

KfK 3098  
Juni 1981

# **Ergebnisse der In-pile-Experimente zum LWR-Brennstabverhalten beim LOCA mit nicht vorbestrahlten Brennstäben**

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

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK  
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3098

Ergebnisse der In-pile-Experimente zum  
LWR-Brennstabverhalten beim LOCA mit  
nicht vorbestrahlten Brennstäben

---

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 faßt die Ergebnisse aus den FR2-In-pile-Versuchen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen zusammen. Das Programm mit nicht vorbestrahlten Prüflingen umfaßte die Serien A und B mit insgesamt 14 Versuchen.

Die In-pile-Versuche sind Bestandteil des 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-Störfalls 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 verwendet mit einer aktiven Brennstofflänge von 50 cm und radialen Abmessungen, die denen von Stäben kommerzieller Druckwasserreaktoren (DWR) entsprechen. Es wurden Versuche sowohl mit unbestrahlten als auch mit vorbestrahlten Prüflingen durchgeführt. Hauptparameter des Versuchsprogramms war der Abbrand, der von 2.500 bis 35.000 MWd/t variiert wurde. Die Stäbe wurden in den Versuchen mit Innendrücker beaufschlagt, die typisch für DWR-Brennstäbe sind.

In den Versuchen der Serie A und B wurde ein Innendruckbereich von rd. 25 bis 100 bar als Ausgangsdruck für die Transiente eingestellt. Die Stableistungen lagen zwischen 31 (A 1.1) und 71 W/cm (A 2.1) bestimmt mit der Anstiegsmethode, sie betrug in der Mehrheit der Versuche 40 bis 50 W/cm.

Alle Versuchsstäbe barsten während der Aufheizphase, bis auf die Stäbe A 1.2 und B 1.4, die während der Transiente drucklos waren.

Die Stabhüllen barsten an den jeweiligen Stellen maximaler Dehnung. Alle geborstenen Stäbe zeigten Umfangsdehnungen über der

gesamten aktiven Stablänge. Die Stäbe A 1.1, B 1.6, B 3.1 und B 3.2 barsten an Stabhöhen, auf denen am Umfang versetzt Thermo-  
elemente angebracht waren. Die Thermo-  
elemente hatten lokale,  
geringe Einflüsse auf die Hüllverformung.

Die Berstdaten und die plastische Hüllverformung der Versuchs-  
stäbe liegen im Streuband der Out-of-pile-Ergebnisse. Die Er-  
gebnisse gaben keinen Hinweis auf einen Einfluß der nuklearen  
Umgebung auf die Mechanismen des Brennstabversagens beim Kühl-  
mittelverlust-Störfall.

## Results from In-pile Experiments on LWR Fuel Rod Behavior under LOCA Conditions with Unirradiated Rods.

---

### Summary

This report summarizes the results of the FR2 In-pile tests with unirradiated test rods. The experiments with unirradiated specimens comprise the series A and B with 14 tests. The in-pile experiments were performed with single rods in the DK loop of the FR2 reactor at the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). The research is part of the Nuclear Safety Project's (PNS) fuel behavior program. The main objective of the FR2 in-pile tests is 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 commercial German PWRs (Pressurized Water Reactors). 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 A- and B-test rods were pressurized with Helium to hot internal pressures between 25 and 100 bar. The power rates were determined to be between 40 and 50 W/cm (from heatup data), except for Test A 1.1 (31) and A 2.1 (71 W/cm).

All test rods burst during the heatup phase, except for the rods A 1.2 and B 1.4 being not pressurized during the transient operation.

The fuel rod claddings burst each at the locations of the maximum deformation. The ruptured rods exhibited circumferential elongations along the entire heated lengths. The rupture locations of rods A 1.1, B 1.6, B 3.1, and B 3.2 coincided axially with thermocouples. The thermocouples caused small local influences on the deformation of the cladding.

The burst data and the results of the plastic cladding deformation did not indicate an influence of the nuclear environment on the mechanisms of fuel rod failure under loss-of-coolant conditions.

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Versuchsziele	2
3. Versuchsprogramm	3
4. Versuchsablauf	4
5. Prüflingsdaten	6
6. Versuchsdaten	11
6.1 Messung der Versuchsdaten	11
6.2 Bestimmung der Prüflingsleistung	28
6.3 Kühlmitteldaten	31
6.4 Prüflingsinnendruck	31
6.5 Hüllrohrtemperaturen	32
7. Berstdaten	33
8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen	34
8.1 Durchstrahlung des Stabes	34
8.2 Fotodokumentation	36
8.3 Vermessung der Prüflinge	36
8.3.1 Stablängsdehnung, Rißabmessungen und Rißlage	37
8.3.2 Durchmesseränderung und Umfangsdehnung	39
8.3.3 Krümmung des Stabes und Exzentrizität der Beule	43
8.3.4 Volumenzunahme des gebeulsten Stabes	47
9. Zerstörende Nachbestrahlungsuntersuchung	50
10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerung	52
11. Literatur	54

Verzeichnis der Abbildungen

	<u>Seite</u>
1. DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislaufschema	56
2. Versuchsablauf, Schema	57
3. Vergleich gerechneter Temperaturverläufe	58
4. Nuklear-Prüfling, vereinfacht	59
5. Cladding Thermocouple (Schematic)	60
6.1 Prüflingsleistung NKP und axiales Leistungsprofil A 1.1	61
6.2 - Prüflingsleistung NTH und axiales Leistungsprofil A 1.2 - B 3.2	62 - 74
7. Reaktorphysikalisch bestimmte Prüflingsleistung für die A- und B-Versuche	75
8. Verlauf der axialen Flußdichteprofile in den Versuchen der Serie A und B	76
9.1 - Druck im Prüflingsplenum (P74) im Versuch 9.14 A 1.1 - B 3.2	77 - 90
10.1 - Axiales Temperaturprofil, 10.14 Versuch A 1.1 - B 3.2	91 - 104
11.1 - Hüllrohrtemperaturen T 131 - T 136 11.14 im Versuch A 1.1 - B 3.2	105 - 118
12. Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck	119
13. Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900 °C (Transiente)	120
14. Burst Temperature vs. Burst Pressure	122
15.1 Neutronenradiografie nach Versuch A 1.2	
15.2 Neutronenradiografie, Winkellagen A 1.2	122 - 123

	<u>Seite</u>
16.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
16.2 nach Versuch A 2.2	124 - 125
17.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
17.3 nach Versuch A 2.3	126 - 128
18.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
18.3 nach Versuch B 1.1	129 - 131
19.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
19.3 nach Versuch B 1.2	132 - 134
20.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
20.2 nach Versuch B 1.3	135 - 136
21.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
21.3 nach Versuch B 1.4	137 - 139
22.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
22.3 nach Versuch B 1.5	140 - 142
23.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
23.3 nach Versuch B 1.6	143 - 145
24.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
24.3 nach Versuch B 1.7	146 - 148
25.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
25.3 nach Versuch B 3.1	149 - 151
26.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
26.3 nach Versuch B 3.2	152 - 154
27.1 - Neutronenradiografie und Winkellagen	
27.2 vor Versuch B 3.1	155 - 156

	<u>Seite</u>
28.1 Röntgenbild A 1.1	
28.2 Ansicht A 1.1	157 - 158
29. Ansicht und Röntgenbild A 2.1	159
30. Ansicht und Röntgenbild A 2.2	160
31. Ansicht und Röntgenbild A 2.3	161
32. Ansicht und Röntgenbild B 1.1	162
33. Ansicht und Röntgenbild B 1.2	163
34. Ansicht und Röntgenbild B 1.3	164
35. Ansicht und Röntgenbild B 1.5	165
36. Ansicht und Röntgenbild B 1.6	166
37. View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone B 1.7	167
38. Ansicht und Röntgenbild B 3.1	168
39. Ansicht und Röntgenbild B 3.2	169
40. Berststelle Versuch A 1.1	170
41. Berststelle Versuch A 2.1	171
42. Berststelle Versuch A 2.2	172
43. Berststelle Versuch A 2.3	173
44. Berststelle Versuch B 1.1	174
45. Ansichten der Beulstelle B 1.2	175
46. Ansichten der Beulstelle B 1.3	176
47. Ansichten der Beulstelle B 1.5	177
48. Ansichten der Beulstelle B 1.6	178
49. Views of the Ruptured Zone B 1.7	179
50. Ansichten der Beulstelle B 3.1	180
51. Ansichten der Beulstelle B 3.2	181
52. Cladding Length Change vs. Burst Temperature	182
53.1 - Circumferential cladding thickness distribution 53.14 (as received) presented as differences from the nominal 0,725 mm	183 -196

	<u>Seite</u>
54. Typical spiral profile; posttest measured rod diameters of test A 2.2	197
55. Axiale Verläufe der Dehnungsprofile	198
56. Circumferential Elongations and Axial Power Profiles of the A 1.1 and A 2.2 Tests (unirradiated)	199
57. Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temperature	200
58. Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	201
59. Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop	202
60. Cross Sections of the A- and B-Test Rods (unirradiated)	203

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>		<u>Seite</u>
1.	Test Matrix	4
2.	Prüflingsdaten. Sollwerte unbestrahlter Stäbe	7
3.	Gemessene Prüflingsdaten der A- und B-Versuchsstäbe	9 + 10
4.	Anordnung der Hüll-Thermoelemente in den Versuchen der A- und B-Serie	12
5.1 - 5.14	Daten der In-pile-Versuche mit unbestrahlten Nuklear- prüflingen (A 1.1 bis B 3.2)	14 - 27
6.	Burst Data of the Unirradiated Test Rods (Berstdaten der In-pile-Versuche mit nicht vorbe- strahlten Prüflingen)	35
7.	Längenänderungen und Rißabmessungen der nicht vorbe- strahlten Stäbe	38
8.	Ovalität im Beulenbereich der A- und B-Versuchsstäbe	41
9.	Umfangsdehnung im Rißbereich der A- und B-Versuchs- stäbe	42
10.	Krümmung der A- und B-Versuchsstäbe	44
11.	Exzentrizität der Beule bei den A- und B-Versuchs- stäben	46
12.	Volumenzunahme der nicht vorbestrahlten Stäbe durch die Hüllverformung	48
13.	Versuchsberichte über die In-pile-Versuche mit nicht vorbestrahlten Prüflingen (Anhang I)	204
14.1 - 14.14	Meßwerte vor Auslösung der Transiente A 1.1 bis B 3.2 (Anhang II)	205 - 219

## 1. Einleitung

Der vorliegende Bericht faßt die Ergebnisse aller In-pile-Versuche mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen zusammen. Insbesondere werden die Nominal- und die gemessenen Daten der Prüflinge, die wichtigsten Meßwerte der Transientenversuche einschließlich des jeweiligen vorangegangenen Stationärbetriebes sowie wichtige Ergebnisse der Nachuntersuchungen der Prüflinge dokumentiert.

Von den 14. Einzelstabversuchen sind nur in den Versuchen A 1.2 und B 1.4 die Prüflinge nicht geborsten, da beide Prüflinge während der Stabaufheizung drucklos waren. Der Prüfling A 1.2 wurde mit Auslösung der Transiente undicht, während beim Prüfling B 1.4 das Verbindungsrohrchen zwischen Stabplenum und Druckaufnehmer verstopft war (damit war keine Druckaufgabe vor Auslösung der Transiente B 1.4 möglich).

Der Versuch B 1.7 diente vor allem der Ermittlung der azimuthalen Temperaturunterschiede während der Transiente. Dieser Versuch war ein Nachzügler innerhalb der Versuchsserien A und B.

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche, außer B 1.4 und B 1.7, sind in unveröffentlichten Einzelberichten /1/, /2/ ausführlich behandelt (siehe Anhang I, Tabelle 13).

In den folgenden Kapiteln wird auf die Versuchsziele, das Versuchsprogramm, den Versuchsablauf, die Versuchsdaten und ihre Auswertung eingegangen.

## 2. Versuchsziele

Die behandelten Versuche wurden im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit zur Untersuchung des Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverlust-Störfällen in Leichtwasserreaktoren durchgeführt. Mit diesen In-pile-Versuchen sollte festgestellt werden, ob und wie die in Out-of-pile-Versuchen nicht simulierbaren nuklearen Parameter die Mechanismen des Brennstabversagens beeinflussen /3/, /4/, /5/.

Die zur Beurteilung notwendigen Grundlagen sollten geschaffen werden durch

- Versuche mit nuklear beheizten Brennstabprüflingen, die nicht vorbestrahlt sind,
- Versuche mit nuklear beheizten Brennstabprüflingen, die vorbestrahlt sind,
- Versuche mit elektrisch beheizten Brennstabsimulatoren (BSS).

### 3. Versuchsprogramm

Die Versuche werden mit verkürzten Einzelstäben im DK-Loop des FR2 durchgeführt. Sie erstrecken sich auf den Abschnitt des Kühlmittelverluststörfalls, für den Brennstabversagen als am wahrscheinlichsten betrachtet wird: auf die dem Blowdown folgende sog. zweite Aufheizphase.

Tabelle 1 zeigt die Test-Matrix der Nuklearstabversuche.

Bei den hier besprochenen Versuchen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen, Versuchsgruppen A, B 1 und B 3, wurde der Innendruck und in geringem Maß die Spaltweite (B3) variiert.

Die Untersuchung des Abbrandeinflusses geschieht in den Versuchsgruppen C bis G 3. Auf diese Versuchsserien wird in diesem Bericht nicht eingegangen.

### 4. Versuchsablauf

Der In-pile-Versuch beginnt mit einigen Stunden Stationärbetrieb des Kreislaufes und des Reaktors. Dabei sind das Absperrventil (Ve 108) zwischen Überhitzer und In-pile-Strecke (siehe Abb. 1) und das Entspannventil kleinen Querschnitts (Ve 111) offen, das Entspannventil großen Querschnitts (Ve 128) ist geschlossen. Der Kreislauf wird dabei mit folgenden Daten betrieben:

Massenstrom:	100 - 140 kg/h
Druck:	60 bar
Dampf­temperatur am Ein­tritt zur Teststrecke:	280 - 340 °C
Prüflingsleistung:	40 - 50 W/cm

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						
III (Main Parameter: Burnup)	C	6	190	5	2500	25 - 110
	D	6	190	-	5000	cancelled
	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	

Während dieses Stationärbetriebes erfolgten u.a. Messungen der Neutronenflußdichte-Profile in benachbarten Positionen zur sog. 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. 2). Gleichzeitig sinkt der Druck im Kühlkanal rasch ab, da Enthitzer, Kondensator und Abgas-system weiterarbeiten.

Unabhängig davon, ob der Prüfling im Verlauf der Transiente platzt oder nicht, wird bei einer vorher bestimmten Hülltemperatur (ca. 920 °C) die Prüflingsleistung durch Reaktorscram praktisch abgeschaltet. Die Hülltemperatur beginnt daraufhin langsam zu sinken. Nach Erreichen einer weiteren Temperaturmarke (ca. 740 °C) wird der Kühldampfstrom wieder eingeschaltet; die Hülltemperatur sinkt schnell ab, ähnlich wie beim Abschrecken (Quenching) durch Fluten im wirklichen Reaktor. Die beiden erwähnten Temperaturmarken ergeben sich aus dem angestrebten Referenztemperaturverlauf. Dieser Referenztemperaturverlauf entstammt einer für den heißesten Stab in einem DWR (Druckwasser-Reaktor) durchgeführten Berechnung. Abb. 3 zeigt neben dem Referenztemperaturverlauf aus den Berechnungen für den DWR auch den berechneten Verlauf der Versuchstransiente (dünne Linie). Während des sog. Blowdown weichen die Versuchstemperaturen wesentlich vom Referenzverlauf ab, ab der 2. Aufheizphase des LOCA (Loss-of-Coolant-Accident) kommen die Hülltemperaturen beider Fälle zur Deckung.

Es wurde versucht, den gewünschten Temperaturverlauf gemäß Abb. 3 für alle Versuche gleichermaßen nachzufahren.

Um dem Prüfling eine zusätzliche Dampfmenge während der Transiente anzubieten, wurde in den Versuchen B 1.6, B 3.1 und B 3.2 noch nach dem Schließen des Absperrventils Ve 108 (Aus-

lösen der Transiente) ein geringer Dampfstrom durch eine Bypass-Leitung zu diesem Ventil zugelassen. Die Dampfmenge (Sollwert 0,2 kg/h) wurde mit Hilfe einer Kapillare begrenzt und mit einer Meßblende kontrolliert.

Der Versuch B 1.7 ist etwas anders als die übrigen Versuche abgelaufen, da mit Auslösen der Transiente das Ventil Ve 108 zwar geschlossen wurde, das Entspannventil Ve128 aber nicht geöffnet wurde. Die Entlastung der Teststrecke mußte somit über das Regelventil Ve 111 (Bypass zu Ve 128) erfolgen, was zu einer wesentlich langsameren Druckabsenkung führte.

## 5. Prüflingsdaten

Die nuklearen Prüflinge entsprechen in ihren radialen Abmessungen den Brennstäben deutscher DWR, die Länge der Prüflinge ist verkürzt auf 500 mm aktive Zone. Abb. 4 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 (251 bis 451 mm von Unterkante Brennstab) wurden mit Ultraschall-Methoden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle zugehörig gemessen, und zwar alle 18° azimuthal, alle 15 mm axial /6/. 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.

Tabelle 2

PROFLINGSDATEN Sollwerte unbestrahlter Stäbe

Hülle		Zry-4
Durchmesser außen	mm	10,75
innen	mm	9,30
Wandstärke	mm	0,725
Länge zwischen den Endstopfen	mm	880
Brennstoff		UO <sub>2</sub>
U235-Gehalt: aktive Zone	%	4,7
Endpellets	%	0,3
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	10,35 (94,4 % T.D.)
UO <sub>2</sub> -Pellets		(a) (c) / (b)
Durchmesser	mm	9,11 / 9,15
Länge	mm	11
Säulenhöhe aktive Zone	mm	500
Endpellets		je 1 Stück beidseitig aktiver Zone
Dishing aktive Zone		beidseitig
Endpellets		einseitig
Dishingradius	mm	3,96 / 3,98
Dishingtiefe	mm	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Isolierpellets		
Durchmesser	mm	9,15
Länge	mm	8,0
		3 Stück an jeder Seite der UO <sub>2</sub> -Säule
Freie Gasvolumen		
Dishing pro Tablette	mm <sup>3</sup>	16
Dishing gesamt	cm <sup>3</sup>	0,736
Spalt Hülle/Brennstoff	cm <sup>3</sup>	1,57 <sup>(a)</sup> / 1,24 <sup>(b)</sup>
Plenum (abzüglich Feder)	cm <sup>3</sup>	15,87
Σ Endstopfen, Kapillare Druckaufnehmer	cm <sup>3</sup>	12,25
Füllgas		100 % Helium
Plenumsfeder		
Außendurchmesser der Feder	mm	9,11
Durchmesser des Federdrahtes	mm	1,55
Anzahl der Windungen		116
Federvolumen	cm <sup>3</sup>	5,19
Blocklänge der Feder	mm	180,6

(a) Für diametrales Einfüllspiel "l" 140 - 240 µm in aktiver Zone

(b) Für diametrales Einfüllspiel "s" 100 - 200 µm in aktiver Zone

(c) alle Endpellets

Außerhalb der genau vermessenen 200 mm wurden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle im Ultraschall-Verfahren 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.

Die wesentlichen gemessenen Prüflingsdaten der 14 Stäbe sind in der Tabelle 3 wiedergegeben.

Tabelle 3      Gemessene Prüflingsdaten der A- und B-Versuchsstäbe

	A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	
Brennstablänge (mm)	973,00	972,86	972,80	973,00	972,87	972,84	
Länge der aktiven Zone (mm)	497,80	497,79	496,97	497,00	497,84	497,45	
Länge des Brennstabplenums (mm)	313,0	312,5	314,0	313,5	312,5	313,0	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	16,00	16,00	16,08	16,07	16,03	16,07	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	0,763	0,734	0,729	0,752	0,725	0,734	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	1,552	1,469	1,466	1,508	1,560	1,567	
Hüllaußendurchmesser (mm)	{ max.	10,766	10,757	10,755	10,760	10,741	10,740
	{ mittel	10,758	10,748	10,750	10,751	10,737	10,733
	{ min.	10,750	10,744	10,742	10,745	10,732	10,725
Hüllinnendurchmesser (mm)	{ max.	9,313	9,298	9,295	9,299	9,306	9,312
	{ mittel	9,303	9,291	9,287	9,292	9,299	9,299
	{ min.	9,295	9,284	9,279	9,286	9,293	9,291
Wandstärke (mm)	{ max.	0,744	0,746	0,749	0,747	0,742	0,740
	{ mittel	0,727	0,729	0,731	0,730	0,719	0,717
	{ min.	0,711	0,710	0,714	0,711	0,695	0,692
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	10,45	10,43	10,43	10,43	10,43	10,43	
Tablettendurchmesser (mm)	{ max.	9,115	9,112	9,111	9,110	9,112	9,112
	{ mittel	9,112	9,110	9,108	9,108	9,109	9,108
	{ min.	9,110	9,106	9,105	9,106	9,105	9,103
Mittleres diametrisches Einfüllspiel (mm) [a]	0,191	0,181	0,179	0,184	0,190	0,191	

[a] aus Meßdaten berechnet

Tabelle 3 (Fortsetzung)

Gemessene Prüflingsdaten der A- und B-Versuchsstäbe

	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2	
Brennstablänge (mm)	972,90	972,89	972,94	972,89	972,94	972,97	
Länge der aktiven Zone (mm)	497,96	496,90	497,42	498,08	499,40	499,20	
Länge des Brennstabplenums (mm)	312,5	314,0	313,0	312,5	311,0	311,0	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	16,02	16,14	16,03	16,03	15,93	15,95	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	0,750	0,750	0,750	0,763	0,782	0,765	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	1,535	1,582	1,509	1,568	1,270	1,311	
Hüllaußendurchmesser (mm)	{ max.	10,769	10,765	10,750	10,758	10,755	10,752
	{ mittel	10,746	10,757	10,746	10,751	10,746	10,747
	{ min.	10,736	10,750	10,739	10,756	10,739	10,735
Hüllinnendurchmesser (mm)	{ max.	9,317	9,309	9,303	9,309	9,316	9,312
	{ mittel	9,295	9,301	9,291	9,298	9,298	9,303
	{ min.	9,285	9,292	9,285	9,289	9,290	9,288
Wandstärke (mm)	{ max.	0,751	0,750	0,741	0,734	0,740	0,740
	{ mittel	0,726	0,728	0,727	0,726	0,722	0,722
	{ min.	0,703	0,706	0,714	0,721	0,704	0,703
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	10,44	10,44	10,46	10,41	10,42	10,42	
Tablettendurchmesser (mm)	{ max.	9,111	9,110	9,111	9,109	9,147	9,145
	{ mittel	9,108	9,108	9,107	9,107	9,144	9,144
	{ min.	9,103	9,106	9,105	9,103	9,142	9,143
Mittleres diametrisches Einfüllspiel (mm) [a]	0,187	0,193	0,184	0,191	0,154	0,159	

[a] aus Meßdaten berechnet

## 6. Versuchsdaten

### 6.1 Messung der Versuchsdaten

Der Stabinnendruck wird am kalten Ende des Prüflings kontinuierlich gemessen. Die Meßeinrichtung besteht aus einem Mikro-DMS-Druckaufnehmer, der über eine Kapillare von 1,6 mm lichter Weite mit dem Plenum verbunden ist. Die Meßverzögerung durch die Kapillare wurde in Vorversuchen mit Helium bestimmt. Sie ist kleiner als 10 ms und kann gegenüber der Zykluszeit der Datenabfrage von 500 ms vernachlässigt werden. Der Meßbereich des Druckaufnehmers beträgt 0 - 175 bar Überdruck.

An der Stabhülle wird - am Umfang verteilt - an sechs Stellen in der aktiven Zone die Temperatur gemessen. Zur Verwendung kommen NiCrNi-Thermoelemente 1 mm  $\varnothing$  mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platin-Hülse zur Trennung der Werkstoffe Inconel und Zirkaloy, deren Bestandteile bei den im Versuch erreichten Temperaturen Eutektika bilden können. Der überstehende Teil der Pt-Hülse wird flachgedrückt und der so entstandene Lappen an das Hüllrohr gepunktet (s. Abb. 5, Version A). Die Version B (ebenfalls in Abb. 5 schematisch gezeigt), bei der die Anschweißung des TE auf der Höhe der Meßstelle erfolgte, wurde im Versuch B 1.7 angewendet. Alle übrigen Prüflinge der Versuchsserie A und B waren mit der TE-Version A ausgestattet. Die Anordnung der TE in den A- und B-Versuchen ist in Tabelle 4 angegeben. Der axiale Abstand zwischen zwei Meßstellen beträgt normalerweise 5 cm.

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.

Tabelle 4 Anordnung der Hüll-Thermoelemente in den Versuchen der A- und B-Serie

Vers.	A 1.1		A 2.1		A 2.2		A 2.3		B 1.1		B 1.2		B 1.3		B 1.5		B 1.6		B 3.1		B 3.2		B 1.7	
	(a)	(b)																						
T131	50	315°	250	260°	200	5°	200	180°	200	245°	200	160°	200	90°	200	210°	200	355°	200	0°	200	355°	450	315°
T132	150	180°	300	140°	250	320°	250	150°	250	215°	250	130°	250	60°	250	180°	250	325°	250	330°	250	325°	450	225°
T133	250	45°	350	80°	300	275°	300	120°	300	185°	300	100°	300	30°	300	150°	300	295°	300	300°	300	295°	450	135°
T134	350	225°	400	20°	350	185°	350	0°	350	65°	350	340°	350	270°	350	30°	350	175°	350	180°	350	175°	450	45°
T135	450	90°	450	320°	400	140°	400	330°	400	35°	400	310°	400	240°	400	0°	400	145°	400	150°	400	145°	513	255°
T136	-		-		450	95°	450	300°	450	5°	450	280°	450	180°	450	330°	450	115°	450	120°	450	115°	538	75°

(a) Axiale Lage = Abstand von Unterkante Brennstoff (mm)

(b) Umfangslage = Winkel von Nullmarkierung im Uhrzeigersinn, bei Ansicht von unten

Alle Meßwerte werden digitalisiert, zur zentralen Anlage CALAS übertragen und auf Band gespeichert. Die Abfragefrequenz beträgt während der Transiente 2 Datensätze pro Sekunde, während des Stationärbetriebs 2 Datensätze pro Minute.

Die Tabellen 5.1 bis 5.14 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßwerte der Versuche A und B und einige von den Meßwerten abgeleitete Daten. Die wesentlichen Meßdaten im Stationärbetrieb als Ausgangswerte für die Transiente sind in Anhang II (Tabelle 14.1 bis 14.4) aufgelistet.

LEISTUNG				
Reaktorleistung		NR	10,8	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$		1,406	Abbrand	-- Mwd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	--	W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		19,2 bis 31,2	W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		15,5 bis 28,5	W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	21,0	W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	53,55
Maximum	50,4	54,41
beim Temperaturmaximum von T 131	73,0	52,43
<b>BERSTDRUCK</b>	78,6	<b>49,86 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	
Meßebene in cm von UK Brennstoff		5	15	25	35	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		306	320	324	321	327	
bei max. Innendruck nach 50,4 sec		716	702	666	638	577	
rel. Maximum nach 73,0 bis 79,1 sec		777	792	764	745	668	
beim Bersten nach 78,6 sec		<b>760</b>	791	760	745	665	
abs. Maximum nach bis sec		850	948	879	872	799	

BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 756 + 54 K **810 °C**

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie) 4 cm

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 131 bei 339 °C nach	6,7 sec	15,0 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 135		2,9 bis 7,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 135		34,5 bis 64,0 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 132		150,2 sec



IT 1980

PNS4237-85.1 a

Daten des Versuchs: A 1.1 vom: 8.10.1975

Tabelle: 5.1

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	7,7	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,05	Abbrand	-- MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	42,45 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		35,5 bis 46,3 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		42,0 bis 44,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	63,17 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	53,72
Maximum	-	-
beim Temperaturmaximum von T	-	-
BERSTDRUCK		- bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	132	133	134			
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		15	25	35			
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		375	351	355			
bei max. Innendruck	nach sec	-	-	-			
rel. Maximum	nach bis sec	-	-	-			
beim Bersten	nach sec	-	-	-			
abs. Maximum nach 63,5 bis 65,0	sec	823	920	933			
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)					+	K	-- °C

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	cm
--	----

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 134 bei 385 °C nach	5,3 sec	27,2	K/s
bei 650 °C	T 133 bis T 134	8,0 bis 11,5	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 133 bis T 134	22,5 bis 23,5	sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 133	63,5	sec

**KIK** IT 1980  
PNS4237-85.2 a

Daten des Versuchs: A 1.2 vom: 29.10.75

Tabelle: 5.2

LEISTUNG			
Reaktorleistung		NR	12,0 MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$		1,012	Abbrand - MWD/t
spezifische Stabileistung	mittlere thermische	NTH	53,96 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		66,0 bis 74,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		60,0 bis 65,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	46,37 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	98,97
Maximum	11,60	99,57
beim Temperaturmaximum von T 131.	19,20	90,90
<b>BERSTD RUCK</b>	19,70	<b>87,98 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	
Meßebe ne in cm von UK Brennstoff		25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		367	388	406	386	387	
bei max. Innendruck nach 11,6 sec		594	615	625	604	614	
rel. Maximum nach 19,2 bis 20,7 sec		722	731	746	744	763	
beim Bersten nach 19,7 sec		<b>722</b>	731	745	738	756	
abs. Maximum nach 47,6 bis 56,2 sec		807	856	905	918	952	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 722 + 98 K						<b>820 °C</b>	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	24 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 135 bei 512 °C nach 8,5 sec	30,4 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 135	17,5 bis 20,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 135	15,1 bis 16,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135	41,8 sec

**KfK** IT 1980  
PNS4237-85.3 a

Daten des Versuchs: A 2.1 vom: 6.7.1976

Tabelle: 5.3

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	6,3	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,03	Abbrand	- MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,59 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		48,1 bis 50,9 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		46,0 bis 49,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	41,34 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	73,47
Maximum	21,30	74,84
beim Temperaturmaximum von T131	37,60	58,36
<b>BERSTDRUCK</b>	37,6	<b>58,36 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		350	356	364	360	374	
bei max. Innendruck nach 21,3 sec		645	662	660	665	685	
rel. Maximum nach 37,1 bis 38,1 sec		<b>783</b>	780	777	798	825	
beim Bersten nach 37,6 sec		783	779	777	796	823	
abs. Maximum nach 70,2 bis 74,3 sec		876	916	922	927	953	
<b>BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)</b>		785	+ 75	K		<b>860 °C</b>	

<b>BEULE</b> Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	15	cm
---	----	----

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 135 bei 406 °C nach	4,0 sec	25	K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 135	12,0 bis 13,0	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 135	20,2 bis 21,5	sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 135	64,6	sec



IT 1980  
PNS4237-85.4 a

Daten des Versuchs: A 2.2 vom: 13.8.1976

Tabelle: 5.4

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	8,3	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,02	Abbrand	- MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	42,82 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		41,6 bis 50,9 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		38,2 bis 48,2 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	34,94 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	26,42
Maximum	37,00	27,28
beim Temperaturmaximum von T 131	55,30	24,70
BERSTDRUCK	55,30	24,70 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		370	367	372	371	365	365
bei max. Innendruck nach 37,0 sec		843	808	819	803	773	762
rel. Maximum nach 42,1 bis 55,8 sec		938	872	917	892	868	788
beim Bersten nach 55,3 sec		938	617	912	892	868	652
abs. Maximum nach 55,3 bis 69,0 sec		938	872	917	892	868	788
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	940 + 75 K	1015 °C					

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	14 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 131 bei 435 °C nach 5,6 sec	23,3 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	10,0 bis 13,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	20,5 bis 25,8 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 131	52,7 sec



IT 1980  
PNS4237-85.5 a

Daten des Versuchs: A 2.3 vom: 2.9.1976

Tabelle: 5.5

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	10,8	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,010	Abbrand	- MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,11 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		51,2 bis 65,4 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		42,0 bis 47,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	42,84 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	58,06
Maximum	26,90	59,20
beim Temperaturmaximum von T 133	40,00	52,37
BERSTDRUCK	40,00	52,37 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		348	348	354	377	369	389
bei max. Innendruck nach 26,9 sec		706	698	724	757	711	730
rel. Maximum nach 40,0 bis 41,0 sec		825	813	836	861	813	838
beim Bersten nach 40,0 sec		823	813	835	861	809	833
abs. Maximum nach 71,6 bis 73,1 sec		837	813	836	956	932	905
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	825 + 75 K						900 °C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	29 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 134 bei 380 °C nach 2,2 sec	28,1 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	13,2 bis 17,7 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	21,0 bis 23,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 134	62,0 sec

**KIK** IT 1980  
PNS4237-85.6 a

Daten des Versuchs: B 1.1 vom: 26.10.1976

Tabelle: 5.6

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	5,3 MW	
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,011	Abbrand	- MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	39,07 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		35,5 bis 39,2 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		30,0 bis 31,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	23,47 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	55,35
Maximum	--	--
beim Temperaturmaximum von T 133	71,0	45,20
<b>BERSTDRUCK</b>	71,0	<b>45,20 bar</b>

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		316	325	330	329	336	339
bei max. Innendruck nach -- sec		-	-	-	-	-	-
rel. Maximum nach bis 71,5 sec		838	838	842	829	841	847
beim Bersten nach 71,5 sec		836	837	<b>841</b>	<b>829</b>	840	846
abs. Maximum nach bis 101,5 sec		920	920	935	913	923	920
BERSTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 840 + 75 K						<b>915 °C</b>	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	33 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 136 bei 340 °C nach	2,5 sec	19,2 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	8,0 bis 9,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	31,3 bis 32,8 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 133	93,5 sec

**KIK** IT 1980  
PNS4237-85. 7 a

Daten des Versuchs: B 1.2 vom: 2.12.1976

Tabelle: 5.7

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	8,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,010	Abbrand	- MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	39,30 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		45,3 bis 50,3 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		42,5 bis 50,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	35,44 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	70,13
Maximum	18,00	70,83
beim Temperaturmaximum von T 133	36,00	62,17
<b>BERSTDRUCK</b>	36,50	<b>61,21 bar</b>

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		356	359	363	371	388	398
bei max. Innendruck nach 18,0 sec		622	618	613	615	666	642
rel. Maximum nach 36,0 bis 38,0 sec		763	776	766	792	816	796
beim Bersten nach 36,5 sec		763	<b>774</b>	<b>765</b>	786	814	794
abs. Maximum nach 62,5 bis 66,0 sec		871	826	832	894	899	910
<b>BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)</b>	770 + 75 K						<b>845 °C</b>

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	28 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 135 bei 441 °C nach	5,5 sec	25,1 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	11,2 bis 12,8 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	19,8 bis 23,2 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 136	62,5 sec



IT 1980  
PNS4237-85.8 a

Daten des Versuchs: B 1.3 vom: 4.1.1977

Tabelle: 5.8

LEISTUNG - 22 -			
Reaktorleistung		NR	8,0 MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$		1,023	Abbrand -- MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	41,74 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		38,5 bis 42,2 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		40,0 bis 45,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	25,72 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	--
Maximum Kein Innendruck		--
beim Temperaturmaximum von T		--
BERSTDRUCK		-- bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C								
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136	
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		340	336	344	349	359	352	
bei max. Innendruck nach sec		--	--	--	--	--	--	
rel. Maximum nach bis sec		--	--	--	--	--	--	
beim Bersten nach sec		--	--	--	--	--	--	
abs. Maximum nach 67,5 bis 69,0 sec		943	897	910	892	905	857	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		+ K					--	°C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	-- cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 135 bei 392 °C nach 5,0 sec	23,7 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	8,9 bis 10,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 135	22,0 bis 24,8 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 131	62,0 sec

KfK

IT 1980

PNS4237-85. 9 a

Daten des Versuchs: B 1.4 vom: 18.1.1977

Tabelle: 5.9

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	6,8	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,013	Abbrand	- MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	41,39 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		35,5 bis 39,2 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		31,5 bis 37,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	22,36 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	57,10
Maximum	41,30	58,15
beim Temperaturmaximum von T 131	66,90	51,50
<b>BERSTDRUCK</b>	72,00	<b>44,67 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C								
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136	
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		329	325	331	340	343	342	
bei max. Innendruck nach 41,3 sec		753	733	730	733	722	716	
rel. Maximum nach 66,9 bis 71,5 sec		852	833	832	845	837	834	
beim Bersten nach 72,0 sec		<b>840</b>	828	831	842	837	832	
abs. Maximum nach 24,4 bis 139,3 sec		853	840	835	918	934	929	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	840 + 70 K						<b>910 °C</b>	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	16 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 131 bei 350 °C nach	3,75 sec	18,58	K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	8,0 bis 9,2	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	26,4 bis 31,5	sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 135	115,1	sec

**KIK** IT 1980  
PNS4237-85. 10a

Daten des Versuchs: B 1.5 vom: 15.2.1977

Tabelle: 5.10

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	5,8	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,01	Abbrand	- MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,75 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		33,6 bis 36,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		25,5 bis 28,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	25,86 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	88,51
Maximum	39,6	90,35
beim Temperaturmaximum von T 133	54,4	83,26
BERSTDRUCK	55,9	79,58 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		349	348	356	361	360	360
bei max. Innendruck nach 39,6 sec		683	673	685	692	681	670
rel. Maximum nach 54,4 bis 55,9 sec		765	754	759	796	783	765
beim Bersten nach 55,9 sec		763	751	749	796	783	765
abs. Maximum nach 101 bis 105 sec		918	862	782	923	940	918
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	750 + 75 K					825	°C

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	29 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 134 bei 413 °C nach	9,5 sec	10,4 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	7,4 bis 8,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	35,2 bis 38,4 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 135	98 sec



IT 1980  
PNS4237-85. 11 a

Daten des Versuchs: B 1.6 vom: 4.5.1977

Tabelle: 5.11

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	10,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,025	Abbrand	-- MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	56,66 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		38,3 bis 44,5 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		31,4 bis 44,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	36,21 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	69,26
Maximum	22,20	70,66
beim Temperaturmaximum von T	--	--
BERSTD RUCK	40,90	61,38 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		45	45	45	45	51,3	53,8
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		428	400	389	409	371	356
bei max. Innendruck nach 22,2 sec		676	686	689	651	451	415
rel. Maximum nach 41,4 sec		780	831	836	-	-	-
beim Bersten nach 40,9 sec		778	828	833	773	480	426
abs. Maximum nach 52,5 bis 53,5 sec		809	866	880	867	-	-
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	830 + 10 K						840 °C

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	25,5 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 133 bei 428 °C nach 3,0 sec		14,8 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 134		10,2 bis 12,3 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 134		22,5 bis 31,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 880 °C bei T 133		53,5 sec

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	6,8	MW
Fluiddichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,01	Abbrand	- Mwd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	39,7 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		39,2 bis 41,6 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		31,0 bis 33,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	30,14 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	89,73
Maximum	31,3	91,40
beim Temperaturmaximum von T 131	43,70	84,83
BERSTDRUCK	45,70	79,32 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		358	362	367	367	365	366
bei max. Innendruck nach 31,3 sec		668	677	676	681	678	665
rel. Maximum nach 43,7 bis 45,7 sec		748	758	772	789	780	771
beim Bersten nach 45,7 sec		740	753	771	789	780	771
abs. Maximum nach 82,0 bis 88,0 sec		822	814	941	931	929	924
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		750 + 75 K				825 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	24	cm
--	----	----

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 134 bei 412 °C nach	8,0 sec	12,5 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	9,2 bis 10,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	29,6 bis 31,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 133	78 sec

KIK

IT 1980

PNS4237-85.12 a

Daten des Versuchs: B 3.1 vom: 5.5.1977

Tabelle: 5.13

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	7,5 MW	
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,01	Abbrand	-- Mwd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,59 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		45,3 bis 48,4 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		33,5 bis 35,2 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	37,94 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	59,63
Maximum	36,40	61,21
beim Temperaturmaximum von T 131.	54,20	51,15
BERSTDRUCK	54,70	50,10 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		362	356	363	379	372	375
bei max. Innendruck nach 36,4 sec		755	729	753	763	739	739
rel. Maximum nach 50,7 bis 54,7 sec		857	835	856	850	839	840
beim Bersten nach 54,7 sec		855	835	844	847	839	840
abs. Maximum nach 54,7 bis 88,9 sec		882	835	910	850	920	936
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		840 + 75 K				915 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	24 cm
--	-------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 133 bei 447 °C nach	10,1 sec	12,9 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	11,2 bis 12,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	27,8 bis 29,3 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 136	81,0 sec


 IT 1980  
 PNS4237-85.13 a

Daten des Versuchs: B 3.2 vom: 1.6.1977

Tabelle: 5.14

## 6.2 Bestimmung der Prüflingsleistung

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse, vor allem zur Nachrechnung des zeitlichen Temperaturverlaufs 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 T 115 vor und T 116 nach dem Prüfling mit Thermoelementen. Zur Bestimmung von Dichte 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.

