

KfK 3345  
Dezember 1982

# **In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverlust-Störfall**

**Bericht über die Versuchsserie E**

L. Sepold, E. H. Karb, M. Prüßmann  
Hauptabteilung Ingenieurtechnik  
Projekt Nukleare Sicherheit

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK

PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3345

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten  
beim Kühlmittelverlust-Störfall  
Bericht über die Versuchsserie E

---

L. Sepold  
E.H. Karb  
M. Prüßmann

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003



## Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse der Versuchsserie E innerhalb der In-pile-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten. Die In-pile-Versuche sind Bestandteil der LWR-Brennstabverhaltens-Programms des Projektes Nukleare Sicherheit (PNS). Die Experimente wurden im DK-Kreislauf des FR2-Reaktors im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) durchgeführt.

Mit den In-pile-Versuchen, in denen die 2. Aufheizphase eines Kühlmittelverlust-Störfalles simuliert wurde, sollte der Einfluß nuklearer Kenngrößen auf die Mechanismen des Brennstabversagens unter LOCA- (Loss-of-Coolant Accident) Bedingungen untersucht werden.

Als Versuchsstäbe wurden Prüflinge mit einer aktiven Brennstofflänge von 50 cm und radialen Abmessungen verwendet, die denen von Stäben kommerzieller Druckwasserreaktoren (DWR) entsprechen. Es wurden Versuche sowohl mit unbestrahlten als auch mit vorbestrahlten Prüflingen durchgeführt. Hauptparameter des Versuchsprogrammes war der Abbrand, der von 2500 bis 35000 MWd/t variiert wurde. Die Stäbe wurden in den Versuchen mit Innendrücken beaufschlagt, die typisch für DWR-Brennstäbe sind.

Die Versuchsreihe E bestand aus fünf Einzelstab-Versuchen, die mit vorbestrahlten Prüflingen vom 20.2. bis 4.3.1980 durchgeführt wurden. Der Nominalabbrand der Stäbe betrug 8000 MWd/t. Als Ausgangswerte für die Transienten wurden Innendrücke von 26 bis 128 bar (warm) eingestellt. Die fünf Einzelstäbe barsten während der Aufheizphase, die Berstdrücke betragen 23, 113, 50, 72 bzw. 19 bar, die Bersttemperaturen 910, 708, 860, 781 bzw. 856 °C (in der Reihenfolge der Versuche E1, E2, E3, E4 und E5). Die größten Umfangsdehnungen betragen 30, 46, 31, 55 und 67 %.

Im Unterschied zu den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen /12/ zeigten die E-Versuchsstäbe, wie auch die Stäbe der Serien F /9/, G1 /10/, G2/3 /11/, C /13/, nach dem Bersten eine Schüttung von zerteilten Brennstofftabletten im Bereich der Hüllrohraufweitung: Der durch das Aufblähen der Hülle zusätzlich entstandene Raum für den Brennstoff füllte sich mit Bruchstücken der während der Vorbestrahlung schon zersprungenen Pellets. Durch Nachrutschen von Brennstoff entstanden so z.T. ausgeprägte Verkürzungen der Pelletsäule.

Hinsichtlich der Berstdaten lassen sich bei den E-Versuchen keine Besonderheiten gegenüber den Versuchen mit unbestrahlten Prüflingen /12/ erkennen.

Dieser Bericht dokumentiert die Nominal- und die gemessenen Daten der Prüflinge, die wichtigsten Meßwerte der Transientenversuche einschließlich des jeweils vorangegangenen Stationärbetriebes sowie die Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchungen. Über die metallografische Nachuntersuchung der Prüflinge wird vom Institut für Material- und Festkörperforschung berichtet.

In-pile Experiments on Fuel Rod Behavior During a LOCA.  
Test Results Report on the Test Series E

---

Summary

This report describes the results of the Test Series E Tests E1 through E5, within the in-pile experimental program for the investigation of LWR fuel rod behavior. The results were obtained with single rods in the DK loop of the FR2 reactor at the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). The research was part of the Nuclear Safety Project's (PNS) fuel behavior program. The main objective of the FR2-LOCA tests was to provide information about the effects of a nuclear environment on the mechanisms of fuel rod failure in the second heatup phase of a LOCA (Loss-of-Coolant Accident).

The test rods had a heated length of 50 cm, and their radial dimensions were identical with those of a commercial German PWR (Pressurized Water Reactor). The tests were performed with unirradiated as well as with previously irradiated rods. The main parameter of the FR2 In-pile Test Program was the burnup, ranging from 2500 to 35000 MWd/t. The test rods were filled with helium to internal pressures representing the range of PWR rod pressures.

The E tests were performed from Febr. 20, 1980 to March 4, 1980. The nominal burnup of the test rods was 8.000 MWd/t. The test rods were pressurized with helium to hot internal pressures between 26 and 128 bar and were subjected to rod linear heat generation rates between 41 and 45 W/cm (derived from heatup rates at 650 °C).

The test rods burst during the heatup phase at pressures of 23, 113, 50, 72, and 19 bar, respectively. The burst temperatures were determined to be 910, 708, 860, 781 and 856 °C for tests E1 through E5. The maximum total circumferential elongations amount to 30, 46, 31, 55 and 67 %, respectively.

The E tests - like the previous tests with irradiated specimens /9/, /10/, /11/, /13/ - showed cracked fuel after the irradiation (prior to the transients) and a fragmentation of fuel pellets after the transient tests due to cladding ballooning. The posttest results indicated a reduction of the pellets stack length of the test rods caused by a redistribution of the fuel in the sections of major deformation.

The burst data of the E tests did not reveal any systematic difference between tests with unirradiated fuel rods /12/ and the irradiated fuel rods of this test series.

This report documents the nominal and actual data of the test rods, the data recorded during the transient and steady-state operation, and the results of the non-destructive posttest examinations.

Results of the destructive posttest examinations (metallography) will be reported by the Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF, Institute for Materials and Solid State Research) at KfK.

	<u>Seite</u>
<u>Inhaltsverzeichnis</u>	
1. Einführung	1
1.1 Berichtsziel	1
1.2 Versuchsziele	1
1.3 Versuchsprogramm	2
2. Versuchsvorbereitung	4
2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge	4
2.2 Stabmontage	6
2.3 Neutronenradiografie	7
3. Prüflingsdaten	8
3.1 Allgemeine Daten	8
3.2 Daten der Prüflinge für die E-Versuchsserie	10
4. Versuchsablauf	10
5. Versuchsdaten	18
5.1 Messung der Versuchsdaten	18
5.2 Kühlmitteldaten	20
5.3 Prüflingsleistung	21
5.4 Prüflingsinnendruck	24
5.5 Hüllrohrtemperaturen	25
5.6 Temperaturanstieg der Hülle	29
6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen	29
6.1 Durchstrahlungen der Stäbe	29
6.2 Fotodokumentation	32
6.3 Vermessung der Prüflinge	32
7. Brennstoffzustand und -verhalten	42
8. Literatur	45
Abbildungen	47
Anhang I: Meßwerte vor Auslösung der Transienten	155
Anhang II: Schnittpläne für die Probenherstellung in den Heißen Zellen, Versuch E1 bis E6	161

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
1. Vorbestrahlungseinsatz, vereinfacht	47
2.1 Axiale Abbrandverteilung im Brennstab E6	48
2.2 Axiale Abbrandverteilung C6, E6, F6, G1.6, G3.6	49
3. Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung, Bündel E	50
4. Zur Messung des Stabinnendrucks	51
5. Nuklearprüfling vereinfacht	52
6.1- Durchmesserabmaße und Einfüllspiel, 6.5 Versuche E1 bis E5	53 - 57
7. DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislauf- schema	58
8. Versuchsablauf, Schema	59
9. Cladding Thermocouple (Schematic)	60
10.1- Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil 10.5 Versuche E1 bis E5	61 - 65
11. In-pile-Versuche E, Prüflingsleistungen NA und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente	66
12.1- Normierte Axialprofile am Prüfling, 12.5 Versuche E1 bis E5	67 - 71
13.1- Druck im Prüflingsplenum, 13.5 Versuche E1 bis E5	72 - 76
14. Schema der Definition von Bersttemperatur und Berstdruck	77
15.1- Axiales Temperaturprofil, 15.5 Versuche E1 bis E5	78 - 82
16.1- Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136, 16.5 im Versuch E1 bis E5	83 - 87
17. Temperature and internal pressure histories, Test E4	88
18. Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900 °C (Transiente)	89

19.	FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam, Burst Temperature vs, Burst Pressure	90
20.	Axial Temperature Profiles at the Upper End of Fuel Stack	91
21.	Cladding Temperature and Pressure Histories During Test E5	92
22.	Neutronenradiografie E5 vor Versuch	93
23.1- 27.3	Neutronenradiografie und Winkellagen nach Versuch, Test E1 bis E5	94 - 108
28.	E5 Fuel Rod Posttest Neutron Radiograph	109
29.- 33.	View of the Ruptured Zone, Test E1 - E5	110 - 114
34.- 37.	Views of the Ruptured Zone, Test E1 - E4	115 - 118
38.	Views of the Cladding Failure Region, Test E5	119
39.	FR2 In-pile Tests Cladding Length Change vs. Burst Temperature	120
40.1- 40.5	Circumferential Cladding Thickness Distribution (as-Received) Presented as Differences from the Nominal 0,725 mm, Test E1 - E5	121 - 125
41.	Circumferential Strain and Axial Power Profiles of the Tests E1 through E5	126
42.1- 42.5	Axial Profile of Circumferential Strain Tests E1 - E5	127 - 131
43.	Typical spiral profile; posttest measured rod diameters of test A 2.2	132
44.1	Versuch E1, Polarmessung 1 (102 mm von UKF)	133
44.2	Versuch E1, Polarmessung 2 (179 mm von UKF)	134
45.1	Versuch E2, Polarmessung 1 (116 mm von UKF)	135
45.2	Versuch E2, Polarmessung 2 (146 mm von UKF)	136
46.1	Versuch E3, Polarmessung 1 (304 mm von UKF)	137
46.2	Versuch E3, Polarmessung 2 (325 mm von UKF)	138
47.1	Versuch E4, Polarmessung 1 ( 93 mm von UKF)	139
47.2	Versuch E4, Polarmessung 2 (131 mm von UKF)	140

48.1	Versuch E5, Polarmessung 1 (44 mm von UKF)	141
48.2	Versuch E5, Polarmessung 2 (89 mm von UKF)	142
49.1-	FR2 In-Pile Tests E1 through E5	143 - 147
49.5	Cross Section, Max. Circumferential Strain	
50.	FR2 In-Pile Tests Max. Circumferential Strain vs. Burst Temperature	148
51.	FR2 In-Pile Tests, Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	149
52.	FR2 In-Pile Tests, Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop	150
53.1	Cross Section of the E6 Fuel Rod	151
53.2	Longitudinal Section of the E6 Fuel Rod	152
54.	View of the Fuel Condition of the E6 Fuel Rod	153
55.	FR2 In-Pile Tests, Series E Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses	154

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	<u>Seite</u>
1. In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten, Test Matrix	3
2. Nominal Test Fuel-Rod Data	9
3. Gemessene Prüflingsdaten der E-Stäbe	11
4.1- 4.5 Daten der Versuche E1 bis E5	13 - 17
5. Anordnung der Hüll-TE in den Versuchen E1 bis E5	19
6. Kühlmitteldaten der E-Versuche	20
7. Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe E	26
8. Hülltemperaturgradienten an den Berststellen, Versuche E1 bis E5	29
9. Längenänderung der Brennstoffsäule durch die E-Versuche	31
10. Längenänderung und Rißlage der E-Stäbe	32
11. Circumferential Strain Data from Rod Diameter Measurement, E1 through E5	35
12. Ovalität im Beulbereich der E-Versuchsstäbe	37
13. Umfangsdehnung im Beulbereich der E-Versuchsstäbe	37
14. Exzentrizität der Beule bei den E-Versuchsstäben	38
15. Krümmung der E-Versuchsstäbe	38
16.1- 16.5 Tabelle der Meßwerte vor Auslösung der Transienten, E1 bis E5 (Anhang I)	156-160

## 1. Einführung

### 1.1 Berichtsziel

Neben einer generellen Beschreibung des Versuchsprogramms, der Prüflinge und der Versuchsdurchführung dient der vorliegende Bericht der Dokumentation der Soll- und Ist-Daten der ungebauten Prüflinge der Serie E, der während der Transientenversuche gemessenen Daten und der Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchung in den heißen Zellen. Aus dem Komplex der zerstörenden Nachuntersuchungen wird lediglich auf die Querschnitte der Stabhülle im Beulbereich zur Bestimmung der Umfangsdehnung eingegangen und mit Bildern des Stabes E 6 der Brennstoffzustand nach der Bestrahlung (vor der Transiente) dokumentiert.

Die Ergebnisse der zerstörenden Nachuntersuchung der Prüflinge werden vom Institut für Material- und Festkörperforschung erarbeitet.

### 1.2 Versuchsziele

Zur Untersuchung des Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverluststörfällen in Leichtwasserreaktoren werden im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit theoretische und experimentelle Arbeiten durchgeführt. Mit den hier behandelten In-pile-Versuchen im DK-Loop des FR2-Reaktors soll festgestellt werden, ob und wie die in Out-of-pile-Versuchen nicht simulierbaren nuklearen Parameter die Mechanismen des Brennstabversagens beeinflussen /1/ und /2/.

Zu diesem Zweck werden einerseits nuklear beheizte Brennstabprüflinge, andererseits elektrisch beheizte Referenzstäbe durch Kühlungsunterbrechung gezielten Temperaturtransienten unterzogen, in denen die 2. Aufheizphase eines Kühlmittelverluststörfalles simuliert wird.

Mit der hier behandelten Versuchsserie E sollte das Verhalten von vorbestrahlten Prüflingen untersucht werden. Von den sechs bis zu einem Abbrand von 8.000 MWd/t bestrahlten Stäben E 1 bis E 6 waren fünf einer Transiente auszusetzen, der Stab E 6 für die radiochemische Abbrandbestimmung sowie zur Untersuchung des Brennstoffzustandes nach der Bestrahlung zu verwenden.

### 1.3 Versuchsprogramm

Die Versuche werden mit verkürzten Einzelstäben (DWR-Abmessungen) durchgeführt. Sie erstrecken sich auf den Abschnitt des Kühlmittelverlust-Störfalls, für den Brennstabversagen als am wahrscheinlichsten betrachtet wird: auf die dem Blow-down folgende sog. zweite Aufheizphase.

Da die nuklearen Parameter, deren Einfluß hier untersucht wird, zumeist selbst stark vom Abbrand abhängen, wird dieser als Haupteinflußgröße variiert. Tabelle 1 zeigt die Test-Matrix:

Einer Reihe sog. Kalibrier- und Scoping-Tests (Gruppe A) folgt eine Versuchsreihe mit unbestrahlten Prüflingen, bei der der Innendruck Hauptparameter ist (Gruppe B).

Bei den vorbestrahlten Prüflingen (Versuchsgruppe C bis G) werden Abbrand und Innendruck variiert, wobei die angegebenen Druckbereiche in Anlehnung an (konservative) Berechnungen für deutsche DWR der 1300 MW<sub>e</sub>-Klasse gewählt wurden.

TABLE 1

FR2 IN-PILE TESTS ON FUEL BEHAVIOR, TEST MATRIX

Type of Test	Test-Group	Number of Rods Irradiated	Nominal Gap Size μm	Number of Tests	Target Burnup MWd/t <sub>U</sub>	Range of Internal Pressure at Steady State Temperature bar
I Calibration, Scoping	A	-	190	5	-	25 - 100
Unirradiated Rods						
II (Main Parameter: Internal Pressure)	B1	-	190	7	0	55 - 90
	B3	-	150	2	0	
Irradiated Rods	C	6	190	5	2500	25 - 110
	D	6	190	-	5000	cancelled
III (Main Parameter: Burnup)	E	6	190	5	8000	25 - 120
	F	6	190	5	20000	45 - 85
	G1	6	150	5	35000	50 - 90
	G2	2	190	2	35000	60 - 125
	G3	4	150	3	35000	

## 2. Versuchsvorbereitung

### 2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge

Die Vorbestrahlung der Prüflinge bis zu den gewünschten Abbrandstufen erfolgte in vertikalen Positionen des FR2. Für die Vorbestrahlungseinsätze wurde in Anlehnung an den Aufbau von FR2-Brennelementen eine hexagonale Anordnung gewählt, die es erlaubt, Vorbestrahlungsbündel zu je 6 Stäben (siehe Abb. 1) in Brennelement- bzw. Zwischengitterpositionen einzusetzen, in gleicher Weise wie die Brennelemente zu kühlen und zu überwachen.

Die im Vorbestrahlungseinsatz eingebaute Meßeinrichtung für Kühlmitteldurchsatz und -temperaturen dient der Bestimmung der aktuellen Stableistung und des erzielten Abbrandes.

Die Zielabbrände der einzelnen Stabbündel können aus der Testmatrix ersehen werden. Die Stäbe G2 und G3 wurden in einem Vorbestrahlungsbündel zusammengefaßt und miteinander bestrahlt.

Die Einsätze für die höheren Zielabbrände wurden mit Abnahme des Spaltstoffinventars nach Bedarf auf Reaktorpositionen höherer Neutronenflußdichte umgesetzt, um wieder in einen akzeptablen Leistungsbereich zu kommen.

Als Grundlage der angegebenen Abbrandwerte dienten die kalorimetrisch ermittelten Leistungen des Einsatzes. Als Endabbrand ergab sich daraus für die Serie E ein Wert von 7900 MWd/t. Der entsprechende Wert aus der radiochemischen Abbrandanalyse des Stabes E 6 beträgt als axialer Mittelwert 0,88 at-% /4/ (siehe Abb. 2.1), das entspricht 8000 MWd/t ( $1 \text{ at-\%} \cong 9130 \text{ MWd/t}$ ). Dieser Abbrand wird als gleich für alle sechs bestrahlten Stäbe angesehen. Das axiale Abbrandprofil beruht auf fünf

axialen Abbrandproben, die radiochemisch untersucht wurden. Abb. 2.2 zeigt das Abbrandprofil des Stabe E 6 zusammen mit den Profilen der Stäbe C 6, F 6, G 1.6 und G 3.6.

Der FR2 hat als Versuchsreaktor zwangsläufig eine andere Betriebsweise und auch andere Betriebsdaten als ein Leistungsreaktor:

- Der Leistungsreaktor wird bis zum Erreichen eines Abbrandes von ca. 35 GWd/t<sub>U</sub> nur zwei- bis dreimal gezielt abgeschaltet. Die Vorbestrahlungsbündel im FR2 erleben dagegen aus verschiedenen Gründen eine ganze Reihe von Abschaltungen, die häufig mit Umladungen von Brennelementen und damit auch mit Leistungsänderungen verbunden sind. Während der Bestrahlungszeit (133 d) des E-Bündels wurde der Reaktor 12 mal abgeschaltet (Abb. 3).
- Kühlmitteldruck und -temperatur liegen im FR2 niedriger als im DWR (FR2: 2,4 bar und 58 °C, DWR: 155 bar und 315 °C als mittlerer Wert zwischen Eintritt und Austritt).
- Die äußere Hüllwandtemperatur des DWR-Stabes liegt um 200 bis 300 K höher als die des FR2-Versuchsstabes.
- Da der Helium-Einfülldruck des FR2-Versuchsstabes zu 3 bar festgelegt wurde (DWR: 22,5 bar bei Raumtemperatur), ist im Gegensatz zum DWR-Stab der Stabinnendruck des FR2-Versuchsstabes während der ganzen Vorbestrahlungszeit geringfügig höher als der Kühlmitteldruck.

## 2.2 Stabmontage

Nach der Bestrahlung wird das Vorbestrahlungsbündel in eine Abschirmposition im Brennelement- (BE)-Lager eingesetzt. Dort wird zunächst eine Abklingzeit von  $\geq 20$  d abgewartet, die nach dem Sicherheitsbericht des Vorhabens notwendig ist, um bei Störfällen während der Montage die Aktivitätsabgabe in den zulässigen Grenzen zu halten.

Die Montage der Versuchsstäbe erfolgt in der Abschirmzelle des FR2. Die Stäbe werden einzeln aus dem Vorbestrahlungseinsatz entnommen. Ein Stab des Bündels wird abgezweigt und einer speziellen Nachuntersuchung zugeführt (z.B. radiochemische Bestimmung des Abbrandes, Messungen zum Abbrandprofil und Analyse der Spaltgase, Feststellungen zum Brennstoffzustand).

Die übrigen fünf Stäbe werden in der Zelle nacheinander mittels fernbedienbarer Vorrichtungen und Werkzeuge mit vorgefertigten Probenträgern gekoppelt. Dabei wird gleichzeitig das Plenum angestochen (s. Abb. 4), ohne daß Spaltgas entweichen kann. Durch das Anstechen wird das Plenum über eine Kapillare mit dem Druckaufnehmer am Kopf des Probenträgers verbunden. Der Plenumsdruck, der sich während der Vorbestrahlung eingestellt hat, wird ermittelt, die Dichtheit der Koppelstelle geprüft.

Die am Probenträger installierten Thermoelemente zur Messung der Hüllrohr-Versuchstemperaturen müssen in der Zelle auf die Stabhülle geschweißt werden. Hierzu wurde eine Spezialeinrichtung erstellt, die eine genaue Positionierung (Abweichung  $\leq 0,5$  mm) sowie ein zuverlässiges, fernbedientes Anpunkten gewährleistet.

Nach Komplettierung mit dem sogenannten inneren Dampfführungrohr ist der Prüfling (s. Abb. 5) einsatzbereit. Es folgt die neutronenradiografische Dokumentation des Zustandes nach der Vorbestrahlung, vor dem Versuch.

### 2.3 Neutronenradiografie

Zur Anfertigung von Durchstrahlungsaufnahmen steht am FR2 die Neutronenradiografie-Anlage (NERA) zur Verfügung.

Der Nuklearprüfling wird zuerst nach der Montage, dann nach dem Versuch in (axial überlappende) Teilaufnahmen radiografiert. Es wird also der Stab nach der Vorbestrahlung und nach dem Versuch vergleichbar dargestellt. Zwischen diesen Aufnahmen wird der Prüflingseinsatz zwar einige Male umgesetzt, bleibt jedoch stets in vertikaler Lage. Bei der nachfolgenden Handhabung, d.h. beim Transport und während der Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen, ist das nicht mehr der Fall. Infolgedessen sind für Aussagen zum Zustand der Brennstoffsäule vor und nach dem Versuch die NERA-Aufnahmen am ehesten geeignet.

An die Bildschärfe darf allerdings kein allzu hoher Maßstab angelegt werden. Hier sind die geometrischen Verhältnisse der Durchstrahlungsanordnung und das Streuverhalten der thermischen Neutronen zu berücksichtigen. Die Darstellung der Zry-Hülle erfolgt nur wenig kontrastreich, da Zirkonium einen geringen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen hat.

### 3. Prüflingsdaten

#### 3.1 Allgemeine Daten

Die nuklearen Prüflinge entsprechen in ihren radialen Abmessungen den Brennstäben deutscher DWR, die Länge der Prüflinge ist verkürzt auf 500 mm aktive Zone. Abb. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Prüflings in der Teststrecke.

Die wichtigsten Prüflingsdaten sind in Tab. 2 zusammengestellt, es handelt sich hier um die Sollwerte des kalten, unbestrahlten Stabs.

Die Ist-Werte der Hüllrohr- und Pelletabmessungen wurden im Verlauf der Stabfertigung festgehalten: Auf eine Länge von 200 mm in der Mitte der aktiven Zone (150 bis 350 mm von Unterkante Brennstoff) wurden mit Ultraschall-Methoden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle zugehörig gemessen, und zwar alle 18° azimuthal, alle 15 mm axial /3/. Aus den Meßwerten von Außendurchmesser und Wandstärke wurde der Innendurchmesser berechnet.

Auch die Pellets wurden im mittleren Abschnitt der aktiven Zone einzeln vermessen. Aus den Mittelwerten der Hülleninnen- und Pelletaußendurchmesser folgt das Einfüllspiel.

Außerhalb der genau vermessenen 200 mm wurden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle im Wendel-Durchlaufverfahren auf Einhaltung der Toleranzen geprüft. Es zeigte sich, daß die im mittleren Abschnitt gemessenen Absolutwerte und Streubreiten charakteristisch für die gesamte Stablänge sind.

Die Länge des Brennstabplenums wurde anhand von Röntgenaufnahmen der Versuchsstäbe im zusammengebauten Zustand ermittelt.

Table 2:

Nominal Test Fuel-Rod Data

---

Cladding	
Material	Zircaloy-4
Outside diameter, mm	10.75
Inside diameter, mm	9.3
Wall thickness, mm	0.725
Fuel pellets	
Material	UO <sub>2</sub>
Diameter (nominal gap), mm	9.11
Diameter (small gap), mm	9.15
Length, mm	11
Enrichment (active zone), %	4.7
Enrichment (end pellets), %	0.3
Height of pellet stack (active zone), mm	500
Density, g/cm <sup>3</sup>	10.35
Theoretical density, %	94.4
Insulating pellets	
Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diameter, mm	9.15
Length, mm	8
Void Volumes	
Dishing per pellet, mm <sup>3</sup>	16
Gap Volume (nominal gap), cm <sup>3</sup>	1.57
Total plenum volume (incl. pressure transducer), cm <sup>3</sup>	28.12
Fillgas composition	100% Helium

---

### 3.2 Daten der Prüflinge für die Versuchsserie E

Die verwendeten sechs Prüflinge haben die folgende Bezeichnung

Stab Nr. 44 → E 1  
Stab Nr. 45 → E 2  
Stab Nr. 46 → E 3  
Stab Nr. 47 → E 4  
Stab Nr. 48 → E 5  
Stab Nr. 49 → E 6 (Abbrandstab: keine Transiente,  
Untersuchung Abbrand usw.)

Die Prüflinge der E-Serie haben die Spaltweite "1", d.h. einen Nennwert des diametralen Einfüllspiels von 190  $\mu\text{m}$ .

Die wichtigsten gemessenen Prüflingsdaten der sechs Stäbe sind in Tabelle 3 zusammengefaßt; zusätzlich zeigen die Abb. 6.1 bis 6.5 die statistische Verteilung der gemessenen Hüllen- und Pelletdurchmesser, deren Mittelwerte sowie das daraus errechnete mittlere Einfüllspiel  $s_E$  für die in den Versuchen E 1 bis E 5 eingesetzten Stäbe.

### 4. Versuchsablauf

Wie bei der Montage der Versuchsstäbe ist auch beim Versuch selbst die Freisetzung von Spaltprodukten unerwünscht und soweit wie möglich zu vermeiden. Im Sicherheitskonzept des Experiments wurde für den Versuch eine Mindest-Abklingzeit nach der Vorbestrahlung von 56 Tagen festgelegt. Nach dieser Wartezeit wird der Prüfling bei abgeschaltetem Reaktor in das für den Betrieb mit schadhaften Prüflingen ausgelegte Dampf-Kontaminations-(DK)-Loop (siehe Abb. 7) eingebaut.

Der In-pile-Versuch beginnt mit einigen Stunden Stationärbetrieb zur Stabilisierung der Kreislaufeinstellung und der Reaktorleistung. Dabei sind das Absperrventil Ve 108 zwischen Überhitzer und In-pile-Strecke und das Regelventil Ve 111 offen, das Einspannventil Ve 128 ist geschlossen.

T a b e l l e 3: Gemessene Prüflingsdaten E-Stäbe

	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	
Brennstablänge (mm)	973,0	973,8	973,8	973,7	973,7	972,9	
Länge der aktiven Zone (mm)	496,7	496,7	497,1	497,4	496,8	497,2	
Länge des Brennstabplenums (mm)	314,0	314,0	313,0	313,0	313,5	313,0	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	16,10	16,14	16,10	16,10	16,12	16,10	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	0,750	0,750	0,745	0,750	0,754	0,759	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	1,531	1,606	1,656	1,641	1,615	1,664	
Hüllaußendurchmesser (mm)	max.	10,745	10,754	10,765	10,759	10,753	10,767
	mittel	10,739	10,745	10,755	10,752	10,746	10,756
	min.	10,733	10,736	10,749	10,746	10,738	10,750
Hüllinnendurchmesser (mm)	max.	9,305	9,314	9,321	9,317	9,313	9,320
	mittel	9,292	9,301	9,307	9,306	9,303	9,306
	min.	9,283	9,287	9,299	9,296	9,294	9,295
Wandstärke (mm)	max.	0,739	0,740	0,740	0,739	0,738	0,731
	mittel	0,723	0,722	0,724	0,723	0,722	0,725
	min.	0,705	0,705	0,709	0,707	0,704	0,719
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	10,42	10,43	10,43	10,42	10,42	10,45	
Tablettendurchmesser (mm)	max.	9,108	9,108	9,109	9,108	9,111	9,105
	mittel	9,105	9,105	9,105	9,106	9,106	9,103
	min.	9,103	9,103	9,102	9,105	9,104	9,101
mittleres diametrales Einfüllspiel (mm)(a)	0,187	0,196	0,202	0,200	0,197	0,203	

(a) aus Meßdaten berechnet

Der Kreislauf wird mit folgenden Daten betrieben:

Massenstrom:	100 - 140 kg/h
Druck:	60 bar
Dampf­temperatur am Eintritt zur Teststrecke:	280 - 340 °C

Während dieses Stationärbetriebes erfolgen u.a. Messungen der Flußdichteprofile in benachbarten Positionen zur sogenannten reaktorphysikalischen Bestimmung der Prüflingsleistung. Auch der Innendruck wird erst in dieser Phase endgültig eingestellt.

Zur Auslösung der Transiente wird bei konstanter Reaktor- und damit auch Prüflingsleistung das Absperrventil Ve 108 geschlossen und gleichzeitig das Entspannventil Ve 128 geöffnet. Damit wird der Kühldampfstrom unterbrochen - die Temperatur des Prüflings steigt an (siehe Abb. 8). Gleichzeitig sinkt der Druck im Kühlkanal rasch ab, da Enthitzer, Kondensator und Abgassystem weiterarbeiten.

Unabhängig davon, ob der Prüfling im Verlauf der Transiente platzt oder nicht, wird bei einer vorher bestimmten Hülltemperatur ( $\sim 920$  °C) die Prüflingsleistung durch Reaktorscram praktisch abgeschaltet. Die Hülltemperatur beginnt langsam zu sinken. Nach Erreichen einer weiteren Temperaturmarke ( $\sim 740$  °C) wird gleichzeitig der Kühldampfstrom wieder eingeschaltet; die Hülltemperatur sinkt schnell ab, ähnlich wie beim Abschrecken (Quenching) durch Flutung beim KVS im wirklichen Reaktor. Bei den fünf E-Versuchen wurde kein Quenching durchgeführt. Die beiden erwähnten Temperaturmarken ergeben sich aus dem nach /1/ angestrebten Referenztemperaturverlauf, dieser selbst in Anlehnung an eine für den heißesten Stab in einem DWR durchgeführte Berechnung.

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	11,0 MW				
FluBdichteformfaktor $\bar{\phi}_{Pr\ max}/\bar{\phi}_{Pr}$		1,047	Abbrand		8.000 MWd/t		
mittlere Stableistung	mittlere thermische		NTH	38,04 W/cm			
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		33,2	bis		45,0 W/cm	
	aus Aufheizung um 300 K		36,2	bis		46,0 W/cm	
Axialer Peaking-Faktor der Stableistung $N_{max}/\bar{N}$							
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		25,77			
Maximum		34,5		26,38			
bei Temperaturmaximum von T 131		59,5		14,92			
BERSTDRUCK		59,0		23,23 bar			
HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
MeBstelle	T	131	132	133	134	135	136
MeBebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		360	366	365	366	373	389
bei max. Innendruck nach 34,5 sec		802	805	806	801	783	752
rel. Maximum nach 59,5 bis 60,0 sec		904	919	930	919	887	846
beim Bersten nach 59,0 sec		900	915	923	916	884	842
abs. Maximum nach 98,5 bis 99,5 sec		920	970	999	976	942	879
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 900 + 10 K						910 °C	
BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie) 16,2 cm							
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 133 bei 395 °C nach 4,5 sec		20,6 K/s					
bei 650 °C T 131 bis T 136		8,8 bis 12,8 K/s					
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136		21,5 bis 27,2 sec					
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 133		58,8 sec					

KIK

IT-19 80  
PNS 4237-85.37

IN-PILE-VERSUCHE ZUM BRENNSTABVERSAGEN

DATEN DES VERSUCHS: E 1 VOM: 20.2.1980

Tabelle 4.1

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	10,4		MW		
Flußdichteformfaktor $\varnothing_{Pr, max} / \bar{\varnothing}_{Pr}$		1,045	Abbrand		8.000 MWd/t		
mittlere Stableistung	mittlere thermische		NTH	42,84		W/cm	
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		30,3	bis 42,6		W/cm	
	aus Aufheizung um 300 K		33,5	bis 45,6		W/cm	
Axialer Peaking-Faktor der Stableistung $N_{max} / \bar{N}$							
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		127,71			
Maximum		15,1		128,58			
bei Temperaturmaximum von T 131		27,2		120,53			
BERSTDRUCK		28,7		113,36 bar			
HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		362	370	375	368	367	369
bei max. Innendruck nach 15,1 sec		579	578	586	579	574	568
rel. Maximum nach 25,6 bis 29,3 sec		713	737	738	721	664	691
beim Bersten nach 28,7 sec		698	737	738	721	661	686
abs. Maximum nach 61,7 bis 75,9 sec		963	989	975	920	841	858
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 698 + 10 K						708 °C	
BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)						13,2 cm	
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 135 bei 410 °C nach 5,0 sec				21,3 K/s			
bei 650 °C T 131 bis T 136				7,8 bis 12,0 K/s			
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136				21,2 bis 29,3 sec			
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 132				58,6 sec			

KIK

IT-19 80  
PNS 4237-85.38

IN-PILE-VERSUCHE ZUM BRENNSTABVERSAGEN

Tabelle 4.2

DATEN DES VERSUCHS: E 2 VOM: 22.2.80

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	10,1		MW		
Flußdichteformfaktor $\varnothing_{Pr \max} / \varnothing_{Pr}$		1,040	Abbrand		8.000		MWd/t
mittlere Stableistung	mittlere thermische		NTH	37,01		W/cm	
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		38,8 bis 40,3		W/cm		
	aus Aufheizung um 300 K		43,0 bis 44,0		W/cm		
Axialer Peaking-Faktor der Stableistung $N_{\max} / \bar{N}$							
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		55,26			
Maximum		30,2		55,96			
bei Temperaturmaximum von T 133		47,4		49,48			
BERSTDRUCK		47,4		49,48 bar			
HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	133	135	137	138	139
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	30	40	48,2	48,8	49,4
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		365	379	367	378	379	380
bei max. Innendruck nach 30,2 sec		737	759	742	685	629	561
rel. Maximum nach 43,2 bis 47,9 sec		849	850	850	772	703	606
beim Bersten nach 47,4 sec		849	850	849	772	702	595
abs. Maximum nach 92,2 bis 100,1 sec		923	949	990	813	704	595
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 850 + 10 K					860 °C		
BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)						31,0 cm	
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T <sub>135</sub> bei 390 °C nach 4,0 sec				21,3 K/s			
bei 650 °C		T <sub>131</sub> bis T <sub>135</sub>		10,7 bis 11,2 K/s			
Dauer der Aufheizung um 300 K		T <sub>131</sub> bis T <sub>135</sub>		22,5 bis 22,9 sec			
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C		bei T <sub>135</sub>		66,1 sec			

KIK

IT-19 80  
PNS 4237-85. 39

IN-PILE-VERSUCHE ZUM BRENNSTABVERSAGEN

Tabelle 4.3

DATEN DES VERSUCHS: E 3 VOM: 26.2.1980

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	10,4		MW		
Flußdichteformfaktor $\varnothing_{Pr, max} / \varnothing_{Pr}$		1,046	Abbrand		8.000 MWd/t		
mittlere Stableistung	mittlere thermische		NTH	38,29		W/cm	
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		39,7 bis 43,0		W/cm		
	aus Aufheizung um 300 K		42,7 bis 46,0		W/cm		
Axialer Peaking-Faktor der Stableistung $N_{max} / \bar{N}$							
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		84,83			
Maximum		20,0		85,71			
bei Temperaturmaximum von T 131		35,0		71,88			
BERSTDRUCK		35,0		71,88 bar			
HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	133	135	137	138	139
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	30	40	48,2	48,8	49,4
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		362	375	380	375	367	358
bei max. Innendruck nach 20,0 sec		635	656	647	612	579	524
rel. Maximum nach 34,0 bis 35,5 sec		771	803	783	718	672	601
beim Bersten nach 35,0 sec		771	803	774	718	672	596
abs. Maximum nach 89,5 bis 134 sec		987	990	995	518	481	455
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 771 + 10 K					781 °C		
BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)					11,5 cm		
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 131 bei 400 °C nach 5,0 sec				21,8 K/s			
bei 650 °C T 131 bis T 135				11,0 bis 12,2 K/s			
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 135				21,6 bis 23,1 sec			
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135				63,6 sec			

KIK

IT-1980  
PNS 4237-85.40

IN-PILE-VERSUCHE ZUM BRENNSTABVERSAGEN

Tabelle 4.4

DATEN DES VERSUCHS: E 4 VOM: 29.2.1980

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	10,3		MW		
Flußdichteformfaktor $\varnothing_{Pr\ max} / \varnothing_{Pr}$		1,044	Abbrand		8.000		MWd/t
mittlere Stableistung	mittlere thermische		NTH	40,16		W/cm	
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		35,9	bis 43,0		W/cm	
	aus Aufheizung um 300 K		38,6	bis 43,5		W/cm	
Axialer Peaking-Faktor der Stableistung $N_{max} / \bar{N}$							
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		25,68			
Maximum		40,2		26,21			
bei Temperaturmaximum von T 131		55,9		24,55			
BERSTDRUCK		62,7		18,77 bar			
HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle		T	131	132	133	134	135 136
Meßebene in cm von UK Brennstoff			20	25	30	35	40 45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec			368	390	369	369	365 369
bei max. Innendruck nach 40,2 sec			833	847	840	838	815 791
rel. Maximum nach 55,9 bis 57,0 sec			922	921	-	902	899 -
beim Bersten nach 62,7 sec			846	868	870	878	869 576
abs. Maximum nach 56,5 bis 58,0 sec			923	923	916	905	899 875
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		846 + 10 K				856 °C	
BEULE Mitte von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)						10,0 cm	
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 134 bei 406 °C nach 4,6 sec						20,2 K/s	
bei 650 °C T 131 bis T 136						9,7 bis 12,1 K/s	
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136						22,5 bis 25,5 sec	
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 132						55,4 sec	



IT-1980  
PNS 4237-85.41a

IN-PILE-VERSUCHE ZUM BRENNSTABVERSAGEN

DATEI: DES VERSUCHS: E 5 VOM: 4.3.1980

Tabelle 4.5

## 5. Versuchsdaten

Die Tabellen 4.1 bis 4.5 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßdaten der Versuche E1 bis E5 und einige von den Meßwerten abgeleitete Daten. Die wesentlichen Meßdaten im Stationärbetrieb als Ausgangswerte für die Transiente sind im Anhang I (Tabelle 16.1 bis 16.5) aufgelistet.

### 5.1 Messung der Versuchsdaten

Der Stabinnendruck wird am kalten, oberen Ende des Prüflings kontinuierlich gemessen. Die Meßeinrichtung besteht aus einem Mikro-DMS-Druckaufnehmer, der über eine Kapillare von 1,6 mm Tichter Weite mit dem Plenum verbunden ist. Der Meßbereich des Druckaufnehmers beträgt 0 - 175 bar Überdruck.

An der Stabhülle wird - am Umfang und über die Stablänge verteilt - an sechs Stellen in der aktiven Zone die Temperatur gemessen. Zur Verwendung kommen Ni/CrNi-Thermoelemente 1 mm  $\emptyset$  mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platin-Hülse, da die direkte Schweißverbindung Inconel/Zry problematisch ist. Bei den Versuchen E wurde die Platinhülse der Thermoelemente ohne überstehenden Teil direkt aufgepunktet (Abb. 9, Version B). Die Anordnung der TE ist in Tabelle 5 angegeben. Der axiale Abstand zwischen zwei Meßstellen beträgt bei den Versuchen E1, E2 und E5 5 cm.

Um den Zeitpunkt der Brennstoffbewegung zu ermitteln, wurden die Teststäbe in den Versuchen E3 und E4 mit Hüll-Thermoelementen am oberen Stabende (T137 - T139) bestückt. Das oberste Thermoelement T139 ragt mit seinem Meßpunkt 2 mm von oben in die aktive Brennstoffzone hinein, für die Elemente T138 und T137 sind es entsprechend 8 bzw. 14 mm (siehe Abb. 17).

Tabelle 5:

## ANORDNUNG DER HÜLL-THERMOELEMENTE IN DEN VERSUCHEN E1 - E5

TE-Bez.	axiale Lage <sup>(a)</sup> (Soll-Maße)	axiale Lage (Ist-Maße) <sup>(b)</sup> und Umfangslage			TE-Bez.	axiale Lage (Soll-Maße)	axiale Lage (Ist-Maße) <sup>(b)</sup> und Umfangslage	
		E1	E2	E5			E3	E4
T 131	200 mm	197/206 <sup>0</sup>	198/73 <sup>0</sup>	199/20 <sup>0</sup>	T 131	200 mm	199/74 <sup>0</sup>	199/184 <sup>0</sup>
T 132	250 mm	247/146 <sup>0</sup>	248/13 <sup>0</sup>	249/320 <sup>0</sup>	T 133	300 mm	299/314 <sup>0</sup>	298/64 <sup>0</sup>
T 133	300 mm	299/86 <sup>0</sup>	299/313 <sup>0</sup>	299/260 <sup>0</sup>	T 135	400 mm	399/194 <sup>0</sup>	399/304 <sup>0</sup>
T 134	350 mm	349/26 <sup>0</sup>	349/253 <sup>0</sup>	349/200 <sup>0</sup>	T 137	482 mm	481/164 <sup>0</sup>	481/274 <sup>0</sup>
T 135	400 mm	399/326 <sup>0</sup>	399/193 <sup>0</sup>	399/140 <sup>0</sup>	T 138	488 mm	487/134 <sup>0</sup>	487/244 <sup>0</sup>
T 136	450 mm	449/266 <sup>0</sup>	449/133 <sup>0</sup>	449/80 <sup>0</sup>	T 139	494 mm	493/104 <sup>0</sup>	493/214 <sup>0</sup>

(a) Abstand von Unterkante aktiver Zone (UKF)

(b) Winkel von Nullmarkierung im Uhrzeigersinn bei Ansicht des Stabes von unten

Von den vielen Größen, die für den Betrieb des Versuchskreislaufs gemessen und verarbeitet werden, interessieren für die Auswertung vor allem Temperaturen, Druck und Massenstrom des Kühlmittels; sie werden zur Bestimmung der sog. thermischen Prüflingsleistung verwendet.

Alle Meßwerte werden digitalisiert, zur zentralen Anlage CALAS<sup>x)</sup> übertragen und auf Band gespeichert. Die Abfragefrequenz beträgt während der Transiente zwei Datensätze pro Sekunde, während des Stationärbetriebes zwei Datensätze pro Minute.

### 5.2 Kühlmitteldaten

Die Kühlmitteldaten in den Versuchen E1 bis E5 unmittelbar vor Auslösung der Transiente gibt Tabelle 6 wieder. Die Gesamtheit aller gemessenen Daten kurz vor Transientenbeginn ist in Anhang I, S.156 ff., eingetragen.

Tabelle 6: Kühlmitteldaten E-Versuche

Versuch	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5
Kühlmittleintrittstemperatur T115 (°C)	317	308	311	307	314
Kühlmittelaustrittstemperatur T116 (°C)	328	330	328	326	333
Kühlmitteldruck in der Teststrecke <sup>a)</sup> (bar)	56	53	53	53	59
Kühlmittelmengenstrom (kg/h)	117	111	114	110	116

a)  $\frac{1}{2}$  (P 60 + P 61)

<sup>x)</sup> Computer Aided Laboratory Automation System

### 5.3 Prüflingsleistung

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse, vor allem zur Nachrechnung des zeitlichen Temperaturverlaufes ist die Kenntnis der Prüflingsleistung erforderlich. Die Bestimmung der Leistung erfolgt mit mehreren Verfahren:

- Thermische Leistung
- Leistung aus Temperaturanstieg
- Reaktorphysikalische Leistung.

a) "Thermische Leistung NTH": Die Gesamtleistung des Prüflings wird durch Messung der Kühlmittelaufheizung im Stationärbetrieb bestimmt. Gemessen werden der Kühlmittelmassenstrom mittels Blende zwischen Prüfling und Enthitzer, die Kühlmitteltemperaturen T115 und T116 nach dem Prüfling mit Thermoelementen. Zur Bestimmung von Dichte  $\rho$  und spezifischer Wärme  $c_p$  des Kühlmittels werden dessen Temperatur und Druck vor und hinter der Teststrecke (T5/P60 und T6/P61) gemessen und gemittelt. Die angegebene "mittlere Thermische Leistung" NTH ist auf die aktive Prüflingslänge von 50 cm bezogen.

Alle zur Leistungsbestimmung erforderlichen Rechenoperationen werden on-line von der EDV-Anlage CALAS ausgeführt.

Die mittlere thermische Leistung ergab sich in den Versuchen E1 bis E5 zu

NTH = 38,0 W/cm (E1), 42,8 W/cm (E2), 37,0 W/cm (E3),  
38,3 W/cm (E4), bzw. 40,2 W/cm (E5)

b) "Leistung aus Temperaturanstieg NA": Diese Methode erlaubt nach dem Versuch eine Abschätzung der lokalen Stableistung an den Stellen, die mit Thermoelementen bestückt sind. Es wird der während der Transiente gemessene Verlauf der Hülltemperatur verglichen mit den gerechneten Anstiegswerten für

verschiedene Stableistungen<sup>a)</sup> und daraus auf die Stableistung geschlossen. Da die Vergleichsrechnungen für das glatte Hüllrohr erfolgten, muß der Einfluß der Thermoelementkabel nachträglich durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden: Die angeschweißten TE und die an einer Meßstelle vorbeiführenden Kabel der weiter unten angebrachten TE vergrößern die aufzuheizende Masse und die wärmeübertragende Oberfläche des Hüllrohres so, daß der Temperaturanstieg bei gleicher Leistung langsamer als am glatten Hüllrohr erfolgt. Nach /5/ muß bei idealem metallischen Kontakt die aus dem gemessenen Anstieg bestimmte Leistung um knapp 1 % pro TE-Kabel erhöht werden, beim obersten Thermoelement T136 insgesamt um 5 % (bei 30 - 50 W/cm). Da diese Zahlen nur mögliche Bereiche darstellen, sind alle NA-Werte in diesem Bericht nicht korrigiert.

Die Leistungen aus dem Temperaturanstieg für die E-Versuche sind in den Tabellen 4.1 bis 4.5 als Zahlenwertbereiche, in den Abbildungen 10.1 bis 10.5 für die einzelnen Positionen zusammen mit dem Profil der NTH aus Abb. 12.1 bis 12.5 angegeben. Die Streuung der aus dem Temperaturanstieg bestimmten Leistungswerte spiegelt die lokalen Unterschiede der Hüllrohrerwärmung azimuthal und des Kontakts zwischen Hülle und vorbeilaufenden TE-Kabeln wieder. Ein axiales Leistungsprofil läßt sich aus den Einzelwerten von NA nicht ableiten.

- c) "Reaktorphysikalische Leistung NKP": Mit der Annahme, daß die Prüflingsleistung proportional der Leistung entsprechender Abschnitte der die Teststrecke umgebenden Reaktor-brennelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brennelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Aufgrund der bei

---

a) Rechnungen des IKE Stuttgart mit WALHYD2D (D. Steiner)

allen E-Versuchen sehr ähnlichen Neutronenflußverhältnisse ergab sich hier die reaktorphysikalisch bestimmte max. Prüfungsleistung NKP als direkt proportional zur Brennelementgesamtleistung NBE:

$$NKP = k \cdot NBE$$

Der Faktor k ist außer von den Flußverhältnissen vor allem vom Abbrand abhängig, d.h. er fällt von Versuchsserie zu Versuchsserie verschieden aus. Für die E-Versuche wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

$$k = 0,47 [(W/cm)/kW] \text{ a)}$$

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA) liefert einen 36 % höheren k-Wert, nämlich 0,64 (W/cm)/kW. Beide k-Verläufe sind in Abb.11 eingetragen.

Axialer Leistungsverlauf: Der relative axiale Leistungsverlauf wird vor allem mit reaktorphysikalischen Methoden bestimmt. Dabei wird von der Tatsache ausgegangen, daß die lokale nukleare Leistung proportional der lokalen Spaltstoffkonzentration und der lokalen Flußdichte thermischer Neutronen ist. Da die lokale Flußdichte am Prüfling direkt nicht gemessen werden kann, werden - im Stationärbetrieb - in drei der Teststrecke benachbarten Reaktorpositionen axiale Flußdichteprofile über die ganze Corehöhe aufgenommen und auf jeder Axialkote z gemittelt. Das so gewonnene mittlere Flußdichteprofil  $\bar{\phi}_{th}$  wird als proportional zum Flußdichteprofil am Prüfling angenommen.

Bei bereits vorbestrahlten Brennstoffprüflingen ist neben der Flußdichte auch die Spaltstoffkonzentration axial im allgemeinen nicht konstant.

---

a)  $k = f \cdot (\phi_{Pr.,max.} / \bar{\phi}_{Core}) = f \cdot \varphi$   
abgeschätzt wurde  $f = 0,37$ ; gemessen wurde  $\varphi = 1,27$

Die beiden Beiträge zum axialen Leistungsprofil,

- a) das während des Versuchs ermittelte Flußdichteprofil und
- b) das Spaltstoffprofil nach erfolgter Bestrahlung

sind als normierte auf den Mittelwert bezogene Kurven zusammen mit dem daraus resultierenden Leistungsprofil (oberste Kurve  $L(z)/\bar{L}$ ) in den Abbildungen 12.1 bis 12.5 für die Versuche E1 bis E5 dargestellt. Das Spaltstoffprofil darin ist aus den Werten von fünf Einzelproben des Stabes E6 (50, 227, 371, 385 und 461 mm von UKF) ermittelt worden. Es hat sich als praktisch konstant über der Länge ergeben. Die Konzentration der U- und Pu-Kerne wurde mit dem Röntgenfluoreszenzverfahren bestimmt, die Anteile der U- und Pu-Isotope wurden massenspektrometrisch ermittelt<sup>(a)</sup>.

Mit den nach den o.g. Methoden bestimmten mittleren Prüflingsleistungen lassen sich die relativen Leistungsprofile in absolute umrechnen. Für die thermische Leistung, zum Beispiel, ist der axiale Verlauf

$$NTH(z) = \overline{NTH} \cdot (L(z)/\bar{L})$$

in den Abbildungen 10.1 bis 10.5 (Versuche E1 bis E5) aufgetragen. Auch der jeweilige Formfaktor, d.h. das Verhältnis von Maximal- zu Mittelwert, ist darin angegeben.

#### 5.4 Prüflingsinnendruck

Die zeitlichen Verläufe des Innendrucks der Prüflinge zeigen die Abbildungen 13.1 bis 13.5. Daraus ergeben sich die Berstzeitpunkte zu 59 s, 29 s, 47 s und 35 s in der Reihenfolge der Versuche E1 bis E4.

Für E5 konnte der Berstzeitpunkt nicht eindeutig aus dem Innendruckverlauf ermittelt werden. Eine rechnerische Abschätzung unter Verwendung vereinfachter Zusammenhänge zwischen Volumenzunahme und Druckänderung ergab mit  $t_B = 63$  s die wahrscheinliche Berstzeit.

---

(a) Abbrandanalyse vom Institut für Radiochemie durchgeführt /4/

Auf den Übersichtsblättern (Tab. 4) sind jeweils vier Druckwerte angegeben: (1) der bei Transientenbeginn im Prüfling herrschende Druck, der vorher bei Stationärbetrieb - also warm - eingestellt wurde, (2) der höchste gemessene Wert, (3) der Druckwert zur Zeit des Temperaturmaximums und schließlich (4) der Berstdruck. Als Berstdruck wird der Druck definiert, bei dem ein Abfall mit mehr als 10 bar/s beginnt; die zugehörige Zeit seit Transientenbeginn wird gemäß Abb. 14 Berstzeitpunkt genannt.

### 5.5 Hüllrohrtemperaturen

Die zeitlichen Verläufe der Hüllrohrtemperatur während der Transiente sind in den Abb. 15.1 bis 15.5 und 16.1 bis 16.5 dargestellt. In den Abb. 15 sind die axialen Hülltemperaturverläufe für einige ausgewählte Zeitschritte zusammen mit den Lagen der Ribstellen eingetragen. Die Abb. 16 zeigen die Verläufe der sechs Hüllrohrtemperaturen kontinuierlich über der Zeit:

Bei 0 s unterscheiden sich die Anzeigen der verschiedenen TE eines Prüflings bis zu 29 K. Der kurze Temperaturabfall bei  $t = 2$  s resultiert aus dem kurzfristig zunehmenden Kühlmittelstrom beim Entspannen des Kreislaufes. Die fortschreitende Deformation zeigt sich meist am verlangsamten Temperaturanstieg. Bei  $t = 59, 29, 47, 35$  und 63 (E1 bis E5) platzten die Stäbe (siehe Druckverlauf in den Abb. 13.1 bis 13.5). Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurde die Leistung zurückgenommen.

Der Temperatureinbruch nach dem Bersten der Hülle erklärt sich daraus, daß es beim Platzen der Hülle zu einer Strömung von relativ kaltem Füllgas vom Stabplenum zur Ribstelle kommt und außerdem die starke Vergrößerung des Spalts zwischen Brennstoff und Hülle den thermischen Widerstand verstärkt hat.

Als Bersttemperatur wird die auf die Beulstelle gemäß Abb. 14 extrapolierte Hülltemperatur zum Zeitpunkt des Berstens bezeichnet. Auf den Übersichtsblättern der Tabelle 4 ist zu diesen Temperaturwert als einzigem eine "Korrektur" angegeben, alle anderen Temperaturangaben stellen den direkten Meßwert dar.

Tabelle 7: Maximale Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe E

Versuch	Temp. meßstelle	Zeitpunkt (s)	Temp. abfall (K)	Abst. Meßstelle/Rißmitte (mm)	Grad <sup>(a)</sup>
E1	T131	59,5	74	30	158
E2	T131	27,2	32	70	138
E3	T133	47,4	34	15	84
E4	T131	35,5	30	88	129
E5	T131	55,9	3	135	102

(a) kleinster Winkel

Eine Korrektur ist deswegen erforderlich, weil die Befestigungsart der Thermoelemente zu Meßwerten führt, die niedriger als die wahre Hüllrohrtemperatur sind. Versuche zur Bestimmung des Meßfehlers ergaben die leistungsabhängigen Korrekturwerte von Abb. 18 für die beiden TE-Versionen A und B; benutzt wird die jeweilige mittlere Kurve. Bei der Extrapolation der Bersttemperatur aus den Meßwerten T131 bis T 136 konnte eine azimutale Temperaturverteilung nicht berücksichtigt werden.

Die Bersttemperaturen aller Versuche sind in Abb. 19 als Funktion des Berstdruckes dargestellt. Die Bersttemperatur/Berstdruck-Wertepaare der Versuche E1 bis E5 liegen im Streubereich der Ergebnisse der übrigen Versuche, die ihrerseits im Bereich von in-pile und out-of-pile erzielten Resultaten anderer Experimentatoren liegen /6/.

Abb. 17, die die Temperaturanzeigen und den Stabinnendruck P74 als Funktion der Zeit darstellt, verdeutlicht das Stabverhalten im Versuch E4:

Zum Berstzeitpunkt erleben die Temperaturanzeigen T137, T138 und T139 einen starken Temperaturabfall, obwohl die Berststelle unterhalb des untersten Thermoelements T131 entstanden ist.

(Üblicherweise zeigen nur die Meßstellen, die in der Nähe der Ribstelle liegen, einen deutlichen Temperaturabfall, die maximalen Temperatureinbrüche, die in der Nähe der Beulstelle gemessen wurden, sind für alle E-Versuche in Tabelle 7 zusammengefaßt.) Nach dem Abfall beim Bersten steigen die Temperaturen T137 bis T139 nur gering an. Das läßt darauf schließen, daß sich nach dem Bersten kein Brennstoff mehr in der Höhe der Meßstellen befand.

Mit den beiden Versuchen E3 und E4 wurde gezeigt, daß die Brennstoffbewegung im Stab praktisch mit dem Bersten der Hülle zusammenfällt. Eine feinere Auflösung des Zeitpunkts war mit der vorhandenen Instrumentierung nicht möglich, da bei den LOCA-typischen Transienten der entscheidende Verformungsvorgang der Hülle aufgrund des exponentiellen Anwachsens der Dehnung nahezu mit dem Bersten zusammenfällt.

Die Versuche E3 und E4 gaben weiterhin Aufschluß über das axiale Temperaturprofil im Bereich der oberen Heizzone, und zwar zu Beginn der Transiente, vor der Stabverformung und während der Verformung bis zum Bersten der Hülle. In Abb. 20 sind die Temperaturen am oberen Stabende für einige ausgewählte Zeitabschritte zwischen 0 und 35 s nach Auslösung der Transiente zusammen mit Werten aus dem Versuch B 1.7 (kein Abbrand) dargestellt. Die Daten des Versuchs B 1.7, der mit fast gleicher Stabileistung wie bei den Versuchen E3 und E4 gefahren wurde, erweitern dabei die Information über den Temperaturverlauf oberhalb der Heizzone. Vor allem während der Transiente verläuft die Temperatur am Ende der Heizzone nicht sprunghaft.

Im Versuch E5 war geplant, die Deformation der Hülle vor dem Bersten zu stoppen. Dazu wurde versucht, die Leistung während des Verformungsvorganges durch Reaktorschnellschluß wegzunehmen und zusätzlich gleichzeitig die Dampfkühlung zuzuschalten. Der Versuch E5 hatte das Ziel, eine deutlich deformierte, aber nicht geborstene Hülle zu erzielen, um die Oxidation

der Hülle innen ohne Eindringen von Wasserdampf zu untersuchen und den Brennstoffzustand ohne Hüllbersten festzustellen. Tabelle 4.5 gibt als "Quick-Look-Blatt" die wesentlichen Versuchsdaten wieder.

Abbildung 21 zeigt für den Versuch E5 die zeitlichen Verläufe der Hülltemperaturen T131 bis T136 und der Drücke P74 (Prüflingsinnendruck), P60 (Dampfdruck vor der Teststrecke), P61 (Dampfdruck hinter der Teststrecke). Daraus kann entnommen werden, daß die Temperaturverläufe sich nach der Leistungsrücknahme bei 57 s in üblicher Weise umkehrten, die Zuschaltung der Kühlung aber wesentlich später (bei ca. 75 s) einsetzte. Der Verlauf des Innendrucks P74 zeigt zunächst wie üblich durch leichten Abfall die zunehmende Verformung an und fällt ab ca. 57 s stärker ab. Dieser Abfall wird jedoch für etwa 5 s unterbrochen und erst ab etwa 63 s wieder fortgesetzt.

Der Berstzeitpunkt war daher nicht, wie sonst, eindeutig aus dem Druckverlauf zu erkennen. Daß der Stab undicht geworden war, zeigte eindeutig der Anstieg des Innendruckes P74 auf Kreislaufdruck bei  $t = 75$  s. Der verhältnismäßig flache Druckabfall (sowohl bei  $t = 57$  bis  $58$  s als auch ab  $t = 63$  s) ließ auf eine kleine Berstöffnung schließen. Dies hat auch die Nachuntersuchung in den heißen Zellen bestätigt (Abbildung 33, 49.5). Eine rechnerische Abschätzung ergab, daß die Hülle wahrscheinlich erst bei  $t = 63$  s "geborsten" ist, also vor Beginn des 2. Druckabfalls.

Aus Abbildung 21 ist auch ersichtlich, daß die Brennstoffsäule bei etwa 58 s (siehe Anzeige T 136), also vor dem Berstzeitpunkt abgerutscht ist. Es bedurfte in diesem Versuch also keiner auslösenden Erschütterung (Druckabfall beim Bersten), um die Brennstoffsäule in Bewegung zu bringen.

## 5.6 Temperaturanstieg der Hülle

Da nach den Ergebnissen von Out-of-pile-Versuchen auch die Aufheizraten von Einfluß auf die Mechanismen des Brennstabversagens sind, wurden in den Tabellen 4 einige Einzelwerte zum Temperaturanstieg der Hülle bzw. zur Aufheizzeit angegeben. Bei Vergleichen ist darauf zu achten, daß die jeweiligen Referenztemperaturen berücksichtigt werden.

Für die Beulstelle der Versuche E1 bis E5 wurden aus den Messungen der Hüll-TE und aus den relativen Leistungsverläufen die Hülltemperatur-Gradienten abgeschätzt, die in Tabelle 8 angegeben sind.

Tabelle 8: Hülltemperaturgradienten an den Berststellen  
(bei 650 °C Meßtemperatur)

Versuch	Hülltemperaturgradient (K/s)
E1	12,5
E2	11,7
E3	11,2
E4	11,6
E5	11,5

## 6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen

### 6.1 Durchstrahlung der Stäbe

Zur Kontrolle des Brennstoffzustandes sowie der Haftung der TE an der Prüflingshülle werden vor dem Versuch Durchstrahlungen des Prüflingseinsatzes in der Neutronenradiografieanlage des FR2 (NERA) vorgenommen. Als Beispiel diene die Abbildung 22, die den Prüfling E5 zeigt.

Nach dem Transientenversuch, d.h. nach Ausbau des Prüflings-einsatzes aus dem FR2 werden erneut Durchstrahlungen in der NERA durchgeführt. Es werden mehrere axial überlappende Aufnahmen des Prüflings sowie Aufnahmen unter verschiedenen Einstellwinkeln gemacht. Dabei wird versucht, vor und nach dem Transientenversuch die gleichen Abschnitte unter gleichen Winkeln zu neutrografieren. Die Winkelstellung der Aufnahmen zum Prüfling ist für die einzelnen Versuchsstäbe in den Abbildungen 23.3, 24.3, 25.3, 26.3 und 27.3 wiedergegeben.

Bei den NERA-Aufnahmen steht der Prüfling noch innerhalb des Dampfführungsrohres (18 mm Innendurchmesser), das aus Edelstahl ist und daher kontrastreicher abgebildet wird als die weniger neutronenabsorbierende Zry-Hülle.

Aus den Aufnahmen (Abbildung 23.1 und 23.2, für E1, bis zu Abbildung 27.1 und 27.2 für E5) ist für diese Versuchsserie zu entnehmen:

- Die vorbestrahlten Stäbe zeigen vor dem Transientenversuch deutliche Risse im Brennstoff, die Pelletform ist noch erhalten.
- Nach dem Transientenversuch haben die Pelletbruchstücke den durch Hüllrohrdehnung entstandenen Raum in der Art einer losen Schüttung von Körnern ausgefüllt.
- Im Bereich größerer Dehnung ist aufgrund der Brennstoffbewegungen die ursprüngliche Pelletform nicht mehr zu erkennen.
- Durch Nachrutschen von Brennstoffteilchen in den Beulbereich hat sich die Länge der Brennstoffsäule bei allen Stäben deutlich verkürzt (siehe Tabelle 9).

- Beim Versuch E5 ist der Prüfling stärker aufgeweitet als bei übrigen Versuchen der E-Serie. (Die Untersuchung des Teststabes in den Heißen Zellen hat ein winziges Loch im Bereich maximaler Verformung ergeben.) Das Aussehen des verformten Stabes ist in den Neutronenradiografien der Abbildung 27.1, das des Beulbereiches als Ausschnitt in Abbildung 28 gezeigt. Abbildung 28 läßt im linken Teilbild die Form der Beule (Anliegen der Hülle am inneren Dampf-führungsrohr auf etwa 10 cm Länge, max. Umfangszunahme ca. 65 %), im rechten Teilbild den Brennstoffzustand erkennen.

