{14}$	26
5/81A	$1,33 \cdot 10^{14}$	84	$0,08 \cdot 10^{14}$	5	$0,55 \cdot 10^{14}$	11
1/82A	$1,47 \cdot 10^{14}$	85	$0,08 \cdot 10^{14}$	5	$0,18 \cdot 10^{14}$	10

Ohne Korrektur durch den He 3-Schirm ergeben sich Flußabsenkungen auf 30 % des Randwertes der Wärmequellldichte für den Zyklus 5/81, auf ca. 16 % für die Folgezyklen, Ergebnisse, die mit dem Programm CHIFAK /12/ erzielt wurden. Die bereits erwähnten Ergebnisse der Nachuntersuchung, die auf eine Flußabsenkung von ca. 30 % hinweisen, geben somit den Einfluß durch den He 3-Schirm mit einer 15 %-igen Reduktion der Absenkung wieder. Über den Einfluß der unterschiedlichen Flußabsenkungen auf die Brennstofftemperaturen wird in Kap. 6 berichtet.

Die vorgesehenen Leistungstransienten wurden am 1.2., 5.2. und 9.2.1982 gefahren. Die Maxima der Transienten wurden nach 9,9 sec (120 % χ/χ_0), 20,1 sec (140 %) und 30 sec (160 %) planmäßig erreicht. Nach entsprechenden 9,9 sec bzw. 12,6 sec auf Nominalleistung sowie durch eine Schnellabschaltung wurden die Transienten beendet. Die entsprechenden Signale der Kollektors, des He 3-Druckes und einiger Thermoelemente sind in den Abb. 17-19 wiedergegeben. Am Beispiel des Thermoelements Nr. 10 erkennt man einen quasi linearen Temperaturanstieg von etwa 30 °C je 20 % Leistungshub bei konstantem Na-Durchsatz. Die Signale der Kollektors geben qualitativ den Leistungspuls gut wieder, ebenso wie der Druckabfall im He 3-Kreislauf.

Mit dem Reaktorscram und nachfolgenden Gasanalysen des Loopcovergases zum Nachweis von Spaltgasen bei eventuellem Stabdefekt, die negativ verliefen, wurde die Bestrahlung beendet.

5. Die Bestrahlungsnachuntersuchung

Nach Abschluß der Bestrahlung wurde der Einsatz im BR 2 neutrografiert. Überraschenderweise zeigte die Aufnahme qualitativ eine nahezu unveränderte Brennstoffsäule, ein Zentralkanal war an keiner Stelle erkennbar. Eine nach dem Transport in die Heißen Zellen des KfK durchgeführte Betatrondurchleuchtung kam zu dem gleichen Ergebnis. Diese ersten Befunde deuteten auf die im folgenden durch weitere Nachuntersuchungsergebnisse bestätigte Tatsache hin, daß die spezifizierten Leistungsniveaus deutlich unterschritten wurden /13/.

Bei der visuellen Inspektion mit Hilfe eines Periskops wurden an dem Brennstab keine Besonderheiten festgestellt. Die wendelförmig über die gesamte Stablänge durchgeführte Durchmesserermessung zeigte, daß keinerlei Änderungen dieser Kenngröße aufgetreten sind.

Die γ -spektrometrische Untersuchung wurde etwa 9 Monate nach Bestrahlungsende durchgeführt. Neben der Hauptaktivität des Nuklidpaares Zr/Nb-95 wurden die Aktivitätsspitzen der Spaltprodukte Ru-103, Ru/Rh-106, Ce-144 und Cs-137 vermessen. Die axialen Aktivitätsprofile zeigten einen gleichmäßigen typischen Verlauf, erwähnenswert ist die Tatsache, daß das Cs-Profil keinerlei axiale Aktivitätsverschiebungen aufweist.

Aus dem Zr/Nb-95-Profil kann folgende axiale Leistungsverteilung während der Bestrahlung entnommen werden:

- Leistungsmaximum in der Mitte der Brennstoffsäule,
- 55 % der Maximalleistung am oberen Brennstoffsäulenende,
- 36 % der Maximalleistung am unteren Brennstoffsäulenende.
- Die über die gesamte Brennstoffsäulenlänge gemittelte Stableistung beträgt ca. 77 % der maximalen Leistung.

Bei obigen Angaben ist zu berücksichtigen, daß wegen der langen Pause zwischen stationärer und transientser Bestrahlungsphase die Leistungsverteilung nur für den letzten Bestrahlungszyklus gilt.

Die zerstörende Nachuntersuchung wurde in der für ein solches Experiment typischen Breite der Analysenmethoden durchgeführt. Im Verlauf der Arbeiten ergaben sich jedoch auf Grund der Zwischenbefunde Einschränkungen des Umfangs, vor allem im Bereich der Keramografie und Metallografie. Eine Ausdehnung war für die Untersuchung der Flußdepression notwendig.

Spaltgasfreisetzung

Durch eine gaschromatografische Analyse wurden die in das Gasplenum freigesetzten Spaltgase Krypton und Xenon bestimmt. Folgende Werte wurden ermittelt:

Krypton	24 mm ³
Xenon	84 mm ³
Luft	61 mm ³
Kr/Xe	1:3,5

Da in dem Analysenverfahren Helium als Transportgas eingesetzt wird, war die Bestimmung dieses Edelgases, das auch zur Füllung des Stabes verwendet worden war, nicht möglich.

Für das frei zugängliche innere Stabvolumen wurde durch eine Druckdifferenzmethode ein Wert von 11,62 cm³ gemessen. Die sehr geringe Spaltgasfreisetzung deutet, wie schon vorher die anderen Befunde, auf eine sehr niedrige Stableistung (Brennstofftemperatur) hin.

Abbrand-Analyse

Der Abbrand-Bestimmung kam in diesem Experiment eine besondere Bedeutung zu, da mit den daraus gewonnenen Daten eine Rückrechnung auf die Stableistung während der Bestrahlung möglich wurde und so die Diskrepanz zwischen Brennstoffzustand und angegebener Stableistung lösbar war. Entnommen für die Analyse wurden drei über die Brennstoffsäule verteilten Proben. Die Proben erhielten die Ziffern 8, 9 und 10, wobei Probe 9 als Hauptprobe ins Maximum

des hier sehr flachen axialen Leistungsverlaufes gelegt wurde. Als Abbrandindikator wählte man die Radionuklide Ce-144 und Cs-137. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise und Diskussion der Ergebnisse findet sich in /14/.

Aus den Analysenwerten wurden die nachstehenden lokalen Abbrände errechnet.

Tabelle VII: Mol-18/1A1 Abbrandbestimmung

Proben-Nr.	8	9	10
Axiale Position vom unteren Brennstoffsäulenende in mm	502	274	114
Ce-144 Abbrand in % Fima	0,566	0,729	0,575
Ce-137 Abbrand in % Fima	0,575	0,705	0,590
Mittelwert Ce/Cs = 1:1	0,571	0,717	0,583

Die Einzelangaben zeigen eine für die Art der Analyse hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Abbrandindikatoren.

Rechnet man den Mittelwert der Abbrandanalyse für die im Bereich maximaler Stabileistung liegende Probe 9 mit Hilfe der üblichen Faktoren in die vergleichbare Größe MWd/t um, so erhält man:

$$0,717 \% \text{ Fima} = 6880 \text{ MWd/t.}$$

Der Wert liegt um ca. 36 % unter dem für diesen Stabbereich von Mol angegebenen Abbrand von 10.800 MWd/t. Er senkt um den gleichen Betrag die angegebenen Stabileistungen.

Analyse der gebundenen Spaltgase

Die Menge des im Brennstoff zurückgehaltenen Spaltgases wurde an drei Proben ermittelt, von denen die eine im Stabileistungsmaximum, die andere im oberen bzw. unteren Drittel der Brennstoffsäule lagen, in unmittelbarer Nähe der Abbrandproben. Jeder der ca. 2 g Brennstoff enthaltenden Stababschnitte wurde zunächst gemahlen und das bei dieser Operation freigesetzte "Porensplattgas" analysiert. Die Mahlproben wurden anschließend in Salpetersäure gelöst und der hier freigesetzte Anteil als "Gittersplattgas" bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle VIII sind die Analysenwerte, bezogen auf jeweils ein Gramm Brennstoff, wiedergegeben.

Tabelle VIII: Mol-18/1A1 Gebundene Spaltgase

Proben-Nr.		2	6	7
Z-Position vom unteren Brennstoff-säulende	(mm)	494	282	106
Porensplattgas				
Xenon	(mm ³ /g)	19,5	25,3	13,1
Krypton	(mm ³ /g)	3,3	4,3	2,5
Xe/Kr	(mm ³ /g)	5,9	5,9	5,2
Gittersplattgas				
Xenon	(mm ³ /g)	92,5	91,2	96,4
Krypton	(mm ³ /g)	10,2	9,6	11,0
Xe/Kr	(mm ³ /g)	9,1	9,5	8,8
Gesamtspaltgas	(mm ³ /g)	125,5	130,4	123,0

Die im Leistungsmaximum liegende Probe Nr. 6 enthält danach 130,4 mm³ Gesamtspaltgas. Eine Berechnung der theoretisch gebildeten Spaltgasmenge aus Brennstoff- und Bestrahlungsdaten ist nur näherungsweise möglich, da insbesondere für den Zerfall kurzlebiger Xenonisotope und der Aufbau von stabilen Folgeprodukten die nuklearen Daten sehr experimentspezifisch und in diesem Fall unbekannt sind. Erfahrungswerte aus anderen Bestrahlungen mit einem hohen thermischen Flußanteil liegen für 1 % Fima bei etwa 270 mm³ pro Gramm Oxidbrennstoff. Danach würde der Spaltgasgehalt der Probe Nr. 6 einem Abbrand von etwa 0,5 % Fima entsprechen, ein Wert, der noch unter der chemischen Abbrandanalyse liegt und weit entfernt von den vorberechneten 1,1 %. Die freigesetzte Spaltgasmenge, die für den gesamten Stab nur 108 mm³ beträgt, braucht bei dieser Betrachtung nur am Rande berücksichtigt werden.

Insgesamt weisen auch die Spaltgaswerte sowohl hinsichtlich der Menge als auch der prozentualen Freisetzung auf eine niedrige Stabileistung während der Bestrahlung hin.

Eine bemerkenswerte Nebenbeobachtung ist beim Vergleich der Xenon-Krypton-Verhältnisse zu machen. Ausgehend von einem Wert von 9 im Gittersplattgas fällt der Xenon-Anteil auf 6 im Porensplattgas und 3,5 im freigesetzten Spaltgas. Hier wird deutlich, daß beide Spaltgase unterschiedliche Freisetzungsraten haben, was aufgrund ihrer unterschiedlichen Atomgröße, insbesondere für den Diffusionsmechanismus auch zu erwarten ist.

Keramografie

Zur Charakterisierung des Brennstoffzustandes wurden die Querproben keramografisch untersucht. Abb. 20 zeigt die Übersichtsaufnahmen mit den zugehörigen β, γ - und α -Autoradiografien. Die erwartete Brennstoff-Umstrukturierung hat nur im Ansatz stattgefunden. Im Zentrum der Tabletten zeigt sich lediglich isometrisches Kornwachstum. Der Brennstoff/Hülle-Spalt ist durch die Rißbildung, aber auch durch eine exzentrische Lage der Tabletten ungleichmäßig ausgebildet. In den β, γ -Autoradiografien erkennt man die starke Leistungsabsenkung im Tablettenzentrum als dunkle Zone verminderter Spaltproduktaktivität. Anzeichen für eine Spaltproduktwanderung sind nicht zu beobachten.

Eine vergrößerte Darstellung der Brennstoffstrukturen findet sich in dem Panoramabild der Abb. 21.

Für die quantitative Auswertung wurden die radiale Spaltweite und der Außenradius der umstrukturierten Brennstoffzone am Mikroskop ermittelt. Die nachfolgende Tabelle gibt die jeweils vier Meßwerte (Winkelabstand je 90°) für die drei Proben wieder:

Tabelle IX: Radiale Spaltweite Mol-18/1A1 und Kornwachstum

Proben-Nr.	1	3	5
Z-Position vom unteren Brennstoffsäulenende (mm)	544	483	294
Radiale Spaltweite Brennstoff/Hülle (μ m)	25/45/130/65 $\delta = 66$	80/35/15/80 $\delta = 53$	35/20/60/40 $\delta = 39$
Außenradius der Zone mit isometrischem Kornwachstum (mm)	1,6/1,7/ 1,65/1,65	1,7/1,6/ 1,6/1,75	1,7/1,65/ 1,6/1,75

Gammaspektrometische Messung der radialen Flußabsenkung

Zur Ermittlung der radialen Flußdepression wurde versucht, den Verlauf der γ -Aktivität über einen Brennstabquerschnitt zu messen /15/. Die allein zur Verfügung stehende Meßeinrichtung mit einem quadratischen Kollimator von 1 mm Öffnungsweite brachte jedoch keine befriedigende Ortsauflösung, insbesondere im Randbereich der Brennstofftablette, wo die Aktivität nach außen steil ansteigt. Im Zentrum der Keramografie-Probe Nr. 5 wurde so nur eine Leistungsdepression auf 30 % der Randleistung gemessen, wohingegen aufgrund von Rechnungen zur Flußabsenkung (siehe Kapitel 6) ca. 10 % der Randleistung erreicht

werden sollten. Daneben konnte allerdings noch eine leichte diametrale Schiefast, die zunächst nicht bekannt war, gefunden werden.

Inspektion der Hüllrohr-Innenfläche

Ein 50 mm langer Abschnitt des Brennstabs innerhalb der Brennstoffsäule wurde längsseits aufgetrennt und der nur lose anhaftende Brennstoff aus den beiden Halbschalen entfernt. Die auf diese Art freigelegte Hüllrohr-Innenfläche konnte optisch inspiziert werden. Sie zeigte ein Abbild der Struktur der zugehörigen Tablettensäule (siehe Abb. 22). Tablettenstoßstellen waren ebenso markiert wie Längs- und Querrisse. Da diese Markierung sicher während der Bestrahlung entstanden ist, gibt sie Auskunft über Form und Größe der Tablettenbruchstücke unter Betriebsbedingungen. Die genaue Ursache der Zeichnungen ist zwar unbekannt, man kann jedoch davon ausgehen, daß flüchtige Bestandteile des Brennstoffs bzw. seine Spaltprodukte die Hülle an diesen Orten angegriffen haben.

Eine Korrosion der Hüllrohrinnenseite wurde an den Proben 3 und 5 beobachtet. Die Schichtdicken der gleichmäßigen Reaktionszone, die sich nicht über den ganzen Rohrumfang erstreckte, betragen maximal 14 bzw. 20 μm .

Das Gesamtbild der Nachuntersuchungsbefunde zeigt, daß die Bestrahlung auf einem niedrigeren Leistungsniveau erfolgte und die bestrahlungsbedingten Veränderungen gering waren.

6. Modelltheoretische Analyse

Aufgrund der Befunde der Nachuntersuchung des Prüflings MoI 18/1A1 wurde die Zuverlässigkeit der Leistungsbestimmung überprüft /16/. Hiernach sind durch die Berechnung der Wärmebilanz aus dem Natriumdurchsatz und der Aufheizspanne des Kühlmittels die Temperatur- und Kühlmitteldurchsatzmessungen als die wesentlichen Bestimmungsgrößen zu untersuchen.