Der Sollwert der mittleren thermischen Leistung beträgt 40 W/cm im axialen Leistungsmaximum.

b) "Leistung aus Temperaturanstieg NA": Diese Methode erlaubt nach dem Versuch eine Abschätzung der lokalen Stabileistung 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 Stabileistungen<sup>(a)</sup> und daraus auf die gefahrene Prüflingsleistung geschlossen.

---

(a) Rechnungen des IKE Stuttgart mit WALHYD-2D (D. Steiner)

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 Hüllrohrs so, daß der Temperaturanstieg bei gleicher Leistung langsamer als am glatten Hüllrohr erfolgt. Nach /7/ muß bei idealem metallischem Kontakt die aus dem gemessenen Anstieg bestimmte Leistung um knapp 1 % pro TE-Kabel erhöht werden, beim obersten Thermoelement T 136 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 Versuche der Serie A und B sind in den Tabellen 5.1 bis 5.14 als Zahlenwertbereiche, in den Abbildungen 6.1 bis 6.14 für die einzelnen Positionen zusammen mit dem relativen Profil angegeben. Die Streuung der aus dem Temperaturanstieg bestimmten Leistungswerte spiegelt die lokalen Unterschiede der Hüllrohraufheizung azimuthal und des Kontakts zwischen Hülle und vorbeilaufenden TE-Kabeln wieder. Ein axiales Leistungsprofil läßt sich aus den Einzeldaten nicht ableiten.

- c) "Reaktorphysikalische Leistung NKP": Mit der Annahme, daß die Prüflingsleistung proportional der Leistung entsprechender Abschnitte der die Teststrecke umgebenden Reaktorbrandelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brandelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Die reaktorphysikalisch bestimmte max. Prüflingsleistung NKP ergab sich als direkt proportional zur Brandelementgesamtleistung 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 Versuche der Serie A/B wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

$$k = 0,62 [(W/cm)/kW] \quad (a)$$

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA) liefert einen um 42 % höheren k-Wert, nämlich 0,88 (W/cm)/kW. Beide k-Verläufe sind in Abb. 7 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  $\bar{\phi}_{th}(z)$  wird als proportional zum Flußdichteprofil am Prüfling angenommen. Bei nicht vorbestrahlten Prüflingen entspricht der Flußdichteverlauf dem axialen Leistungsverlauf.

Die axialen Flußdichteprofile aus den Versuchen der Serien A und B sind in der Abb. 8 dargestellt. Es ist zu sehen, daß die Verläufe bis auf die Fälle A 1.1 und A 1.2 ähnlich sind. Im Versuch A 1.1 wurde bewußt ein steiles Leistungsprofil (axialer Formfaktor  $\phi_{Pr,max}/\bar{\phi}_{Pr} = 1,4$ ) gefahren. Im Versuch A 1.2 liegt das Maximum näher am oberen Ende des Prüflings als bei den übrigen, nämlich bei 40 cm oberhalb der Brennstoffunterkante. Der Flußdichte-Formfaktor betrug im Versuch A 1.2 1,05. Die Werte der übrigen Versuche lagen zwischen 1,01 und 1,03. Dieses relativ flache Leistungsprofil entspricht dem des mittleren Abschnitts

---

(a)  $k = f \cdot (\phi_{Pr,max}/\bar{\phi}_{Core}) = f \cdot \varphi$   
abgeschätzt wurde  $f = 0,47$ ; gemessen wurde  $\varphi \sim 1,3$

in einem Leistungsreaktor (DWR). In den Versuchen wurde das flache Leistungsprofil durch ein Vertrimmen der Trimm-Abschalt-elemente des FR2-Reaktors im Bereich der Teststrecke erreicht.

Die relativen Leistungsprofile lassen sich in absolute Werte umrechnen, wenn z.B. die mittlere Prüflingsleistung bekannt ist. Für die thermisch bestimmte Leistung ergeben sich dann die axialen Werte zu

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

mit  $\overline{NTH}$  = kalorimetrisch bestimmte mittlere Leistung

$\vartheta(z) / \overline{\vartheta}$  = rel. Flußdichteverlauf im Prüflingsbereich.

In den Abb. 6.2 bis 6.14 ist der axiale Verlauf  $NTH(z)$  zusammen mit den Einzelwerten aus dem Temperaturanstieg  $NA$  aufgetragen. Auch der jeweilige axiale Formfaktor, d.h. das Verhältnis von Maximal- zu Mittelwert, ist darin angegeben. In Abb. 6.1 ist statt  $NTH(z)$  die reaktorphysikalisch bestimmte Stabileistung  $NKP(z) = \overline{NKP} (\vartheta(z) / \overline{\vartheta})$  eingetragen, da im Versuch A 1.1 die "thermische Leistung" noch nicht ermittelt worden war.

### 6.3 Kühlmitteldaten

Die Kühlmitteldaten unmittelbar vor Auslösung der Transiente in den Versuchsreihen A/B können dem Anhang II entnommen werden.

### 6.4 Prüflingsinnendruck

Der zeitliche Verlauf des Innendrucks, der nach der Entspannung des Kühlmitteldrucks gleich dem auf die Hülle wirkenden Differenzdruck ist, wird im Plenum gemessen. Die zeitlichen Druckverläufe der Versuche A und B sind in den Abb. 9.1 bis 9.14 wiedergegeben.

Auf den Übersichtsblättern (Tabellen 5.1 bis 5.14) 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.12 Berstzeitpunkt genannt.

### 6.5 Hüllrohrtemperaturen

Die zeitlichen Verläufe der Hüllrohrtemperatur während der Transiente sind in den Abb. 10.1. bis 10.14 und 11.1 bis 11.14 dargestellt. In den Abb. 10 sind die axialen Hülltemperaturverläufe für einige ausgewählte Zeitschritte zusammen mit den Lagen der Rißstellen eingetragen. Die Abb. 11 zeigen die Verläufe der Hüllrohrtemperaturen T 131 - T 136 kontinuierlich über der Zeit.

Bei 0 s unterscheiden sich die Anzeigen der verschiedenen TE eines Prüflings wenig. Man erkennt die Aufheizung des Dampfes von etwa 20 K beim Strömen durch den Kühlkanal vom untersten TE (T 131) bis zum obersten (T 136). Der kurze Temperaturabfall bei  $t = 2$  s resultiert aus dem kurzfristig zunehmenden Kühlmittelstrom beim Entspannen des Kreislaufs. Die fortschreitende Deformation zeigt sich meist am verlangsamten Temperaturanstieg. Im Verlauf der Verformung beginnen die Hülltemperaturen auseinanderzulaufen.

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

dem Bersten den ungefähren Ort der maximalen Verformung bzw. des Risses erkennen: Die Meßstellen, die den größten Temperatureinbruch nach dem Bersten zeigen, liegen der Berststelle am nächsten.

Mit Erreichen der Maximaltemperatur wird die Leistung durch Reaktor-Schnellschluß zurückgenommen. Das Zuschalten der Dampfkühlung (Quenching) im weiteren Versuchsablauf bringt die Hülltemperatur auf das Ausgangsniveau zurück.

Als Bersttemperatur wird die auf die Beulstelle gemäß Abb. 12 extrapolierte Hülltemperatur zum Zeitpunkt des Berstens bezeichnet. Auf den Übersichtsblättern der Tab. 5.1 bis 5.14 ist zu diesem Temperaturwert als einzigem eine "Korrektur" angegeben, alle anderen Temperaturangaben stellen den direkten Meßwert dar. 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. 13 für die beiden TE-Versionen A und B; benutzt wird die jeweilige mittlere Kurve. Bei der Extrapolation der Bersttemperatur aus den Meßwerten T 131 bis T 136 kann eine azimutale Temperaturverteilung nicht berücksichtigt werden.

## 7. Berstdaten

Die aus den Versuchen mit unbestrahlten Prüflingen ermittelten Bersttemperaturen als Funktion des Berstdruckes sind in Abb. 14 in Relation zu den Ergebnissen der MRBT (Multi Rod Burst Tests) des ORNL<sup>(a)</sup> /8/ mit gleichfalls indirekt beheizter Hülle (hier elektrisch) dargestellt. Bei diesem Diagramm ist zu beachten, daß die Definitionen von Bersttemperatur und -druck bei beiden Versuchsvorhaben (ORNL und KfK) nicht übereinstimmen. In beiden Versuchsvorhaben jedoch wurde die Hülle in gleicher Weise, nämlich indirekt, beheizt.

---

(a) Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA

Die Berstdaten der In-pile-Versuche mit nicht vorbestrahlten Prüflingen sind als Zahlenwerte in Tabelle 6 angegeben.

Die Versuchsergebnisse neben den Berstdaten werden aus den Nachbestrahlungsuntersuchungen der Prüflinge in den Heißen Zellen des FR2 gewonnen. In den folgenden Kapiteln wird über die Ergebnisse der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung berichtet.

## 8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen

### 8.1 Durchstrahlung des Stabes

Nach Ausbau des Prüflingseinsatzes aus dem FR2 werden Durchstrahlungen in der Neutronenradiografieanlage (NERA) des FR2 vorgenommen. Es werden mehrere axial überlappende Aufnahmen des Prüflings sowie Aufnahmen unter verschiedenen Einstellwinkeln gemacht. Bei den NERA-Aufnahmen steht der Prüfling noch innerhalb des Dampfführungsrohres und befindet sich dabei wie beim Versuch in senkrechter Stellung.

Die Neutronenradiografien des getesteten Brennstabprüflings geben einen ersten Eindruck von der Verformung der Stabhülle, d.h. von Form und Größe der Beulstelle. Dadurch können auch erste Angaben über die Rißlage gemacht werden. Ferner dienen die NERA-Aufnahmen der Dokumentation des Brennstoffzustandes nach dem Versuch, bevor der Transport zu den Heißen Zellen das Stabaussehen verändert.

Da die Zry-Hülle wenig neutronenabsorbierend ist, ist sie nicht so kontrastreich abgebildet wie das den Stab umgebende Dampfführungsrohr aus Edelstahl. Doch läßt sich die Aufweitung der Hülle meist erkennen. Die Berststelle liegt grundsätzlich im Bereich der stärksten Aufweitung.

Tabelle 6: Burst Data of the Unirradiated Test Rods  
(Berstdaten der In-pile-Versuche mit nicht  
vorbestrahlten Prüflingen)

Test	Rod No	Cold Diametral gap size µm	Heatup Rate at 923 K K/s	Time to Burst s	Burst Temperature K	Maximum Cladding Temperature K	Burst Pressure bar	Maximum Pressure bar	Circumferential Elongation			Calculated Eng. Burst Stress MN/m <sup>2</sup>
									Max.	At rupture end		
									%	upper %	Lower %	
A 1.1	15	191	7,0	79	1083	1275	50	54	64	53	53	31,98
A 1.2	14	182	10,1	-	-	1281	-	-	-	-	-	-
A 2.1	16	181	19,0	20	1093	1323	88	100	36	31	34	56,43
A 2.2	17	179	12,1	38	1133	1301	58	75	56	56	47	37,43
A 2.3	18	184	13,0	55	1288	1288	25	27	35	29	33	15,84
B 1.1	20	190	17,5	40	1173	1304	52	59	30	25	25	33,59
B 1.2	21	191	8,0	72	1188	1283	45	(55)	25	23	25	28,99
B 1.3	22	187	12,5	37	1118	1258	61	71	34	31	29	39,26
B 1.4	23	184	9,5	-	-	1291	-	-	-	-	-	-
B 1.5	24	193	9,2	72	1183	1282	45	58	60	45	58	28,65
B 1.6	25	184	8,2	56	1098	1288	80	90	38	31	27	51,04
B 1.7	30	191	(10,4)	41	1113	1163	61	71	34	24	29	39,37
B 3.1	1	154	10,0	46	1098	1289	79	91	37	27	28	50,87
B 3.2	2	159	12,1	55	1188	1284	50	61	50	32	33	32,13

Die Neutronenradiografien der Versuche A 1.2 bis B 3.2, die nach dem jeweiligen Versuch aufgenommen wurden, sind zusammen mit den Lageplänen der Aufnahmerichtung in den Abb. 15.1 bis 26.3 wiedergegeben. Stellvertretend für die NERA-Aufnahmen vor dem Versuch ist als Beispiel die Aufnahme des B 3.1-Prüflings mit Lageplan in Abb. 27.1 und .2 zu sehen.

Auf den Röntgenaufnahmen des Stabes ist die Stabhülle deutlicher zu erkennen als auf den Neutronenradiografien. Dies zeigen die Abb. 28.1 bis 39 (Röntgenaufnahme und Ansicht der Stäbe A 1.1 bis B 3.2, außer B 1.4).

## 8.2 Fotodokumentation

Bevor mit der Vermessung der Prüflinge in den Heißen Zellen begonnen wird, werden von jedem Prüfling Fotografien des gesamten Stabes sowie Detailaufnahmen von der Beulstelle des Stabes unmittelbar nach der Demontage des Prüflings aus dem Dampfführungsrohr gemacht.

Die Abb. 40 bis 51 geben die Ansichten der Beulstelle (Detailaufnahmen) aus den Versuchen A 1.1 bis B 3.2 wieder.

Unter den A/B-Prüflingen erlebten die Stäbe A 1.1, B 1.2 und B 1.5 relativ schmale Aufrisse. Die Bersttemperaturen für diese Stäbe betragen  $810^{\circ}\text{C}$ ,  $915^{\circ}\text{C}$  bzw.  $910^{\circ}\text{C}$ . Diese Temperaturen liegen bei A 1.1 in der hohen  $\alpha$ -Phase des Zry bzw. in der hohen  $\alpha+\beta$ -Phase für die Versuchsstäbe B 1.2 und B 1.5. Bei anderen Stäben ergaben sich bei vergleichbaren Bersttemperaturen hingegen breite Aufrisse.

## 8.3 Vermessung der Prüflinge

Die Vermessung der Prüflinge in den Heißen Zellen umfaßt:

- Längenmessung des Stabes mittels Maßstab
- Rißvermessung mittels Maßstab

- Durchmesserbestimmung durch Wendelschrieb
- Bestimmung der Stabkrümmung durch mehrere Mantelschriebe auf dem Umfang.

### 8.3.1 Stablängsdehnung, Rißabmessungen und Rißlage

Die Differenz der Länge vor und nach dem Versuch ergibt die bleibende Längung des Stabes. Evtl. Abweichungen der Längenänderung durch Stabbiegung werden dabei vernachlässigt.

Tabelle 7 gibt die Längenänderung des Stabes und die Rißabmessungen für alle unbestrahlten Versuchsstäbe wieder.

Als Funktion der Bersttemperatur sind die Stablängsdehnungen der A- und B-Versuche in Abb. 52 aufgetragen. Die Versuchspunkte der In-pile-Versuche sind mit der ORNL-Kurve, die aus out-of-pile durchgeführten Einzelstabversuchen mit indirekter Beheizung der Hülle ermittelt wurde /9/, verglichen. Alle KfK-In-pile-Versuchspunkte liegen oberhalb der ORNL-Kurve, zeigen also größere Längungen. Die deutliche Verkürzung der Stäbe bei Bersttemperaturen  $\leq 900$  °C aus den ORNL-Versuchen konnte mit den KfK-In-pile-Versuchen nicht bestätigt werden.

Wie die Durchmesserermessung (siehe Kap. 8.3.2) ergibt, liegt der Riß axial grundsätzlich im Bereich der größten Dehnung.

Vergleicht man die Umfangslage der Risse mit der vor dem Versuch ermittelten Wandstärkeverteilung in der Rißebeine (Abb. 53.1 bis 53.14), so liegt die Mehrzahl der Risse im Gebiet der dünneren Wanddicke. Deutliche Ausnahmen sind allerdings die Hüllrohre der Stäbe A 2.1 und B 1.5.

Tabelle 7 Längenänderungen und Rißabmessungen der nicht vorbestrahlten Stäbe

Versuch	A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2
Bleibende Längung des Stabes (mm)	5,53	0,94	0,18	7,45	3,13	4,46	-	3,91	0,86	1,31	2,66	3,81
Riß-Anfang (mm von UKF) <sup>(a)</sup>	30	309	120	134	269	332	262	126	276	233	225	225
Riß-Ende (mm von UKF)	49	344	170	153	310	343	298	181	304	282	252	258
Riß-Länge (mm)	19	35	50,0	19	41	11	36	45	28	49	27	33
Riß-Breite max. (mm)	1,3	9	5,5	4,5	9,5	1,7	8,5	3,9	9,5	9,6	9,8	8,2
Riß-Winkellage zur Kerbe <sup>(b)</sup>	270 <sup>0</sup>	50 <sup>0</sup>	210 <sup>0</sup>	315 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup>	240 <sup>0</sup>	225 <sup>0</sup>	320 <sup>0</sup>	170 <sup>0</sup>	81 <sup>0</sup>	225 <sup>0</sup>	22 <sup>0</sup>

(a) UKF = Unterkante Brennstoff

(b) Alle Winkelangaben von der Kerbe aus im Uhrzeigersinn bei Stabansicht von unten

Da der Vergleich der Rißlage mit dem azimuthalen Wandstärkenprofil wegen der genannten Ausnahmen zu keiner eindeutigen Systematik führt, muß davon ausgegangen werden, daß die azimuthale Temperaturverteilung hauptverantwortlich für die Rißlage auf dem Umfang ist.

Die azimuthale Temperaturverteilung wurde im Versuch B.1.7 bestimmt. Hierzu waren vier Thermolemente (T 131 bis T 134) auf gleicher Höhe, nämlich 45 cm von UKF<sup>(a)</sup>, um jeweils 90° versetzt zueinander angeordnet. Abb. 53.12 zeigt schematisch im Hüllrohrquerschnitt die Temperaturen zum Berstzeitpunkt auf Höhe 45 cm zusammen mit der Wanddickenverteilung und der Rißlage auf Höhe 26 cm. Zum Berstzeitpunkt beträgt der max. Temperaturunterschied in der Höhe der vier Thermolemente also 60 K, zum Beginn der Verformung rd. 40 K. Von der Meßebene kann nur mit Einschränkung auf die Rißebebe geschlossen werden. Die metallografische Auswertung der Querschliffe jedoch bestätigt die angegebene Größenordnung auch für die Rißebebe.

### 8.3.2 Durchmesseränderung und Umfangsdehnung

Das axiale Durchmesserprofil wird mittels Wendelschrieb aufgezeichnet. Auch für die Ermittlung der Umfangsdehnung der Hülle werden die Wendelschriebe für die Axialbereiche herangezogen, die keine wesentliche Ovalität aufweisen. Diese Bereiche liegen an den jeweiligen oberen und unteren Stabenden.

Ganz allgemein kann der Stab bezüglich des axialen Verformungsprofils in drei Bereiche eingeteilt werden:

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

---

(a) Unterkante Brennstoff

Die drei Bereiche sind in Abb. 54 verdeutlicht. Sie zeigt einen typischen Wendelschrieb eines Versuchsstabes (hier Versuch A 2.2).

Im Bereich kleiner Ovalität ergibt sich die Umfangsdehnung aus 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 Ribbereich wird der Umfang mittels Querschlifffbildern ermittelt.

Zur Bestimmung der Ovalität,  $D_{\max} - D_{\min}$ , in einzelnen Ebenen nahe der Ribstelle werden sogenannte Polarschriebe aufgezeichnet (Durchmesserbestimmung ohne Längsvorschub des rotierenden Stabs). Die so ermittelten Ovalitäten sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Die axialen Verläufe der Umfangszunahmen (Dehnungsprofile) der A- und B-Prüflinge sind in den Abb. 55 und 56 wiedergegeben. Tabelle 9 zeigt die numerischen Werte der Dehnungen im Ribbereich.

Aus den Dehnverläufen ergibt sich, daß

- sich die bleibenden Durchmesserzunahmen über den gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs erstrecken,
- die Umfangszunahmen an den Ribstellen am größten sind,
- an den TE-Befestigungsstellen lokale Einschnürungen von 1 bis 2 %  $\Delta d/d_0$  (bis zu 0,25 mm) entstehen können,
- in der Mehrzahl der Fälle die Aufweitung der Hülle zu den Enden hin kegelförmig abnimmt,
- das axiale Leistungsprofil einen starken Einfluß auf das axiale Dehnprofil hat (Versuch A 1.1 hatte ein steiles Leistungsprofil mit einem axialen Formfaktor <sup>[a]</sup> von 1,4, während die übrigen Versuche mit Leistungsformfaktoren von 1,01 bis 1,03 durchgeführt wurden).

---

[a] Maximal- zu Mittelwert

Tabelle 8:

Ovalität im Beulbereich der A- und B-Versuchsstäbe

Versuch		A 1.1	A 2.1		A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5		B 1.6		B 1.7		B 3.1		B 3.2	
Stab	Nr.	15	16		17	18	20	21	22	24		25		30		1		2	
Polar- schieb	Nr.	*	2	3	*	*	*	*	*	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Abstand von UKF	mm	*	216	258	*	*	*	*	*	136	183	269	309	230	285	219	256	222	261
D <sub>min</sub>	mm	*	14,0	13,5	*	*	*	*	*	16,7	14,9	13,3	13,6	13,2	12,9	13,5	13,5	13,7	13,6
D <sub>max</sub>	mm	*	14,7	14,7	*	*	*	*	*	17,3	16,3	14,1	14,5	14,4	13,8	14,0	13,8	15,0	14,9
Ovalität	mm	*	0,64	1,25	*	*	*	*	*	0,67	1,42	0,81	0,87	1,24	0,96	0,51	0,35	1,25	1,29

\*) wurde nicht gemessen

Tabelle 9:

Umfangsdehnung im Rißbereich der A- und B-Versuchsstäbe

Versuch		A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2
Stab	Nr.	15	16	17	18	20	21	22	24	25	30	1	2
unteres Rißende	U mm	51,7	45,1	49,0	45,0	42,0	42,4	42,7	54,8	43,0	43,4	43,3	45,0
	$\frac{\Delta U}{U_0}$ %	53,0	33,5	45,0	33,2	24,5	25,7	26,5	60,4	27,5	28,5	28,3	33,4
Mitte Riß	U mm	55,3	46,0	52,8	45,5	43,5	41,8	45,3	53,8	46,6	45,3	46,2	50,6
	$\frac{\Delta U}{U_0}$ %	64,0	36,2	56,3	34,7	29,0	24,0	34,2	59,2	38,0	34,1	36,9	49,9
oberes Rißende	U mm	51,7	44,3	51,0	43,5	41,8	41,6	44,6	49,0	46,4	41,9	45,1	44,7
	$\frac{\Delta U}{U_0}$ %	53,0	31,0	51,0	28,8	24,0	23,4	32,1	45,1	37,4	24,0	33,6	32,5

Die "Einbrüche" der Dehnung durch die TE-Meßstellen deuten darauf hin, daß die zusätzliche wärmeabführende Oberfläche und die wärmespeichernde Masse der TE lokal zu geringeren Hüllrohrtemperaturen gegenüber der Umgebung führt.

Die größten Umfangszunahmen der Hülle sind in Abb.57 zusammen mit den anderen Versuchspunkten dieses Versuchsprogramms eingetragen und mit den von BMI<sup>(a)</sup> in /10/ angegebenen Umfangsdehnungen als Funktion der Temperatur verglichen. Die BMI-Daten sind aus Versuchen mit bestrahlten Hüllrohren gewonnen worden.

### 8.3.3 Krümmung des Stabes und Exzentrizität der Beule

Unter der Krümmung des Stabes wird die radiale Auslenkung der Stabachse von der geraden Verbindungslinie ihrer Endpunkte verstanden (s. Schema S. 45).

Zur Feststellung der Krümmung des Stabes und der Beulenlage zur Stabachse werden Mantelschriebe an in der Regel vier Umfangswinkelpaaren (z.B.  $0^{\circ}/180^{\circ}$ ,  $45^{\circ}/225^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/270^{\circ}$ ,  $135^{\circ}/315^{\circ}$ ) durchgeführt. Die aus den Mantelschrieben ermittelten Stabachsen im Beulbereich wurden mit den Stabachsen außerhalb der Beulbereiche verglichen. Die Differenz der beiden jeweiligen Werte wird als "Exzentrizität der Beule" angegeben. Die maximale Krümmung und die Krümmung im Beulbereich sind für die A- und B-Versuchsstäbe in Tabelle 10, die Exzentrizität der Beule in Tabelle 11 wiedergegeben. Die maximalen Krümmungen der Versuchsstäbe liegen zwischen 1 und 3 mm. Die Krümmungen im Beulbereich sind etwa von der gleichen Größe. Die Exzentrizität der Beule liegt meist etwa an der Krümmungsaußenseite, während die Rißstelle gegenüber, also an der Innenseite liegt (s. Schema).

---

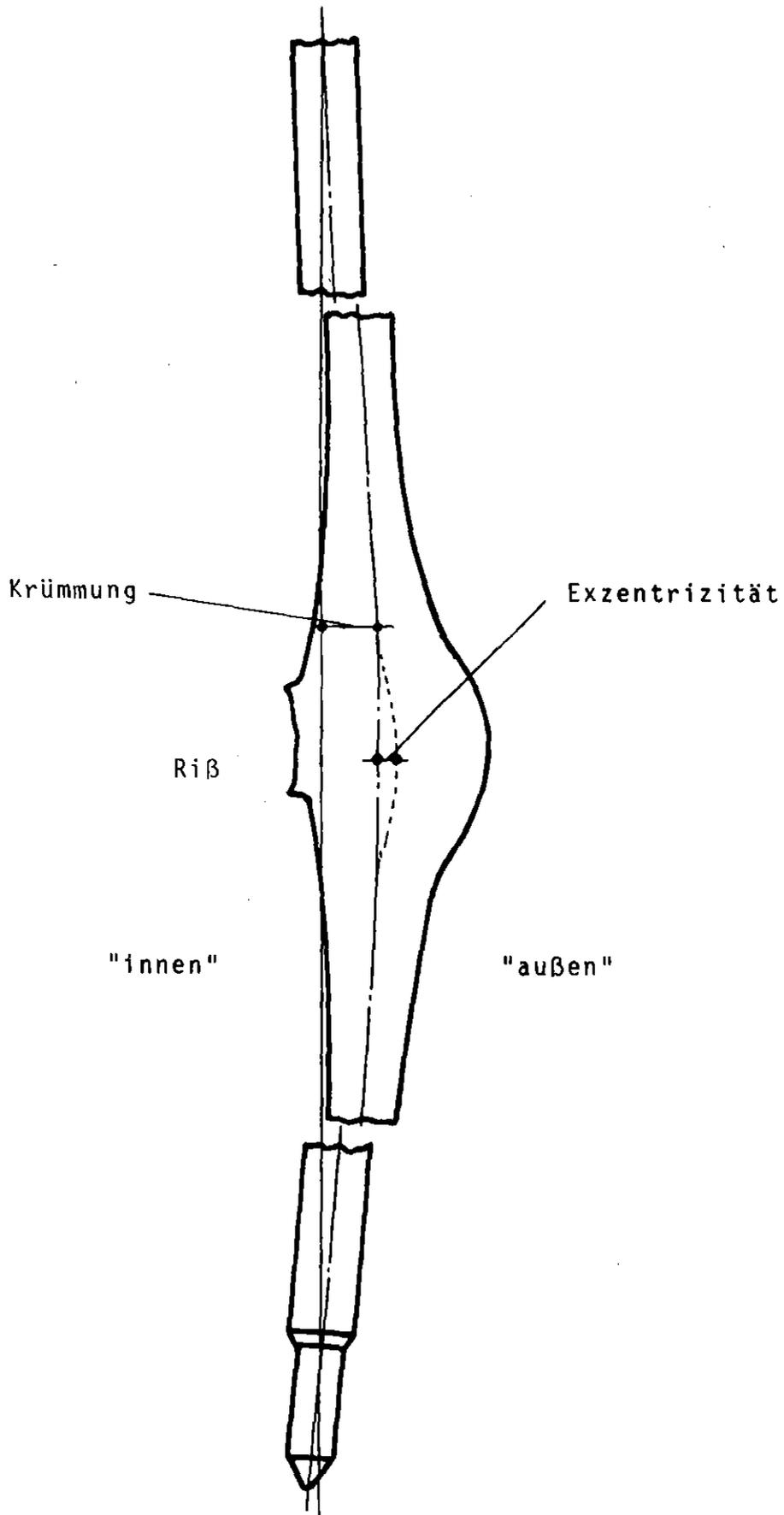
(a) Battelle-Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, USA.

Tabelle 10:

Krümmung der A- und B-Versuchsstäbe

Versuch		A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2
Stab	Nr.	15	16	17	18	20	21	22	24	25	30	1	2
a) max. Krümmung	mm	*	1,3	3,0	1,1	1,8	1,8	1,1	2,4	1,0	1,7	1,4	1,7
Abstand von UKF	mm	*	270	300	450	130	450	210	420	190	500	170	150
Lage zur Nullmarke	Grad	*	160	120	80	240	45	45	120	90	40	85	190
b) Krümmung im Beulbereich	mm	*	1,1	2,0	0,5	1,3	1,2	1,0	1,6	0,6	1,1	1,2	1,7
Lage Krümmungsaußen- seite zum Riß	Grad	*	120	120	125	130	160	165	180	180	160	145	150

\*) wurde nicht gemessen



SCHEMA

Tabelle 11:

Exzentrizität der Beule bei den A- und B-Versuchsstäben

Versuch		A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2
Stab	Nr.	15	16	17	18	20	21	22	24	25	30	1	2
Abstand Mitte Beule von UKF	mm	40	237	145	144	290	338	280	159	290	258	239	242
Lage zum Riß	Grad	*	130	165	145	140	0	-	90	150	159	140	168
Lage zur Nullmarke	Grad	*	190	45	170	250	240	-	230	320	240	5	190
Exzentrizität	mm	*	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3	0	0,2	0,5	0,4	0,2	0,2

\*) wurde nicht gemessen

#### 8.3.4 Volumenzunahme des gebeulsten Stabes

Um die Volumenvergrößerung des verformten Versuchsstabes zu erfassen, wurde das Volumen aus den Wendelschrieben ermittelt. Dabei wurde der Stab in genügend kleine Abschnitte eingeteilt und das Volumen der Abschnitte aus den Außendurchmessern berechnet. Für das Volumen von Hüllwand und Brennstoff wurden dabei die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelmolumina stellt 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  $V_1$  = Leervolumen des Stabes nach dem Versuch

$V_0$  = Leervolumen des Stabes vor dem Versuch.

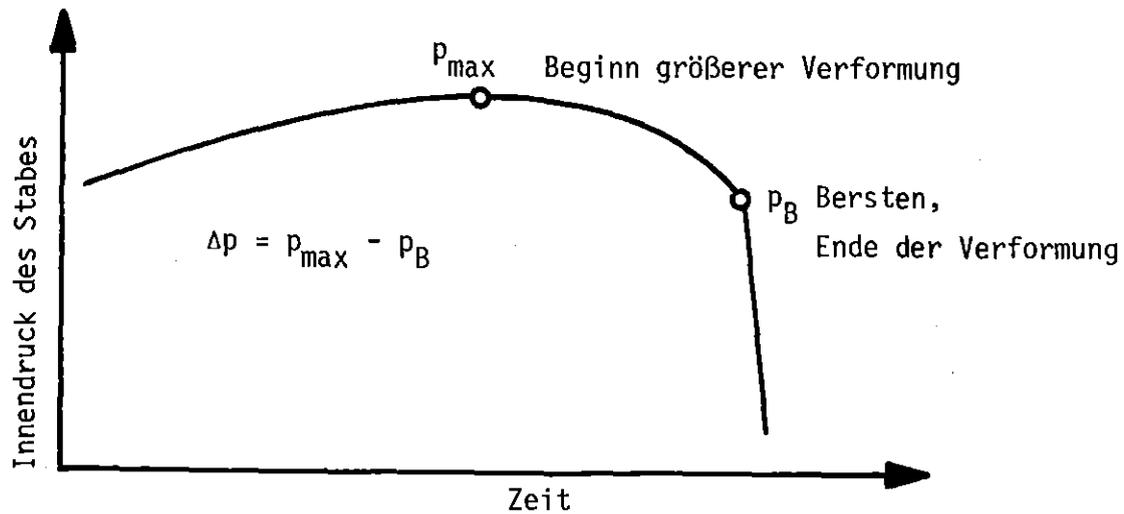
In Tabelle 12 sind die Volumenzunahmen der gebeulsten Versuchsstäbe aus der A- und B-Serie zusammengefaßt, und in Abb. 58 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche der Reihe A und B aufgetragen. Es zeigt sich, daß die Versuchspunkte recht gut einer Geraden folgen. Das bedeutet einen linearen Zusammenhang zwischen Volumenzuwachs bzw. Gesamtverformung des Stabes und der maximal bestimmten Umfangszunahme. Eine deutliche Ausnahme bildet der 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. Bei diesem Versuch hat sich eine "konzentrierte" Aufblähung des Hüllrohrs, d.h. ein geringer Volumenzuwachs im Vergleich zur maximalen Umfangsdehnung, ergeben.

In Abb. 59 wurde die relative Volumenzunahme in Abhängigkeit von der Innendruckänderung während der Verformung dargestellt. Die Innendruckveränderung  $(p_{\max} - p_B)/p_{\max}$  während des Ballooning der Hülle ist in folgendem Schema veranschaulicht.

Tabelle 12:

Volumenzunahme durch die Hüllverformung, Versuche mit nicht vorbestrahlten Stäben

Versuch	A 1.1	A 2.1	A 2.2	A 2.3	B 1.1	B 1.2	B 1.3	B 1.5	B 1.6	B 1.7	B 3.1	B 3.2
$V/V_0$ [%]	24	47	83	56	44	39	52	105	44	48	40	69



Schema

Innendruckverlauf während der Hüllverformung

Der durch die 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 vereinfachenden Annahmen auch analytisch herleiten bei Berücksichtigung der Erwärmung des während der Stabdeformation vom Plenum in die aktive Zone einströmenden Gases.

## 9. Zerstörende Nachbestrahlungsuntersuchung

Die zerstörenden Nachbestrahlungsuntersuchungen der Brennstabprüflinge wurden vom Institut für Material- und Festkörperforschung des KfK in / 2/ beschrieben.