Im Vergleich zum Versuch E5 ist die Transiente des Versuchs E1 von gleichem Innendruck aus gestartet worden (E5: 25,7 bar; E1: 25,8 bar), die Deformation der Stabhülle aber ganz anders verlaufen, wie die Neutronenradiografie des Stabes E1 nach dem Versuch in Abbildung 23.1 und 23.2 zeigen. Der Versuch E1 ist nach dem üblichen Schema durchgeführt worden, d.h. die Hülle ist nach erfolgtem Beulen und Bersten weiter aufgeheizt worden, im Gegensatz zu Versuch E5 (Leistungsrücknahme bei Beulbeginn).

Tabelle 9:      Längenänderung der Brennstoffsäule durch die E-Versuche

Versuch	Montagemaß <sup>(a)</sup> (mm)	Länge nach Versuch (mm)	Längendifferenz (mm)
E1	497	475	22
E2	497	475	22
E3	497	482	15
E4	497	448	49
E5	497	415	82

(a) wird gleichgesetzt mit dem Maß nach der Bestrahlung

## 6.2 Fotodokumentation

Auf den Abbildungen 29, 30, 31, 32 und 33 ist ein Stab-Abschnitt mit der Ansicht der Rißstelle zu sehen. Die weiteren Abbildungen 34, 35, 36, 37 und 38 zeigen Detailaufnahmen der Beul- bzw. Rißstellen.

Neben den hier beispielhaft gezeigten Bildern existieren von jedem Stab noch Aufnahmen des gesamten Prüflings unmittelbar nach Demontage des iDFR sowie weitere Detailaufnahmen der Beulstelle.

## 6.3 Vermessung der Prüflinge

Die Längenänderung der E-Versuchsstäbe sowie die Rißlage sind in Tabelle 10 aufgelistet. Evtl. Abweichungen der Stablänge durch die Stabkrümmung sind in den Daten vernachlässigt. Die Winkellagen der Tabelle 10 wie auch an anderer Stelle in diesem Bericht sind von der Nullmarkierung (Kerbe am Prüfling) aus im Uhrzeigersinn bei der Stabansicht von unten zu verstehen. Die axiale Rißlage wurde mit Hilfe eines Maßstabes bestimmt.

Tabelle 10: Längenänderung und Rißlage E-Stäbe

	E1	E2	E3	E4	E5
Gesamtlänge vor der Transiente (mm)	973,0	973,8	973,8	973,7	973,7
nach der Transiente (mm)	979,4	973,8	977,8	972,5	975,6
Bleibende Längung des Stabes (mm)	6,4	0,0	4,0	- 1,2	1,9
Riß-Anfang (mm von UKF)	164	122	308	96	62
Riß-Ende (mm von UKF)	177	139	322	127	68
Riß-Länge (mm)	13	17	14	31	5,6
Riß-Breite max. (mm)	3,4	7,5	6,0	4,3	~ 0,1
Riß-Winkel zur Kerbe (Grad)	48	295	230	55	122

In Abbildung 39 sind die ermittelten Stablängsdehnungen als Funktion der Bersttemperatur aufgetragen. Die Versuchspunkte der In-pile-Versuche sind mit der ORNL-Kurve, die aus out-of-pile durchgeführten Einzelstabversuchen ermittelt wurde /7/, verglichen. Alle KfK-In-pile-Versuchspunkte liegen oberhalb der ORNL-Kurve.

Die azimuthalen Rißlagen sind in den Abbildungen 40.1 bis 40.5 in die Diagramme der vor der Bestrahlung bestimmten Wandstärkenverteilung über dem Umfang eingezeichnet. Die Wandstärke ist darin  $18^0$ -weise als Abweichung vom Sollwert in ( $\mu\text{m}$ ) angegeben. Die angegebene Wandstärkenverteilung gilt für die Rißebeane, ist aber auch für den gesamten vermessenen Bereich von 200 mm in Stabmitte repräsentativ, da sich auf dieser Länge die Wandstärke axial unwesentlich verändert.

Die azimuthalen Rißlagen sind in Bezug auf die Ausgangs-Wandstärken nicht systematisch. Die Rißlage wird generell nicht als Folge des azimuthalen Wandstärkeprofils, sondern als Folge der azimuthalen Temperaturverteilung angesehen.

#### Durchmesseränderung und Umfangsdehnung

Die Ergebnisse der Durchmesseränderungen und Umfangsdehnungen der E-Stabhüllen sind in den Abbildungen 41 und 42.1 bis 42.5 dargestellt. Dabei sind die Dehnprofile aus den Versuchen E1 bis E5 zusammen in Abbildung 41, die Einzelkurven der E-Stäbe in den Abbildungen 42 wiedergegeben.

Die bleibende Durchmesserzunahme erstreckt sich über den gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs. Mit Ausnahme des Stabs E3 liegen die Beulen deutlich unterhalb der Stabmitte entsprechend den Leistungsprofilen (siehe Abbildung 10 und Abbildungen 12), die im unteren Stabbereich höhere Werte vorweisen. Bei Stab E3 ist eine lokale Heißstelle zu vermuten, die das Leistungsprofil überkompensierte.

An den TE-Befestigungsstellen sind z.T. Einschnürungen von 1 - 3 %  $\Delta d/d_0$ , in einem Fall möglicherweise sogar bis zu 7 % (1 mm), entstanden. Dies deutet darauf hin, daß die zusätzliche wärmeabführende Oberfläche und wärmespeichernde Masse der TE lokal zu geringeren Hüllrohrtemperaturen führt. Besonders deutlich ist der Einfluß der Thermoelemente am Versuchsstab E2 zu erkennen.

Die bleibenden Durchmesserzunahmen sind in der Tabelle 11 aufgelistet. Die Durchmesserangaben wurden aus dem Wendelschrieb entnommen, für die Rißzone wurden zusätzlich Querschnittfotos ausgewertet.

Zur Ermittlung von Umfangsdehnungen mit Hilfe der Wendelschriebe (Durchmesserwerte) kann jeder der Stäbe in drei Bereiche eingeteilt werden:

- 1) Bereich außerhalb des Risses, in denen der Stabquerschnitt kreisförmig ist (Ovalität < 50  $\mu\text{m}$ ),
- 2) Bereiche nahe dem Riß, die eine deutliche Ovalität aufweisen,
- 3) der Rißbereich.

Die drei Bereiche sind in Abbildung 43 verdeutlicht. Sie zeigt einen typischen Wendelschrieb eines Versuchsstabes (hier Versuch A 2.2).

Im Beulbereich kleiner Ovalität ist die Umfangsdehnung gleich den Durchmesserzunahmen. Im Bereich der deutlichen Ovalität wird der Stabquerschnitt als Ellipse angenommen und deren Umfang mit Hilfe des maximalen und minimalen Durchmesserwertes bestimmt. Im Rißbereich wird der Umfang mittels Querschliffbildern ermittelt.

FR2 IN-PILE TESTS E 1 THROUGH E 5  
CIRCUMFERENTIAL STRAIN DATA FROM ROD DIAMETER MEASUREMENT

KIK  
IT 1982

TABELLE 11

Test E 1		Test E 2		Test E 3		Test E 4		Test E 5	
mm from UKF [a]	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$ [b]	mm from UKF	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$						
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	5	27	5	20	5	21	5	18	5
30	10	55	10	35	10	32	10	25	10
45	15	80	15	85	15	42	15	28	15
60	20	110	20	185	15	50	20	32	20
130	25	115	25	300	15	58	25	34	30
162	[c] (29)	116	(27)	304	(16)	82	30	36	40
179	(24)	146	(30)	325	(25)	93	(32)	38	50
185	20	148	25	340	20	131	(39)	42	60
260	15	157	20	370	15	148	35	48	65
272	10	170	15	390	10	156	30	89	(67)
405	5	205	10	470	5	165	25	134	(66)
500	0	245	10	500	0	190	25	140	65
		300	10			205	25	143	60
		320	15			252	25	150	50
		340	15			275	25	156	40
		370	10			288	20	162	30
		420	5			298	15	168	20
		500	0			330	15	188	15
						378	15	380	10
						387	10	430	5
						465	5	500	0
						500	0		
max.at 169	30,4%	max.at 131	46,0%	max.at 321	30,9%	max.at 114	55,5%	max.at 120	67,4%

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b]  $U_0 = \pi \cdot d_0$ , where  $d_0 = 10,75$  mm

[c] rupture opening between the two elevations in parentheses

Die Ovalität  $D_{\max} - D_{\min}$  wird Polarschrieben (Wendelschriebe ohne Längsvorschub des Stabes) entnommen. Die Polarschriebe erfassen die Ovalität möglichst nahe der Rißstelle. Die Abbildungen 44.1 und 44.2 bis 48.1 und 48.2 zeigen die Polarschriebe der E-Stäbe im Beulbereich, Tabelle 12 gibt einige Zahlenwerte daraus wieder.

Da die Umfangsdehnung im Rißbereich nicht kontinuierlich gemessen werden kann, wird sie in diesem Bereich an mindestens zwei Stellen aus Schliffbildern bestimmt. Ergebnisse der Umfangsmessung und der daraus berechneten prozentualen Umfangszunahme  $\Delta U/U_0$  sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die maximal ermittelten Umfangszunahmen der Stäbe E1 bis E5 sind demnach: 30 %, 46 %, 31 %, 56 % und 67 %. Sie sind außerdem in den Abbildungen 49.1 bis 49.5 veranschaulicht.

Die größten Umfangszunahmen der Hülle sind in Abbildung 50 zusammen mit den anderen Versuchspunkten dieses Versuchsprogramms als Funktion der Temperatur eingetragen. Die Versuchspunkte der E-Reihe liegen im Streubereich der Punkte aus den übrigen Versuchen des hier beschriebenen Vorhabens.

#### Exzentrizität der Beule und Krümmung des Stabes:

Zur Feststellung der Beulenlage in Bezug auf die Stablängsachse wurden die Mantelschriebe der verformten Stäbe an drei Umfangswinkelpaaren ( $0^\circ/180^\circ$ ,  $60^\circ/240^\circ$ ,  $120^\circ/300^\circ$ ) verwendet. Die daraus ermittelten Stabachsen im Beulbereich wurden mit den Stabachsen außerhalb der Beulbereiche verglichen. Die Differenz der beiden jeweiligen Werte wird als Exzentrizität der Beule angegeben. Für die Versuche der E-Reihe sind die Werte in Tabelle 14 aufgelistet. Die Exzentrizität der Beule liegt meist etwa an der Krümmungsaußenseite, während die Rißstelle gegenüber, also an der Innenseite liegt (siehe Schema Seite 39).

Tabelle 12: Ovalität im Beulbereich E-Versuchsstäbe

Versuch		E1		E2		E3		E4		E5	
Stab	Nr.	44		45		46		47		48	
Polar-schrieb	Nr.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Abstand von UKF	mm	162	179	116	146	304	325	93	131	44	89
D <sub>min</sub>	mm	13,7	13,1	13,3	13,6	12,3	13,3	13,7	14,4	17,4	18,0
D <sub>max</sub>	mm	14,0	13,5	13,9	14,4	12,7	13,6	14,6	15,5	17,7	18,1
Ovalität	mm	0,32	0,48	0,60	0,78	0,40	0,28	0,96	1,11	0,23	0,10

Tabelle 13: Umfangsdehnung im Beulbereich E-Versuchsstäbe

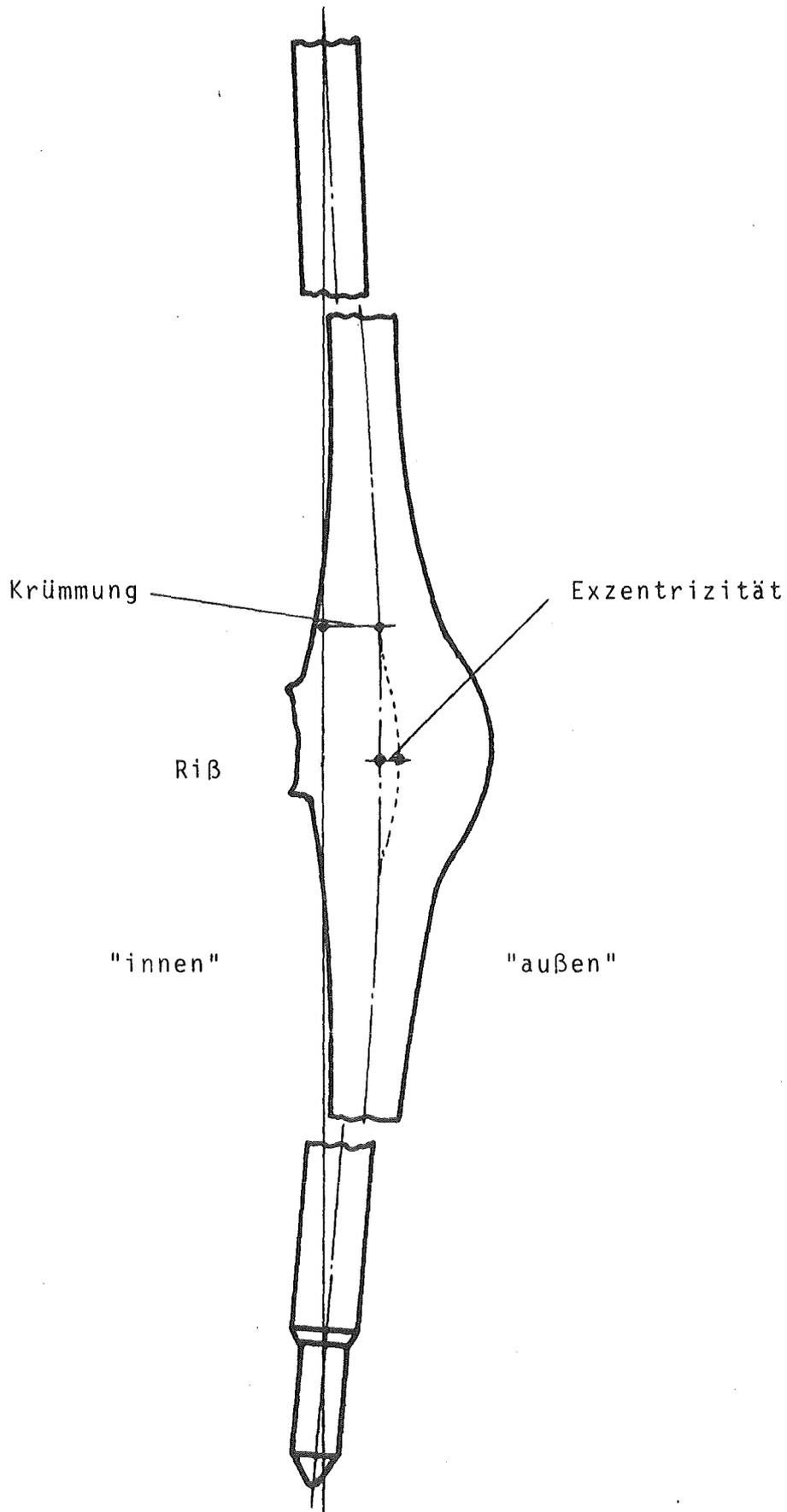
Versuch			E1	E2	E3	E4	E5
Stab	Nr.		44	45	46	47	48
unteres RiBende	U	mm	43,5	42,5	39,2	44,4	56,5
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	29,0	27,2	16,0	31,5	67,4
Mitte RiB	U	mm	44,0	49,3	44,2	52,5	56,5
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	30,4	46,0	30,9	55,5	67,4
oberes RiBende	U	mm	41,8	43,9	42,2	47,0	56,5
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	23,8	30,1	25,0	39,2	67,4

Tabelle 14: Exzentrizität der Beule bei E-Versuchsstäben

Versuch		E 1	E 2	E 3	E 4	E 5
Stab	Nr.	44	45	46	47	48
Abstand von UKF	mm	170	130	315	112	65
Lage zum Riß	Grad	47	175	40	135	18
zur Nullmarke	Grad	95	120	270	280	140
Exzentrizität	mm	0,4	1,3	0,2	1,0	0,3

Tabelle 15: Krümmung E-Versuchsstäbe

Versuch		E 1	E 2	E 3	E 4	E 5
Stab	Nr.	44	45	46	47	48
max. Krümmung	mm	3,1	5,4	2,7	3,1	5,1
Abstand von UKF	mm	390	350	380	400	430
Lage zur Nullmarke	Grad	240	200	70	75	270
Krümmung im Beulbereich	mm	0,9	3,0	1,1	1,0	0,9
Abstand von UKF	mm	175	130	315	110	65
Lage zum Riß	Grad	45	170	180	170	180



SCHEMA

Ebenfalls aus den Mantelschrieben wird die Stabkrümmung abgeleitet. Sie wird als Auslenkung der Stablängsachse von der geraden Verbindungslinie ihrer Endpunkte verstanden (s.a. Schema). Die Maximalwerte liegen bei 350 bis 430 mm von UK aktiver Zone. Die Auslenkung beträgt 2,7 bis 5,4 mm (siehe Tabelle 15).

Im Beulbereich zeigen die E-Stäbe eine wesentlich geringere Auslenkung der Stablängsachse. Die azimutale Lage der Krümmung zum Riß ist so wie bei der Ezentrizität der Beule beschrieben: die Krümmungsinenseite liegt meistens am Riß ( $\sim 180^\circ$  zwischen Riß und Auslenkung des Stabes durch Krümmung). Die Umfangslage der Aufbeulung und der Stabkrümmung sind also etwa gleich.

#### Volumenzunahme des gebeulsten Stabes

Um die Volumenvergrößerung der verformten Versuchsstäbe zu erfassen, wurden die Volumina aus den Wendelschrieben ermittelt. Dabei wurden die Stäbe in genügend kleine Abschnitte eingeteilt und die Volumina der Abschnitte aus den Außendurchmessern berechnet. Für das Volumen von Hüllwand und Brennstoff wurden dabei die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelvolumina stellte das vergrößerte Volumen  $V_1$  dar. Der relative Volumenzuwachs ergibt sich dann zu

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} - 1$$

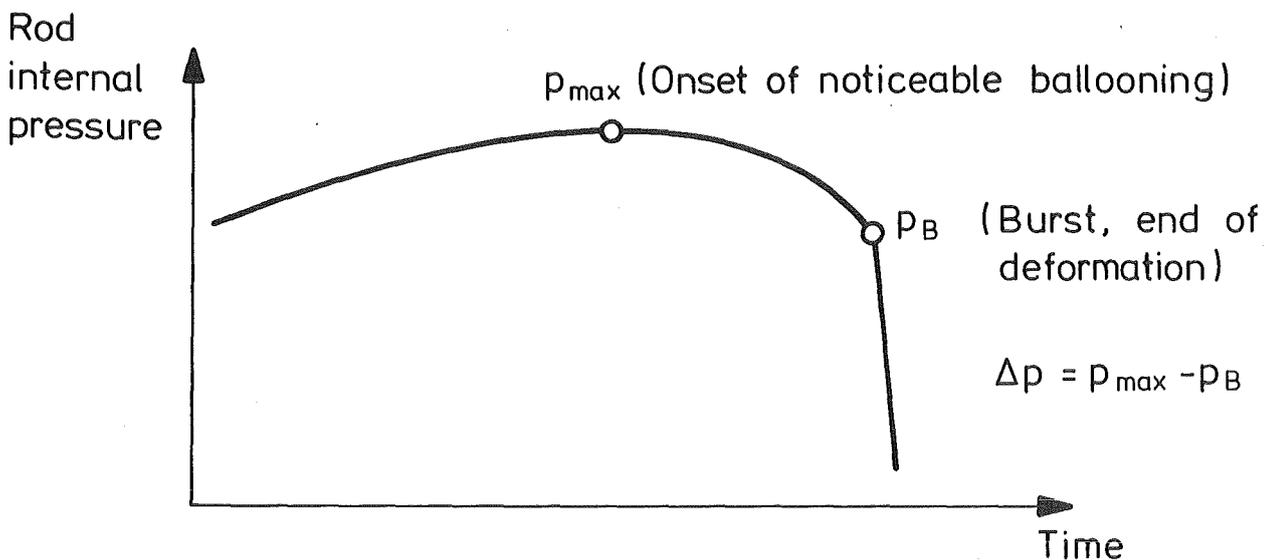
wobei  $V_1$  = Gasvolumen des Stabes nach dem Versuch

$V_0$  = Gasvolumen des Stabes vor dem Versuch

In Abbildung 51 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche E1 bis E5 wie auch für andere bestrahlte und unbestrahlte Stäbe aufgetragen. Es zeigt sich, daß die Versuchspunkte recht gut einer Geraden folgen. Das bedeutet einen linearen Zusammenhang zwischen Volumenzuwachs bzw.

Gesamtverformung des Stabes und der maximal bestimmten Umfangszunahme. Eine Ausnahme bildet Versuch A 1.1, er wurde im Gegensatz zu den übrigen Versuchen nicht mit einem flachen, sondern mit einem steilen Leistungsprofil (axialer Formfaktor 1,4) durchgeführt.

In Abbildung 52 wurde die relative Volumenzunahme in Abhängigkeit von der Innendruckänderung während der Verformung dargestellt. Die Innendruckveränderung  $(p_{\max} - p_B)/p_{\max}$  während der Deformation der Hülle ist in nachfolgendem Schema veranschaulicht:



Schema: Innendruckverlauf während der Hüllverformung

Der durch Versuchspunkte gegebene Zusammenhang zwischen der Volumenvergrößerung des Stabes und der Innendruckabnahme läßt sich approximieren durch die Beziehung

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3,05 \frac{\frac{\Delta p}{p_{\max}}}{1 - \frac{\Delta p}{p_{\max}}}$$

Eine Funktion dieser Form läßt sich unter vereinfachten Annahmen auch analytisch herleiten bei Berücksichtigung der Erwärmung des während der Stabdeformation vom Plenum in die aktive Zone einströmenden Gases.

## 7. Brennstoffzustand und -verhalten

Zur Beurteilung des Brennstoffzustandes nach der Vorbestrahlung und möglicher Veränderungen des Brennstoffzustandes beim Transientenversuch wurde von den sechs vorbestrahlten Versuchsstäben der Serie E der Stab E6 keinem Transientenversuch ausgesetzt.

Aus den Querschnitten des Stabes E6 läßt sich entnehmen, daß die vorbestrahlten Stäbe vor der Transiente schon gebrochene Brennstofftabletten hatten. Die Bruchstücke der Tabletten saßen allerdings noch so zusammen, daß die Pelletform einwandfrei erhalten war. Das zeigen sowohl die NERA-Aufnahmen vor dem Versuch, wie z.B. die Abbildung 22 des Stabes E5, wie auch die Metallografie-Bilder. Einen Querschnitt des Stabes E6 (205 mm von Unterkante Brennstoff) gibt Abbildung 53.1 wieder. Abbildung 53.2 zeigt einen Längsschnitt. Das Bruchmuster sieht in verschiedenen Brennstoffebenen im Prinzip gleich, im Detail unterschiedlich aus. Das verdeutlicht auch die Abbildung 54. Das Aussehen des Brennstoffs im Stab E6 wird als typisch für alle Stäbe der E-Serie angesehen. Die Schnittpläne der E-Stäbe sind als Anhang II beigelegt.

Der Vergleich mit Brennstoff ähnlich großen Abbrands aus Leichtwasserreaktoren konnte qualitativ anhand von Stab-Querschnittsbildern durchgeführt werden. Es zeigten sich keine systematischen Unterschiede im Rißmuster, in der Größe und Anzahl der Bruchstücke, so daß man den Brennstoff der im FR2 bestrahlten E-Stäbe in dieser Hinsicht als typisch für den Leichtwasserreaktor ansehen kann.

Durch die radiale Aufweitung der Hülle beim Transientenversuch wird dem Brennstoff zusätzlicher Raum gegeben, in den die Pelletbruchstücke hineinfallen. Dies führt im Bereich größerer Dehnung, an den Beulstellen, zum vollkommenen Verlust der Pelletform. Darüberhinaus füllt der Brennstoff den Beulenraum in der Art einer lockeren Schüttung von Bruchstücken auf, was durch nachrutschen von Teilchen zu einer Verkürzung der Höhe der Brennstoffsäule führt. Das Maß dieser Verkürzung (siehe auch Tabelle 9) wird bestimmt von der Größe der Beule, im Falle der E-Stäbe wurden bis zu 82 mm (E5) gemessen.

Dieses Brennstoffverhalten ist bei den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen nicht beobachtet worden.

Die Größe der Bruchstücke des Brennstoffs wurde durch den Transientenversuch im Mittel nicht geändert, wie die Auswertung der Siebanalysen für die Stäbe E in Abbildung 55 darstellt. Hier sind die Teilchengrößen der Pelletbruchstücke des Stabes E6 (ohne Transientenversuch) mit denen der übrigen E-Stäbe (mit Transientenversuch) verglichen. Die Werte des Referenzstabes E6 liegen im Datenband der Siebanalysen aller E-Stäbe bei den kleineren und mittleren Teilchengrößen an der oberen Grenze, d.h. im Verlauf der Transiente kam es nicht zum weiteren Zerfall der bei der Vorbestrahlung gebildeten Teilchen. Die häufigste Bruchstückgröße liegt bei etwa 3 mm.

Der Effekt der Verkürzung der Brennstoffsäule wurde in den Versuchen mit besonderer Instrumentierung, E3 und E4, als Indikator benutzt zur Bestimmung des Zeitpunkts im Verlauf eines Transientenversuchs, zu dem die Brennstoffumverteilung stattfindet (siehe auch Abschnitt 5.5). Letztlich sollte damit die Frage geklärt werden, ob die Brennstoffbewegung

den Verformungsvorgang beeinflusst. Die Auswertung der beiden Versuche läßt erkennen, daß das Zerfallen der Brennstoffsäule in den bei uns durchgeführten, für die Aufheizphase eines LOCA typischen Transienten frühestens zum Berstzeitpunkt erfolgt und daß es damit zu keiner Beeinflussung des Verformungsvorganges kommt. Daß kein wesentlicher Einfluß auf die Verformung vorliegt, untermauern auch die anderen E-Versuche, da die Berstdaten wie Bersttemperatur, Berstdruck und plastische Hüllverformung der Versuchsstäbe aus der E-Serie keine Besonderheiten bezüglich des Brennstabverhaltens im Vergleich mit unbestrahlten Prüflingen erkennen lassen.

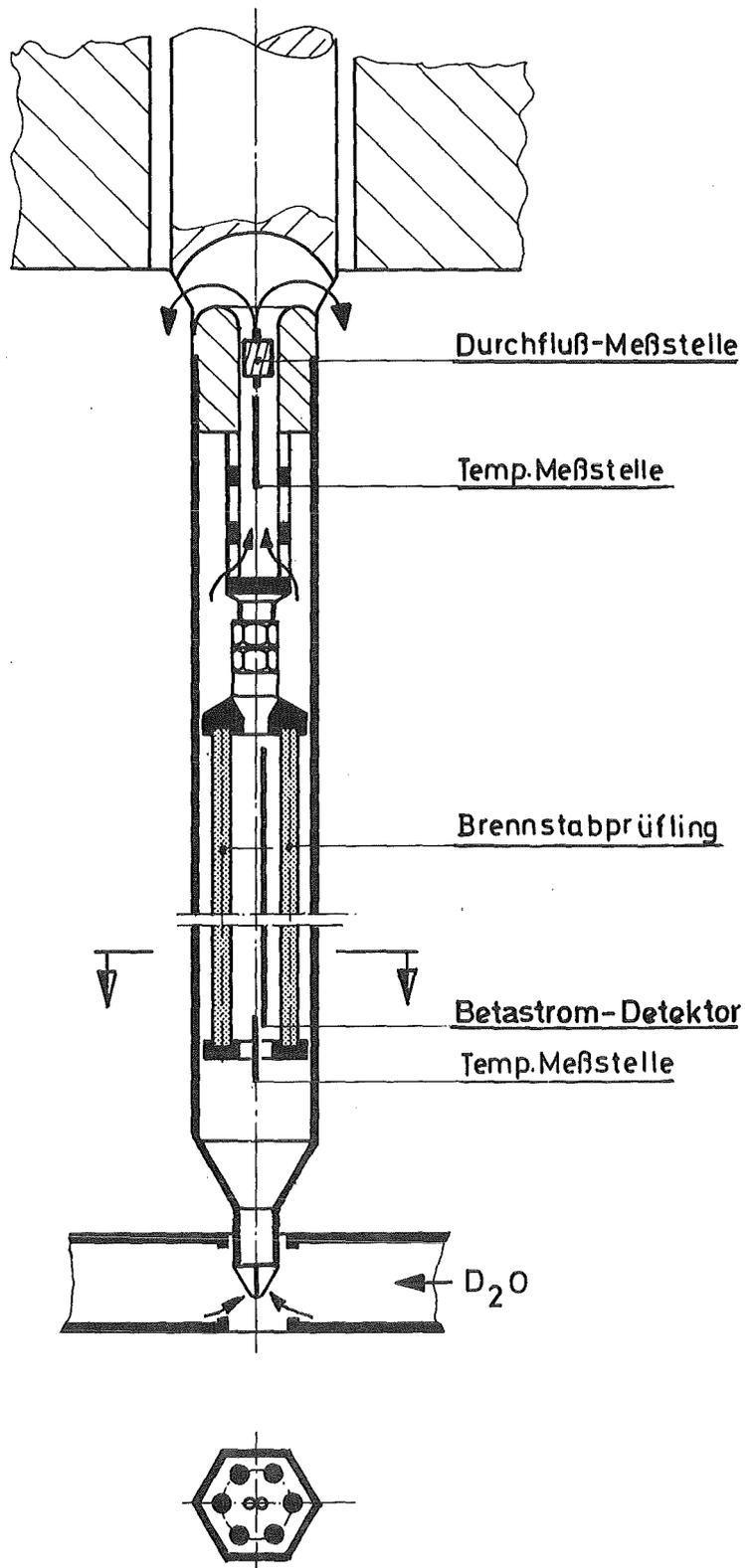
Eine Ausnahme bildet der Versuch E5; bei dem keine LOCA-typische Transiente gefahren wurde und auch kein Bersten im üblichen Sinne erfolgte, sondern eine relativ kleine Öffnung zu einer Art Undichtheit führte. Hier erfolgte die Brennstoffumverteilung vor dem "Bersten" der Hülle, ein Einfluß auf die Verformung kann hier nicht ausgeschlossen werden.

Die endgültige Beurteilung des Stabverhaltens muß allerdings einer vergleichenden Zusammenstellung der Resultate einer größeren Zahl von Versuchen nach Abschluß und Auswertung aller Nachuntersuchungen vorbehalten bleiben.

## 8. Literatur

- /1/ Karb, E.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zur Untersuchung des Brennstabver-  
sagens, KfK 2101 (1974), S. 94 - 112
- /2/ Karb, E.:  
Ergebnisse von In-pile-Experimenten im FR2 zum  
Brennstabverhalten bei Kühlmittelverlust-Störfällen  
KfK 2570 (Dez. 1977), S. 195 - 203
- /3/ Sepold, L.; Prüßmann, M.:  
private Mitteilung (1977)
- /4/ Wertenbach, H.:  
private Mitteilung (1981)
- /5/ Wagner, K.:  
Private Mitteilung (1980)
- /6/ Karb, E.H.; Sepold, L.; Hofmann, P.; Petersen, C.;  
Schanz, G. and Zimmermann, H.:  
"LWR Fuel Rod Behavior During Reactor Tests under  
Loss-of-coolant Conditions, Results of the FR2 In-  
pile Tests", in Journal of Nuclear Materials, North-  
Holland Publishing Company, 107 (1982) 55 - 77
- /7/ Chapman, R.H.; Cathcart, J.M.; and Hobson, D.O.:  
Status of Zircaloy Deformation and Oxidation Research  
at Oak Ridge National Laboratory, presented at Spe-  
cialist's Meeting on the Behavior of Water Reactor  
Fuel Elements under Accident Conditions,  
September 13-16, 1976, Spatind (Nord-Torpa), Norway,  
USERDA Report CONF-760977-2, NTIS, 1976
- /8/ Bauer A.A. et al.:  
Evaluating Strength and Ductility of Irradiated  
Zircaloy, Quarterly Progress Report January - March  
1978, NUREG / CR-0085, BMI-2000, June 1978
- /9/ Karb, E.; Prüßmann, M.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim  
Kühlmittelverlust-Störfall, Bericht über die Ver-  
suchsserie F  
KfK 2956 (Mai 1980)
- /10/ Prüßmann, M.; Karb, E.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim  
Kühlmittelverlust-Störfall. Bericht über die Ver-  
suchsserie G1  
KfK 3061 (Februar 1981)

- /11/ Sepold, L.; Karb, E.H.; Prüßmann, M.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim  
Kühlmittelstörfall, Bericht über die Versuchs-  
serie G2/3, KfK 3099 (Juli 1981)
- /12/ Sepold, L.; Karb, E.H.; Prüßmann, M.:  
Ergebnisse der In-pile-Experimente zum LWR-Brennstab-  
verhalten beim LOCA mit nicht vorbestrahlten Brenn-  
stäben, KfK 3098 (Juni 1981)
- /13/ Prüßmann, M.; Karb, E.H.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim  
Kühlmittelverluststörfall. Bericht über die Versuchs-  
serie C, KfK 3195 (Januar 1982)

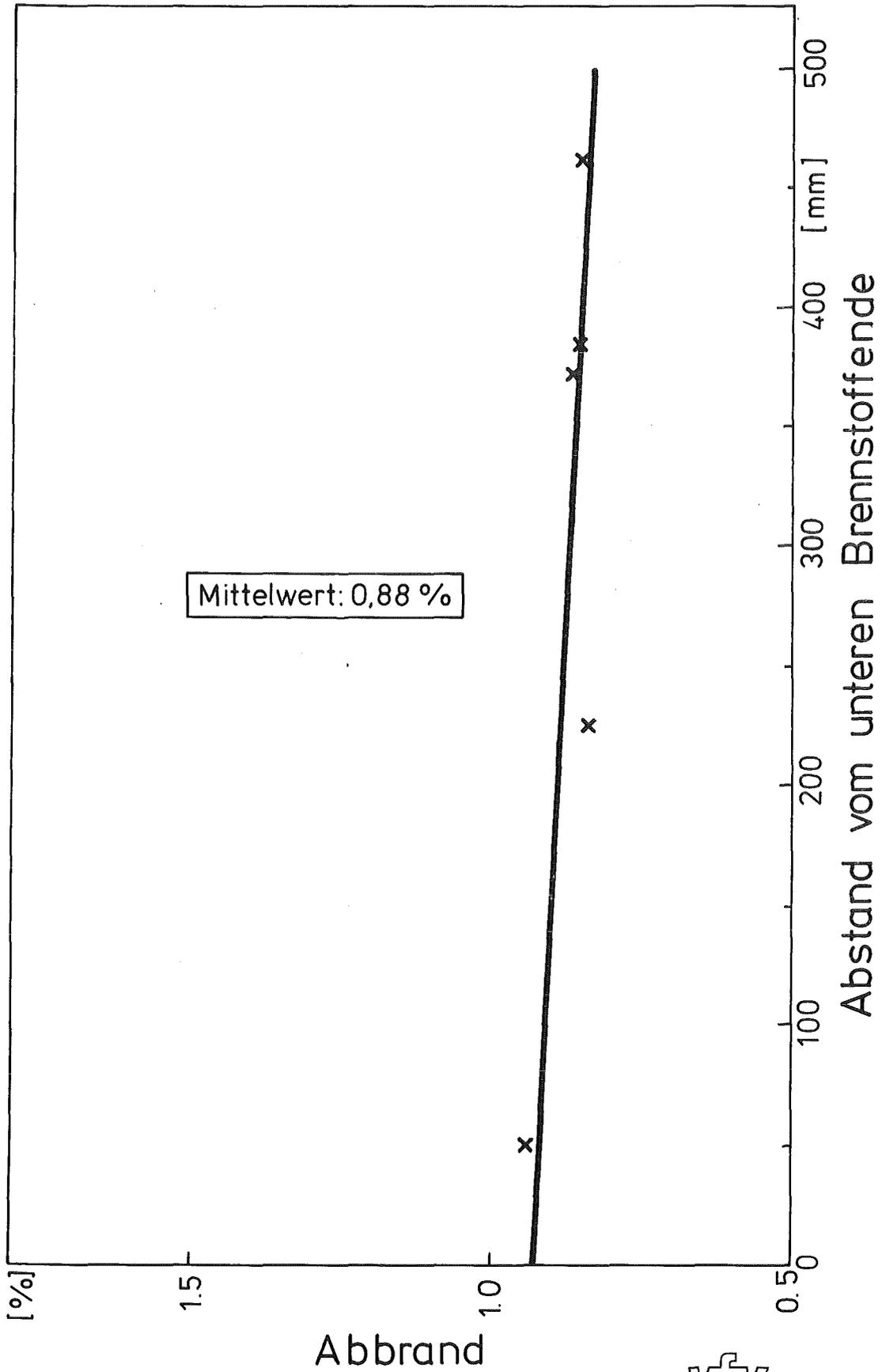


**KfK** IT 78  
PNS 4237-147

# Vorbestrahlungseinsatz

vereinfacht

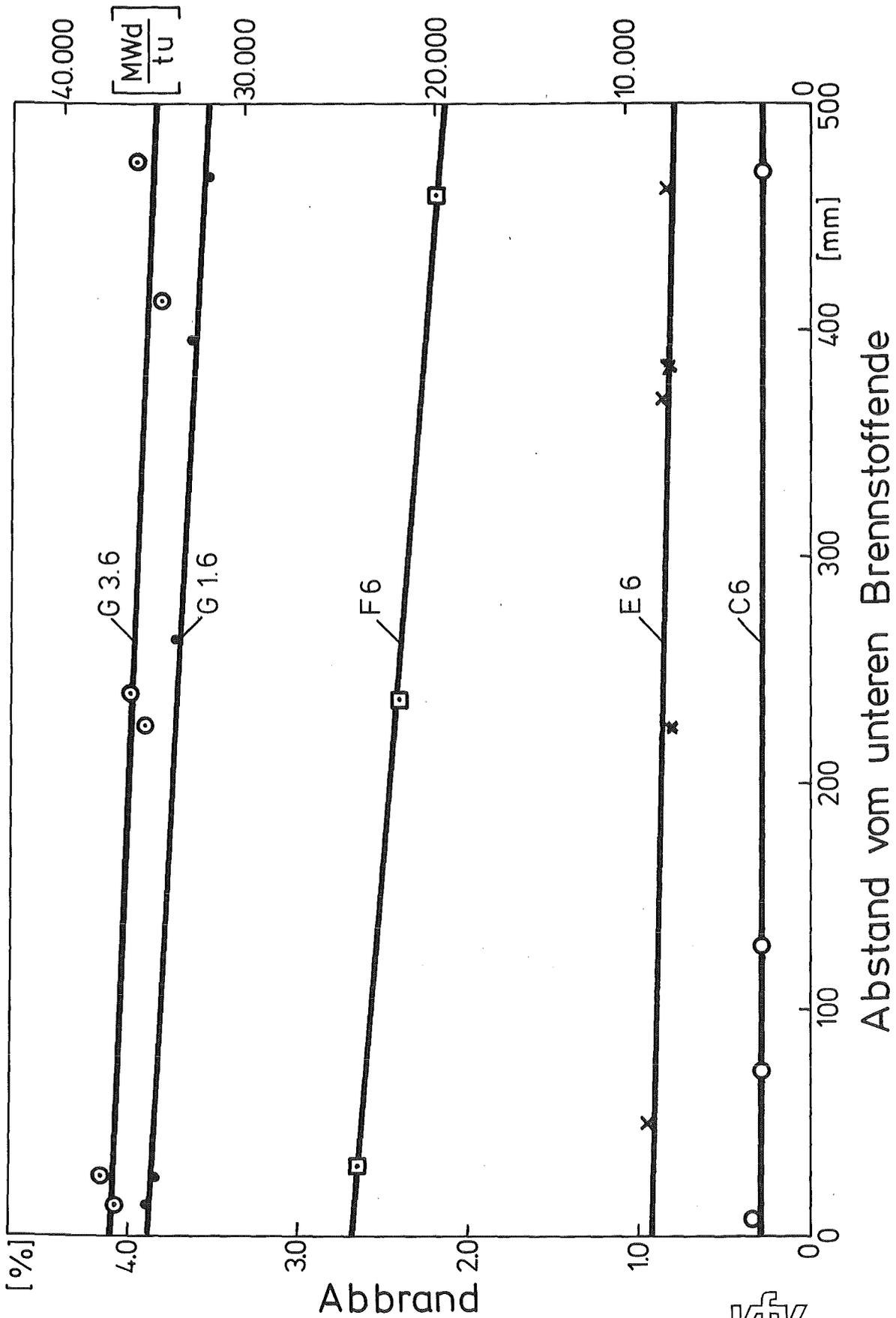
Abb. 1



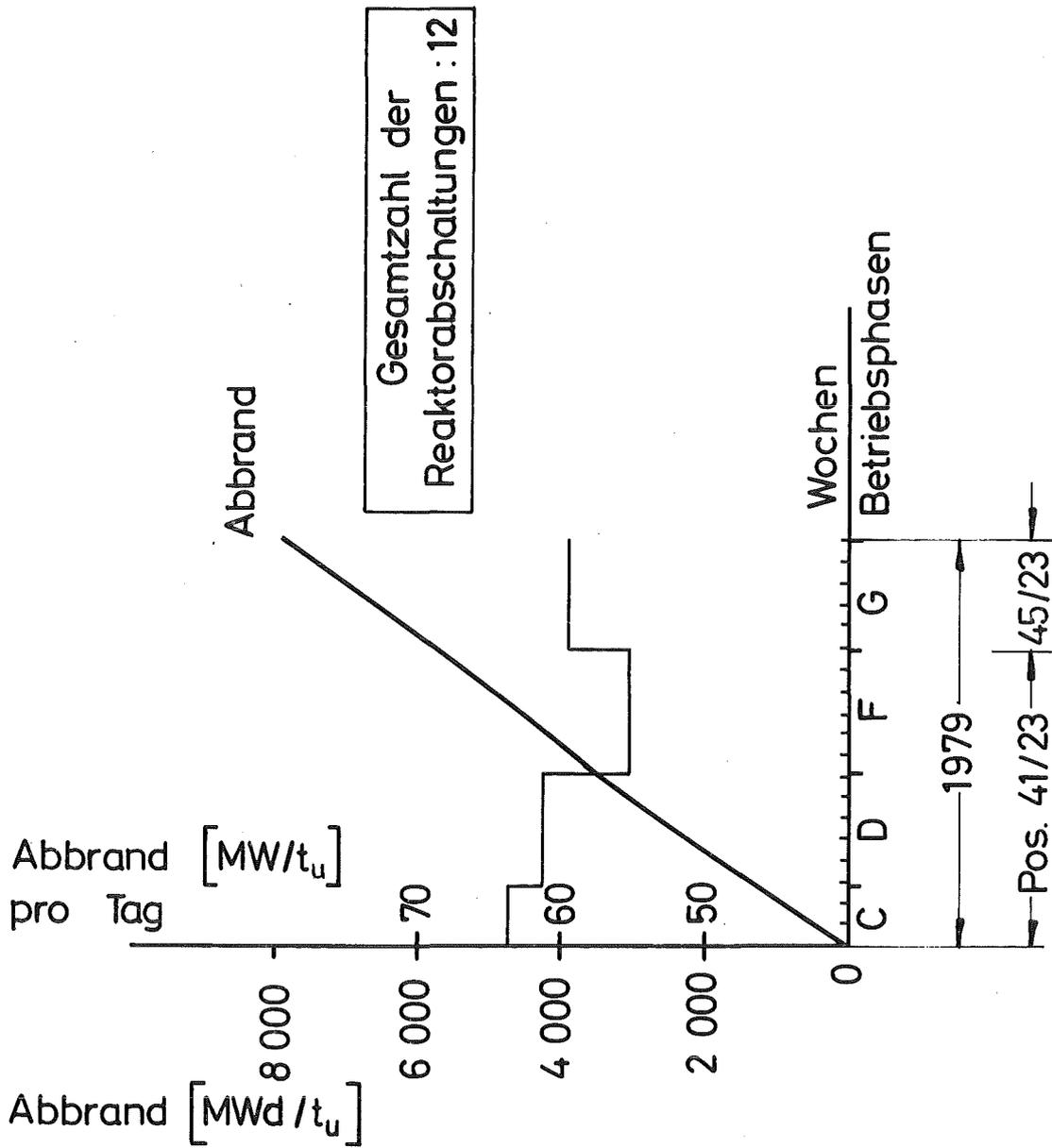
IT 81  
PNS 4237-573

Axiale Abbrandverteilung E 6

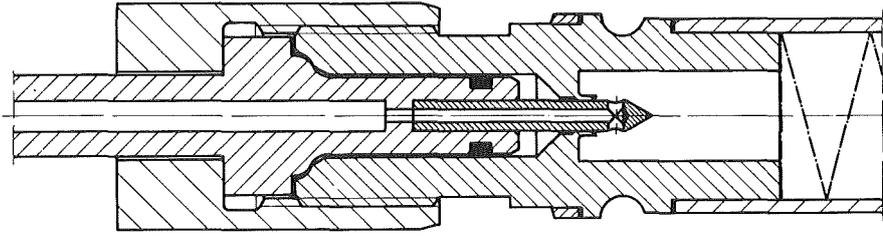
Abb. 2.1



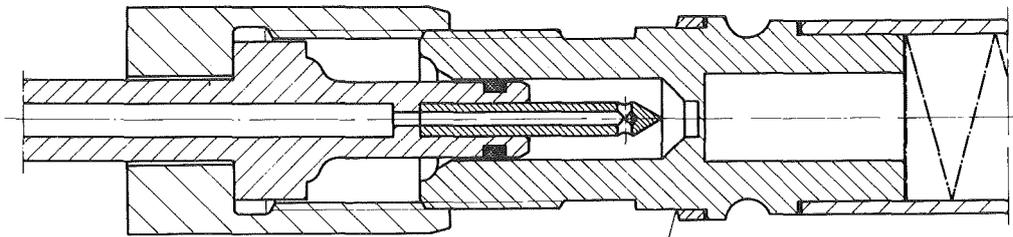
Axiale Abbrandverteilung C6, E6, F6, G1.6, G3.6



Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung  
Bündel E, Abbrand 7 900 MWd/t<sub>u</sub> Abb.: 3

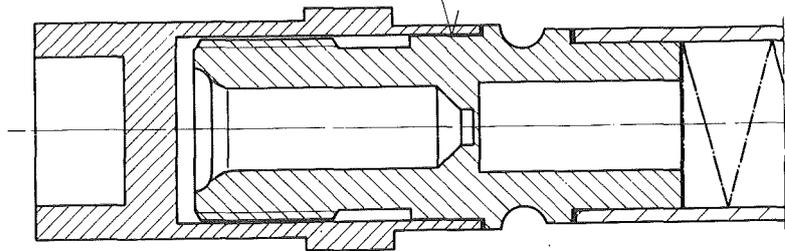


Ankoppelung Prüfingsendstopfen  
nach Membrandurchstich



Ankoppelung Prüfingsendstopfen  
vor Membrandurchstich

Trennstelle Schutzkappe



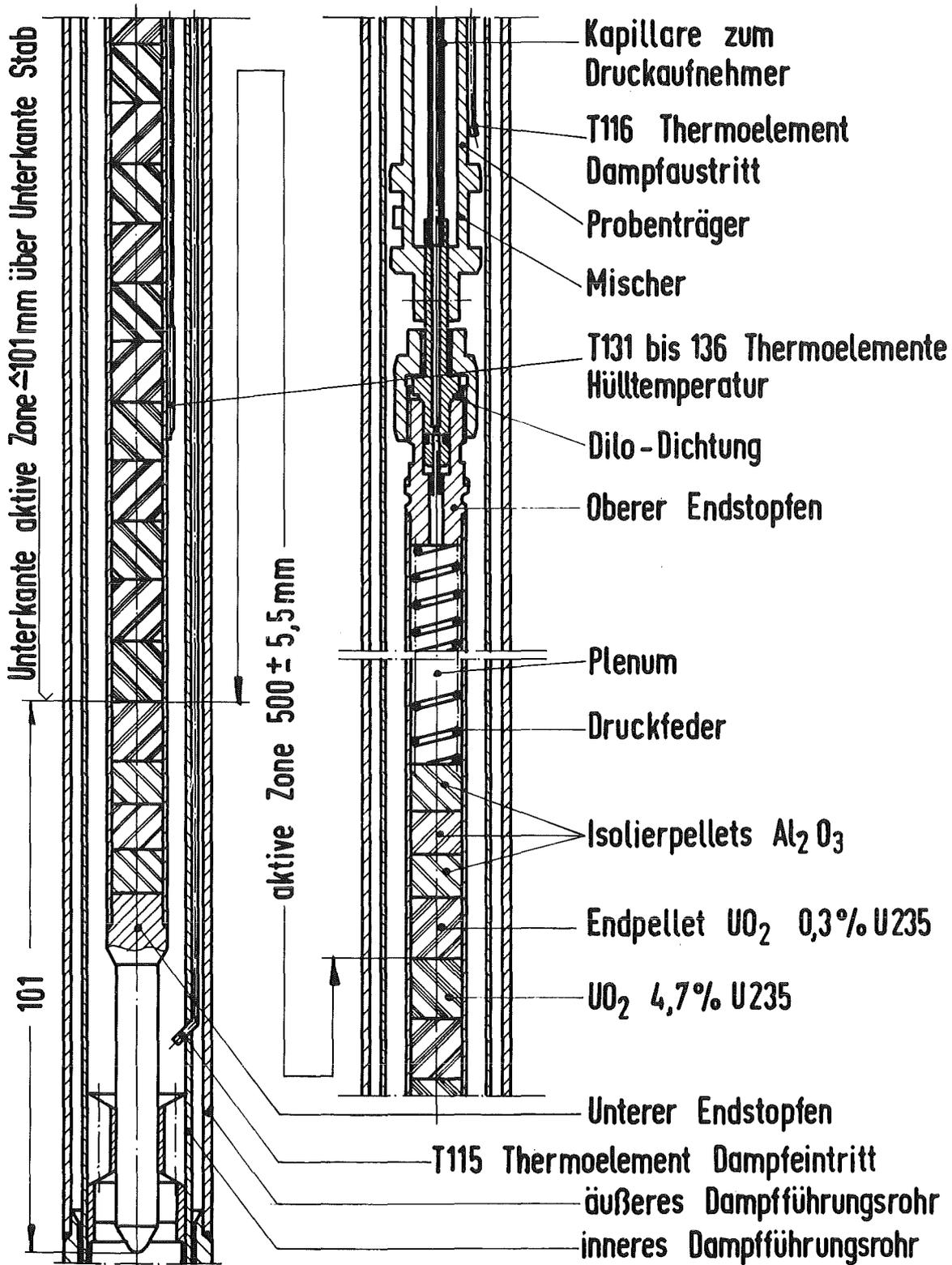
Prüfling mit Schutzkappe  
für Vorbestrahlung

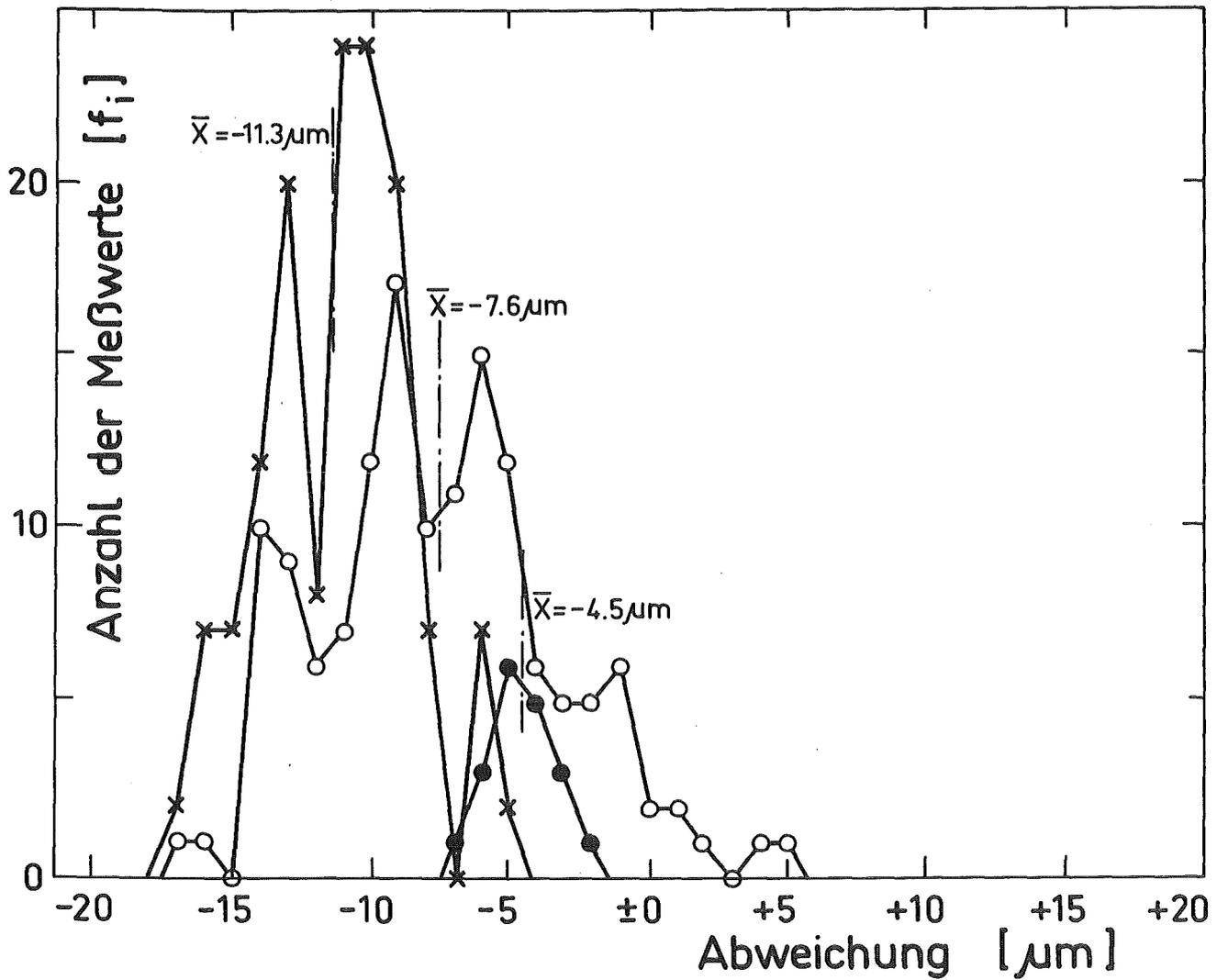


IT78 PNS4237-18

Zur Messung des Stabinnendruckes

Abb.: 4





Hüllrohr × Außendurchmesser :

Nennmaß : 10.750 mm

Mittelwert: 10.739 mm

○ Innendurchmesser :

Nennmaß : 9.300 mm

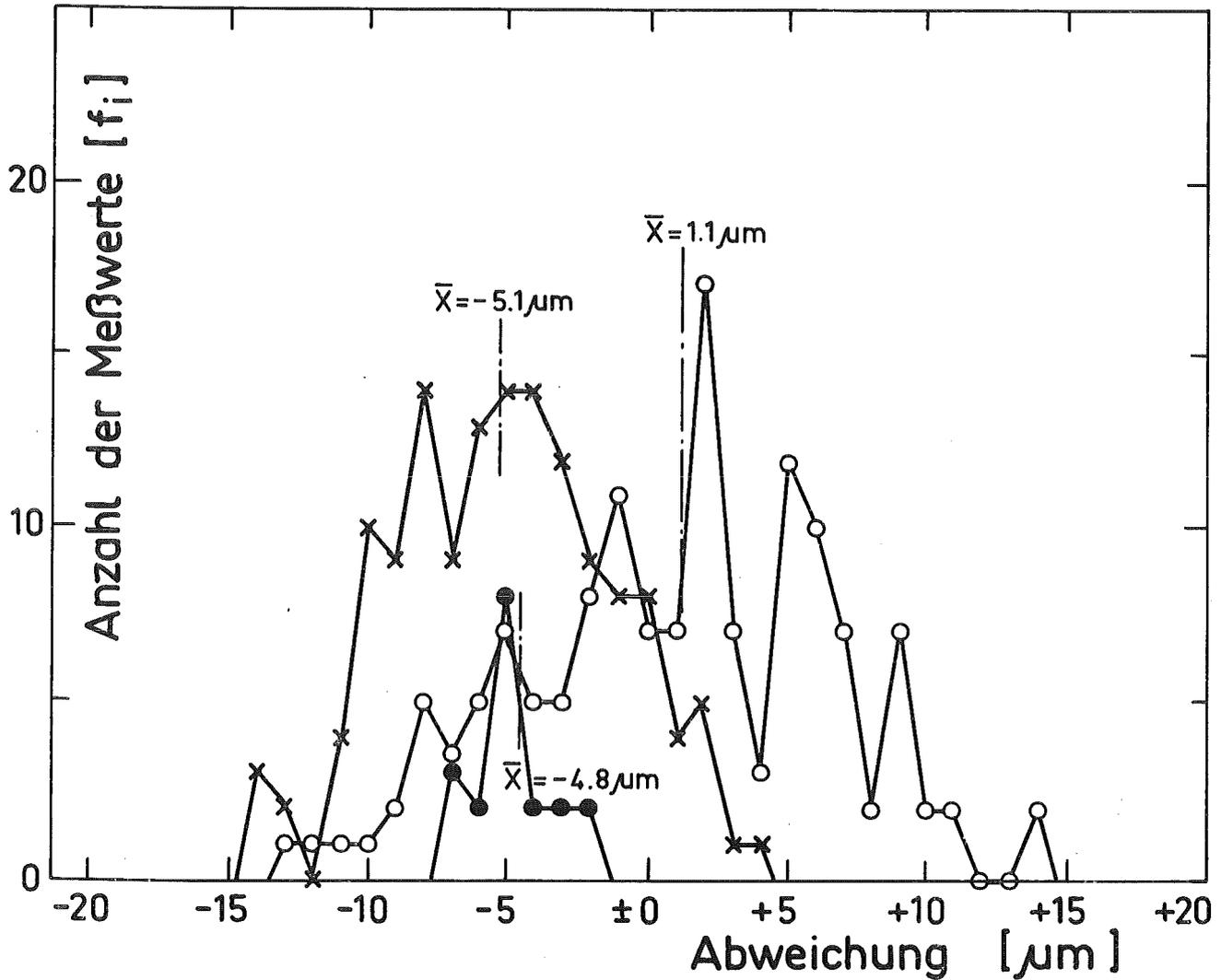
Mittelwert: 9.292 mm

Pellet ● Außendurchmesser :

Nennmaß : 9.110 mm

Mittelwert: 9.105 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.292 - 9.105 = 0.187 \text{ mm}$

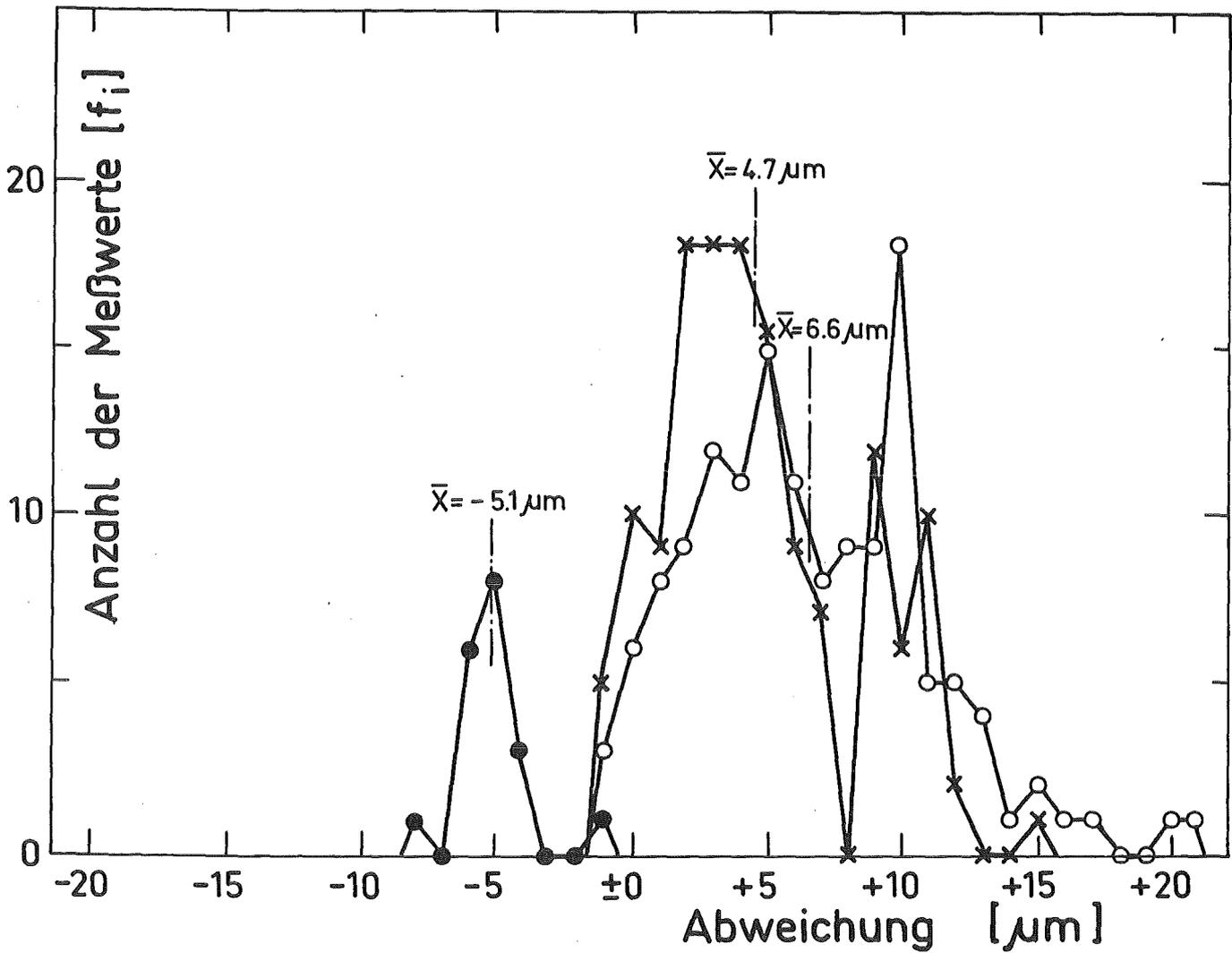


Hüllrohr x Außendurchmesser : Nennmaß : 10.750 mm  
Mittelwert: 10.745 mm

o Innendurchmesser : Nennmaß : 9.300 mm  
Mittelwert: 9.301 mm

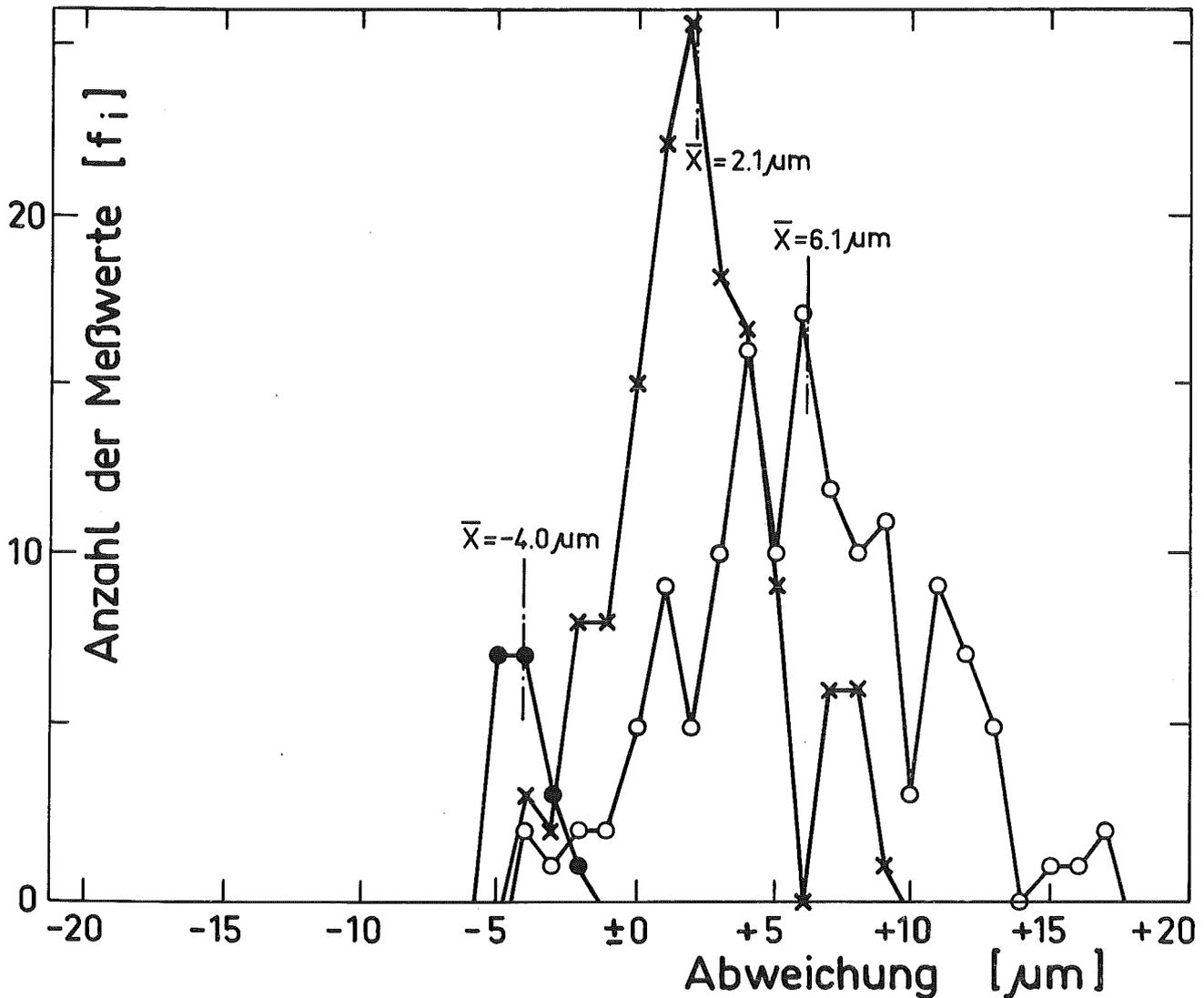
Pellet ● Außendurchmesser : Nennmaß : 9.110 mm  
Mittelwert: 9.105 mm