Durch Lageänderung der zur Wärmebilanz herangezogenen Thermolemente im Abstandshaltegerüst können, wie aus Meßwertvergleichen ermittelt wurde, Fehler von maximal 5 % bei der Leistungsberechnung eintreten.

Mögliche Fehler bei der Messung des Natriumdurchsatzes können auftreten durch fehlerhafte Eichung der permanentmagnetischen Durchflußmeßsonde, unterschiedliche Na-Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der Form der

Einlaufstrecke sowie durch einen Natrium-Bypaß-Strom vom Pumpenausstritt zum Durchflußmesser-Eintritt infolge eines Ringspaltes zwischen Brennstabauflängung und dem inneren Einsatzrohr.

Während in /16/ gravierende Fehler der Sondeneichung nicht befürchtet werden, können Fehler durch Strömungsgeschwindigkeiten und den Bypaß nicht ausgeschlossen werden: Bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten können die Ergebnisse der Durchflußmessung nicht mehr eindeutig interpretiert werden, ein Bypaßfluß von bis zu 30 % des Gesamtdurchflusses ist möglich. Eine eindeutige Aussage, durch welche Einflüsse die reale Sachlage entstanden ist, ist nicht mehr möglich.

Ausgehend von den Befunden der Nachuntersuchung sowie den relativierten Angaben zur Bestrahlung (axialer und zeitlicher Verlauf der Stableistung) wurde der Bestrahlungsverlauf mit Stableistungen erstellt, die aus der Abbrandkorrektur abgeleitet wurden. Mit dem Korrekturfaktor $f_{\text{korr}}=0,637$ wurden die Nominalleistungen umgerechnet.

In Tabelle XI ist der den Betriebsberichten entnommene (vereinfachte) Bestrahlungsablauf mit den neuen Stableistungen und Kühlmitteltemperaturen wiedergegeben. Das axiale Leistungsprofil aus den Betreiberangaben gibt die Befunde der γ -scannings gut wieder (vergl. Tabelle V).

Die modelltheoretische Analyse beginnt mit der Bestimmung des Temperaturprofils in Brennstoff und Hülle. Mit dem Rechenprogramm SATURN-S wurde zunächst der Einfluß der Flußabsenkung auf die Brennstoffzentraltemperatur untersucht. In der heißen Brennstoffebene mit einer Leistung von 277 W/cm ergeben sich bei nahezu gleichen Brennstoffoberflächentemperaturen die in Tabelle X aufgeführten Zentraltemperaturen.

Tabelle X: Mol-18/1A1 Brennstoffzentraltemperatur für verschiedene Flußabsenkungen

Flußabsenkung $\varnothing_i / \varnothing_a$ (%)	Brennstoffzentraltemperatur T_z (°C)
7,5	1386
15,0	1447
30,0	1556

Tabelle XI: Mol-18/1A1 Bestrahlungsablauf

Zeit (h)	Max. korr. Leistung (W/cm)	Natrium-Temperatur (°C)	
		Ein	Aus
0,00	0	155	155
14,40	277	464	612
19,20	277	464	612
19,30	0	155	155
21,60	293	460	590
309,20	293	460	590
309,30	0	155	155
313,80	306	400	550
426,40	306	400	550
427,00	0	155	155
430,00	317	440	597
543,00	317	440	597
543,05	344	450	600
567,00	344	450	600
567,05	373	450	600
592,00	373	450	600
592,05	405	450	600
613,00	405	450	600
613,05	439	450	600
620,00	439	450	600
620,05	319	450	598
711,00	319	450	600
711,00	405	450	600
711,01	319	450	600
805,00	319	457	598
805,01	458	448	598
805,01	319	450	588
902,00	319	440	587
902,01	516	455	596
902,02	0	20	20

Für die nachfolgende thermische Analyse wird die Flußabsenkung von 30 % zugrunde gelegt, weil zum einen die experimentellen Befunde vorliegen, zum

anderen führt dieser Fall zu den höheren thermischen Brennstoffbelastungen. In Tabelle XII sind die wichtigsten Brennstoff- und Hülltemperaturen zu den in Tabelle XI angeführten Betriebszeitpunkten aufgeführt. Diese Angaben beziehen sich auf die axiale Brennstabposition mit maximaler Stableistung, d.h. ≈ 330 mm vom unteren Brennstoffsäulenende.

Im folgenden werden die einzelnen experimentellen Befunde mit den theoretischen Ergebnissen verglichen.

Brennstabdurchmesser:

Wie aus Tabelle XII ersichtlich, ist der Spalt Brennstoff-Hülle zu jedem Zeitpunkt geöffnet, mechanische Wechselwirkungen, die zu Hüllaufweitungen führen können, sind ausgeschlossen. Weitere Hüllaufweitungen durch Kriechen oder Schwellen werden nicht berechnet, der Stabdurchmesser bleibt unverändert.

Spaltgasfreisetzung:

Die Berechnung der Freisetzung der Spaltgase Kr und Xe lieferte folgende Werte

$$\text{Kr } 2,3 \text{ mm}^3 \qquad \text{Xe } 16,1 \text{ mm}^3 .$$

Das entsprechende Verhältnis beträgt $\text{Kr/Xe} = 1:7$. Der Vergleich mit den Meßwerten von 24 mm^3 Kr und 84 mm^3 Xe sowie dem Verhältnis $\text{Kr/Xe} = 1:3,5$ weisen auf die bereits in Kapitel 5 erwähnte Tatsache hin, daß bei niedrigen Brennstofftemperaturen die Diffusion der beteiligten Partner eine Rolle spielt. Diese Diffusionsmechanismen werden in dem Spaltgasfreisetzungmodell von SATURN-S, welches lediglich Abbrand- und Temperatureffekte berücksichtigt, nicht mitbehandelt. Infolge der offenbar stärkeren Diffusion des Krypton verschieben sich die Kr/Xe-Verhältnisse vom Gitter- über das Porensplattgas bis zum freigesetzten Gas. Mittelt man über die experimentellen Kr/Xe-Verhältnisse, so ergibt sich ein Wert von $1:6,10$, in relativ guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Ergebnis.

Aus den Gasproduktionen (s. gebundene Spaltgase) ergibt sich für die theoretische Analyse eine Freisetzungsrates von $0,1 \%$, aus den experimentellen Befunden ein Wert von $0,7 \%$.

Abbrand:

Mit der in Tabelle XI angegebenen Leistungsgeschichte ergibt sich in der Ebene maximaler Stableistung ein Abbrand von $0,698 \text{ At.}\%$, der dem Wert von $0,717$ gemäß Tabelle VII entspricht. Der mittlere Abbrand

Tabelle XII: Ergebnisse der thermischen Analyse des Experiments Mol-18/1A1 mit dem Programm SATURN-S

Zeit (h)	Leistung (W/cm)	Brennstoffinnen- außentemperatur		Hüllinnen- außentemp.		Spalt- breite (μm)	Poro- sität 1) (%)	Abbrand (At-%)	
		T _{Bi}	T _{Ba} (°C)	T _{Hi}	T _{Ha}				
1. Zyklus	14,4	277	1557	864	573	545	60	11,48	0,006
	19,2	277	1574	908	573	545	58	11,48	0,009
	21,6	293	1600	859	563	533	58	11,48	0,010
	309,2	293	1598	900	563	533	55	11,50	0,221
	313,8	306	1574	816	515	483	54	11,50	0,223
	426,4	306	1590	867	515	483	52	11,51	0,310
2. Zyklus	430,0	317	1657	870	559	527	51	11,51	0,311
	543,0	317	1668	906	559	527	50	11,53	0,401
	543,05	344	1756	912	570	535	47	11,53	0,401 1.R.
	567,0	344	1759	927	570	535	47	11,55	0,421
	567,05	373	1849	932	574	536	45	11,55	0,421 2.R.
	592,0	373	1854	943	574	536	45	11,65	0,445
	592,05	405	1949	949	578	537	43	11,65	0,445 3.R.
	613,0	405	1957	964	578	537	42	12,02	0,466
	613,05	439	2053	968	583	539	41	12,02	0,466 4.R.
	620,0	439	2064	985	583	539	41	12,57	0,474
	620,05	319	1673	911	565	533	48	12,57	0,474
	711,0	319	1669	902	566	534	48	12,60	0,546
	711,004	405	1940	939	578	537	42	12,60	0,546 1.T.
	711,01	319	1669	908	566	534	47	12,60	0,546
	805,0	319	1666	900	569	536	47	12,63	0,621
	805,01	458	2085	962	584	537	39	12,63	0,621 2.T.
	805,01	319	1664	904	561	528	46	12,63	0,621
	902,0	319	1644	885	555	522	46	12,66	0,698
	902,01	516	2228	986	594	542	36	12,66	0,698 3.T scram
	902,02	0	20	20	20	20	74	12,66	0,698 ⁺

⁺A_{Rechn}/A_{rad chem} = 0,974 (R. = Rampe / T. = Transiente)

1) im innersten Ring

über den gesamten Brennstoff beträgt bei Zugrundelegung der axialen Leistungsverteilung 0,552 %.

Gebundene Spaltgase:

Mit dem in dem Spaltgasproduktionsterm verwendeten Gasausbeuten je Spaltung (0,27 Gasatome für schnelle und epithermische, 0,31 für thermische Spaltung sowie Wichtung über die entsprechenden Gruppenanteile) ergibt sich eine Spaltgasproduktion von $17,84 \text{ cm}^3$ über den gesamten Brennstoff. Dem steht eine Gesamtproduktion von ca. 15 cm^3 aus den Daten der Nachuntersuchung gegenüber. Dieser um ca. 17 % niedrigere Wert entspräche einem mittleren Gesamtabbrand von 0,46 %, bezogen auf den obigen theoretischen Mittelwert. Der Mittelwert der gebundenen Gase beträgt nach der Rechnung $150 \text{ mm}^3/\text{g}$, im Flußmaximum etwa $190 \text{ mm}^3/\text{g}$.

Thermische Analyse des Brennstoffs:

Wie aus Tabelle XII zu entnehmen ist, liegen die Brennstoffzentraltemperaturen bei stationärer Leistung zwischen 1500 und 1700 °C. Erst im Verlauf der vier Leistungsrampen werden Temperaturen von maximal 2070 °C erreicht. Bei diesen Leistungsrampen mit Haltezeiten von bis zu 24 Stunden können Umstrukturierungen auftreten: Bei der 4. Rampe mit 439 W/cm mit einer Zentraltemperatur von 2070 °C liegt die Temperaturgrenze von 1900 °C, einem möglichen Stengelkornzonenradius, bei etwa 1 mm, die 1600 °C-Grenze, entsprechend der Kornwachstumszone, zwischen 1,6 und 1,8 mm Brennstoffradius. Die Nachuntersuchungsbefunde zeigen eine Kornwachstumszone von 1,6 - 1,7 mm, jedoch kein Stengelkornwachstum. Dies ist vermutlich auf das sehr flache Temperaturprofil und die offenbar nicht ausreichende Haltezeit zurückzuführen, eine Stengelkornbildung zu ermöglichen. In Abb. 23 ist die radiale Temperaturverteilung und das berechnete Porositätsprofil zu diesem Zeitpunkt dargestellt. Nach dem Zentralkanalbildungsmodell führt diese Porositätsänderung zu einem Zentralkanal von 9 (!) µm, ein Wert, der unter dem mittleren Durchmesser der Herstellungsporengröße liegt. Diese Ergebnisse decken sich mit den Nachuntersuchungsbefunden.

Obwohl die Brennstofftemperaturen bei den drei Leistungstransienten auf Werte bis zu 2230 °C ansteigen, werden aufgrund der kurzen Zeiten, in denen diese Temperaturen anliegen, keine weiteren Porositätsänderungen berechnet.

Der Spalt Brennstoff-Hülle hat sich vom Ausgangswert $84 \mu\text{m}$ auf $74 \mu\text{m}$ im Kaltzustand verringert durch Brennstoffschwellen. Die Nachuntersuchungsergebnisse liegen zwischen $39 - 66 \mu\text{m}$ (Mittelwerte über 4 Radialmessungen siehe Kapitel 5). Der dem Rechenergebnis von $74 \mu\text{m}$ entsprechende Mittelwert von $39 \mu\text{m}$ der Probe 5 beinhaltet gleichzeitig eine Spaltverringerng infolge Aufreißen der Tabletten während der Abkühlphase. Inwieweit die vorhergehenden Transienten, Rampen und Abschaltungen an der Spaltverringerng beteiligt sind, kann u.U. durch eine Analyse der Rißflächen belegt werden.

Aufgrund der niedrigen Brennstofftemperaturen wird keine Plutoniumverteilung berechnet.

Durch den geringen Abbrand wird die Ausgangsstöchiometrie von 1,978 auf 1,980 erhöht.

Die Inspektion der Hüllinnen-Oberfläche zeigt eine der Brennstoffoberfläche entsprechende Struktur. Physikalisch gesehen bedeutet dies Änderungen z.B. der Oberflächenrauigkeit und der optischen Eigenschaften wie der Emissivität: Während Rauigkeitsänderungen nicht gemessen wurden, ist aus Literaturhinweisen bekannt, daß die Emissivität von Hüllrohroberflächen (ca. 0,3 - 0,4) durch Oxidation o.ä. auf Werte von 0,7 - 0,9 ansteigt, Werte, die bei hohen Hüllrohrinnentemperaturen für den Wärmedurchgang wichtig werden können.

Der Vergleich zwischen modelltheoretischer Analyse und den Ergebnissen der Nachuntersuchung zeigt im Rahmen der im vorangegangenen aufgezeigten Unsicherheiten in der Bestimmung der absoluten Leistungen und Flußabsenkungen gute Übereinstimmung. In einigen Punkten, wie z.B. in der Behandlung der Spaltgasfreisetzung, sind jedoch qualitativ erklärbare, größere Abweichungen festzustellen, die u.U. zu Modellerweiterungen führen können.

Es hat sich somit gezeigt, daß die Modellkombinationen des Programms SATURN-S das Brennstoffverhalten im Niedertemperaturbereich sowie bei Rampen und Leistungstransienten der gezeigten Leistungsbereiche quantitativ gut beschreiben.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Betriebstransientenprogramms des Projektes Schneller Brüter wurde für nichtstationären Leistungs- und Kühlmitteltemperaturbetrieb ein Loopeinsatz entwickelt, welcher es gestattet, Brennstäbe mit KNK II-Abmessungen gezielten Leistungs- und Temperaturtransienten in-pile zu unterwerfen. Dieser sogenannte Loop Mol-18/VIC wurde in dem vorgestellten Experiment Mol-18/1A1 erstmals erprobt.

Während der Bestrahlungsdauer wurden neben umfangreichen Tests der Anlage mehrere Leistungsrampen und -transienten gefahren. Der eingebaute Brennstab - ein Reservestab aus der KNK II/1-Fertigung - wurde sukzessiv 4 Leistungserhöhungen um je 10 % von Nominallast auf 140 % sowie drei schnellen Transienten im 10 sec-Bereich mit Lastspitzen von 120, 140 und 160 % unterworfen.