In der Regel wurden von jedem Prüfling an drei bis vier Stellen Proben für Querschliffe angefertigt. Die Querschliffbilder der Berststellen werden u.a. zur Bestimmung der Umfangsdehnung verwendet (siehe Kap. 8.3.2 Durchmesseränderung und Umfangsdehnung). Anhand der Schliffbildaufnahmen des Zry-4-Gefüges werden weiterhin Aussagen über den Gefügezustand, die Wandstärkeabnahme, den Oxidationszustand, eine evtl. chemische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle, sowie die maximal erreichte Hülltemperatur gemacht. Die über das Gefügebild abgeschätzten Zirkaloy-Temperaturen werden mit den korrigierten Meßwerten verglichen. Die Querschliffbilder der Stelle max. Umfangsdehnung sind für die A- und B-Versuchsstäbe in Abb. 60 zusammengestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse der zerstörenden Nachbestrahlungsuntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Oxidschichten der Hüllrohräußenseite liegen in der Größenordnung von 2 - 9  $\mu\text{m}$ . Die Oxidschichten sind fest haftend und in der Regel dicht. Dort, wo die Oxidation durch eine wesentliche Dehnung des Hüllmaterials überlagert wird, kommt es durch Anrisse der Oxidschicht zu einer zerklüfteten Zry-Oberfläche.

Die Oxidschichten der Hüllrohrinnenseite sind nach dem Aufriß stärker als weiter entfernt von der Rißstelle. Der nach dem Bersten von außen in die Hülle eingedrungene Wasserdampf ist für die Innenoxidation von ausschlaggebender Bedeutung; ein Beitrag durch den Sauerstoffanteil aus dem Brennstoff  $\text{UO}_2$ , hingegen, konnte nicht festgestellt werden. Die Oxidschicht der Hüllrohrinnenseite weist nahe der Rißstelle etwa die gleiche Dicke auf wie die der Hüllrohräußenseite.

Die Brennstofftabletten zerfallen allenfalls im Beulbereich in wenige große Bruchstücke. Der überwiegende Anteil der  $UO_2$ -Tabletten ist unversehrt. Es lassen sich nur sehr feine radiale Risse im Brennstoff erkennen.

Aus den Gefügeuntersuchungen wurden die maximalen Hüllrohrtemperaturen, die während der LOCA-Transiente erreicht wurden, ermittelt. Sie ergaben in der Regel etwa 15 - 80 K niedrigere Werte im Vergleich zu den korrigierten Meßwerten.

Die azimuthalen Temperaturdifferenzen des Hüllrohrs wurden aus den Gefügebildern zu 0 - 70 K abgeschätzt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Meßwerten des Versuchs B 1.7, bei dem sich zum Berstzeitpunkt azimuthale Unterschiede von 60 K (siehe auch Kapitel 8.3.1) ergaben.

## 10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerung

Die wesentlichen Ergebnisse aus den In-pile-Versuchen mit nicht vorbestrahlten Stäben sind im folgenden zusammengefaßt:

- Alle druckbeaufschlagten Stäbe barsten während der Aufheizphase. Die Stäbe der Versuche A 1.2 und B 1.4 waren zum Zeitpunkt der Transiente drucklos und versagten deshalb nicht.
- Alle geborstenen Stäbe zeigten Umfangszunahmen über der gesamten aktiven Zone.
- Alle Prüflinge barsten an der Stelle maximaler Dehnung.
- Einige Stäbe barsten an axialen Stellen, an denen Thermoelemente angebracht waren; dort liegt der Riß am Umfang versetzt zum TE (A 1.1, B 1.6, B 3.1, B 3.2).
- Die Berstdrücke und Bersttemperaturen sowie die Berstdehnungen liegen im Streuband der Out-of-pile-Ergebnisse.
- Ein lokaler Einfluß der Thermoelemente auf das Verformungsverhalten des Stabes existiert: Bis zu 2 % Verminderung der Umfangsdehnung.
- Die max. Verformung ist an oder nahe der Stelle max. Leistung gelegen.
- Das axiale Leistungsprofil hatte einen Einfluß auf die Berstdaten sowie auf die Beulenform.
- Im Versuch B 1.7 wurden mit Hilfe von vier Thermoelementen auf einer Ebene azimutale Temperaturen von 60 K zum Berstzeitpunkt, von rd. 40 K zum Beginn größerer Verformung gemessen.
- Die Risse lagen in der Mehrheit der Versuche im Bereich der minimalen Wandstärken bzw. im Übergangsbereich zur minimalen Wanddicke; es läßt sich jedoch aus der Umfangsverteilung der Wanddicke vor der Verformung nicht auf die spätere

Rißlage schließen. Die azimutale Temperaturverteilung wird als hauptverantwortlich für die Umfangslage des Risses angesehen.

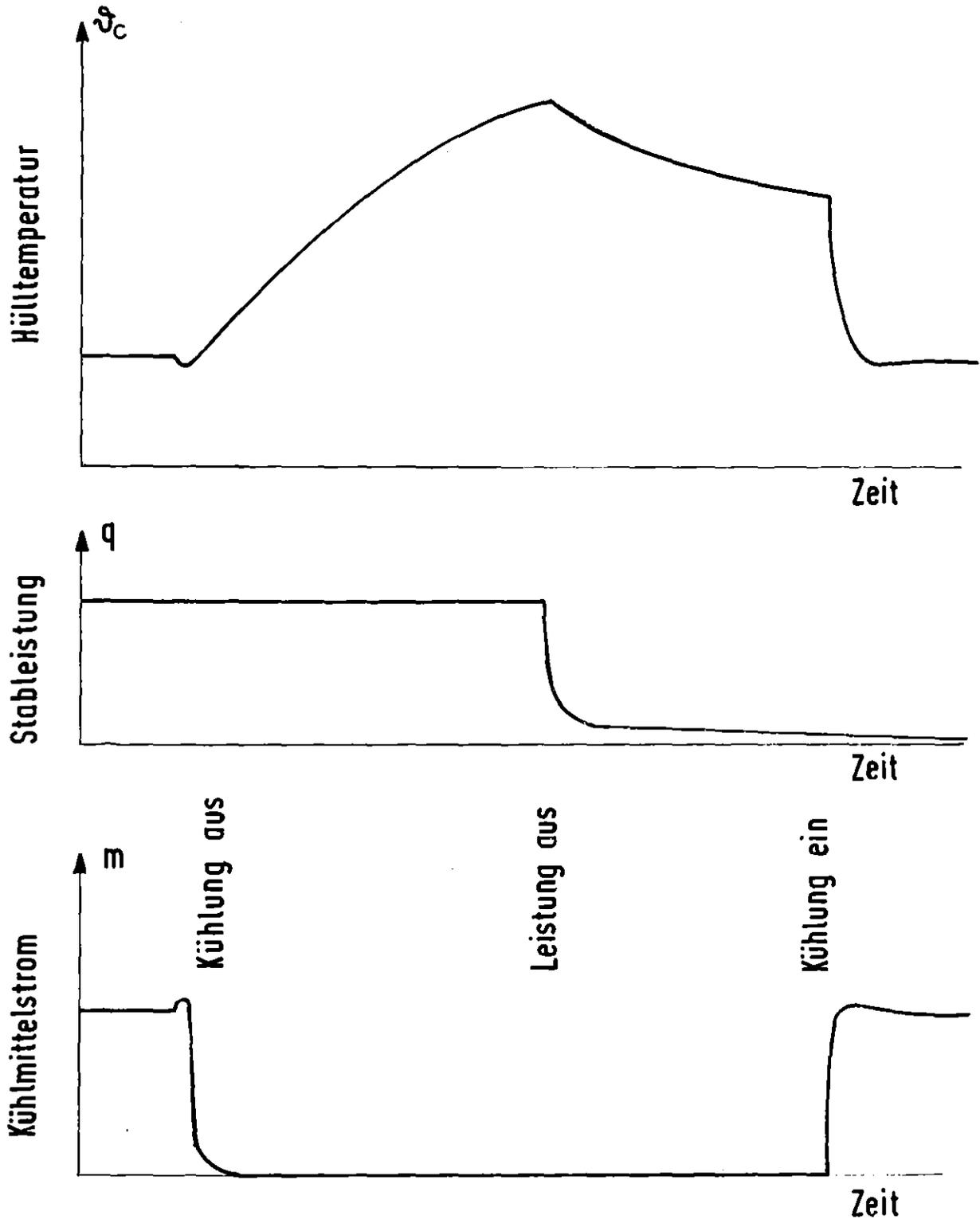
Im Hinblick auf die Zielsetzung des Forschungsvorhabens kann gesagt werden, daß die Versuchsergebnisse keinen Hinweis auf einen Einfluß der nukleären Umgebung auf die Mechanismen des Brennstabversagens ergaben.

11. Literatur

- /1/ E. Karb, G. Harbauer, M. Prüßmann, B. Räßple, L. Sepold:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /2/ P. Hofmann, C. Petersen, G. Schanz:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /3/ E. Karb, L. Sepold:  
In-pile-Experimente zur Untersuchung des Brennstabver-  
sagens, KfK 2101 (1974), S. 94 - 112
- /4/ E. Karb:  
Ergebnisse von In-pile-Experimenten im FR2 zum Brennstab-  
verhalten bei Kühlmittelverlust-Störfällen.  
KfK 2570 (Dez. 1977), S. 195 - 203
- /5/ E.H. Karb:  
In-Pile Tests at Karlsruhe of LWR Fuel Rod Behavior  
During the Heatup Phase of a LOCA.  
Nuclear Safety, Vol. 21, No. 1, Jan-Febr. 1980 S. 26 - 37
- /6/ L. Sepold, M. Prüßmann:  
unveröffentlichter Bericht des KfK, 1977
- /7/ K. Wagner, A. Scherer:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /8/ R.H.Chapman:  
Multirod Burst Test Program Progress, Report for  
January - March 1978, NUREG / CR - 0225,  
ORNL / NUREG / TM-217, August 1978

- /9/ R.H. Chapman, J.V. Cathcart and D.O. Hobson:  
Status of Zircaloy Deformation and Oxidation Research  
at Oak Ridge National Laboratory, Presented at the CSNI  
Specialist's Meeting on the Behavior of Water Reactor  
Fuel Elements under Accident Conditions in Spätind,  
Norway, Sept. 13 - 16, 1976
- /10/ A.A. Bauer et al.:  
Evaluating Strength and Ductility of Irradiated Zircaloy,  
Quarterly Progress Report January - March, 1978  
NUREG / CR-0085, BMI-2000, June 1978





RBT/IT- 1977  
PNS 4237 -59.1

# Versuchsablauf, Schema

Abb.: 2

# Vergleich gerechneter Temperaturverläufe LOCA-DWR / Prüfling im DK-Loop

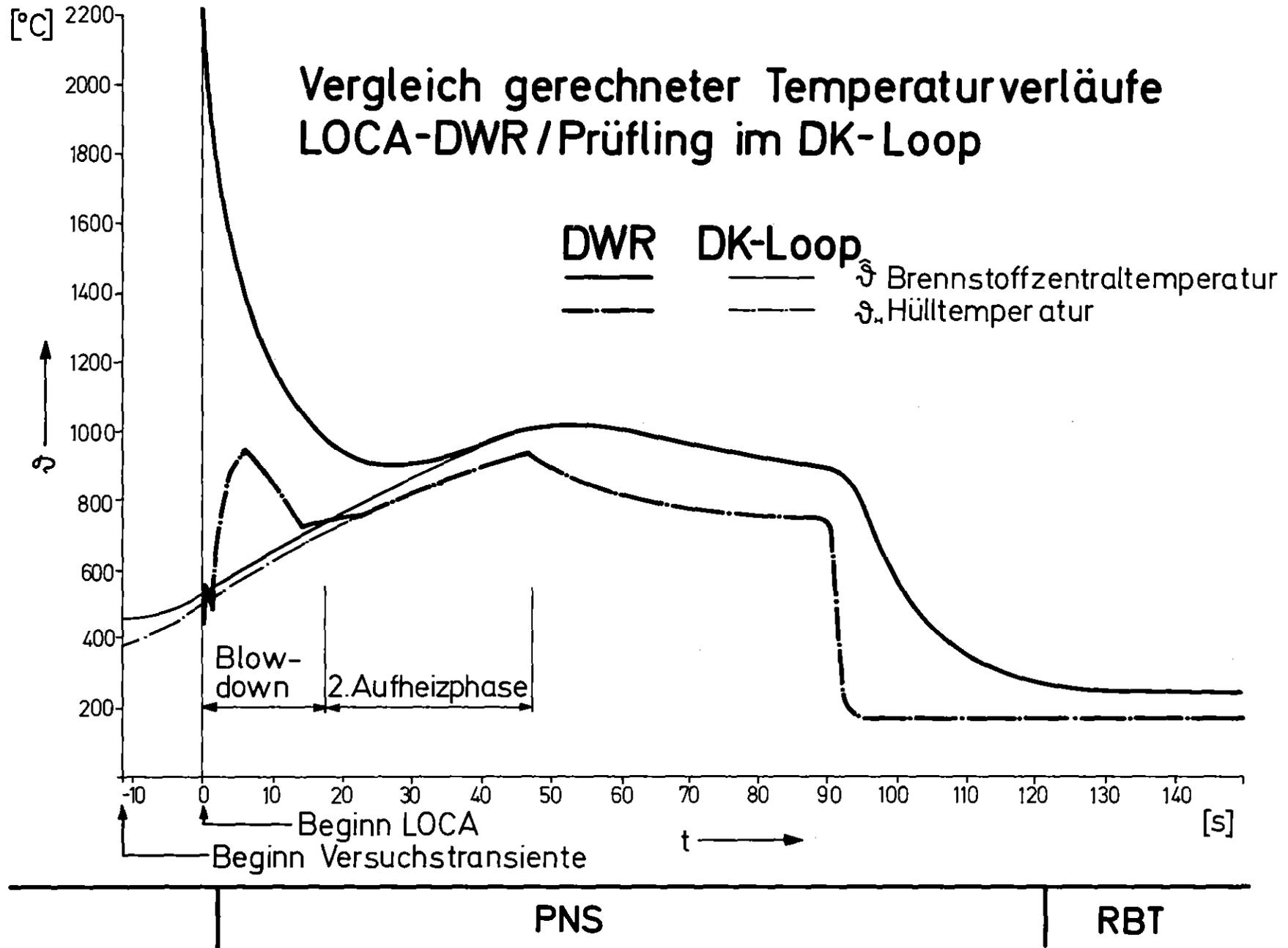
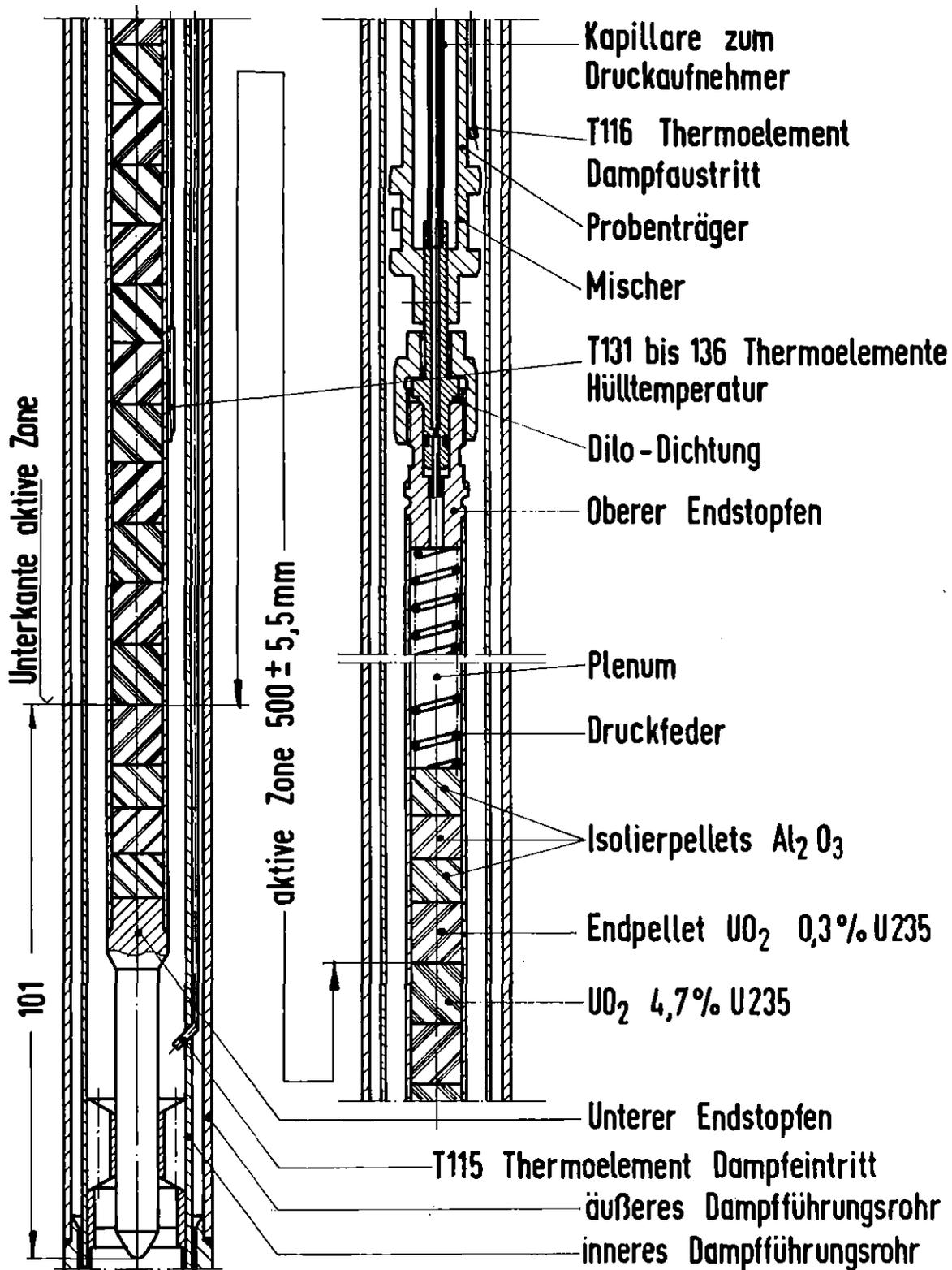


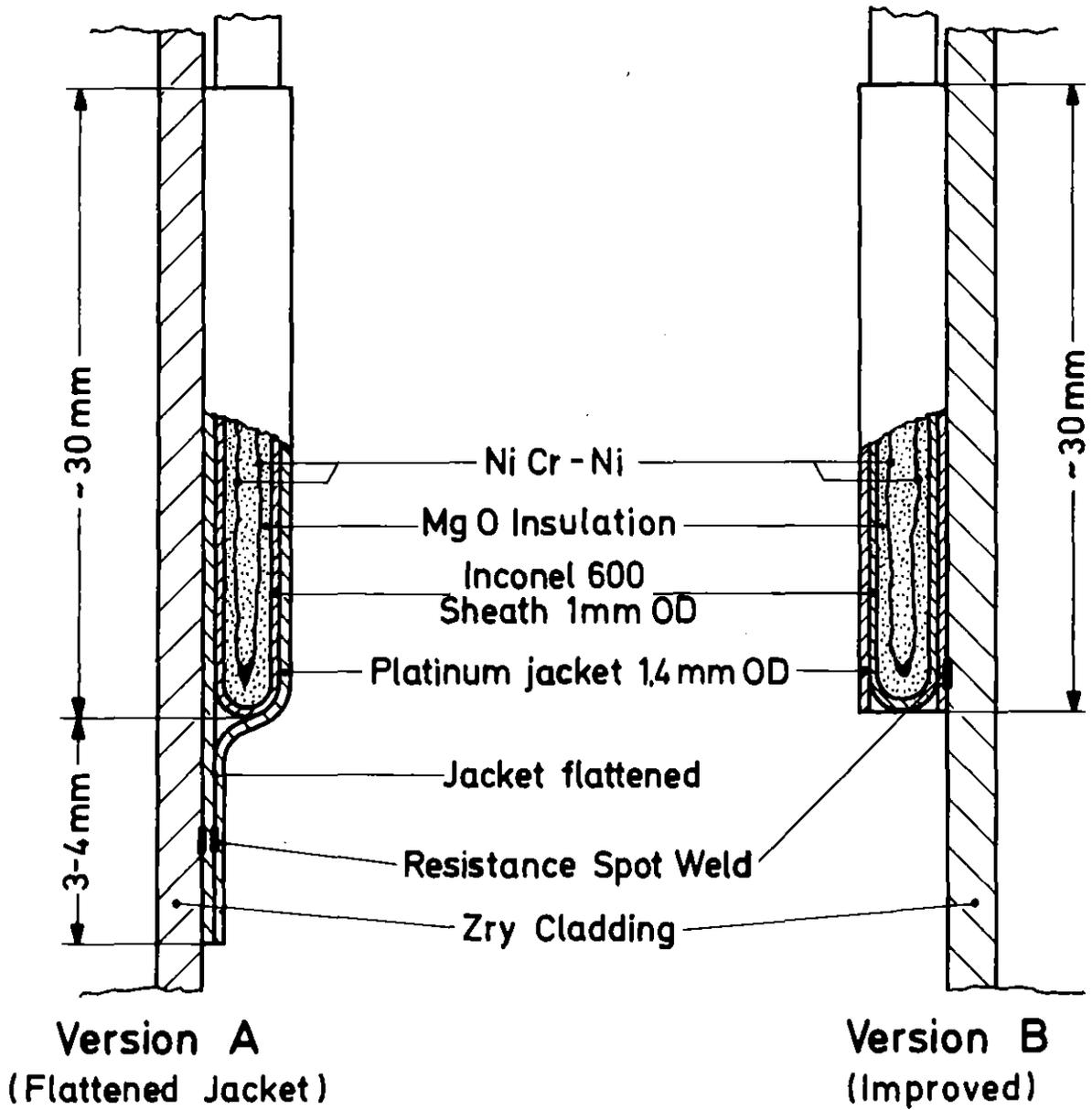
Abb.:3



RBT/IT - 1977  
PNS 4237-88

# Nuklear-Prüfling vereinfacht

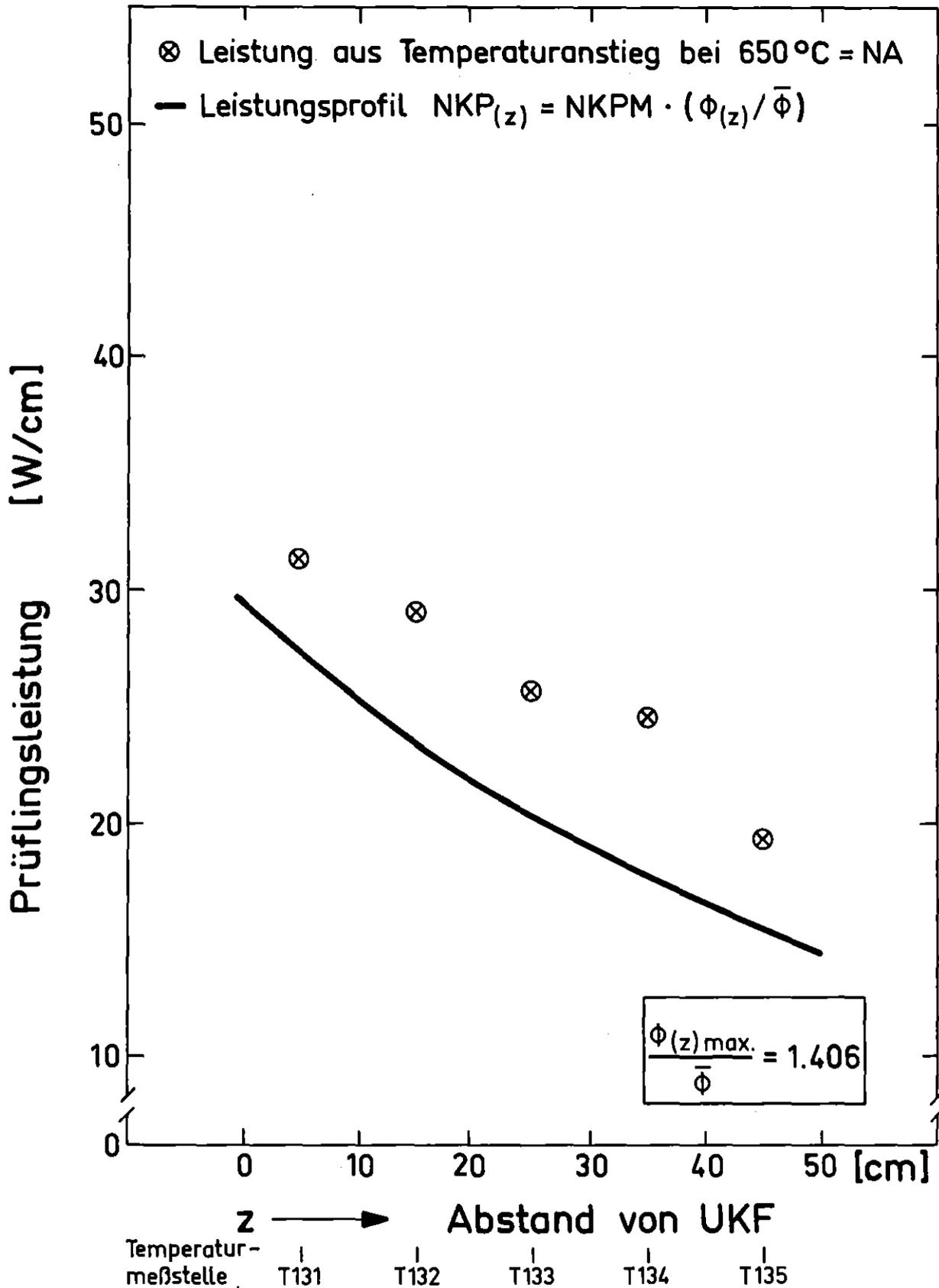
Abb.: 4

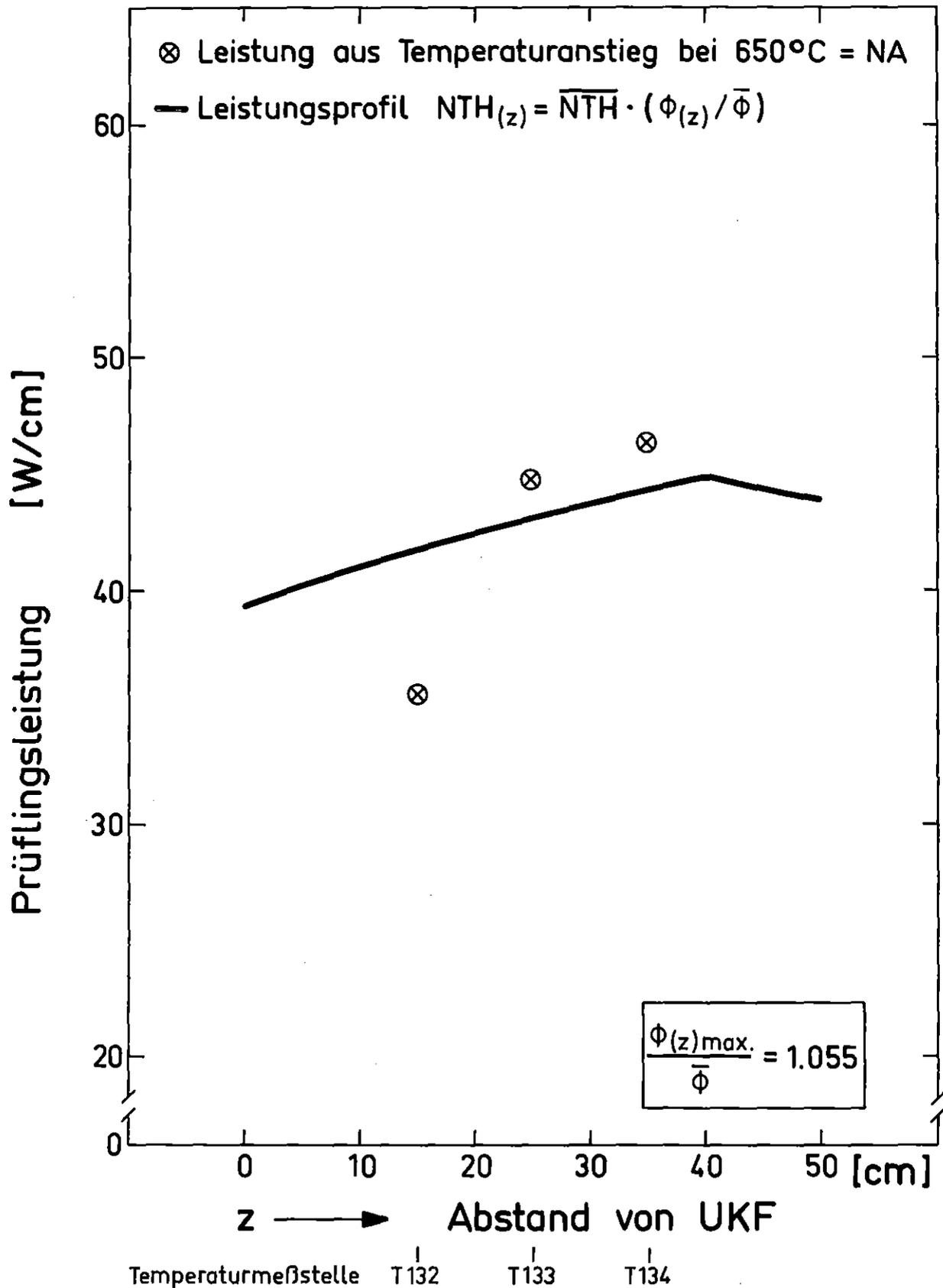


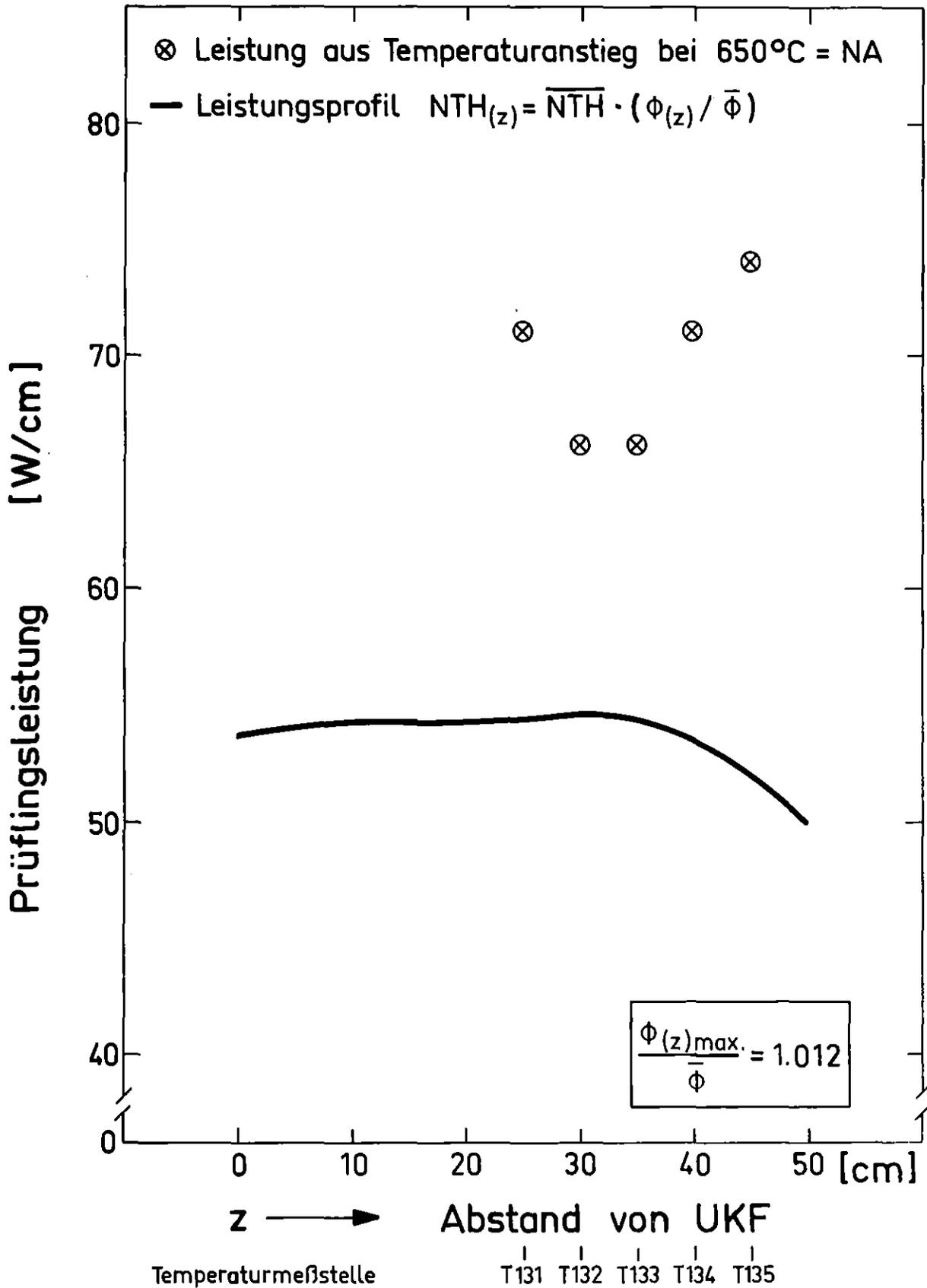
KIK  
KIT-80  
PNS4237-300

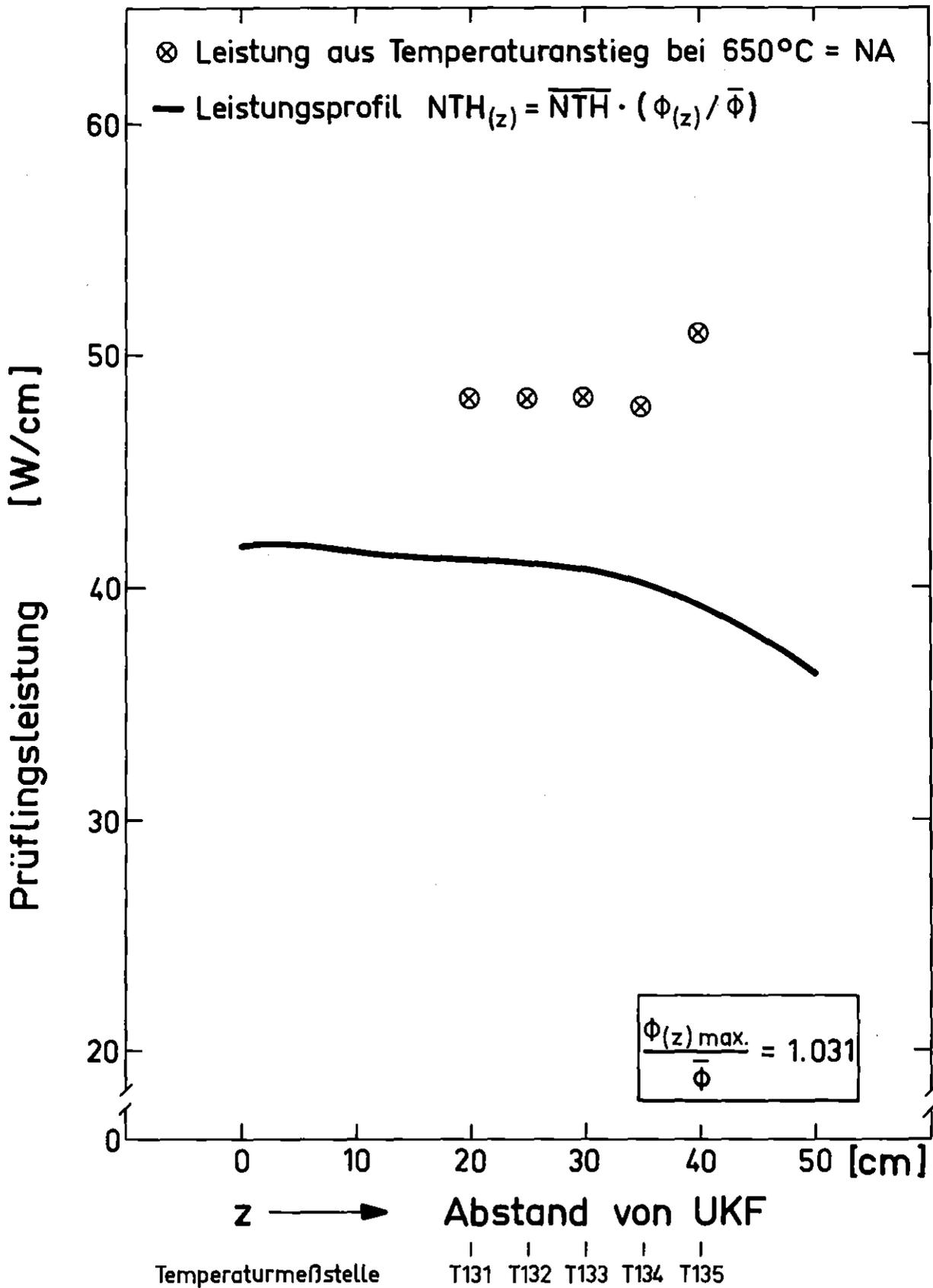
FR2 In-Pile Tests:  
Cladding Thermocouple (Schematic)