**Einfüllspiel:  $S_E = 9.301 - 9.105 = 0.196$  mm**



<u>Hüllrohr</u> × <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
	Mittelwert : 10.755 mm
○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
	Mittelwert : 9.307 mm
<u>Pellet</u> ● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm
	Mittelwert : 9.105 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.307 - 9.105 = 0.202 \text{ mm}$

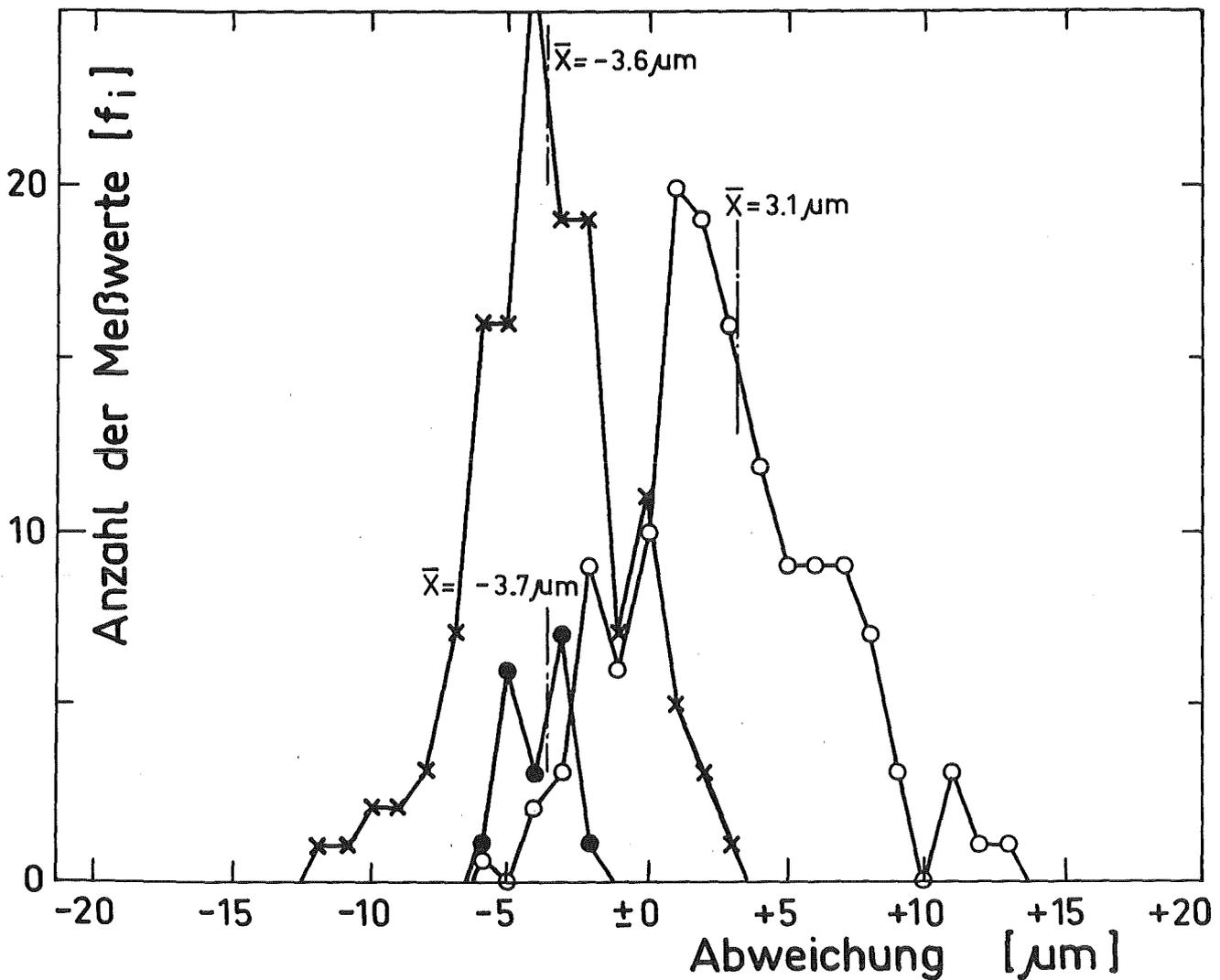


Hüllrohr x Außendurchmesser : Nennmaß : 10.750 mm  
Mittelwert: 10.752 mm

o Innendurchmesser : Nennmaß : 9.300 mm  
Mittelwert: 9.306 mm

Pellet ● Außendurchmesser : Nennmaß : 9.110 mm  
Mittelwert: 9.106 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.306 - 9.106 = 0.200 \text{ mm}$



Hüllrohr × Außendurchmesser :

Nennmaß : 10.750 mm

Mittelwert: 10.746 mm

○ Innendurchmesser :

Nennmaß : 9.300 mm

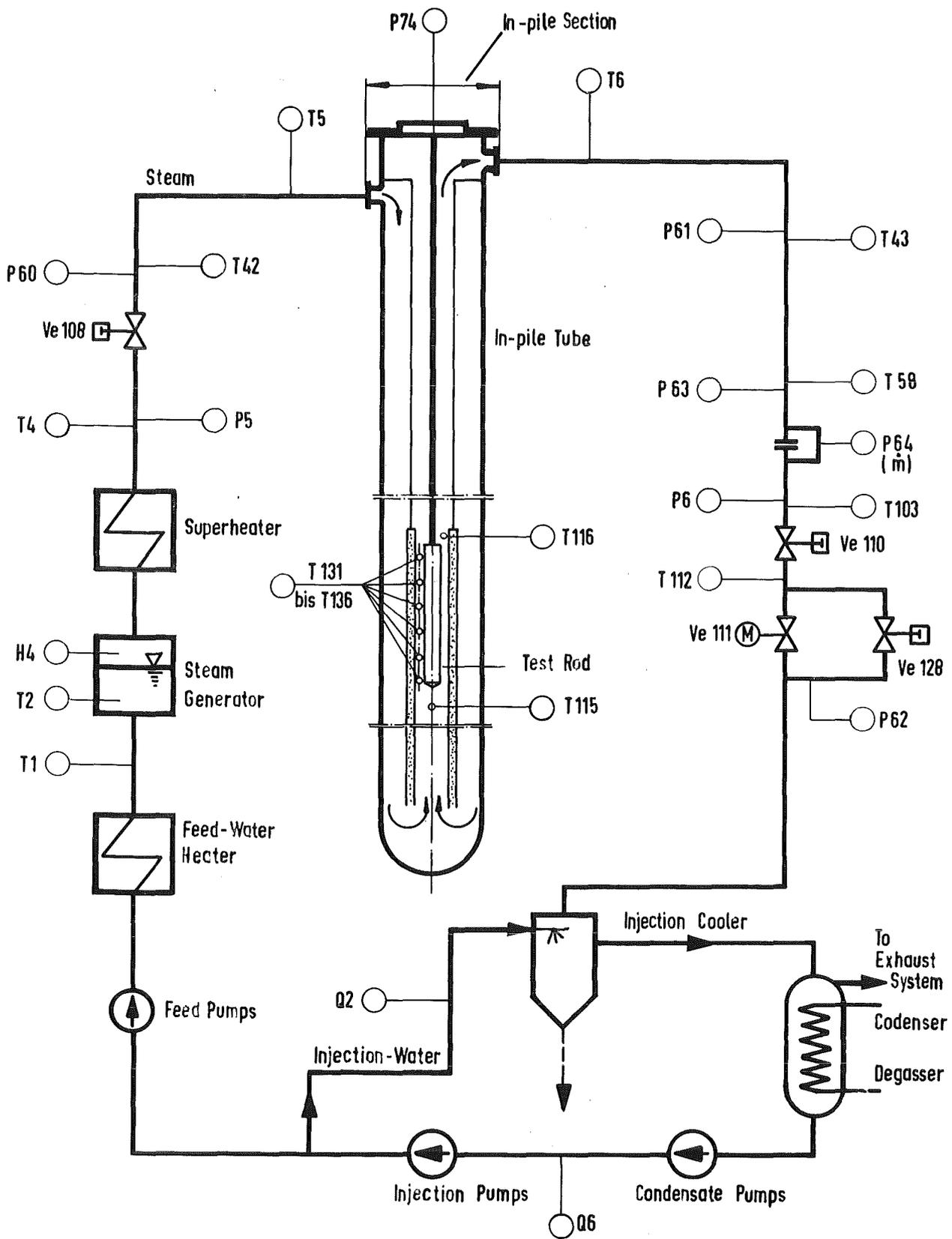
Mittelwert: 9.303 mm

Pellet ● Außendurchmesser :

Nennmaß : 9.110 mm

Mittelwert: 9.106 mm

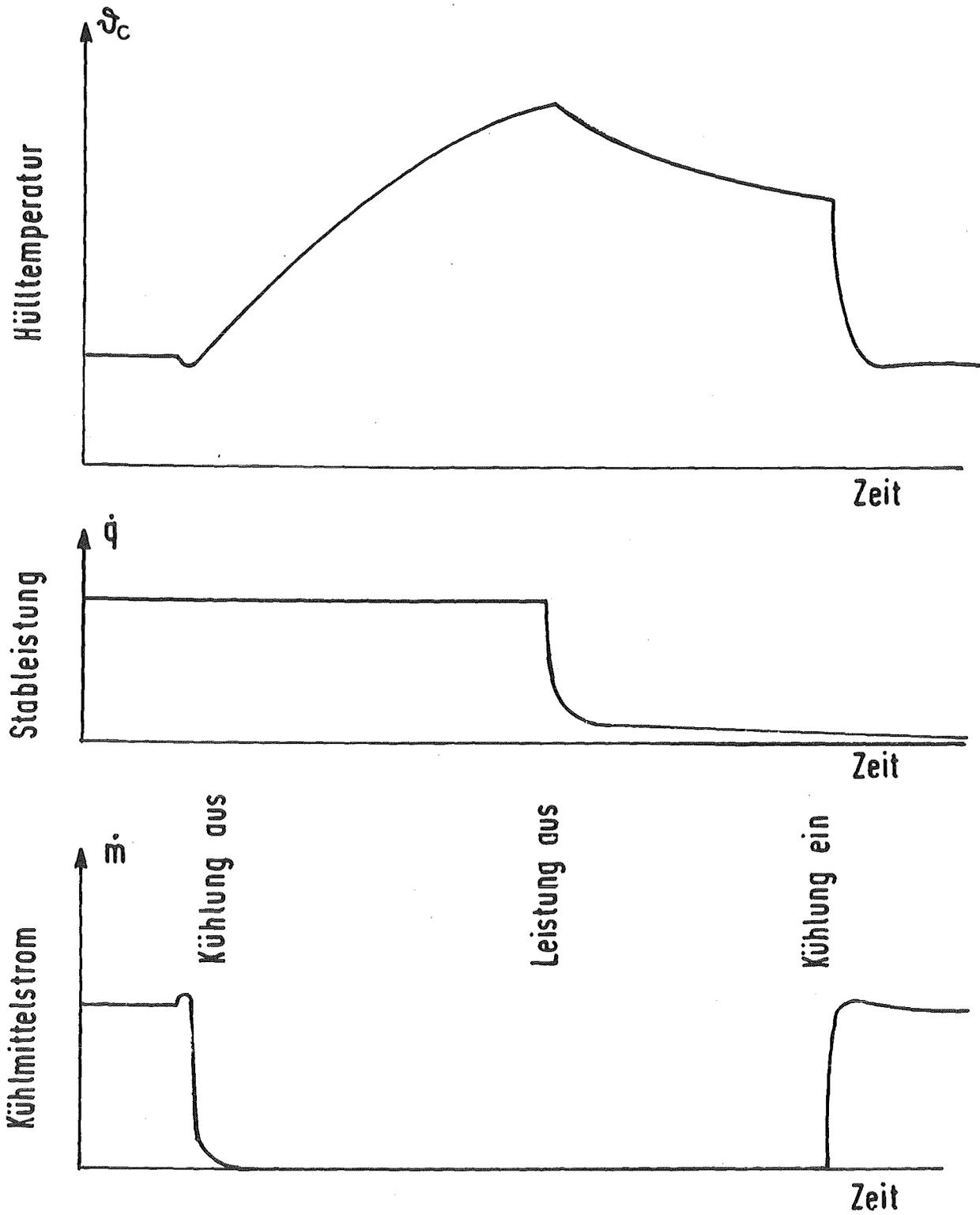
Einfüllspiel:  $S_E = 9.303 - 9.106 = 0.197 \text{ mm}$



**OK**  
RBT/IT-1978  
PNS 4237-87.1

**FR2 DK Loop. High Pressure Section, Simplified**

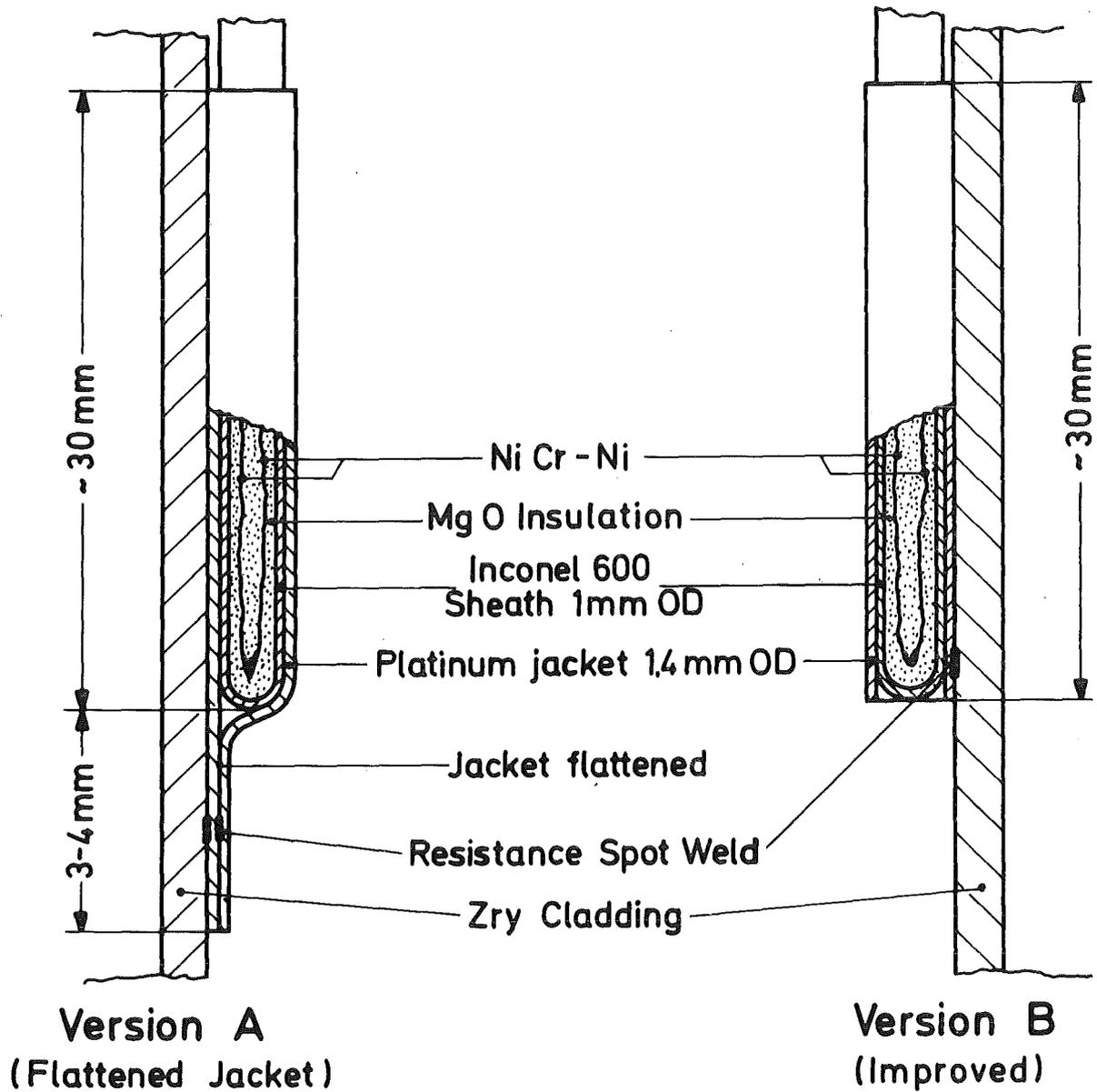
**Abb. 7**



11-1977  
PNS 4237-59.1

# Versuchsablauf, Schema

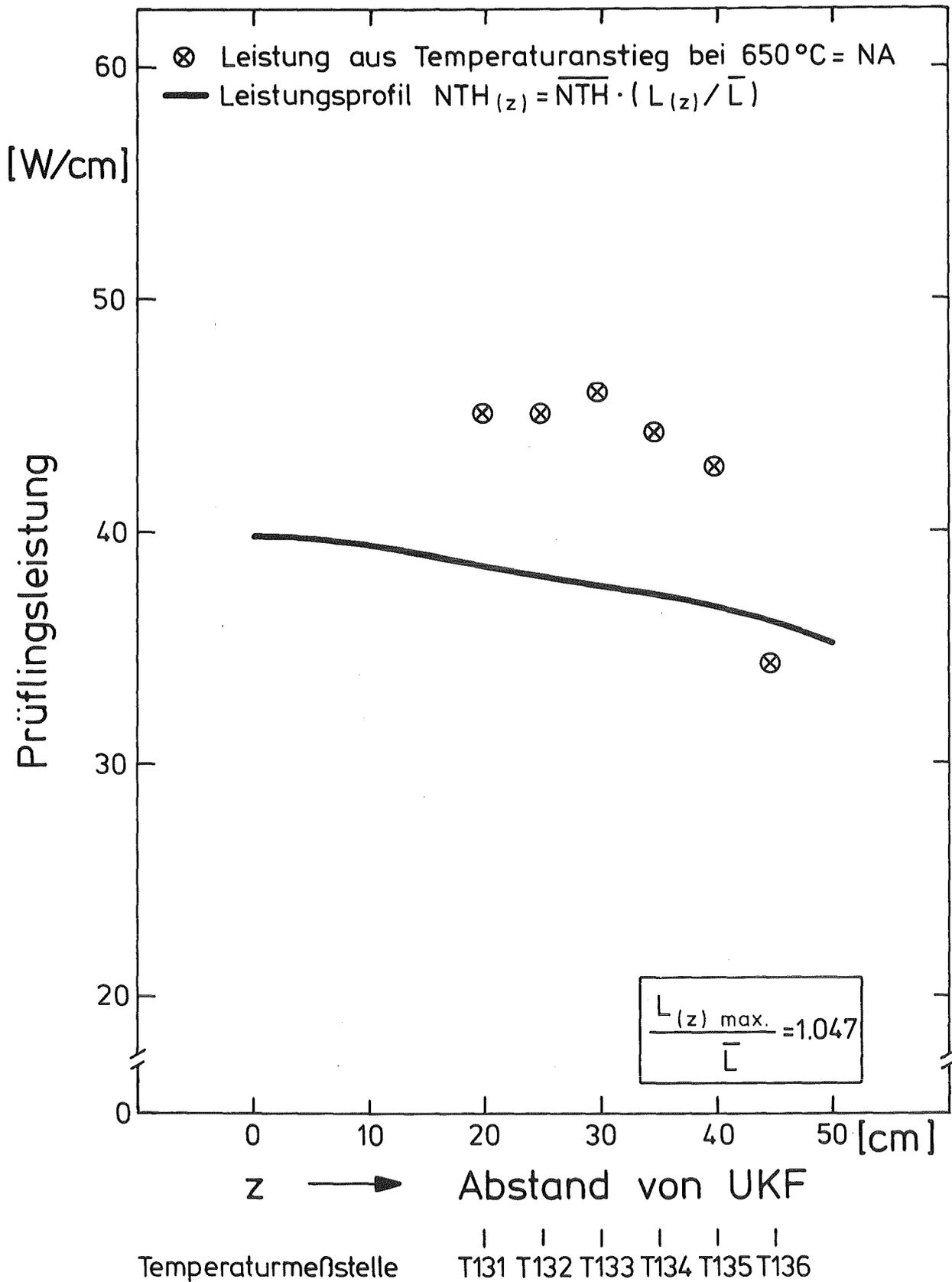
Abb.: 8



**KIK** IT-80  
PNS4237-300

**FR2 In-Pile Tests:**  
Cladding Thermocouple (Schematic)

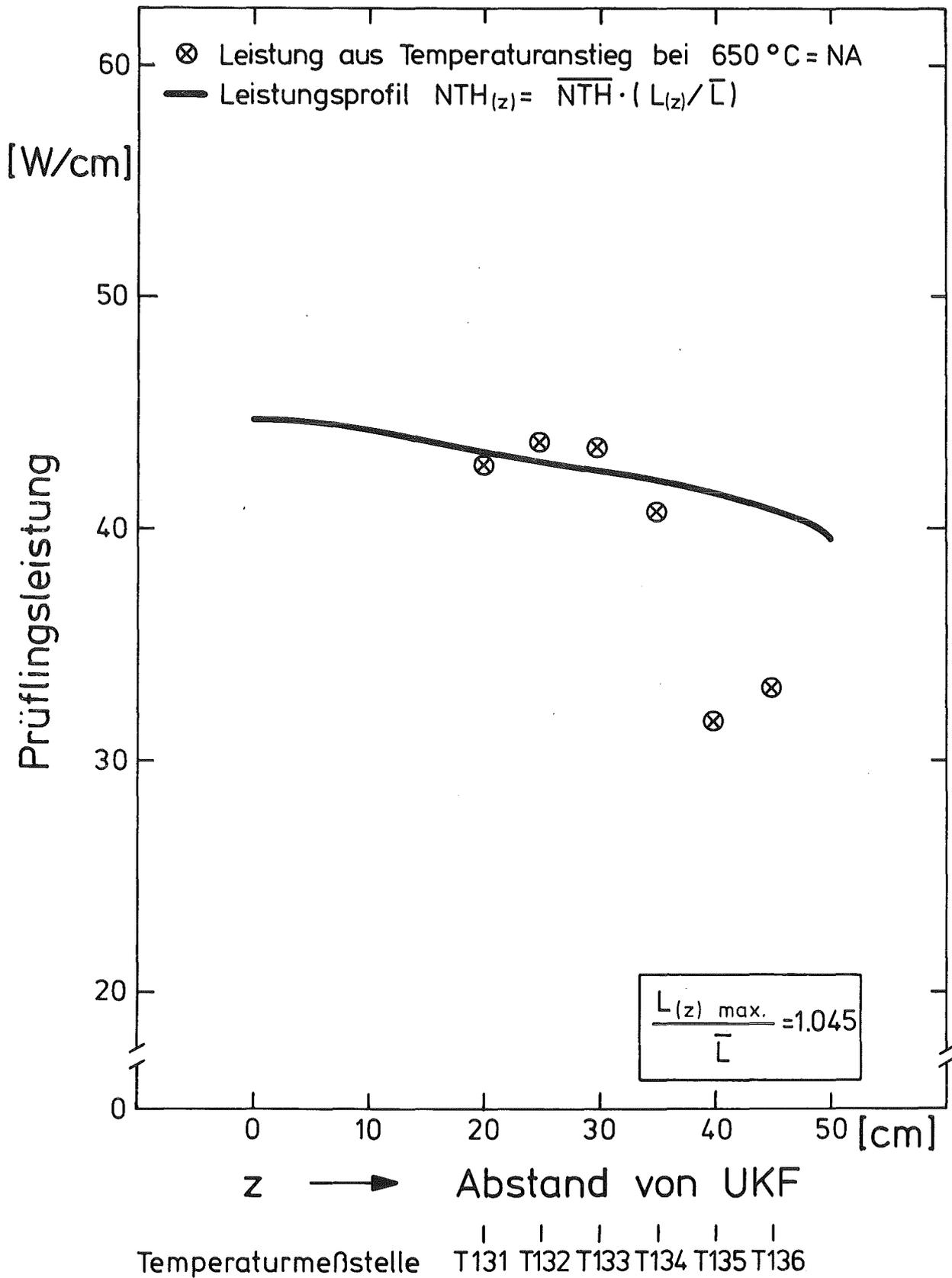
Abb.:9



IT 80  
PNS 4237 486.37

# FR 2 In-Pile Versuche E 1

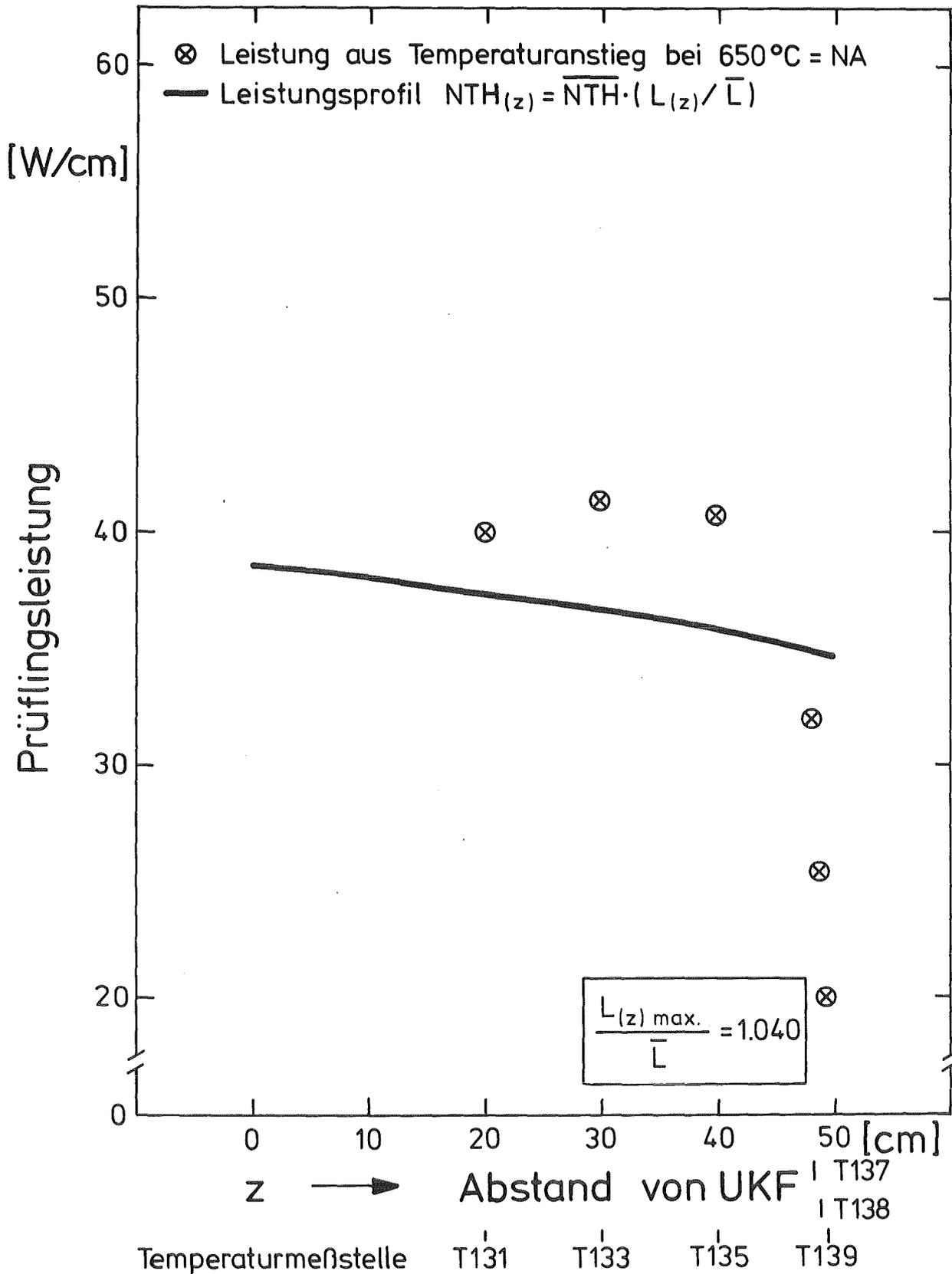
Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb.:10.1



IT80  
PNS 4237-486.38

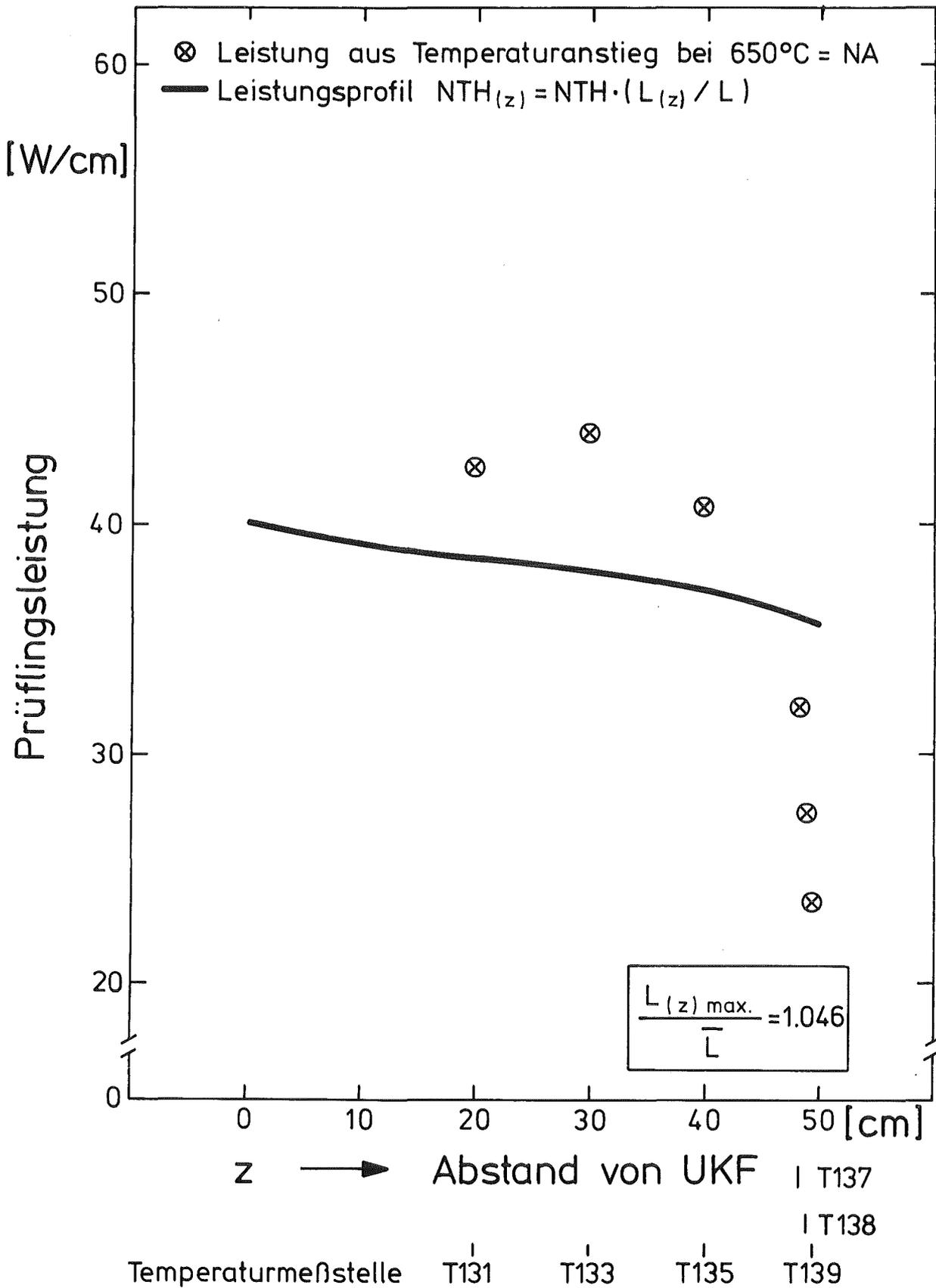
# FR2 In-Pile Versuche E2

Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb.: 10.2



# FR2 In-Pile Versuche E 3

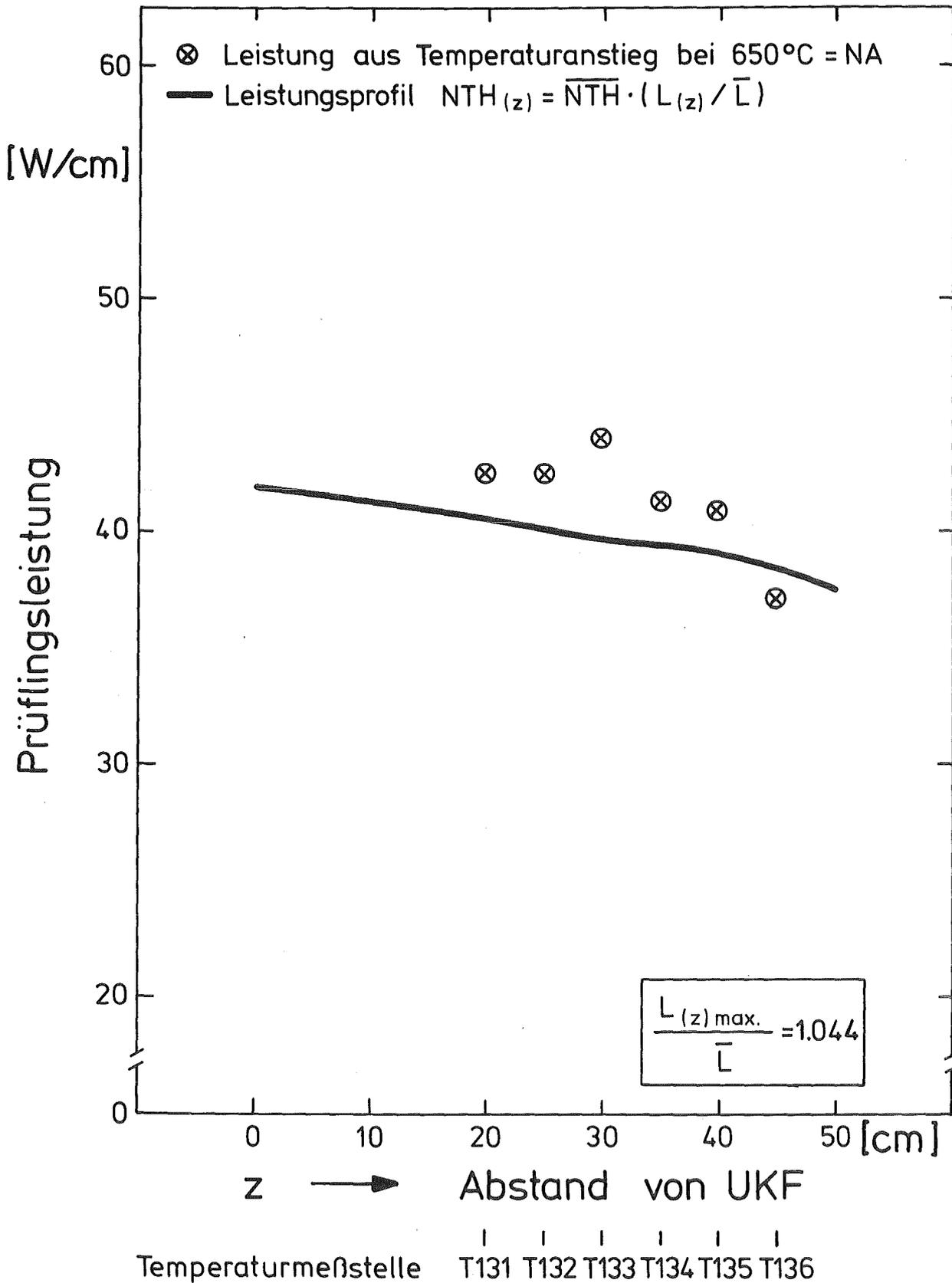
Prüfungsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb. 10.3



IT80  
PNS 4237-486.40

# FR 2 In-Pile Versuche E4

Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb.10.4

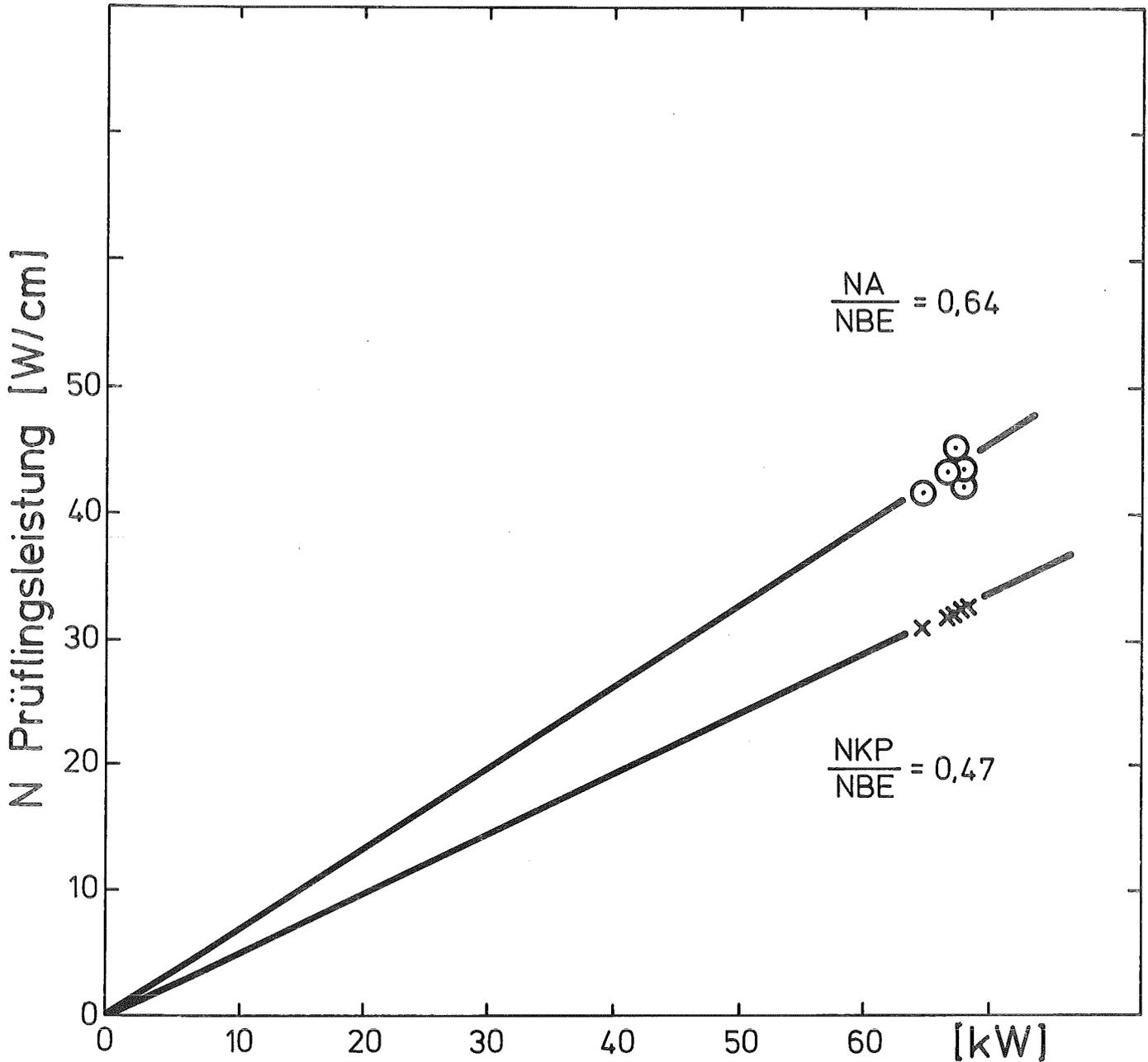


IT 80  
PNS 4237-486.41

# FR2 In-Pile Versuche

# E 5

Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb.:10.5



NBE = Leistung der umgebenden Brennelemente

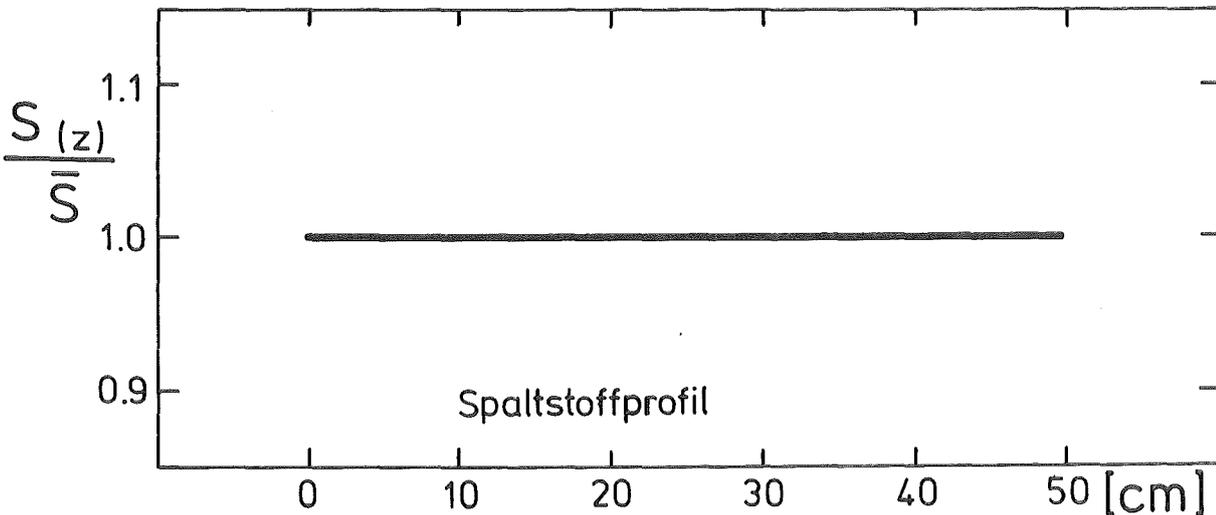
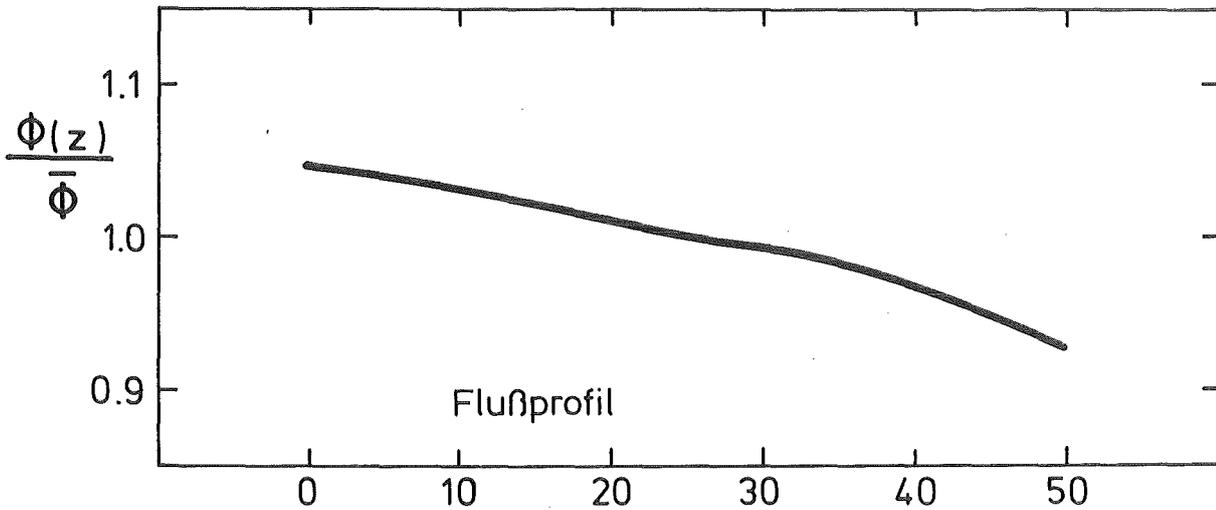
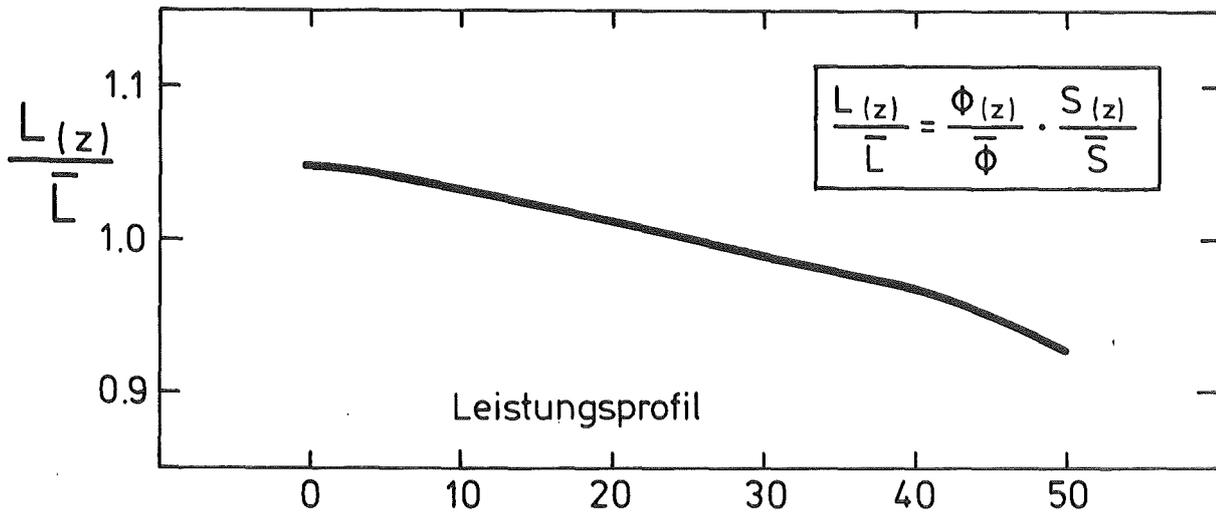
⊙ NA = Prüfungsleistung aus Temperaturanstieg

× NKP = „reaktorphysikalische“ Prüfungsleistung

## FR 2 In - Pile Versuche : E

Prüfungsleistungen NA und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente NBE

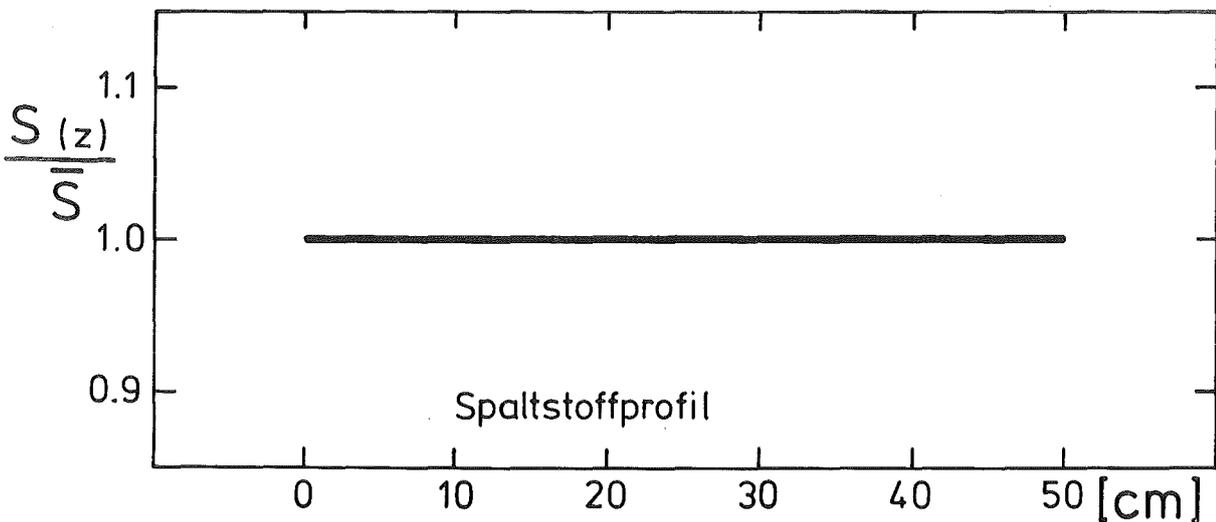
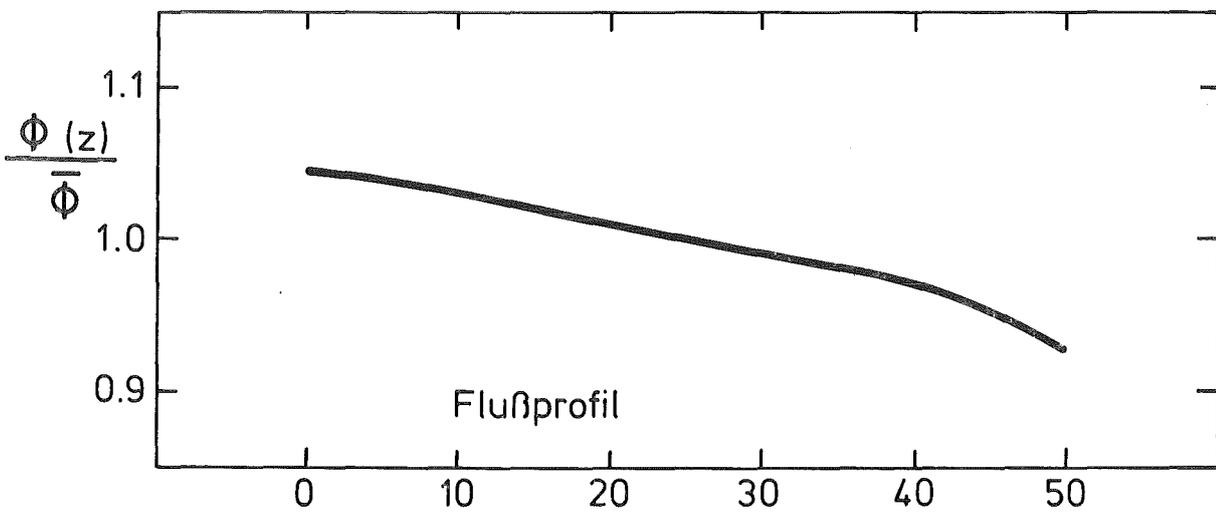
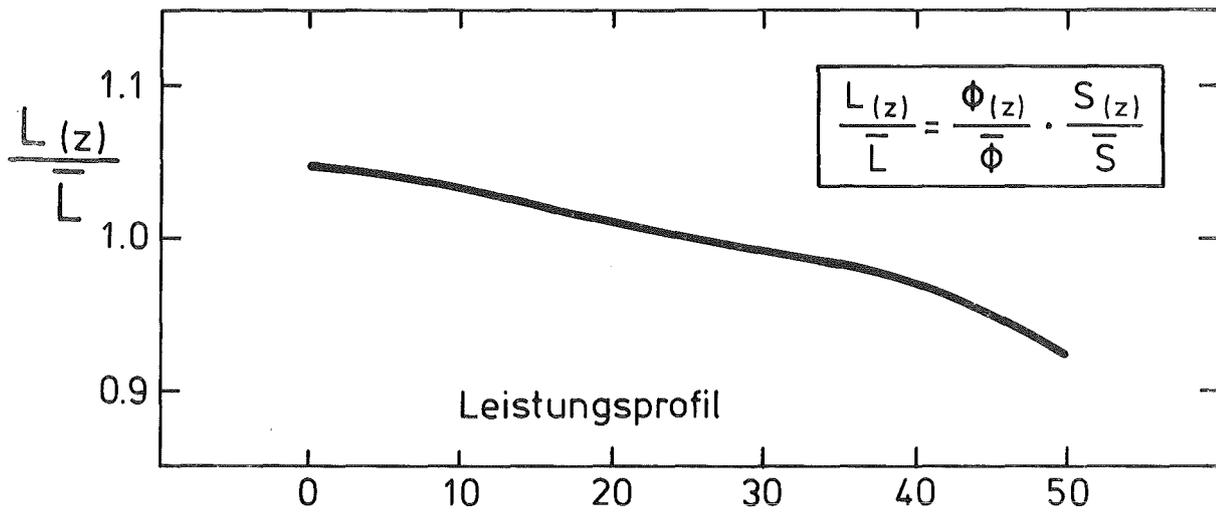
Abb.11



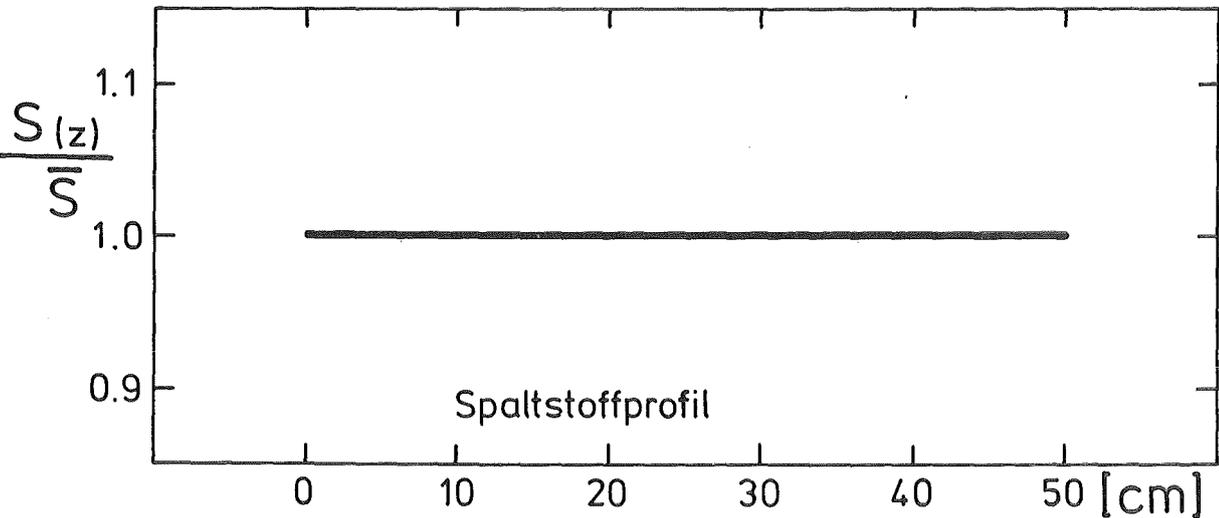
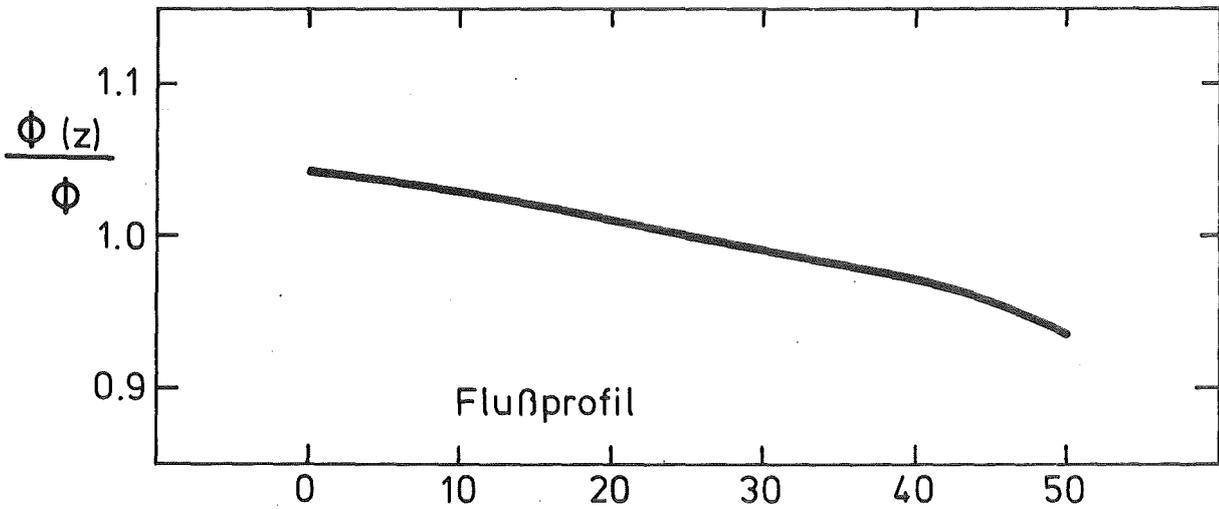
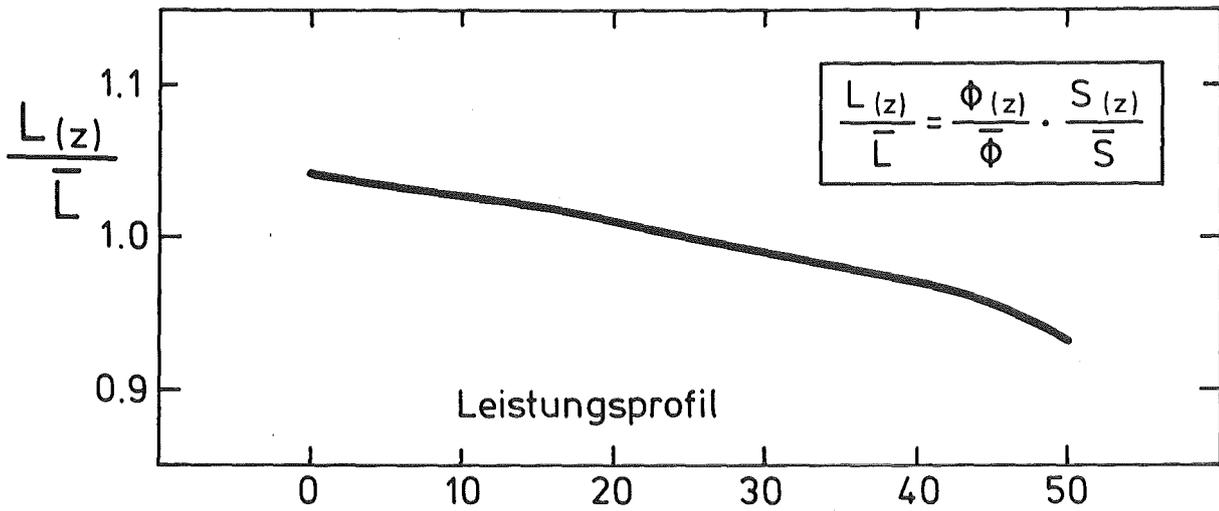
z → Abstand von UKF



IT 79  
PNS 4237-248.37



z → Abstand von UKF



z → Abstand von UKF



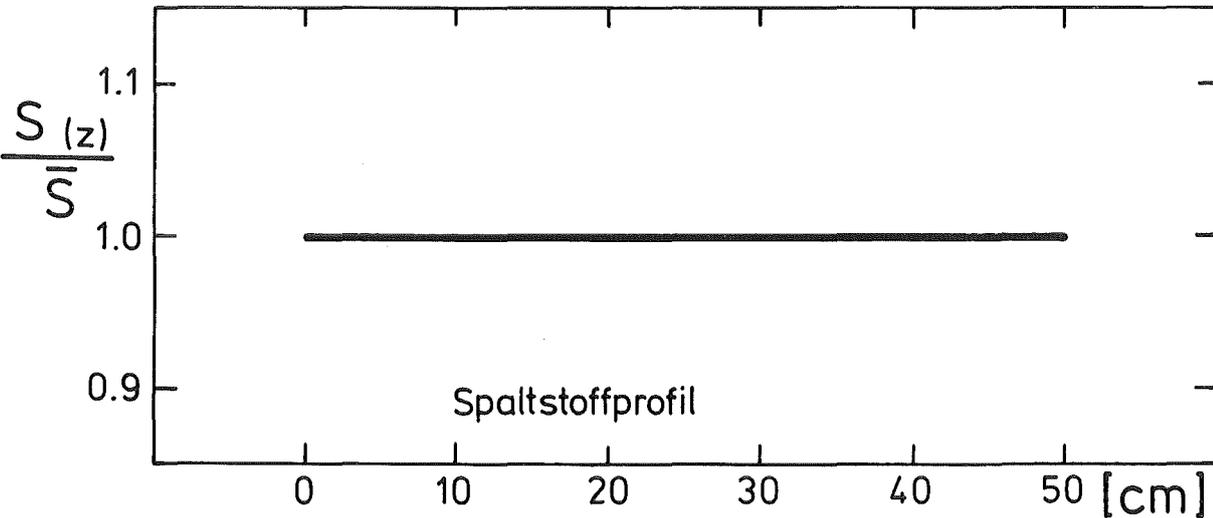
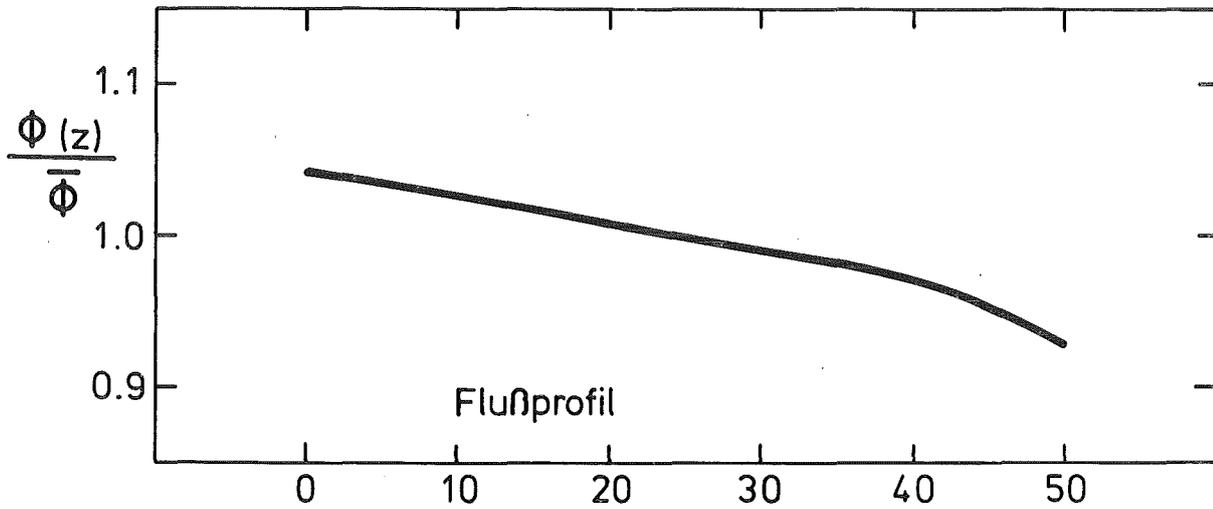
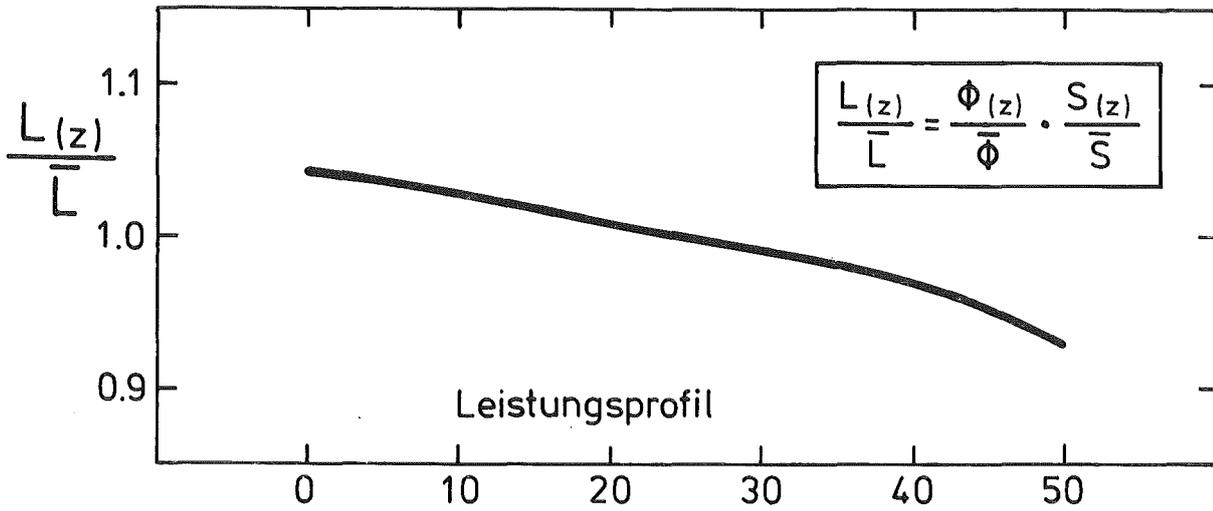
IT 79  
PNS4237-248.39