Aus den Nachuntersuchungsergebnissen wurde jedoch deutlich, daß das stationäre Leistungsniveau deutlich unterschritten wurde. Wie Untersuchungen ergaben, war ein nicht erkennbarer Na-Bypaß, der letztendlich zu einer die geforderten Bedingungen widerspiegelnden Wärmebilanz führte, die Ursache. Diese Tatsache führte zu konstruktiven Änderungen an Folge-loops der Experimentserie Mol-18, in der zwei weitere Einsätze bestrahlt wurden.

Mit einer aus radiochemischen Abbrandbestimmungen abgeleiteten korrigierten Leistungsgeschichte wurde mit dem Rechenprogramm SATURN-S eine modelltheoretische Analyse durchgeführt.

Unter Berücksichtigung einer 30 %-igen Flußabsenkung im Brennstoff wurde die Bestrahlungsgeschichte nachvollzogen. Hierbei zeigte es sich, daß im Leistungsbereich von 277 bis 319 W/cm Brennstoffzentraltemperaturen von 1700 °C nicht erreicht wurden. Erst bei Leistungsrampen von 110, 120, 130 und 140 %, ausgehend von 320 W/cm werden Temperaturen von 1760 °, 1850 °, 1960 ° bzw. 2060 °C erreicht. Durch das flache Temperaturprofil und die Haltezeiten von bis zu 24 h wurde signifikante Brennstoffumstrukturierung weder berechnet noch gemessen.

Aufgrund der niedrigen Brennstofftemperaturen war die Spaltgasrückhaltung nahezu vollständig. Die Analyse der freigesetzten Gase ergab eine starke Verschiebung des Kr/Xe-Verhältnisses auf 1:3,5, ein Wert, der offenbar durch starke Kr-Diffusion zustande kommt. Bei den zurückgehaltenen Gasen liegt dieses Verhältnis bei 1:5,7 für Porensplattgas, bei 1:9 für Gitter-

spaltgas, der theoretische Wert war aufgrund überwiegender U-235-Spaltung auf 1:7 eingestellt.

Die vor Bestrahlungsende durchgeführten Leistungstransienten erreichten Werte von 405 W/cm (\approx 120 %), 458 W/cm (\approx 140 %) und 516 W/cm (\approx 160 %) mit berechneten Zentraltemperaturen von 1940, 2085 bzw. 2228 °C. Infolge der kurzen Zeiten von 10, 20 bzw. 30 sec konnten sich auch hier keine deutlichen Brennstoffumstrukturierungen ausbilden.

Dieses Prototypexperiment hat somit einen wertvollen Beitrag für die Durchführung der Folgeexperimente durch Verbesserung der Loopkonstruktion sowie für die Analyse von Experimenten im unteren Leistungsbereich des Reaktorbetriebes geliefert.

Literaturhinweise:

- /1/ B. Steinmetz:
Unveröffentlichter Bericht (1984)
- /2/ H. Plitz, D. Freund:
Bestrahlungsexperimente zum Betriebstransientenverhalten,
KfK-Nachrichten, Jahrgang 15, 1983, S. 127
- /3/ J. Dekeyser:
The VIC Sodium Loop: A Versatile Irradiation Device for Transient
Testing of LMFBR Fuel Pins;
Fast, Thermal and Fusion Reactor Experiments Conference, Salt Lake
City, April 12-15, 1982
- /4/ J. Dekeyser, W. Hebel:
Unveröffentlichter Bericht (1977)
- /5/ J. Dekeyser:
Unveröffentlichter Bericht (1982)
- /6/ G. West:
Unveröffentlichter Bericht (1981)
- /7/ I. Müller-Lyda, H. Steiner:
Unveröffentlichter Bericht (1981)
- /8/ W. Hartlieb:
Unveröffentlichter Bericht (1981)
- /9/ W. Hartlieb:
Unveröffentlichter Bericht (1981)
- /10/ W. Hartlieb:
Unveröffentlichter Bericht (1982)
- /11/ W. Hartlieb:
Unveröffentlichter Bericht (1982)
- /12/ H. Gärtner:
Unveröffentlichter Bericht (1985)
- /13/ D. Geithoff:
Unveröffentlichter Bericht (1983)
- /14/ D. Geithoff, H. Wertenbach:
Unveröffentlichter Bericht (1983)
- /15/ D. Geithoff:
Unveröffentlichter Bericht (1983)
- /16/ H. Reiser, J. Dekeyser:
Unveröffentlichter Bericht (1983)

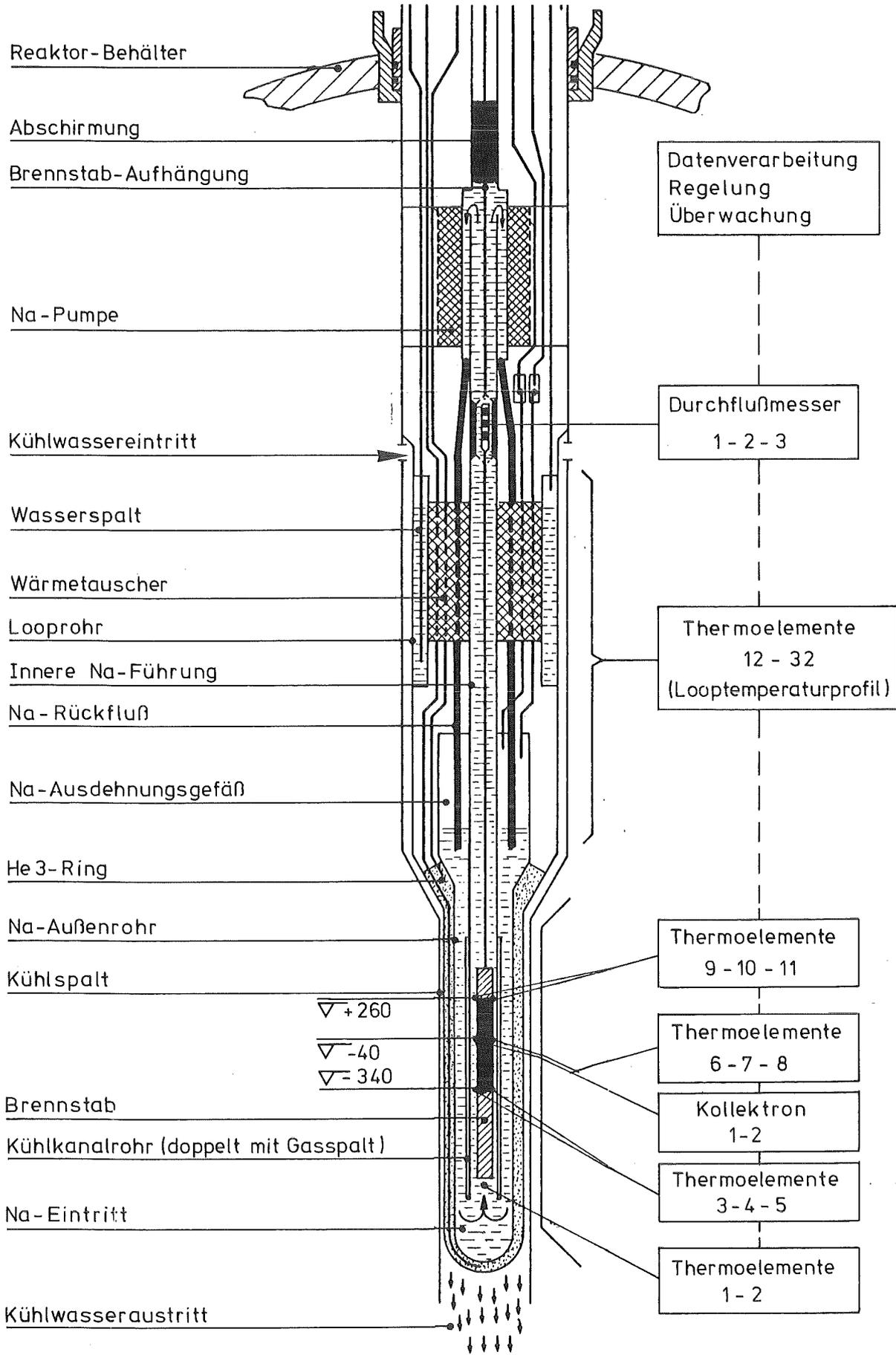


Abb. 1 Mol 18 VIC-Loop Axialer Aufbau

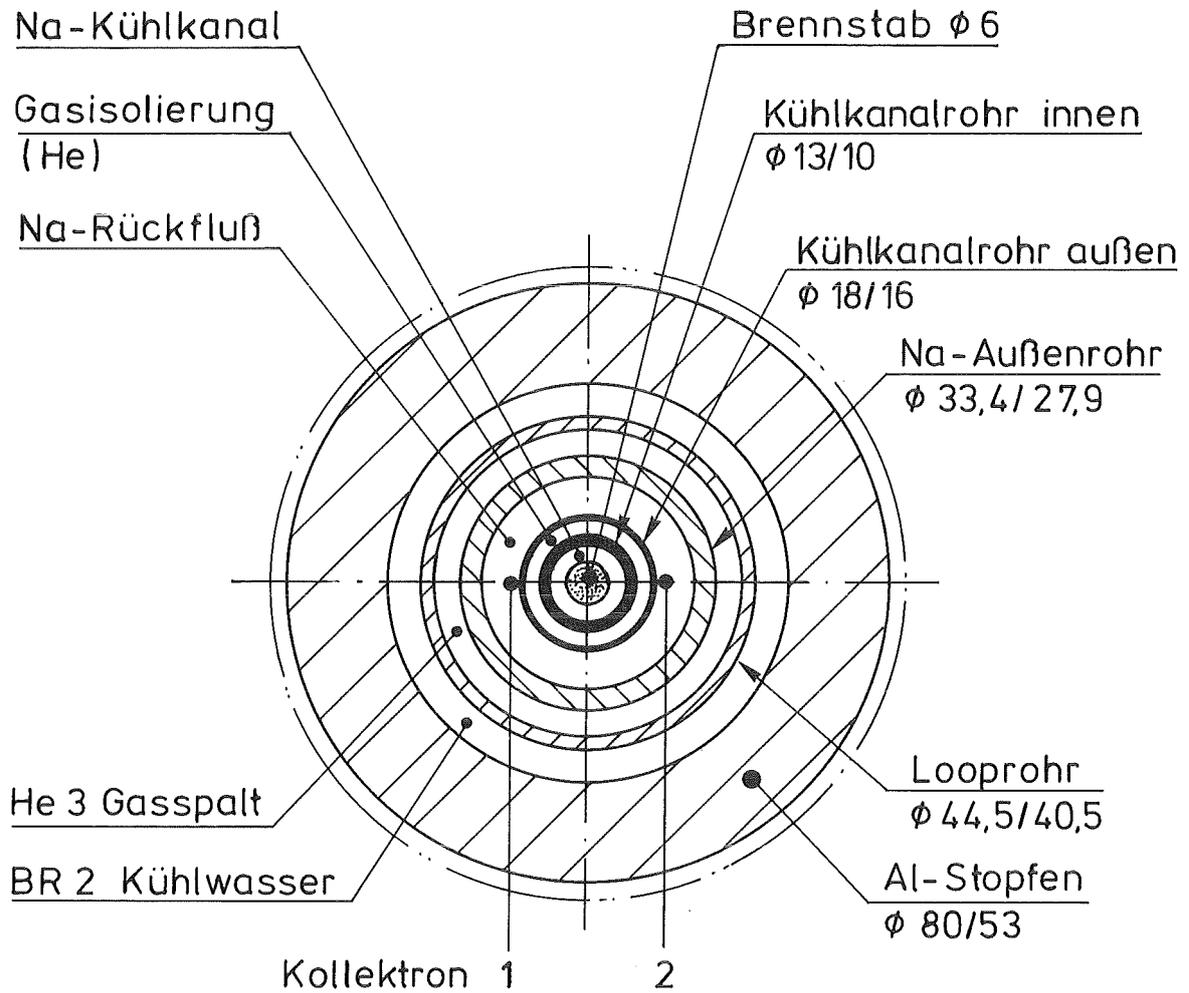


Abb. 2 Mol 18 VIC-Loop
Querschnitt in Brennstabhöhe

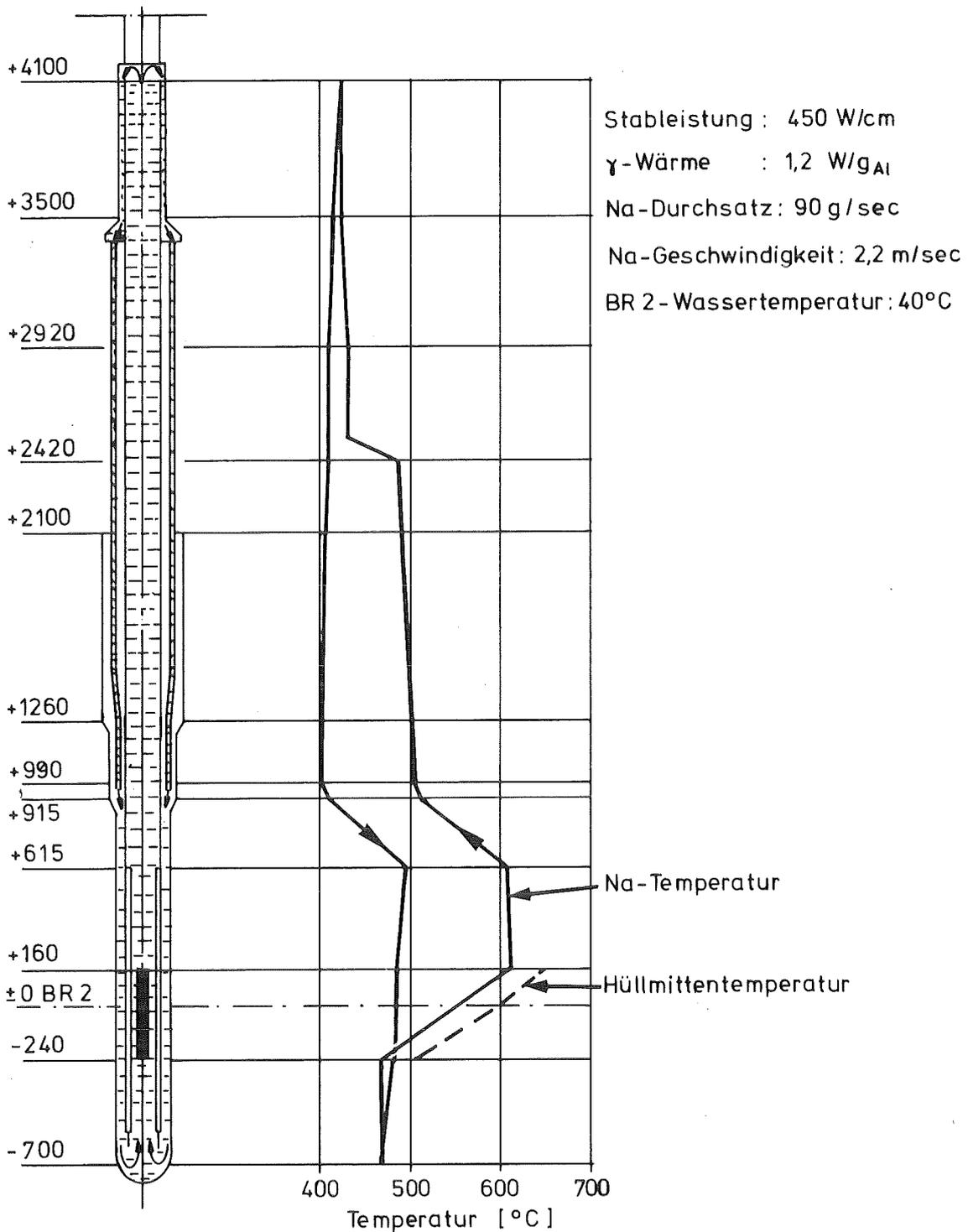


Abb. 3 Mol 18-1A1 Axialer Verlauf von Kühlmittel- und Hüllmittentemperatur unter Nominalbedingungen im VIC-Loop