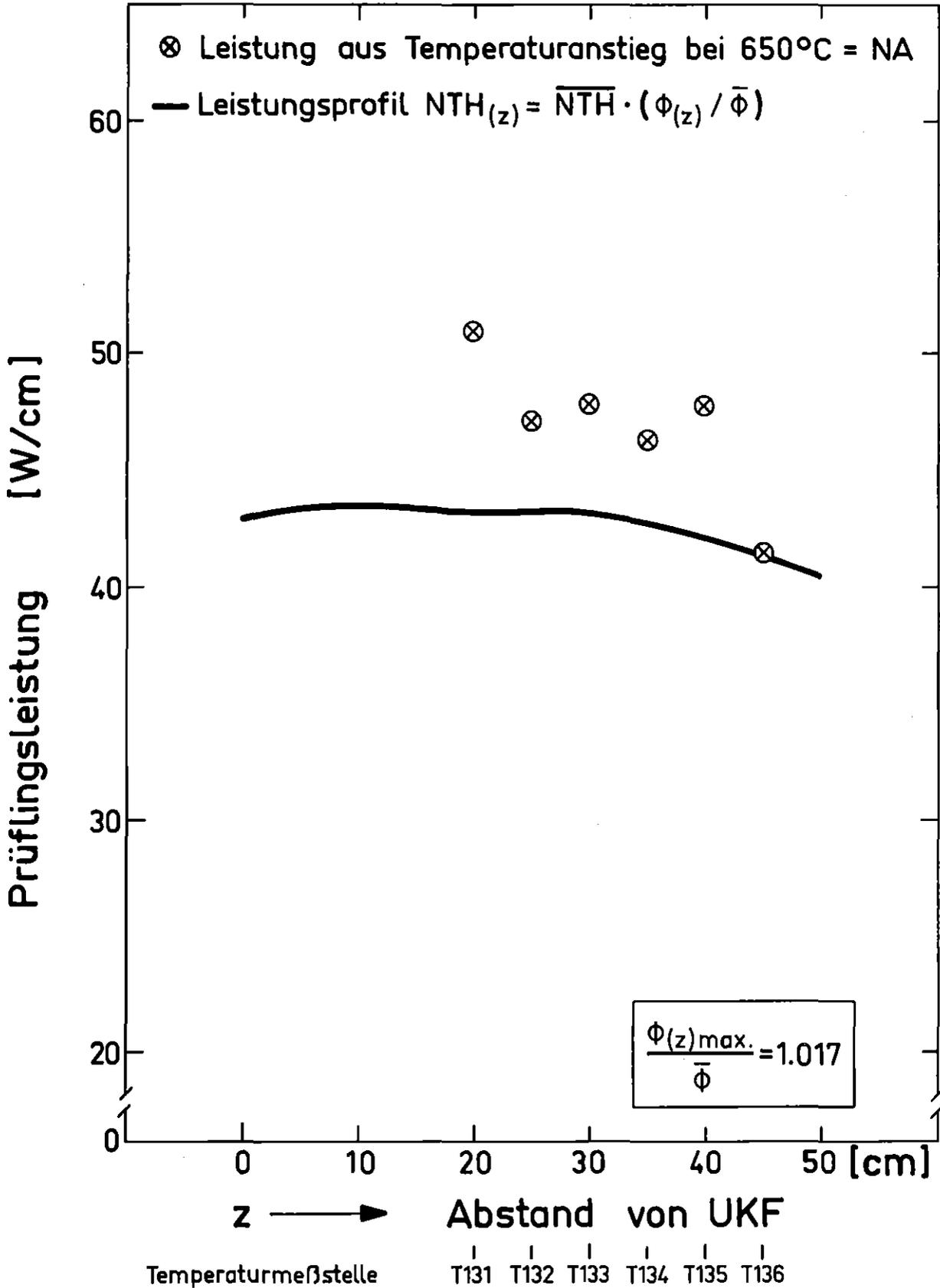
Fig.5

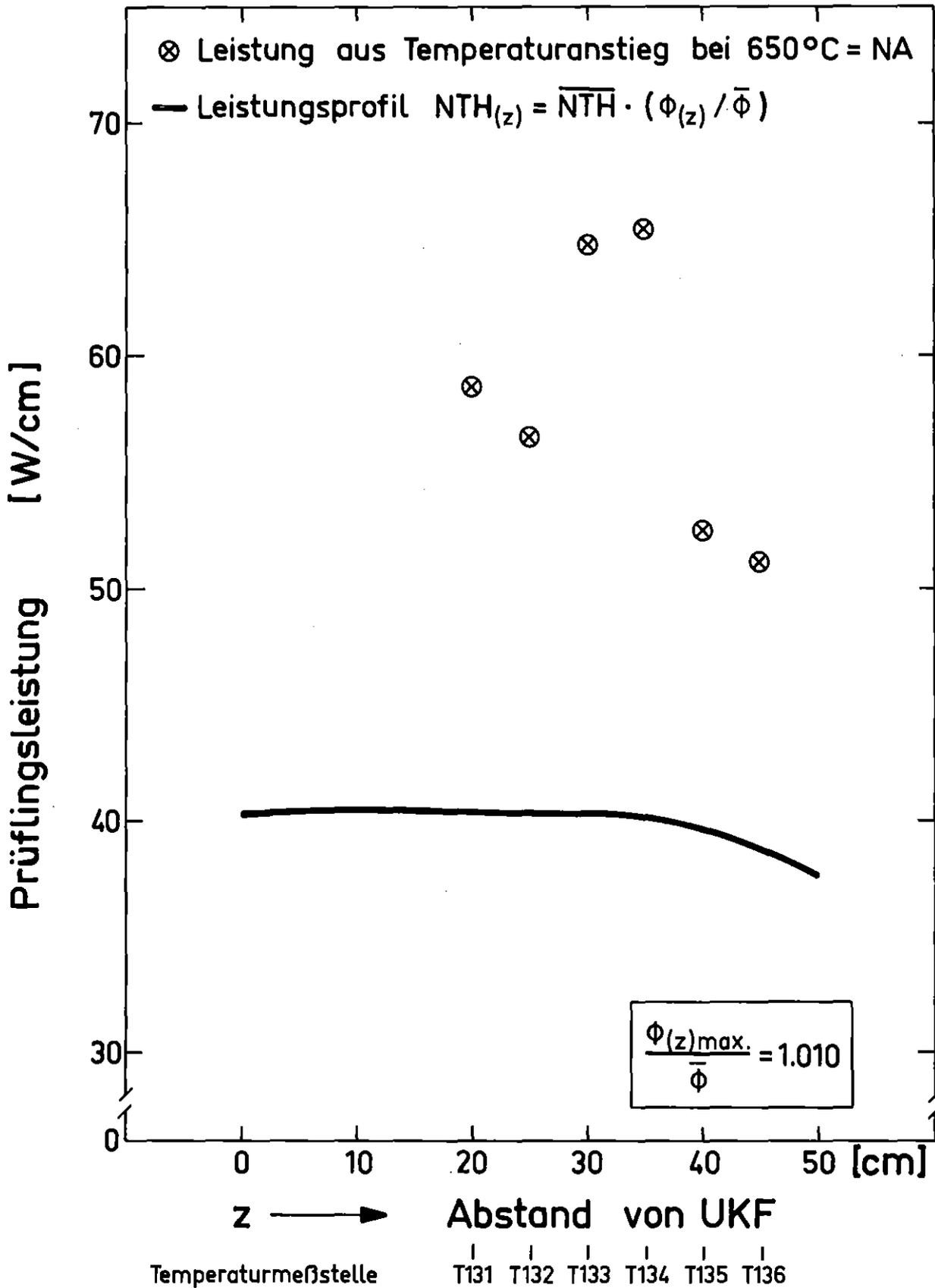










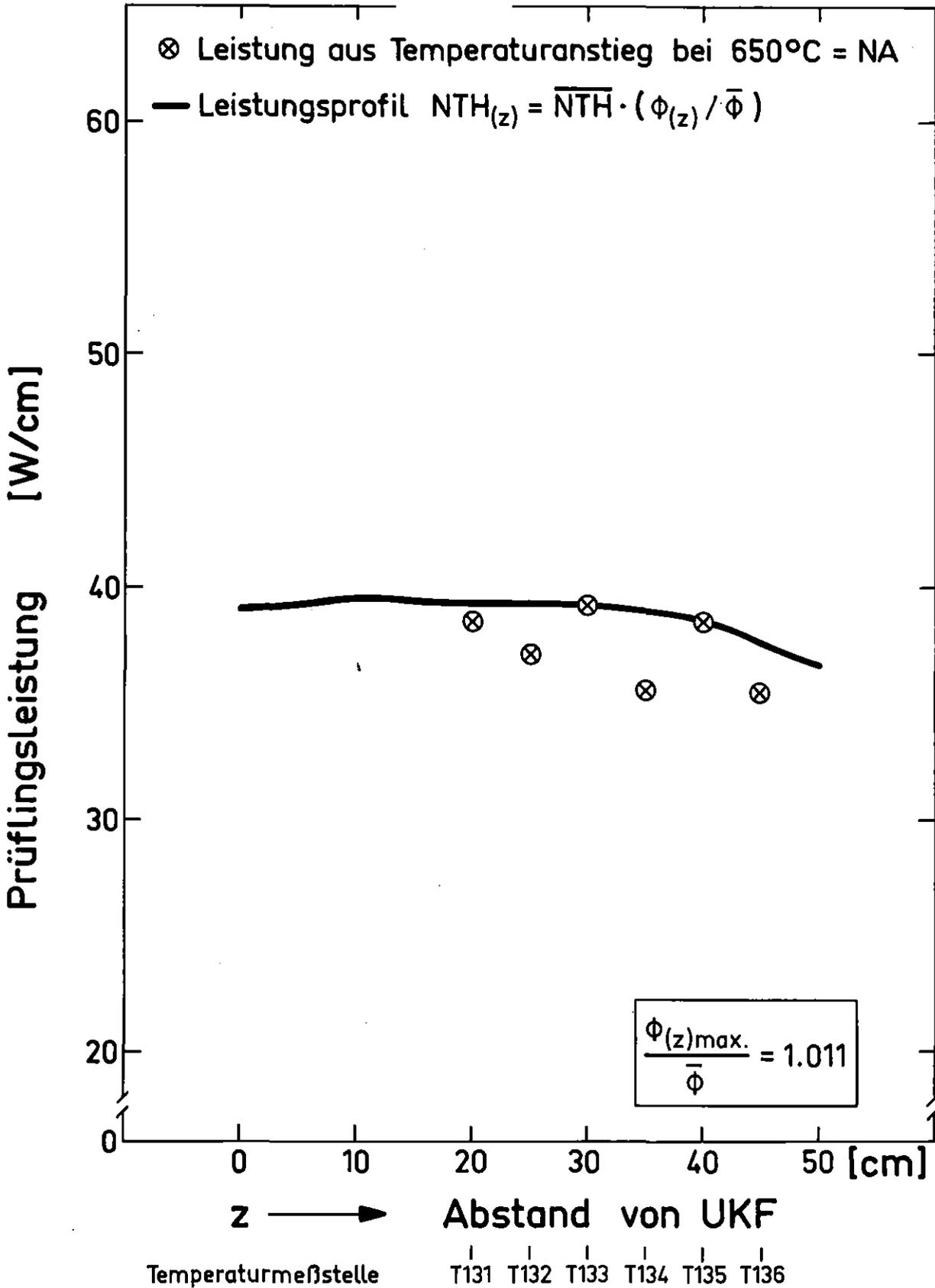


IT 80  
PNS 4237-486.6

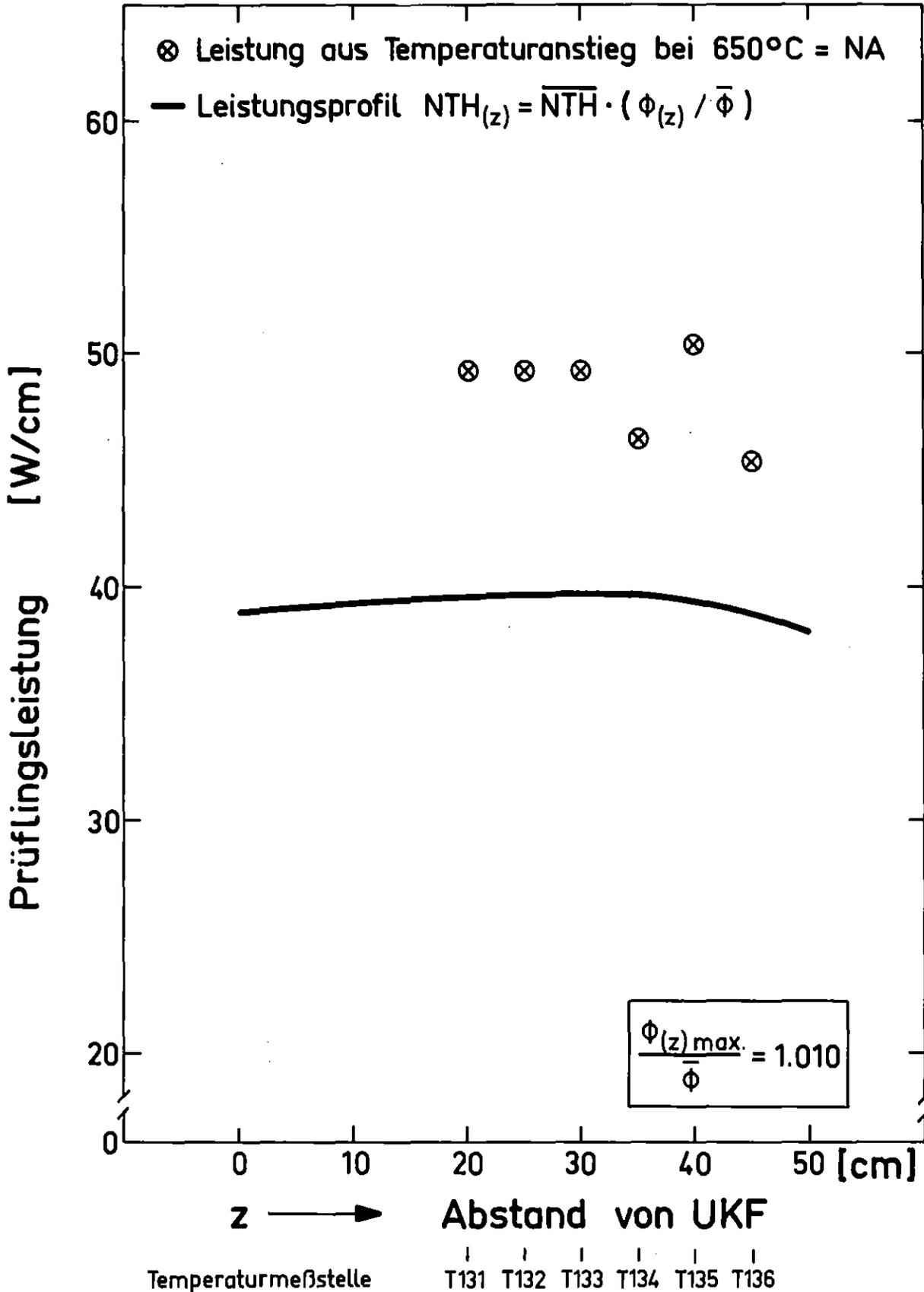
FR2 In-Pile-Versuche

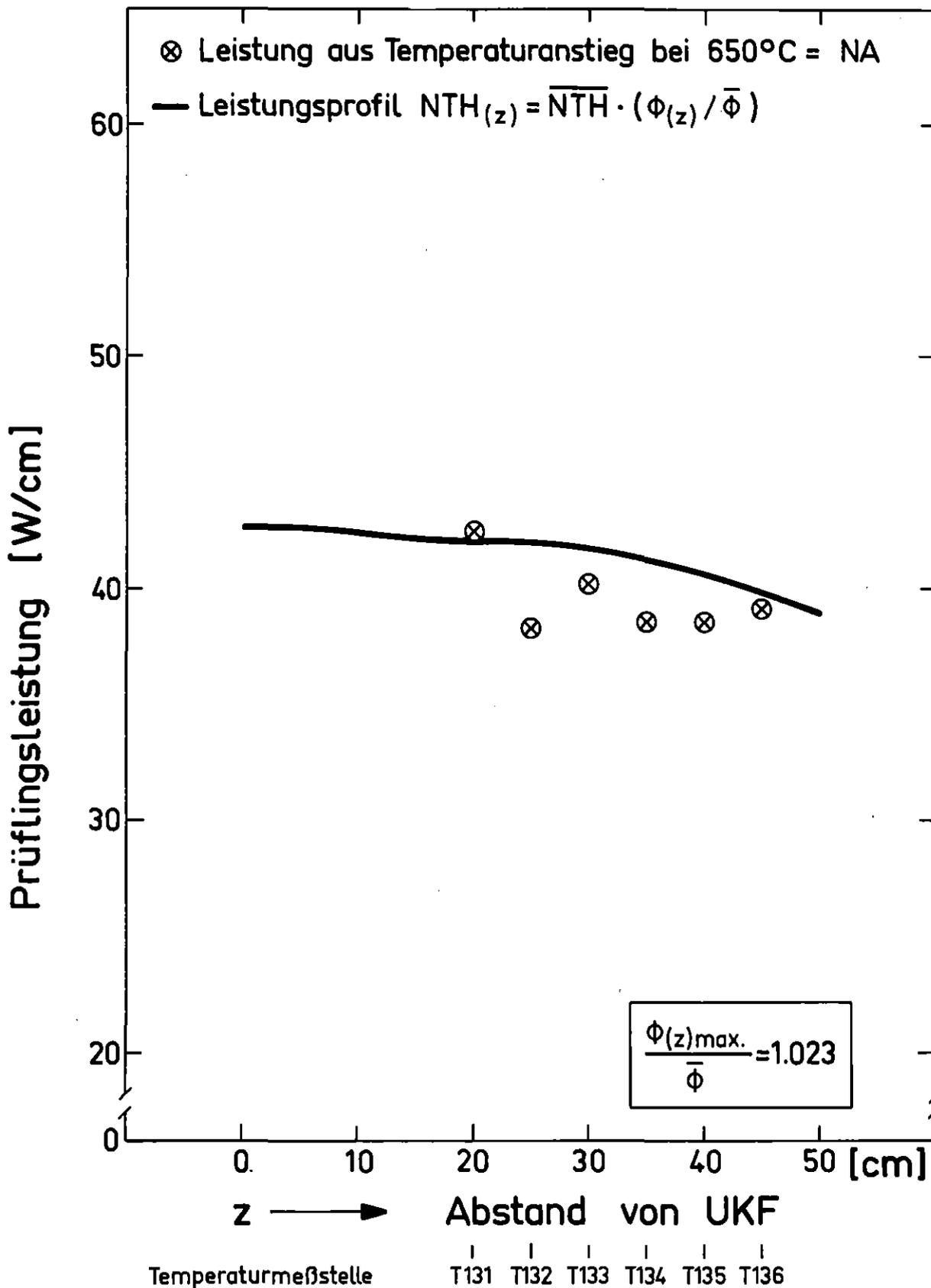
B1.1

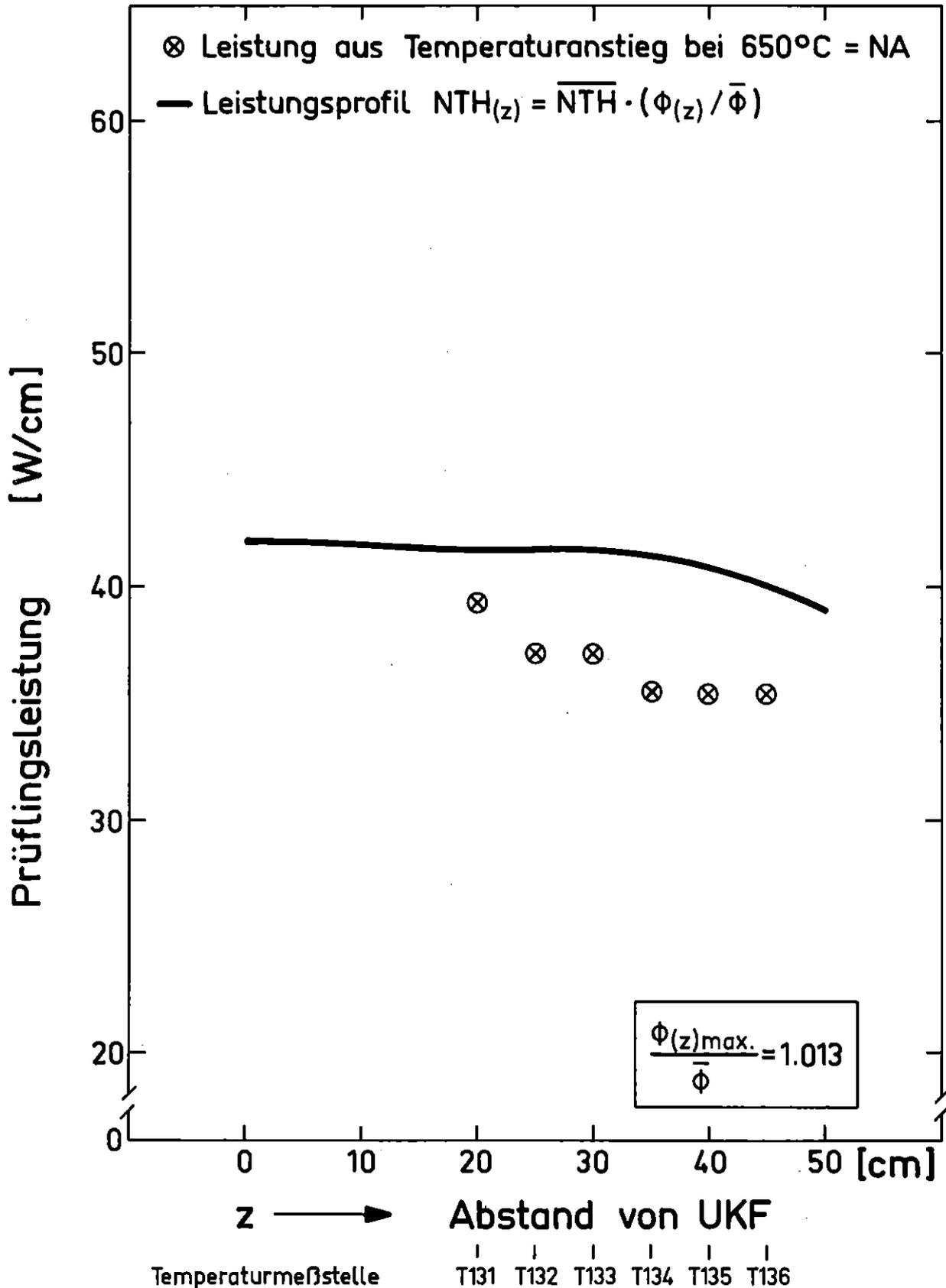
Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Abb.:6.6