# Normierte Axialprofile am Prüfling

Versuch: E3

Stab Nr.: 46

Abb.: 12.3



z → Abstand von UKF



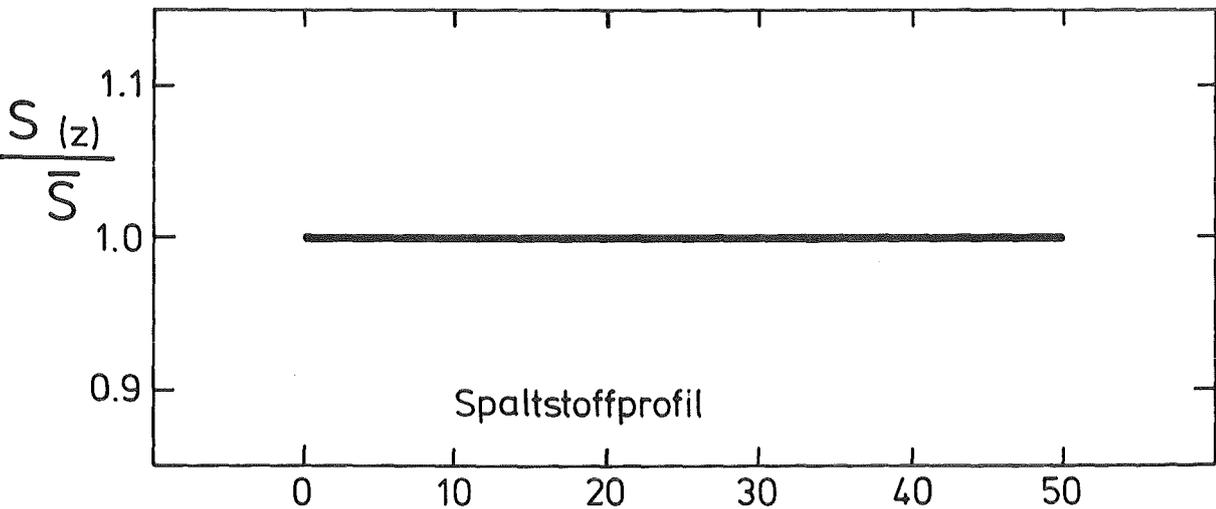
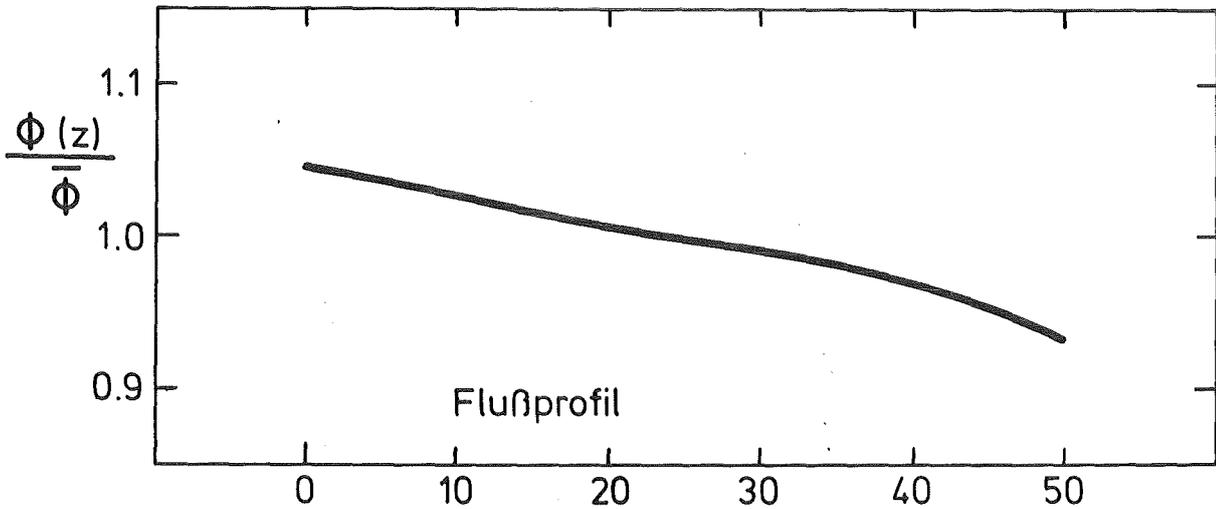
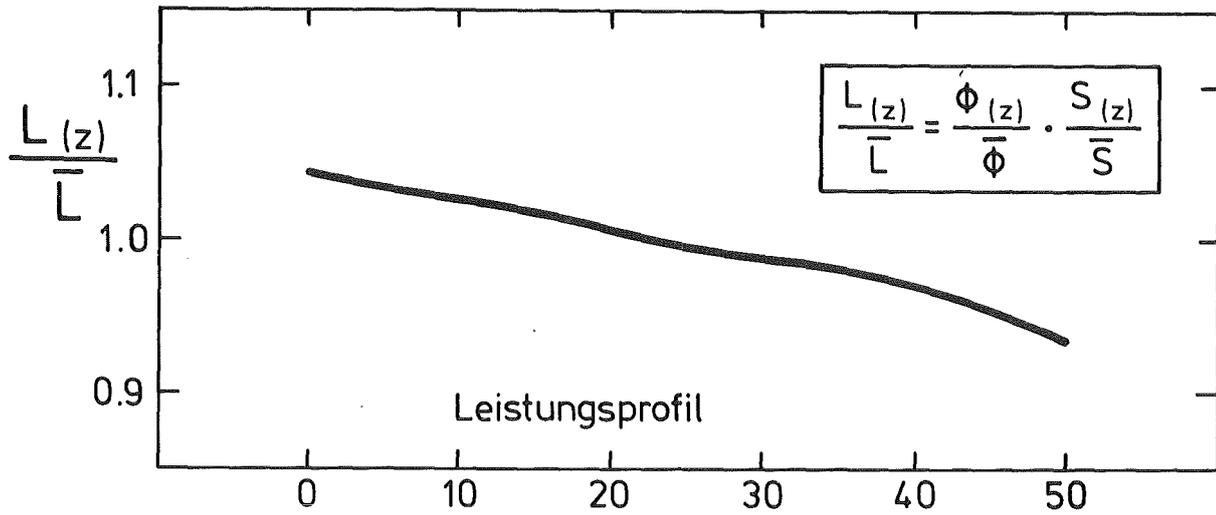
IT 79  
PNS 4237-248.40

# Normierte Axialprofile am Prüfling

Versuch: E4

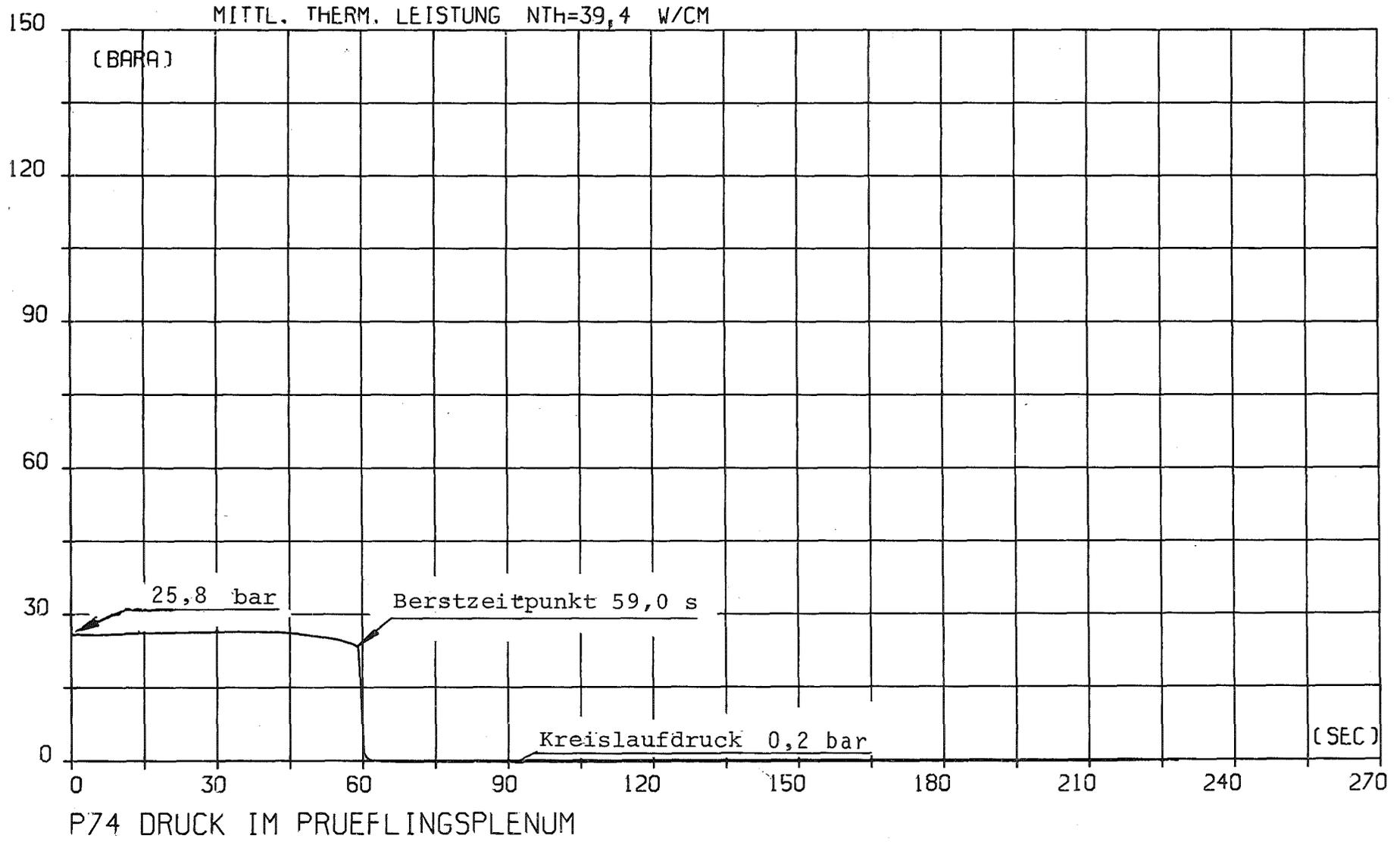
Stab Nr.: 47

Abb.: 12.4

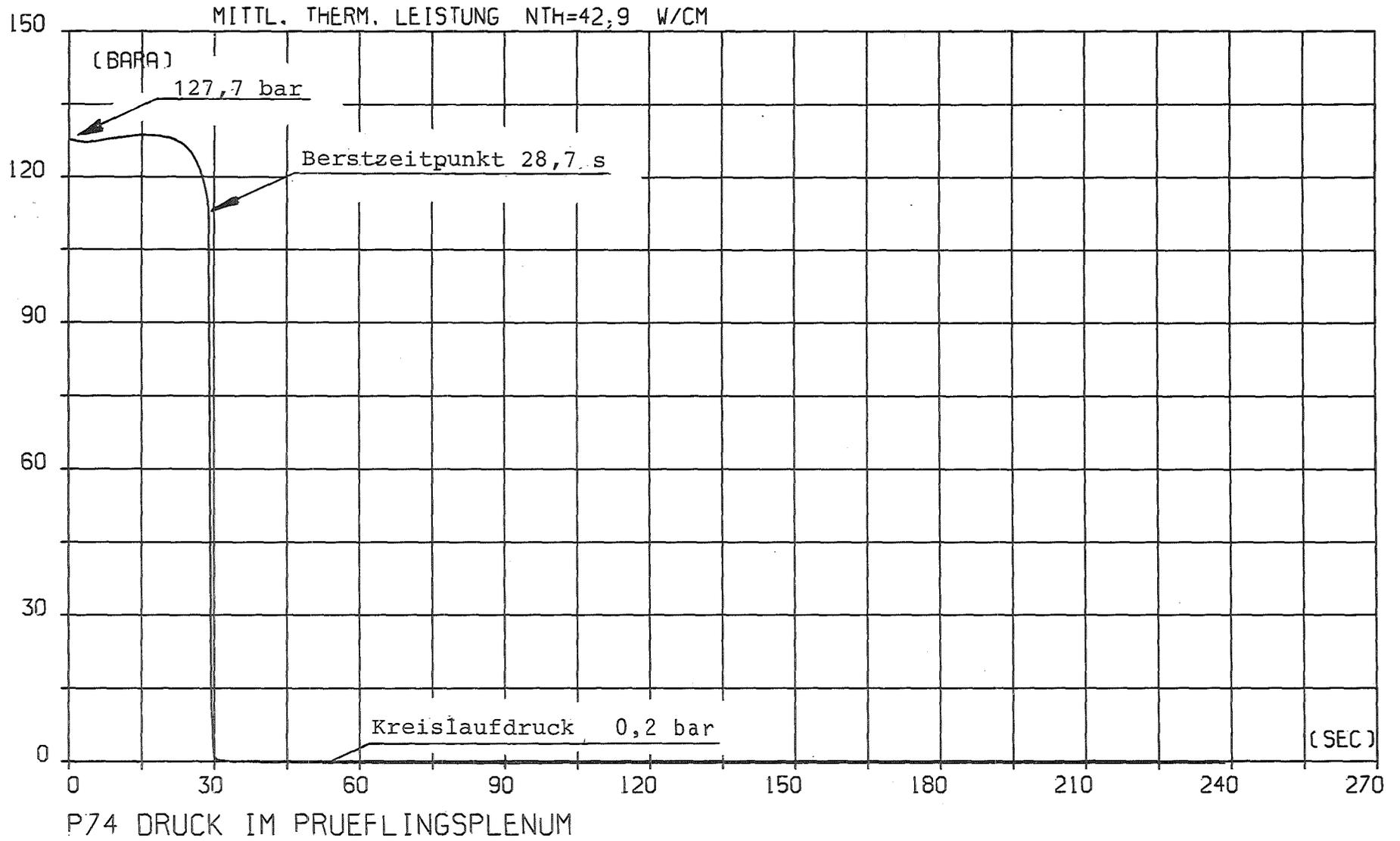


z → Abstand von UKF

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 1  
VOM 20.02.80 ZEIT 15H39M07S

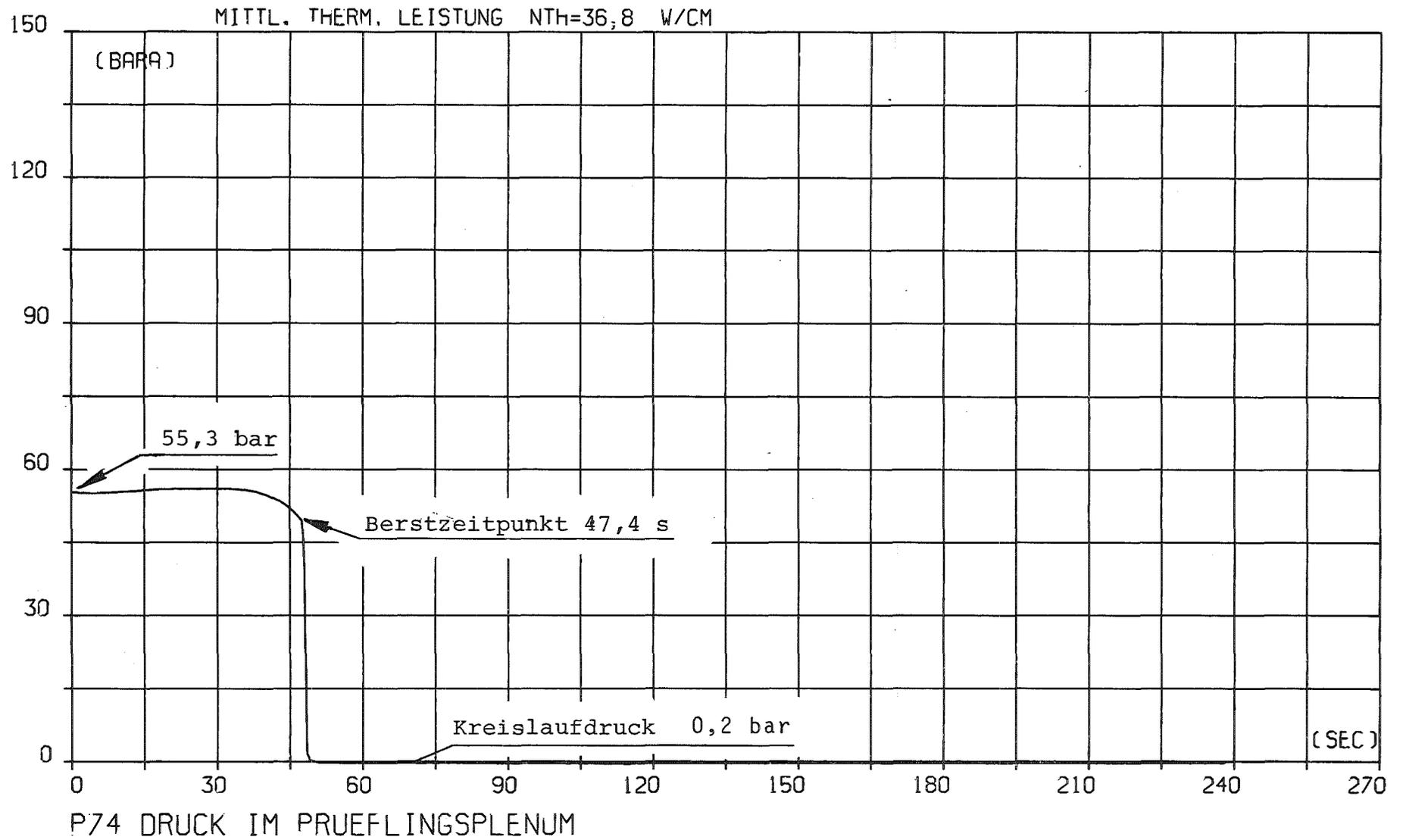


PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 2  
VOM 22.02.80 ZEIT 11H17M32S

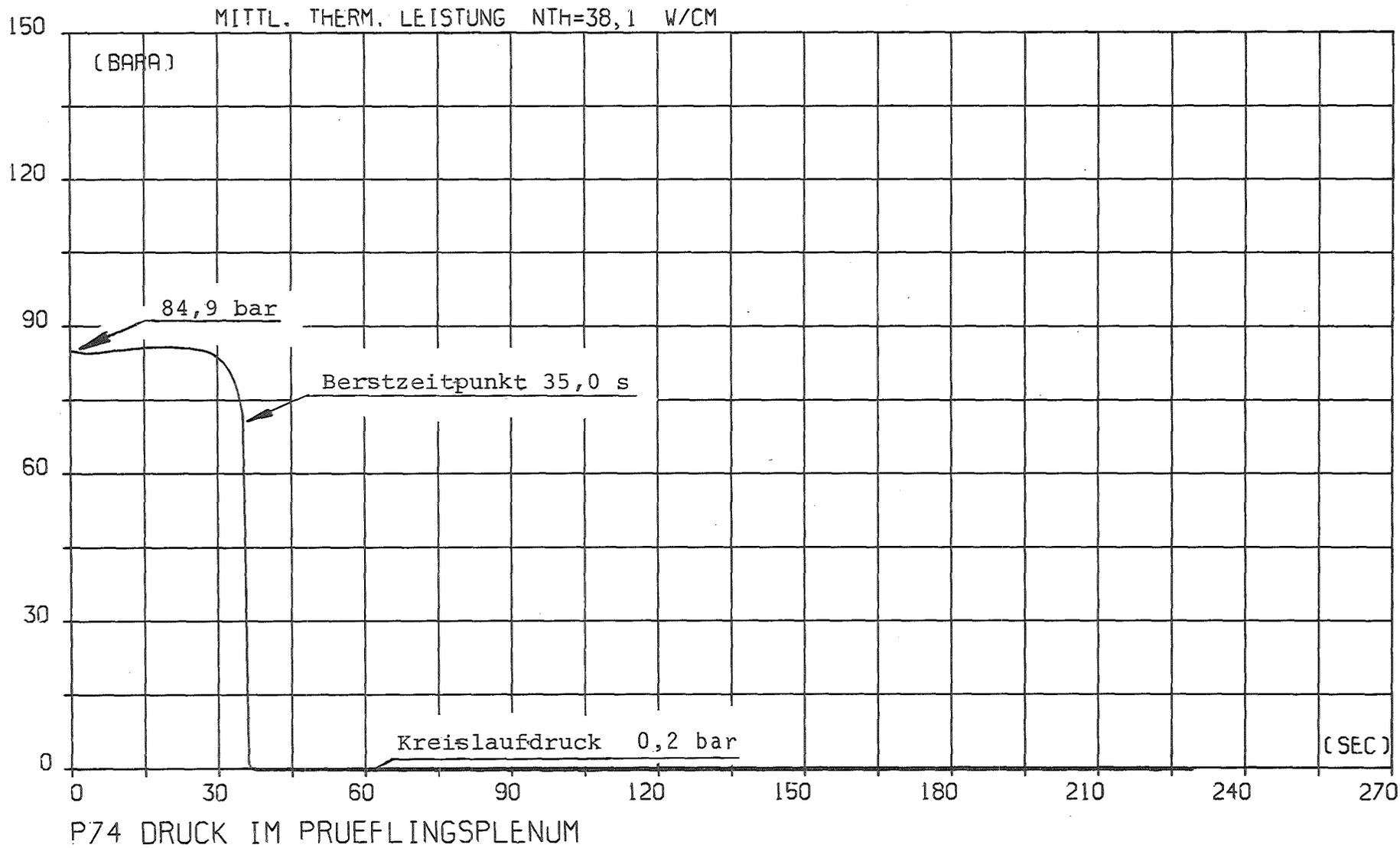


DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH E 2  
ABB. 13.2

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 3  
VOM 26.02.80 ZEIT 11H00M48S



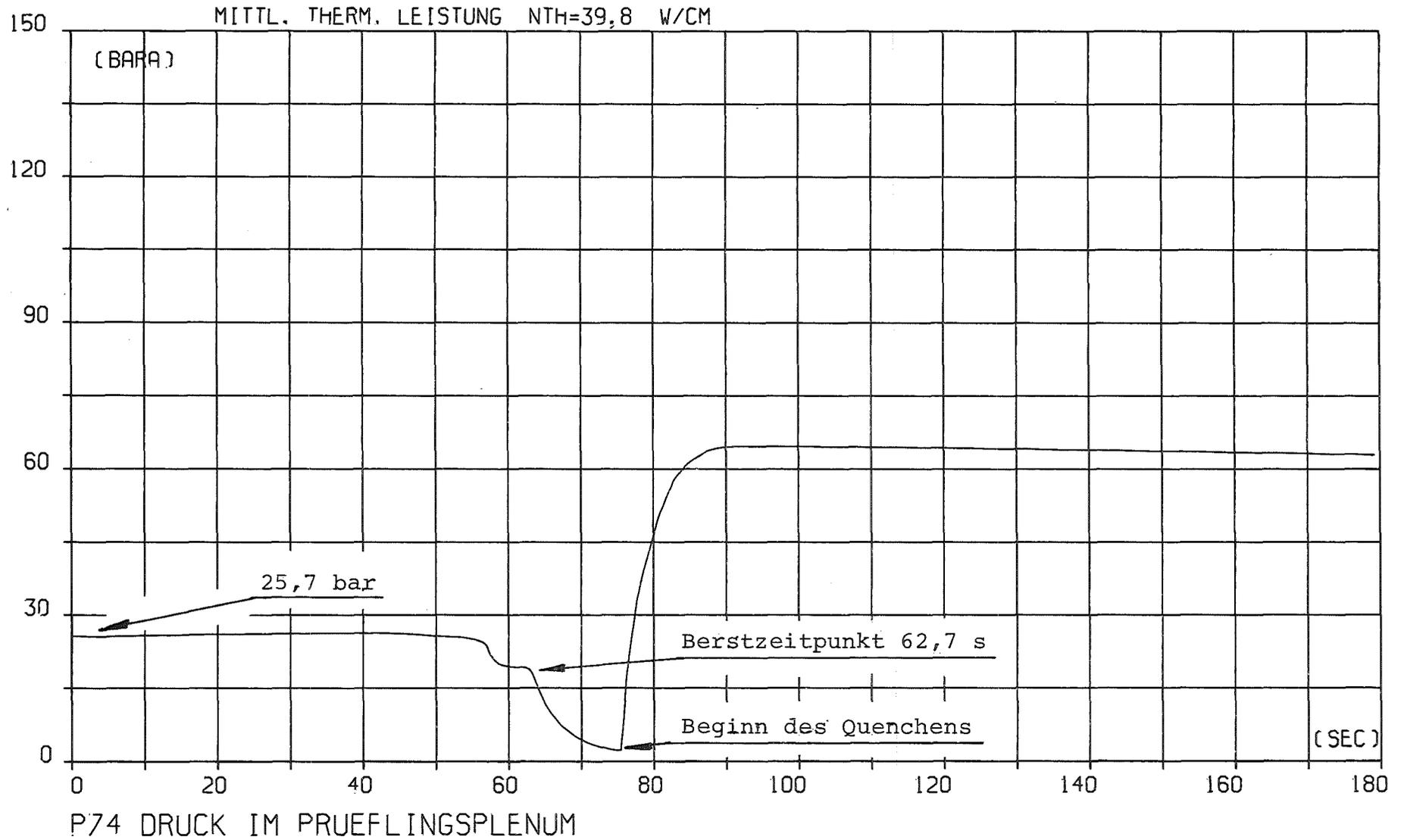
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 4  
VOM 29.02.80 ZEIT 11H04M01S



DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH E 4

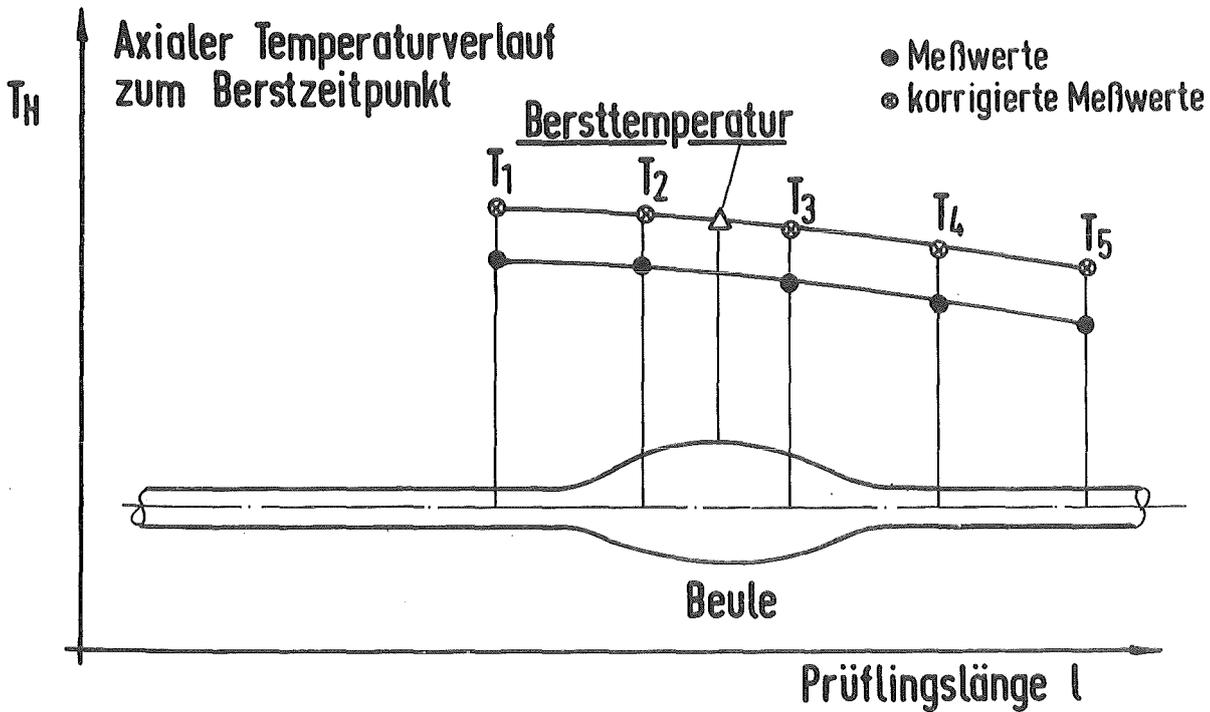
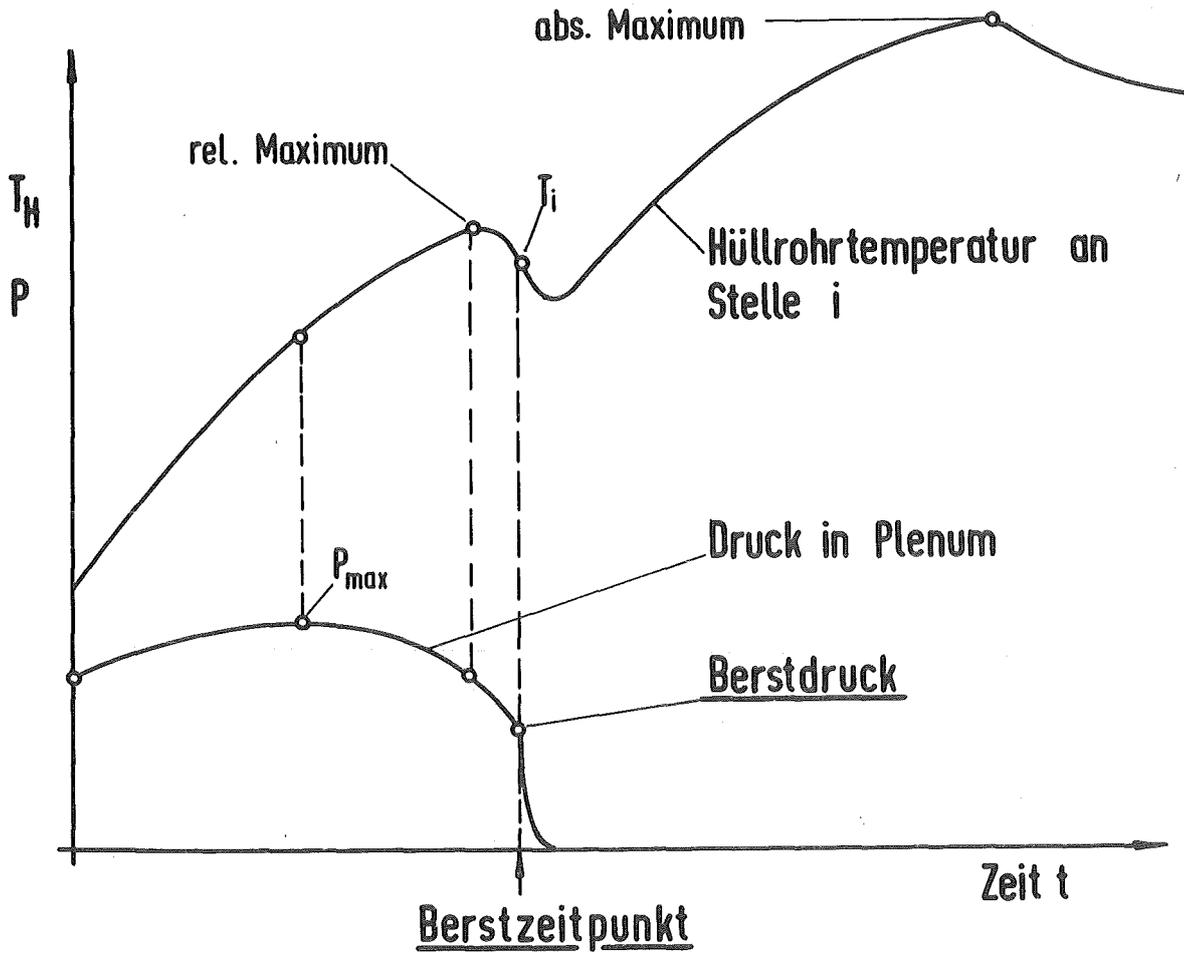
ABB.13.4

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 5  
VOM 04.03.80 ZEIT 11H03M24S



DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH E 5

ABB. 13.5



RBT/IT-1977  
PNS-4237-91.1

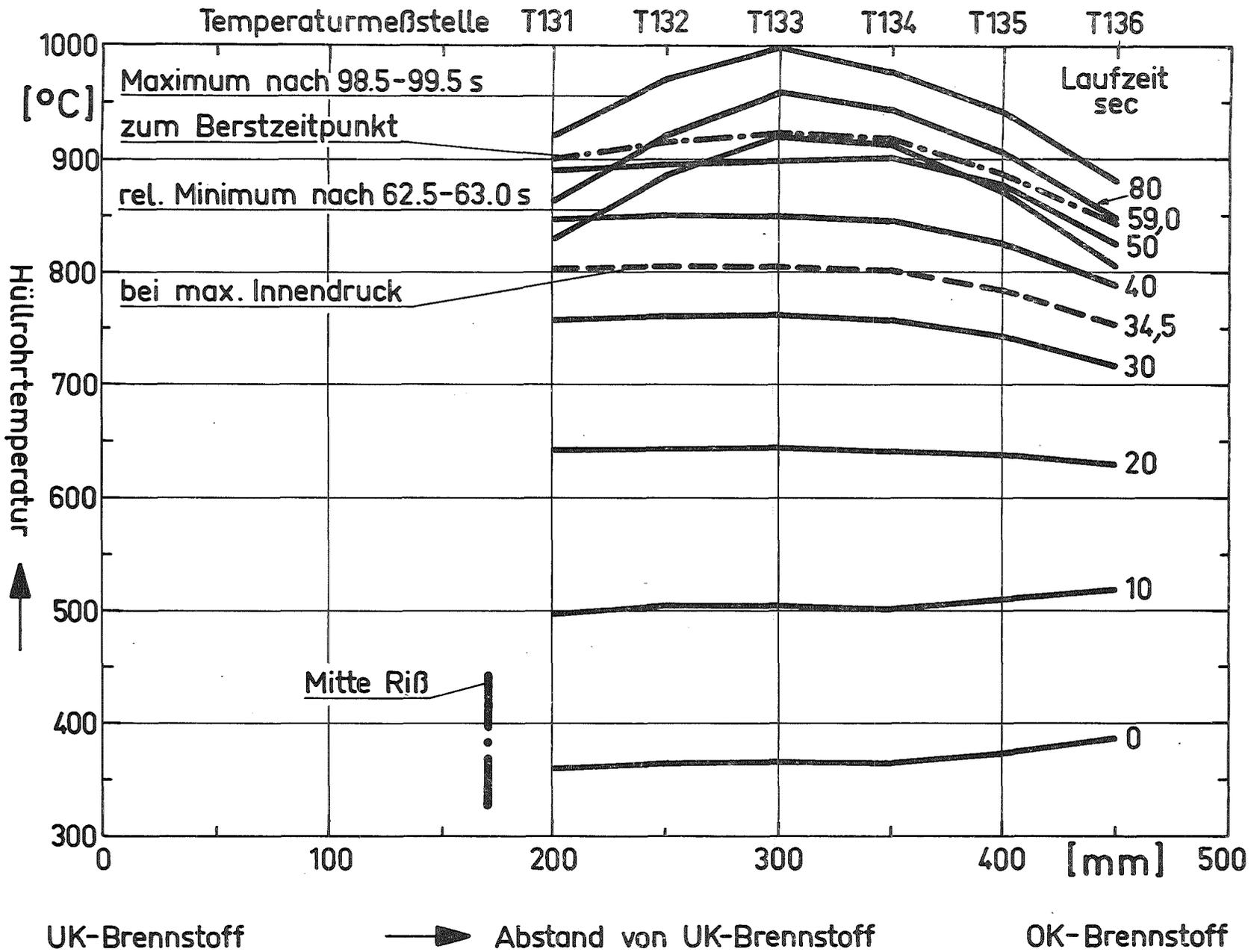
Schema zur Definition von Bursttemperatur und Berstdruck

Abb. 14

In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: E1

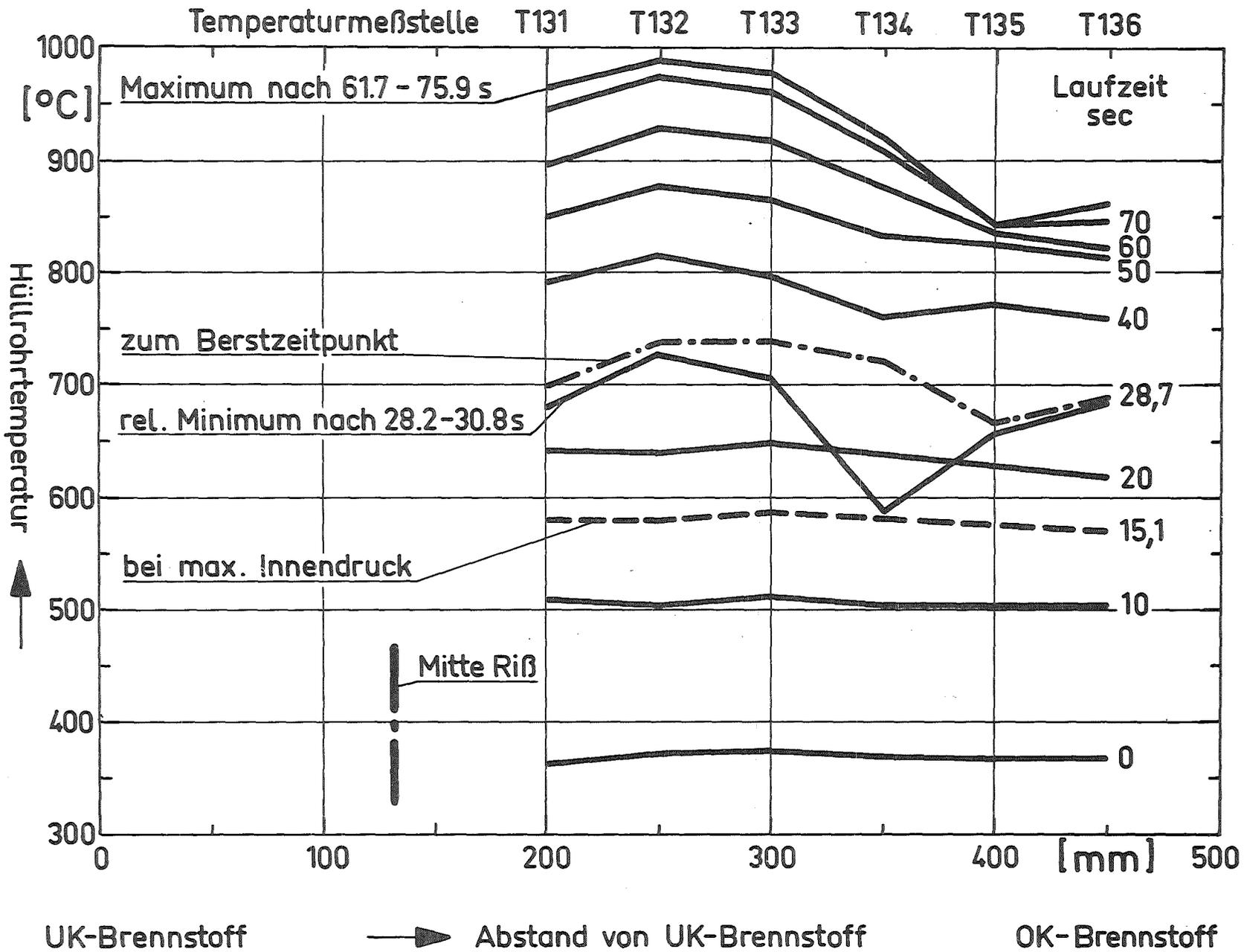
Abb.15.1

KfK  
 IT 1980  
 PNS 4237-84.37



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: E2  
 Abb. 15.2

**KfK**  
 IT 1980  
 PNS 4237-84.38

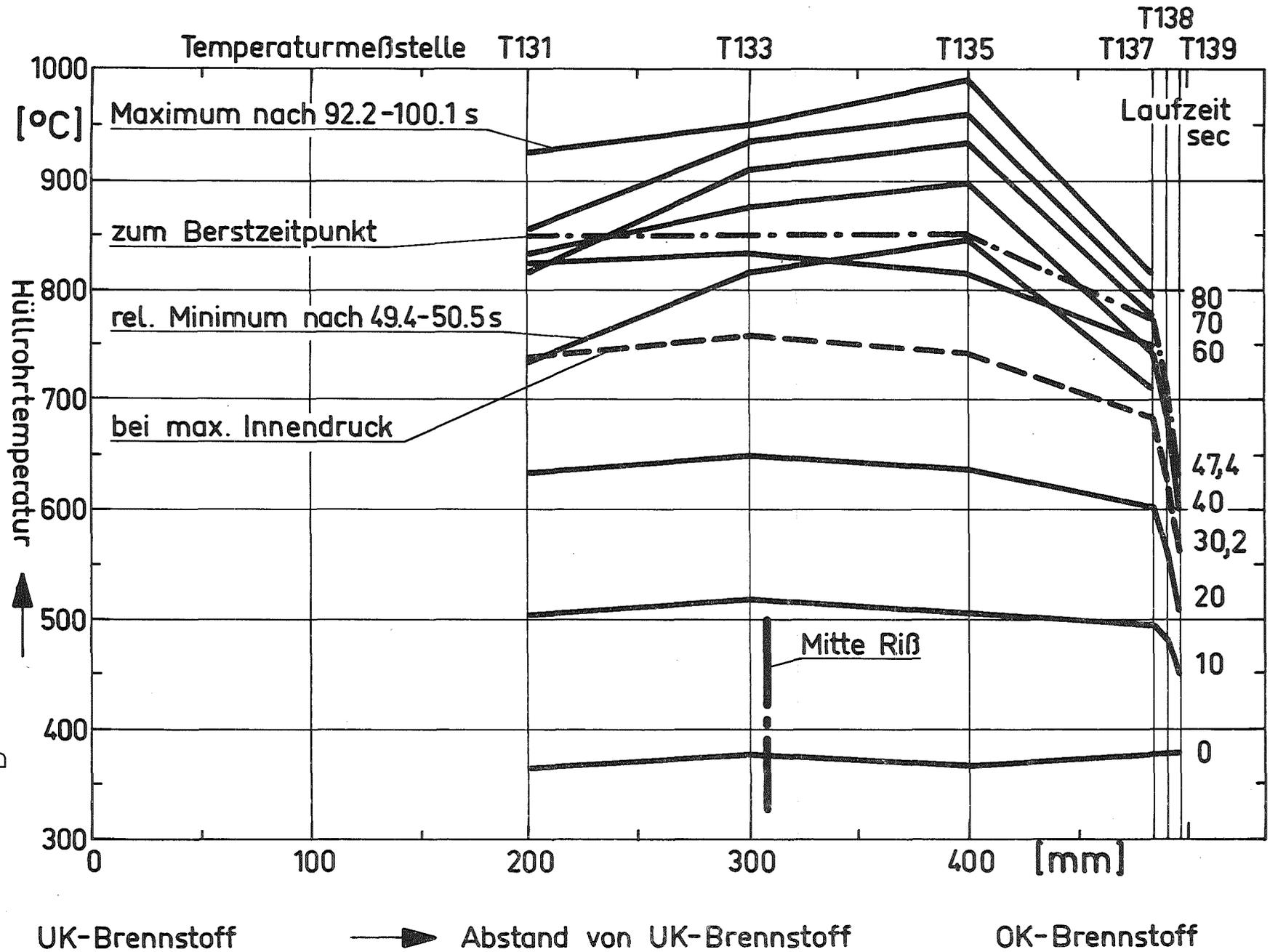


In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: E3

Abb. 15.3



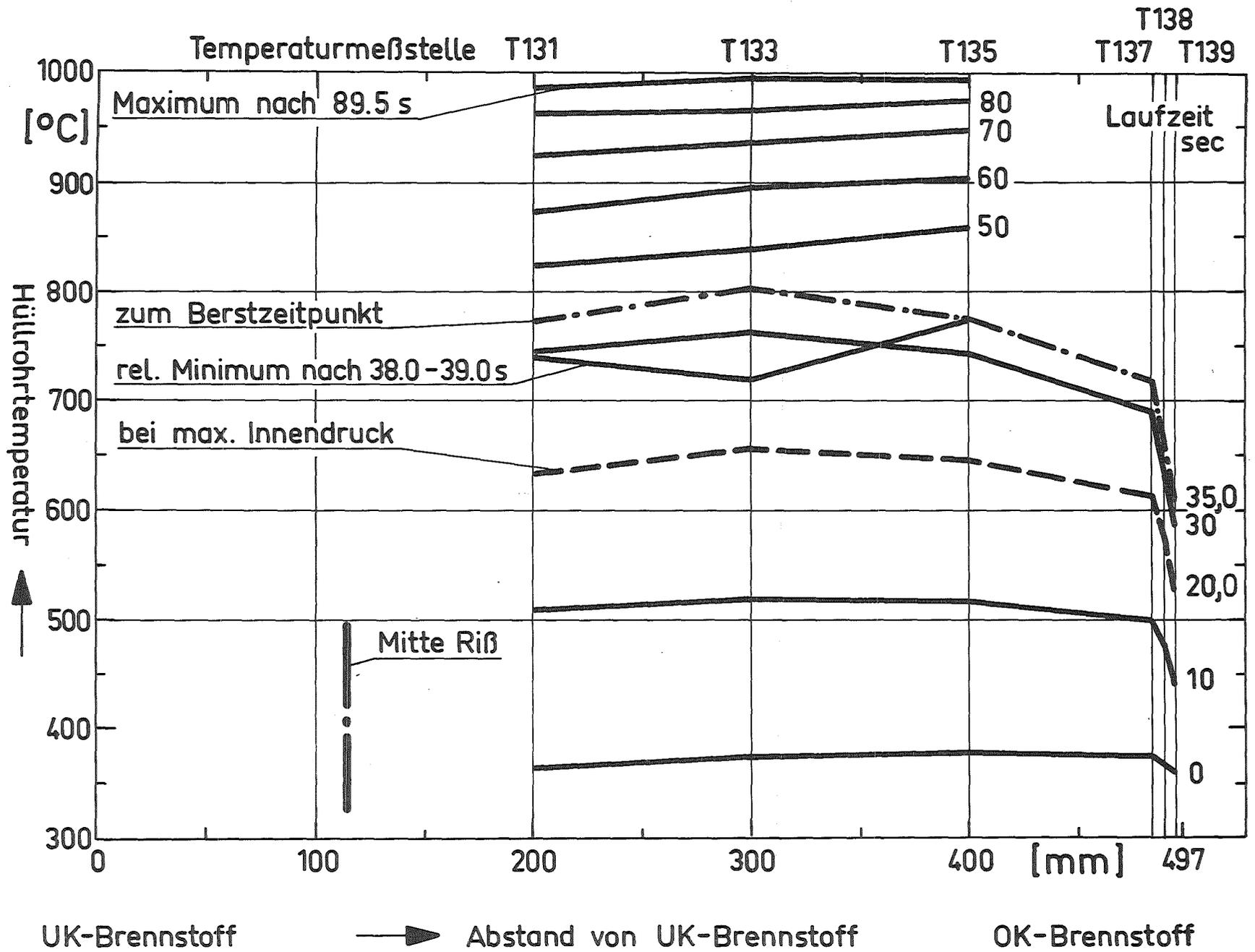
IT 1980  
 PNS 4237-84.39



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: E4

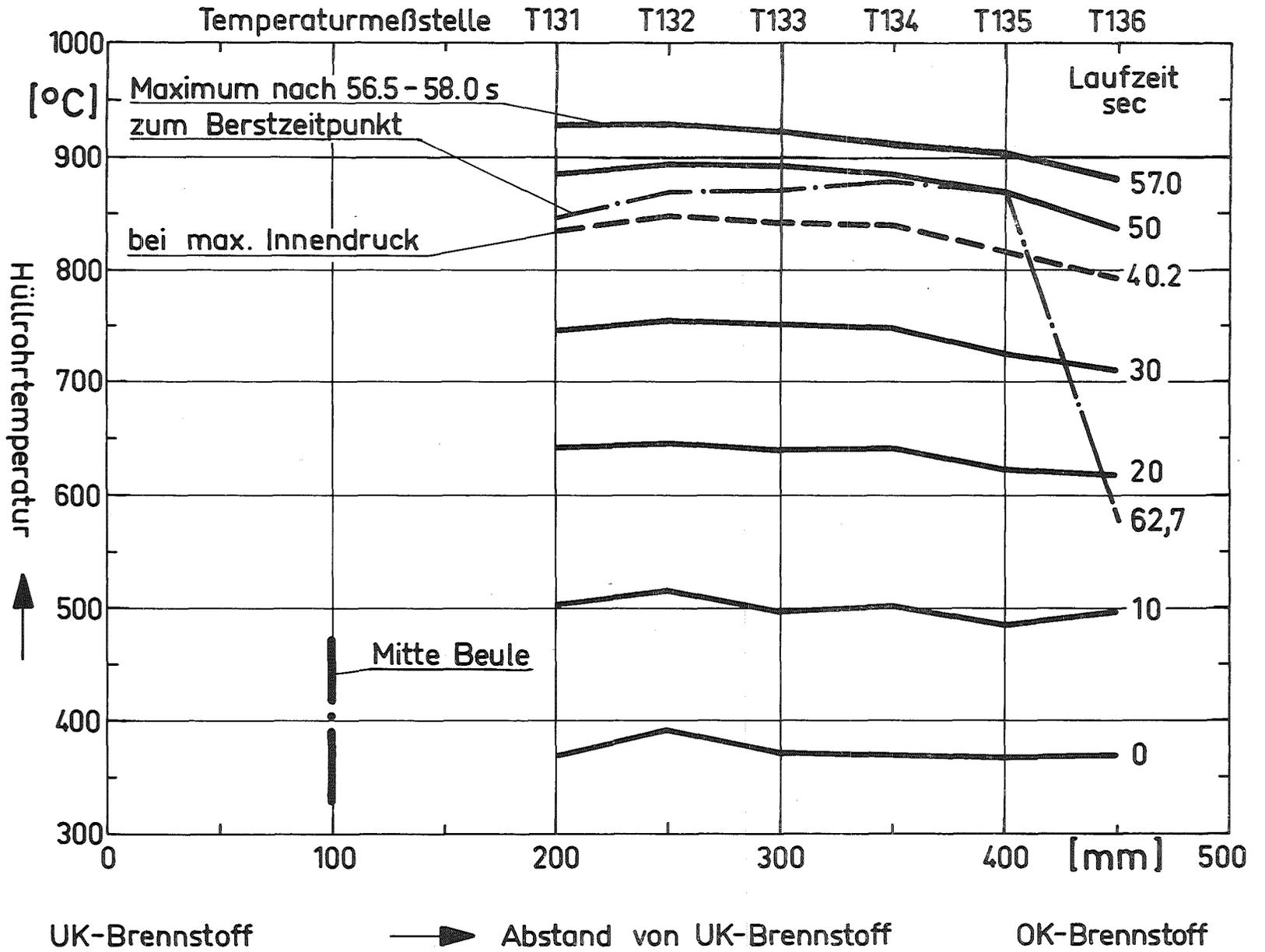
Abb. 15.4

KfK  
 IT 1980  
 PNS 4237-84.40

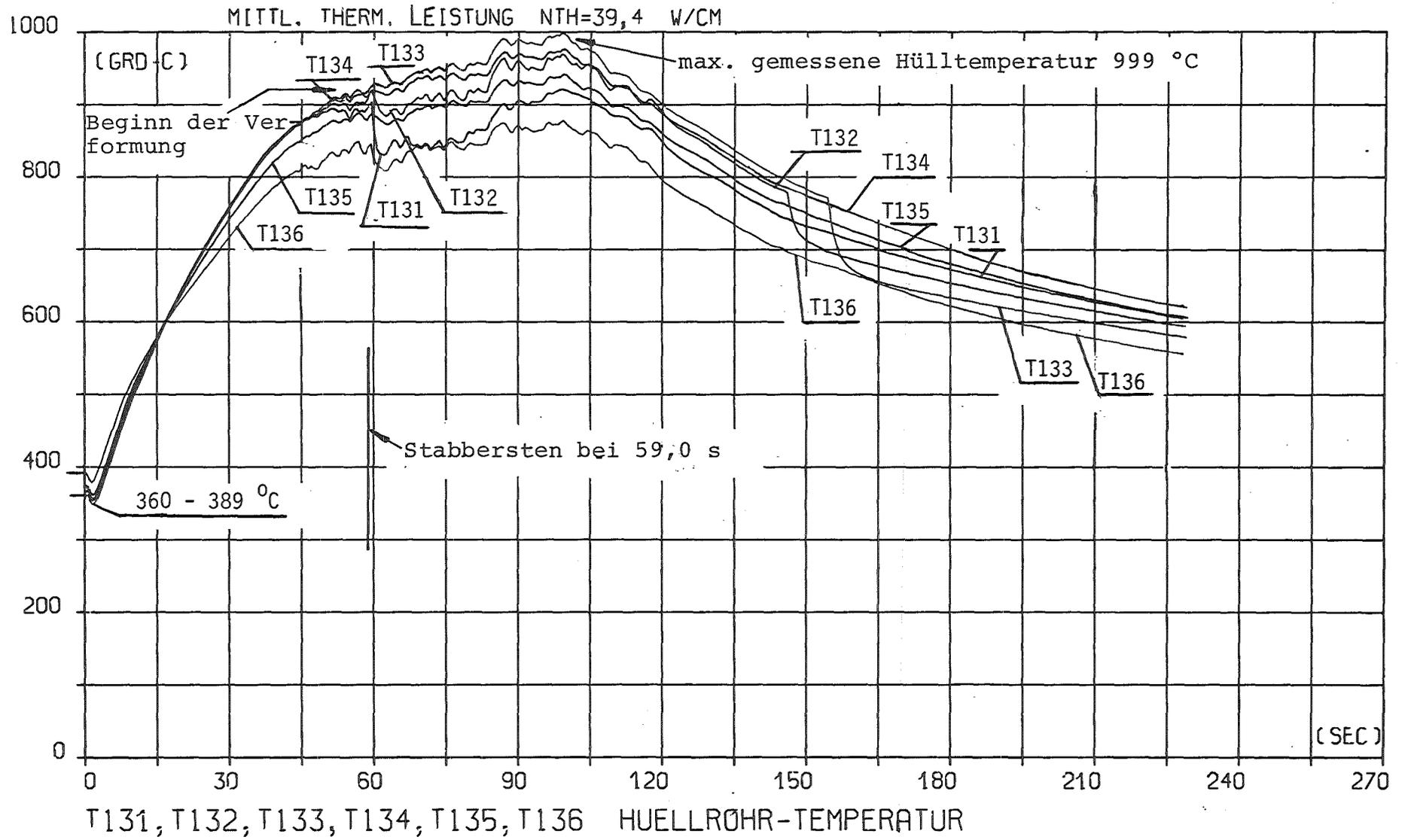


In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: E5  
 Abb. 15.5

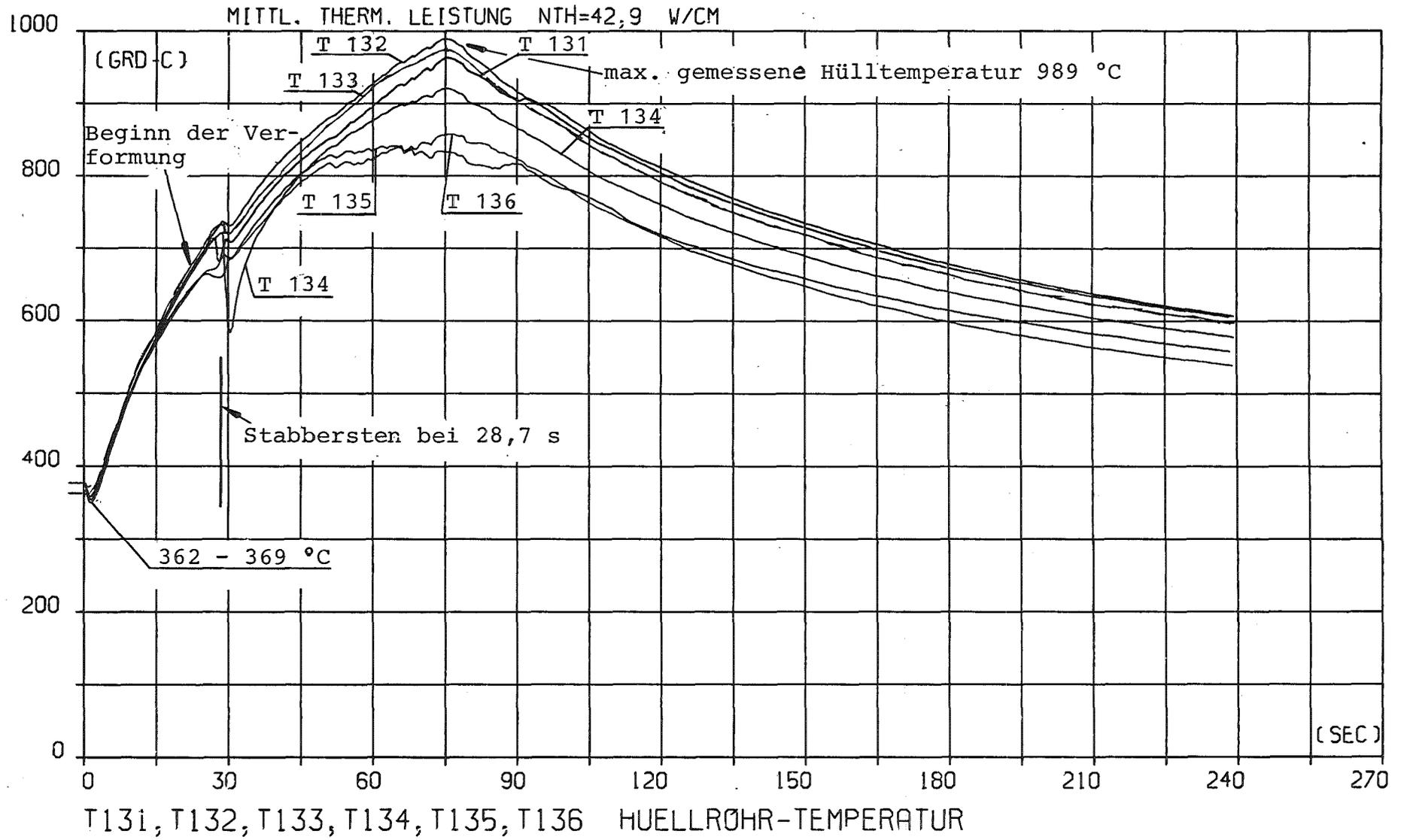
KfK  
 IT 1980  
 PNS 4237-84.41



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 1  
 VOM 20.02.80 ZEIT 15H39M07S

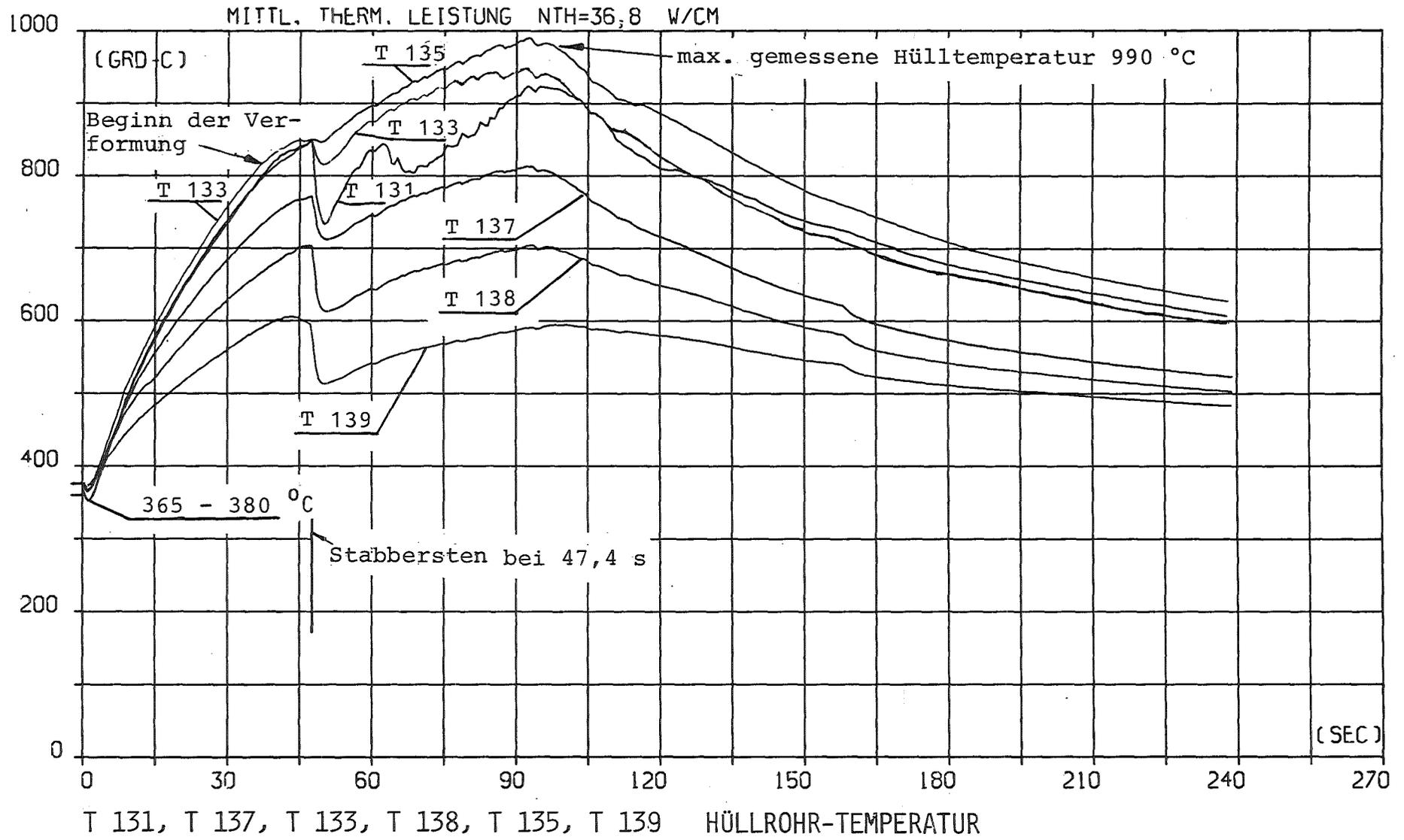


PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 2  
VOM 22.02.80 ZEIT 11H17M32S