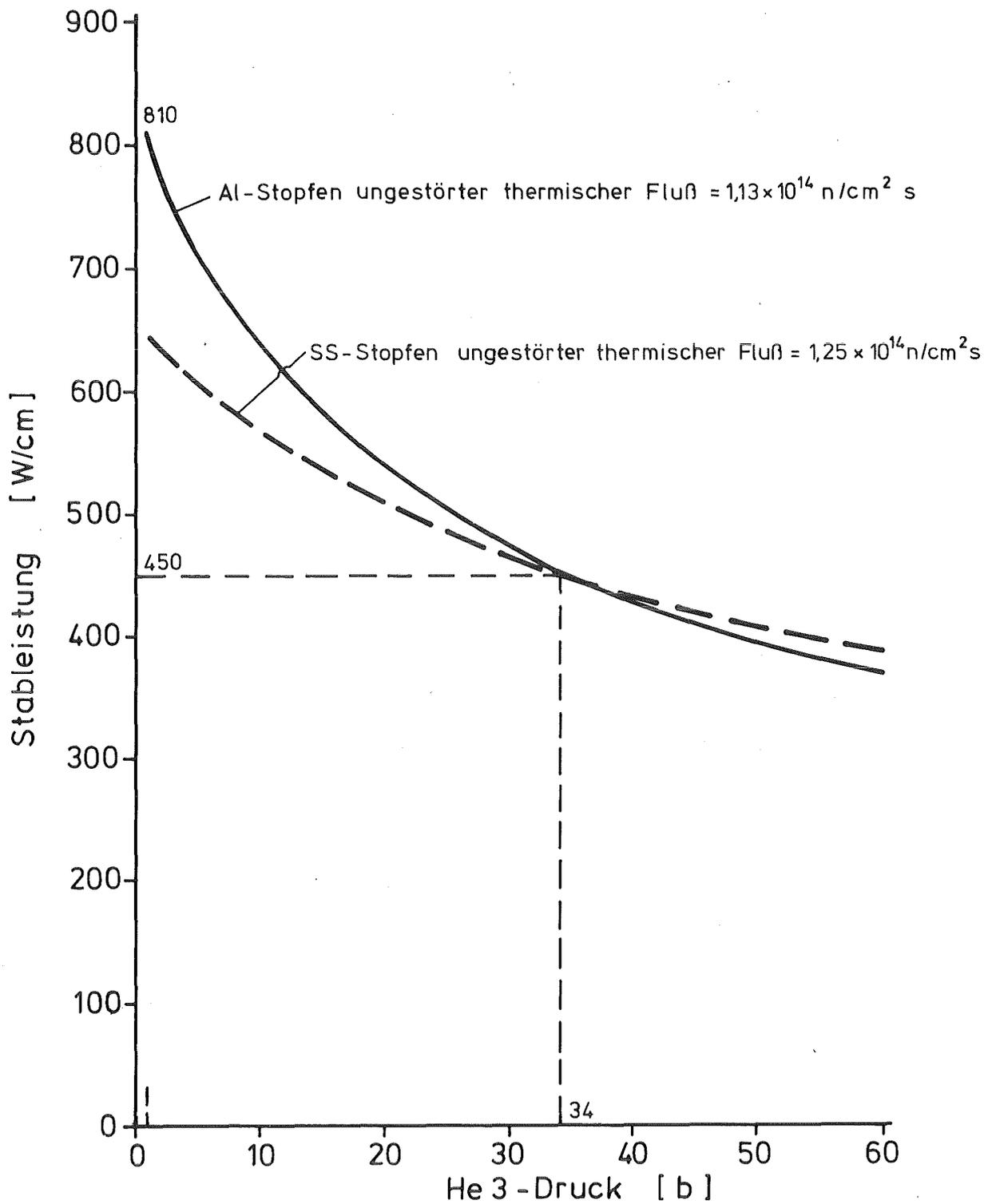


Abb.4 Mol 18-1A1 Lineare Stableistung als Funktion des He3-Drucks
(He3: Spaltbreite 3,55 mm, Temperatur 260 °C)

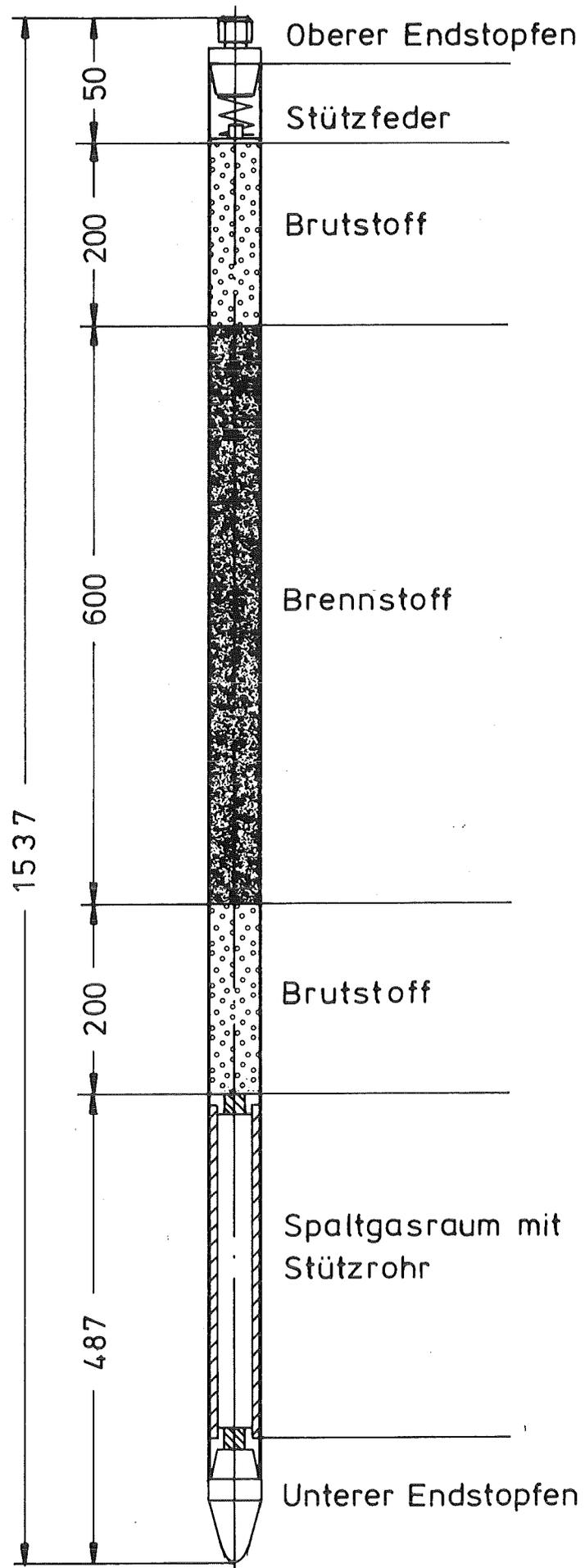


Abb. 5 Mol 18-1A1

Brennstabaufbau

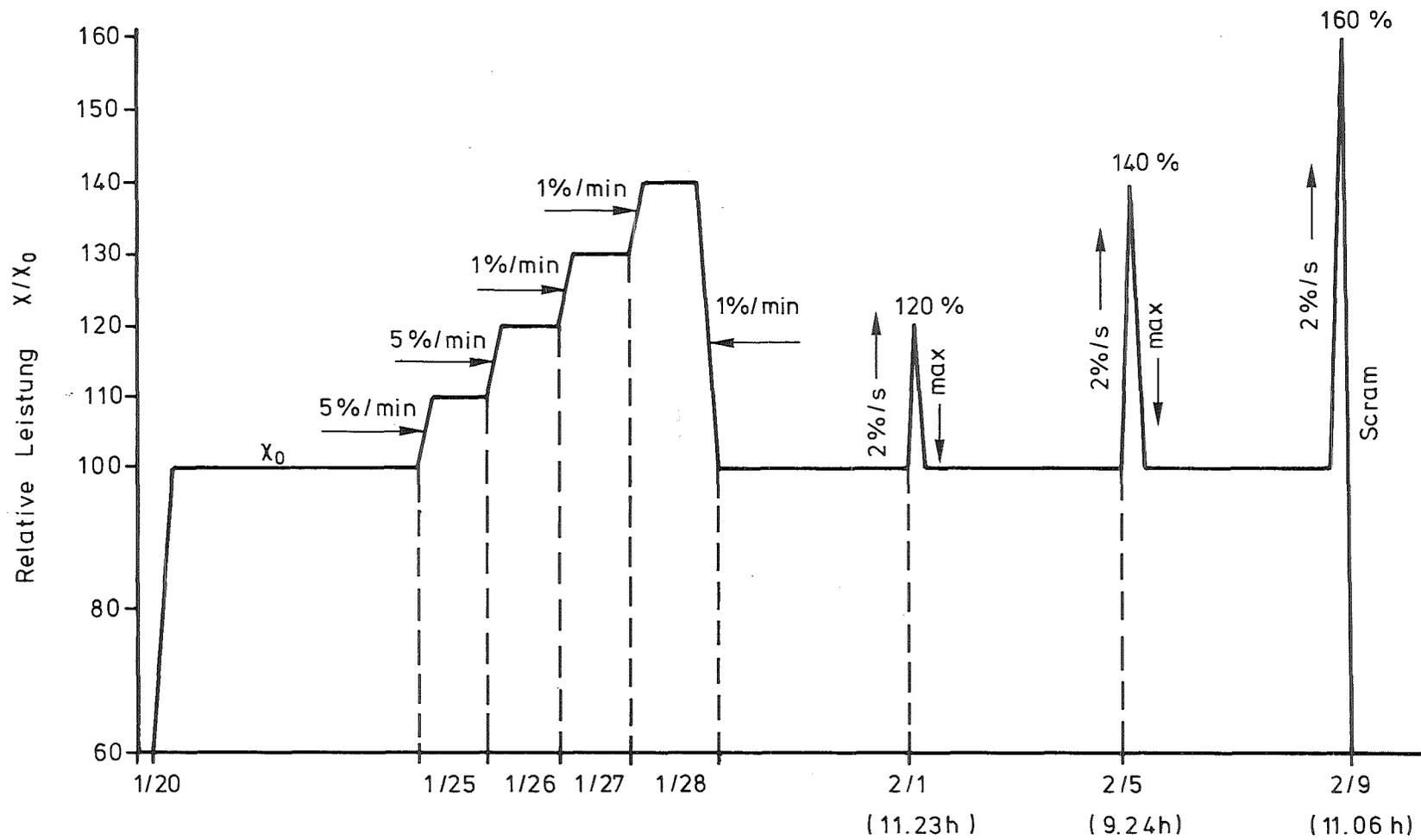


Abb.6 Mol 18-1A1 Ablauf der Bestrahlung (2. Bestrahlungszyklus 1/82 A)

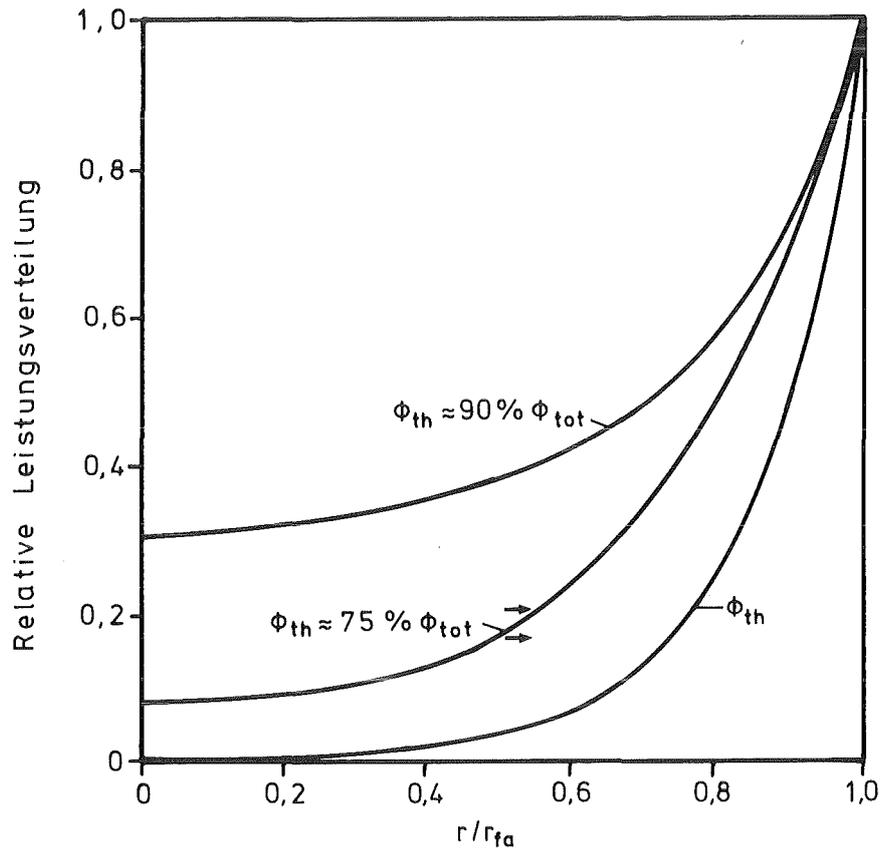


Abb. 7 Mol 18-1A1 Relative Leistungsverteilung bei thermischem Neutronenfluß (χ_{th}) bzw. im Neutronenspektrum ($\chi_{th} + \chi_s$)