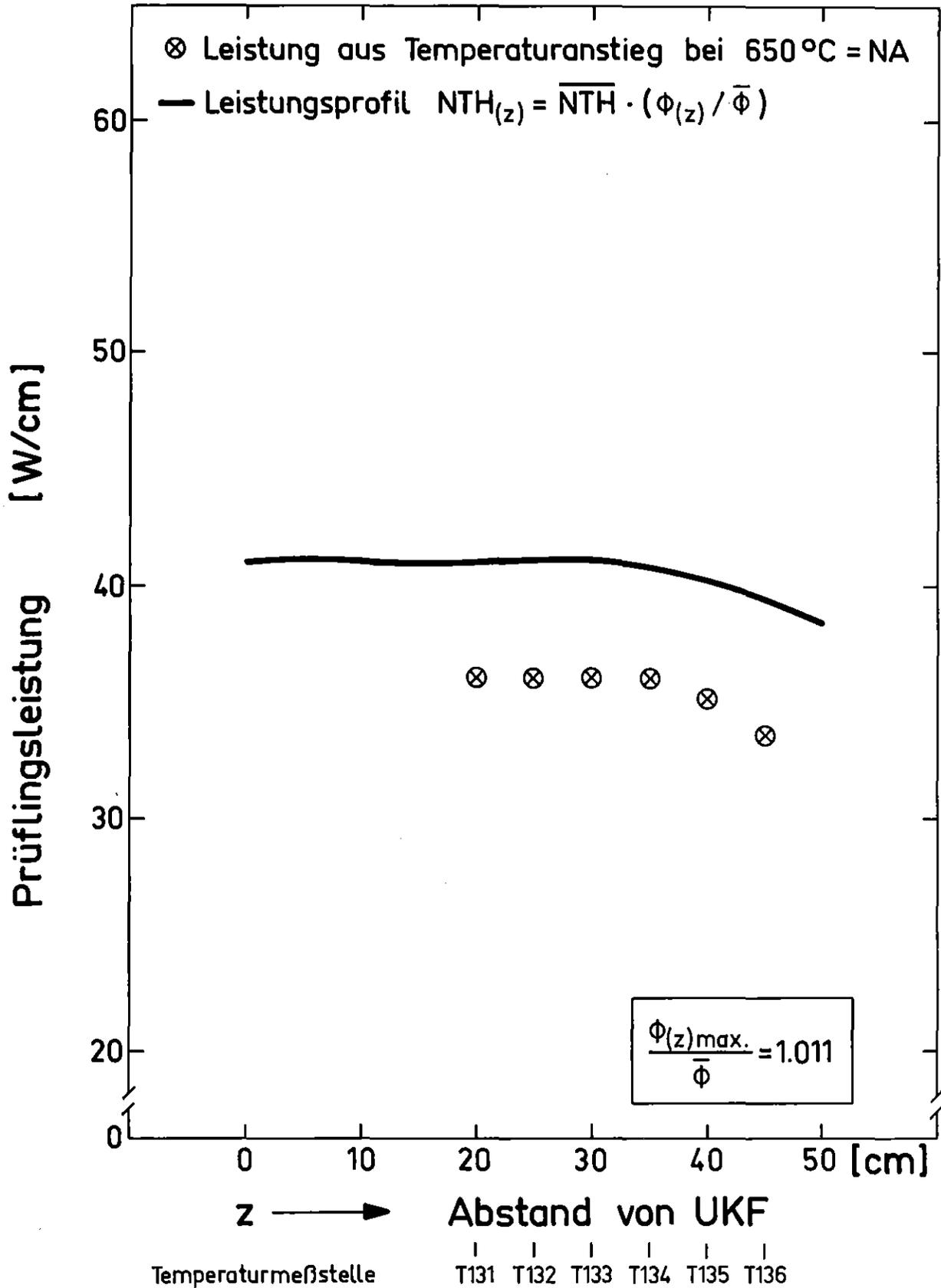


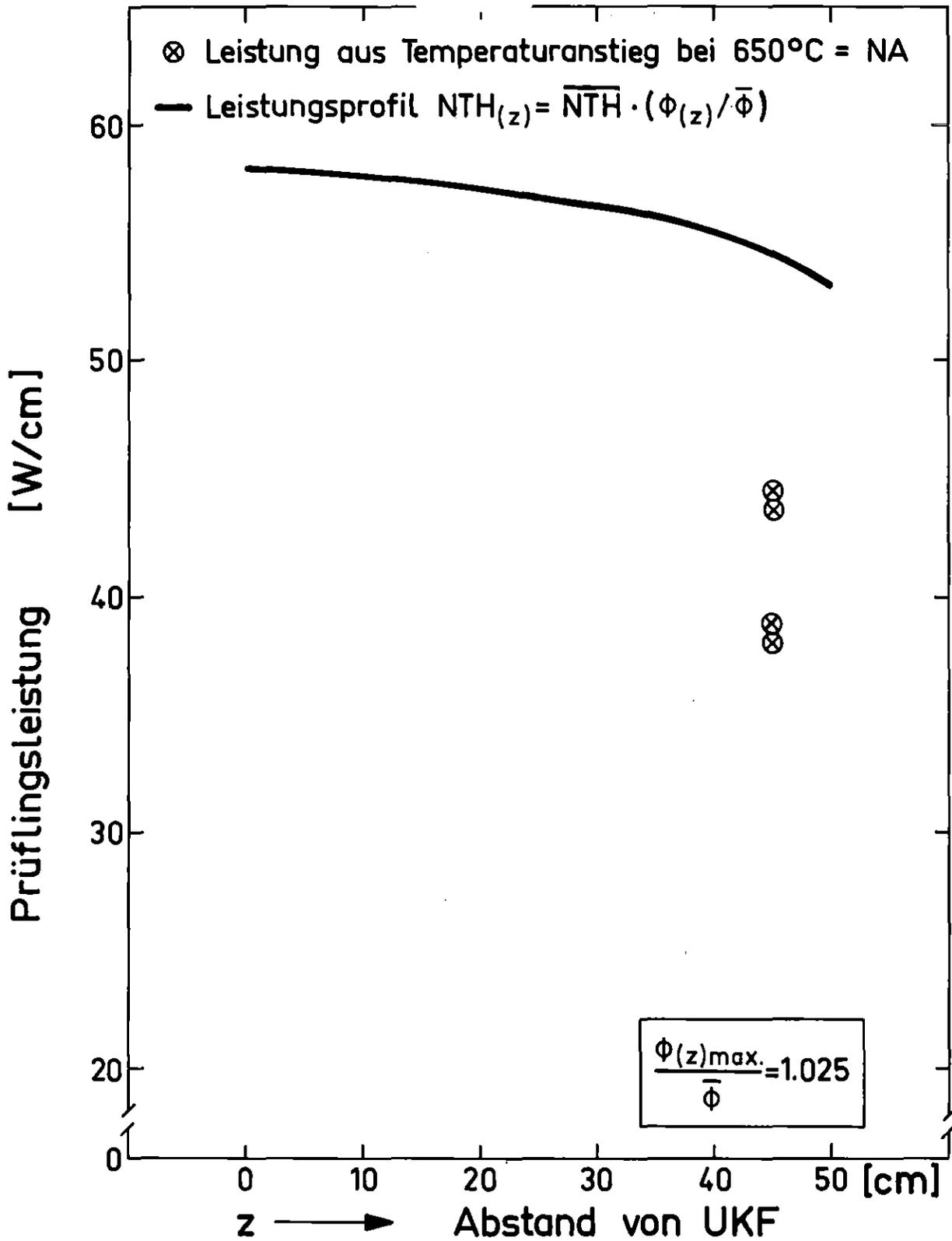
IT 80  
PNS 4237-486.7









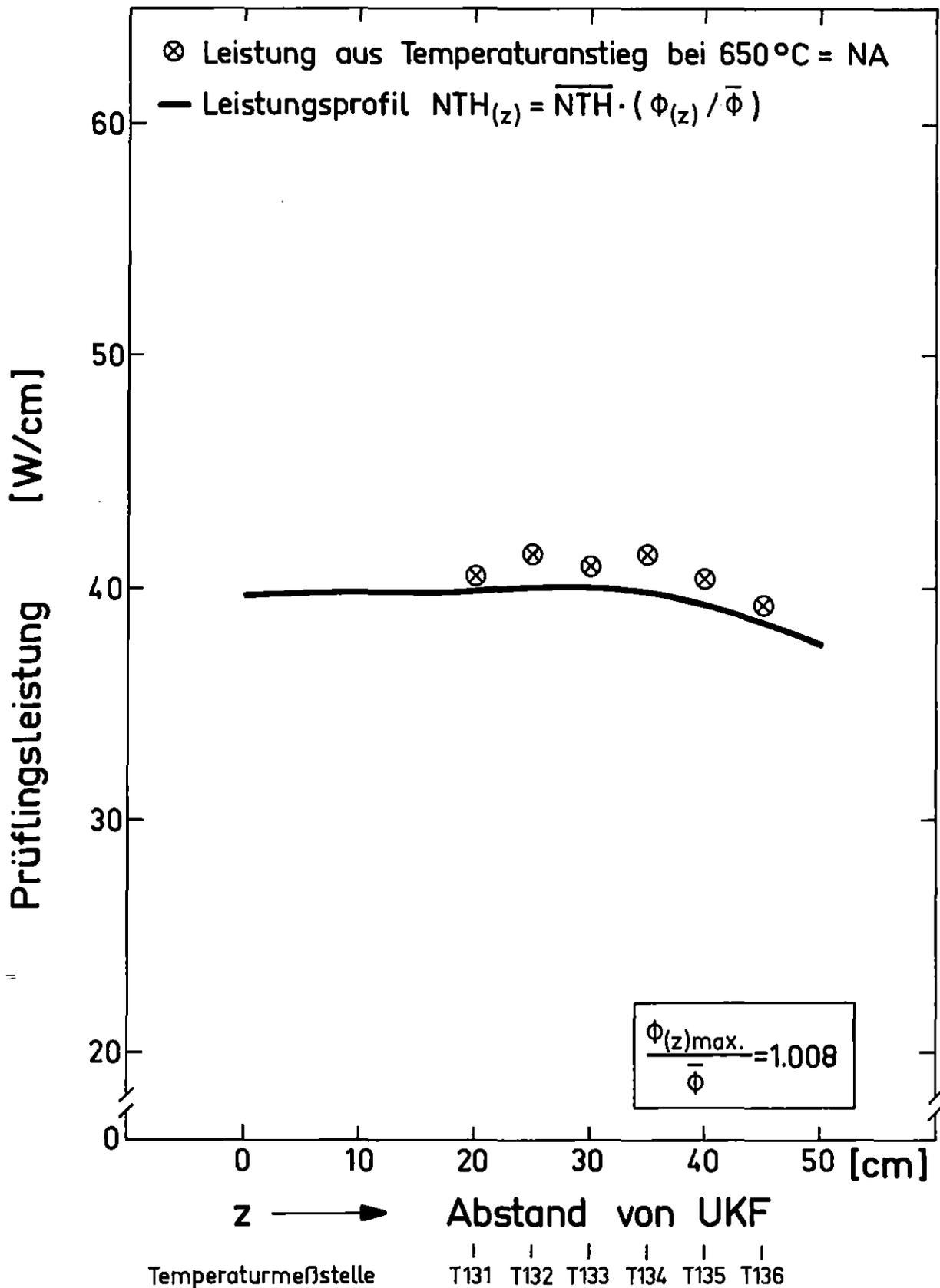


Temperaturmeßstelle

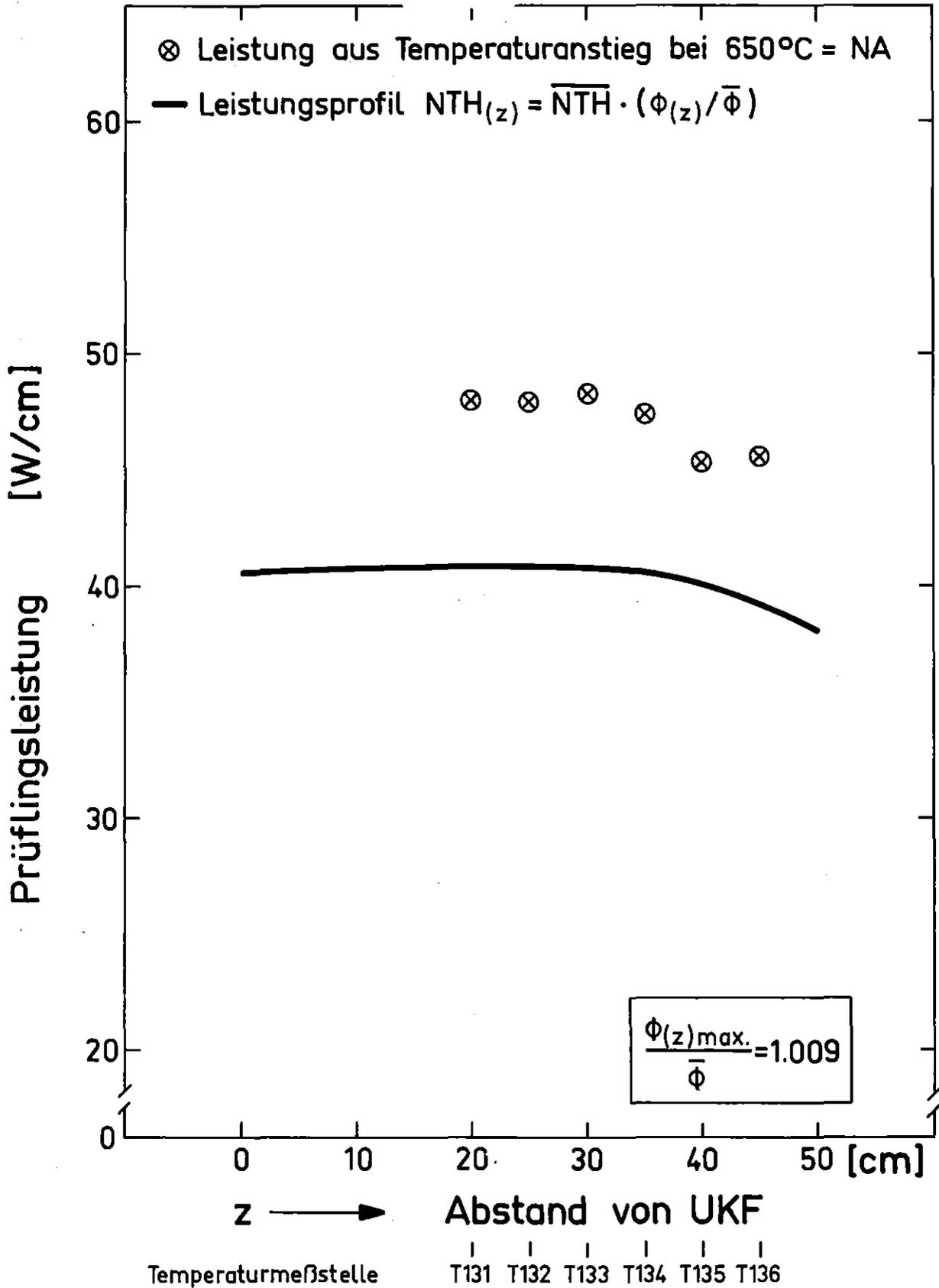
T 131  
T 132  
T 133  
T 134

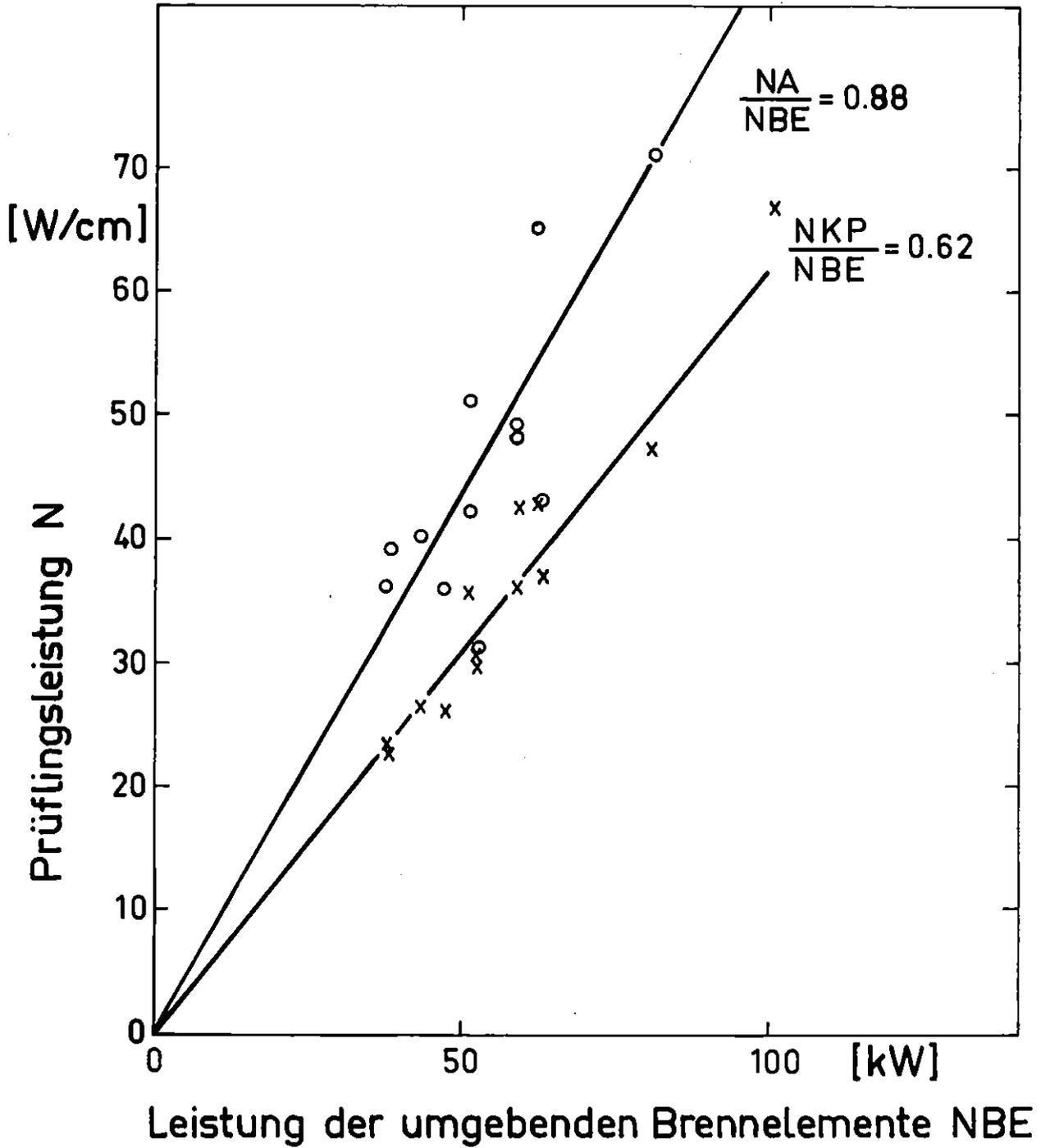


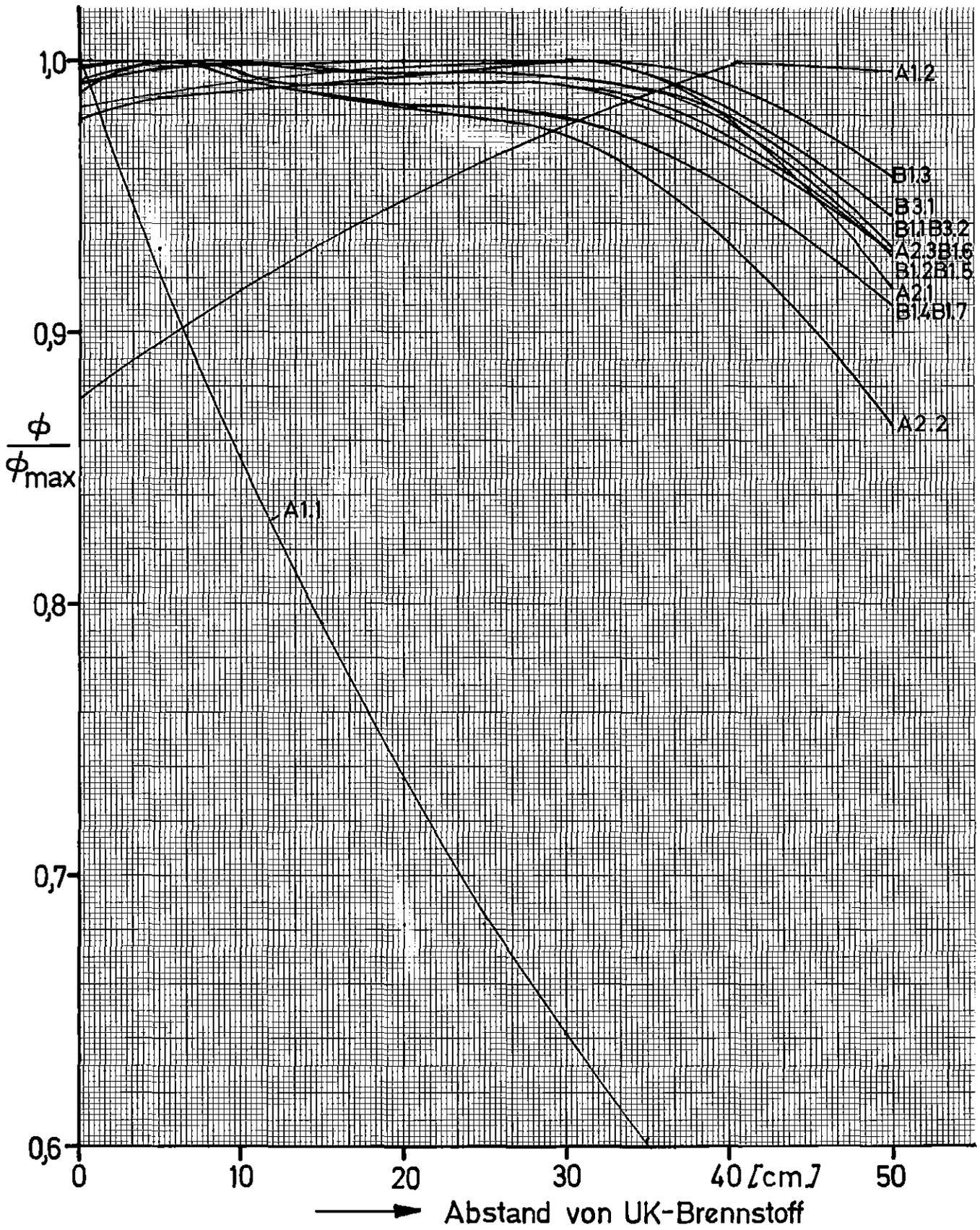
IT 80  
PNS 4237-486.30



IT 80  
PNS 4237-486.12

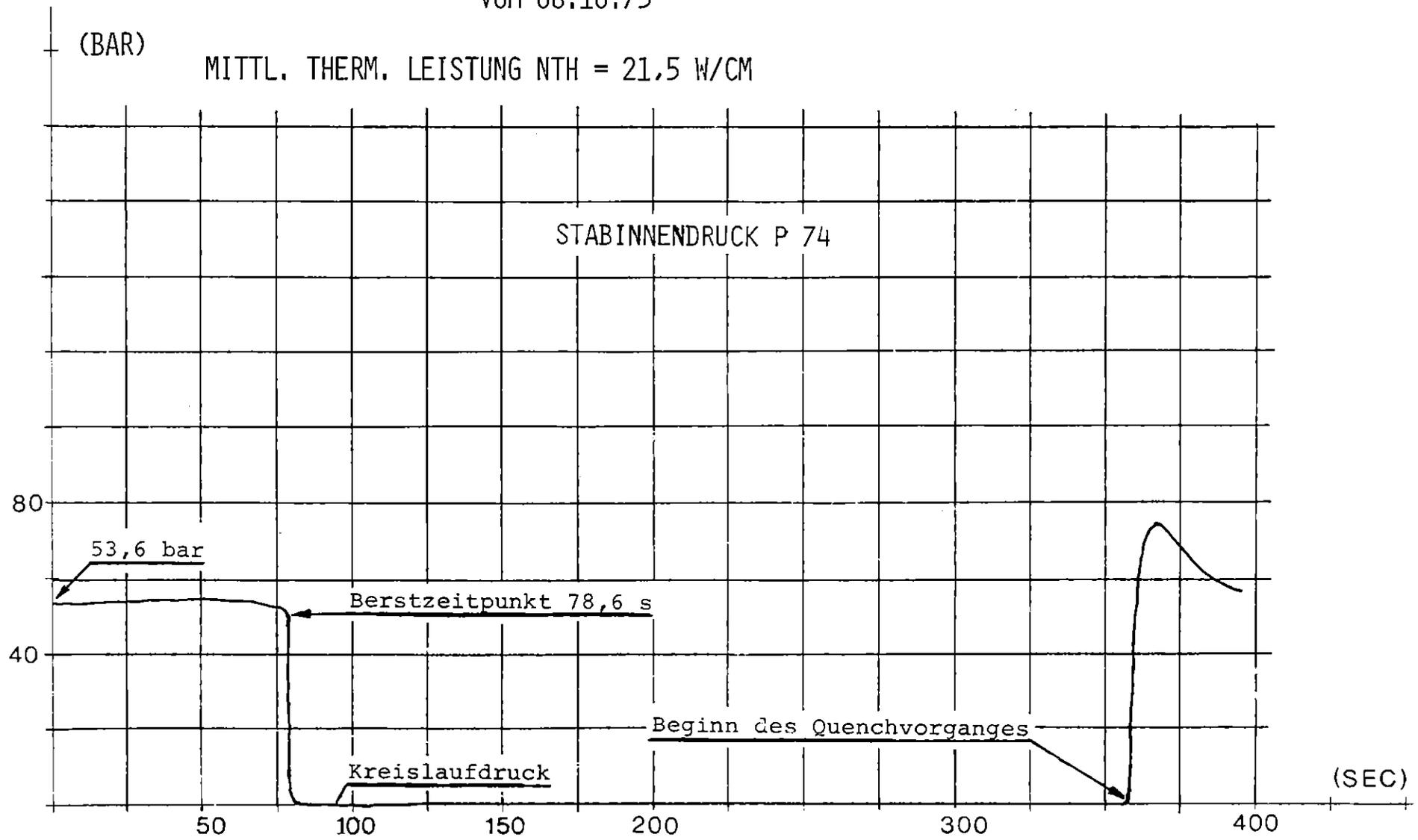






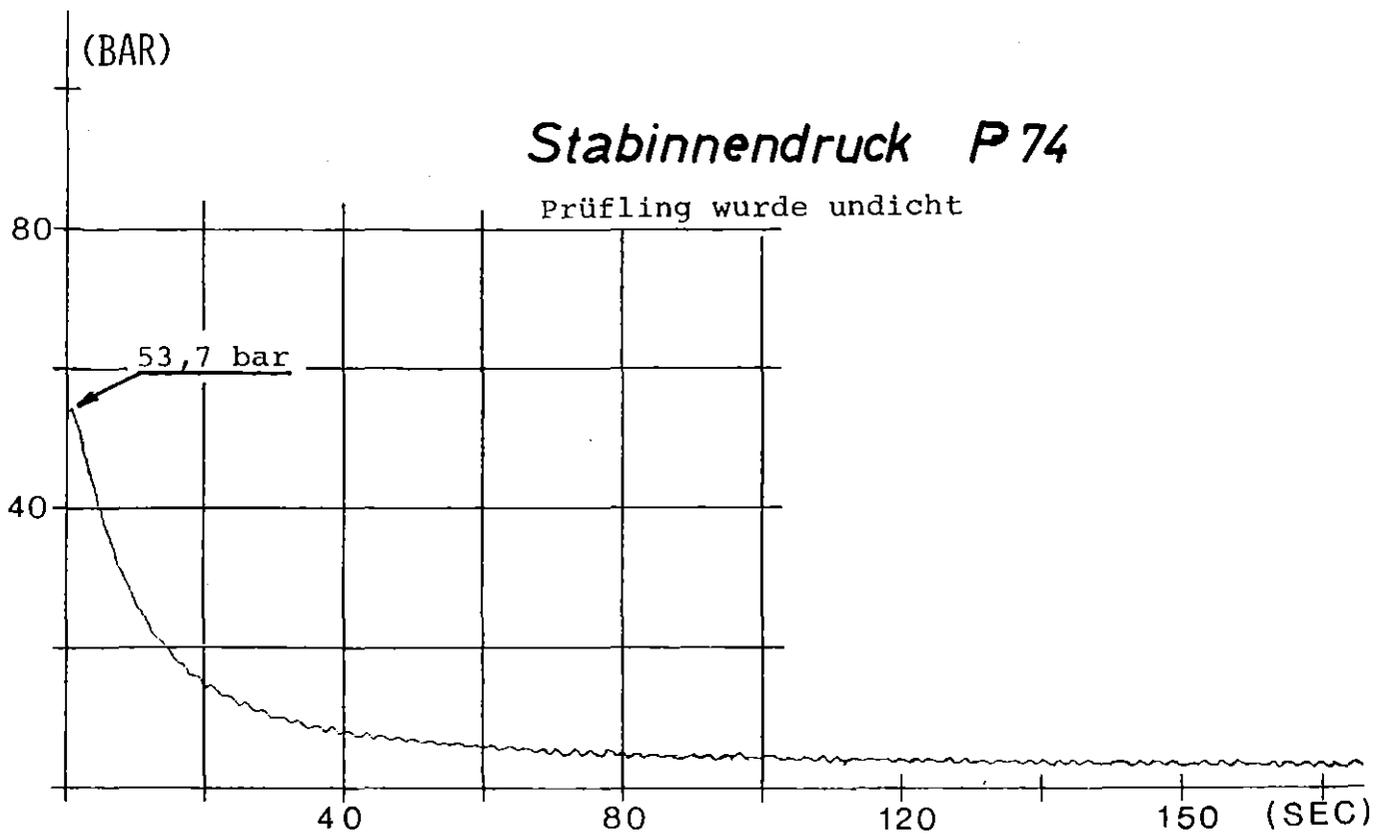
Verlauf der axialen Flußdichteprofile in den Versuchen der Serie A und B Abb.: 8

PROJEKT PNS 4237 - VERSUCH NR. MSV - HV A 1.1  
VOM 08.10.75



PROJEKT PNS 4237 - VERSUCH NR. A 1,2  
VOM 29.10.75

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH = 42,5 W/CM



DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH A 1.2

ABB. 9.2

(BARA) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. NSV-HVA2.1  
VOM 06.07.76

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= 50 W/CM

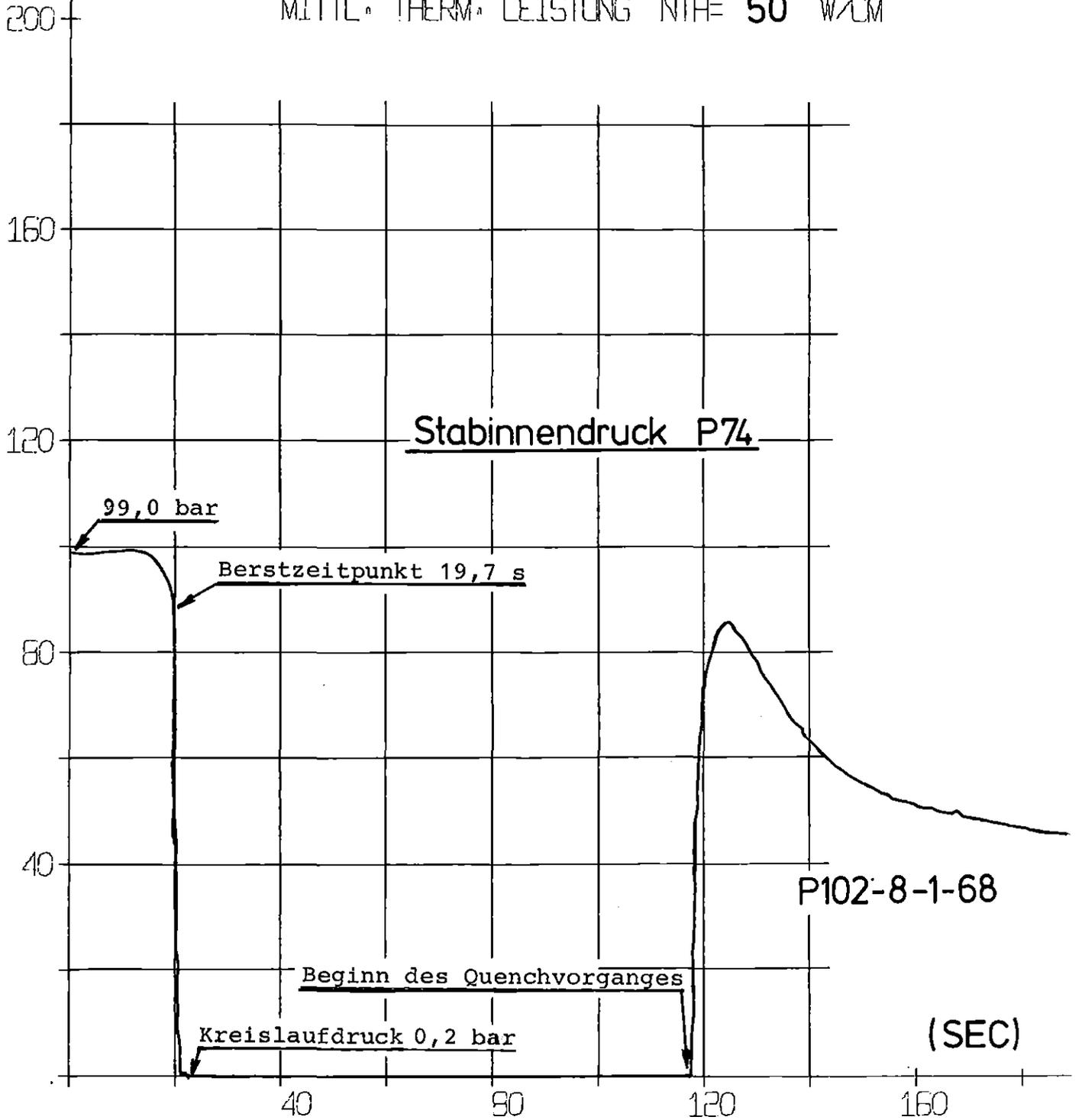
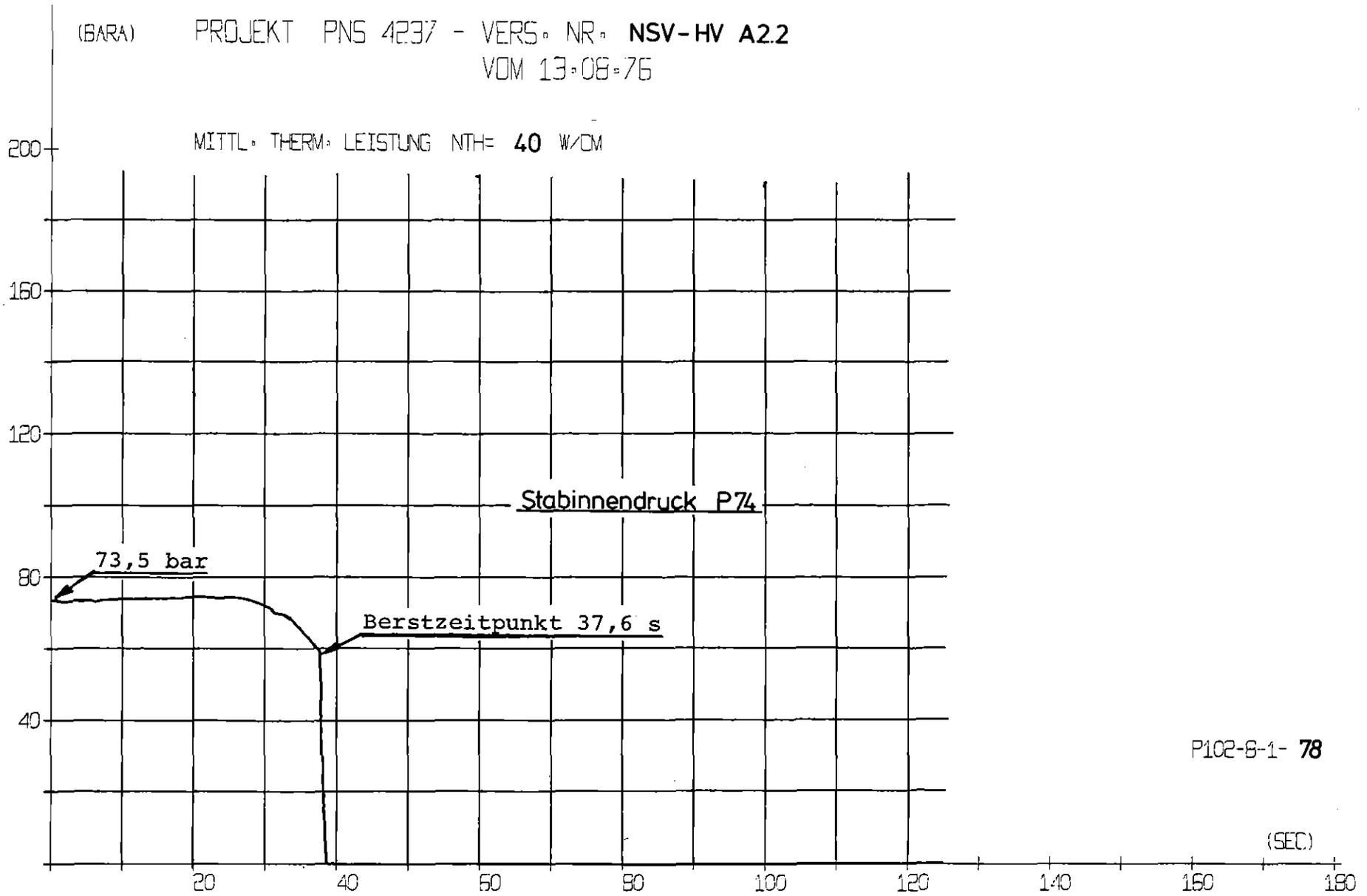


ABB.00023 06.07.76 ZEIT 11H58M54S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM  
DRUCK IM PROFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH A 2.1      ABB. 9.3

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH A 2.2 ABB. 9.4

(BARA) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. NSV-HV A2.2  
VOM 13.08.76

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= 40 W/CM



P102-8-1- 78

(SEC)

ABB.00023 13.08.76 ZEIT 10H46M01S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

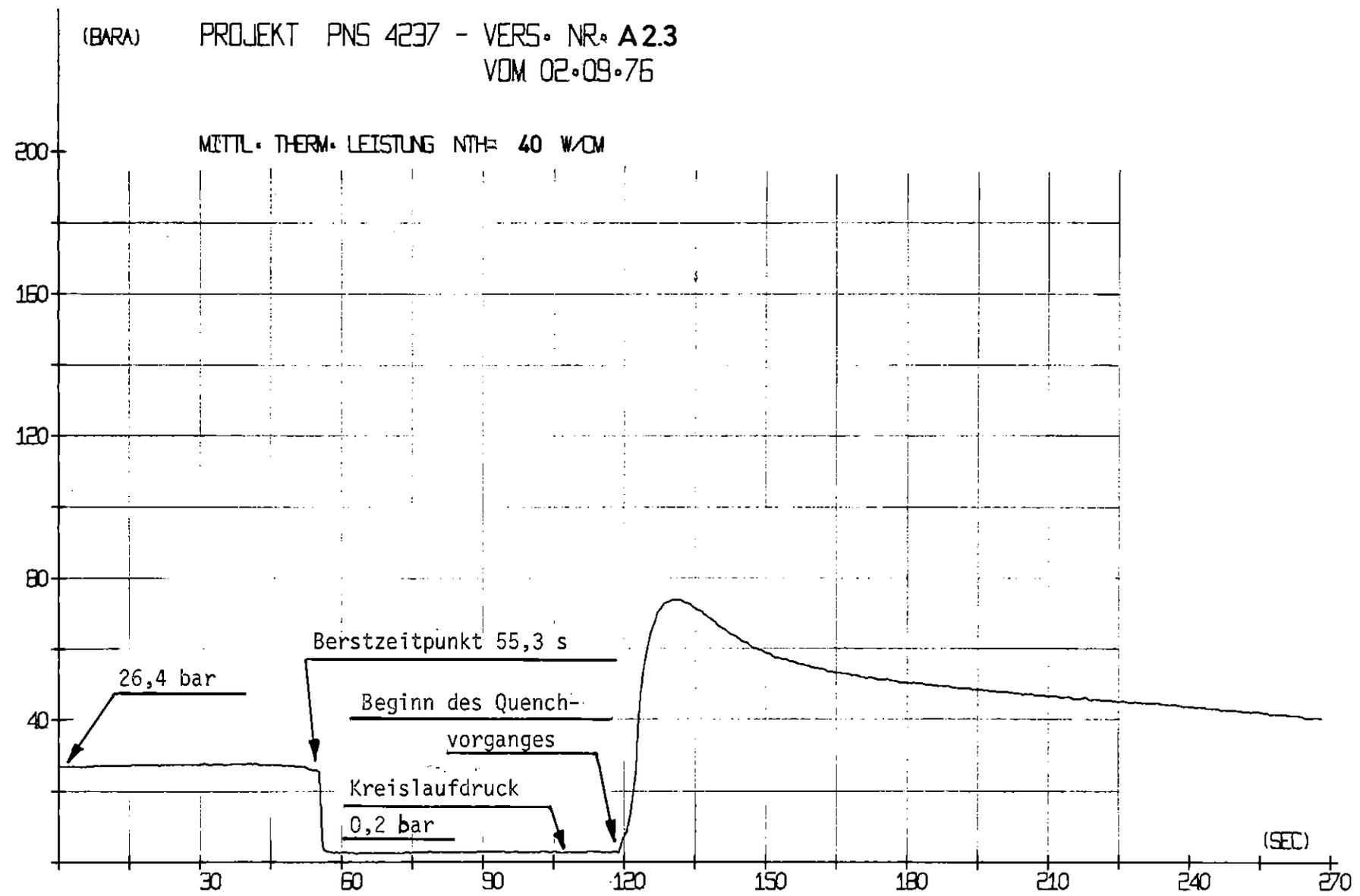


ABB.00023 02.09.76 ZEIT 12:31:54S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PROFILINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 1.1 ABB. 9.6

(BAR) PROJEKT PMS 4237 - VERS. NR. NSV - HV B1.1  
VOM 25.10.76

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= 40 W/CM

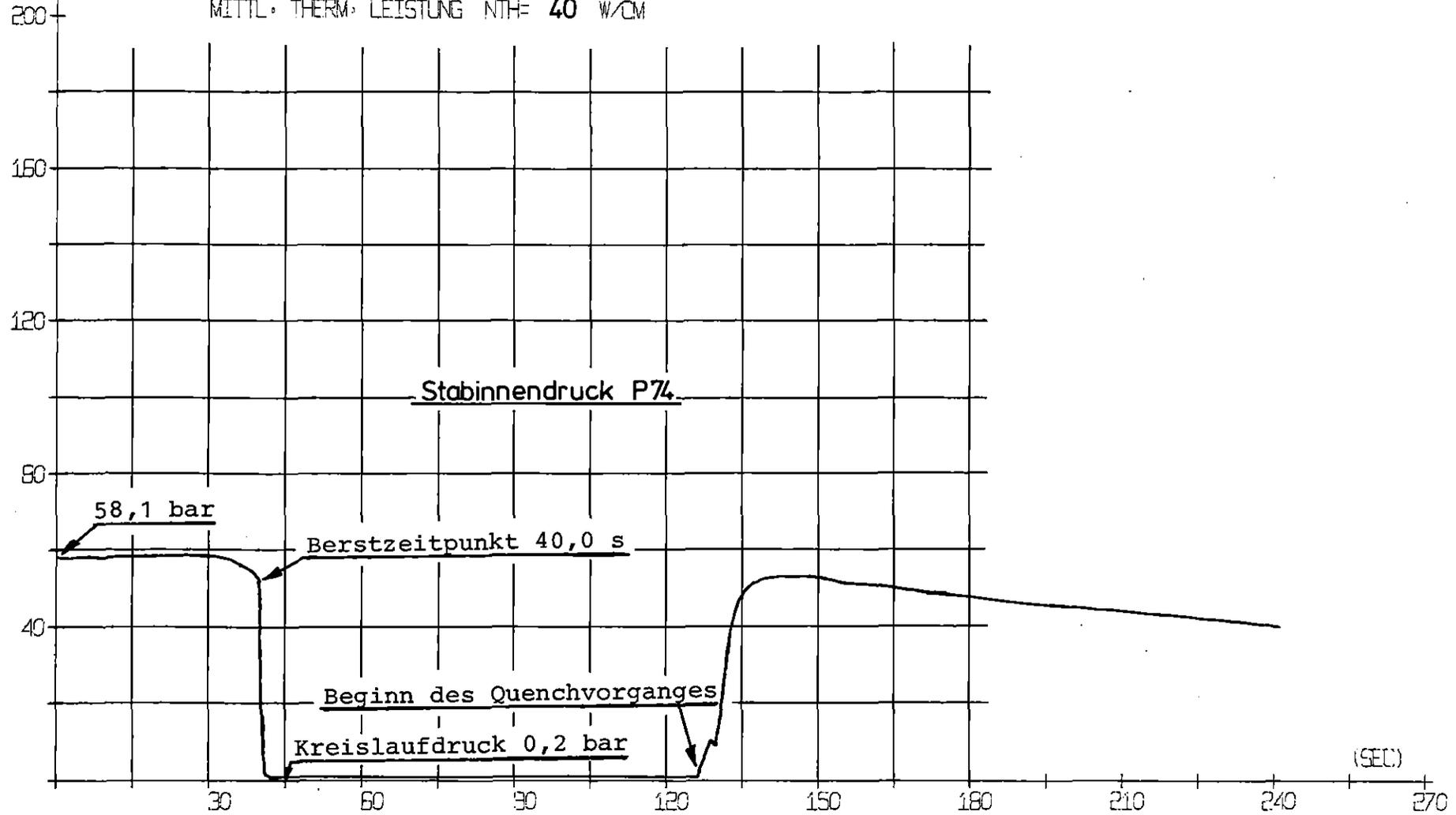


ABB-00023 25.10.76 ZEIT 13:24M57S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PROFILINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 1.2

ABB. 9.7

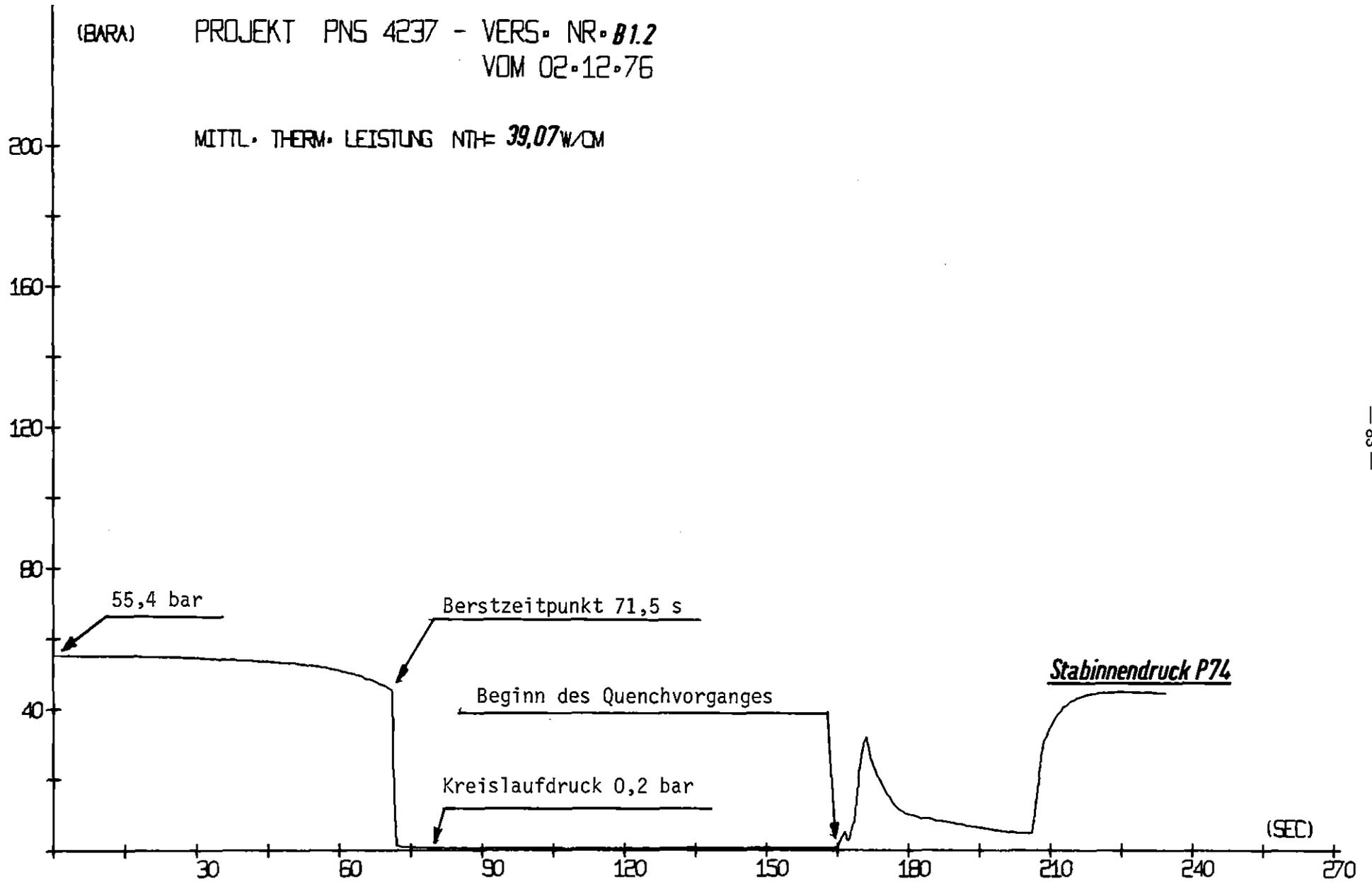


ABB.00023 02.12.76 ZEIT 11H12M12S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 1.3 ABB. 9.8

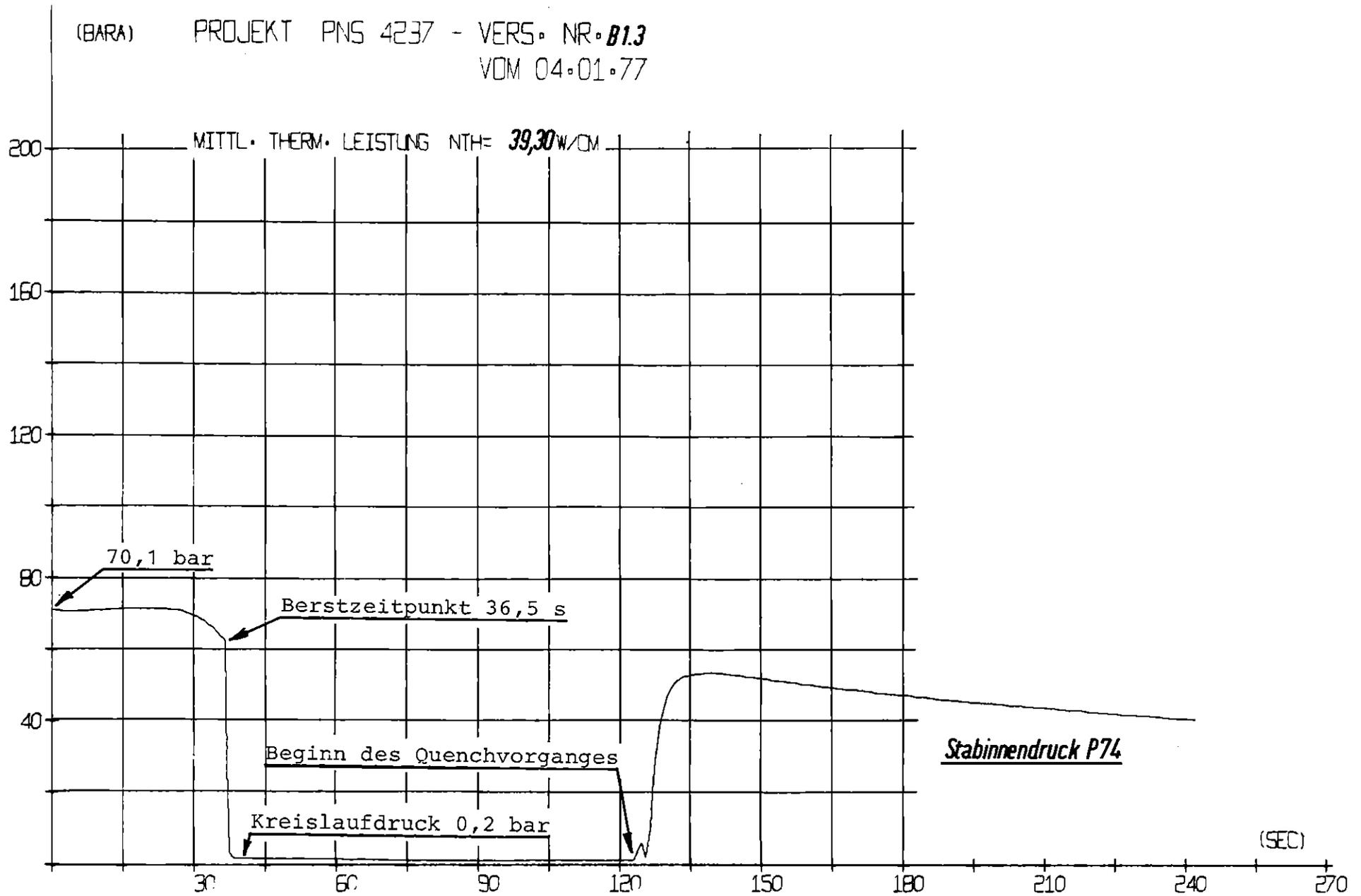


ABB.00023 04.01.77 ZEIT 16:00M025 P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