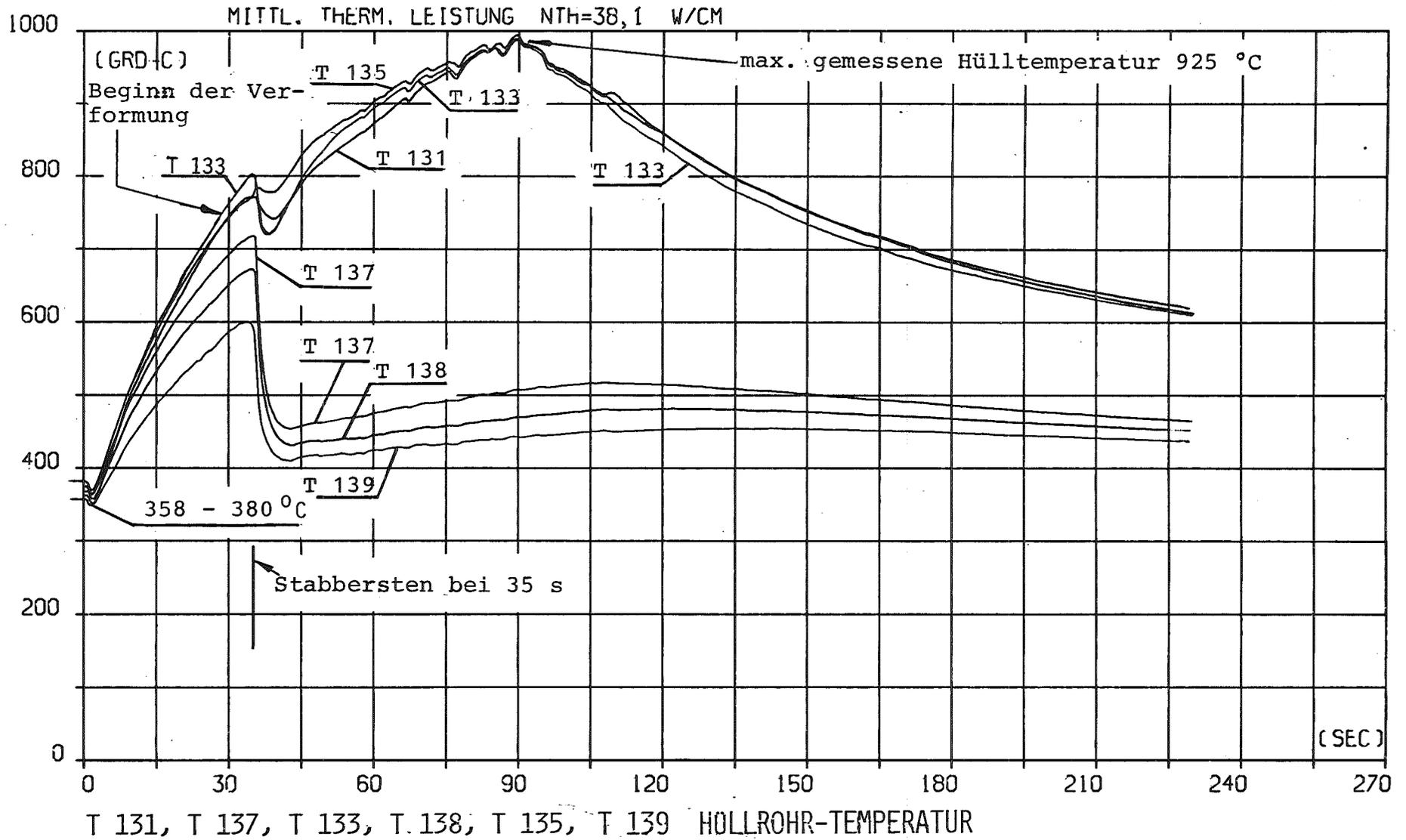


PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 3

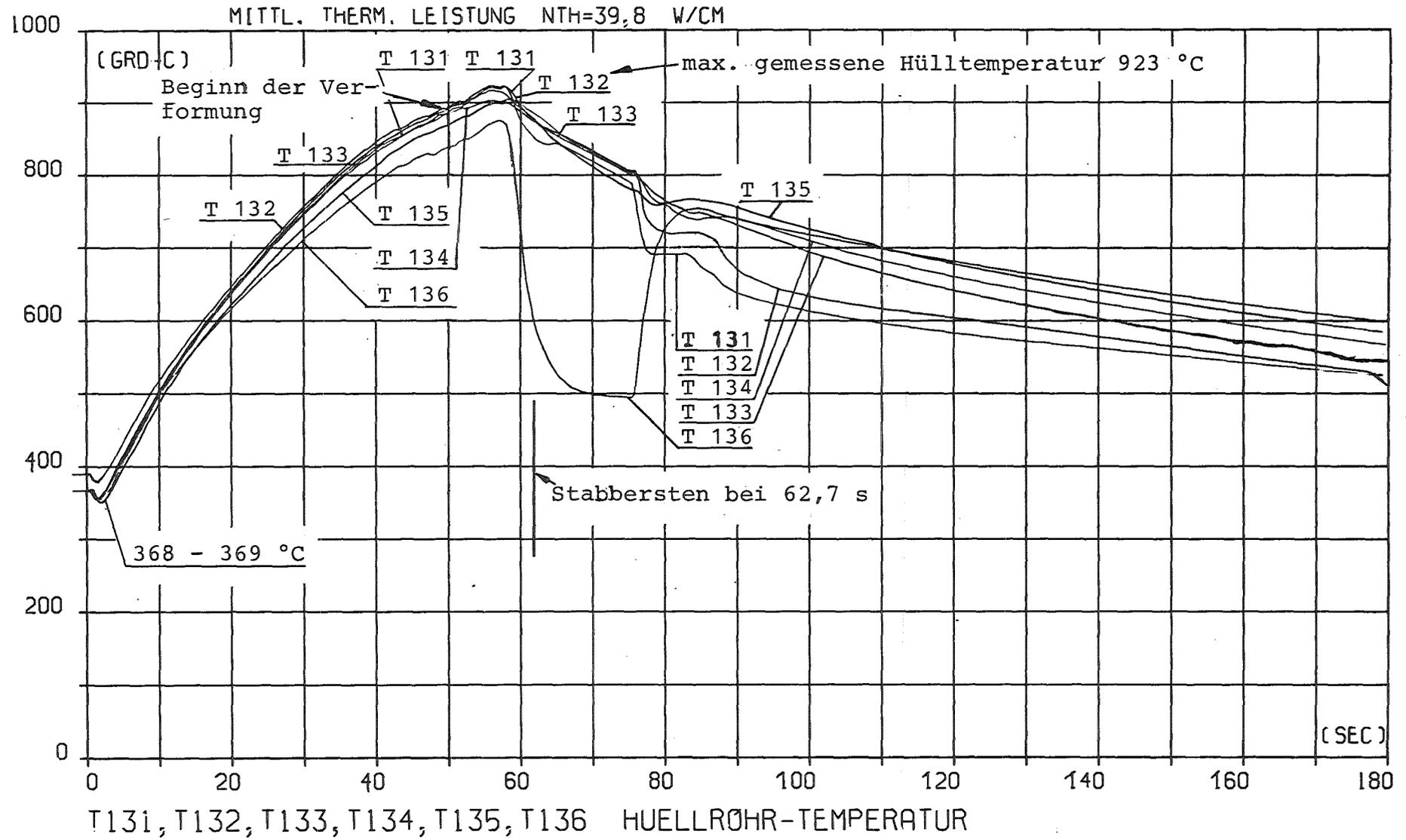
VOM 26.02.80 ZEIT 11H00M48S

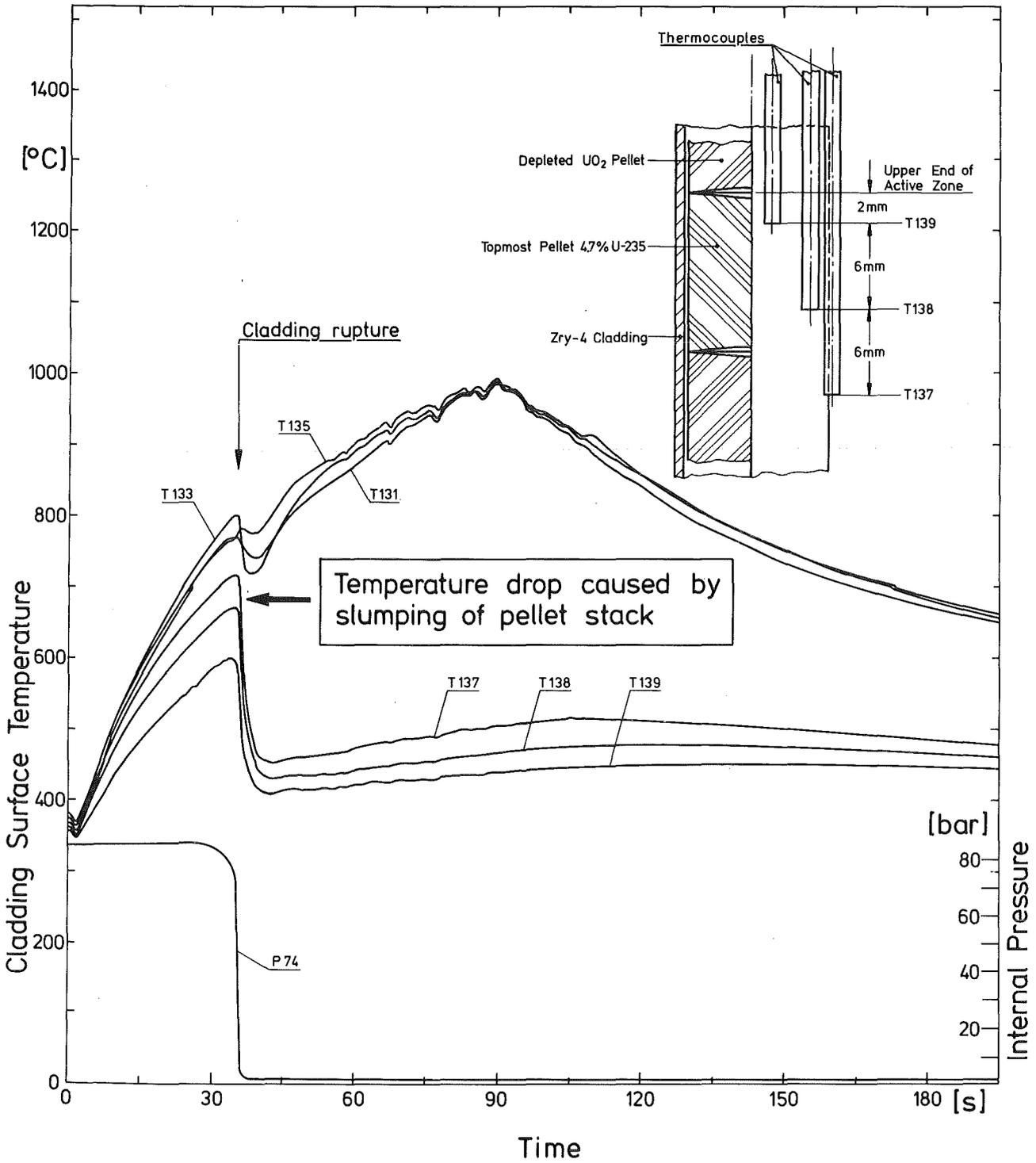


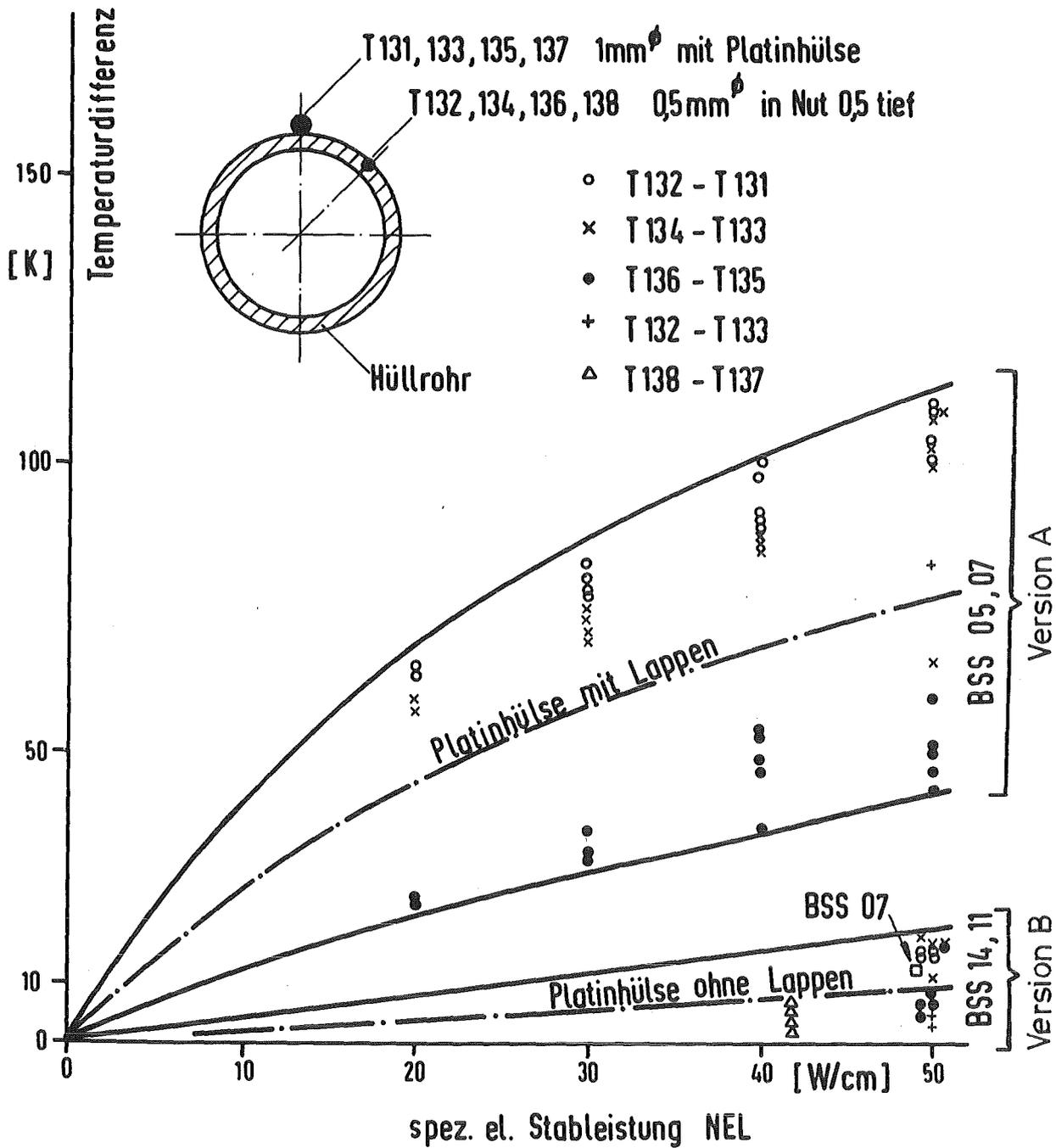
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. .; E 4  
 VOM 29.02.80 ZEIT 11H04M01S



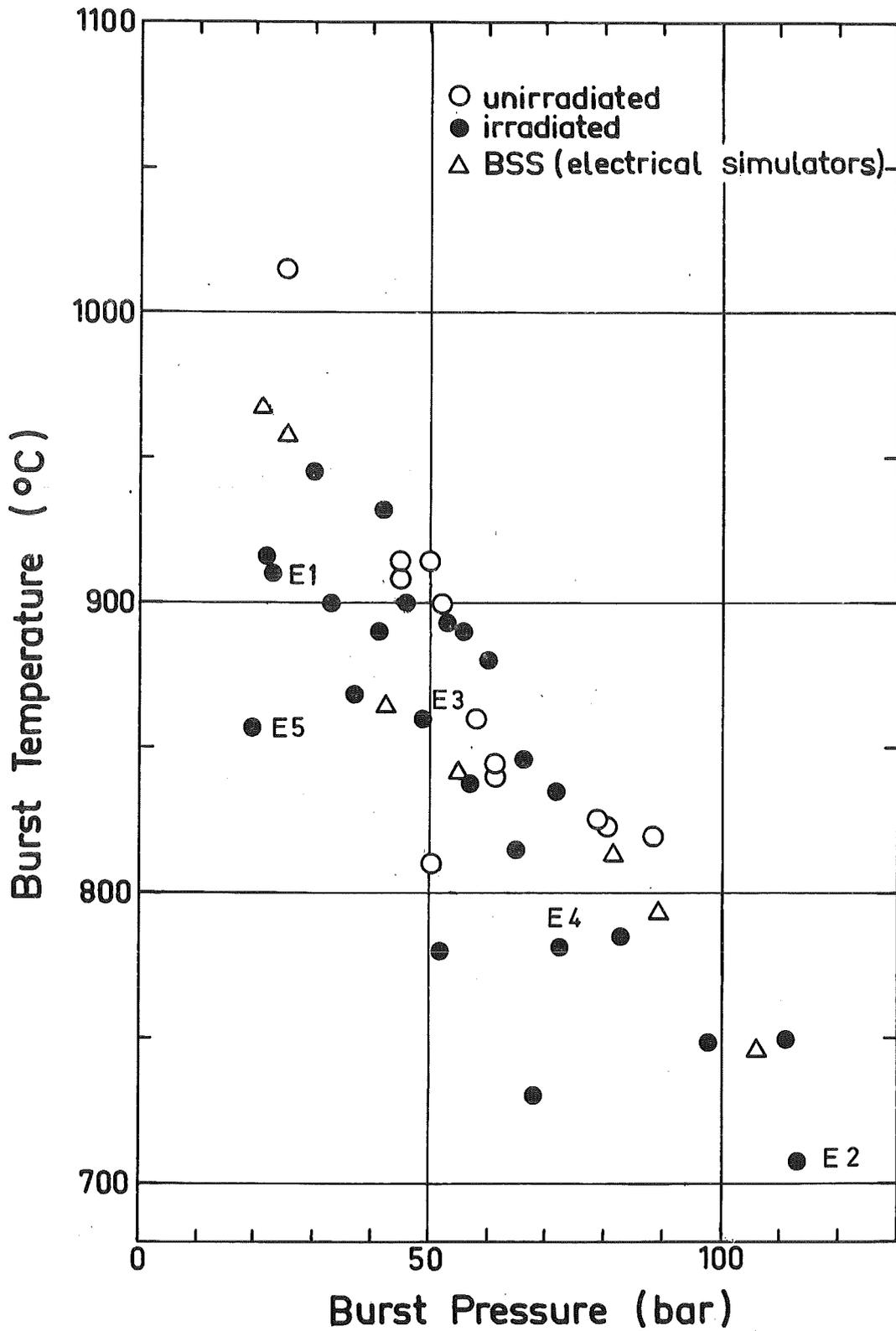
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : E 5  
VOM 04.03.80 ZEIT 11H03M24S





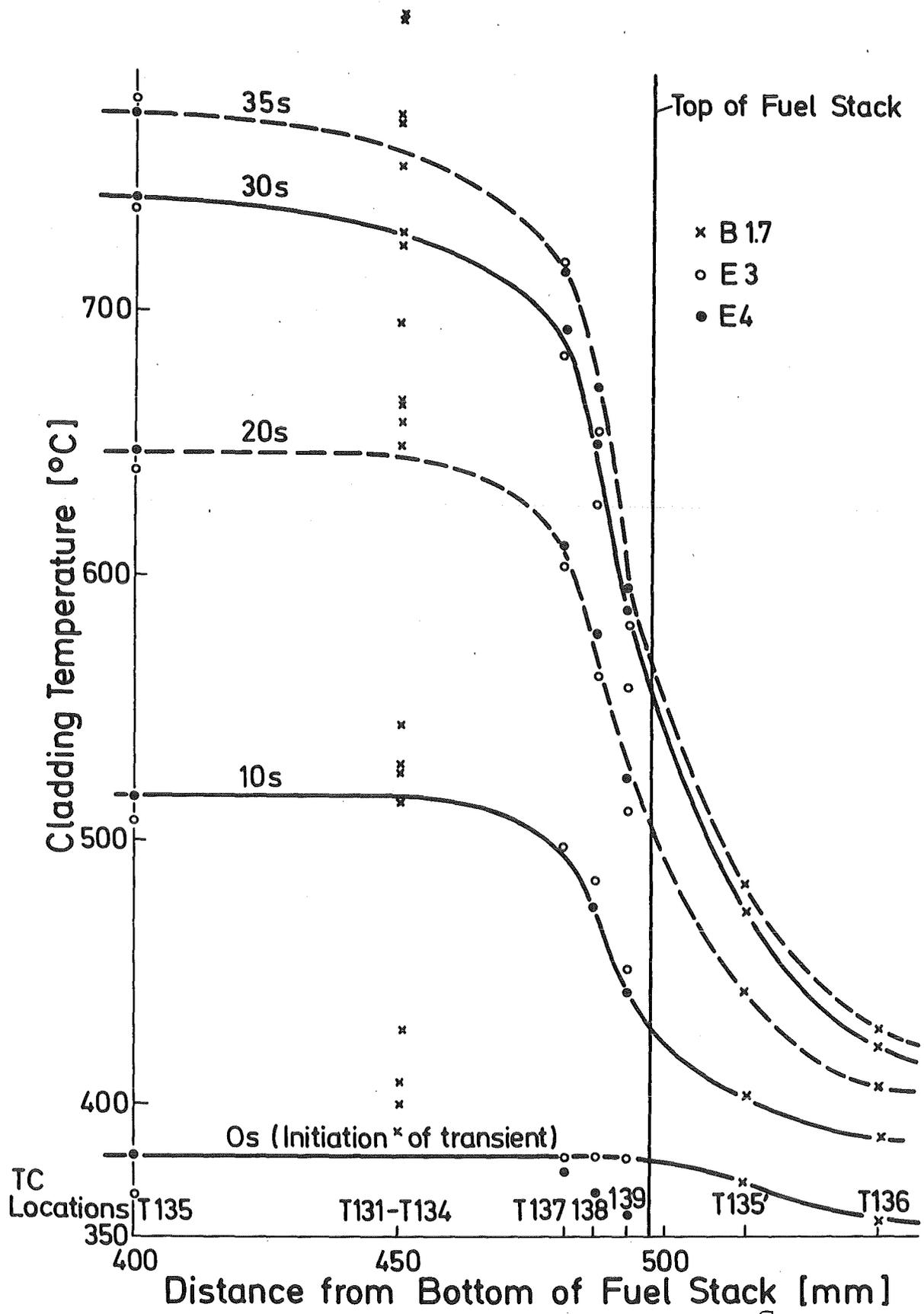


Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900°C (Transiente) Abb.: 18



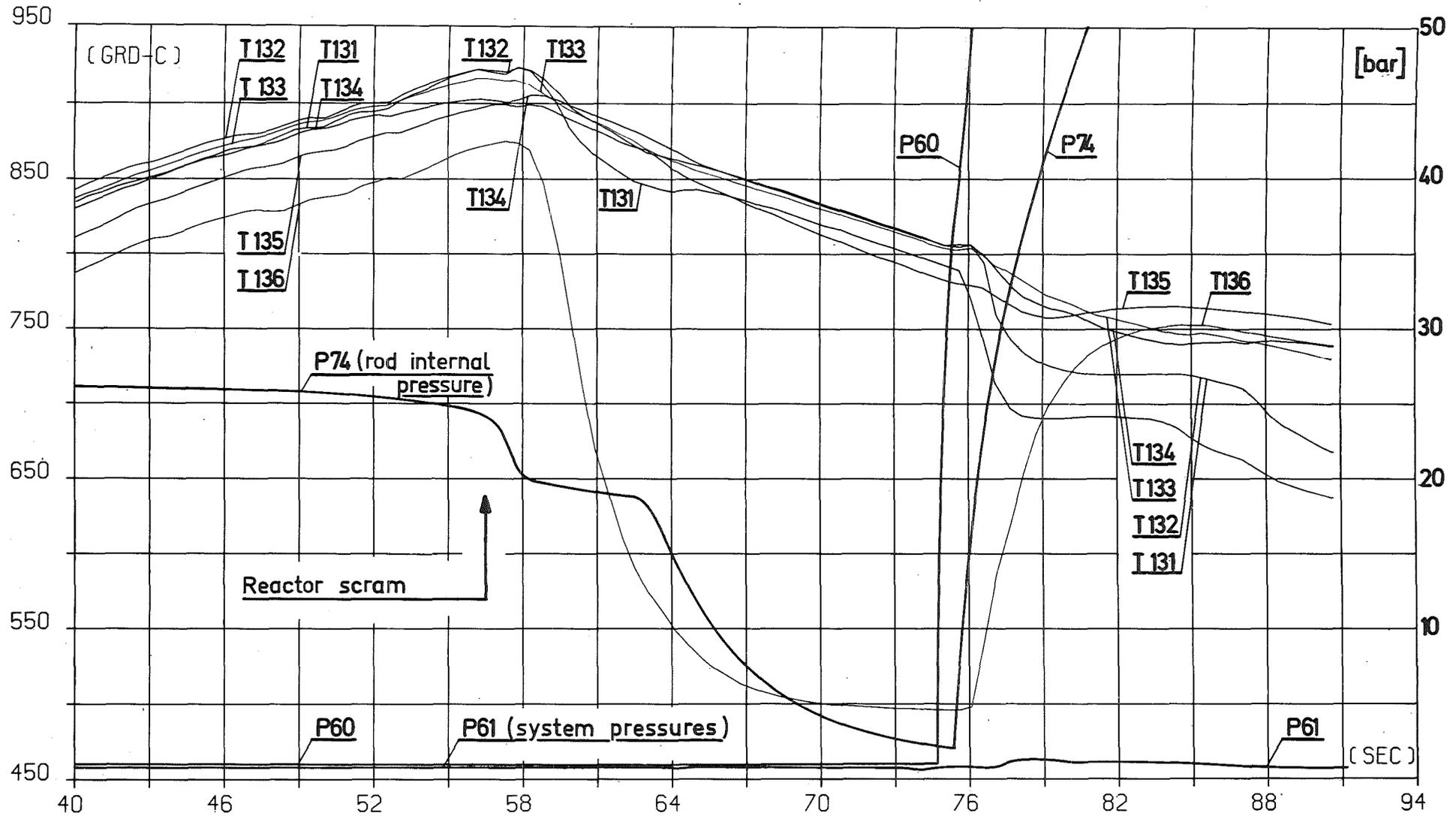
# FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam.

Burst Temperature vs. Burst Pressure

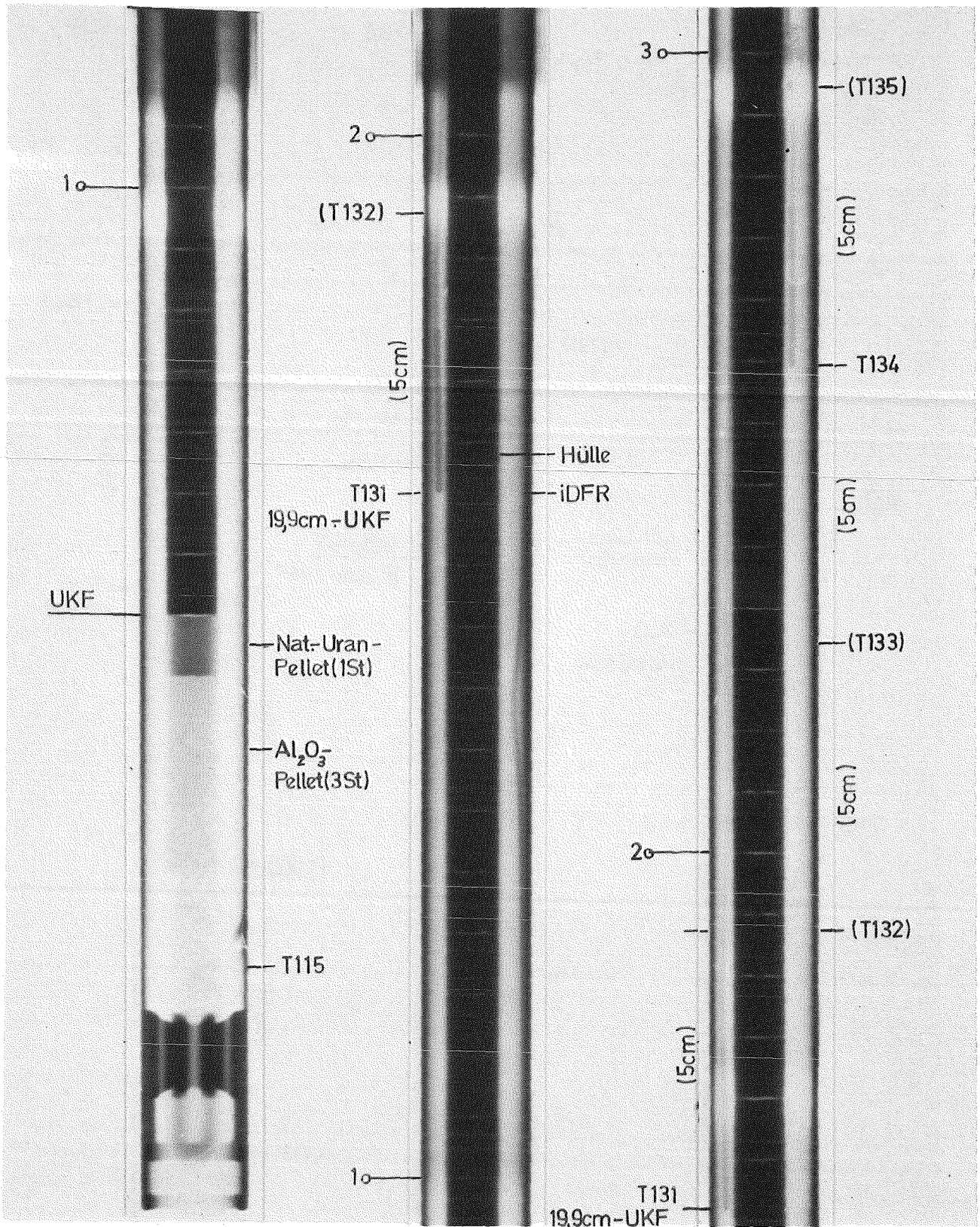


KIK  
IT-80  
PNS4237-328

FR2 In-Pile Tests: E3, E4 and B1.7  
Axial Temperature Profiles at the Upper End of Fuel Stack



— 92 —

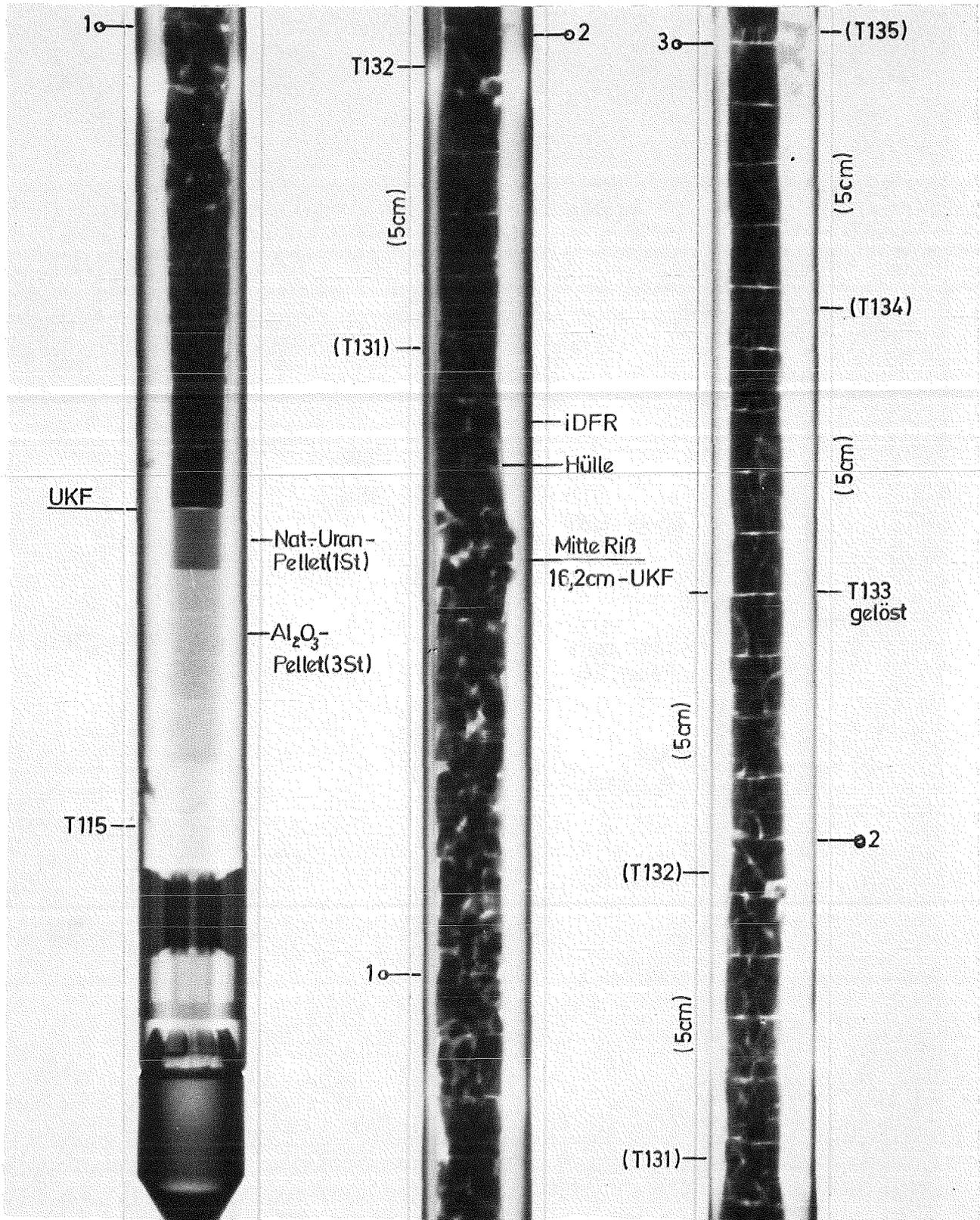


Aufnahme 1

Aufnahme 2

Aufnahme 3

**KIK**  
KIT-80  
PNS4237-726

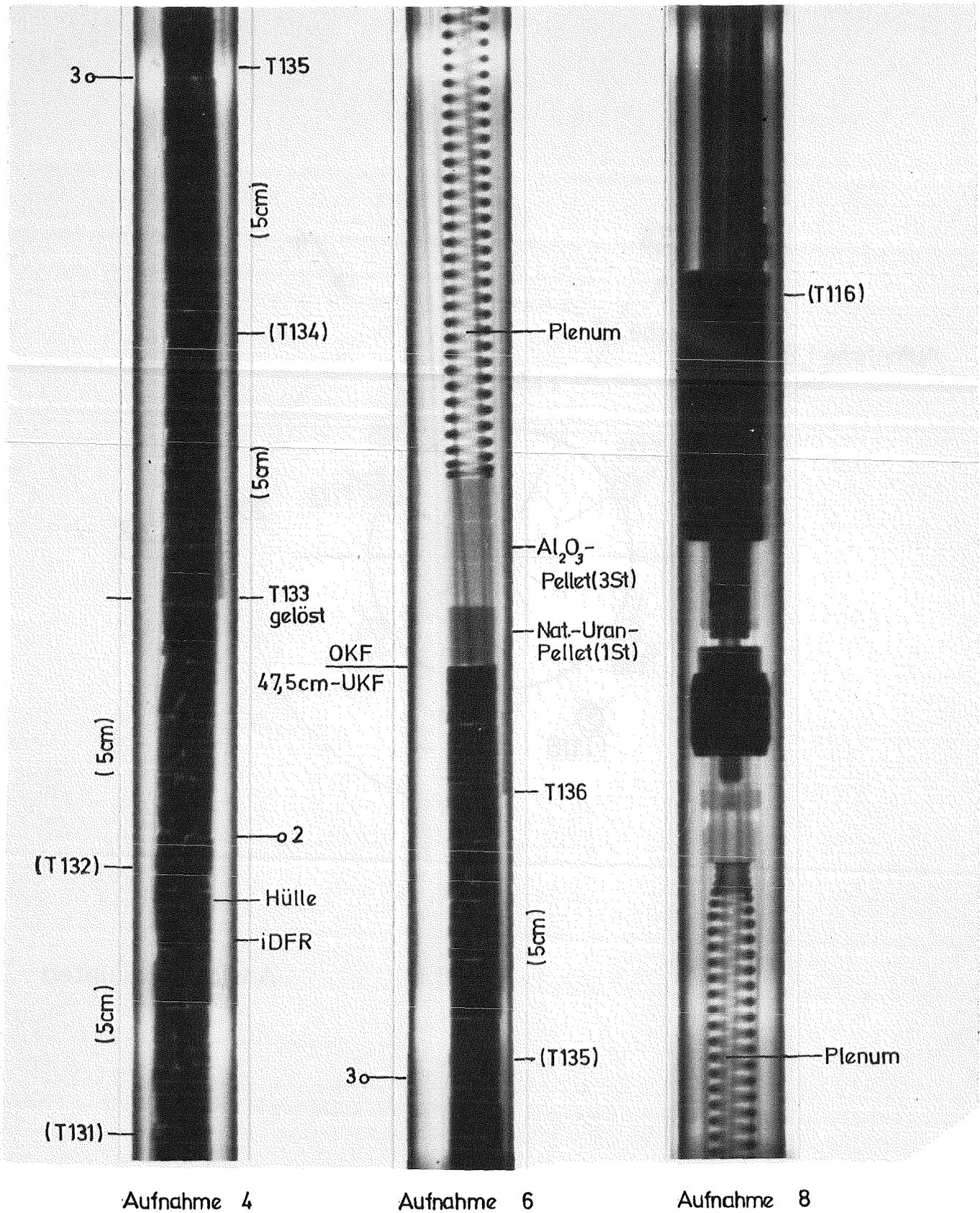


Aufnahme 1

Aufnahme 2

Aufnahme 3

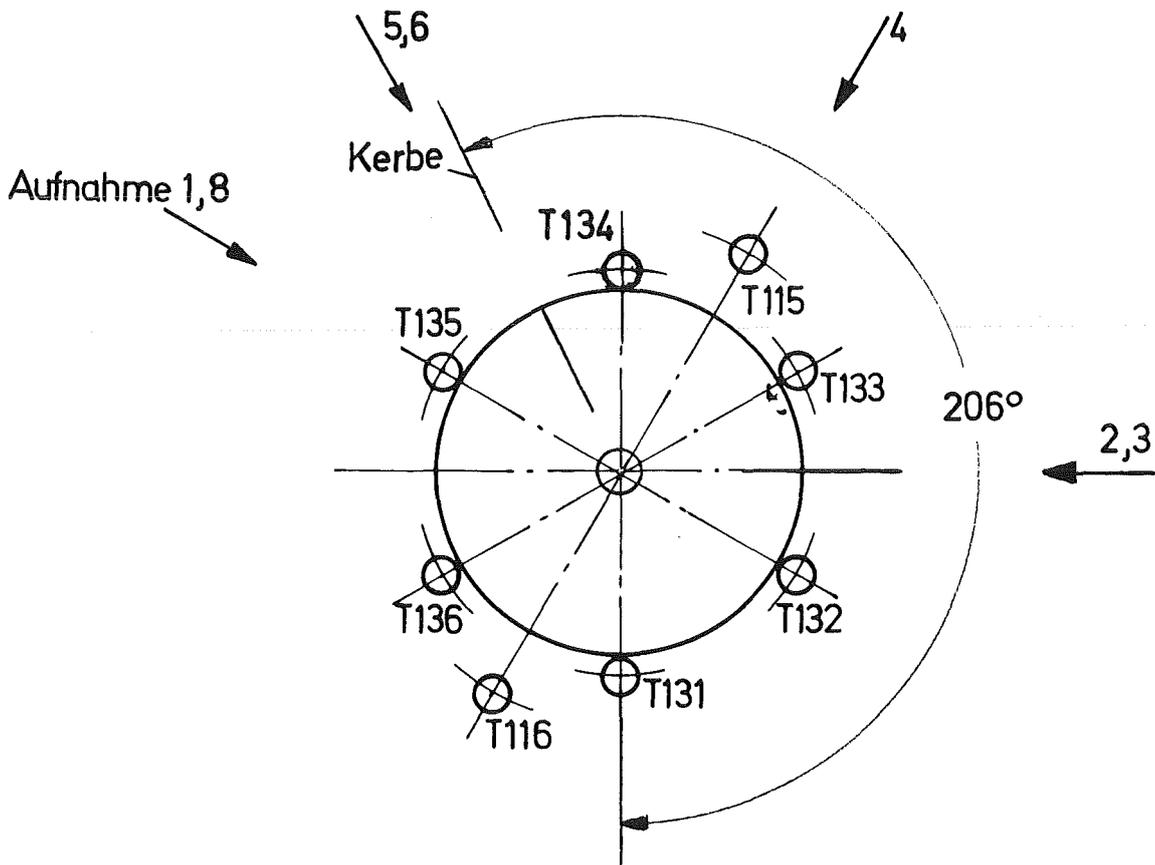
**KfK**  
IT-80  
PNS4237-492



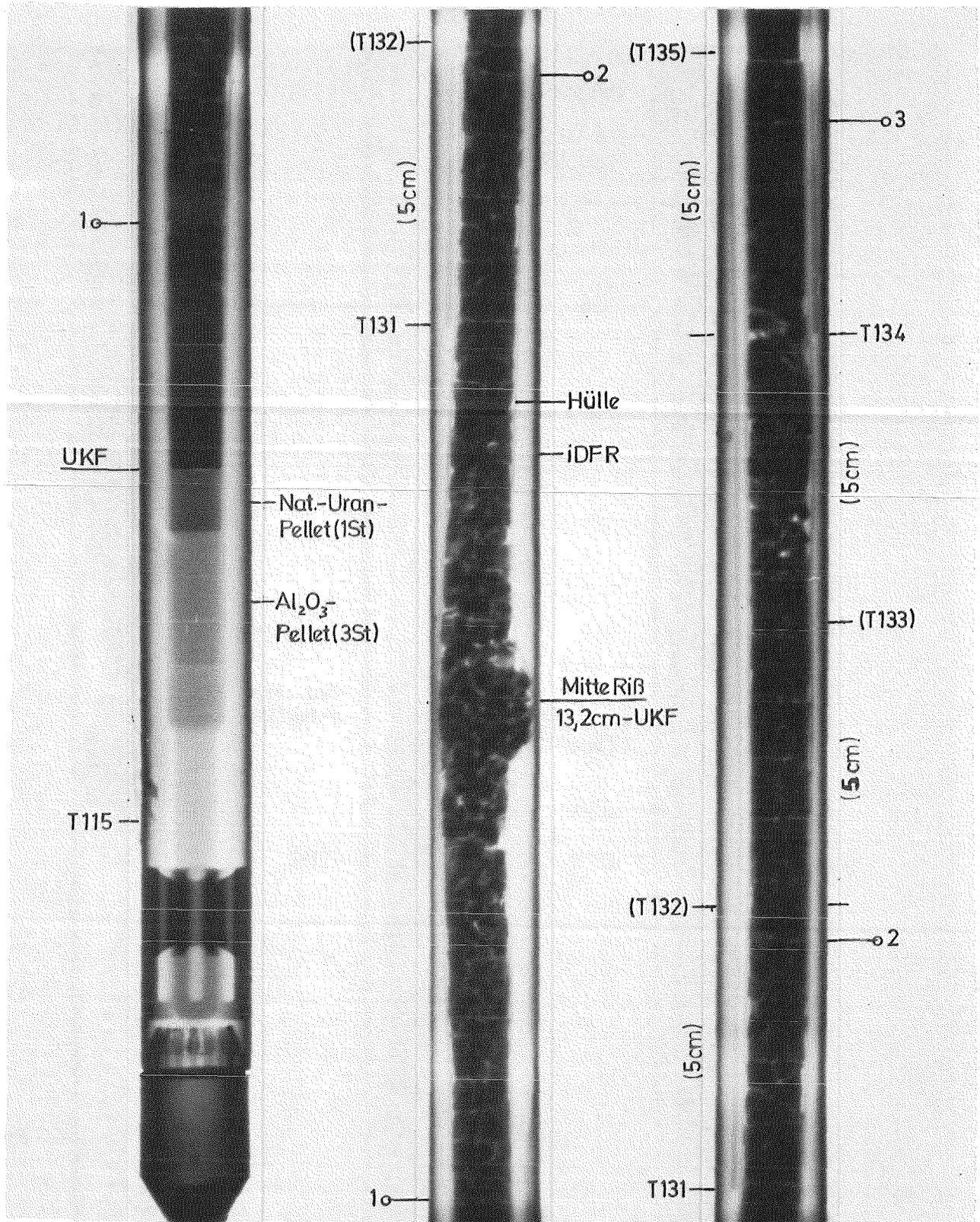
**KIK** IT-80  
PNS4237-493

FR2 In-pile Versuche. E1  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb.: 23.2