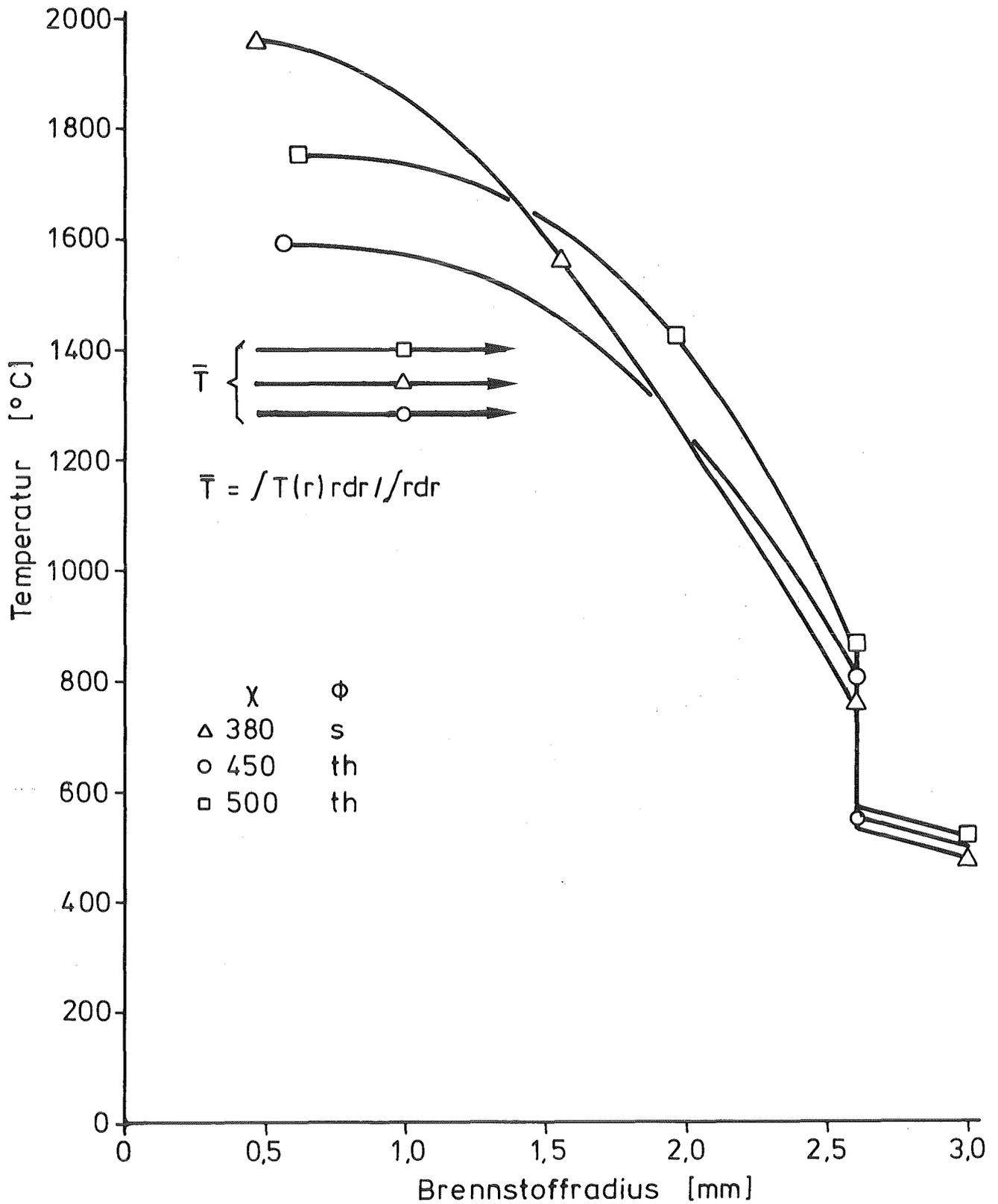


Abb.8 Mol 18-1A1 Temperaturprofile vor Rampenbeginn

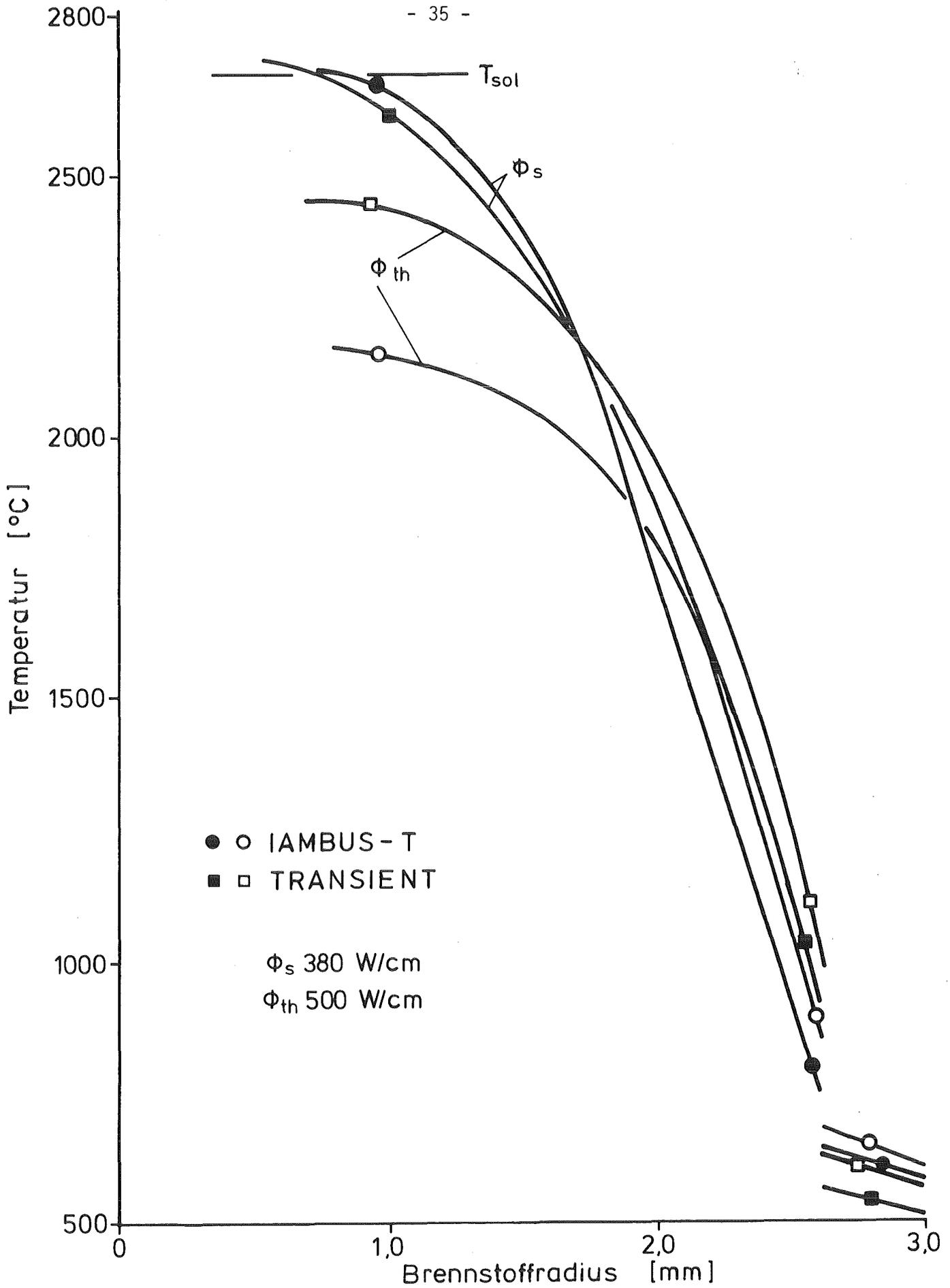
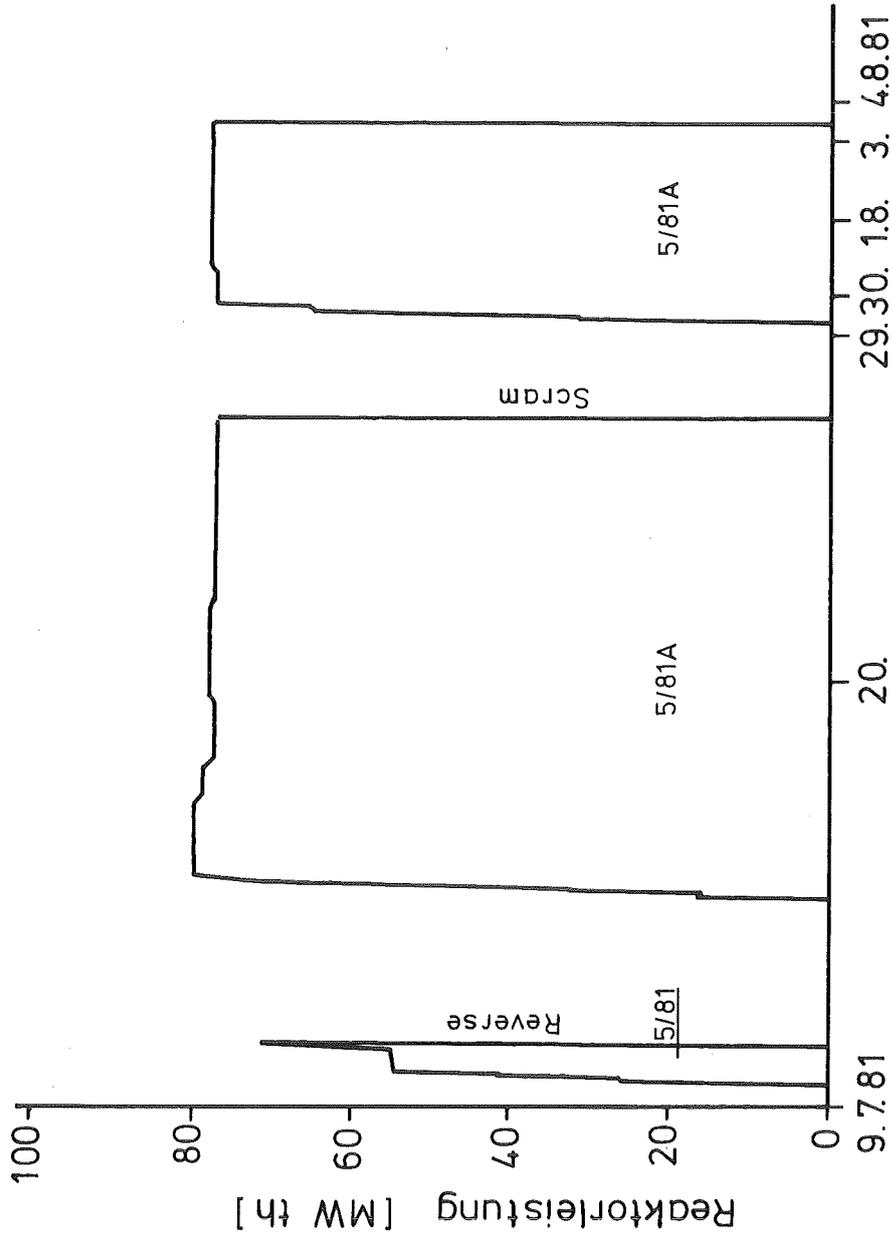