(BAR) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **81.4**  
VOM 18.01.77

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= **41,74 W/CM**

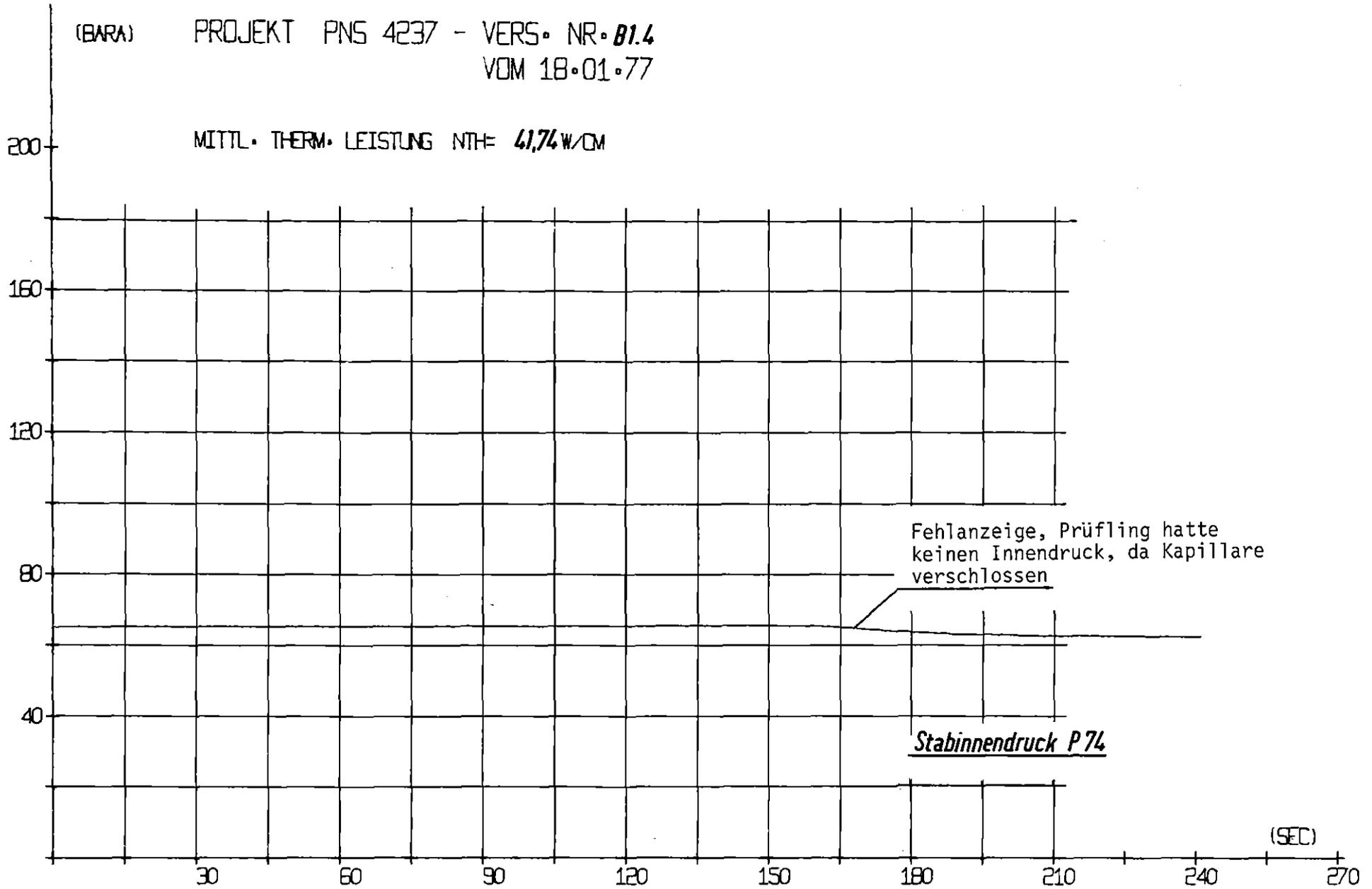


ABB.00023 18.01.77 ZEIT 15:31M14S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

(BARA) PROJEKT: PNS 4237 - VERS. NR. **B1.5**  
VOM 15.02.77

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= **41,39** W/CM

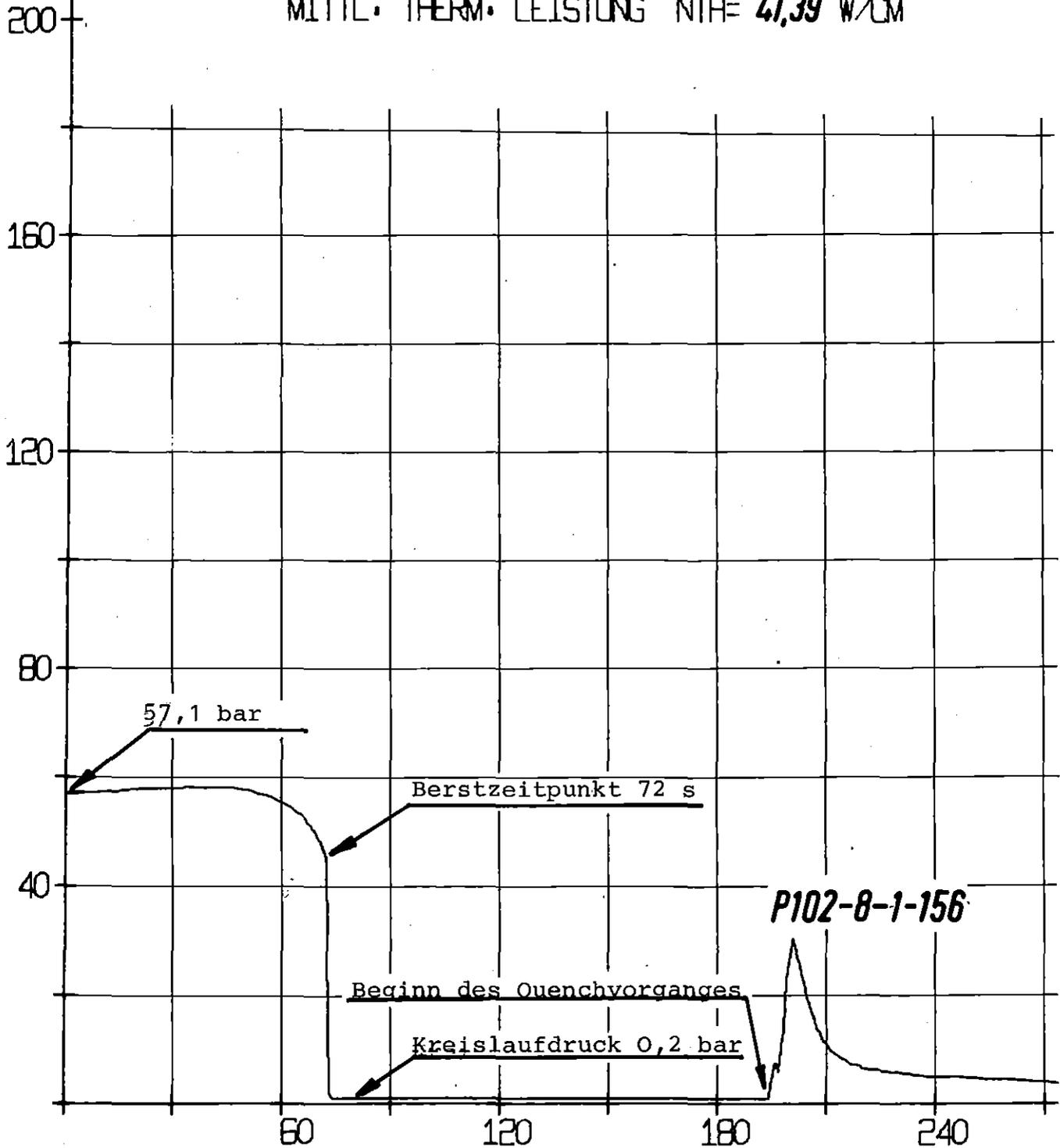


ABB.00023 15.02.77 ZEIT 11H16M41S P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 1.5

ABB. 9.10

DRUCK IM PROFILINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH B 1.6 ABB. 9.11

(BAR) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B1.6**  
VOM 04.05.77

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH=40,75 W/CM

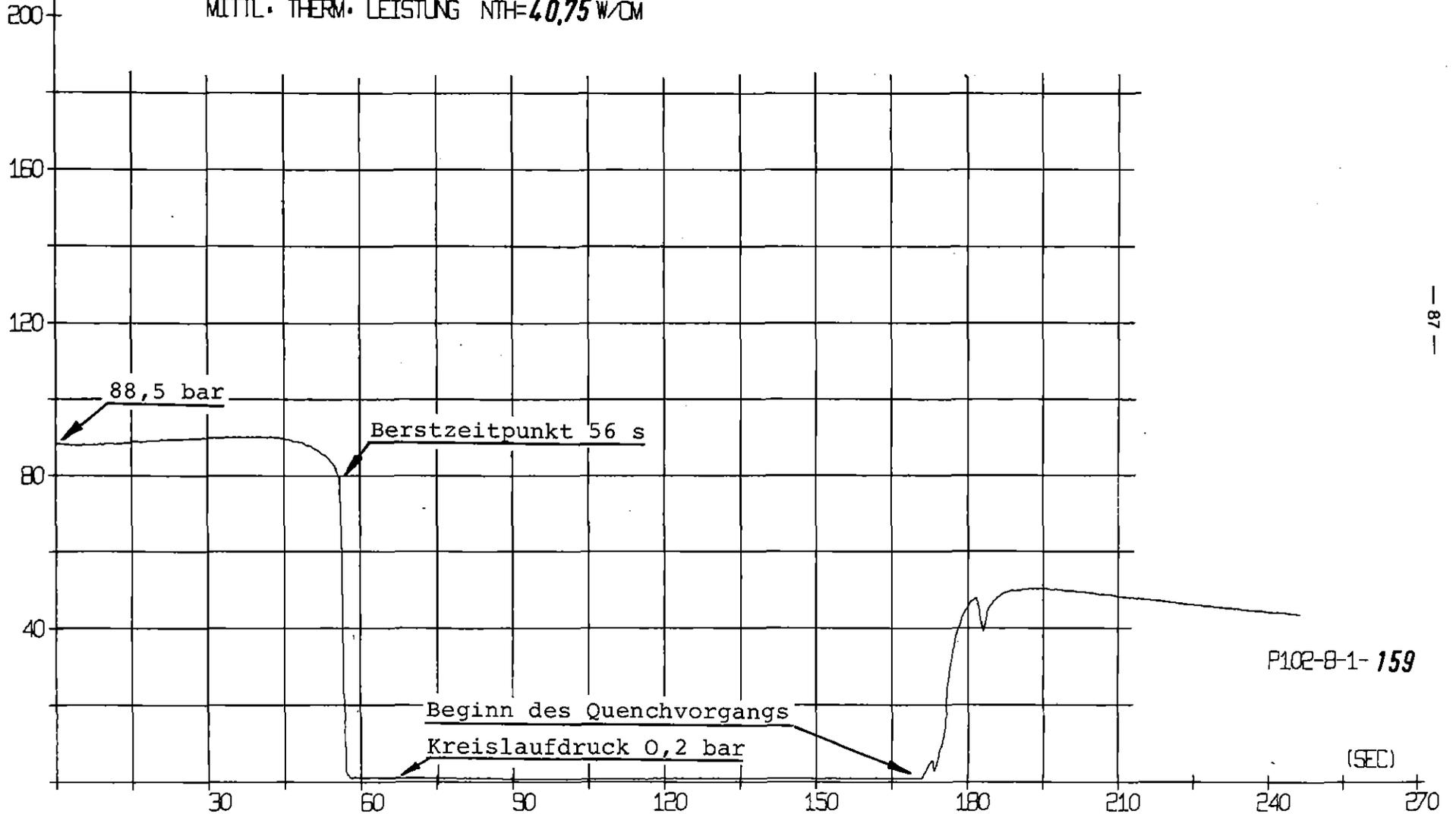


ABB.00023 04.05.77 ZEIT 11H57M15 P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 1.7 ABB. 9.12

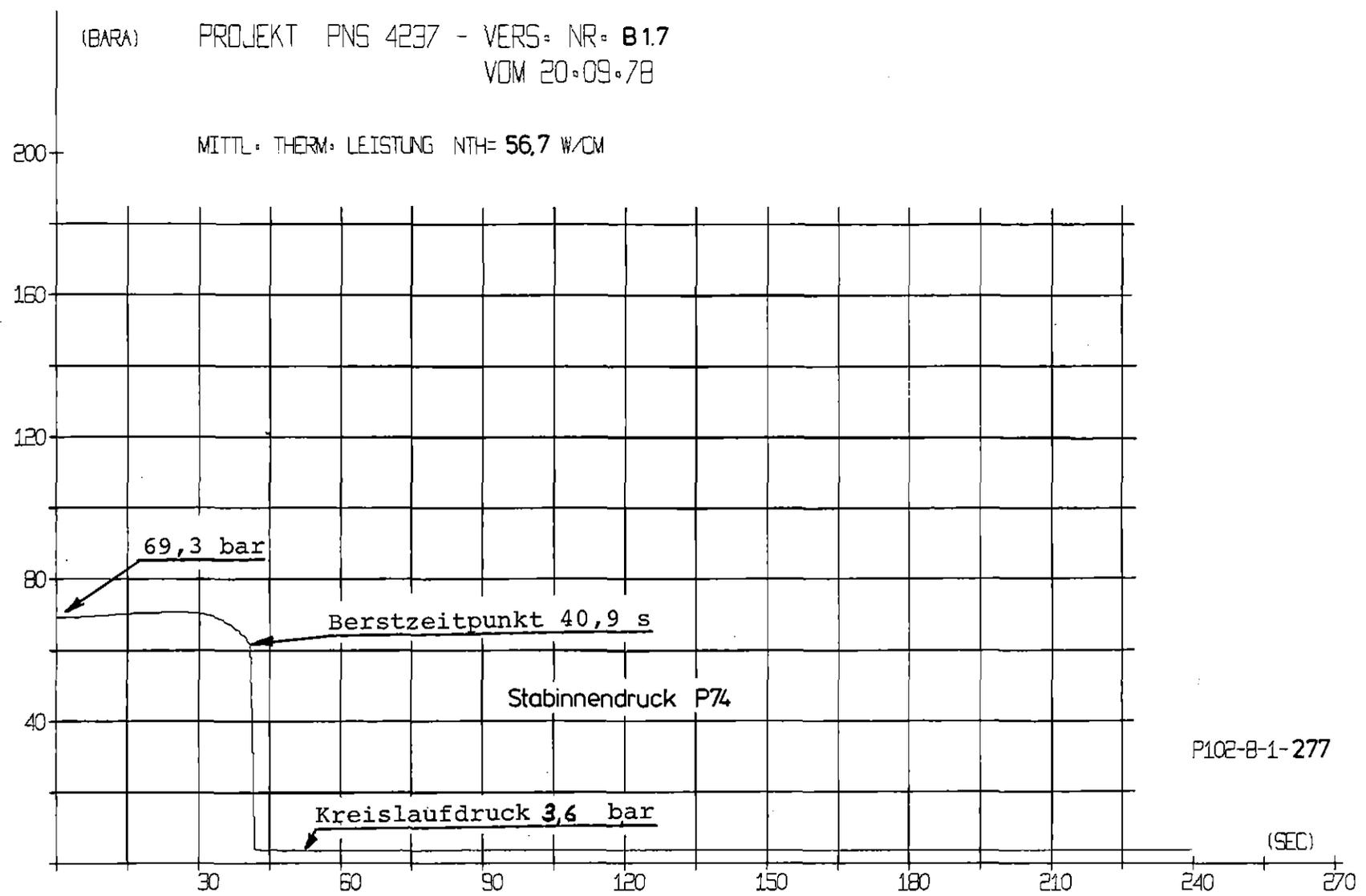


ABB.00023 20.09.78 ZEIT 13:03M105 P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PROFILINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 3.1 ABB. 9.13

(BARA) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B3.1**  
VOM 05.05.77

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= **39,70W/CM**

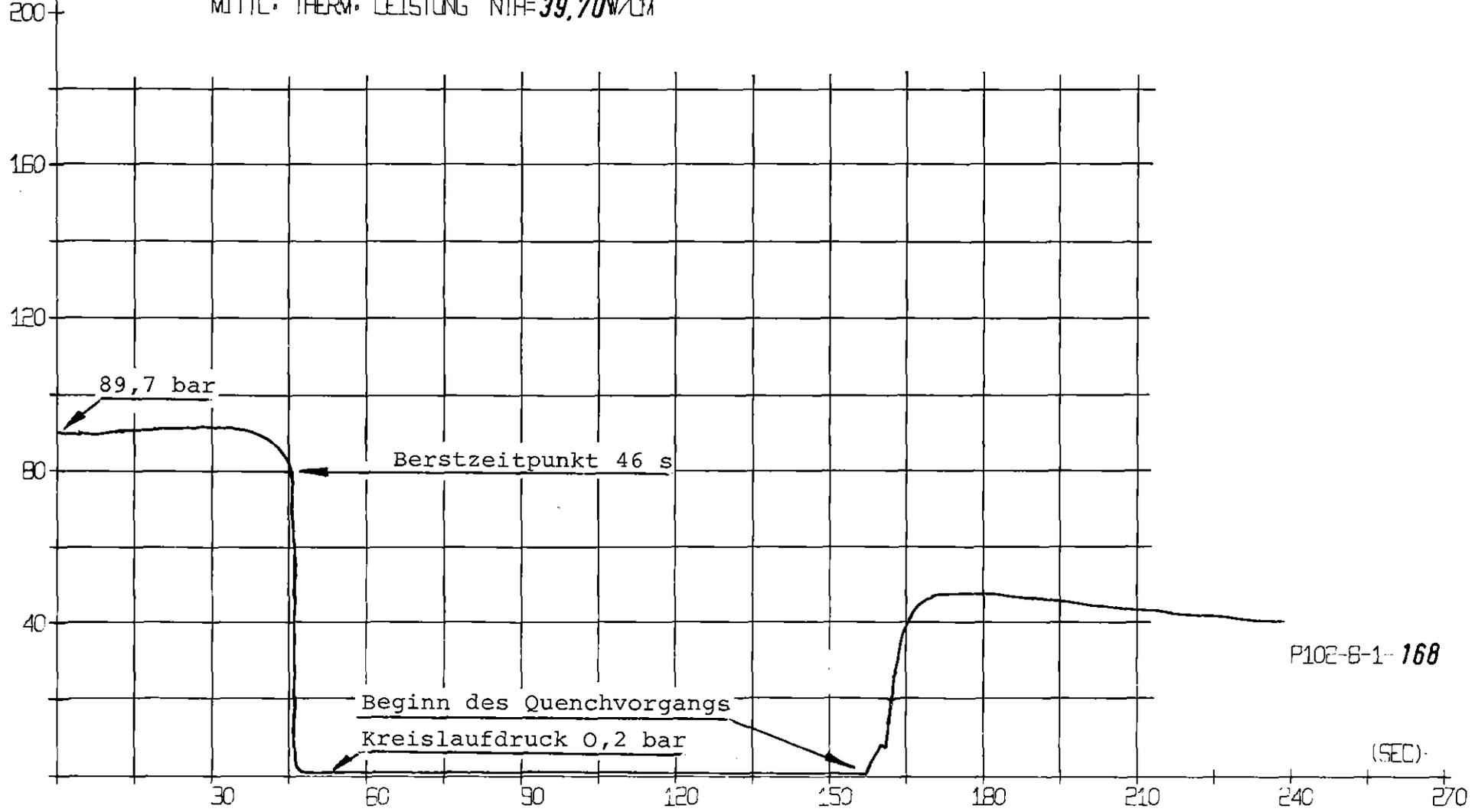


ABB.00023 05.05.77 ZEIT 11:20M34S P74 DRUCK IM PROFILINGSPLENUM

DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH B 3.2

ABB. 9.14

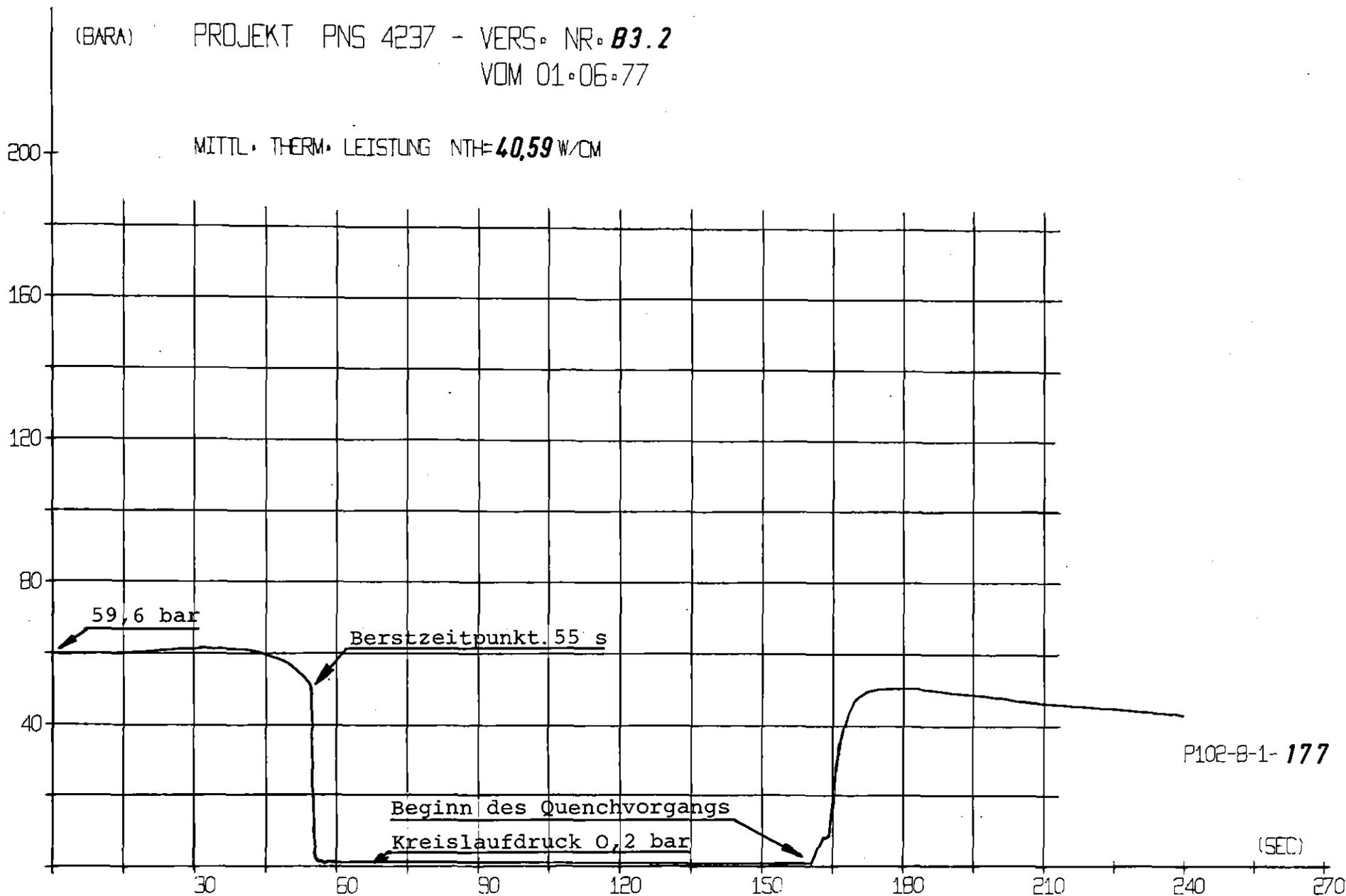
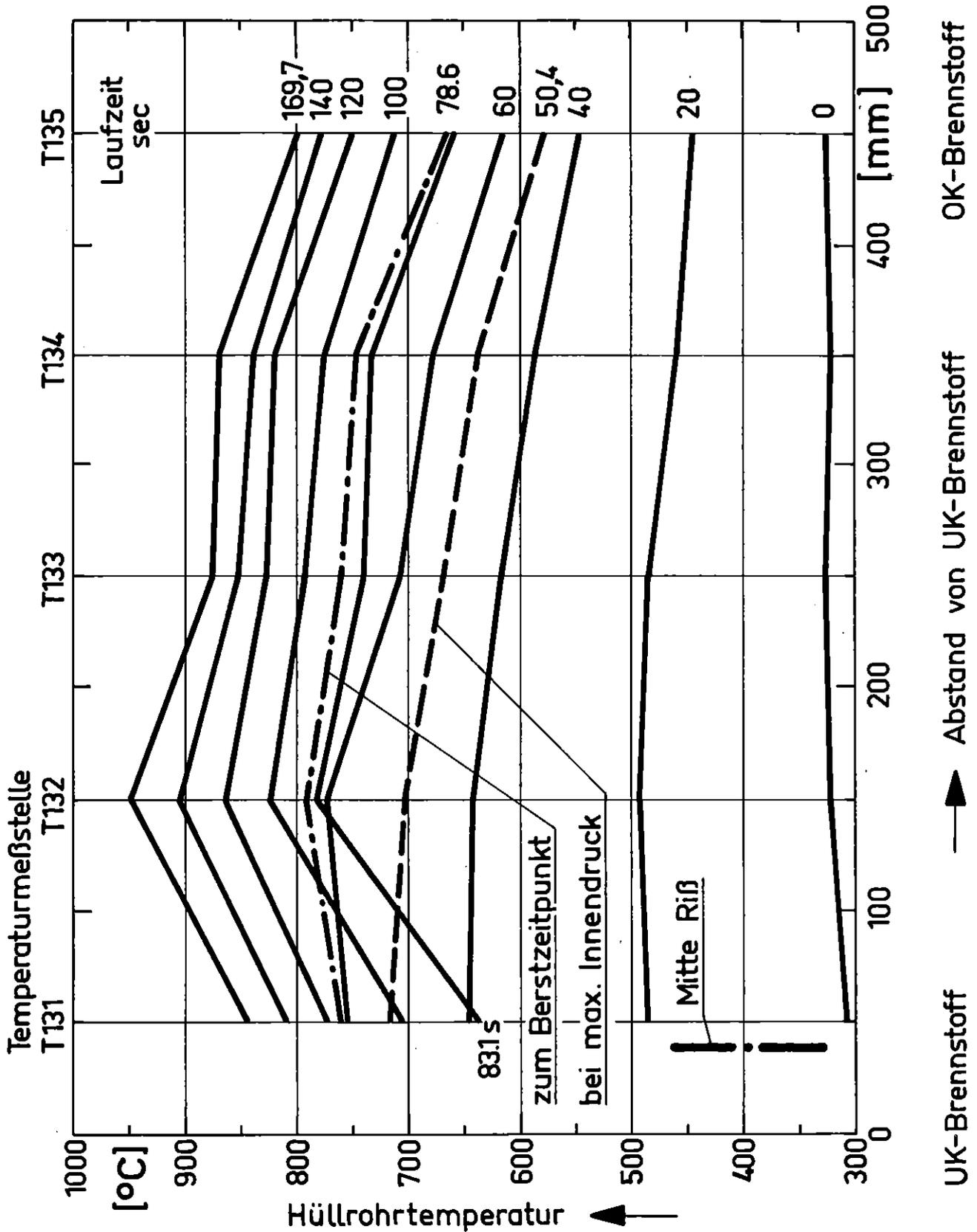


ABB.00023 01.06.77 ZEIT: 13:33:06:5 P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM



IT 1980  
PNS 4237-84.1

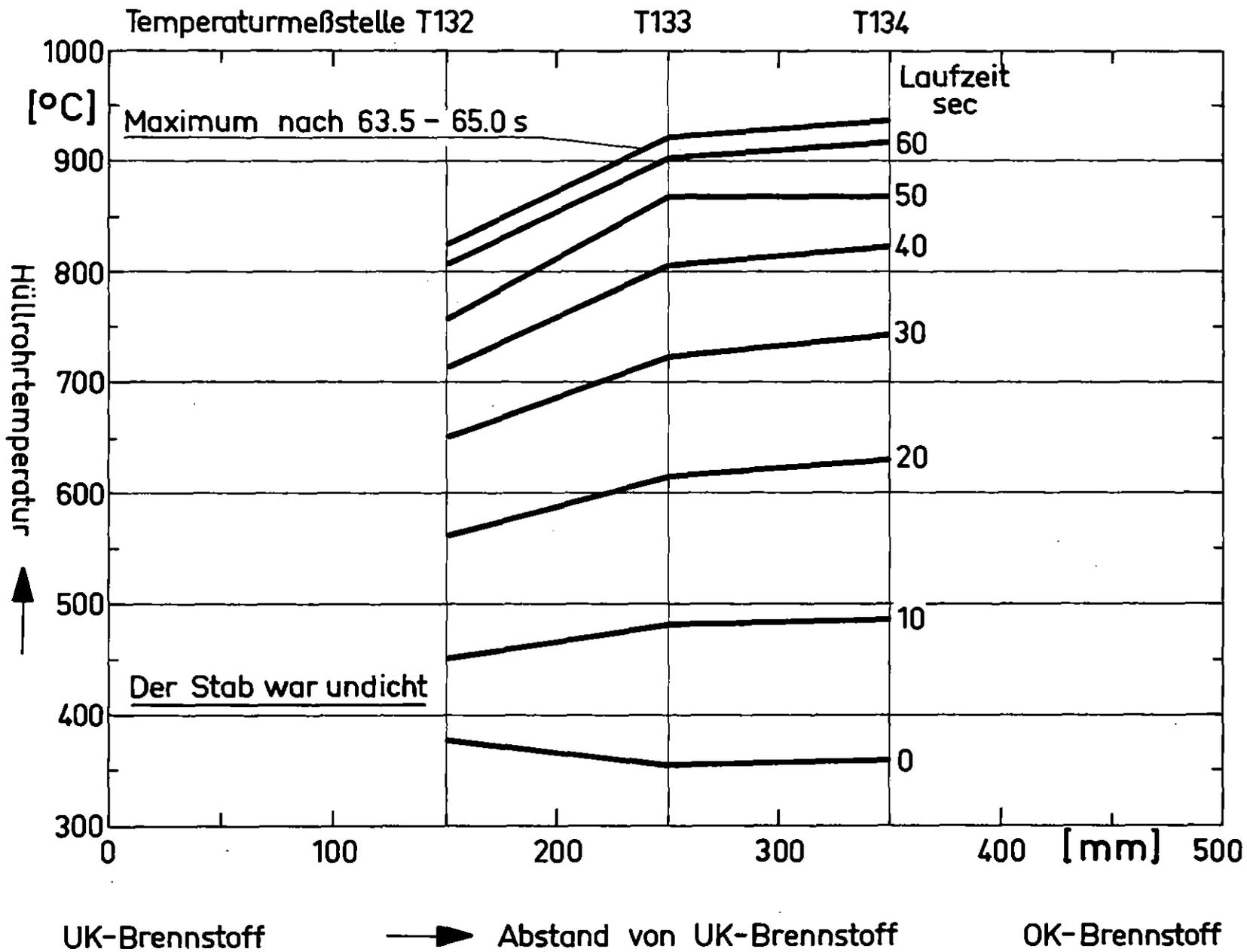
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: A1.1

Abb.:10.1

In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch:A1.2

Abb.10.2

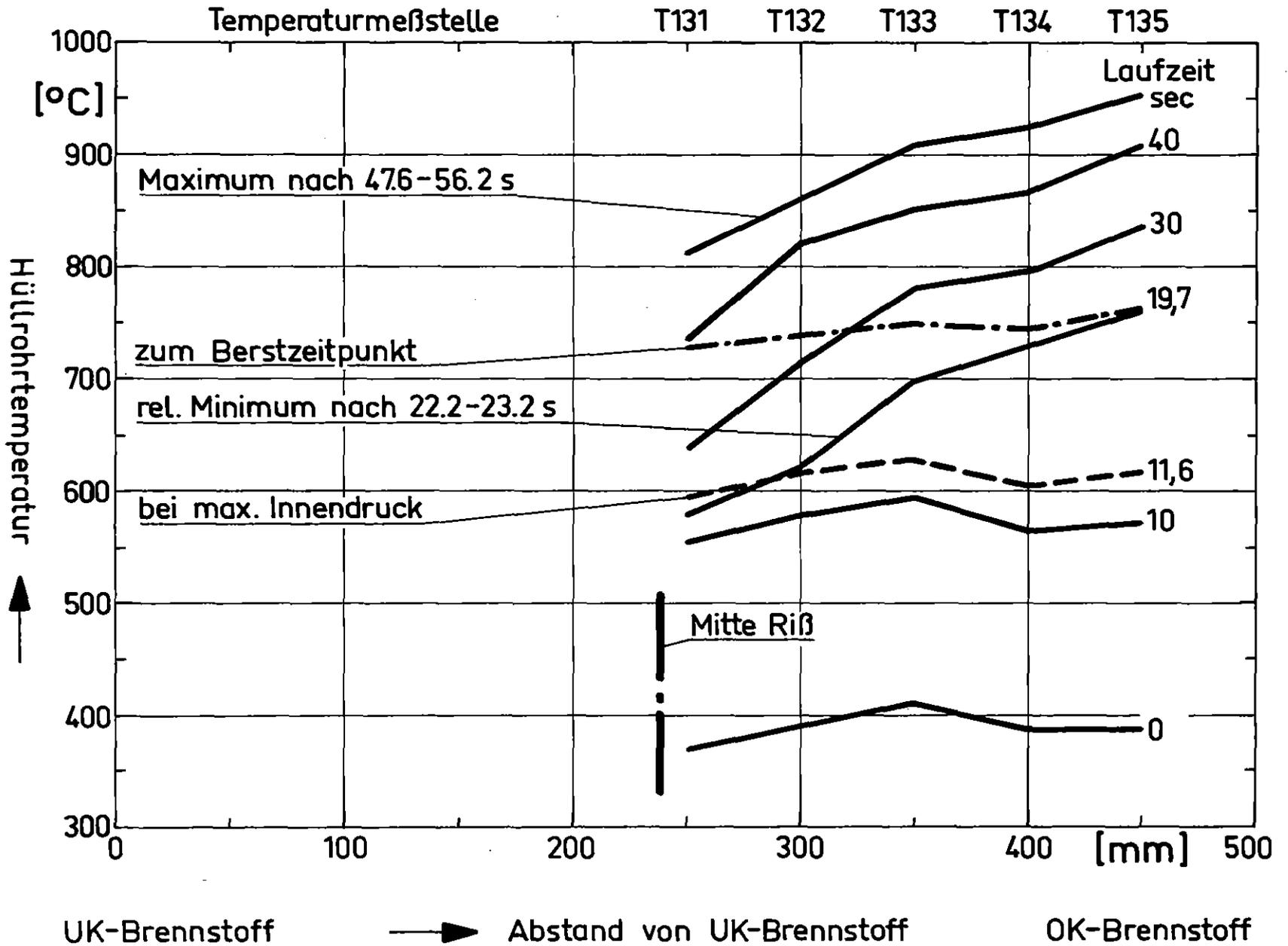
KfK  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.2



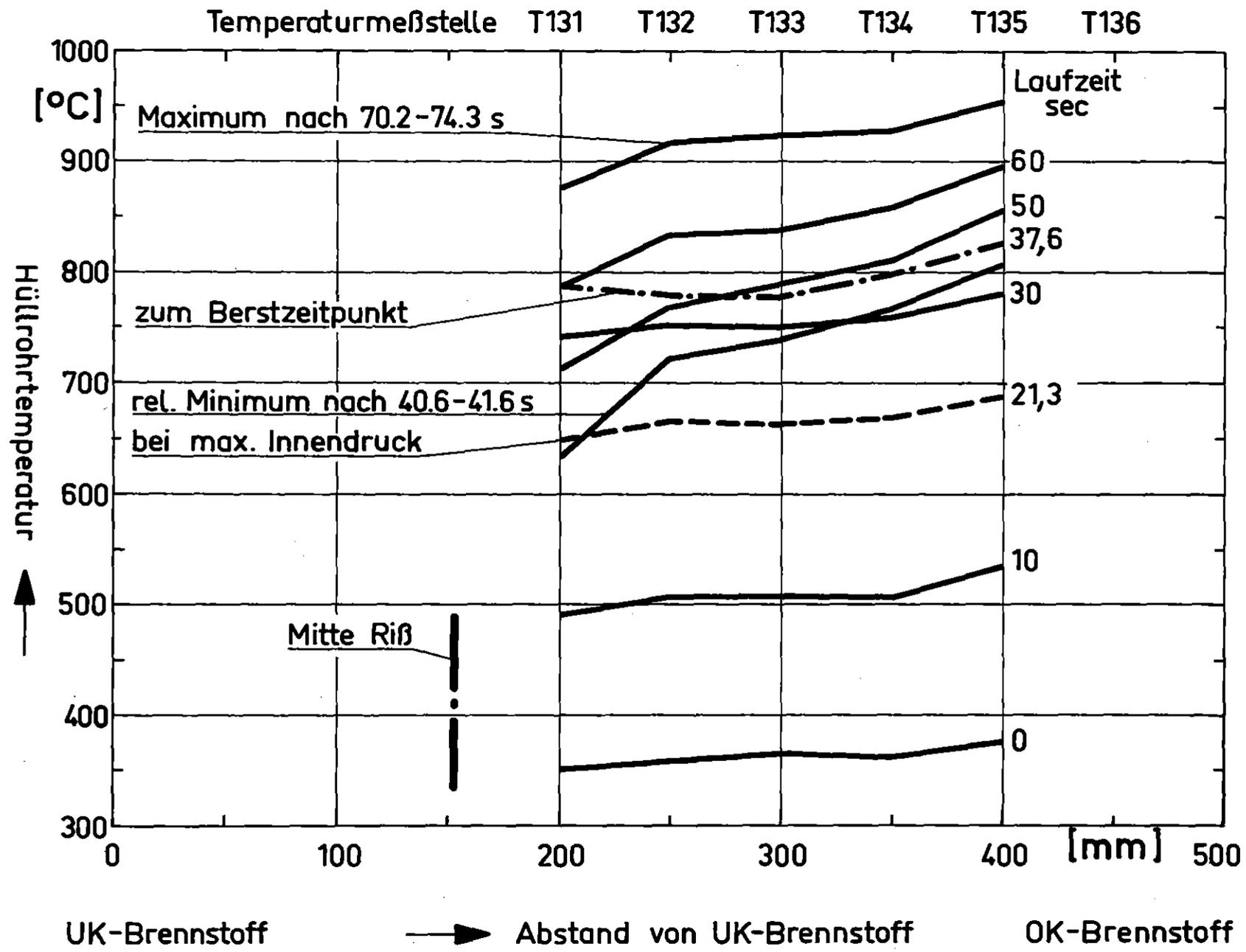
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch:A.2.1