Ansicht von unten



Aufnahme 1

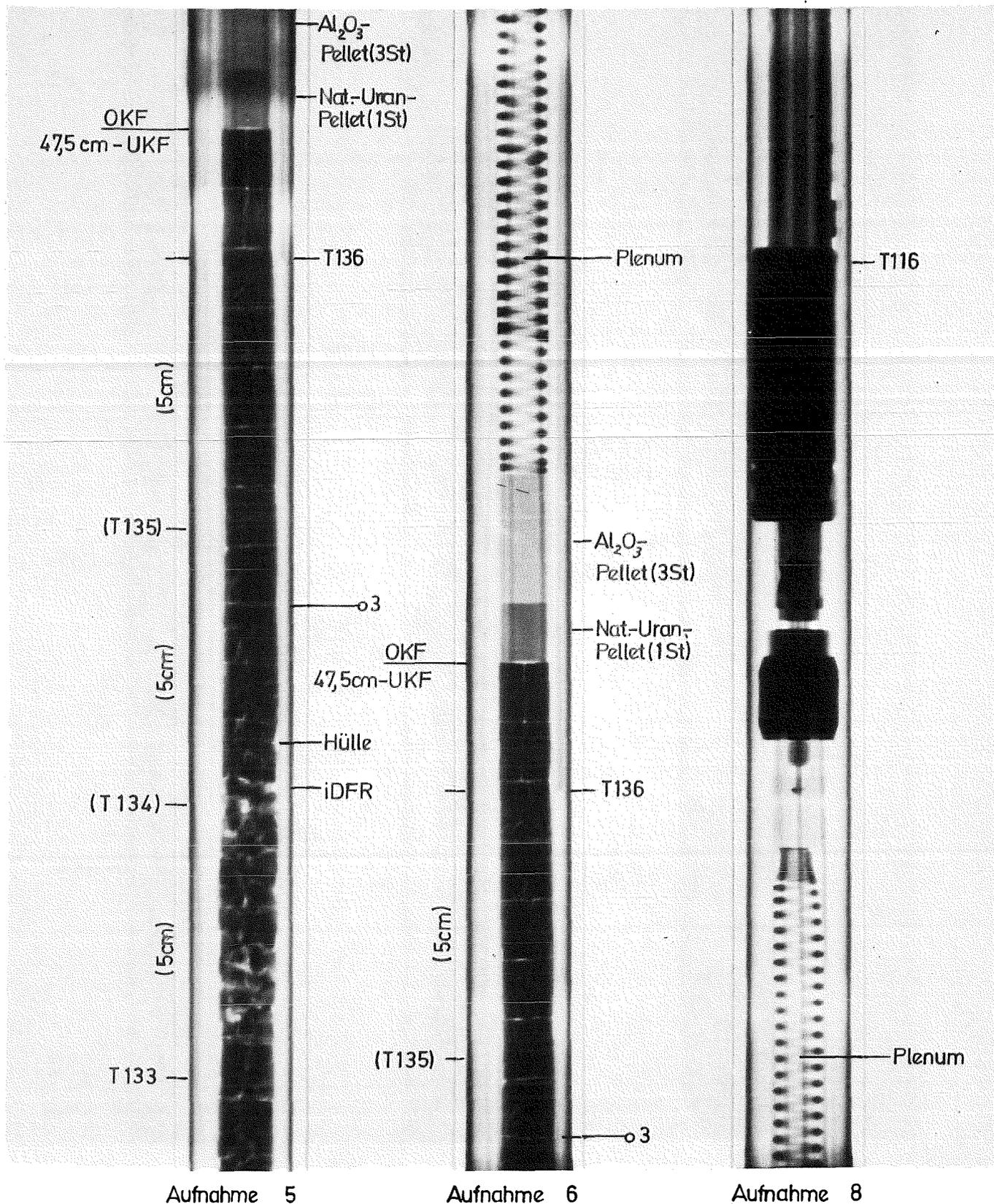
Aufnahme 2

Aufnahme 3

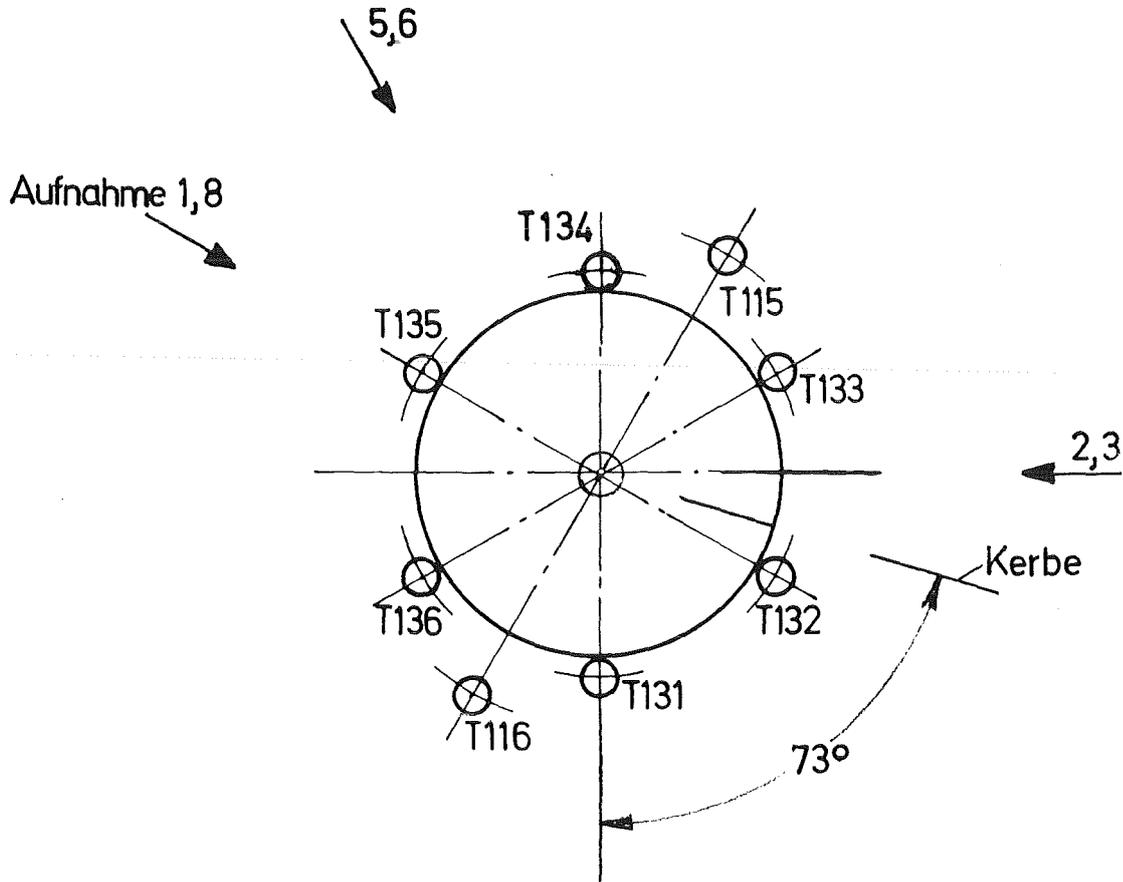
**KIK** IT-80  
PNS4237-518

FR2 In-pile Versuche. E2  
Neutronenradiografie nach Versuch

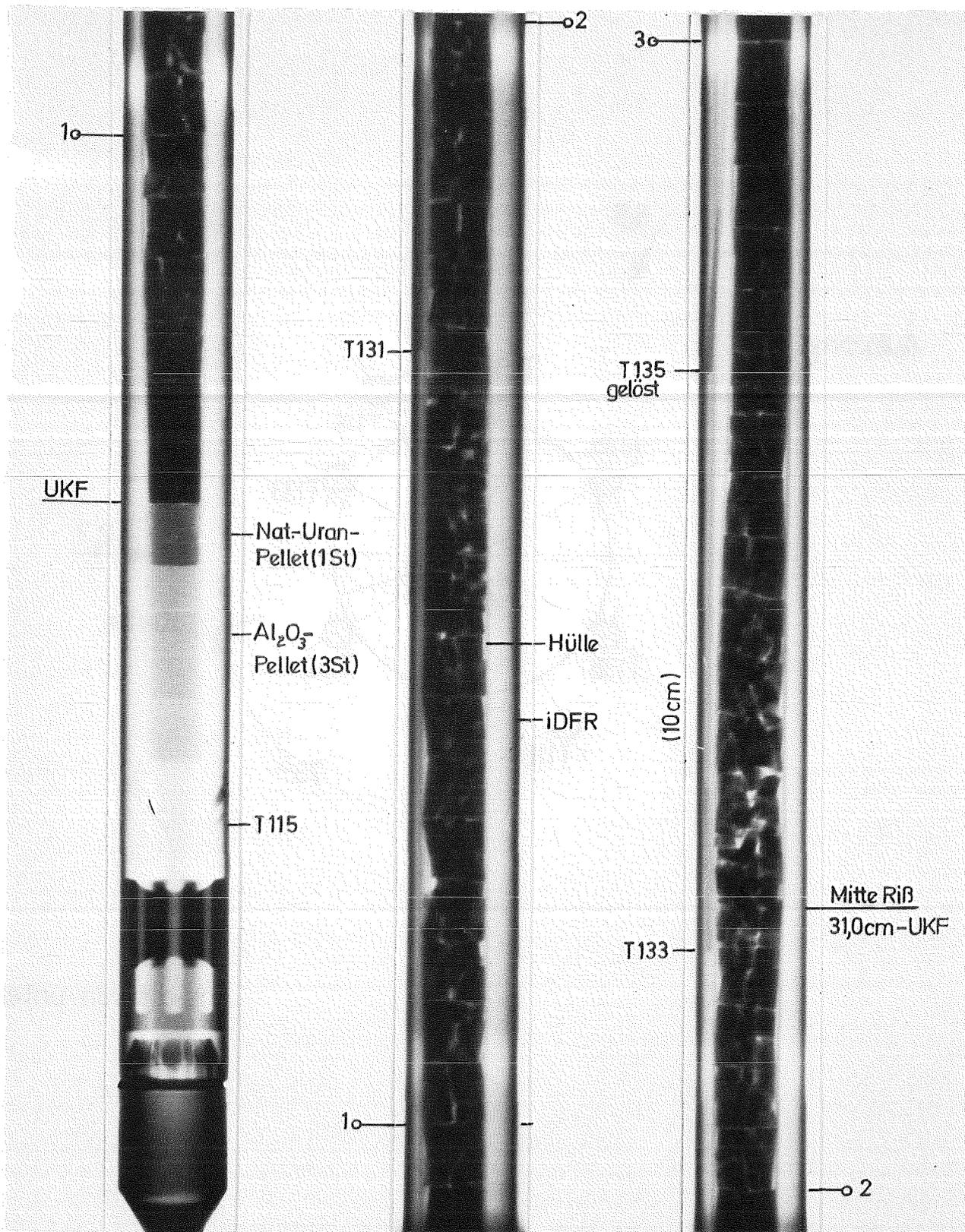
Bl.1  
Abb.: 24.1



**KIK** IT-80  
PNS4237-519



Ansicht von unten

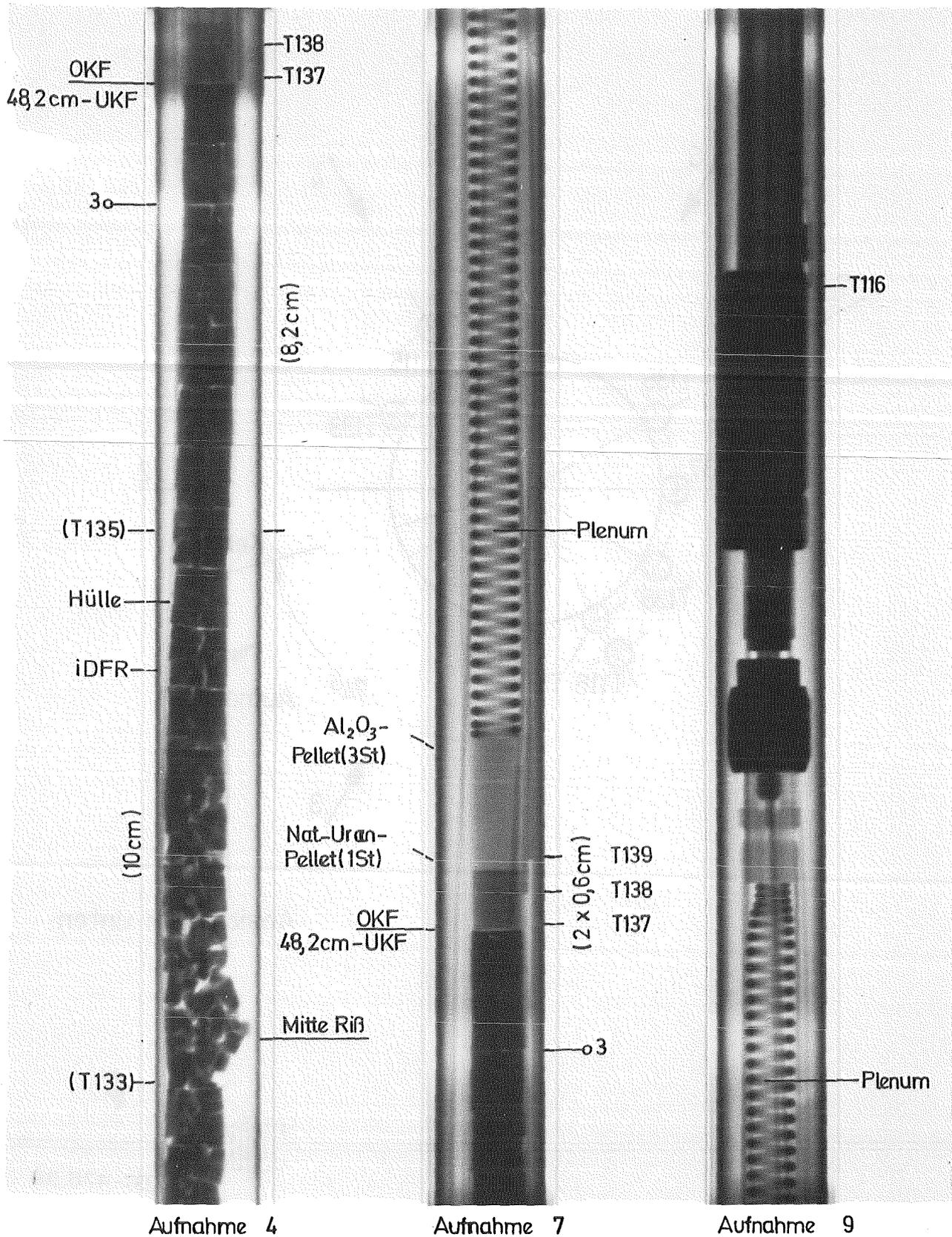


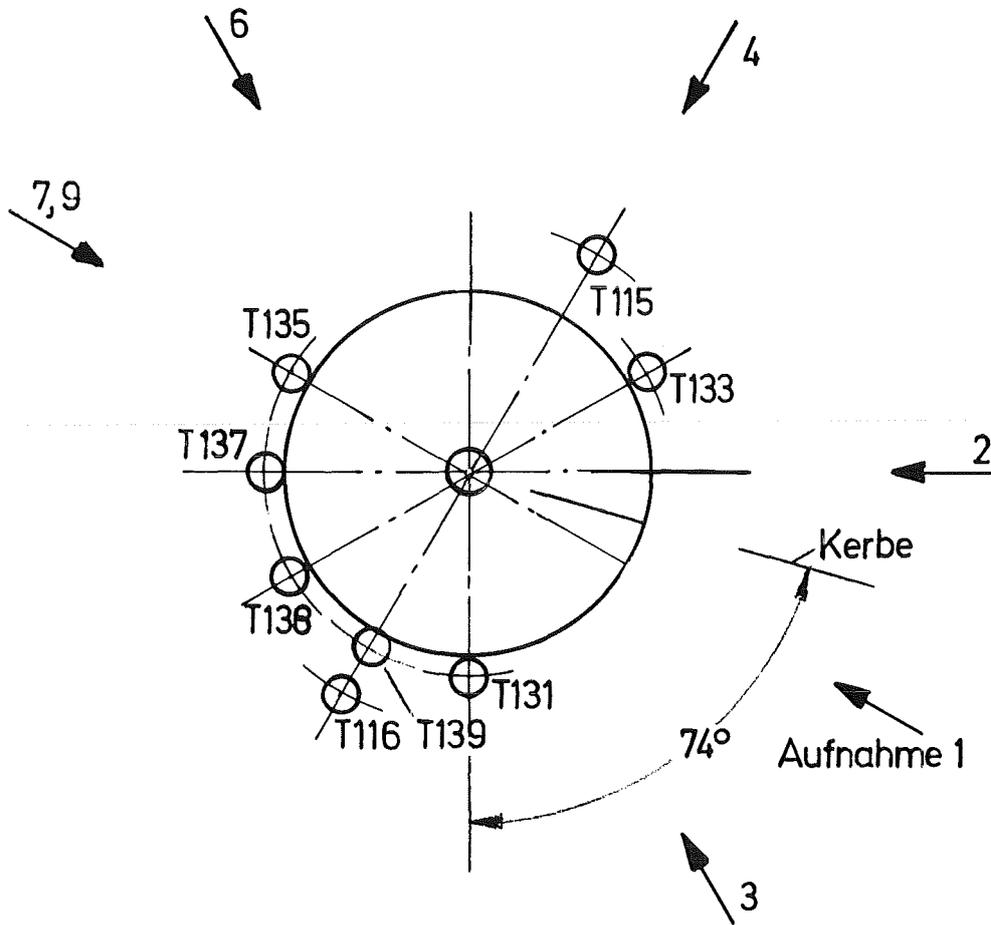
Aufnahme 1

Aufnahme 2

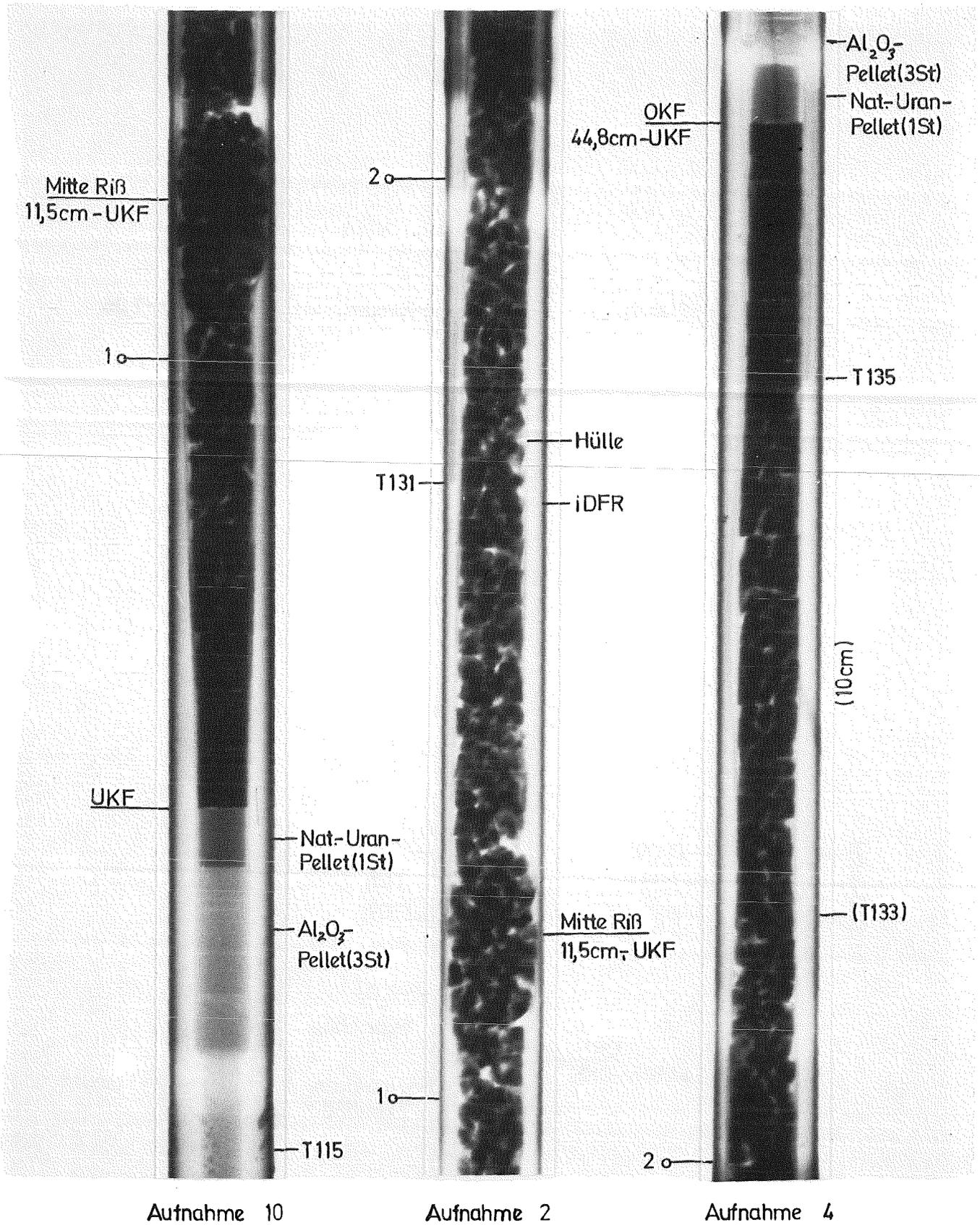
Aufnahme 3

**KIK**  
KIT-80  
PNS4237- 520





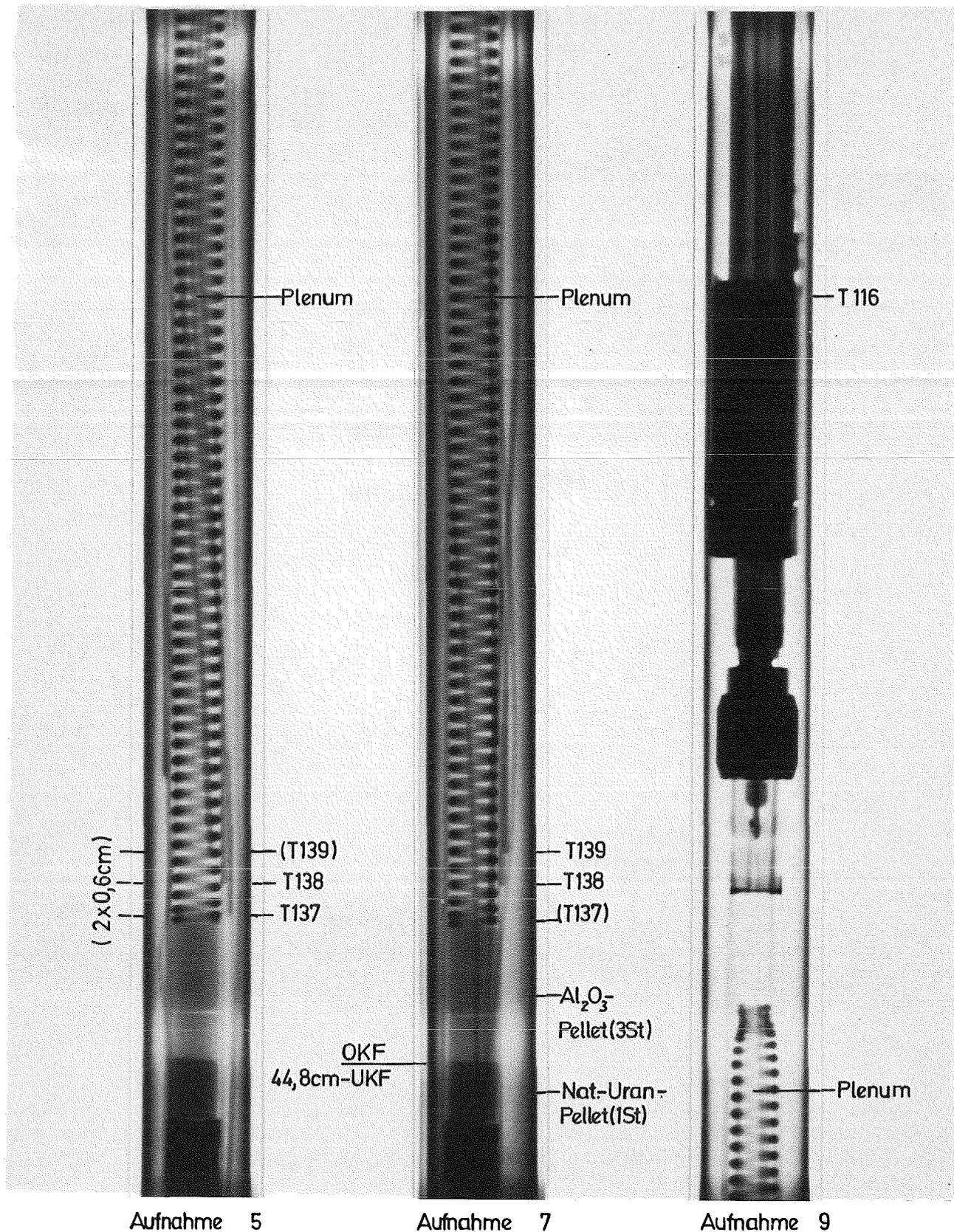
Ansicht von unten



**KfK** IT-80  
PNS4237-522

FR2 In-pile Versuche. E 4  
Neutronenradiografie nach Versuch

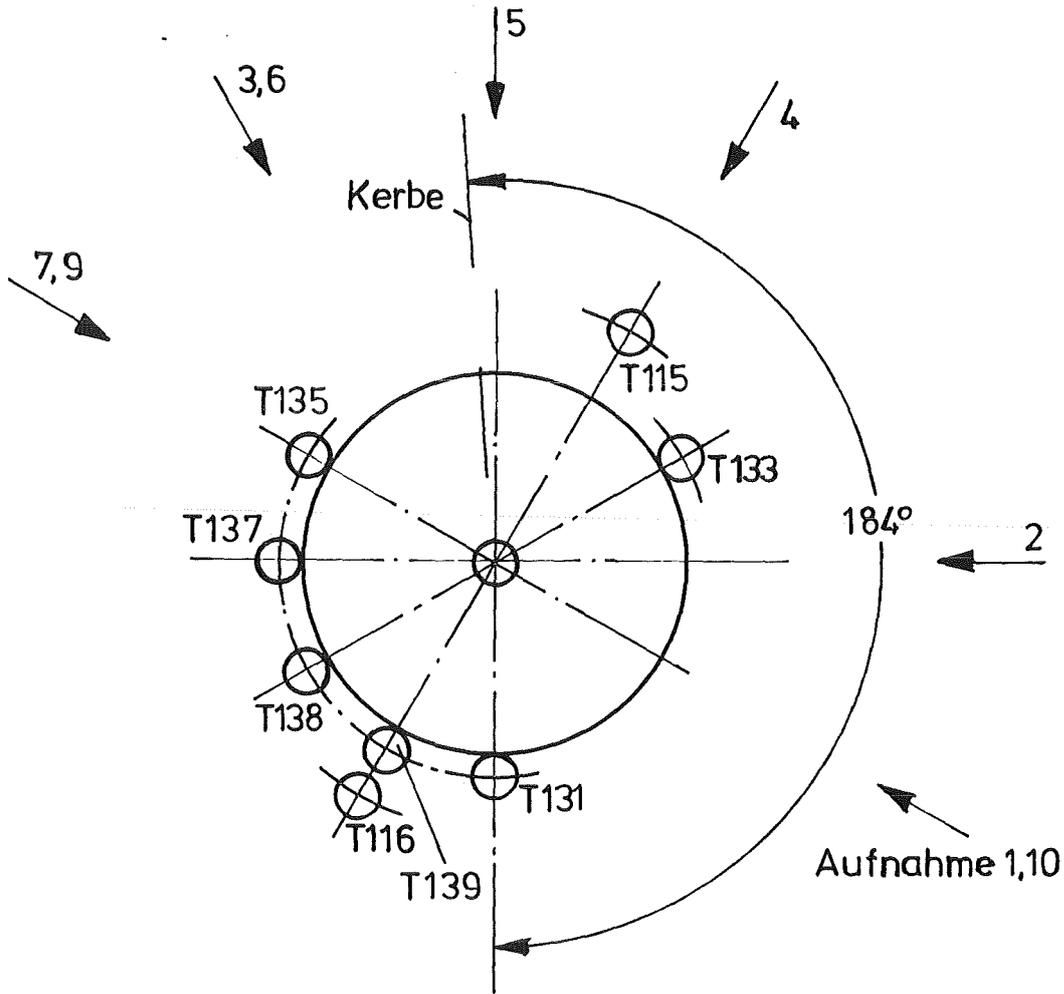
Bl.1  
Abb.: 26.1



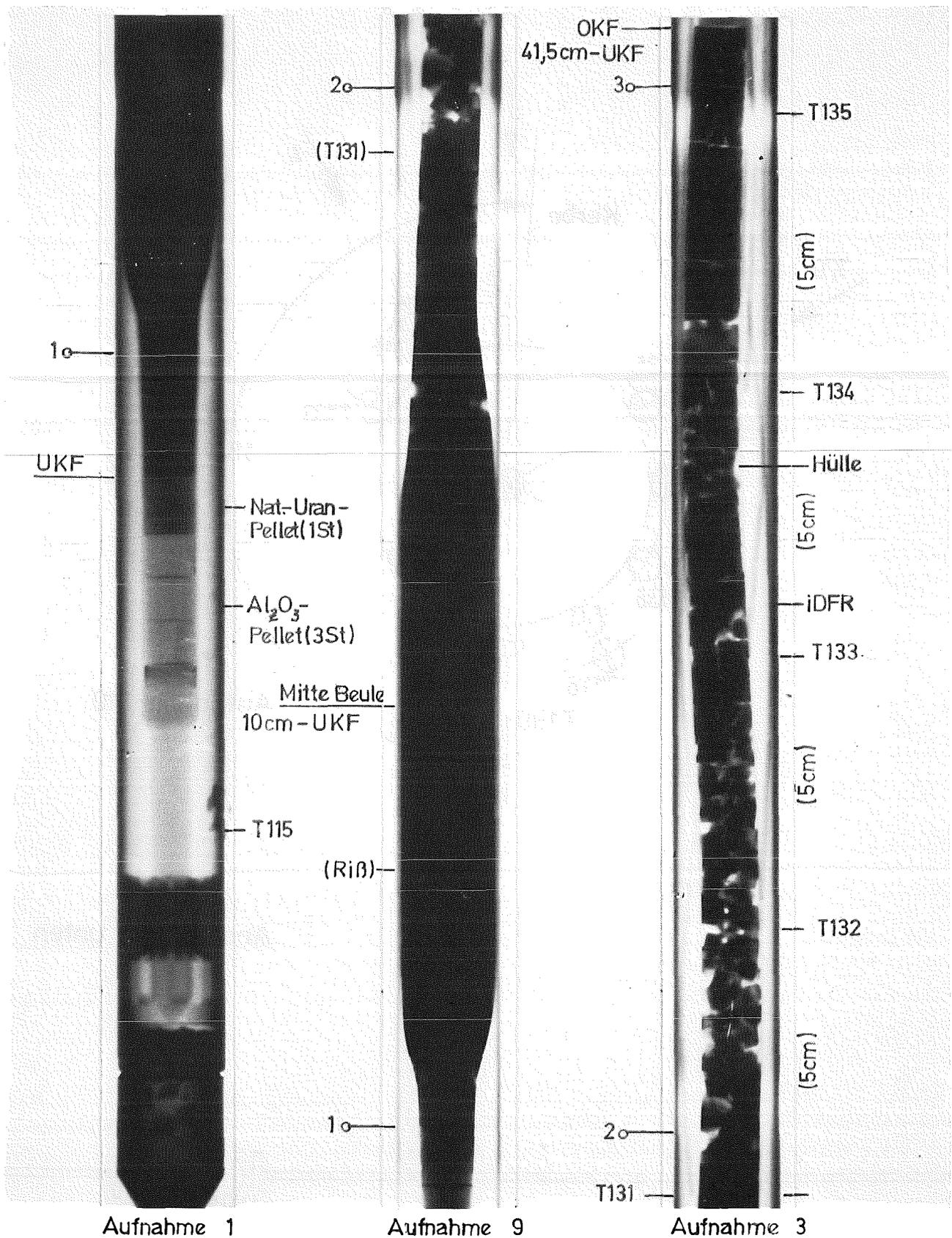
**KfK** IT-80  
PNS4237-523

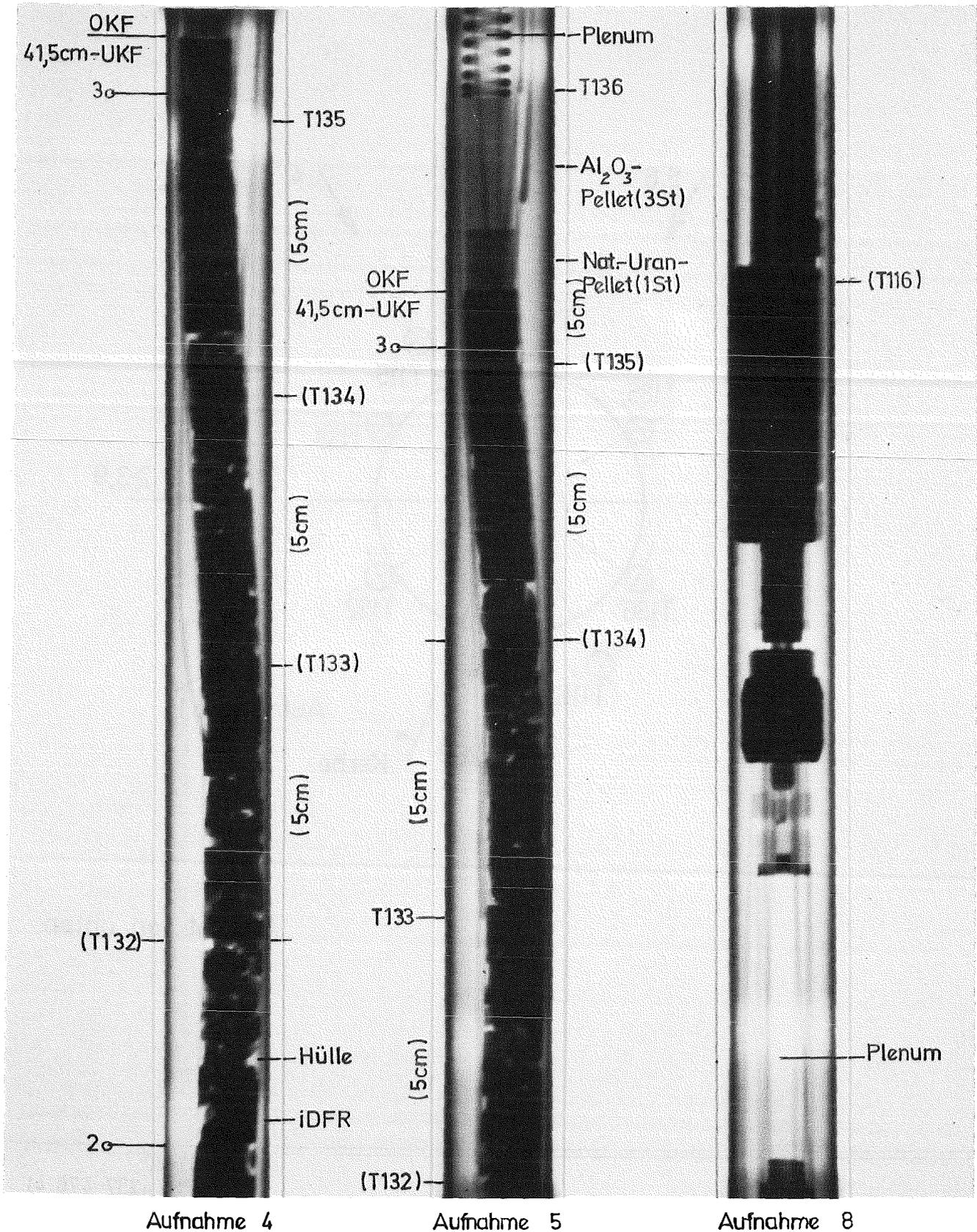
FR2 In-pile Versuche. E4  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb.: 26.2



Ansicht von unten

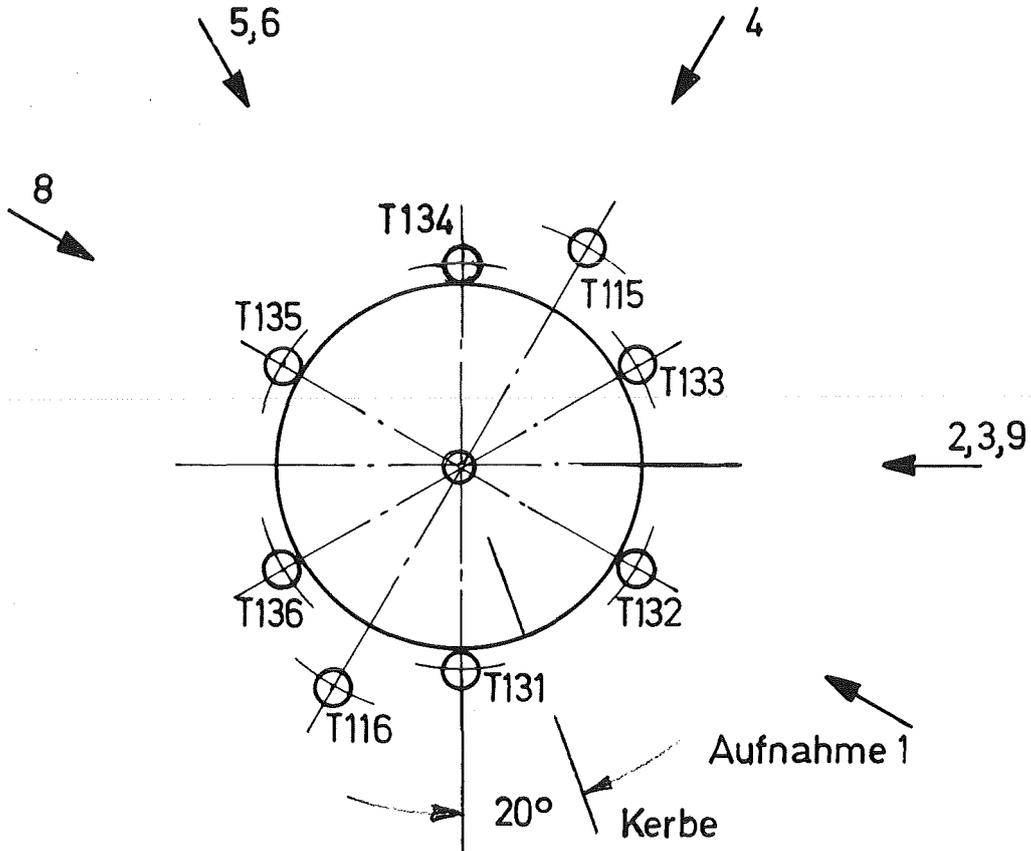




**KfK** IT-80  
PNS4237- 525

FR2 In-pile Versuche E5  
Neutronenradiografie nach Versuch

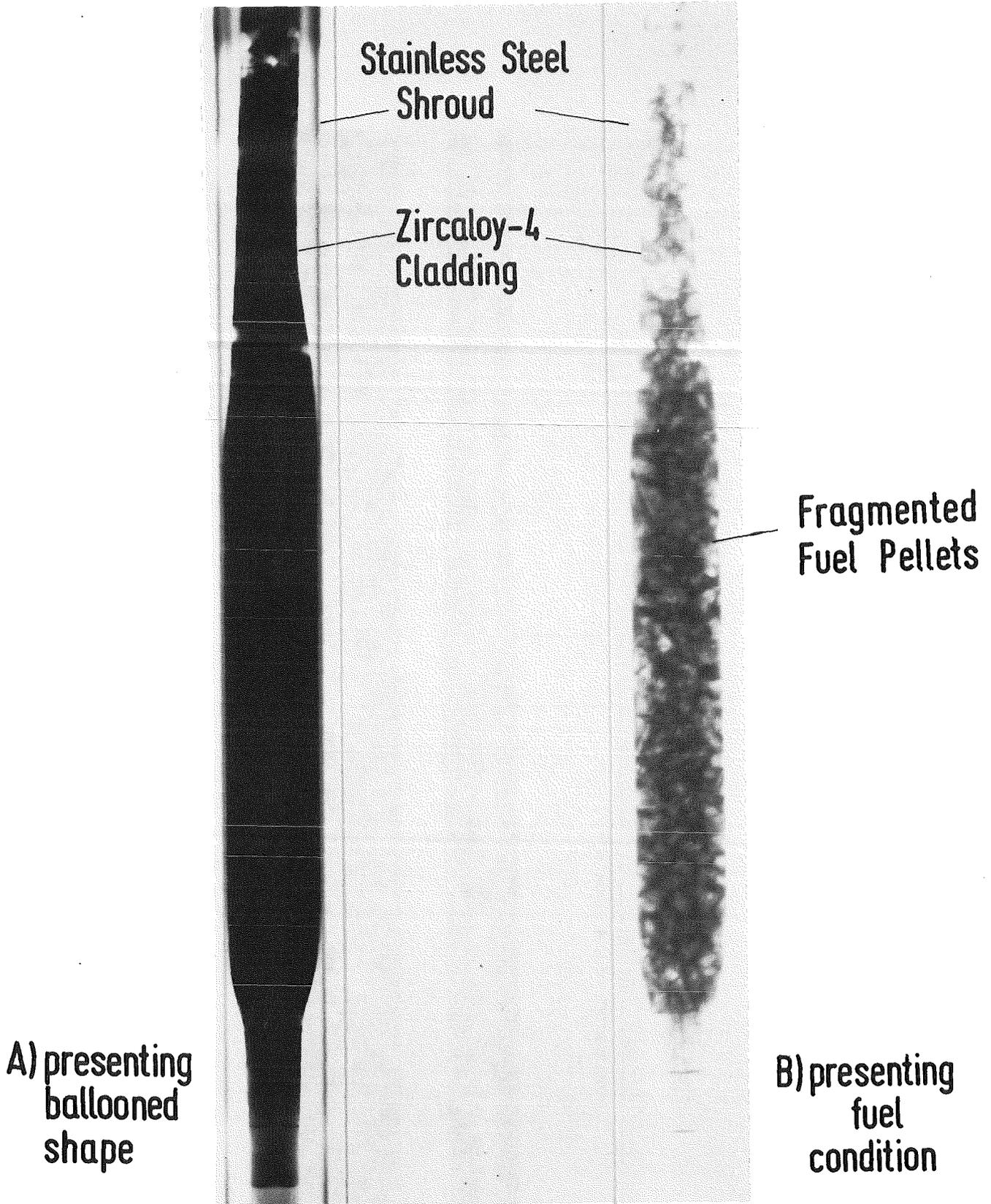
Bl.2  
Abb.: 27.2

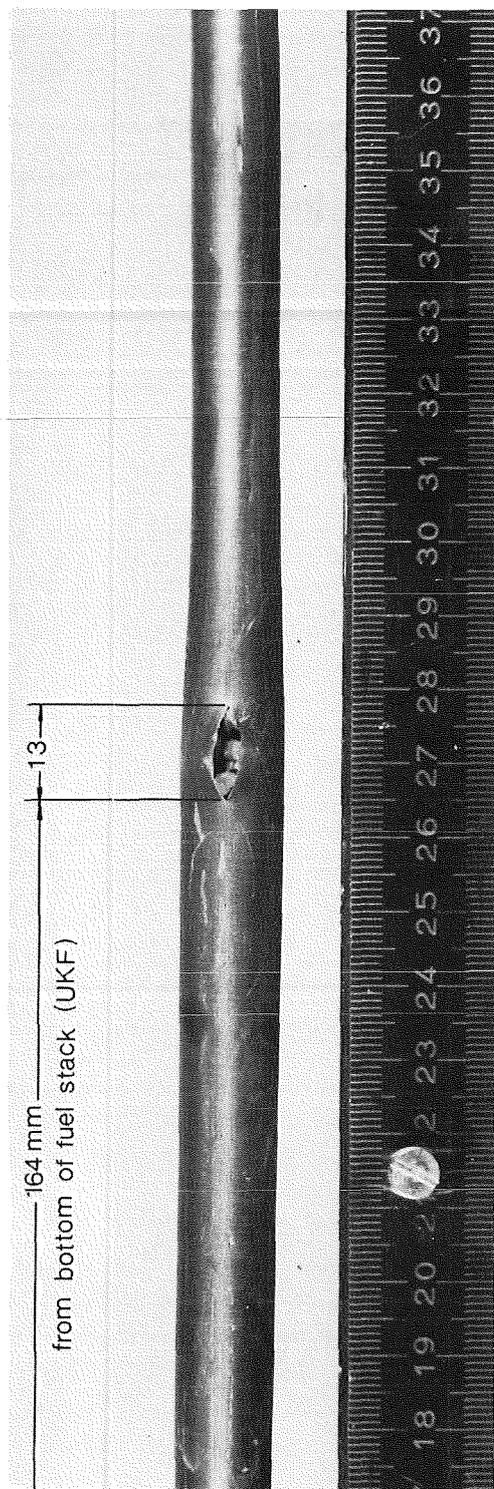


Ansicht von unten

# FR 2 In-Pile Versuche. E 5

## Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

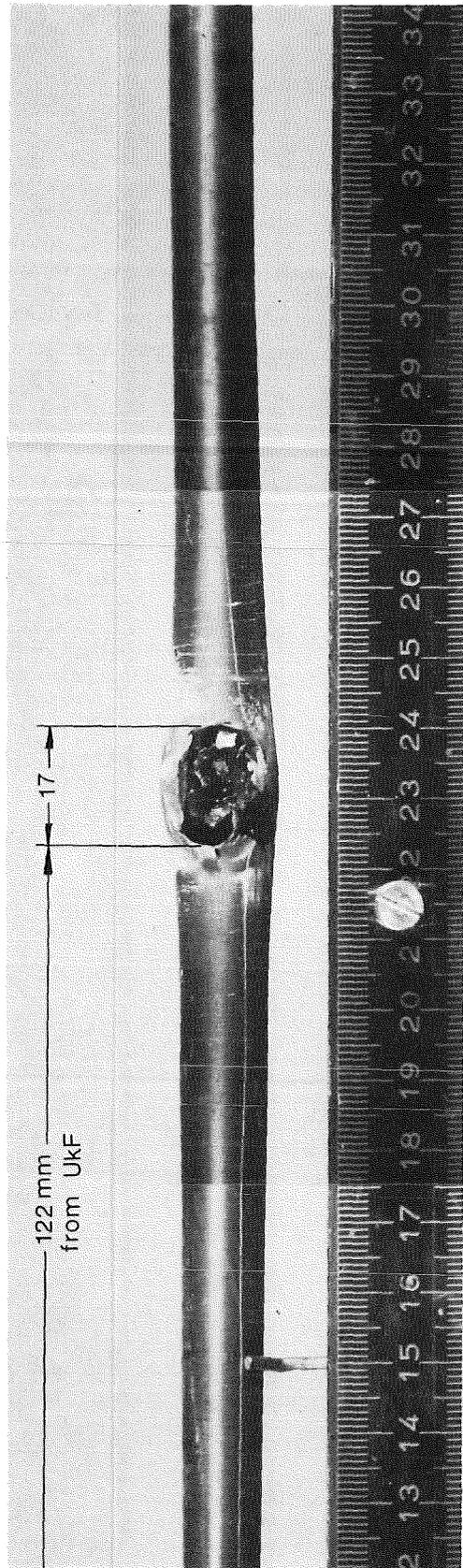




4237-660



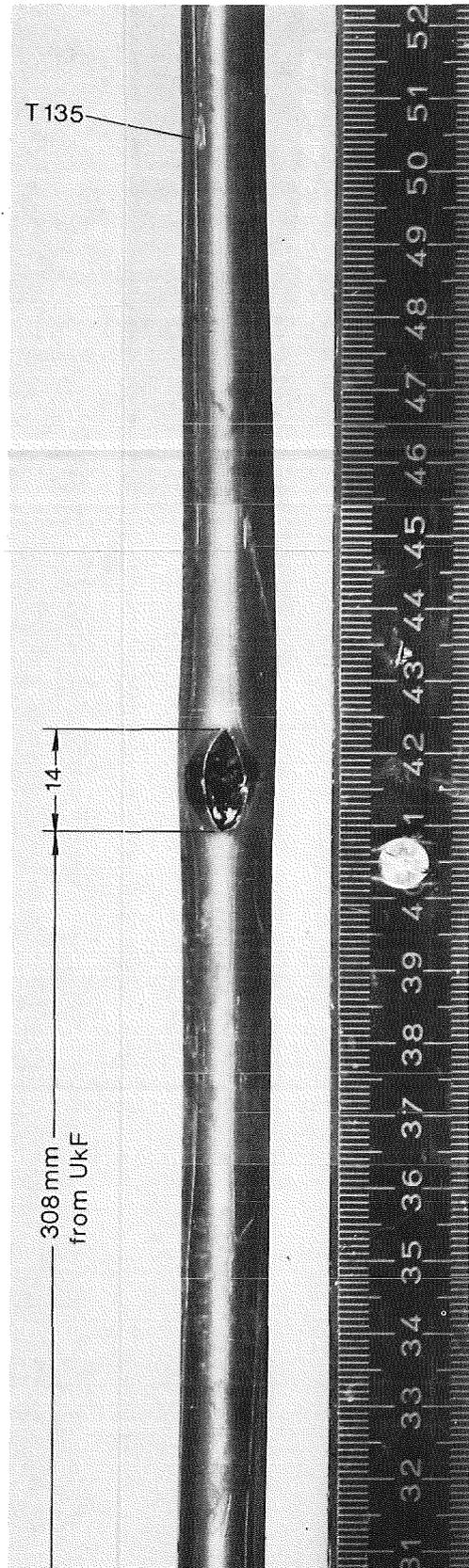
FR 2 In-Pile Tests. Test E1  
View of the Ruptured Zone



4237-661

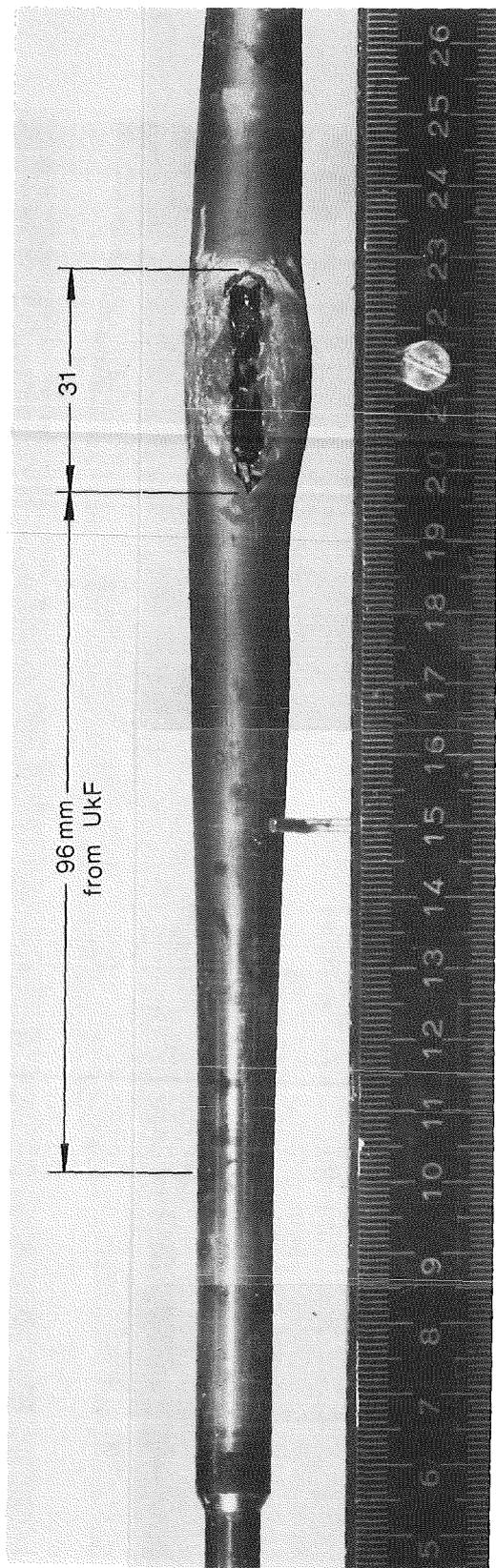


FR 2 In-Pile Tests. Test E2  
View of the Ruptured Zone



4237-662

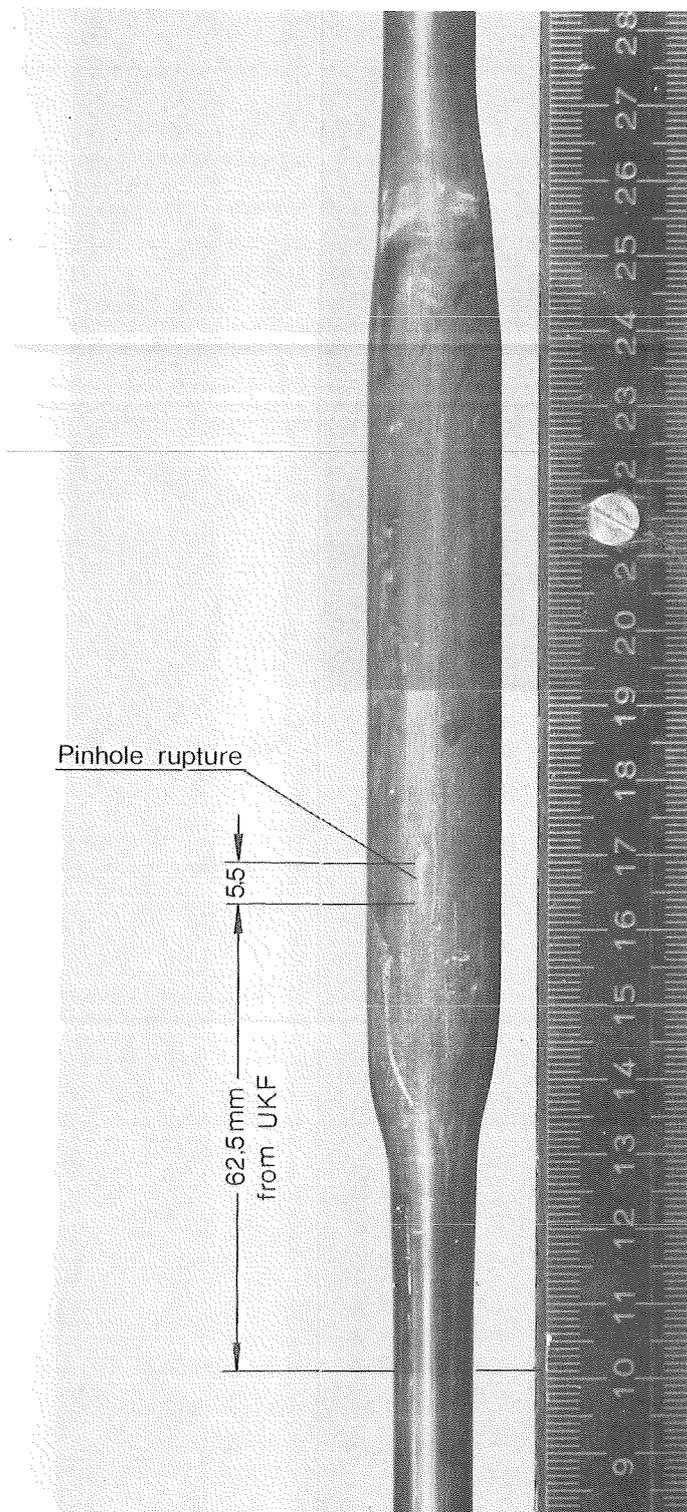




4237-663



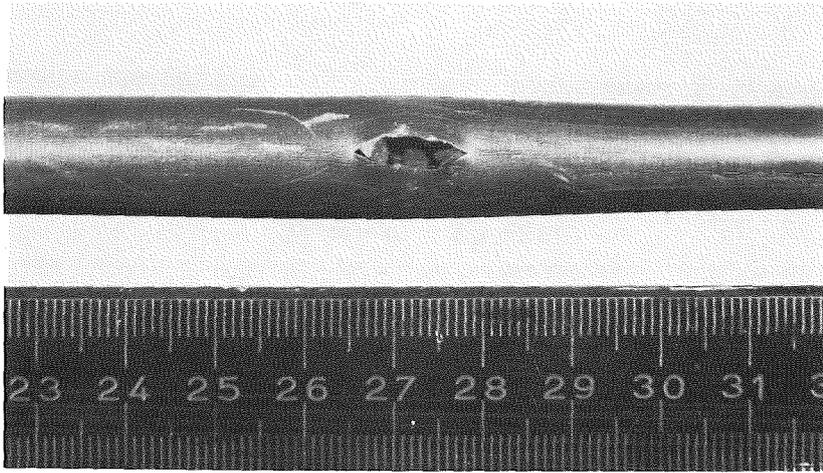
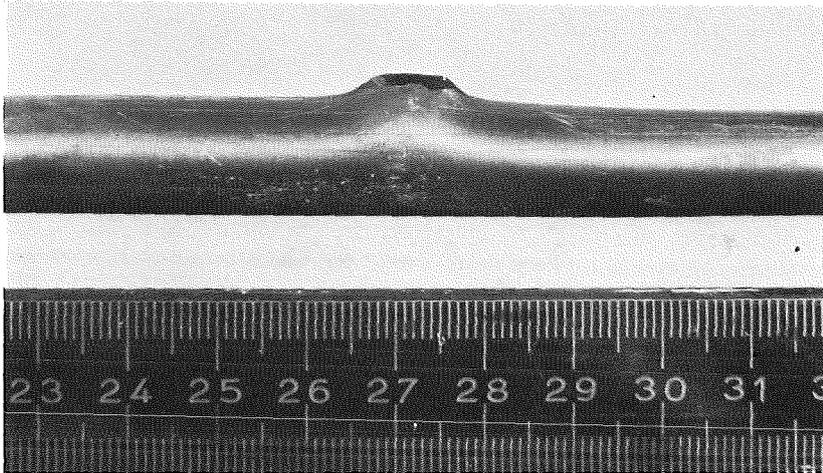
FR 2 In-Pile Tests. Test E4  
View of the Ruptured Zone



4237-664

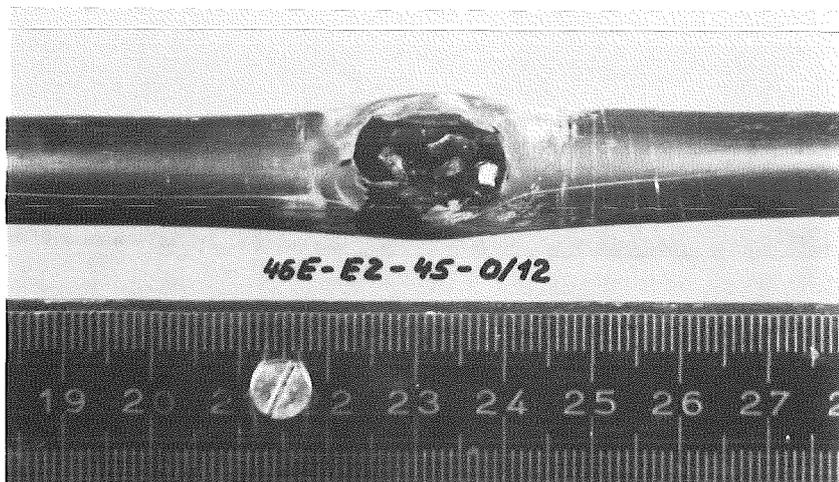
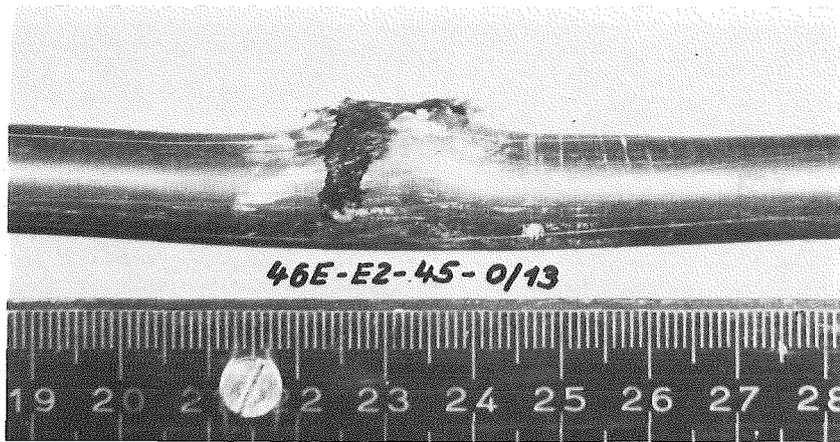


FR 2 In-Pile Tests. Test E5  
View of the Ruptured Zone



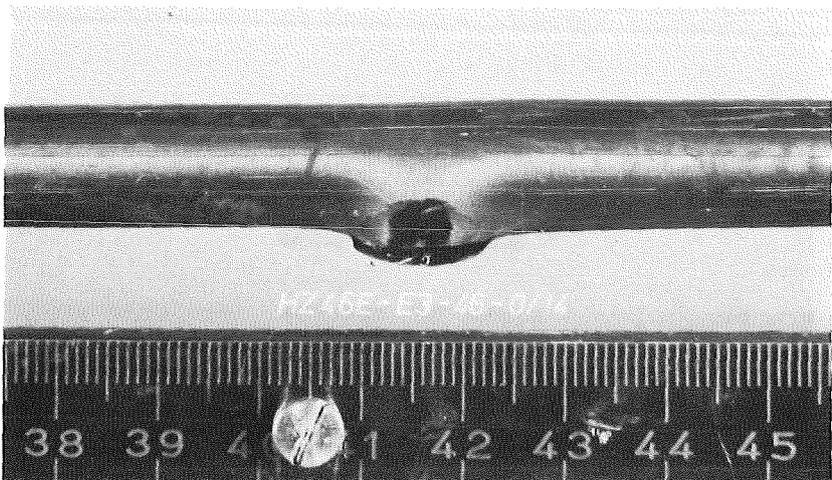
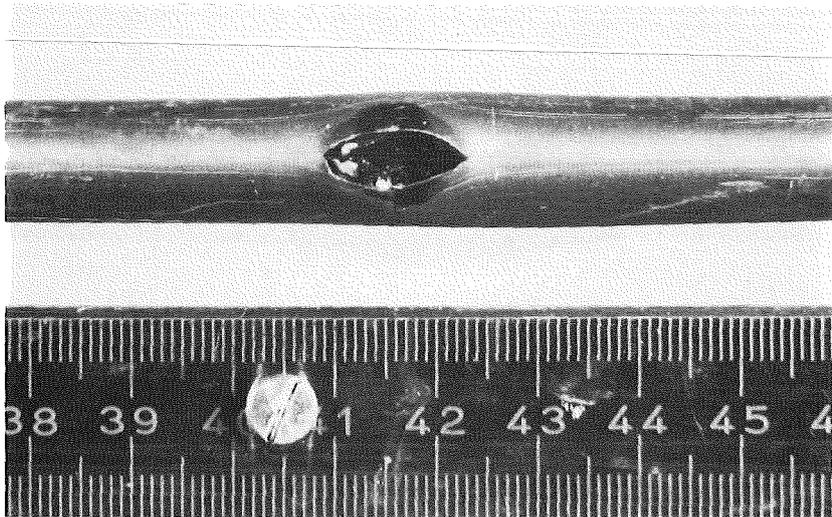
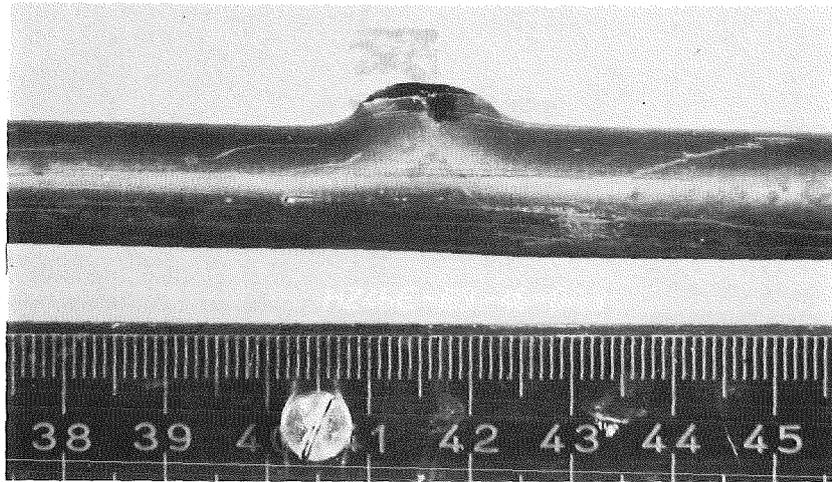
4237-665





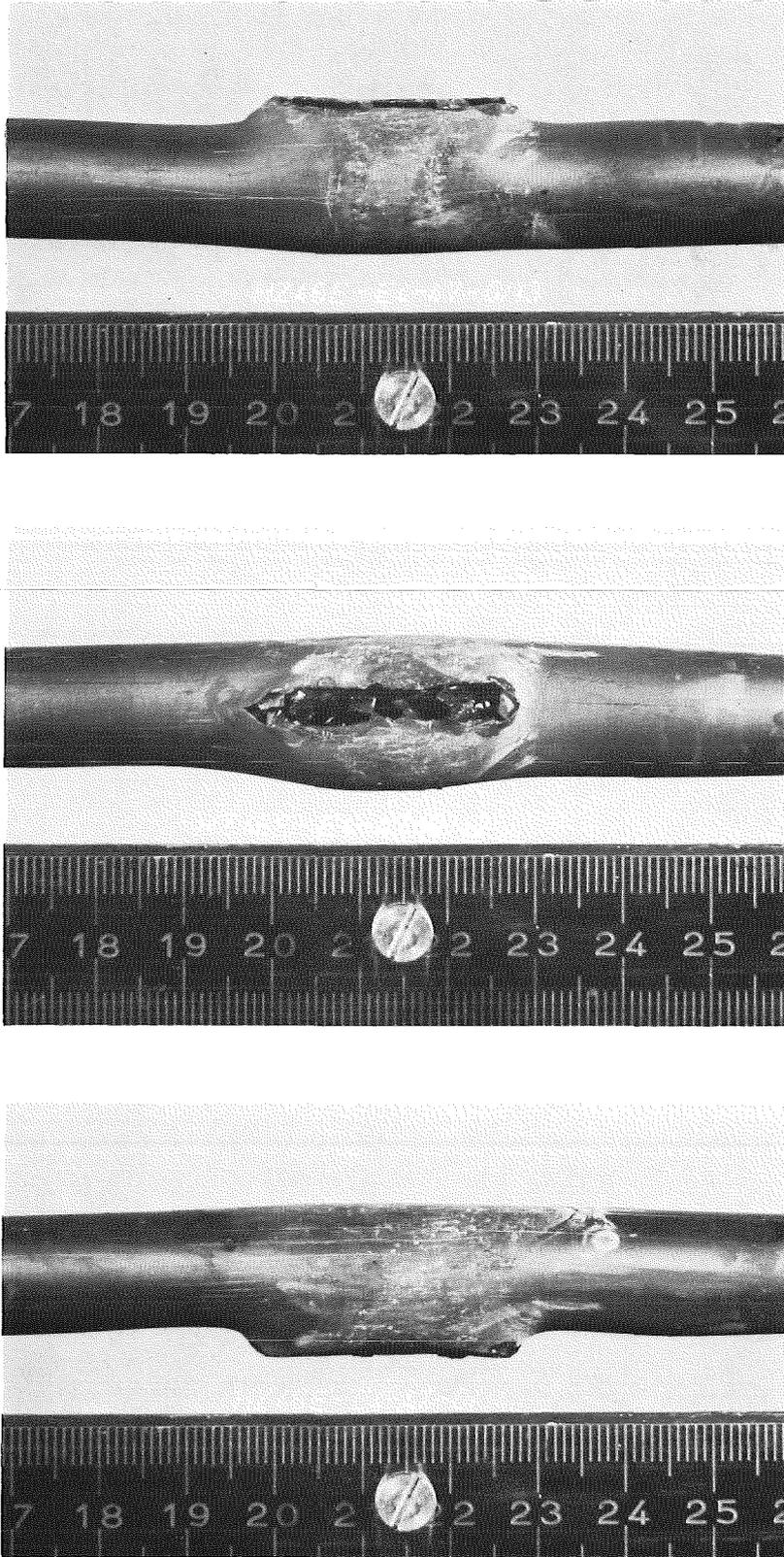
4237-666





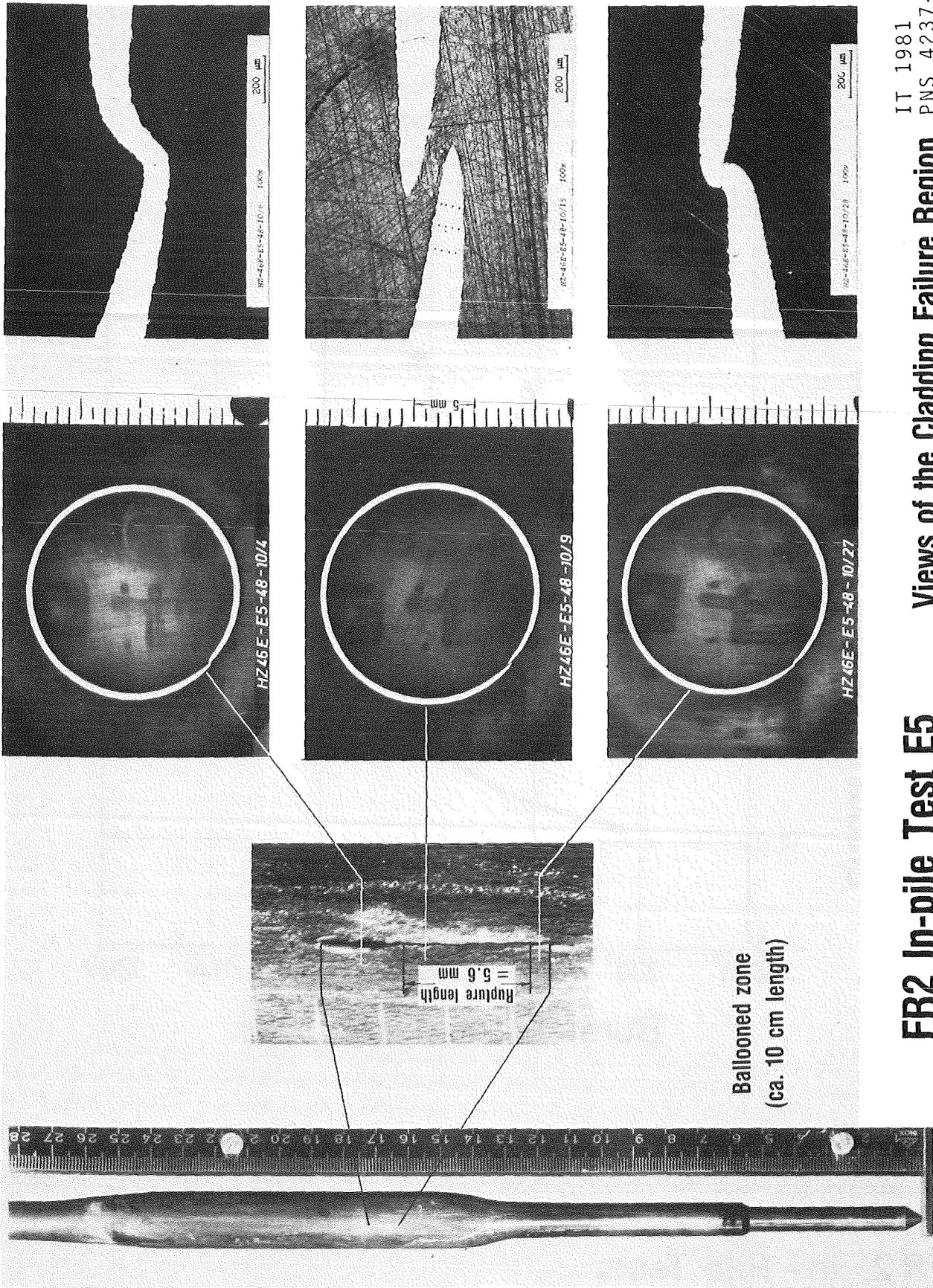
4237-667





4237-668

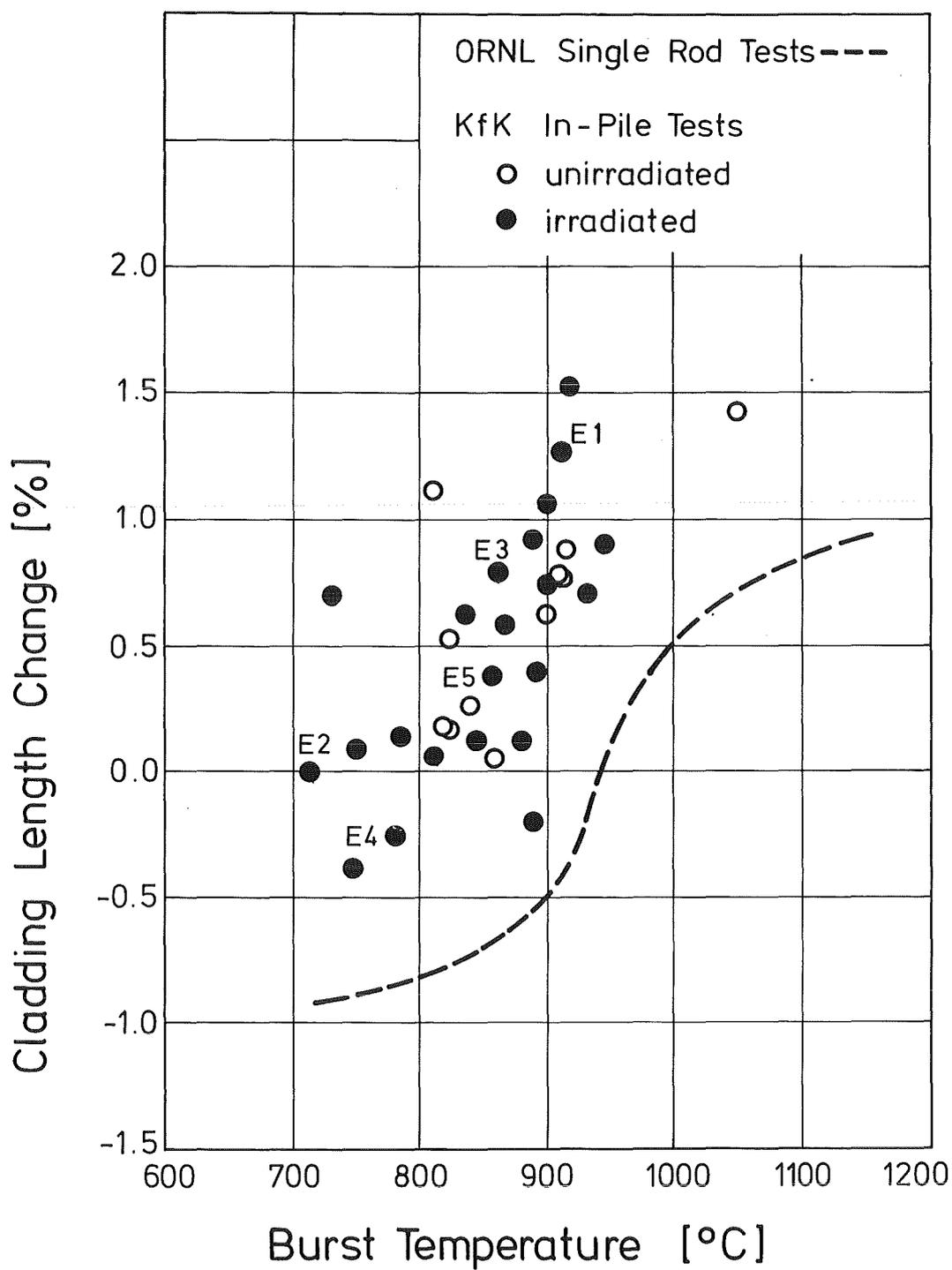




IT 1981  
PNS 4237-611

### Views of the Cladding Failure Region

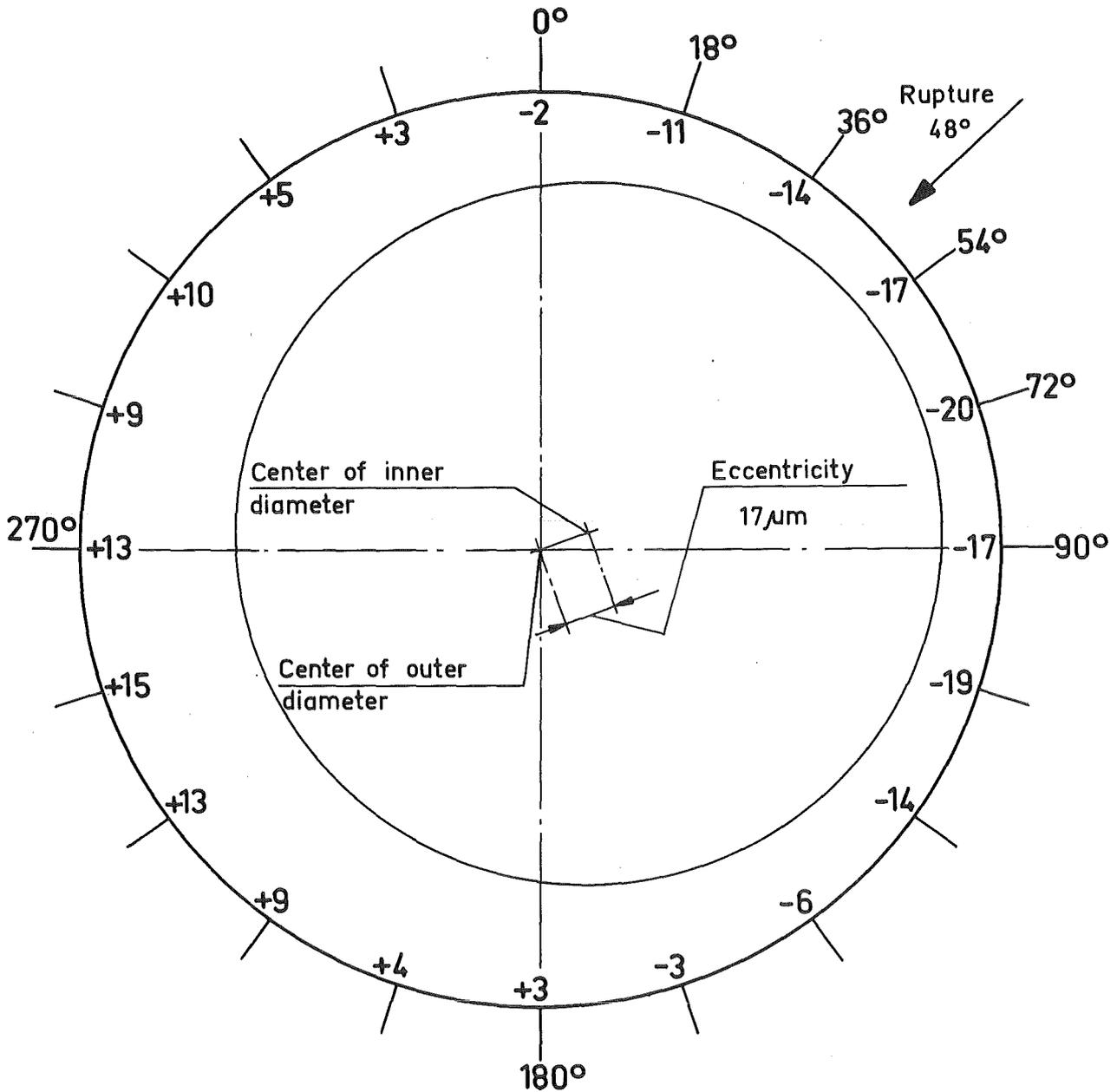
### FR2 In-pile Test E5



## FR 2 In-Pile Tests

Cladding Length Change vs. Burst Temperature

Fig. 39



Bottom view

Measuring plane No. 14  
Measuring plane : 155 mm from UKF  
Rupture midplane: 162 mm from UKF