Abb. 9 Mol 18-1A1 Radiale Temperaturprofile bei 60% Überlast nach 32 sec



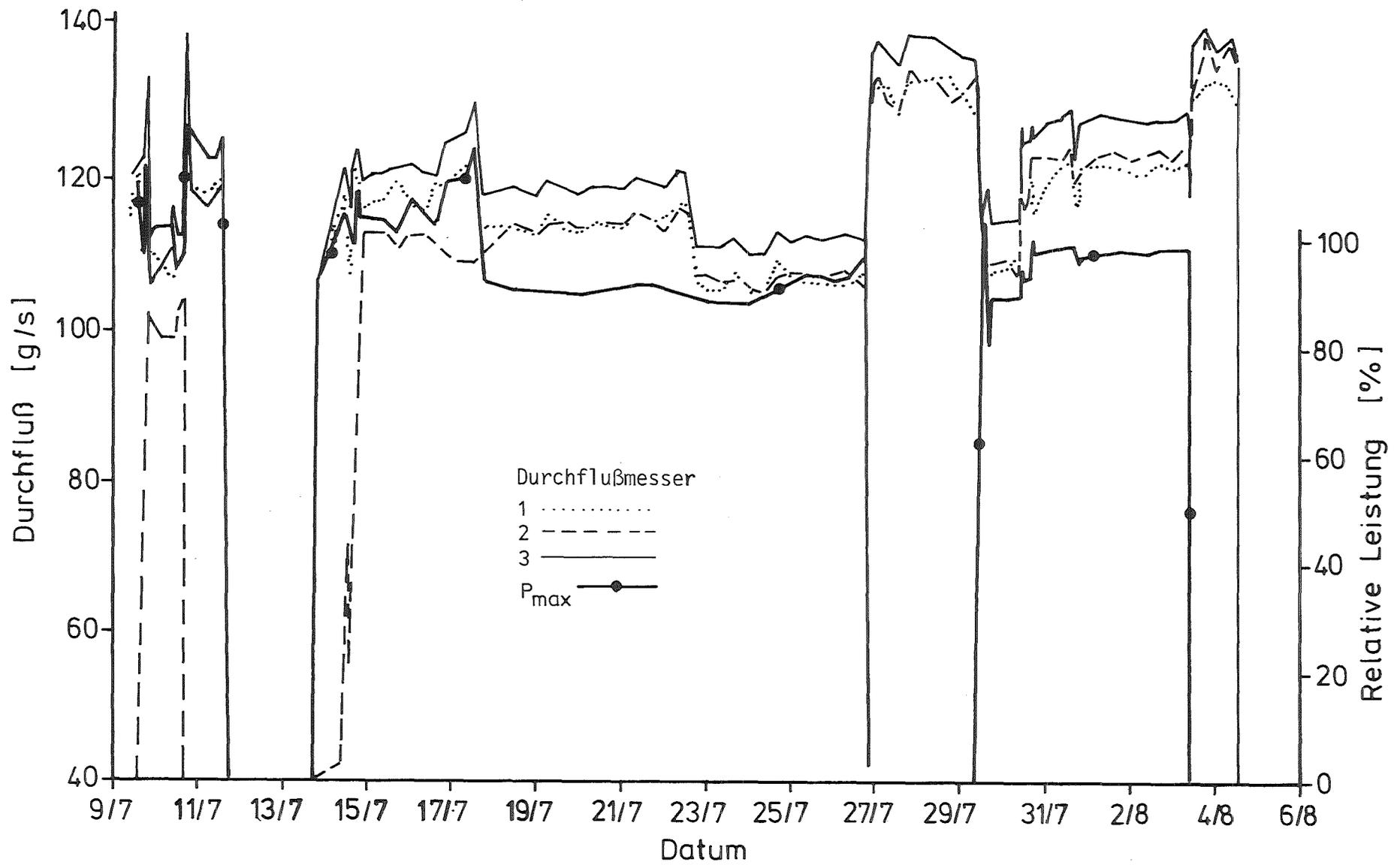


Abb. 11 Mol 18-1A1 Na-Durchfluß und relative Stableistung im Zyklus 5/81/81A

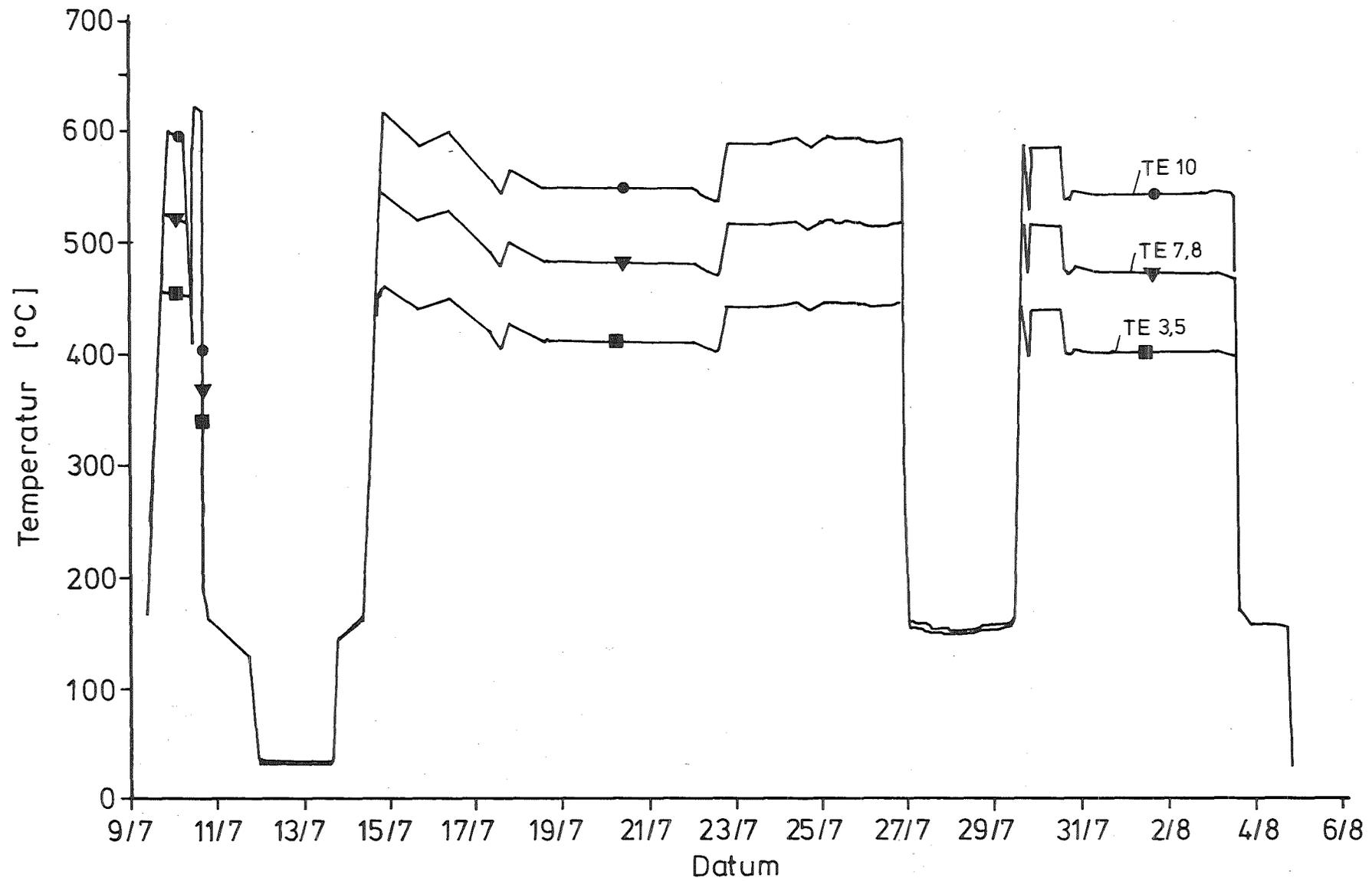


Abb. 12 Mol 18-1A1 Temperaturverlauf im Zyklus 5/81/81A

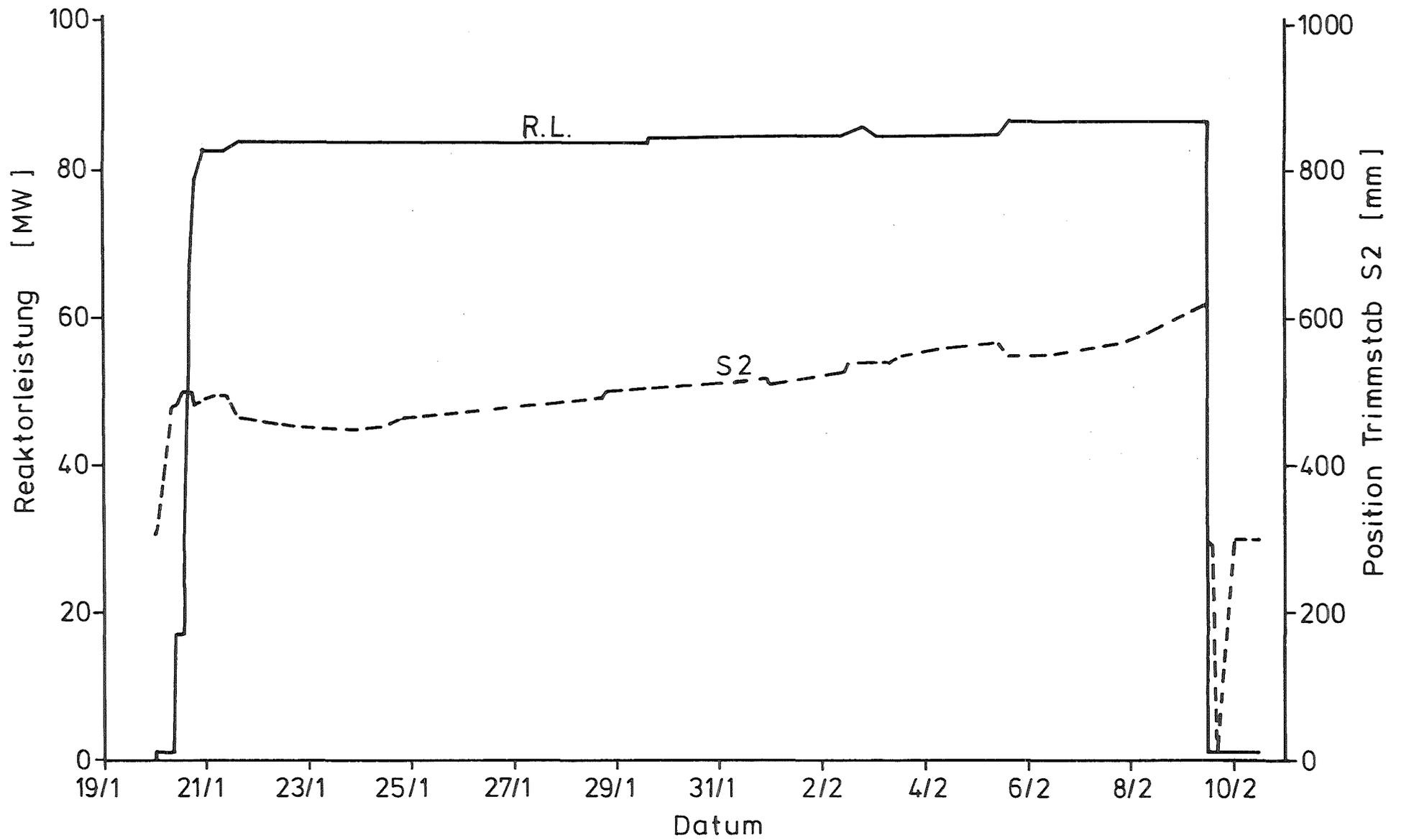


Abb.13 Mol 18-1A1 BR2-Reaktorzyklus 1/82 vom 20.1.82 bis 9.2.82

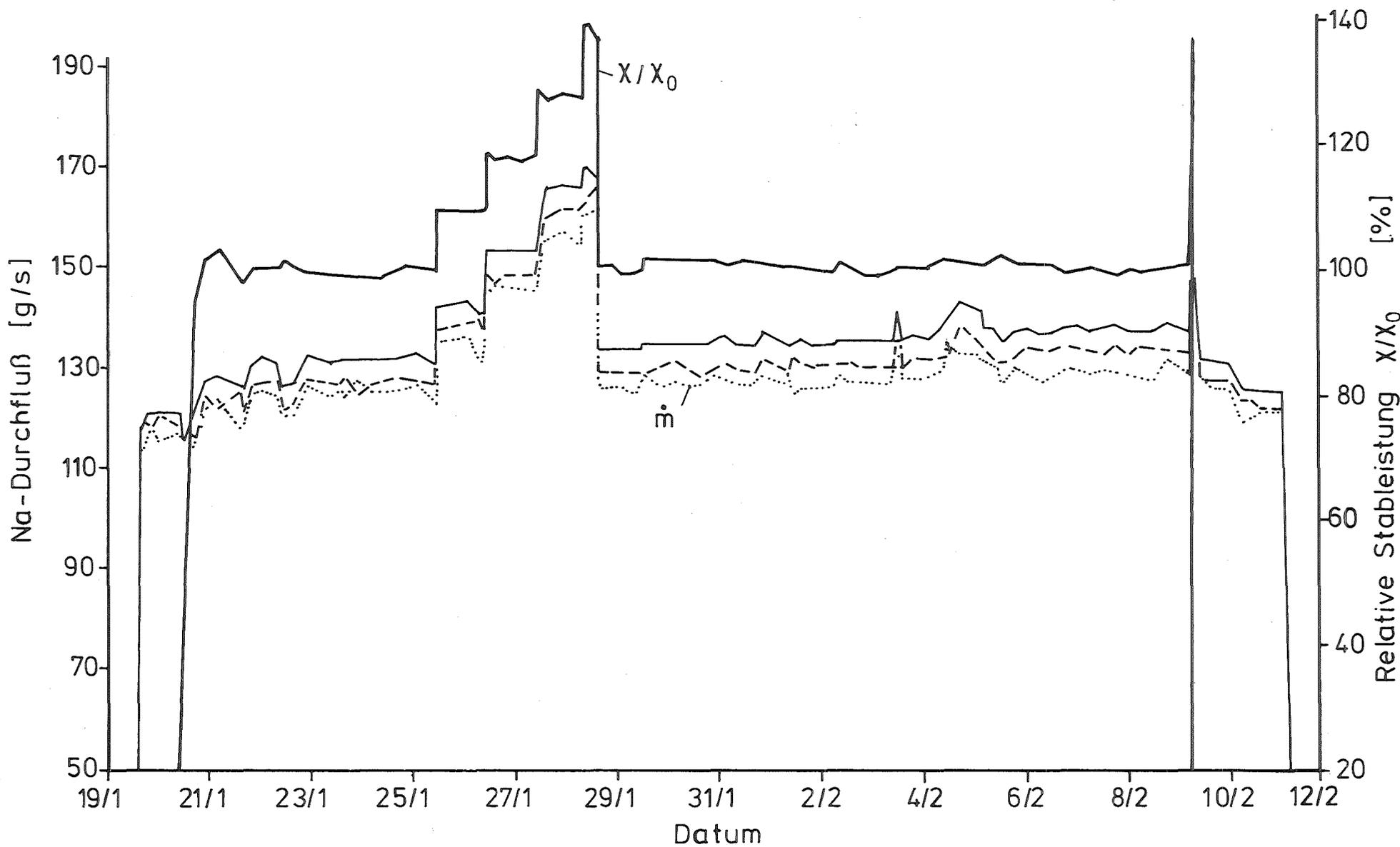


Abb. 14 Mol 18-1A1 Na-Durchfluß und relative Stableistung im Zyklus 1/82

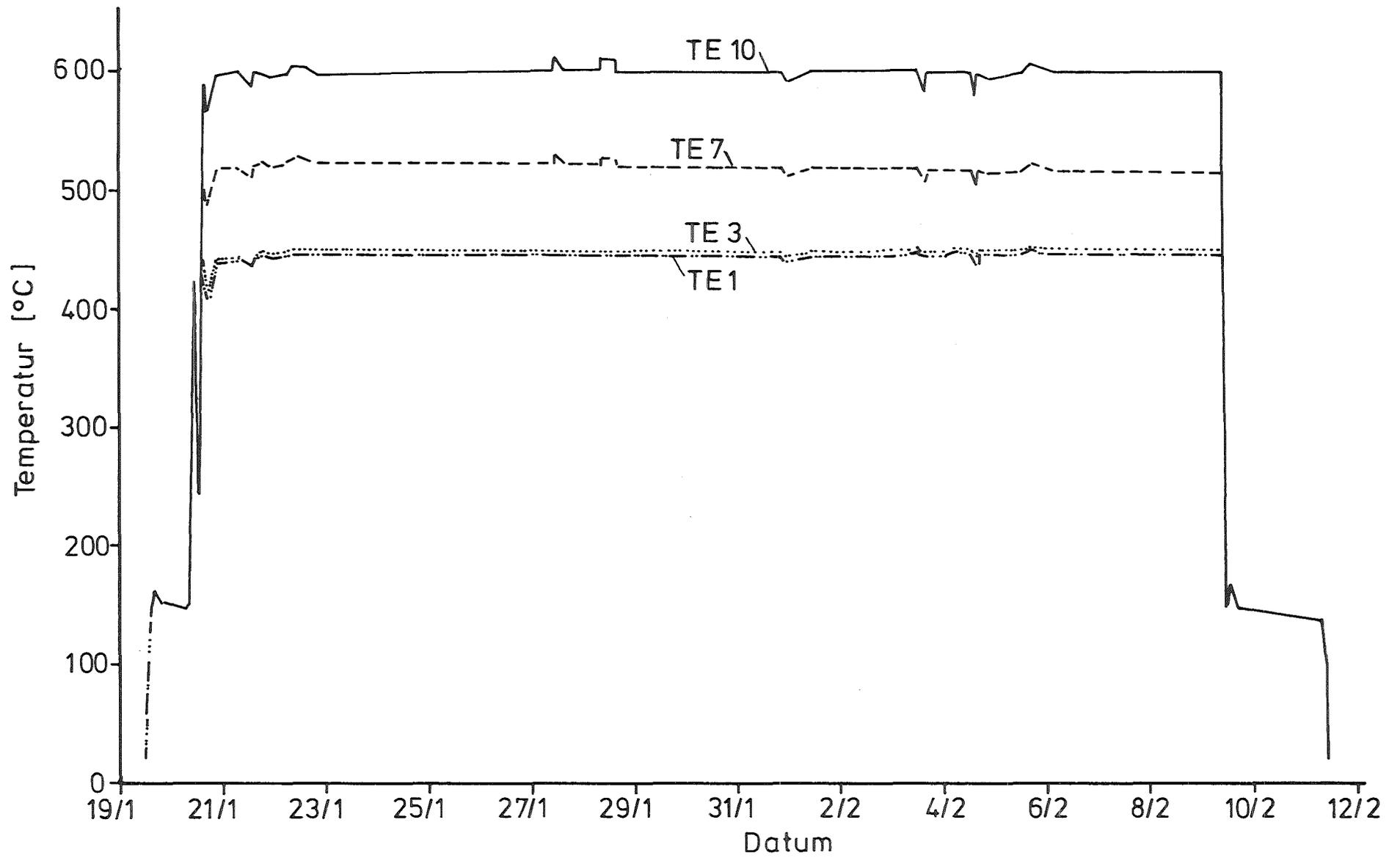