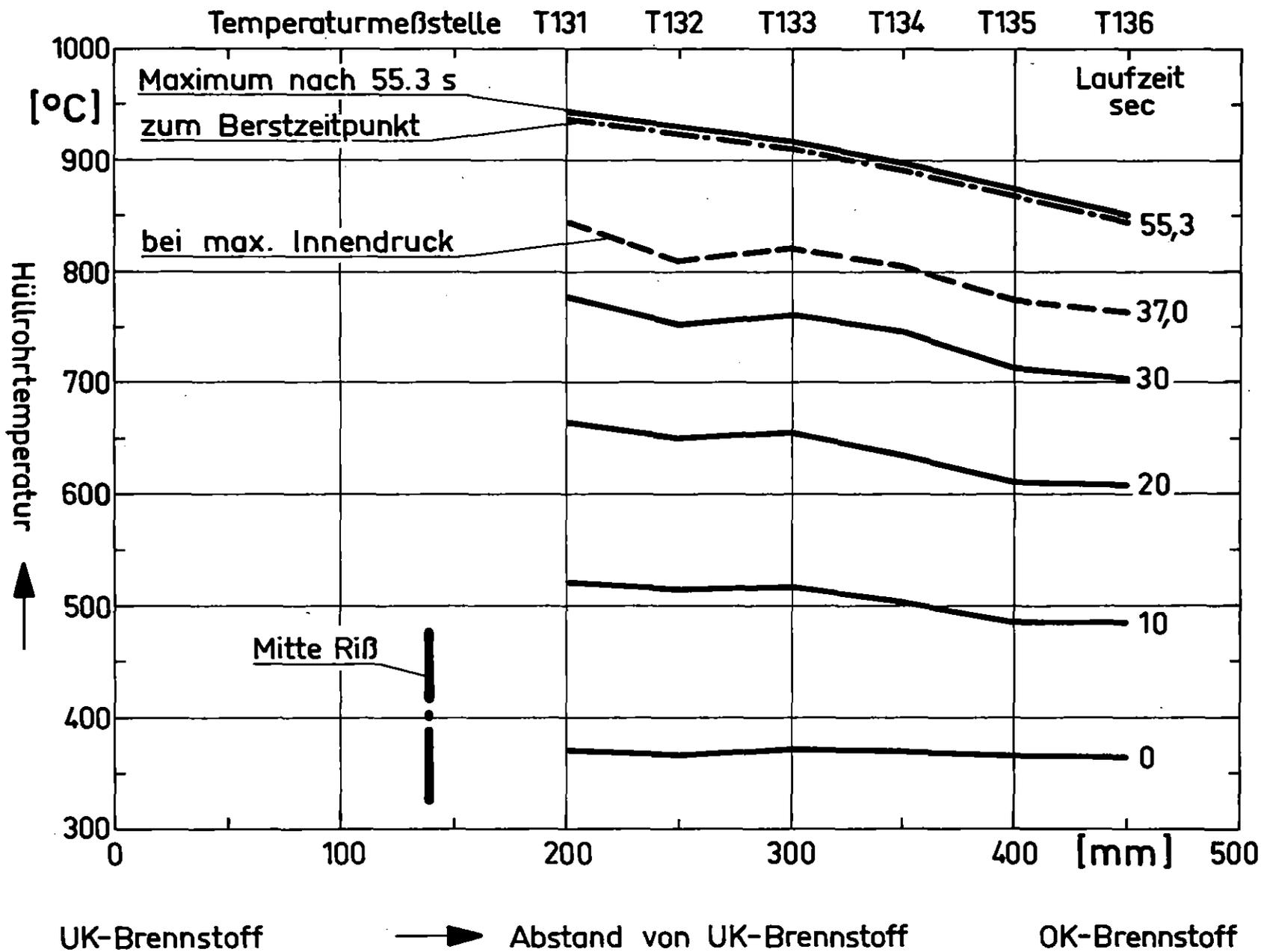
Abb.:10.3

KfK  
 IT 1978  
 PNS 4237-84.3



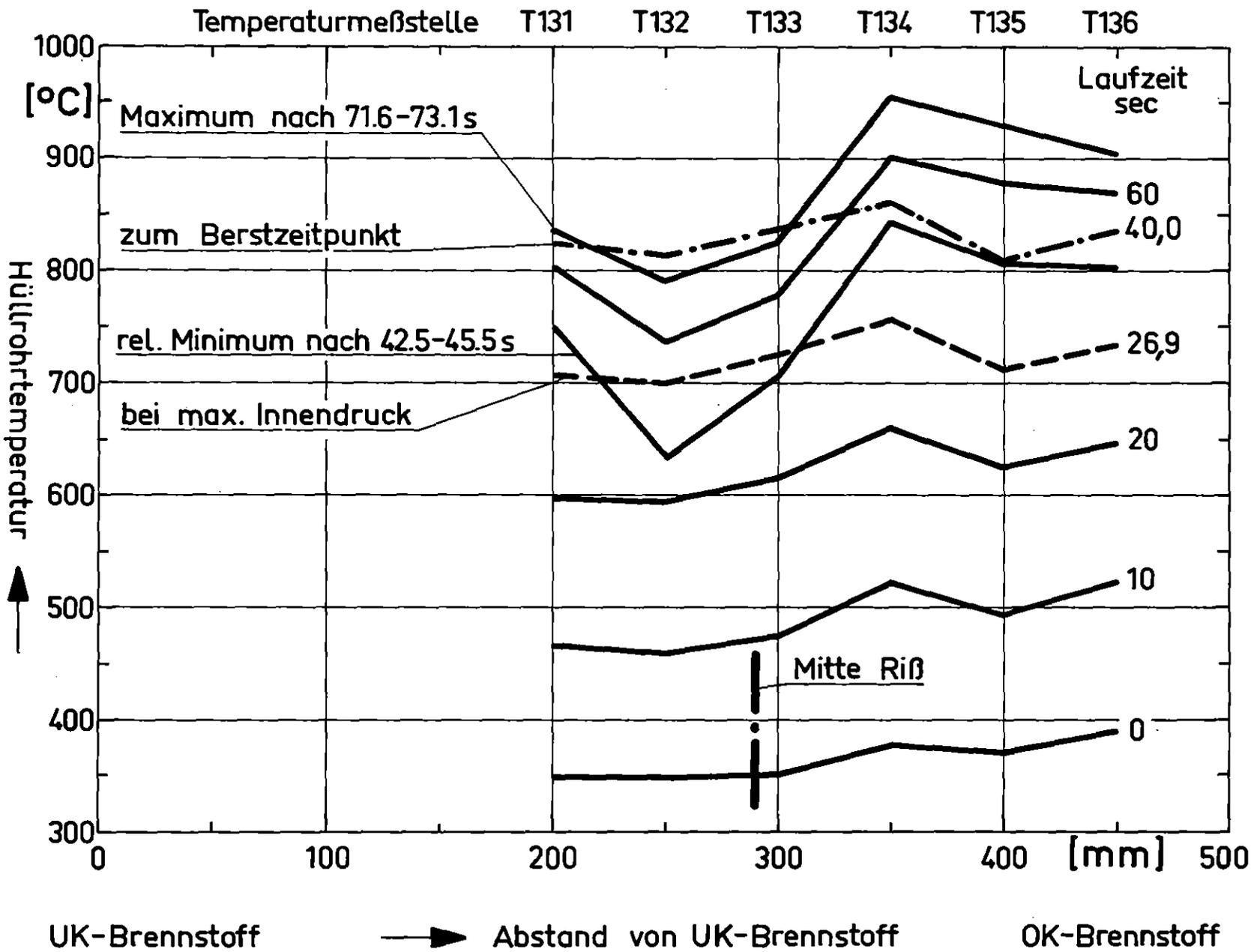
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: A2.2  
 Abb.:10.4





In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B.1.1  
 Abb.:10.6

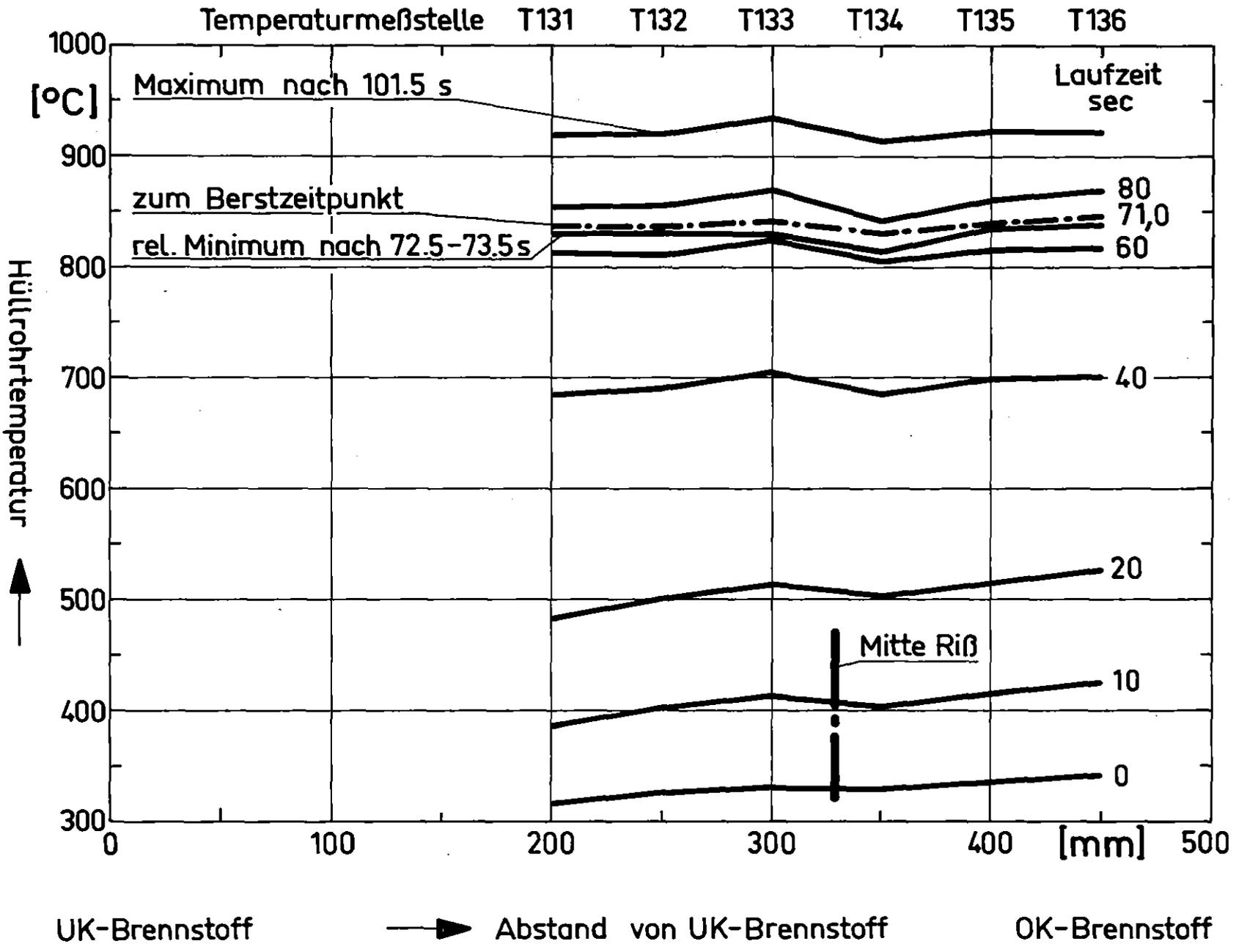
KfK  
 IT 1980  
 PNS 4237-84.6



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B1.2

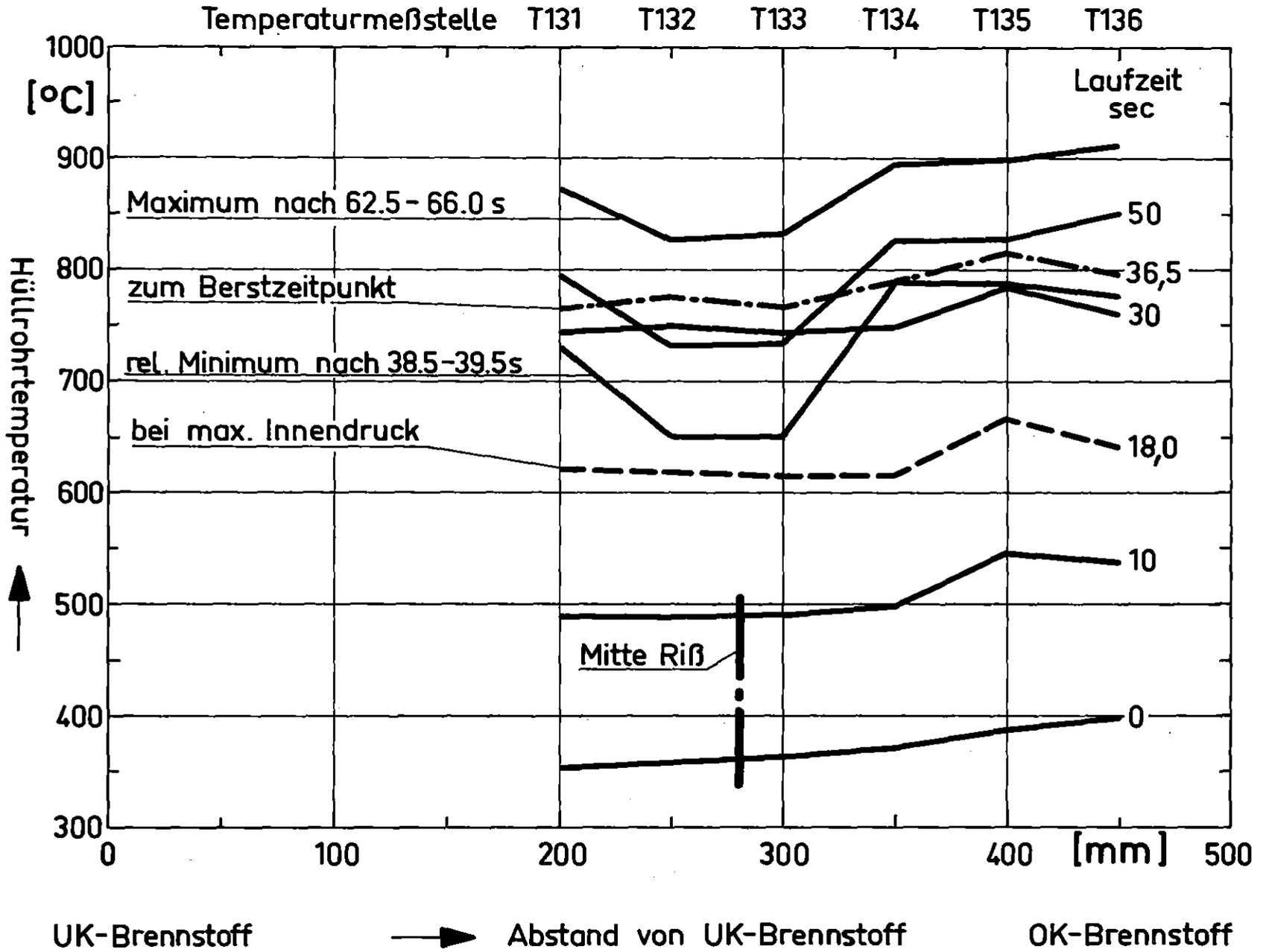
Abb.:10.7

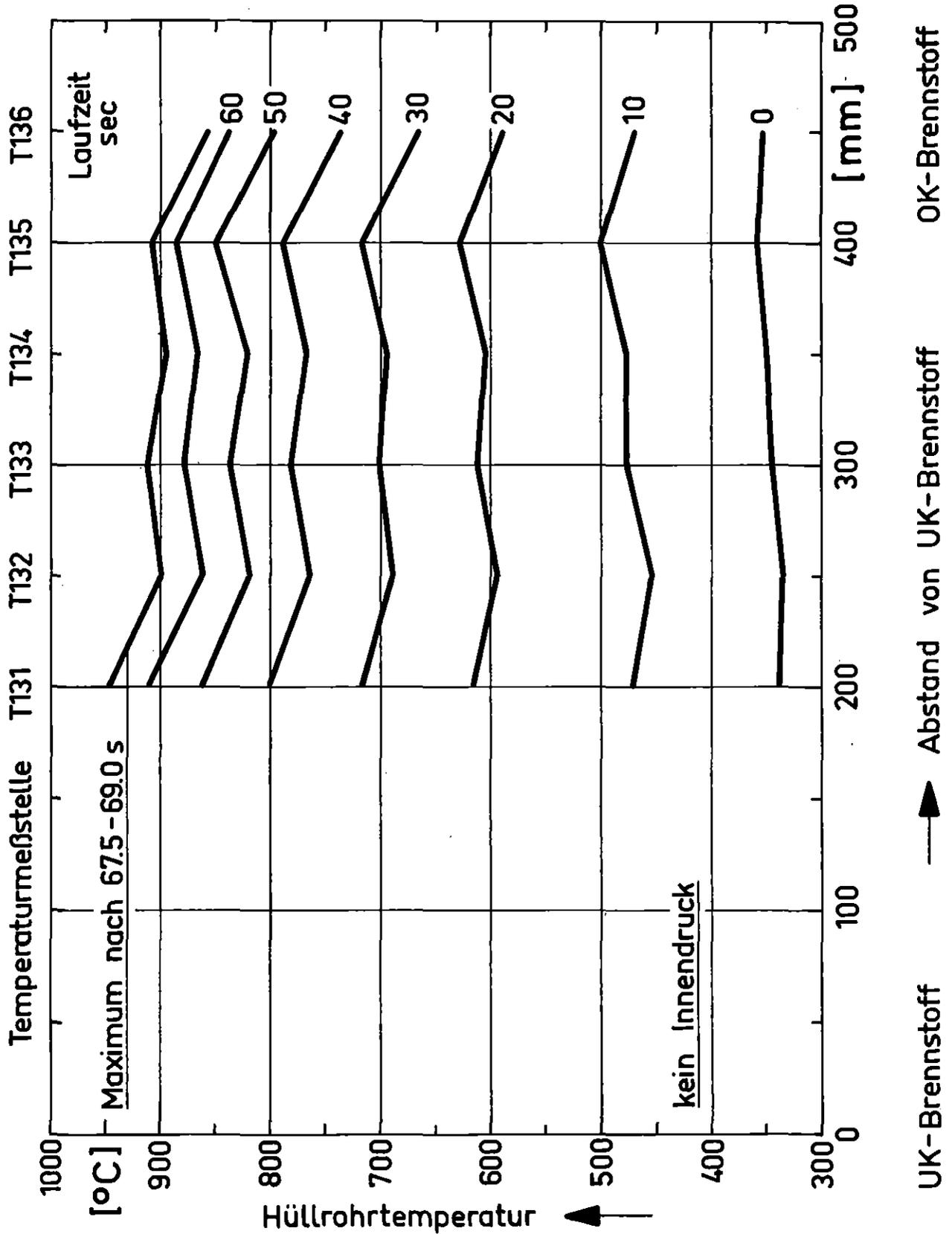
KfK  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.7



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B1.3  
 Abb.:10.8

KfK  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.8





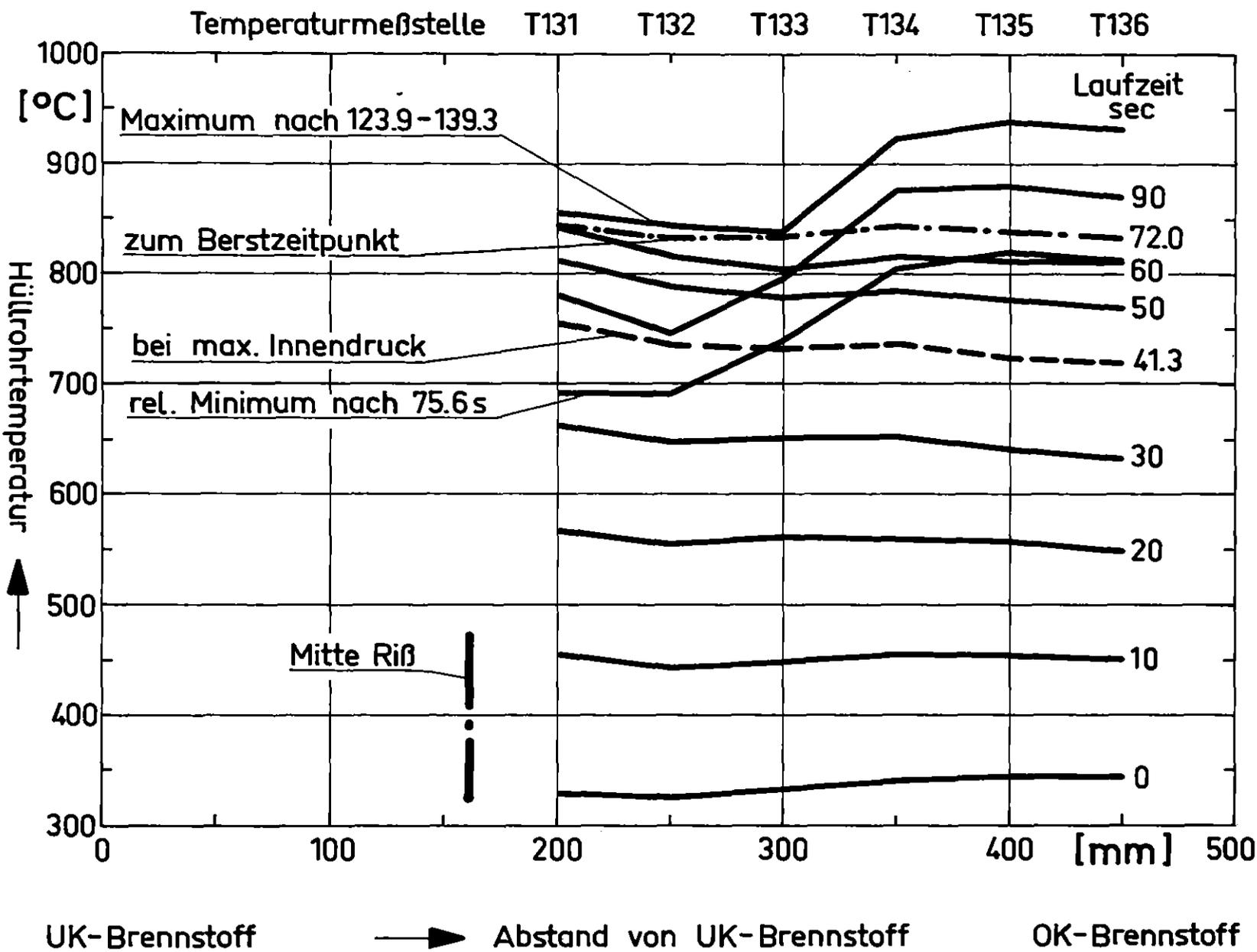
KfK IT 1977  
PNS 4237-84.9

In-Pile - Versuche zum Brennstabversagen  
Axiales Temperaturprofil Versuch: B1.4

Abb.:10.9

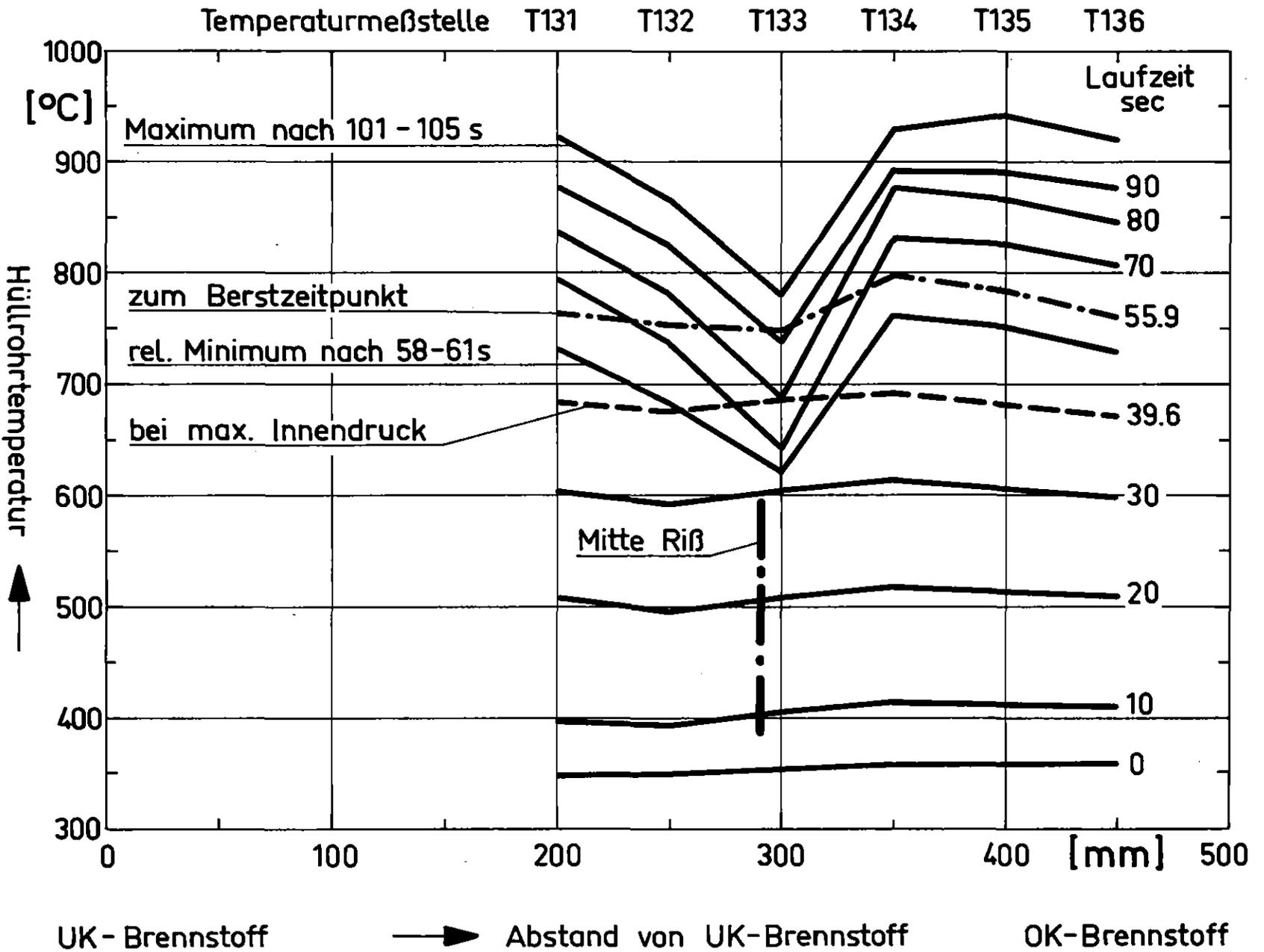
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B1.5  
 Abb.:1010

**KfK**  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.10



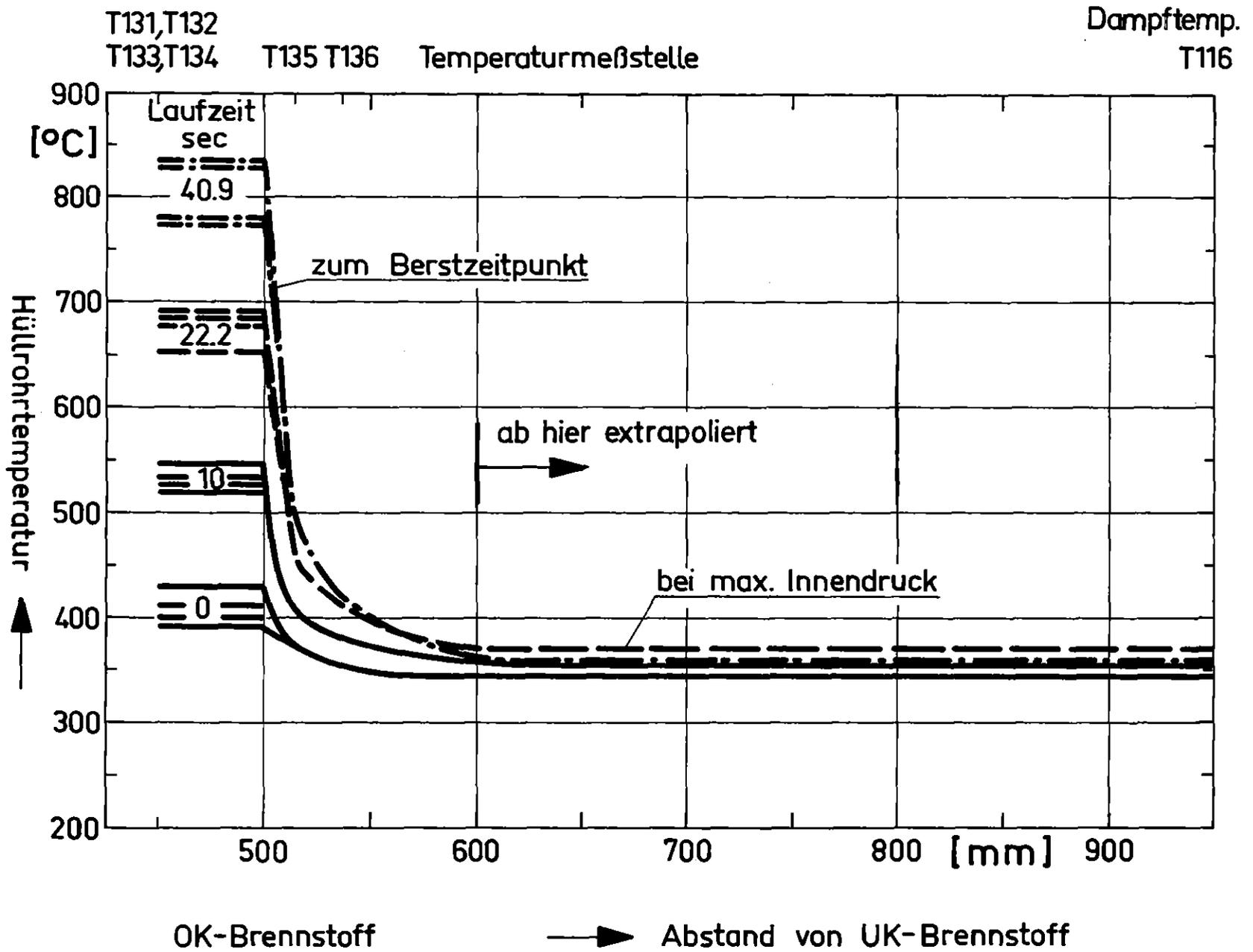
In - Pile - Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B.1.6  
 Abb.:10.11

IT 1977  
 PNS 4237-84.11



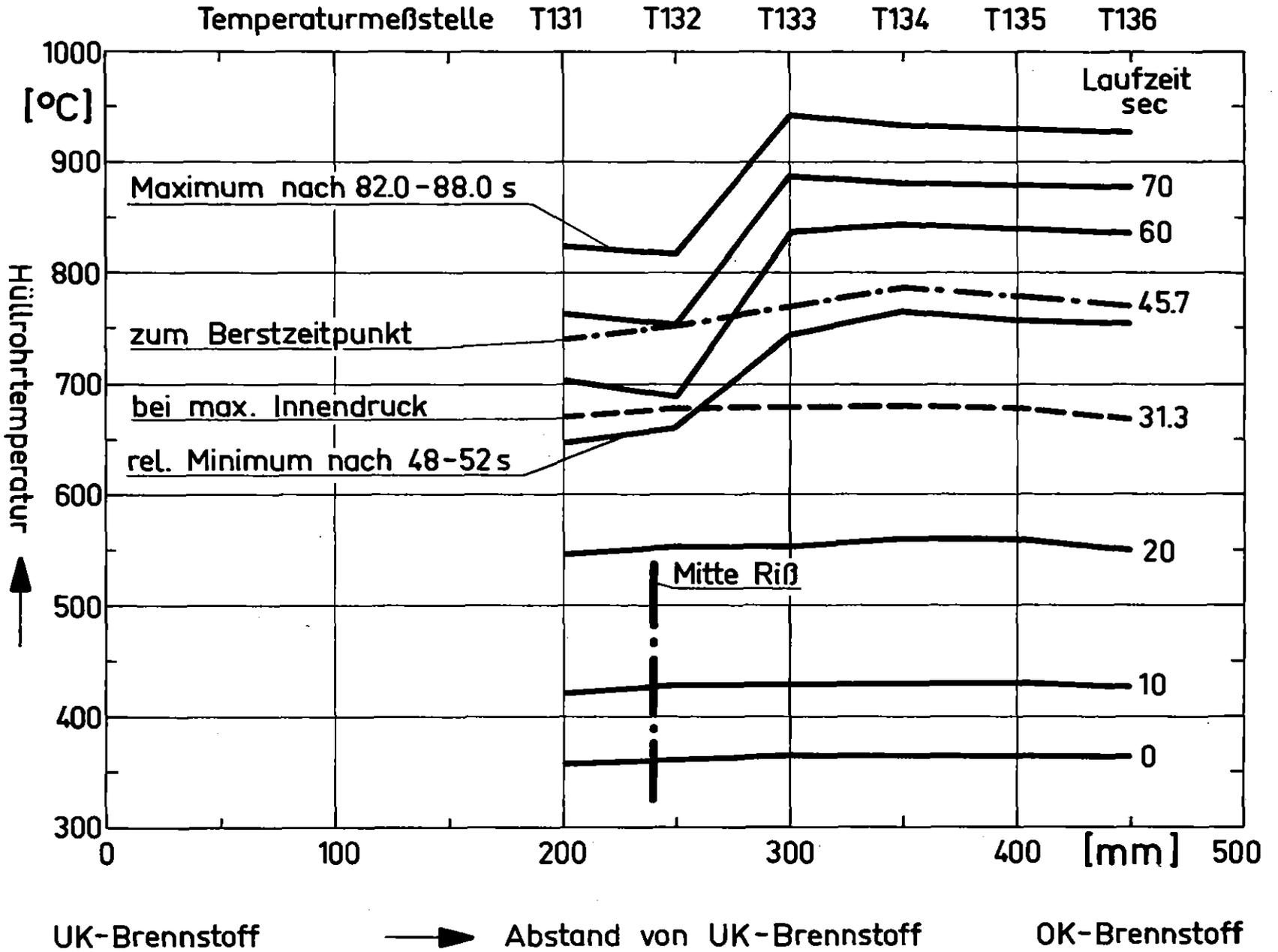
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B17  
 Abb.:10.12