TEST E1; ROD44



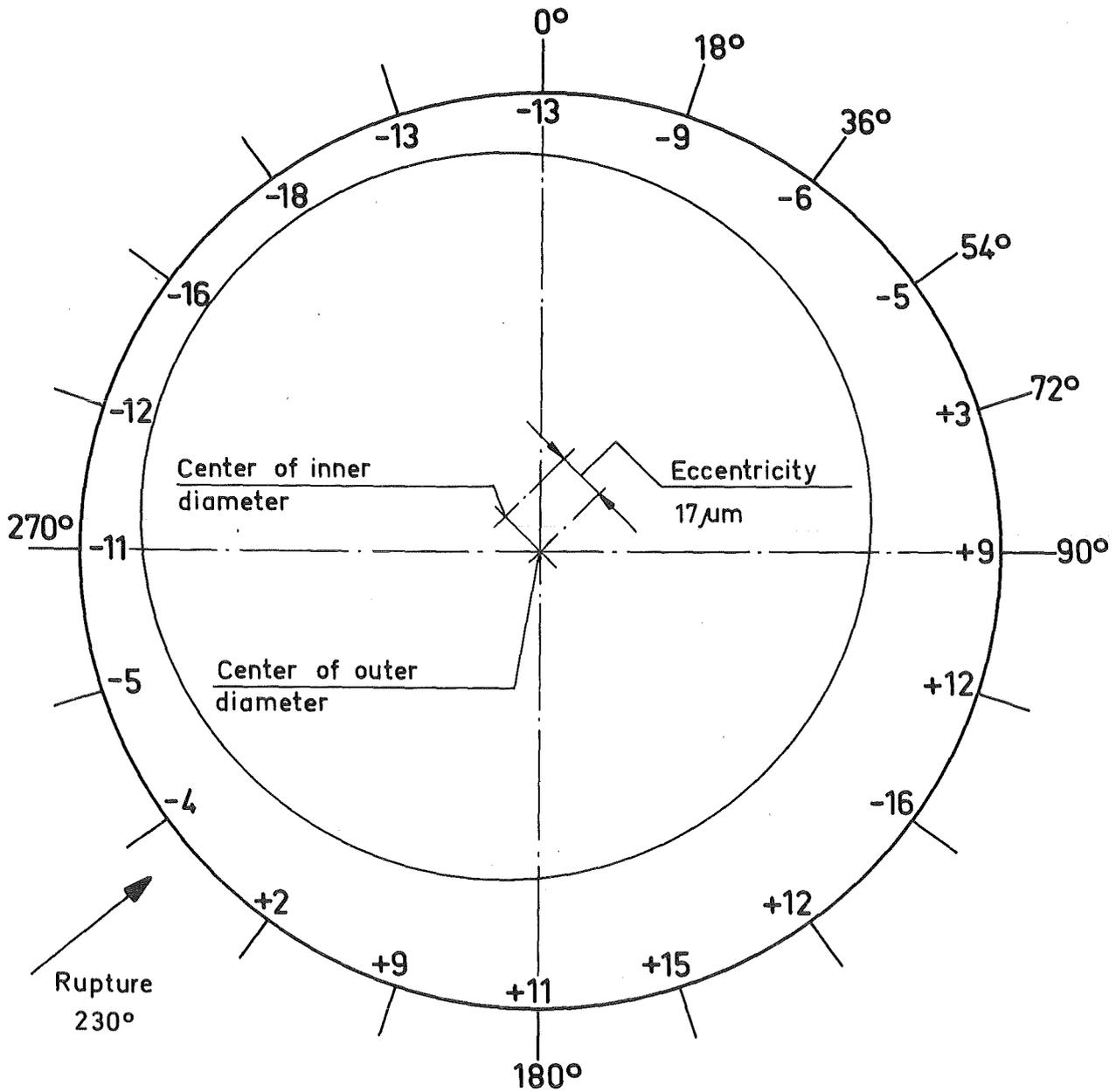
IT 1980  
PNS 4237-359.37

## FR 2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

40.1



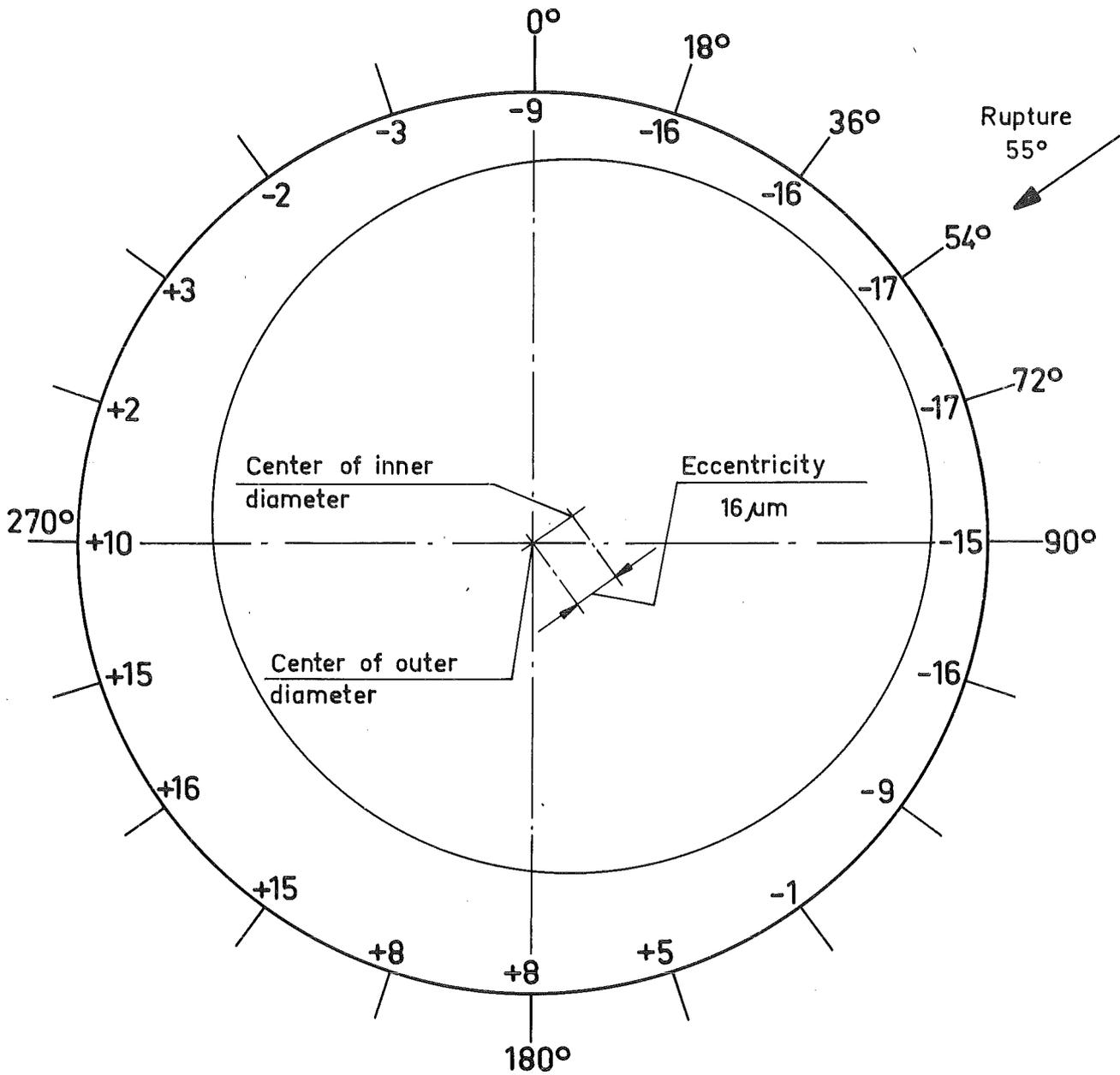


Bottom view  
Measuring plane No. 4  
Measuring plane: 305mm from UKF  
Rupture midplane: 310mm from UKF

### TEST E3; ROD46

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm



Bottom view

Measuring plane No.14

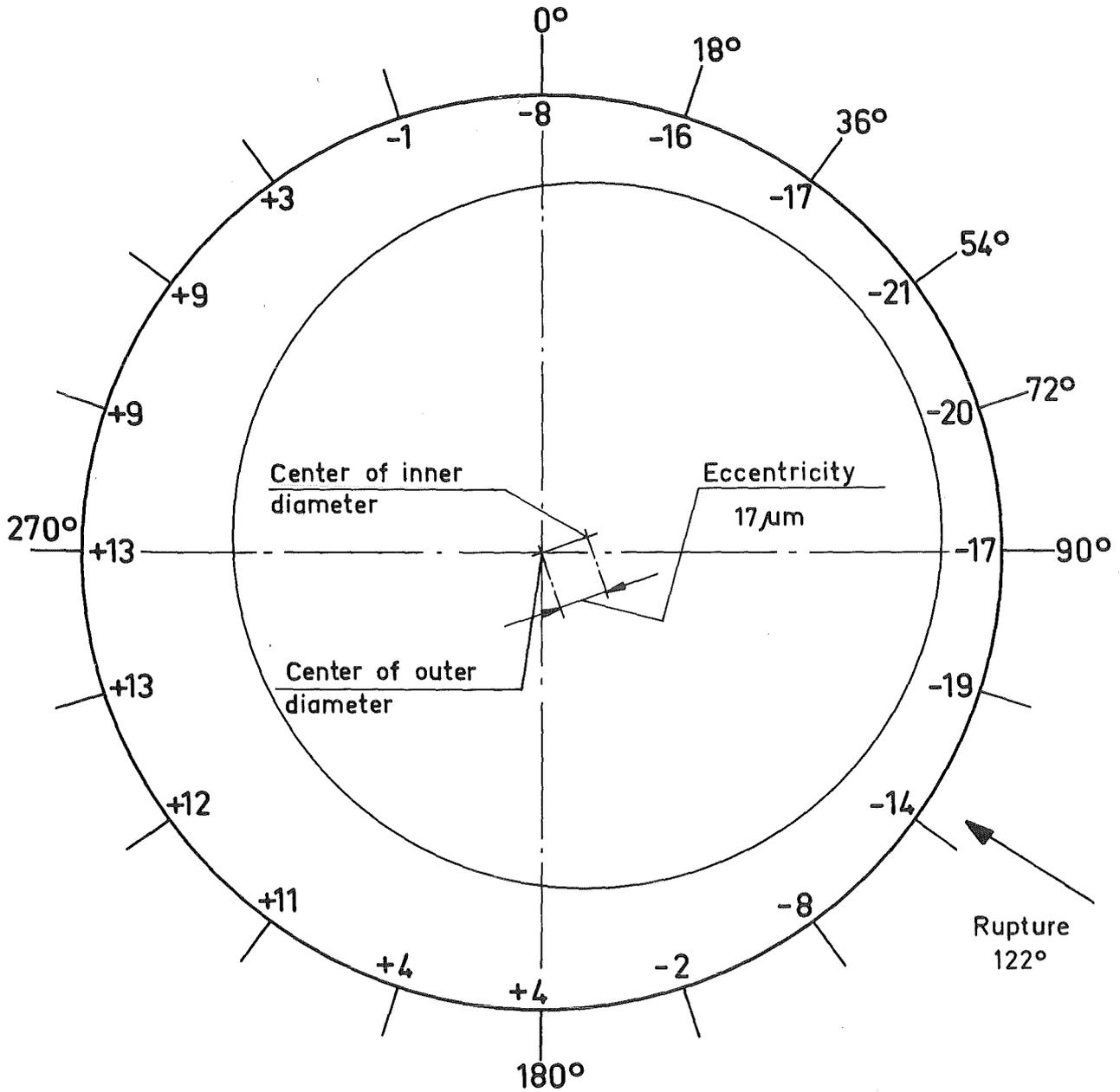
Measuring plane : 155 mm from UKF

Rupture midplane:115 mm from UKF

TEST E4; ROD 47

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm



Bottom view

Measuring plane No. 14

Measuring plane: 155 mm from UKF

Rupture midplane: 100 mm from UKF

TEST E5; ROD 48

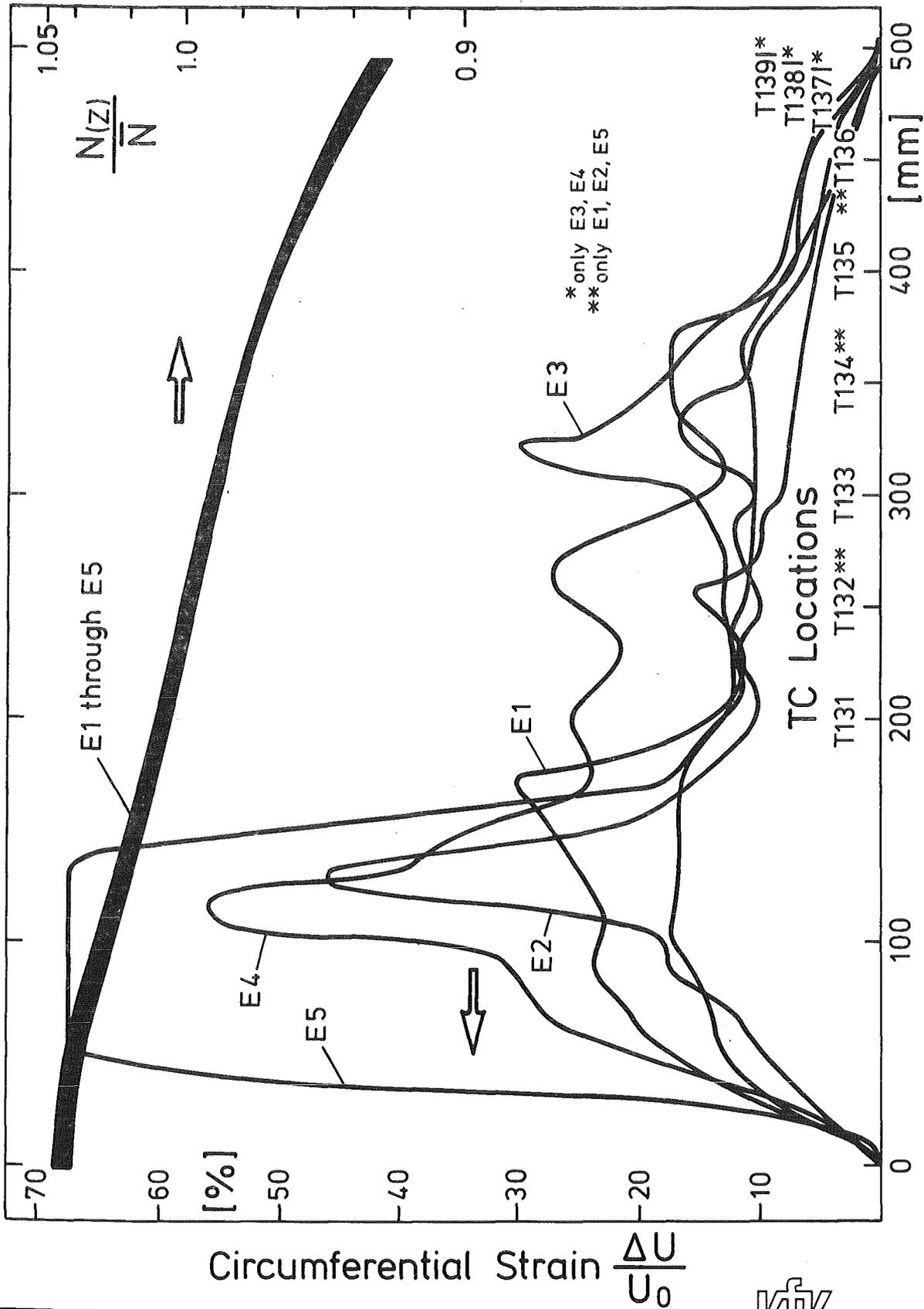


IT 1980  
PNS 4237-359.41

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

40.5



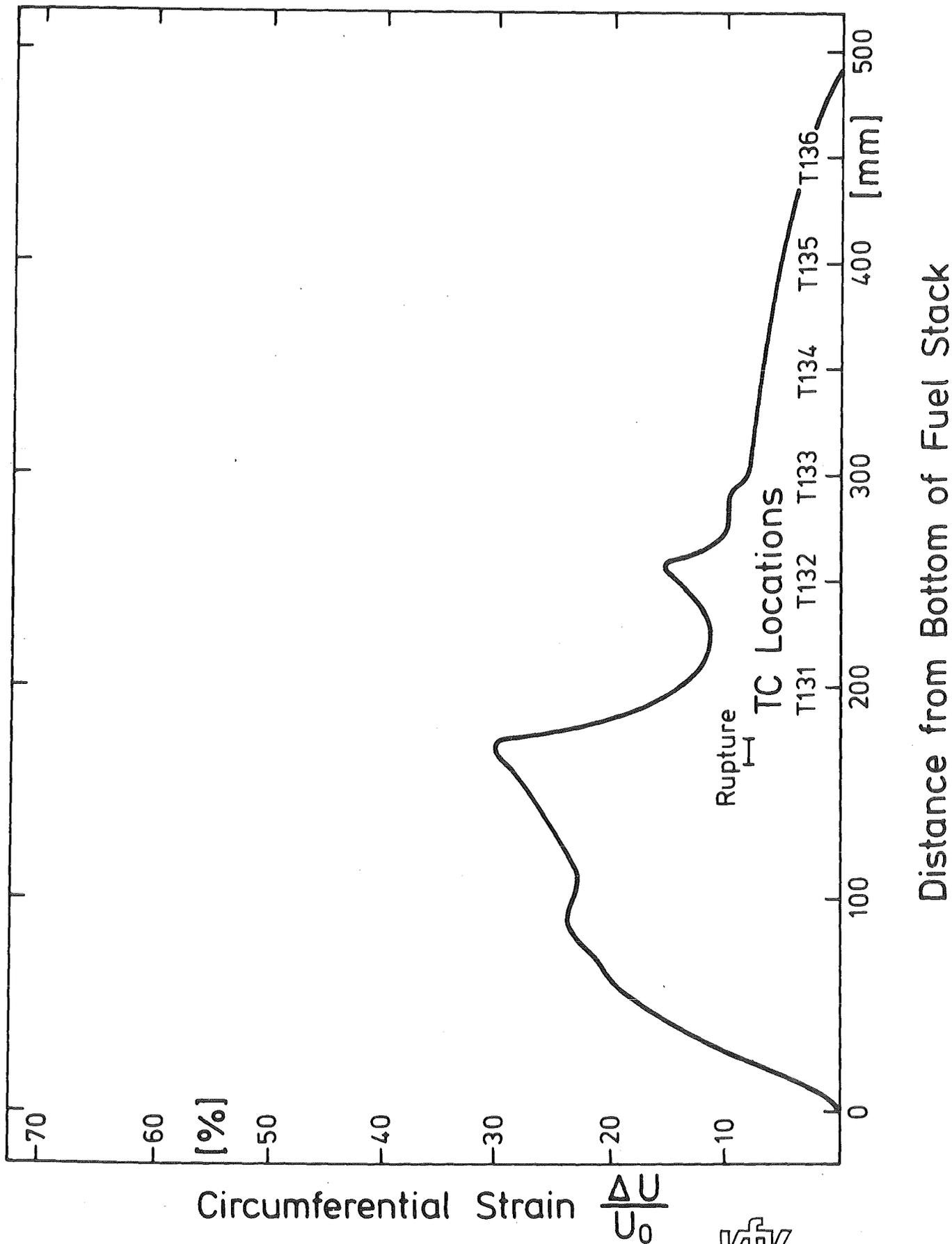
Distance from Bottom of Fuel Stack



IT 82  
PNS 4237-698

## FR 2 In-Pile Tests.

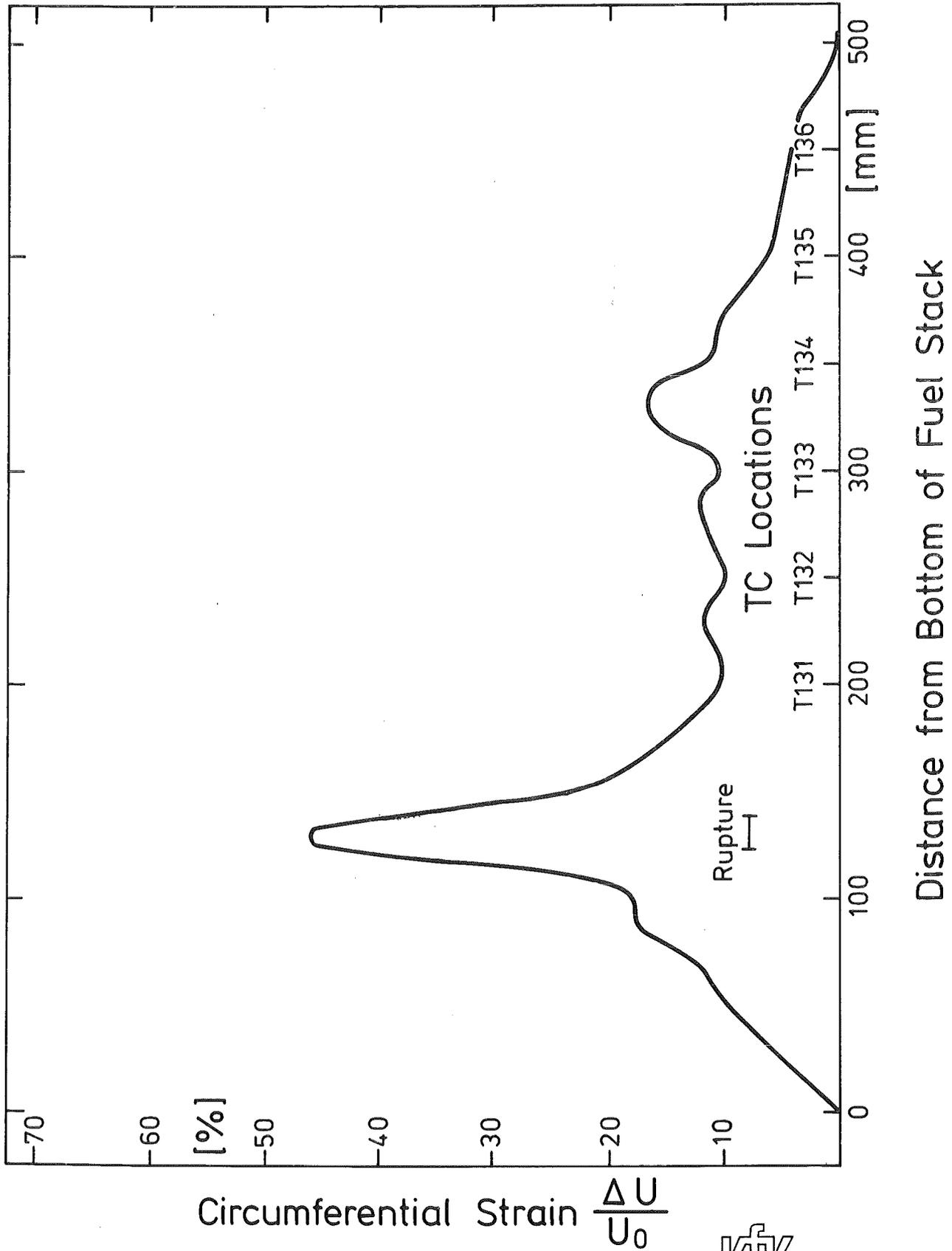
Circumferential Strain and Axial Power Profiles of the Tests E1 through E5



IT 81  
PNS 4237-95.37

# FR 2 In-Pile Tests.

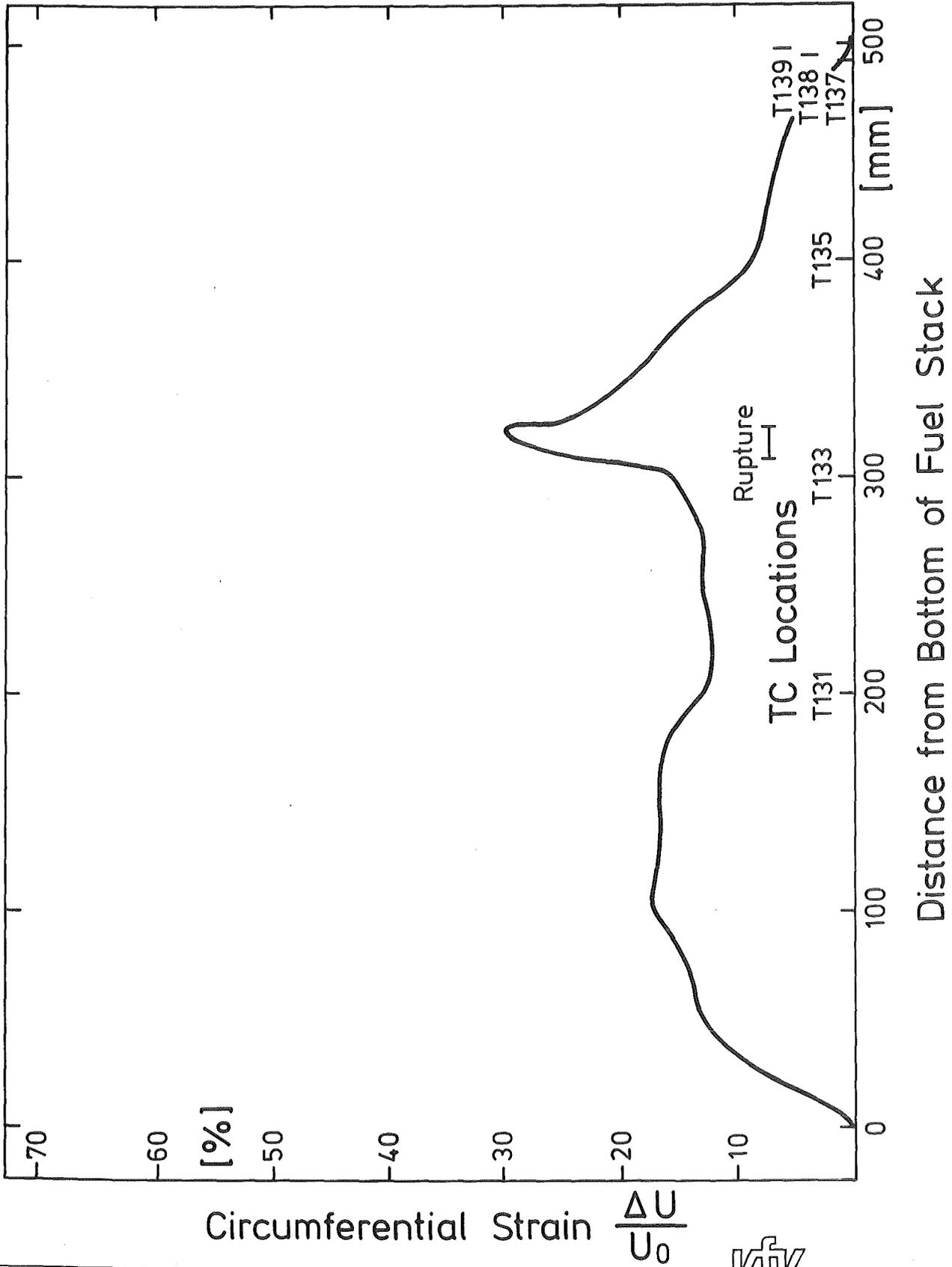
Axial Profile of Circumferential Strain, Test E1



IT 82  
PNS 4237-95.38

## FR 2 In-Pile Tests.

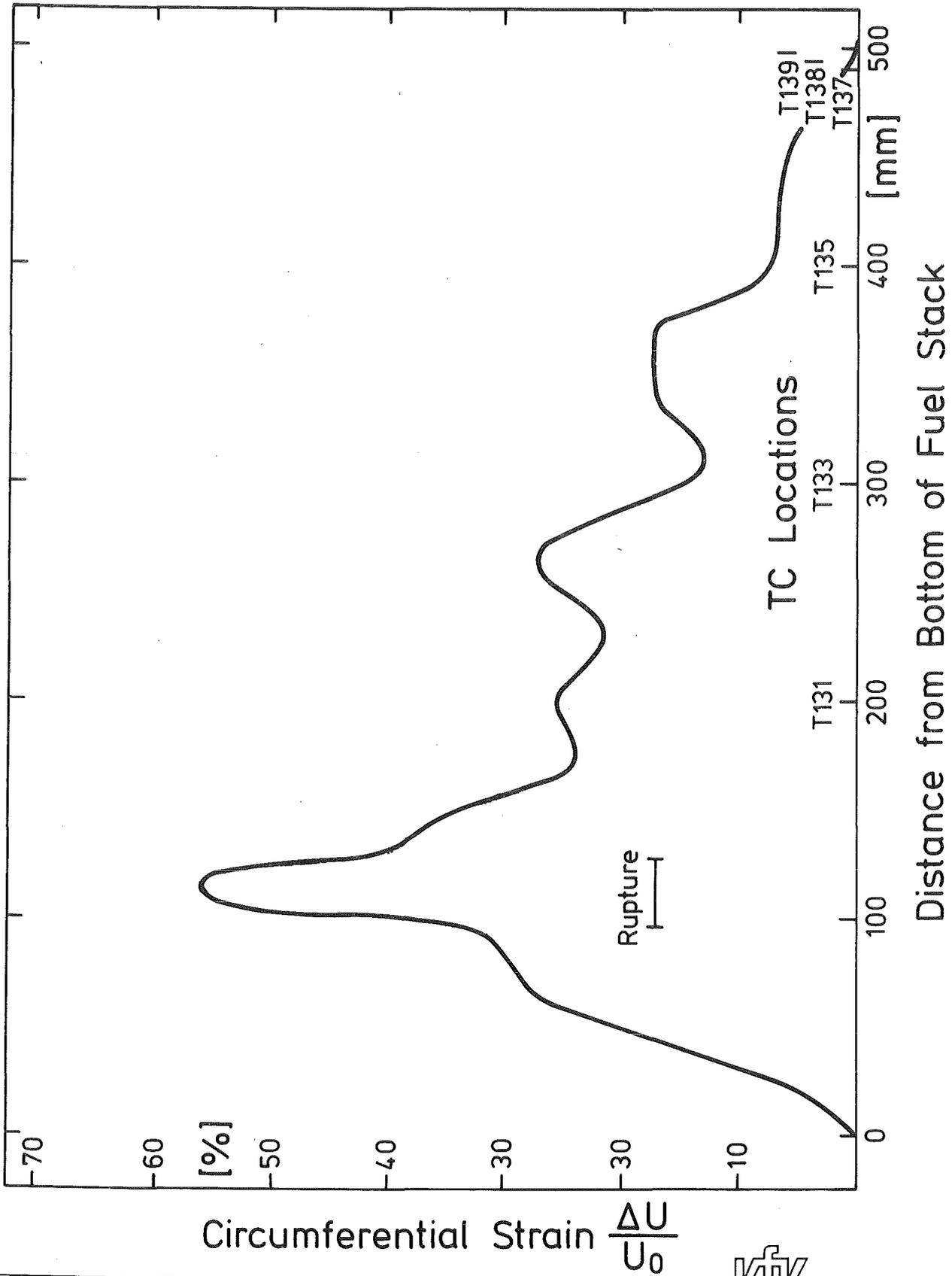
Axial Profile of Circumferential Strain, Test E2



IT 82  
PNS 4237-95.39

# FR2 In-Pile Tests.

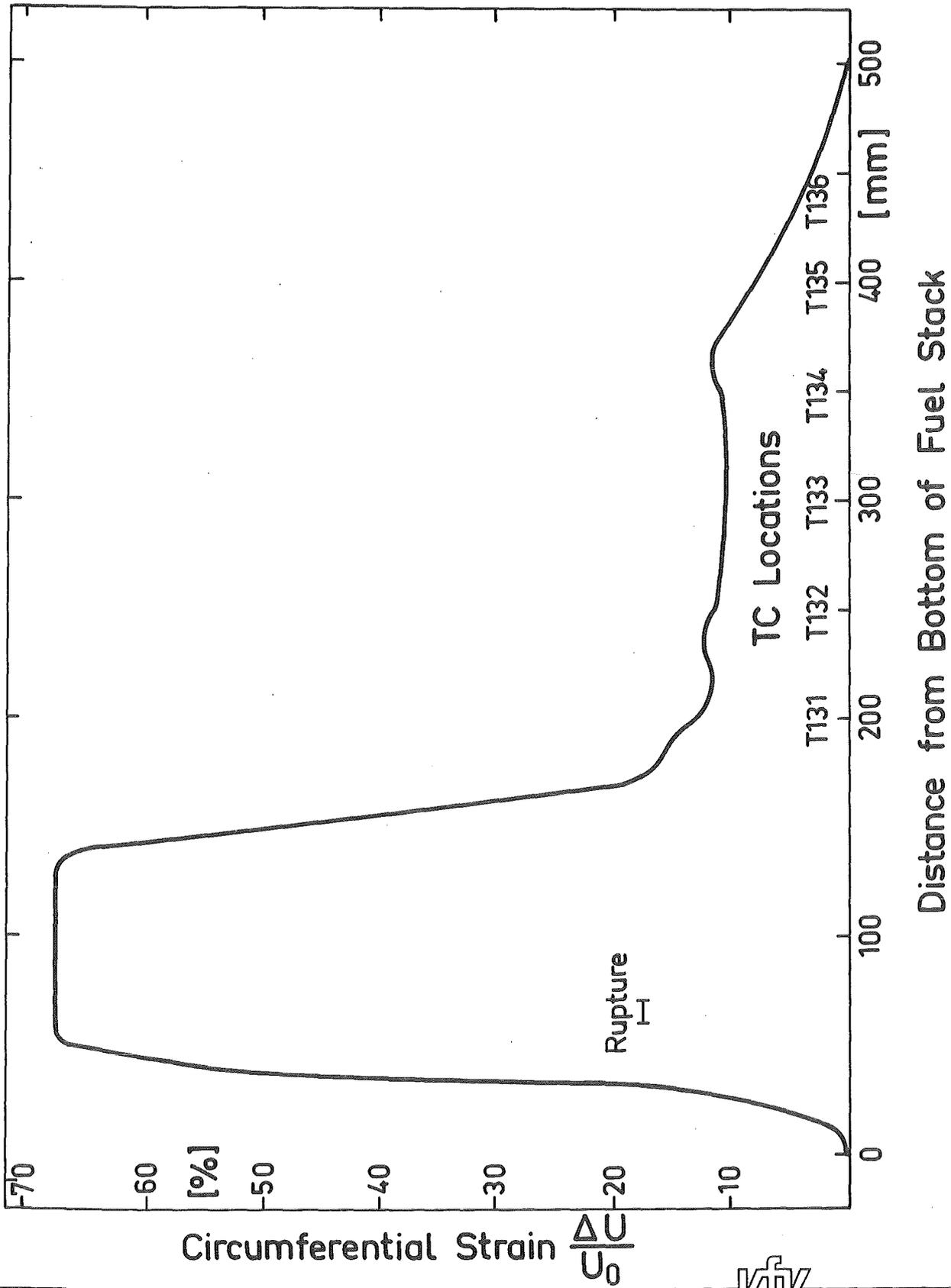
Axial Profile of Circumferential Strain, Test E3



IT 82  
PNS 4237-95.40

# FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test E4

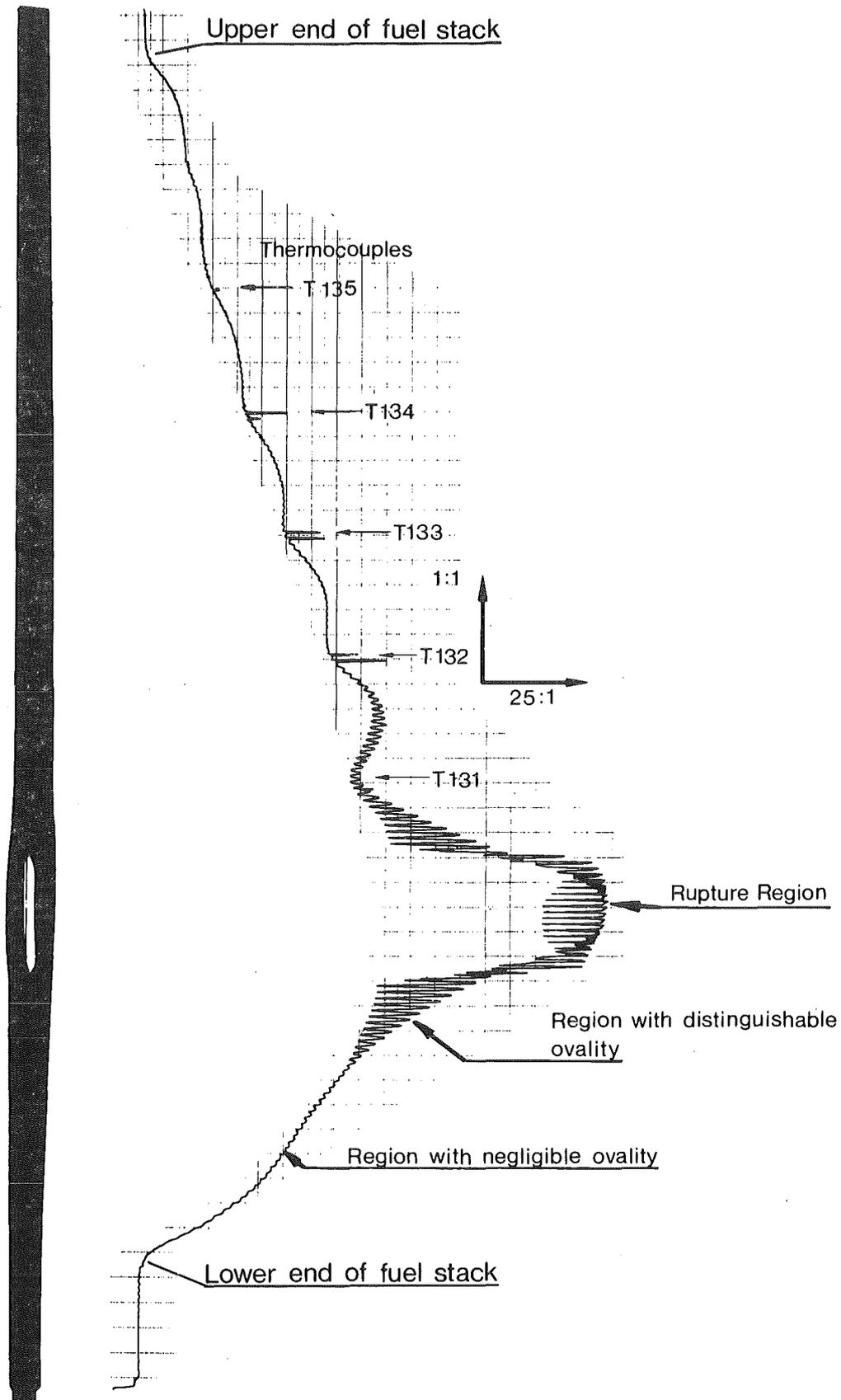


KfK  
IT 81  
PNS 4237-95.41

### FR 2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test E5

42.5

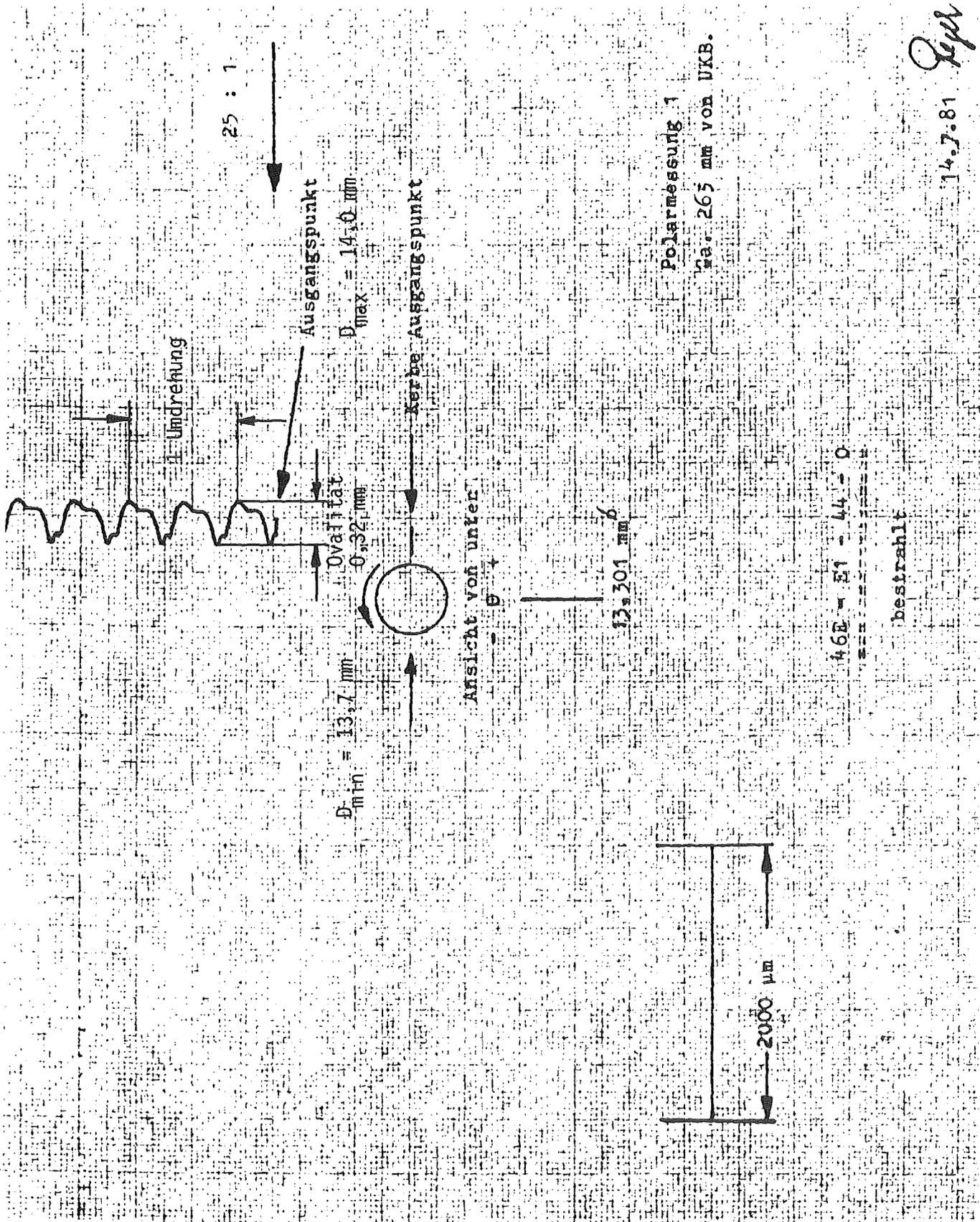


IT 1980  
PNS 4237-400

## FR 2 In-Pile Tests.

Typical spiral profile;

posttest measured rod diameters of test A2.2 Abb.: 43

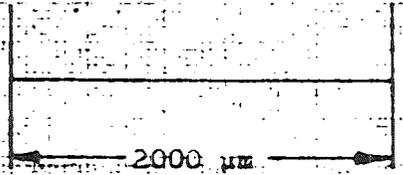
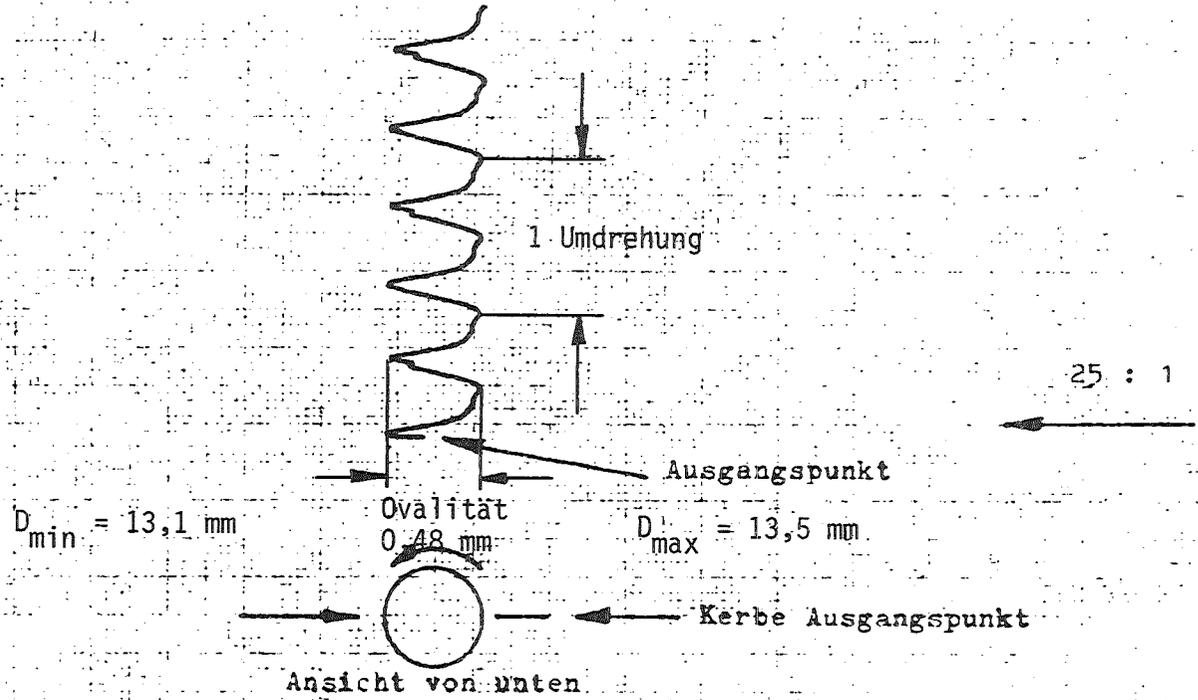


POLARMESSUNG 1 (162 MM VON UKF)  
 VERSUCH E 1 STAB NR. 44

44.1



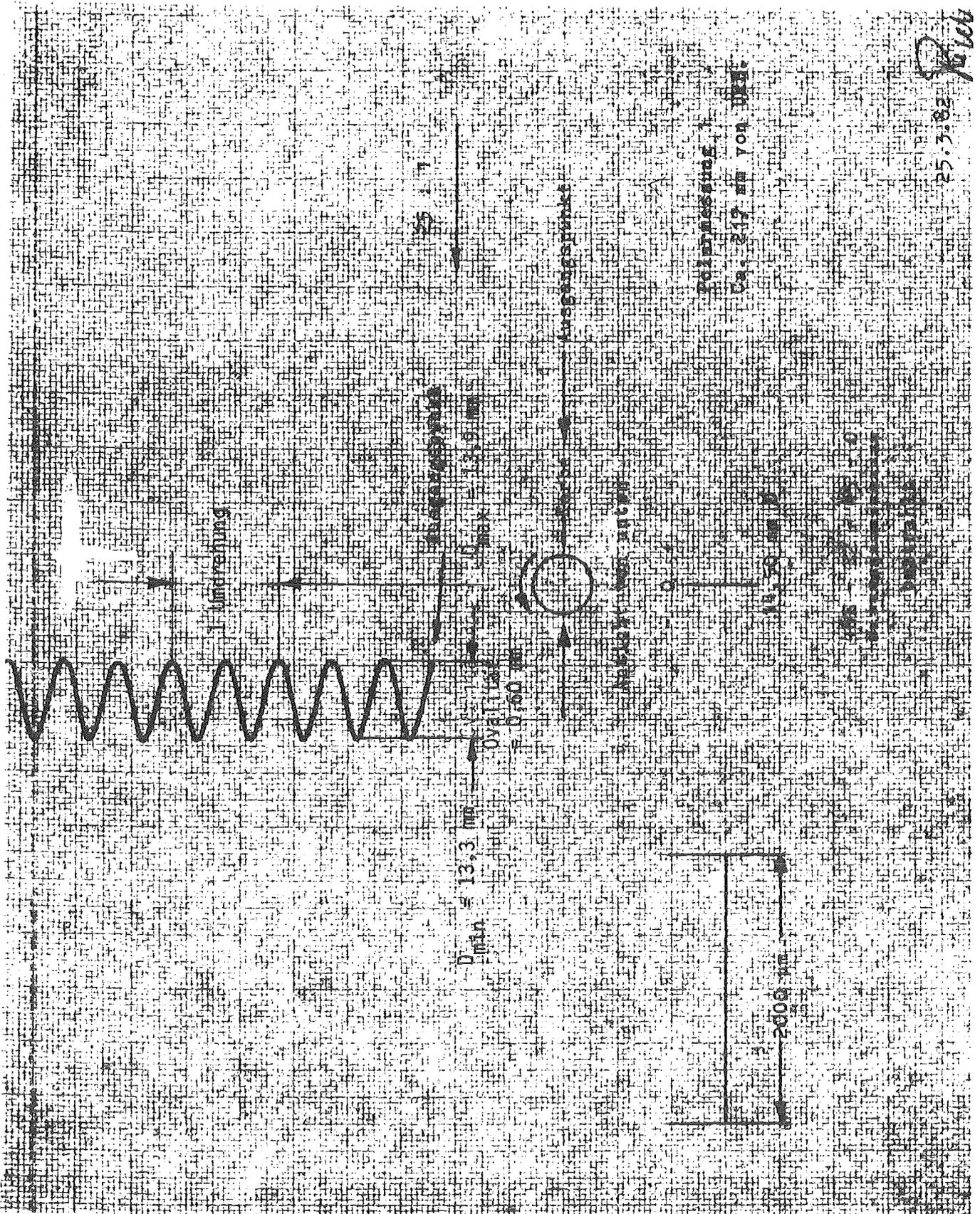
IT - 1981

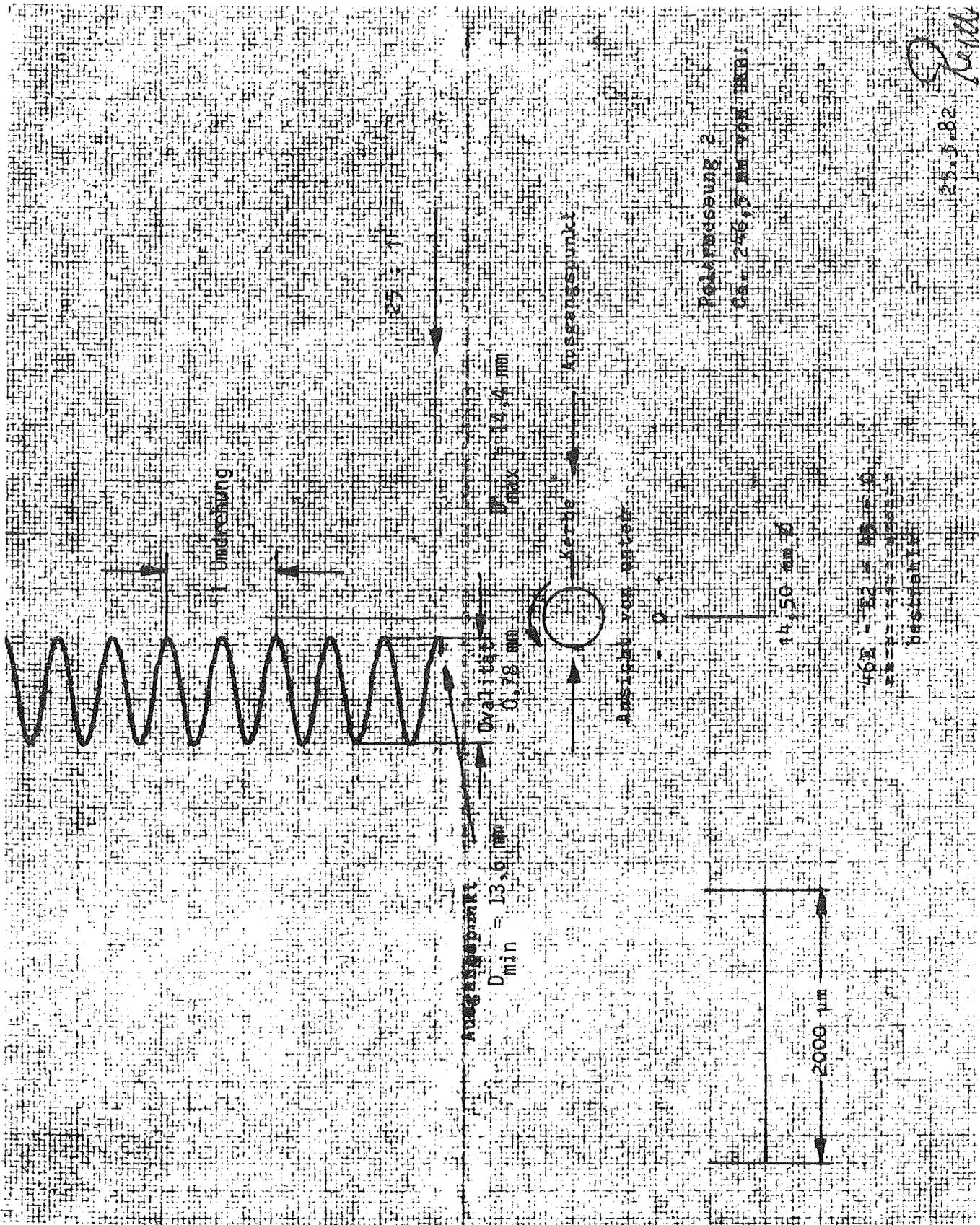


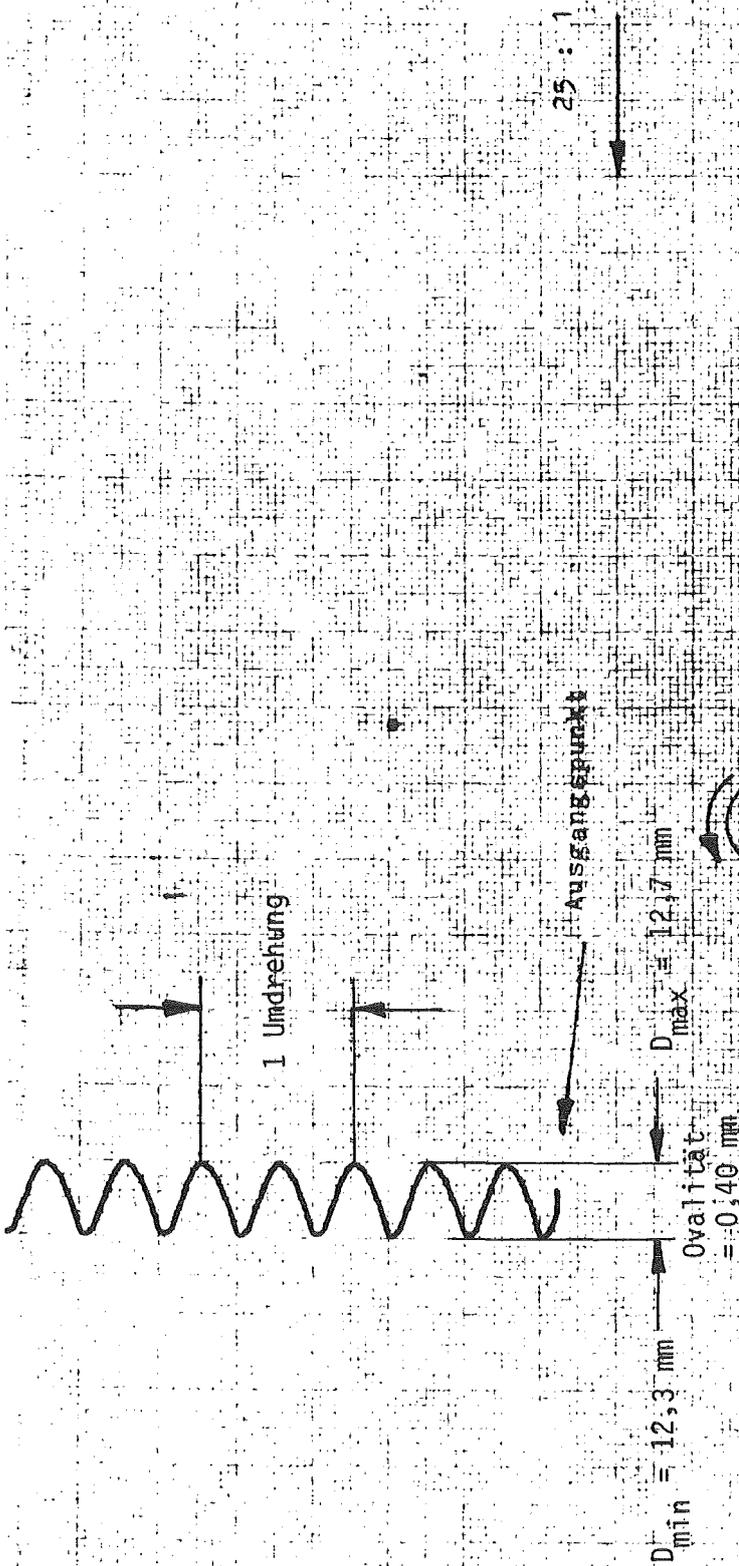
Polarmessung 2  
Ca. 280 mm von UKB.

46E - E1 - 44 - 0  
bestrahlt

14.7.81 *Reger*







Polarmessung 1  
Ca. 405 mm von UKB.