Abb. 15 Mol 18-1A1 Temperaturverlauf im Zyklus 1/82

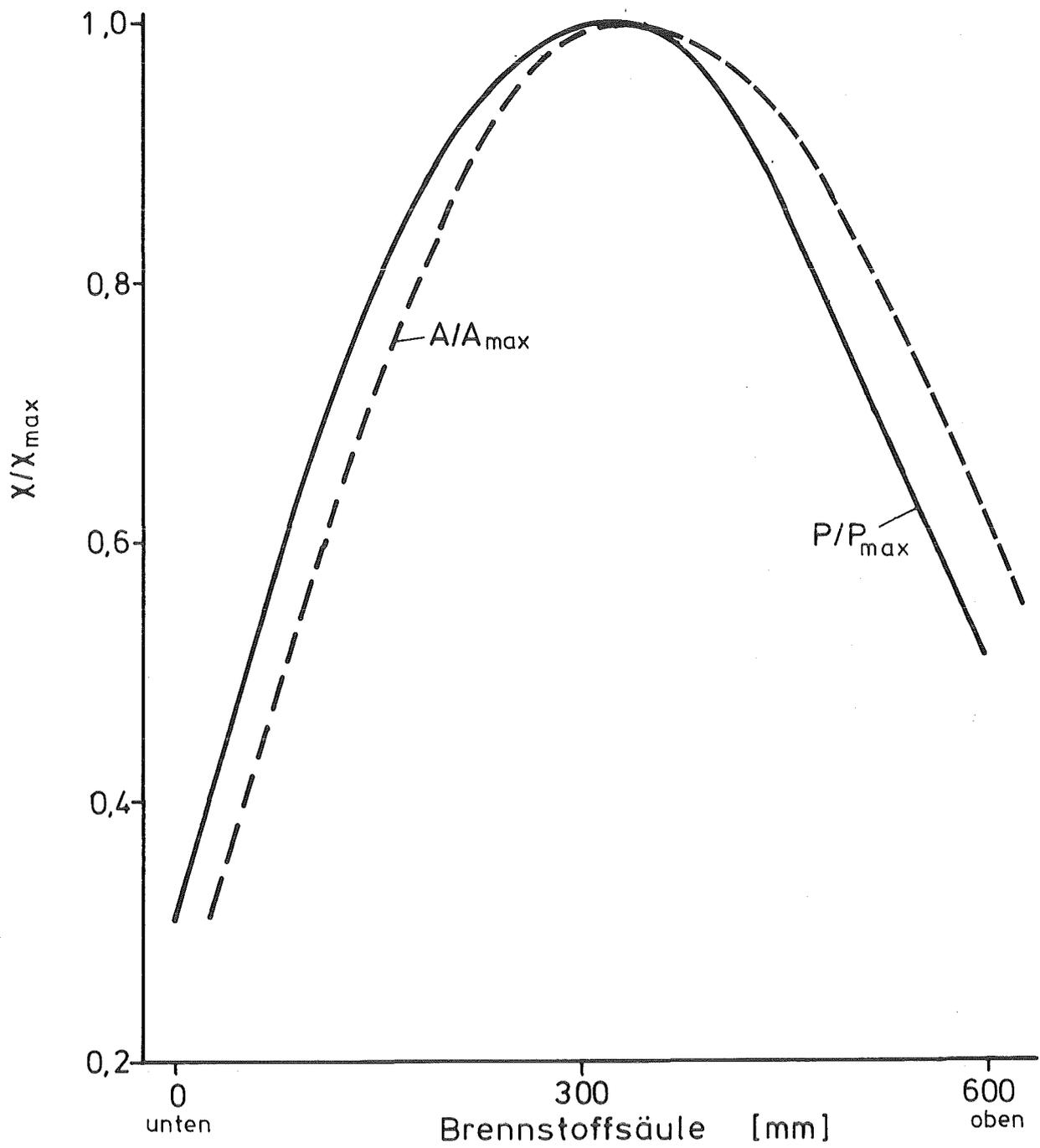


Abb. 16 Mol 18-1A1 Axiales Leistungsprofil

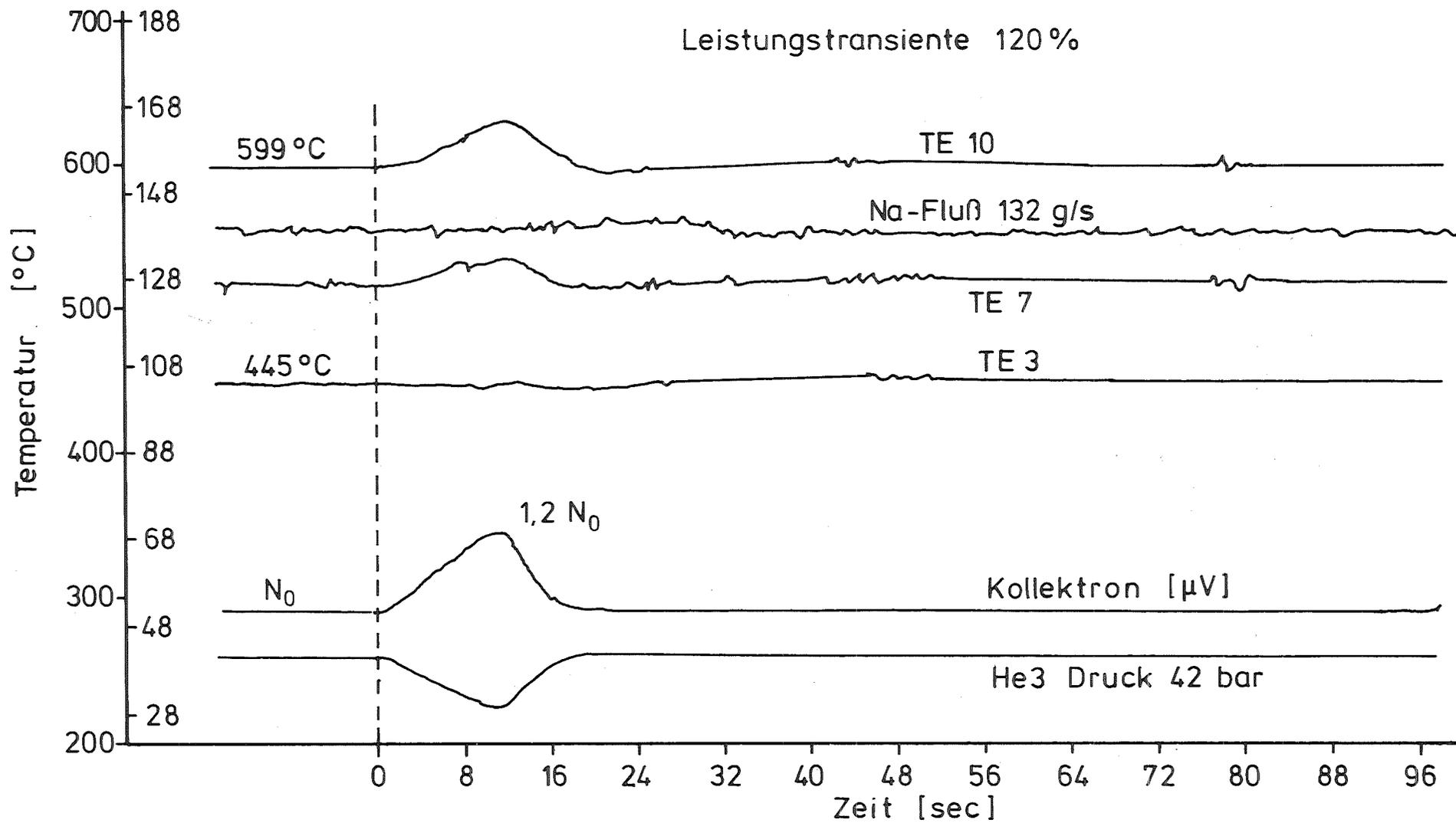


Abb. 17 Mol 18-1A1 Thermoelement (TE)-, Kollektor- und He3- Drucksignale bei 1. Transienten

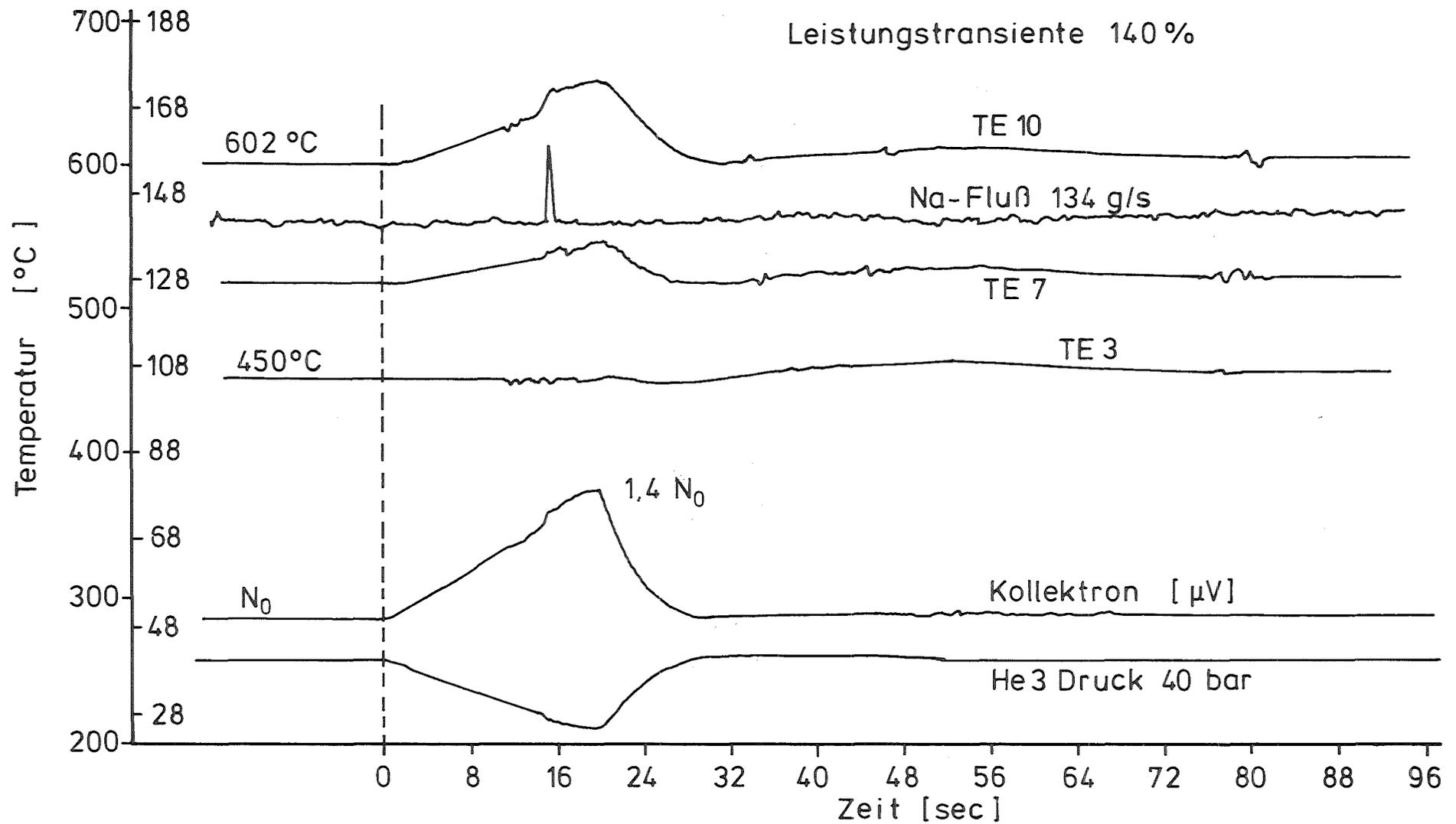


Abb. 18 Mol 18-1A1 Thermoelement (TE)-, Kollektor- und He3-Drucksignale bei 2. Transienten

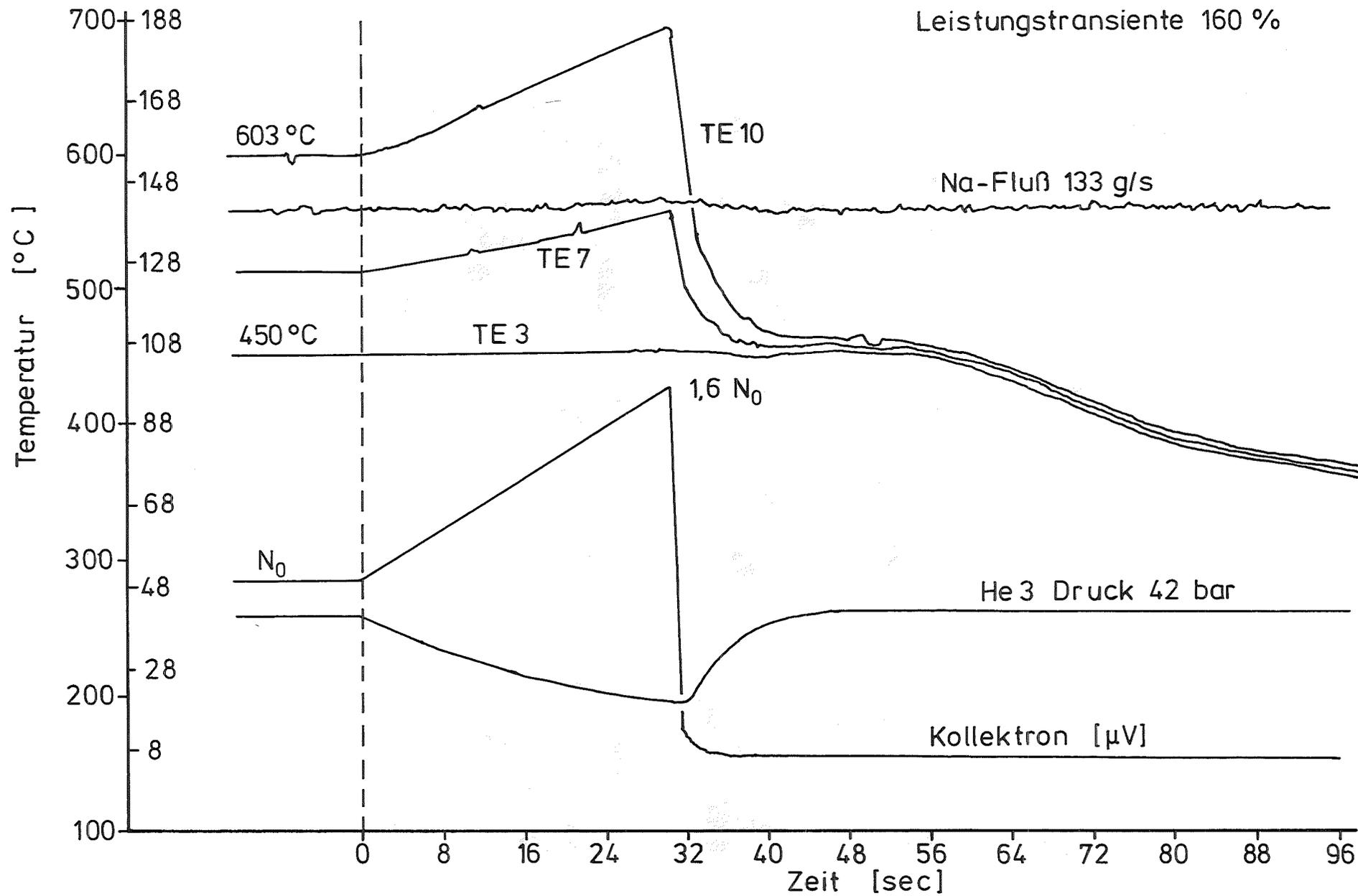


Abb. 19 Mol 18 -1A1 Thermoelement (TE)-, Kollektion- und He3-Drucksignale bei 3. Transienten

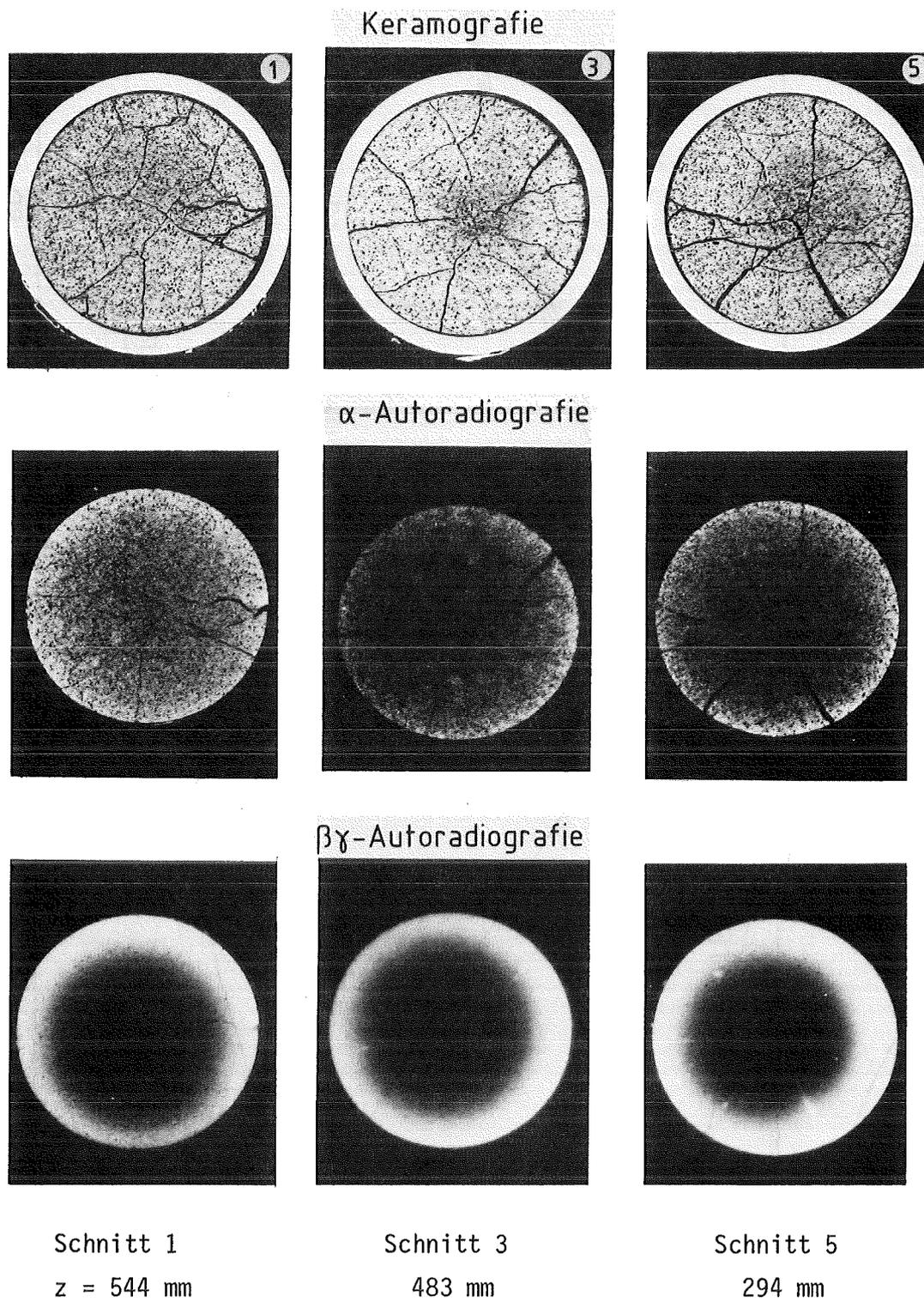


Abb. 20: Mo1-18/1A1
Keramografie und Autoradiografien der drei Querschliffe

Brennstoffzentrum

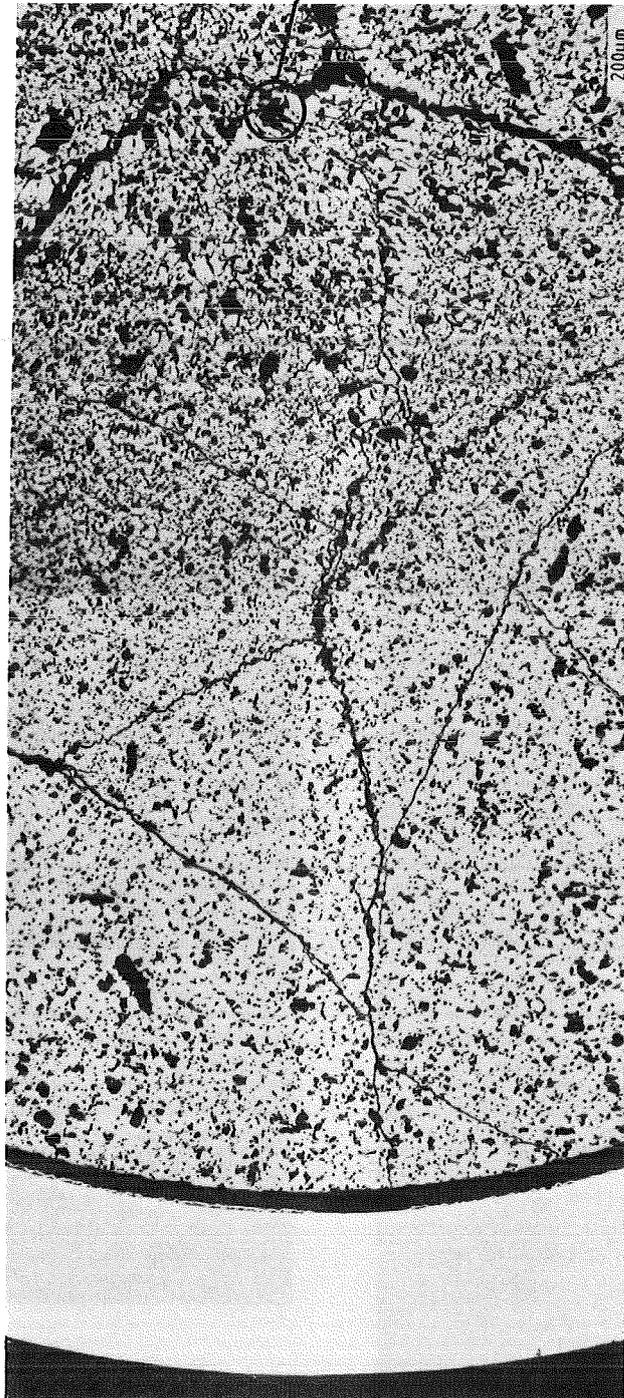


Abb. 21: Mo1-18/1A1
Keramografie Probe 5 (z = 294 mm)

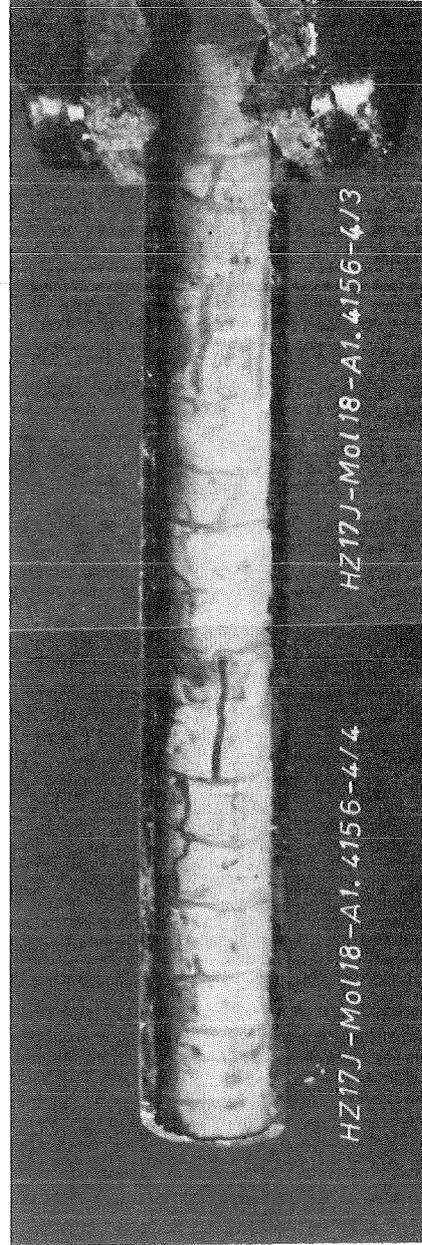
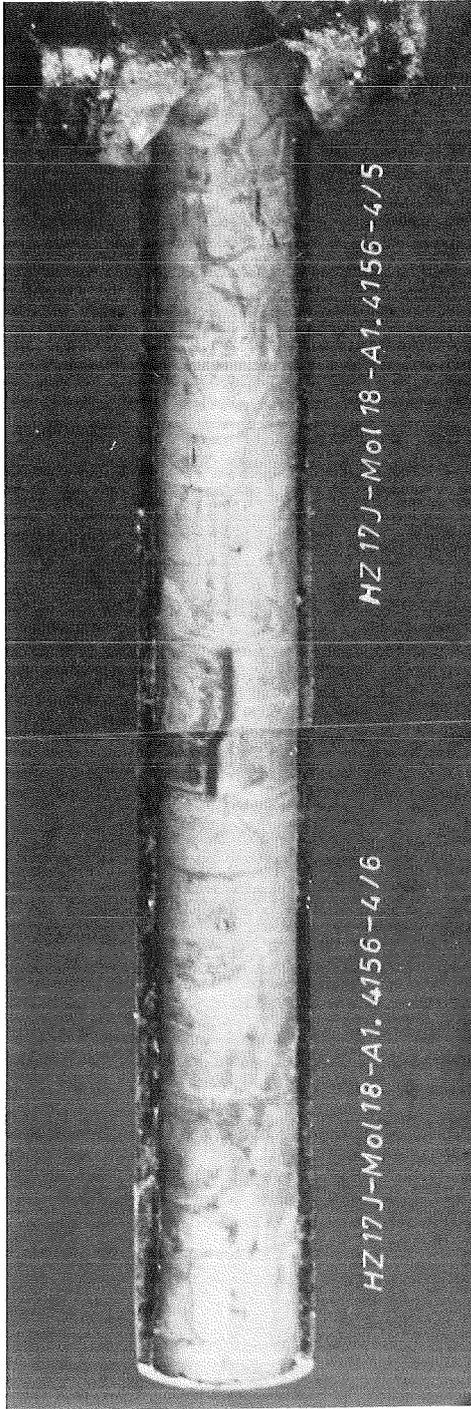


Abb. 22: MoI-18/1A1

Inspektion der Hüllrohr-Innenfläche

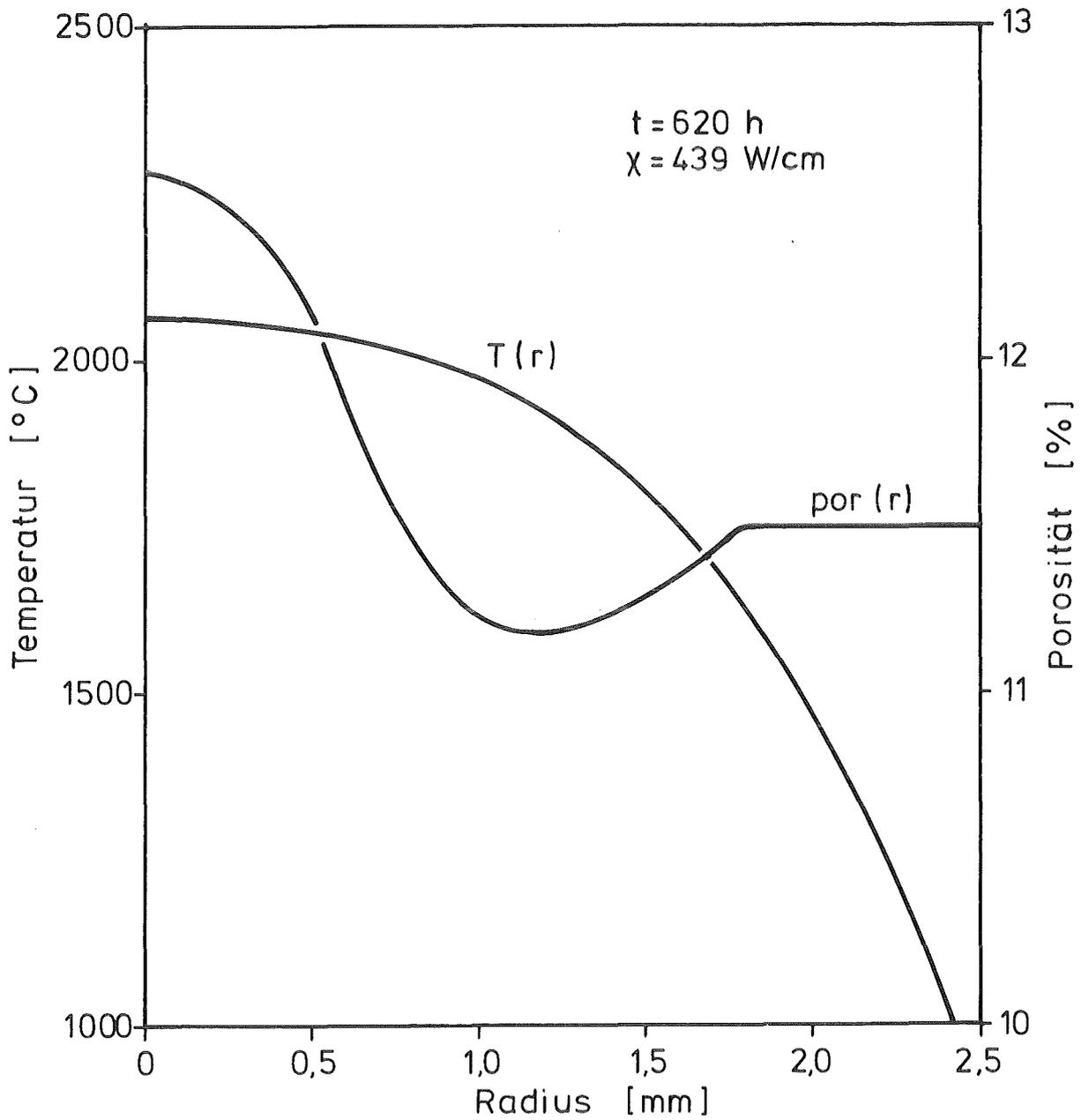


Abb. 23 Mol 18-1A1 Temperatur- und Porositätsprofil nach Rampe 4 (Heiße Ebene)