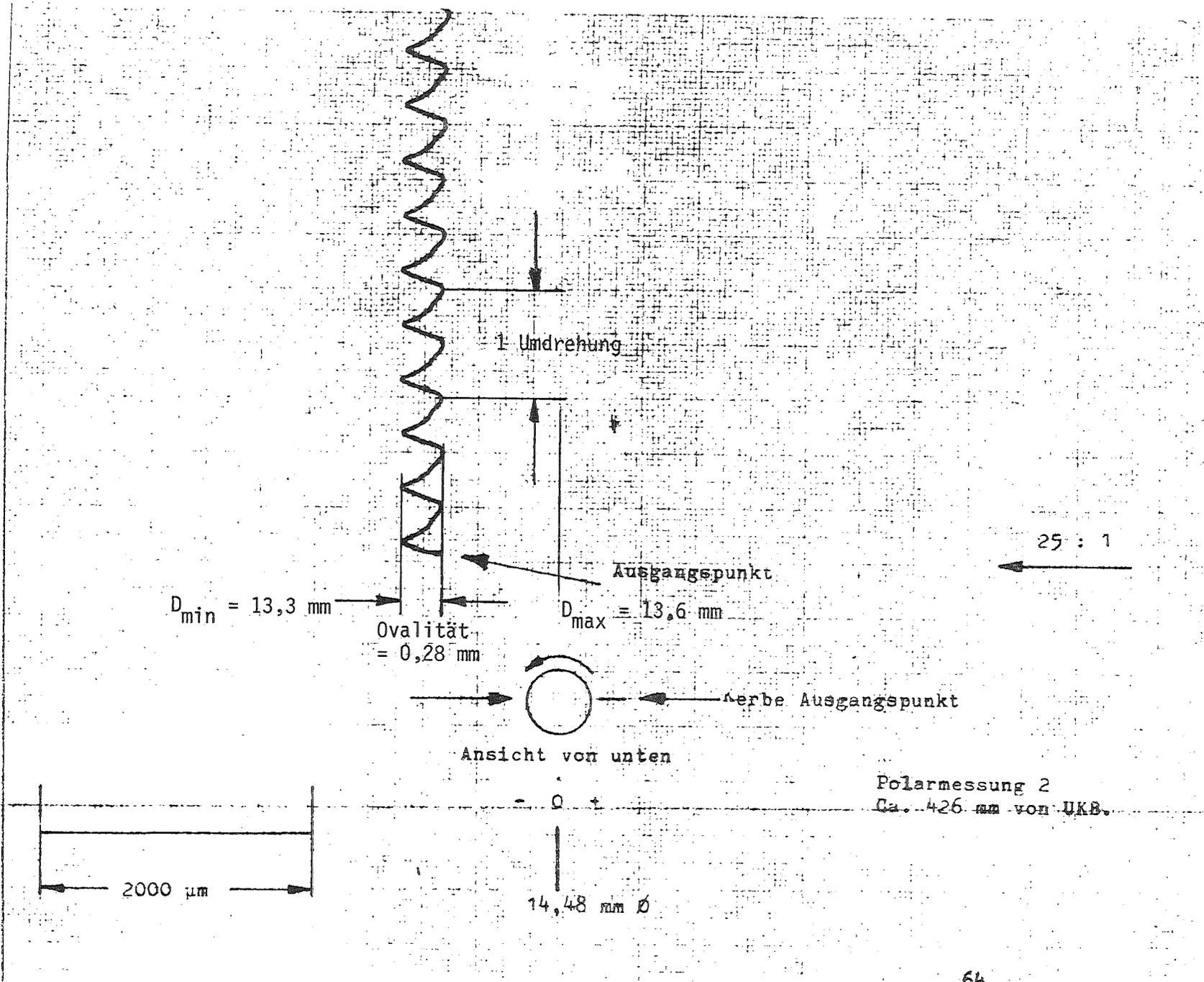
14,48 mm  $\phi$

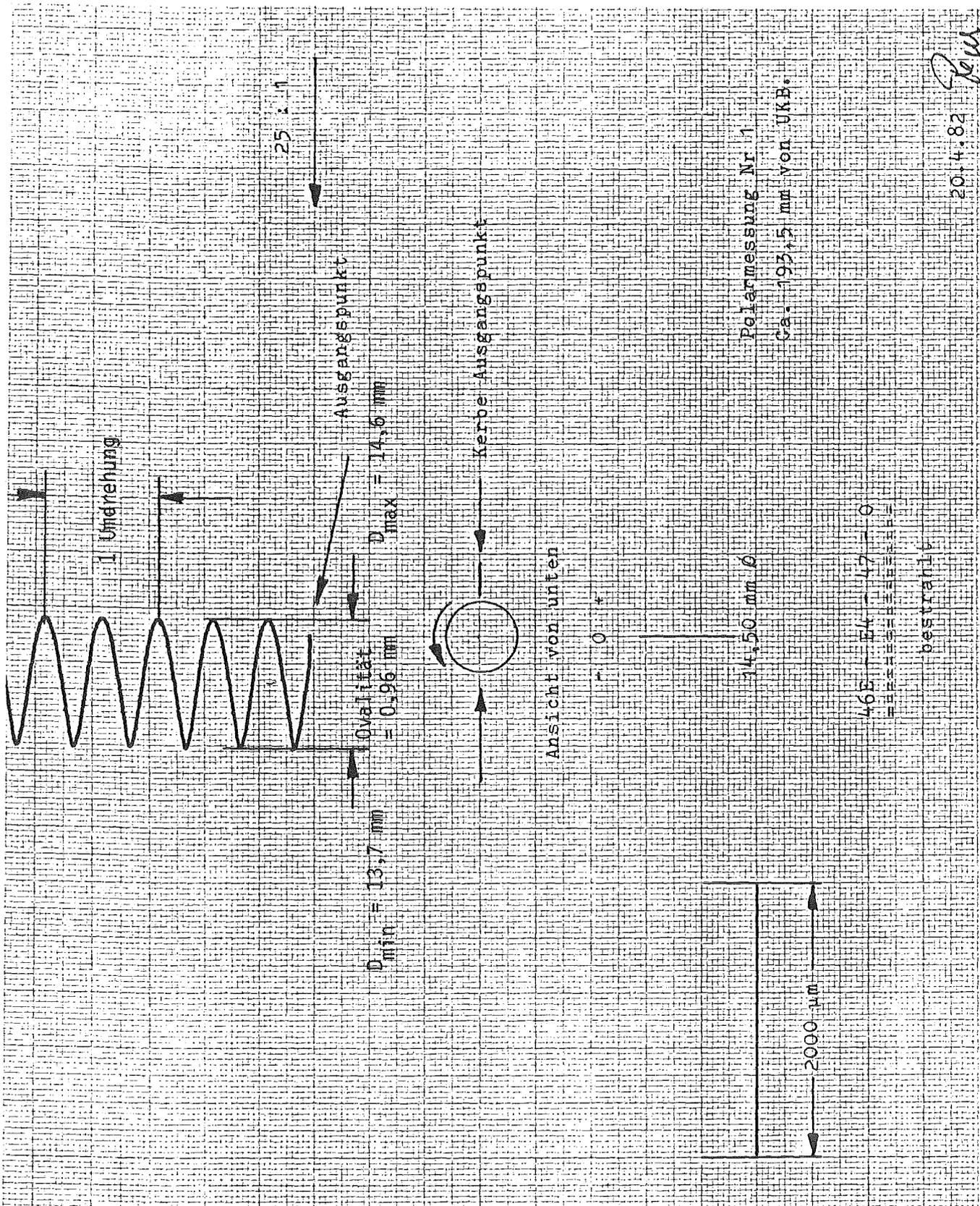
165 = 46 = 0

bestrahit

6.4.82

*Recht*

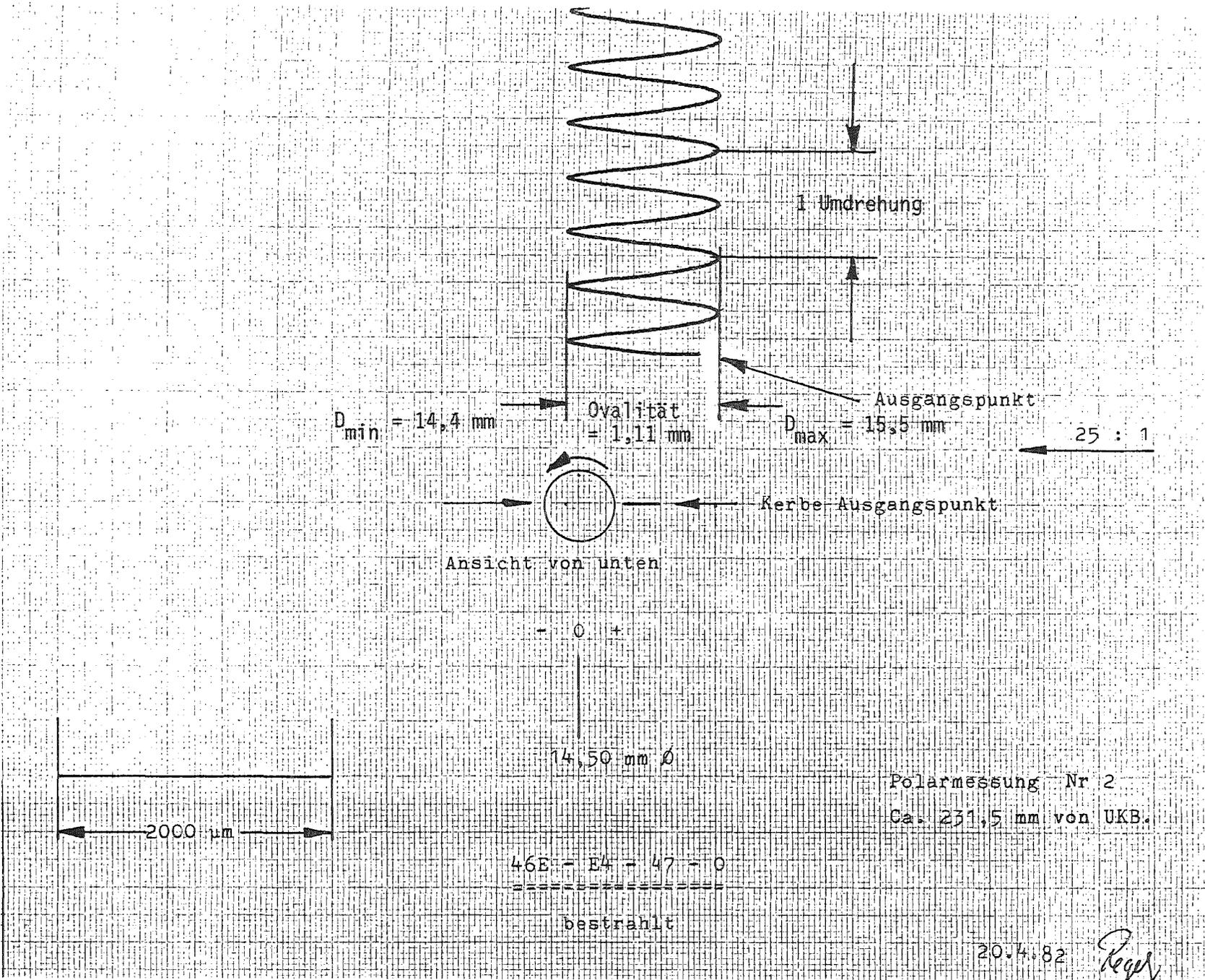


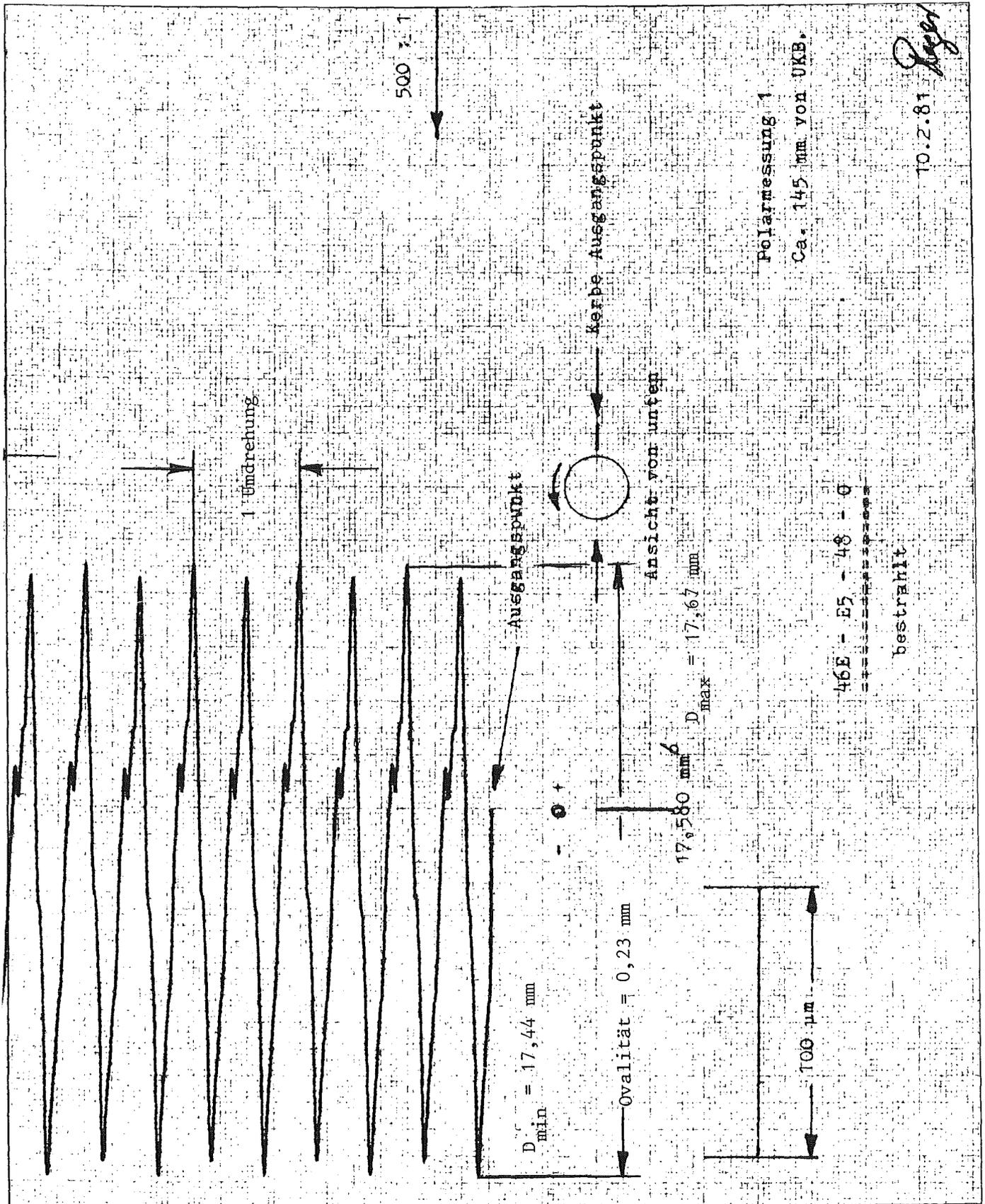


POLARMESSUNG 1  
VERSUCH E 4

(92,5 MM VON UKF)  
STAB NR. 47

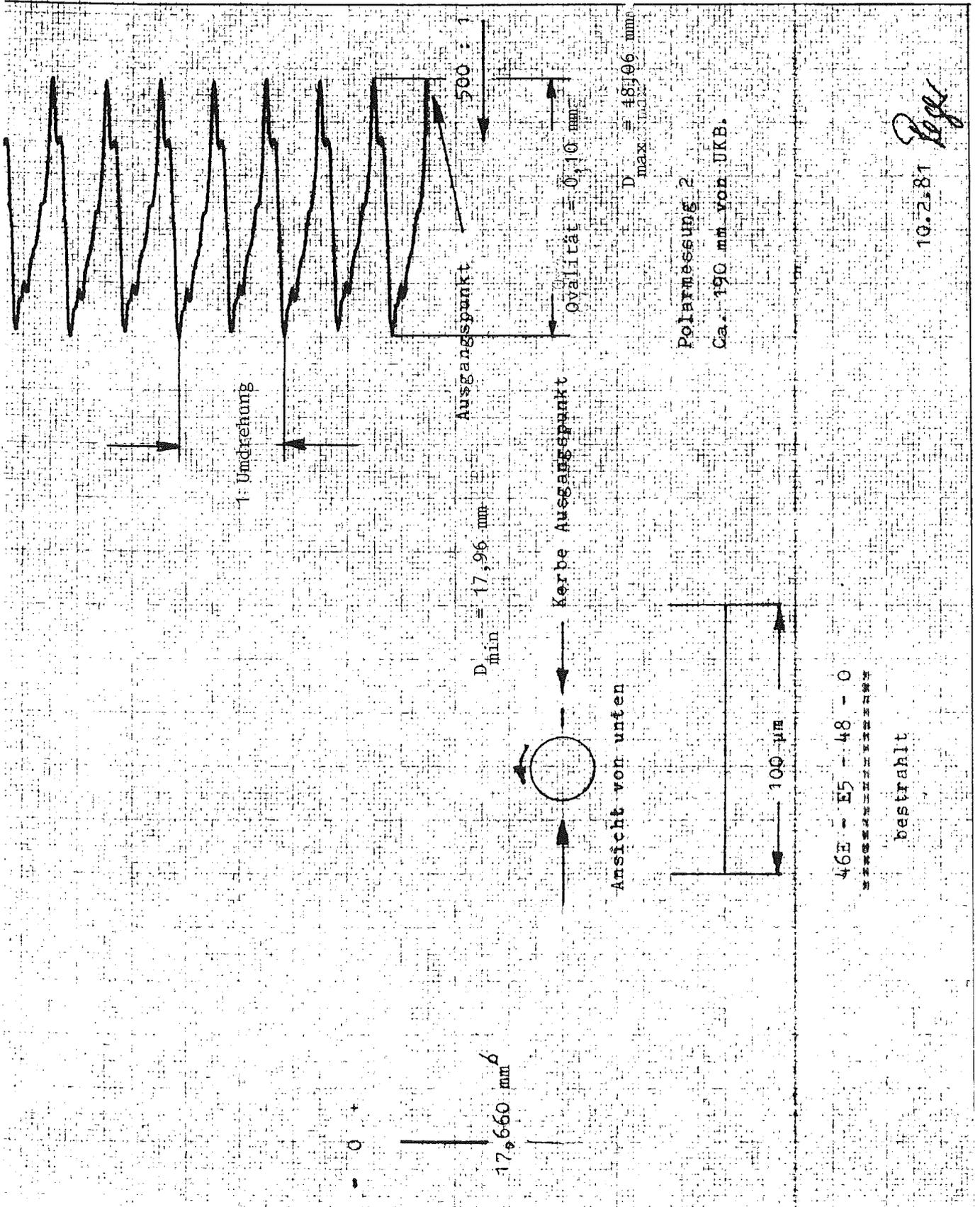
47.1





POLARMESSUNG 1 (44 MM VON UKF)  
 VERSUCH E 5 STAB NR. 48

48.1



11 1981

POLARMESSUNG 2 ( 89 MM VON UKF)

VERSUCH E 5 STAB NR. 48

48.2



169 mm from UKF

4237-707



FR 2 In-Pile Tests. Test E 1

Cross Section, Max. Circumferential Strain

49.1



131mm from UKF

4237-708



FR 2 In-Pile Tests. Test E 2

Cross Section, Max. Circumferential Strain 49.2



316 mm from UkF

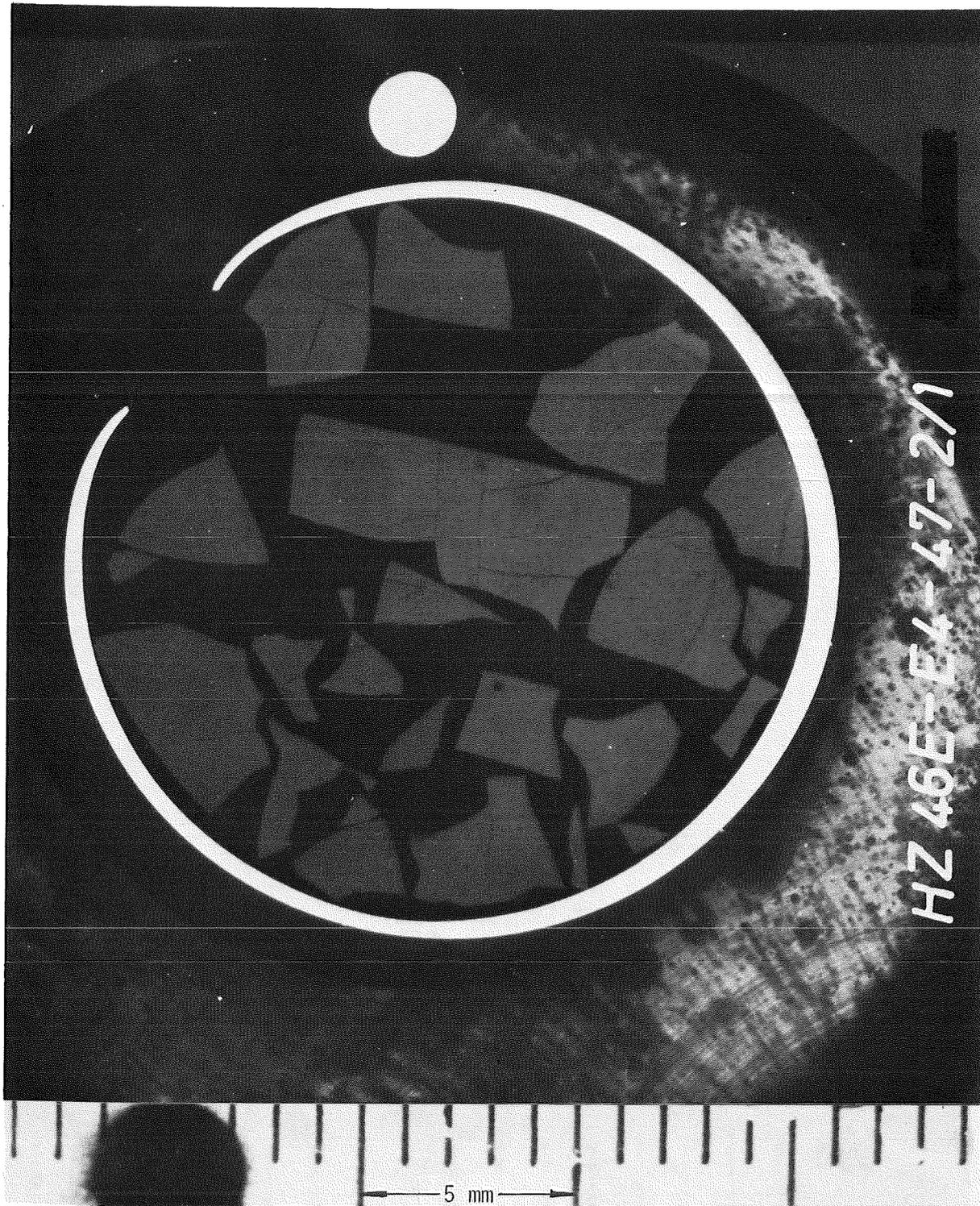
4237-709



# FR 2 In-Pile Tests. Test E3

Cross Section, Max. Circumferential Strain

49.3



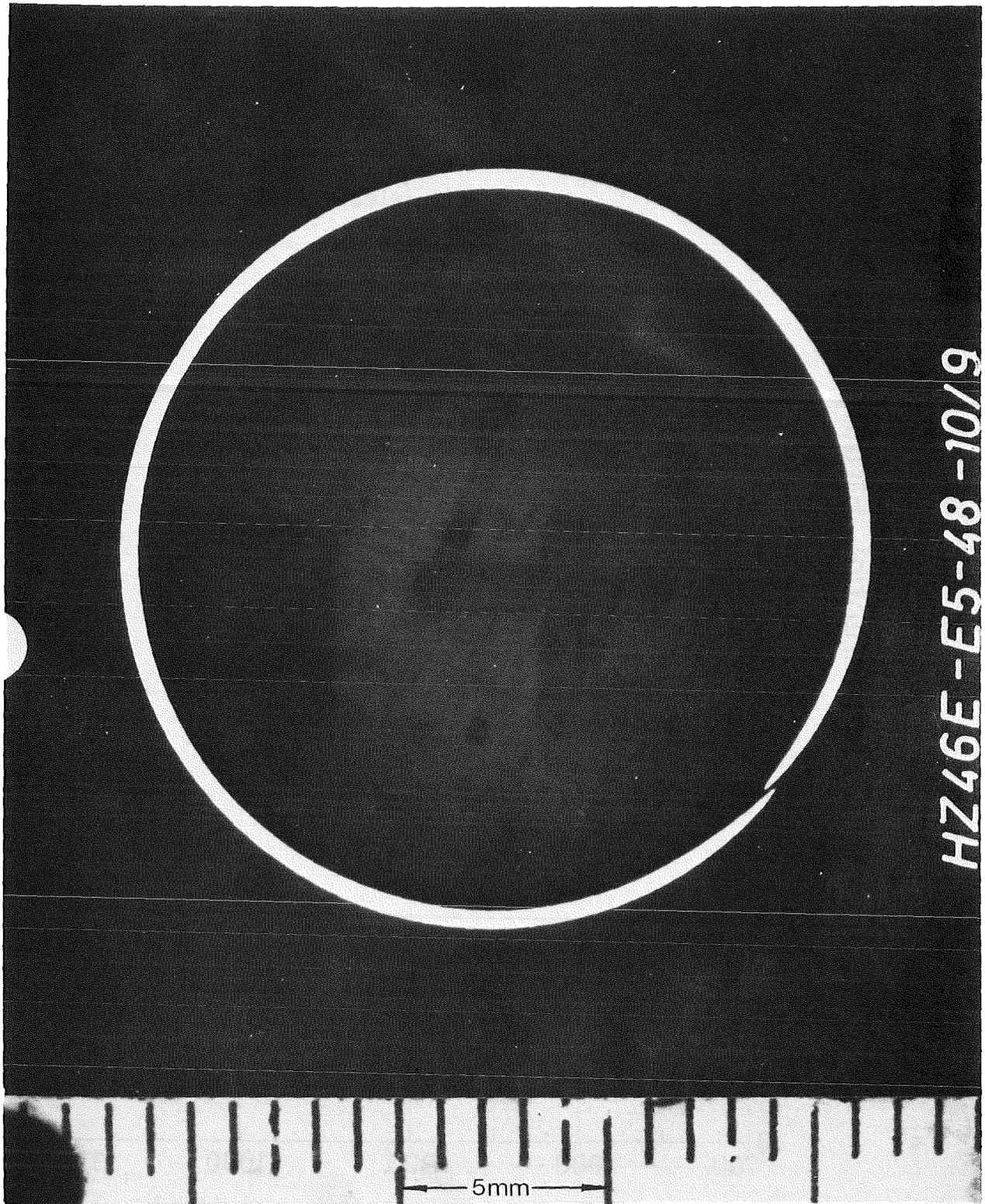
114 mm from UKF

4237-710



FR 2 In-Pile Tests. Test E4

Cross Section, Max. Circumferential Strain 49.4



67,5 mm from UKF

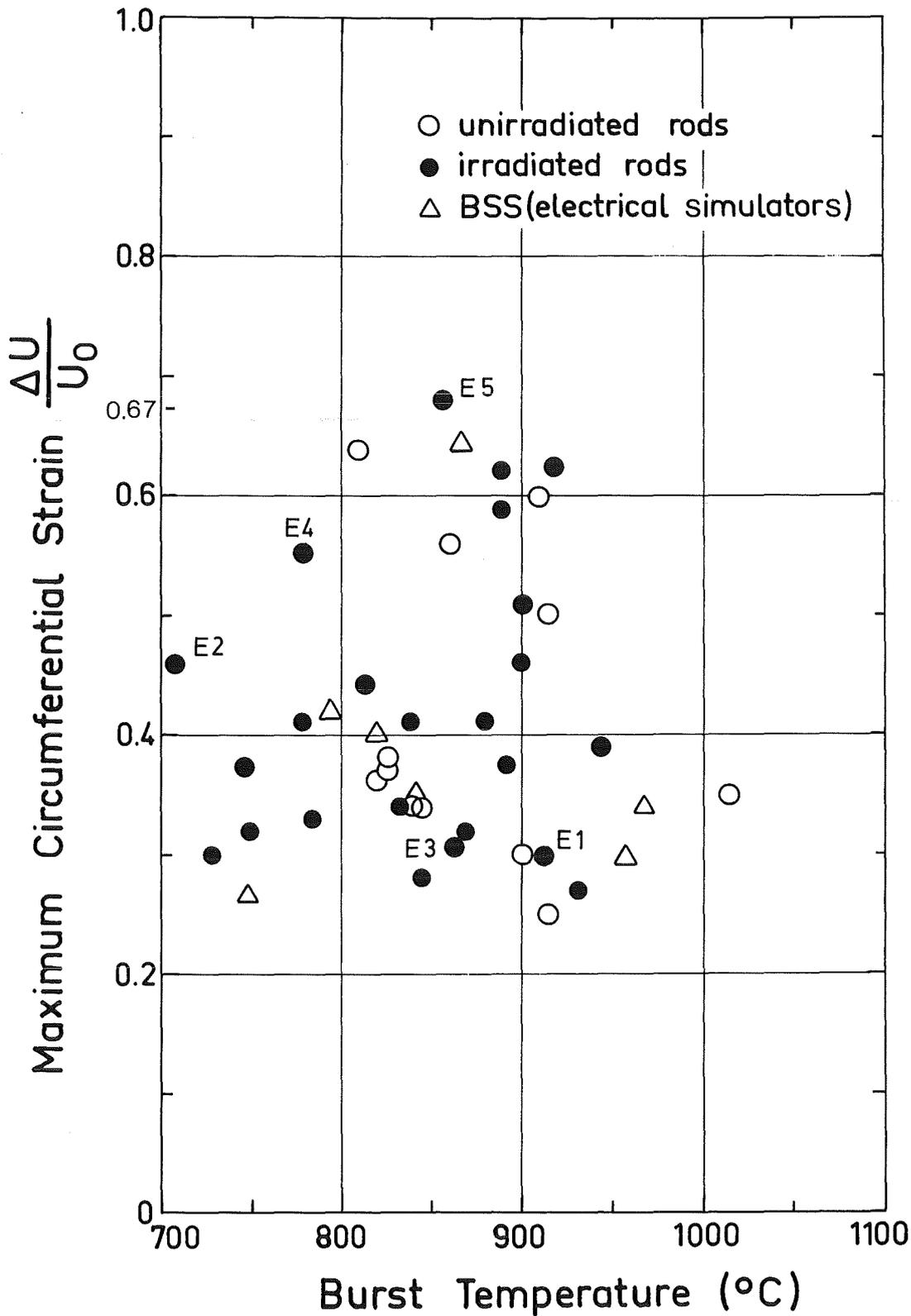
4237-711



FR 2 In-Pile Tests. Test E 5

Cross Section, Max. Circumferential Strain

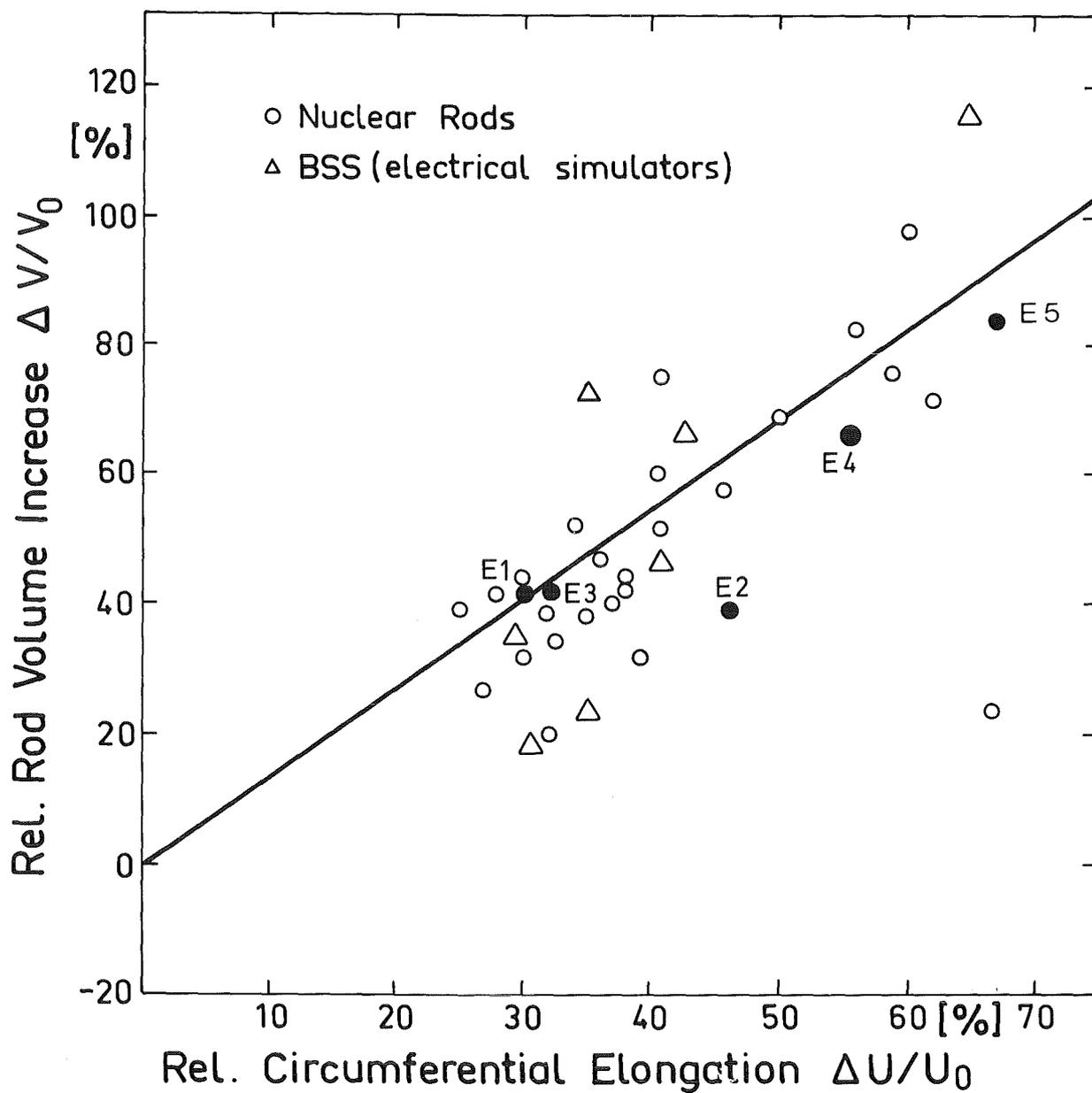
49.5



IT-80  
PNS 4237-480.37

## FR2 In - Pile Tests.

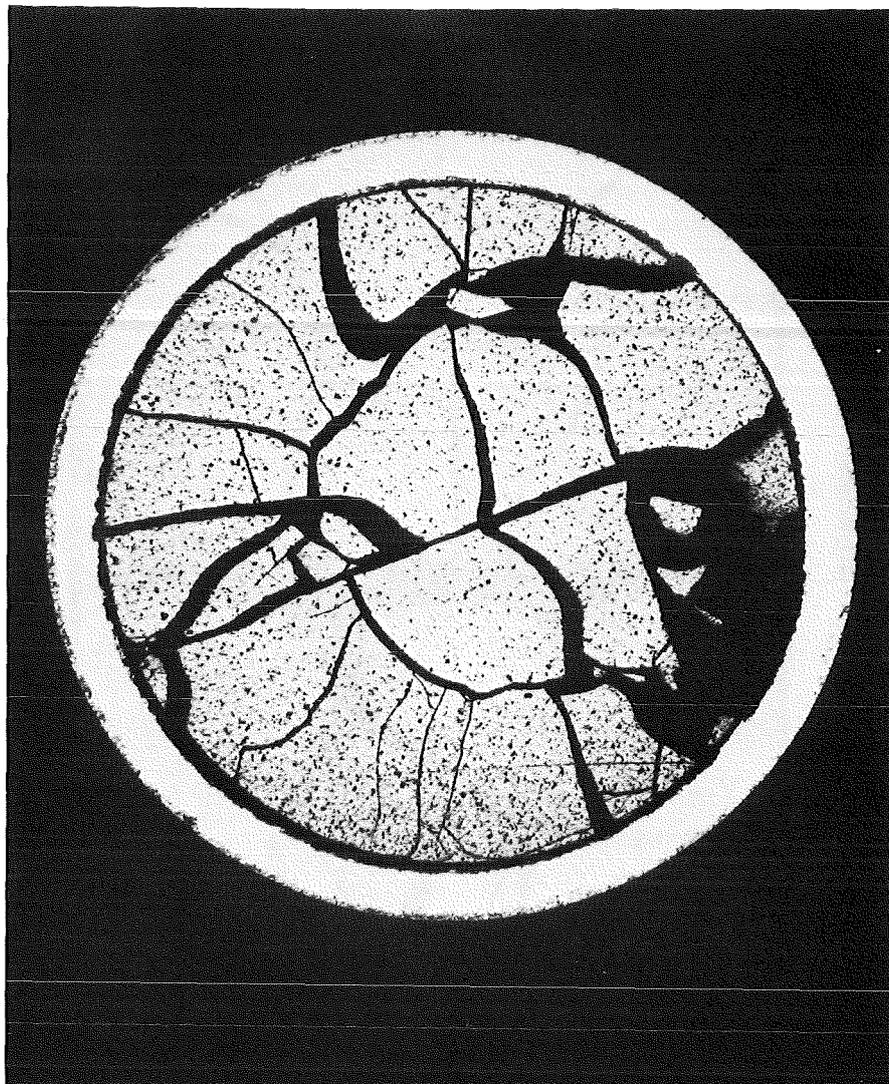
Max. Circumferential Strain vs. Burst Temperature



### FR2 In-Pile Tests.

Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation





*HZ-46E-E6-49-5/22 10x geätzt*

2 mm

Sample 5; 205 mm from UKF

8 000 MWd/t burnup

not transient-tested



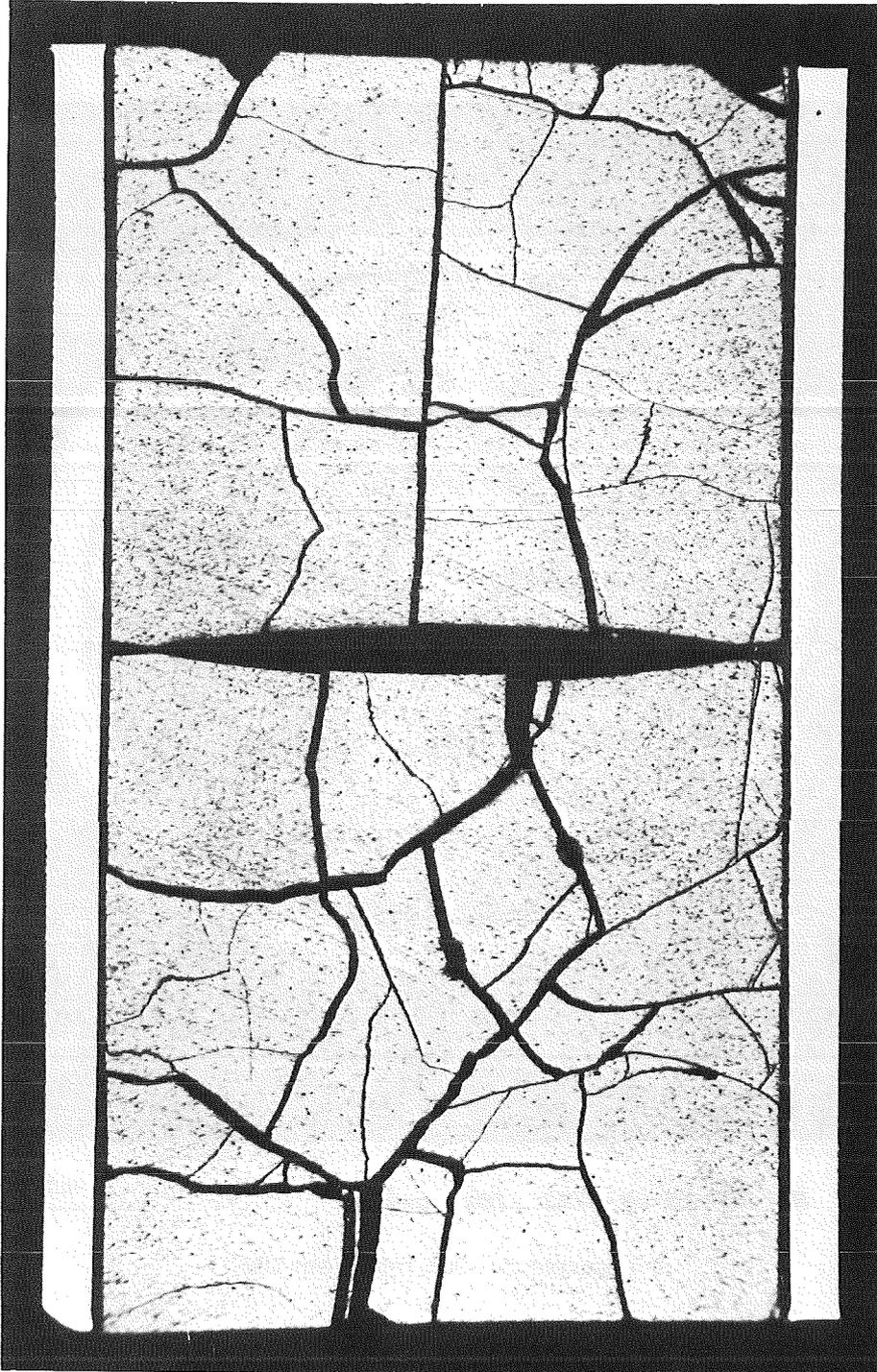
IT 1982  
PNS 4237-712

FR 2 In-Pile Tests.

Cross Section of the E6 Fuel Rod

HZ-46E-E6-49-4/19 10x geätzt

2 mm



HZ-46E-E6-49-4/18 10x geätzt

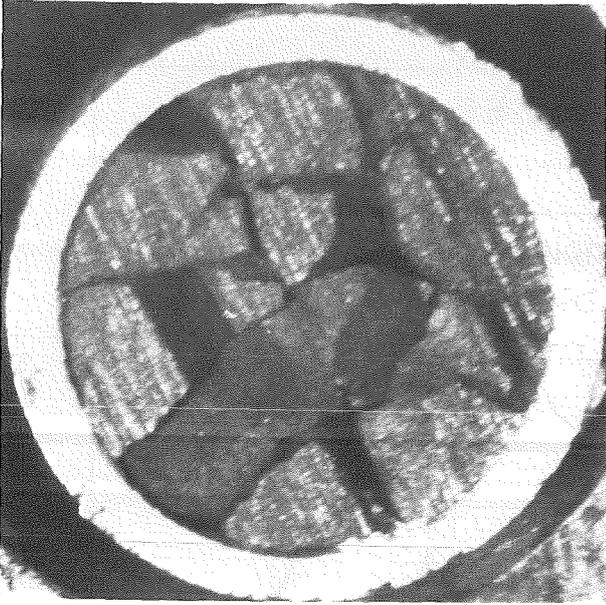
2 mm

PNS 4237-713

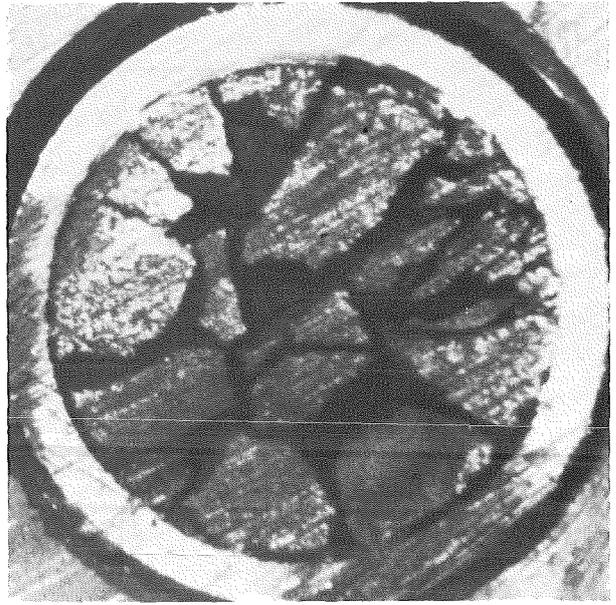


# FR 2 In-Pile Tests

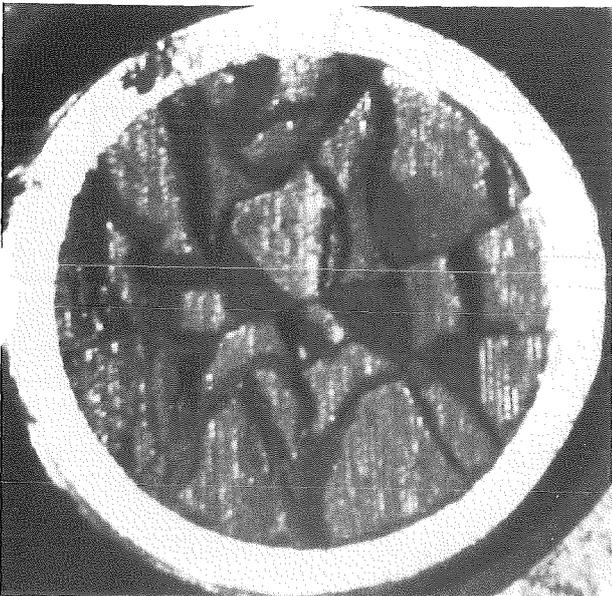
## Longitudinal Section of Test Rod E6



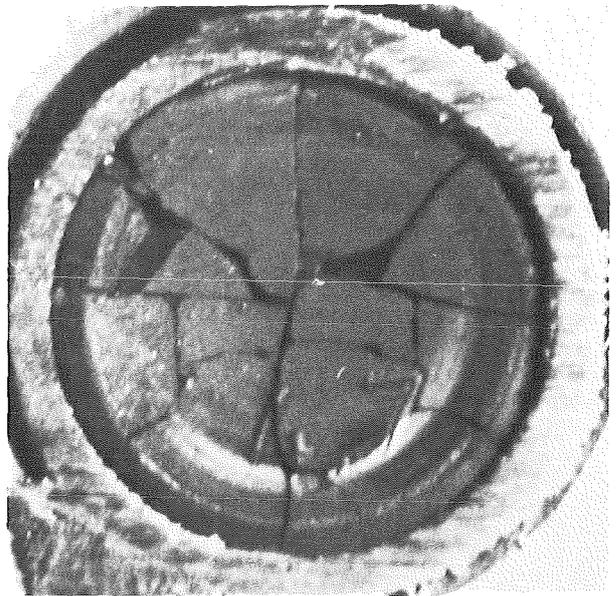
Sample 2; 233 mm from UkF



220 mm from UkF



Sample 3; 56 mm from UkF



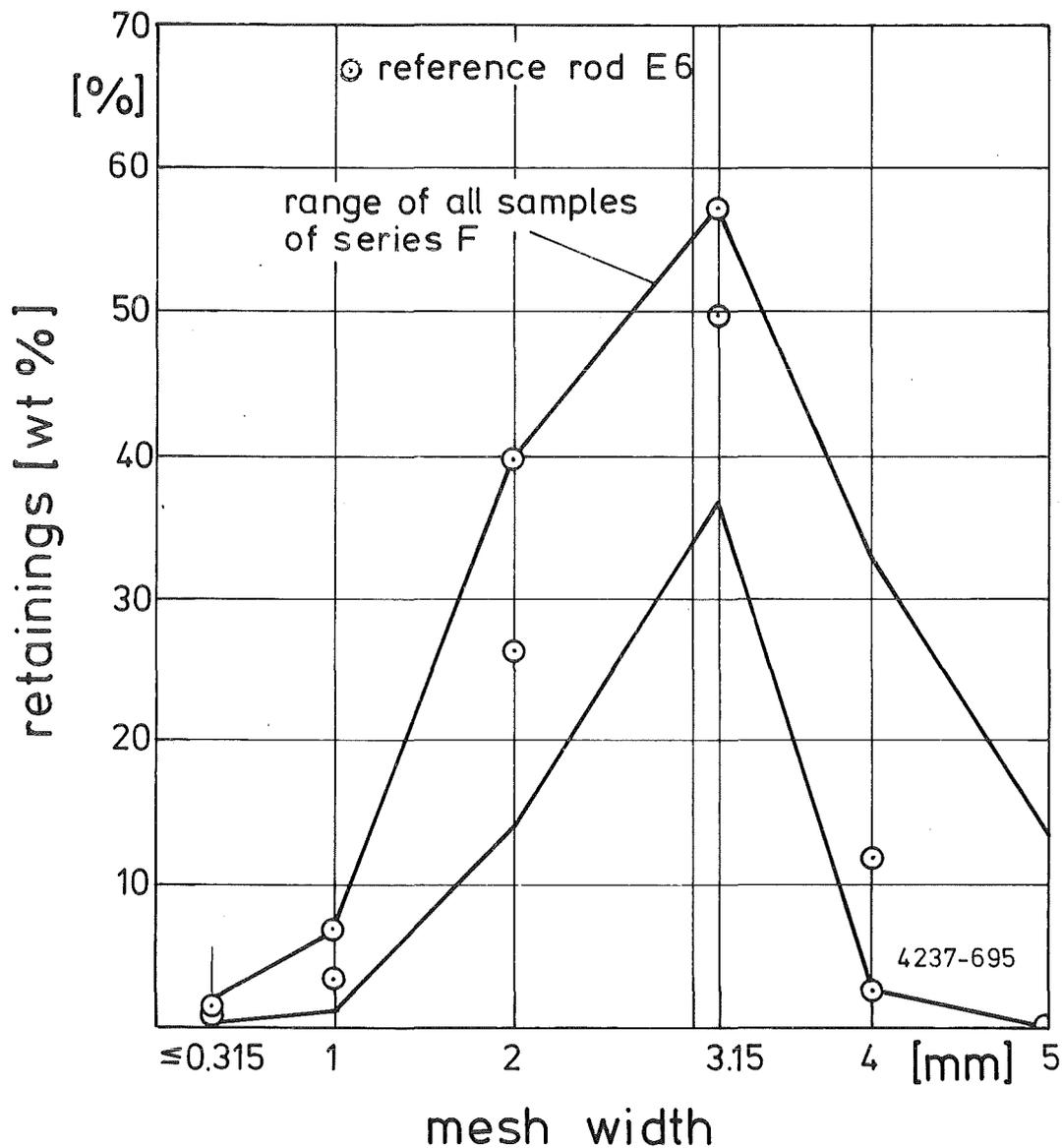
43 mm from UkF



IT 1982  
PNS 4237-714

## FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the E6 Fuel Rod



# FR 2 In-Pile Tests: Series E

## Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses

A N H A N G I

Meßwerte vor Auflösung der Transienten,  
Versuch E1 bis E5

Tabelle 16.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: E1                      Datum: 20.2.1980                      Uhrzeit: 15.39.07

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	510 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	499 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	315 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	317 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	328 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	372 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	342 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	350 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	345 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	285 °C
10	T 131	Versuchstemperatur 1	360 °C
11	T 132	Versuchstemperatur 2	366 °C
12	T 133	Versuchstemperatur 3	365 °C
13	T 134	Versuchstemperatur 4	366 °C
14	T 135	Versuchstemperatur 5	373 °C
15	T 136	Versuchstemperatur 6	389 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	58 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	54 bar
18	P 63	Druck vor Blende	54 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	54 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,2 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	26 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	276 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	283 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	553 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	18,8K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	67 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	53 - 55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	60 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	889 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	117 kg/h

Tabelle 16.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: E2

Datum: 22.02.80

Uhrzeit: 11.17.32

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	508 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	495 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	309 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	308 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	330 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	368 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	334 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	347 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	341 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	281 °C
10	T 131	Versuchstemperatur 1	362 °C
11	T 132	Versuchstemperatur 2	370 °C
12	T 133	Versuchstemperatur 3	375 °C
13	T 134	Versuchstemperatur 4	368 °C
14	T 135	Versuchstemperatur 5	367 °C
15	T 136	Versuchstemperatur 6	369 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	54 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	52 bar
18	P 63	Druck vor Blende	52 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	52 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,25 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	128 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	273 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	280 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	22,3 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	68 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	47 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	52-53 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	58 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	828 mbar
	m	Dampfmengenstrom	111 kg/h

Tabelle 16.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: E3

Datum: 26.2.1980

Uhrzeit: 11.00.48

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	497 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	312 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	311 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	328 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	369 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	337 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	348 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	343 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	283 °C
10	T 131	Versuchstemperatur 1	365 °C
11	T 137	Versuchstemperatur 2	378 °C
12	T 133	Versuchstemperatur 3	379 °C
13	T 138	Versuchstemperatur 4	379 °C
14	T 135	Versuchstemperatur 5	367 °C
15	T 139	Versuchstemperatur 6	380 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	52 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	54 bar
18	P 63	Druck vor Blende	54 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	54 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	55 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	275 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	282 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	544 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	18,6 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	65 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	46 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	51 - 52 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	60 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	835 mbar
	m	Dampfmengenstrom	114 kg/h

Tabelle 16.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: E4 Datum: 29.2.1980 Uhrzeit: 11.04.01

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	495 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	308 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	307 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	326 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	368 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	333 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	347 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	341 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	281 °C
10	T 131	Versuchstemperatur 1	362 °C
11	T 137	Versuchstemperatur 2	375 °C
12	T 133	Versuchstemperatur 3	375 °C
13	T 138	Versuchstemperatur 4	367 °C
14	T 135	Versuchstemperatur 5	380 °C
15	T 139	Versuchstemperatur 6	358 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	55 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	51 bar
18	P 63	Druck vor Blende	51 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	51 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,2 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	85 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	272 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	279 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	543 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	20,2 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	66 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	51 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	55 - 57 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	57 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	823 mbar
	m	Dampfmengenstrom	110 kg/h

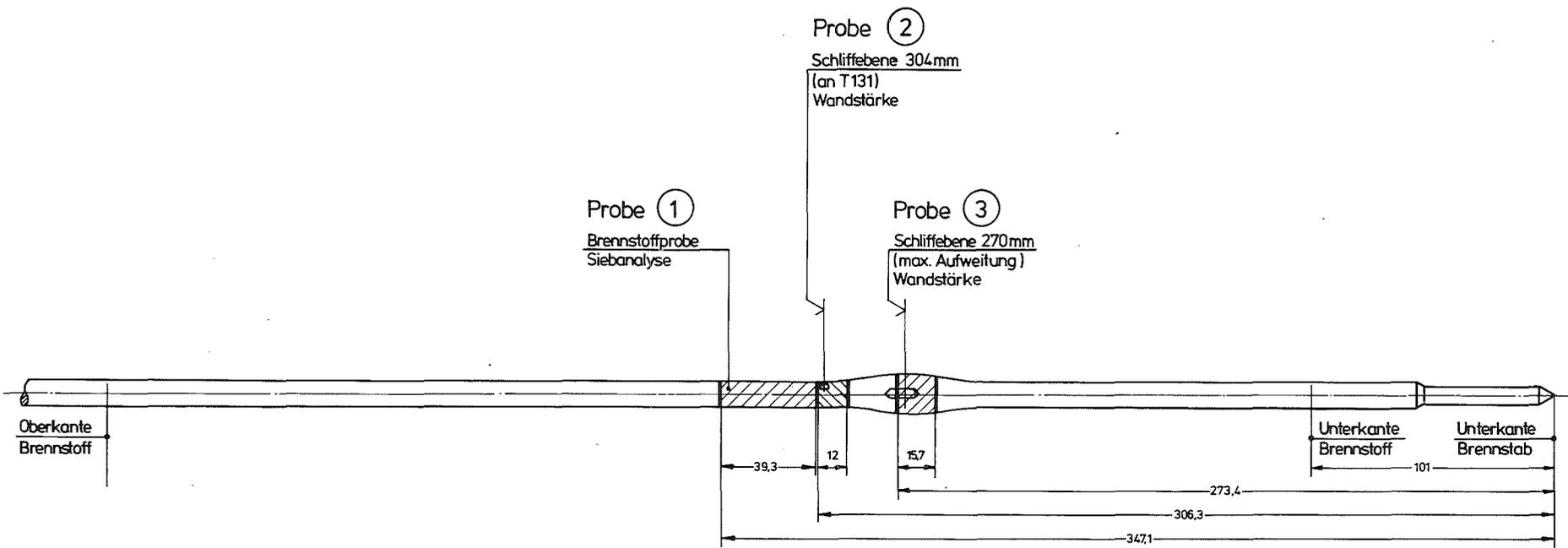
Tabelle 16.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: E5                      Datum: 4.3.1980                      Uhrzeit: 11.03.24

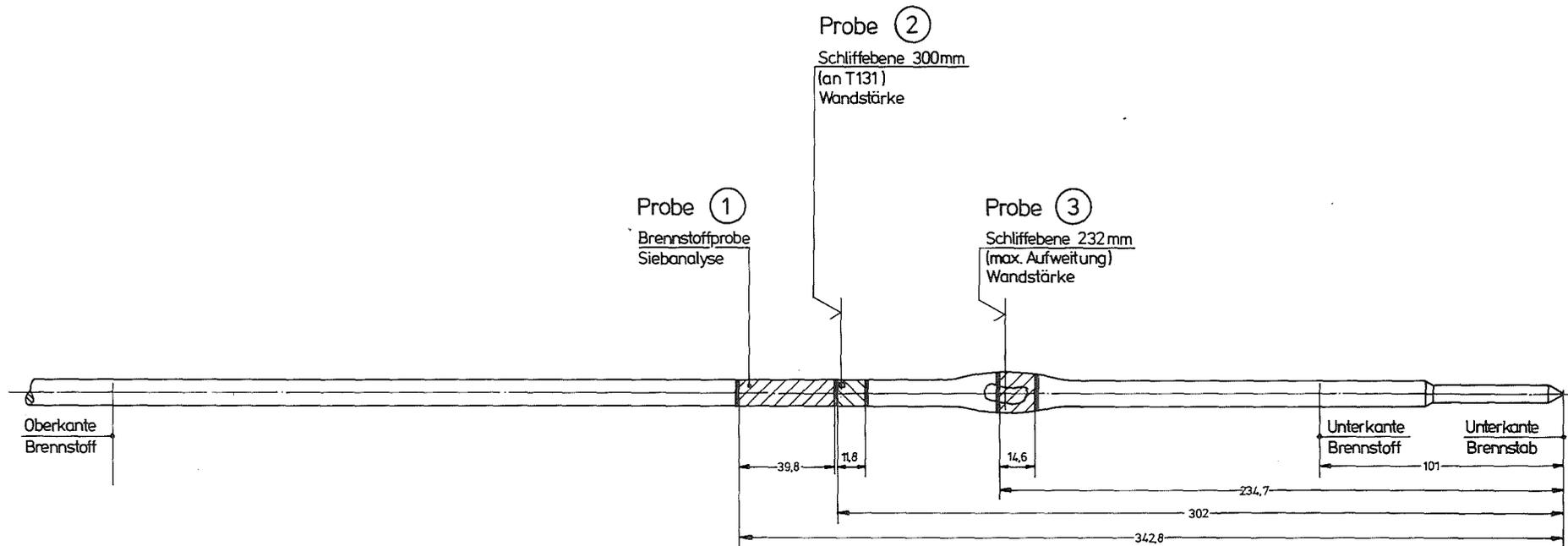
CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	498 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	315 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	333 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	372 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	340 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	350 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	345 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	286 °C
10	T 131	Versuchstemperatur 1	368 °C
11	T 132	Versuchstemperatur 2	390 °C
12	T 133	Versuchstemperatur 3	369 °C
13	T 134	Versuchstemperatur 4	369 °C
14	T 135	Versuchstemperatur 5	365 °C
15	T 136	Versuchstemperatur 6	369 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	61 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	57 bar
18	P 63	Druck vor Blende	56 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	56 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,2 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	26 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	278 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	285 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	19,7 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	49 °C
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	49 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	54 - 55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	62 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	823 mbar
	m	Dampfmengenstrom	116 kg/h

A N H A N G . I I

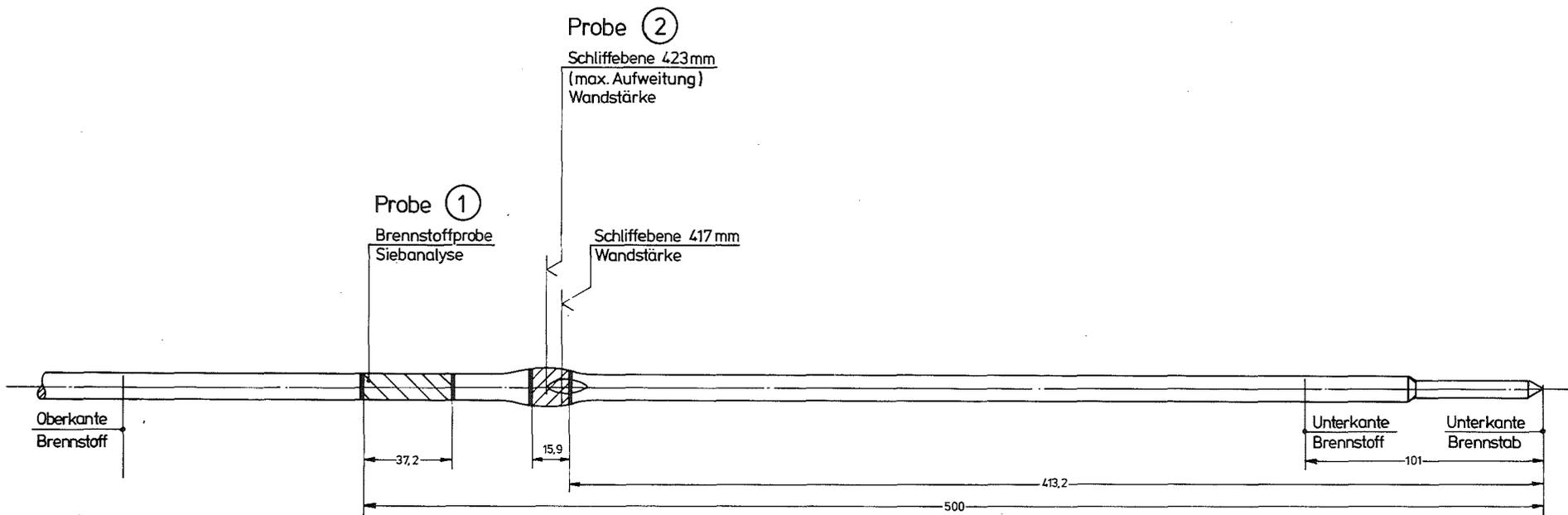
Schnittpläne für die Probenher-  
stellung in den Heißen Zellen  
Versuch E1 bis E6



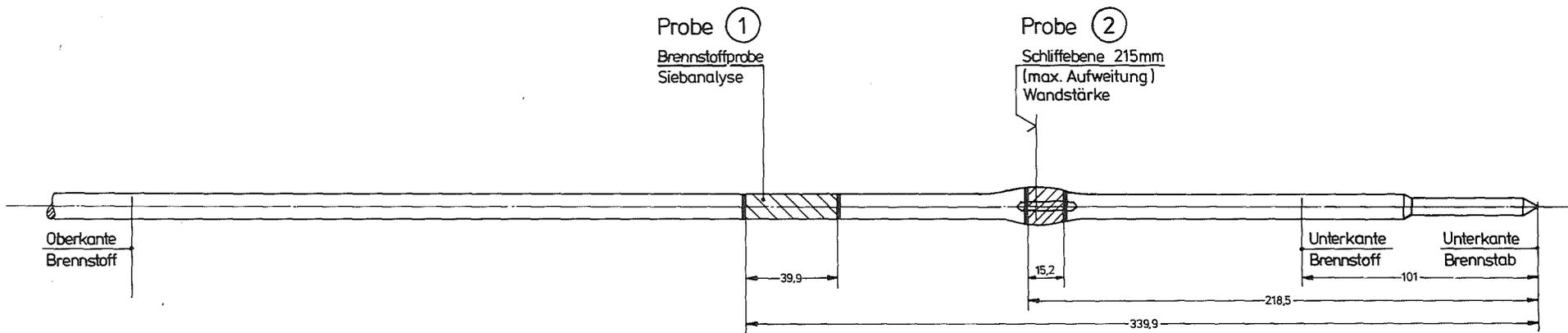
Schnittplan E 1 (Abbrand: 8000 MWd/t)



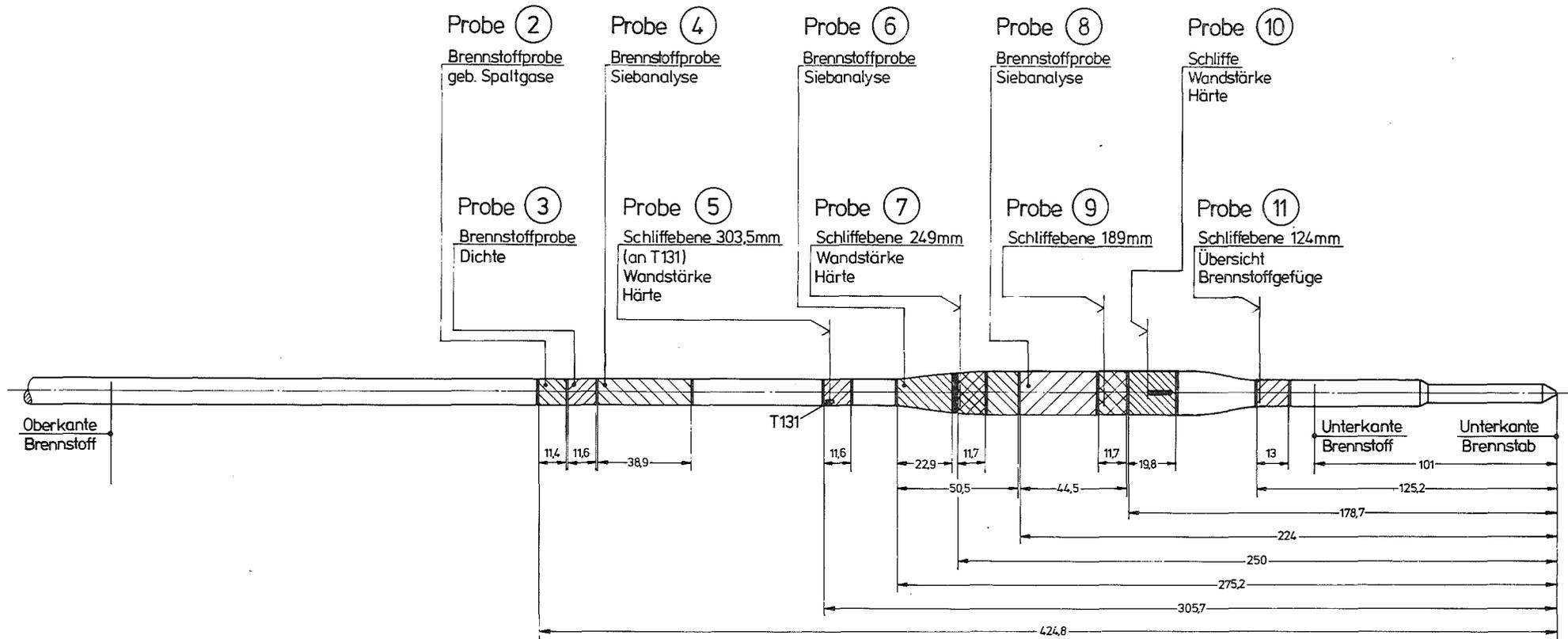
Schnittplan E2 (Abbrand: 8000 MWd/t)



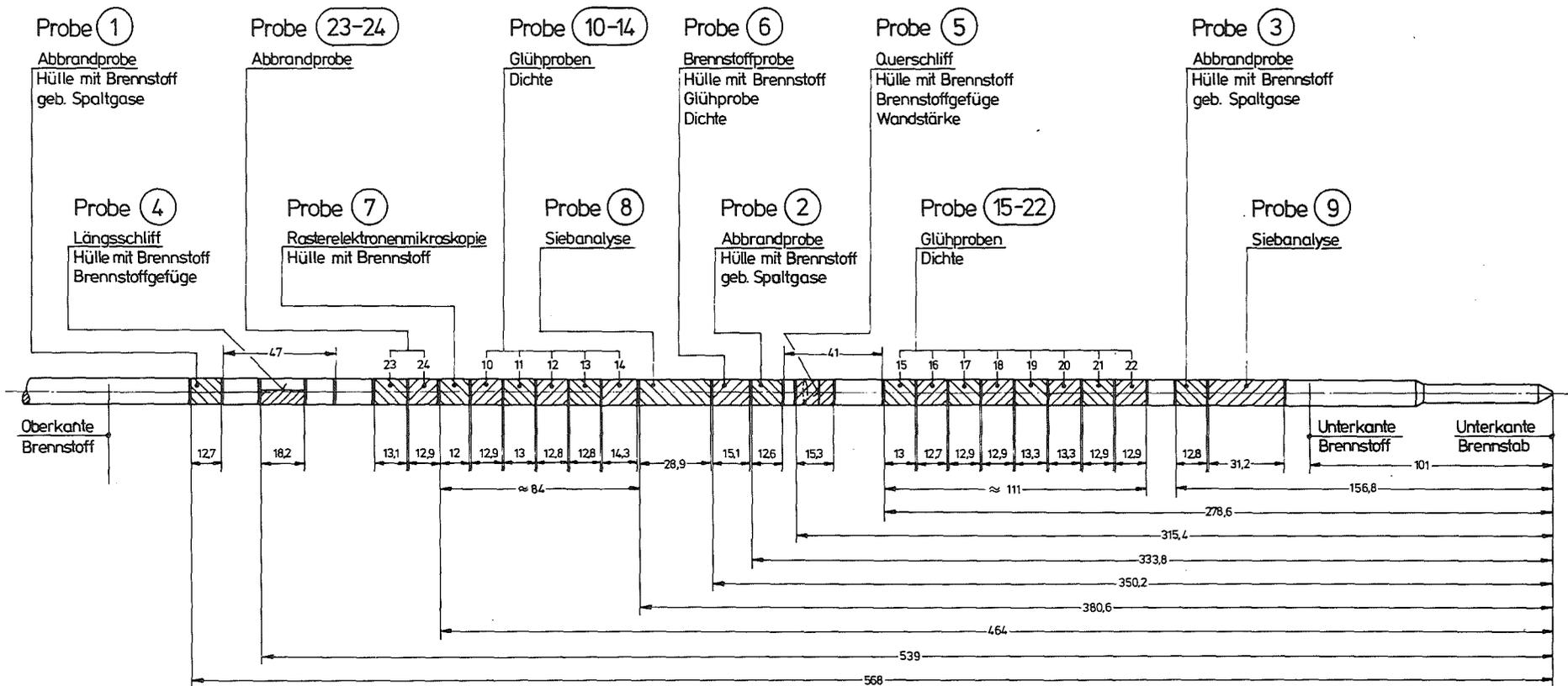
Schnittplan E3 (Abbrand: 8000 MWd/t)



Schnittplan E 4 (Abbrand: 8000 MWd/t)



Schnittplan E 5 (Abbrand : 8000MWd/t)



Schnittplan E 6 (Abbrand 8000Mw/t)

### Danksagung

Allen an den Versuchsdurchführungen und -auswertungen Beteiligten sei an dieser Stelle vielmals gedankt.

Besonderer Dank gilt den Herren G. Harbauer, H. Hespeler, W. Knappschneider, W. Legner, W. Leiling, A. Scherer und K. Wagner für die Mithilfe bei der Erstellung dieses Berichtes. Für die Ermittlung der Flußdichteprofile während der Versuche sei Herrn R. Heine, für die Aufbereitung der CALAS-Meßwerte Herrn A. Grünhagen und für die Durchführung der konstruktiven Arbeiten zu den Versuchseinsätzen sei Herrn K. Baumgärtner besonders gedankt. Dank gesagt sei auch Herrn F. Schmitt für die Betreuung des DK-Kreislaufes am FR2.