KfK  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.30



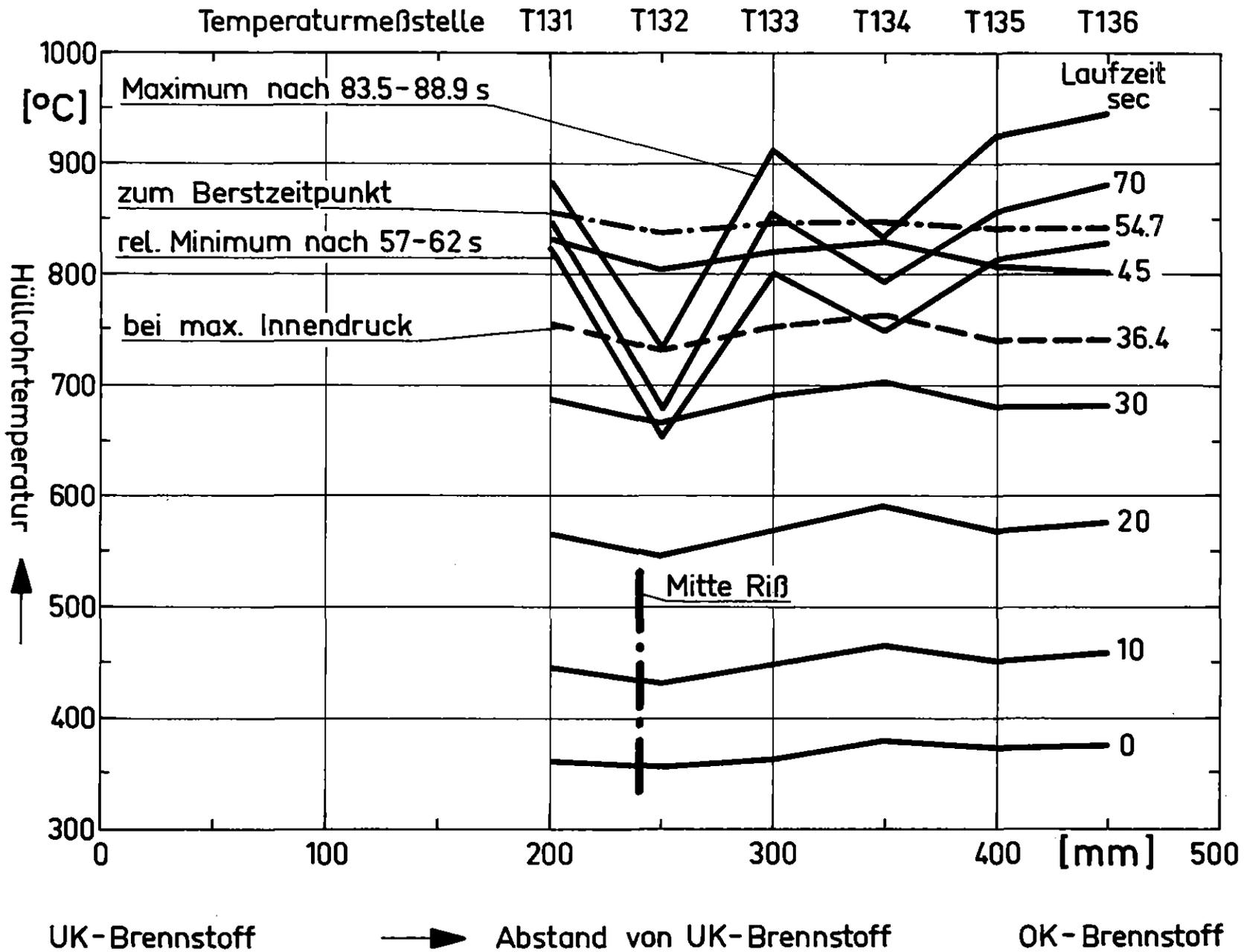
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B3.1  
 Abb.:10.13

KfK  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.12



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: B.3.2  
 Abb.: 10.14

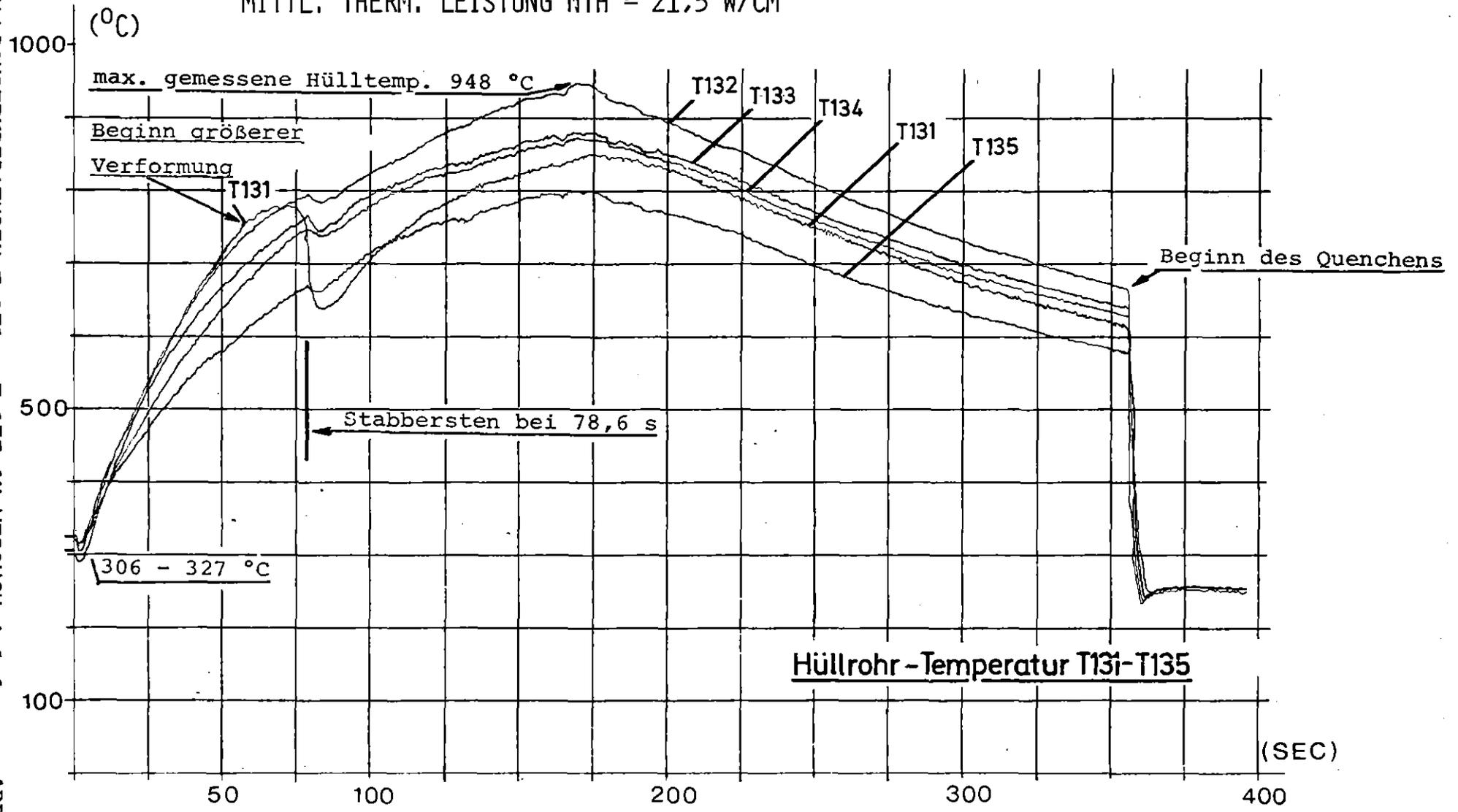
**KIK**  
 IT 1977  
 PNS 4237-84.13



PROJEKT PNS 4237 - VERSUCH NR. NSV-HV A 1.1  
VOM 08.10.75

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH = 21,5 W/CM

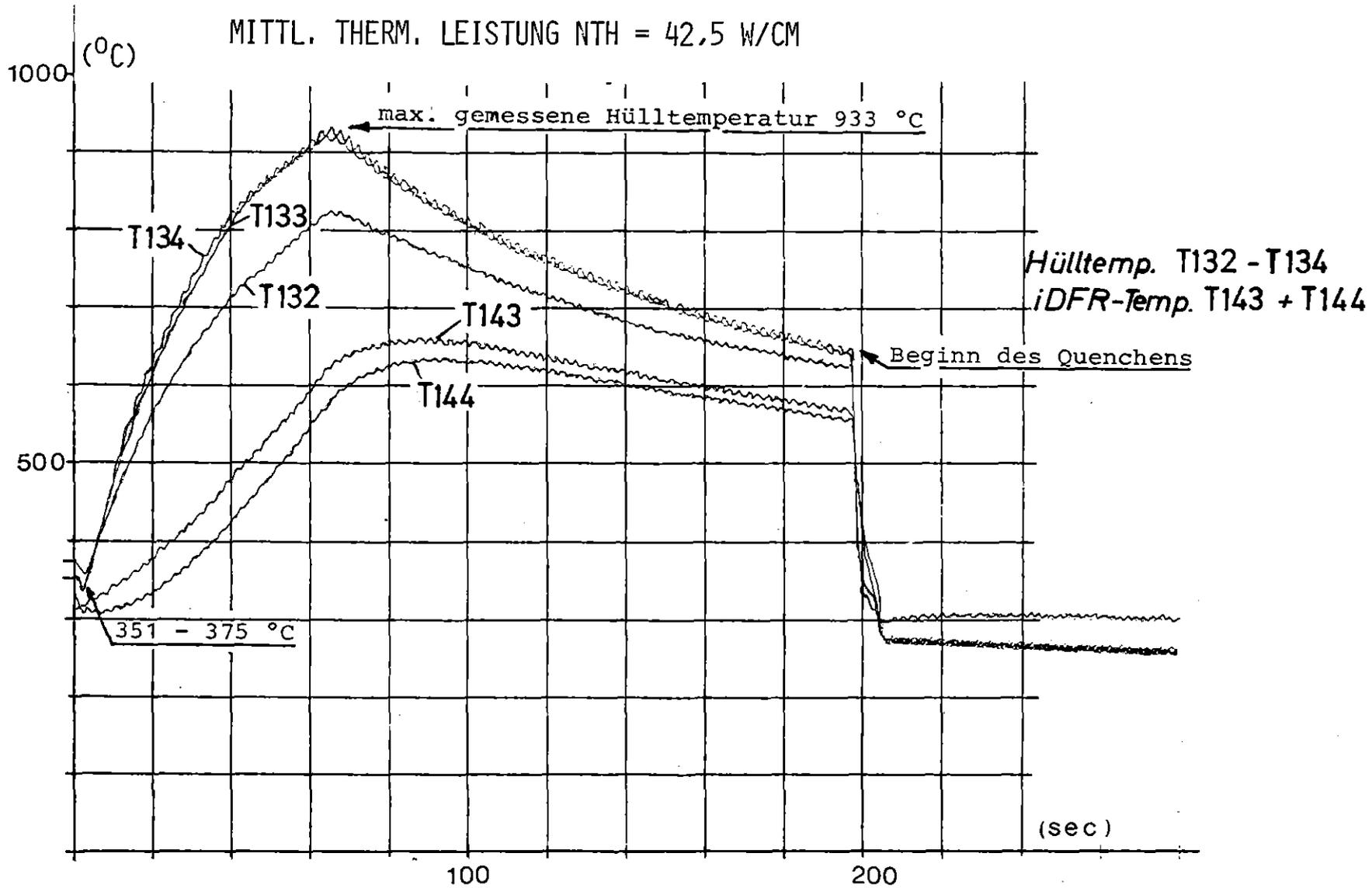
HÜLLROHRTEMP. T131 - T135 IM VERSUCH A 1.1  
ABB. 11.1



PROJEKT PNS 4237 - VERSUCH NR. A 1.2  
VOM 29.10.75

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH = 42,5 W/CM

HÖLLEHROHRTTEMPERATUREN T 131 - T 134 IM VERSUCH A 1.2 ABB. 11.2



(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. NSV-HVA2.1  
VOM 06.07.76

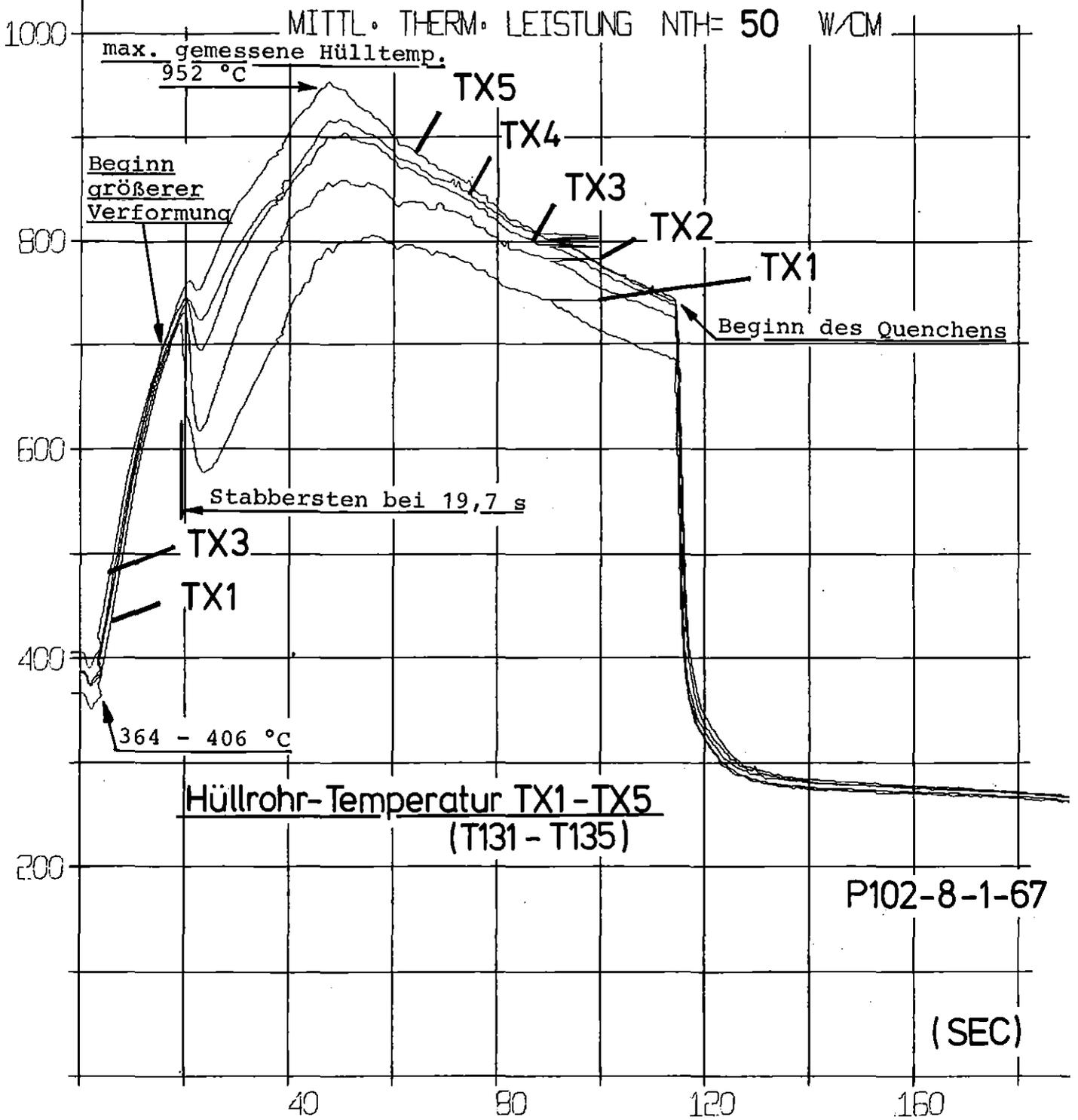


ABB. 00029 06.07.76 ZEIT 11H58M54S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5 VERS. - TEM

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. NSV-HV A2.2  
VOM 13.08.76

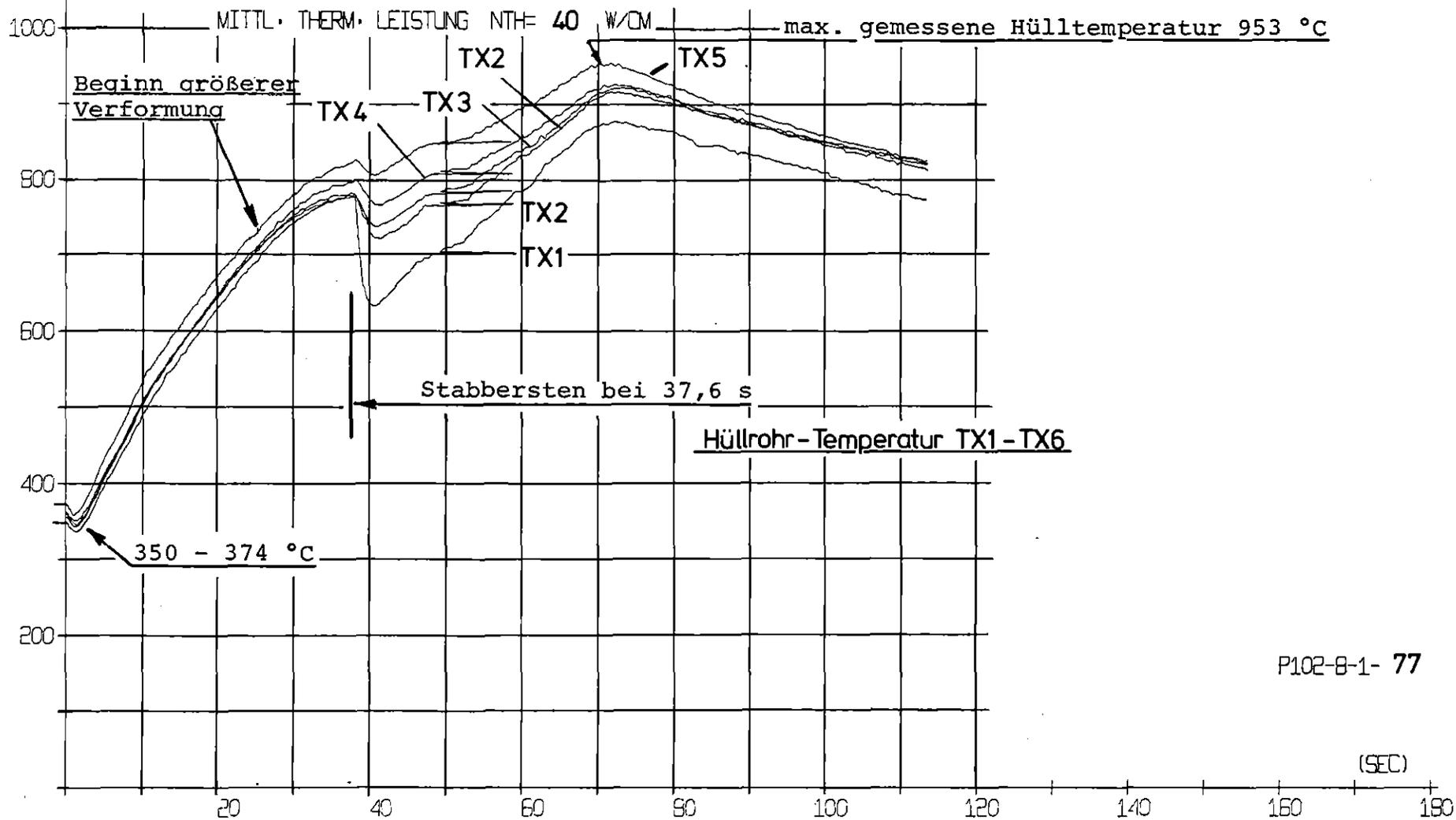


ABB.00029 13.08.76 ZEIT 10H46M01S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5 VERS.-TEMP.

P102-8-1- 77

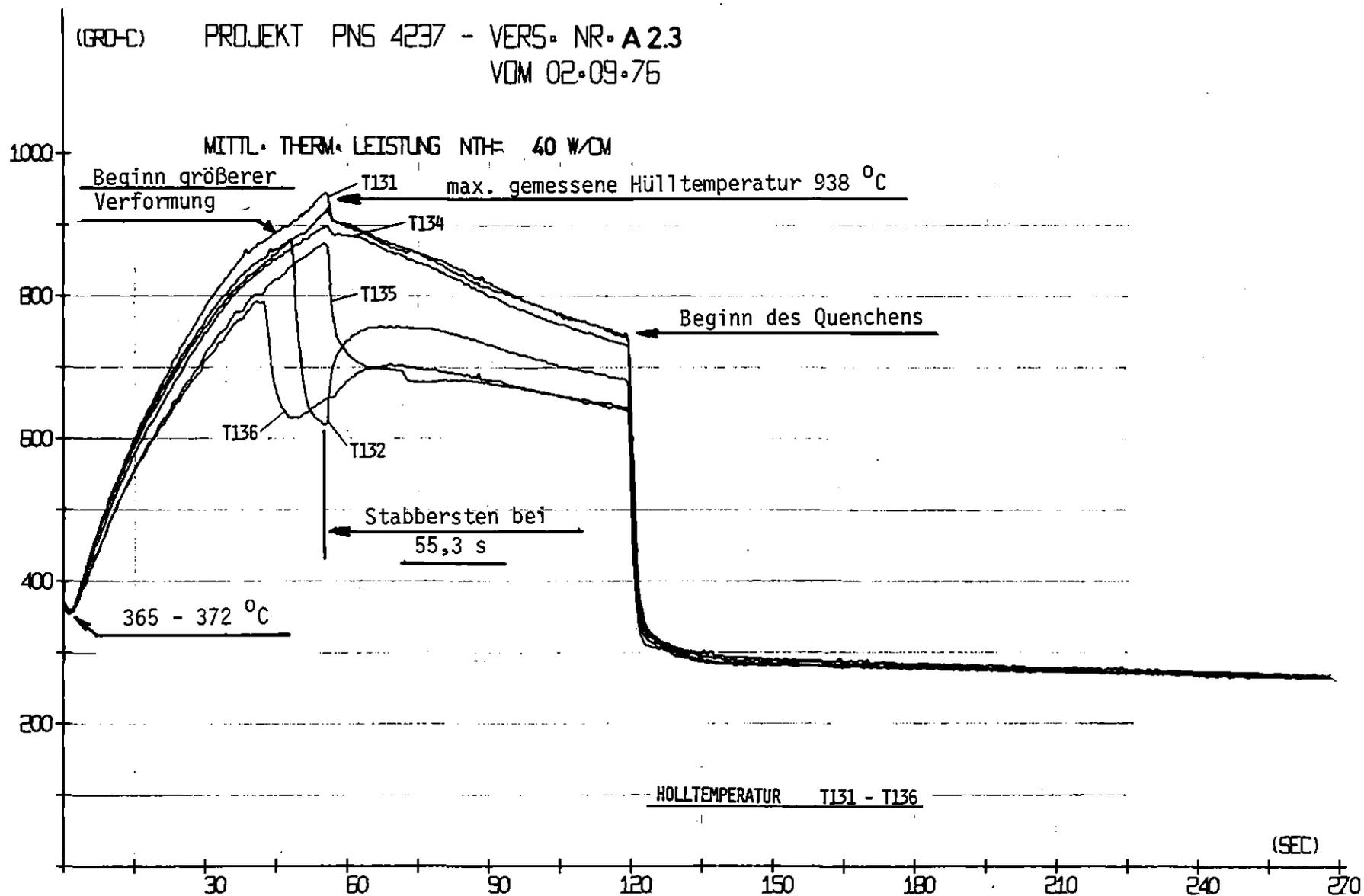


ABB.00032 02.09.76 ZEIT 12:31M54S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

HÜLLROHRTTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH B 1.1

ABB. 11.6

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. NSV-HV B1.1  
VOM 26.10.76

Beginn größerer  
Verformung

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH= 40 W/CM

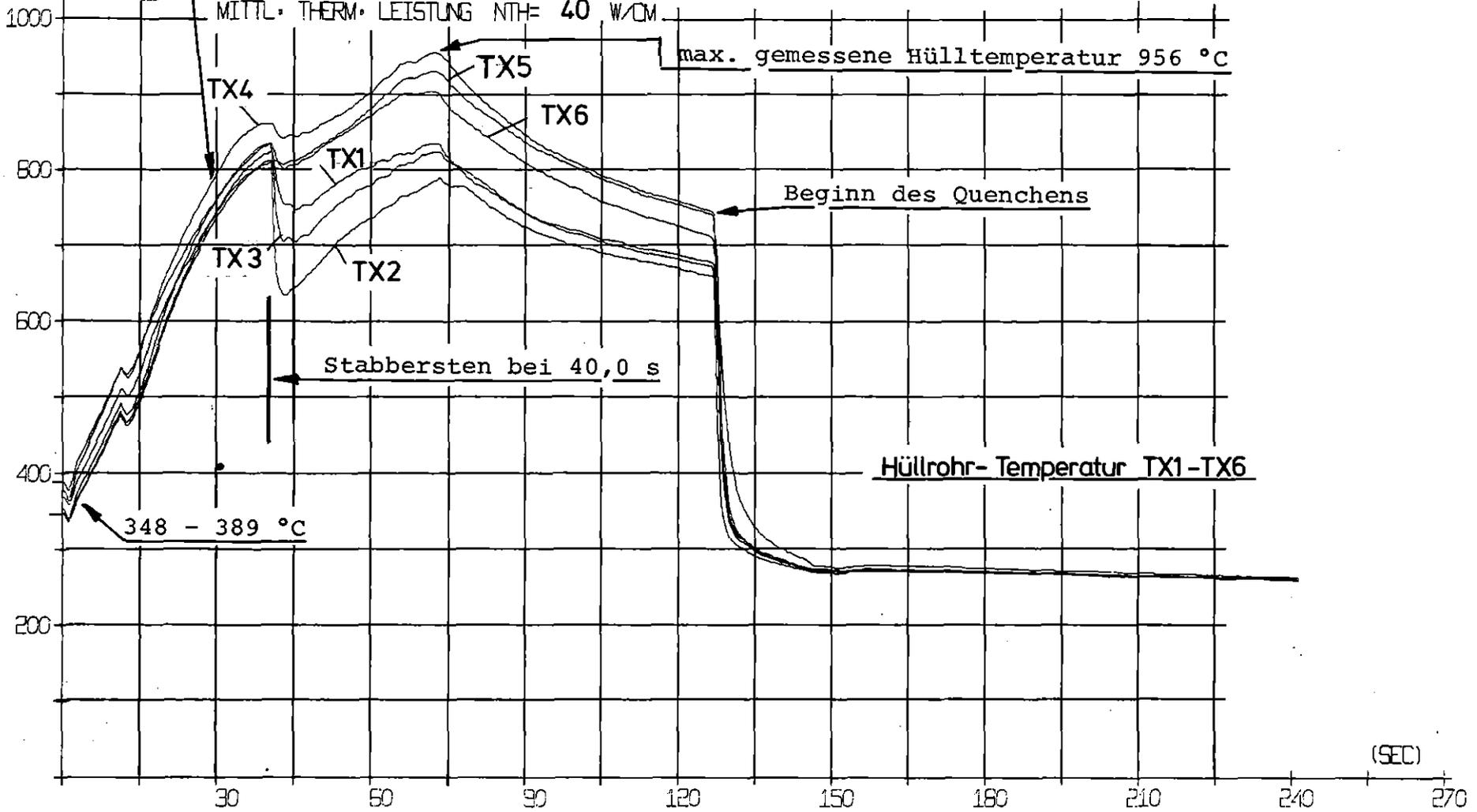
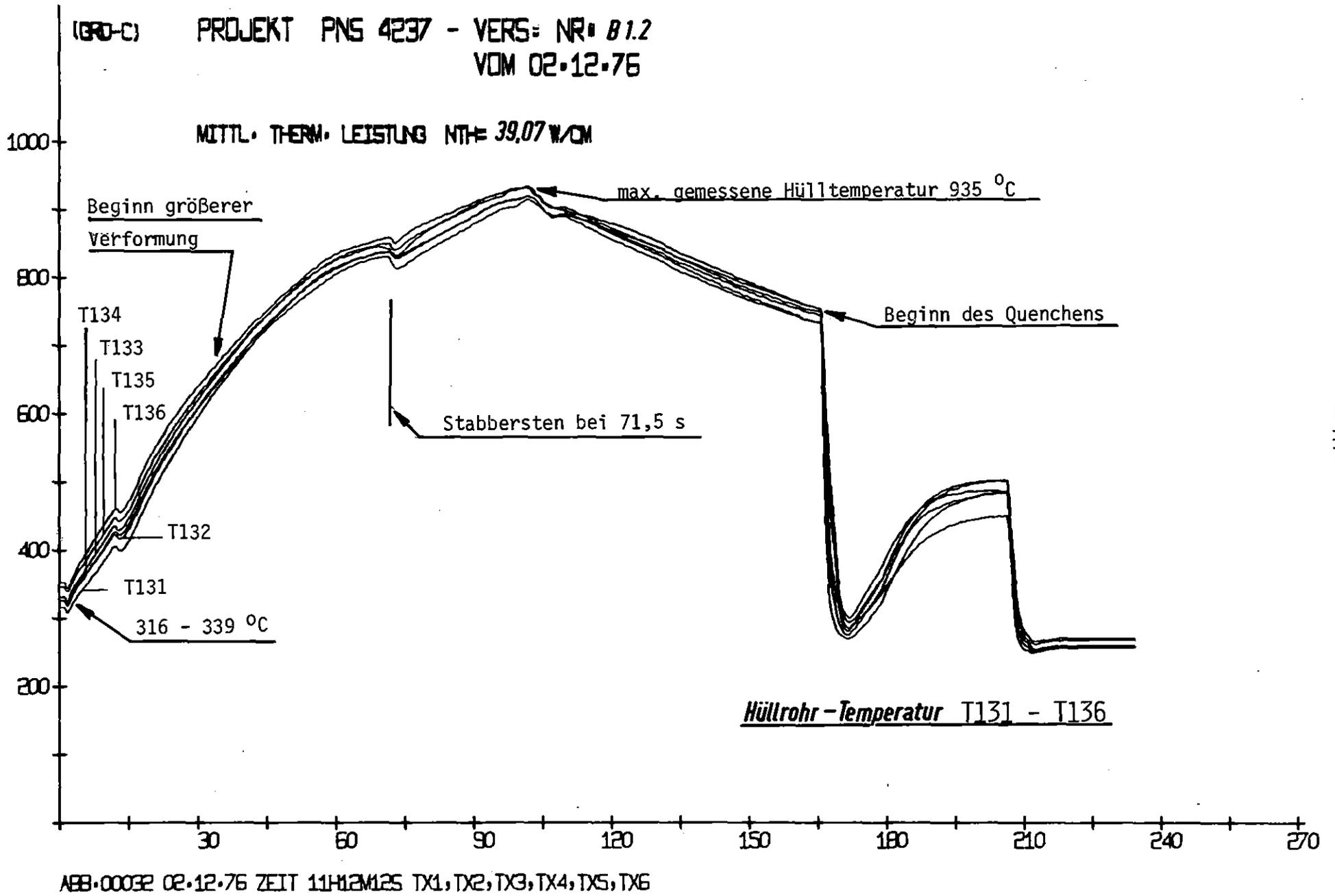


ABB.00032 26.10.76 ZEIT 13H24M57S TX1;TX2;TX3;TX4;TX5;TX6

HÜLLROHRTEMPERATUREN T131 - T136 IM VERSUCH B 1.2

ABB. 11.7



HÖLLEHROHRTTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH B 1.3

ABB. 11.8

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B1.3**  
VOM 04.01.77

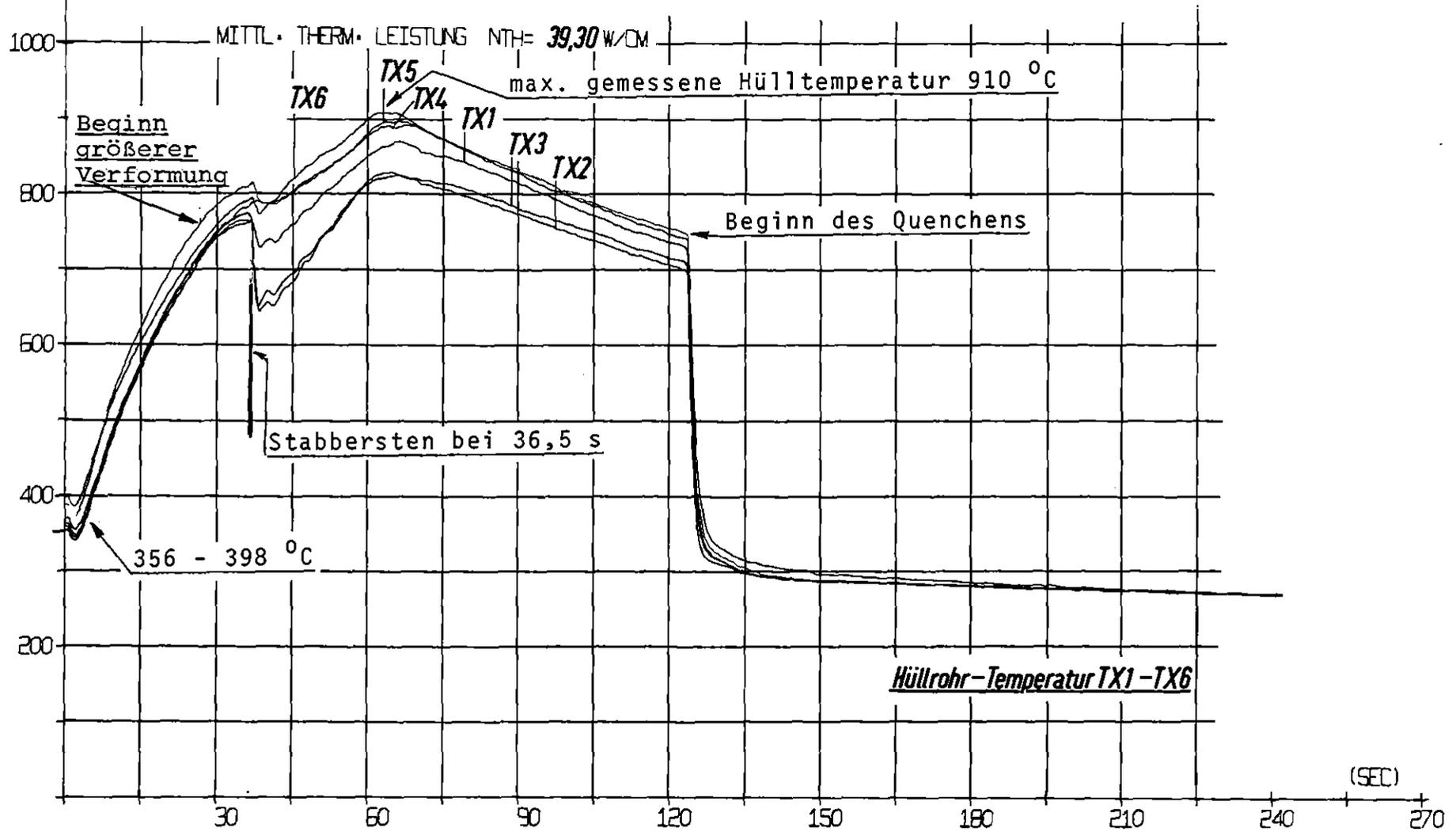
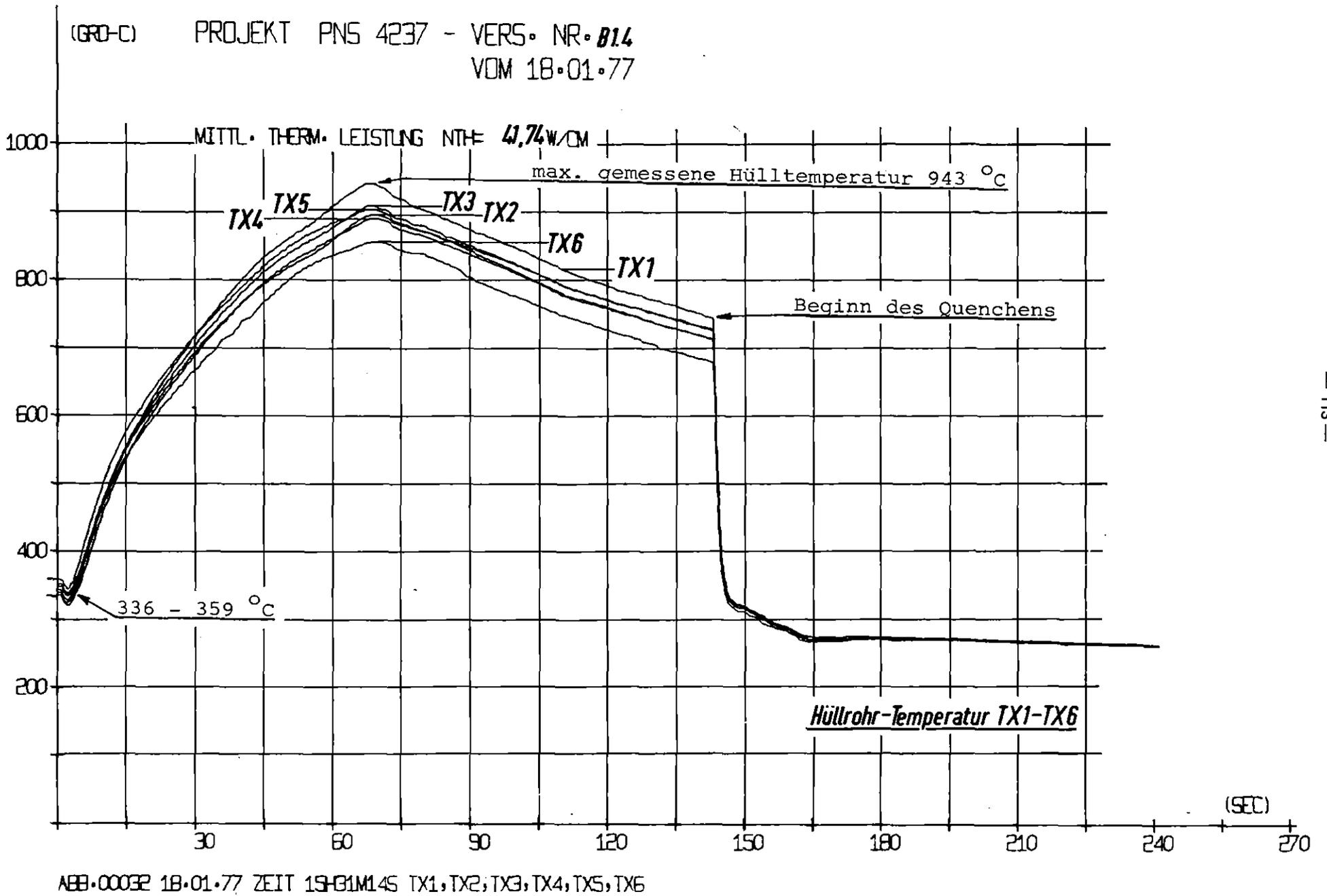


ABB.00032 04.01.77 ZEIT 16:00:025 TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

HÜLLROHRTTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH B 1.4

ABB. 11.9



(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B1.5**  
VOM 15.02.77

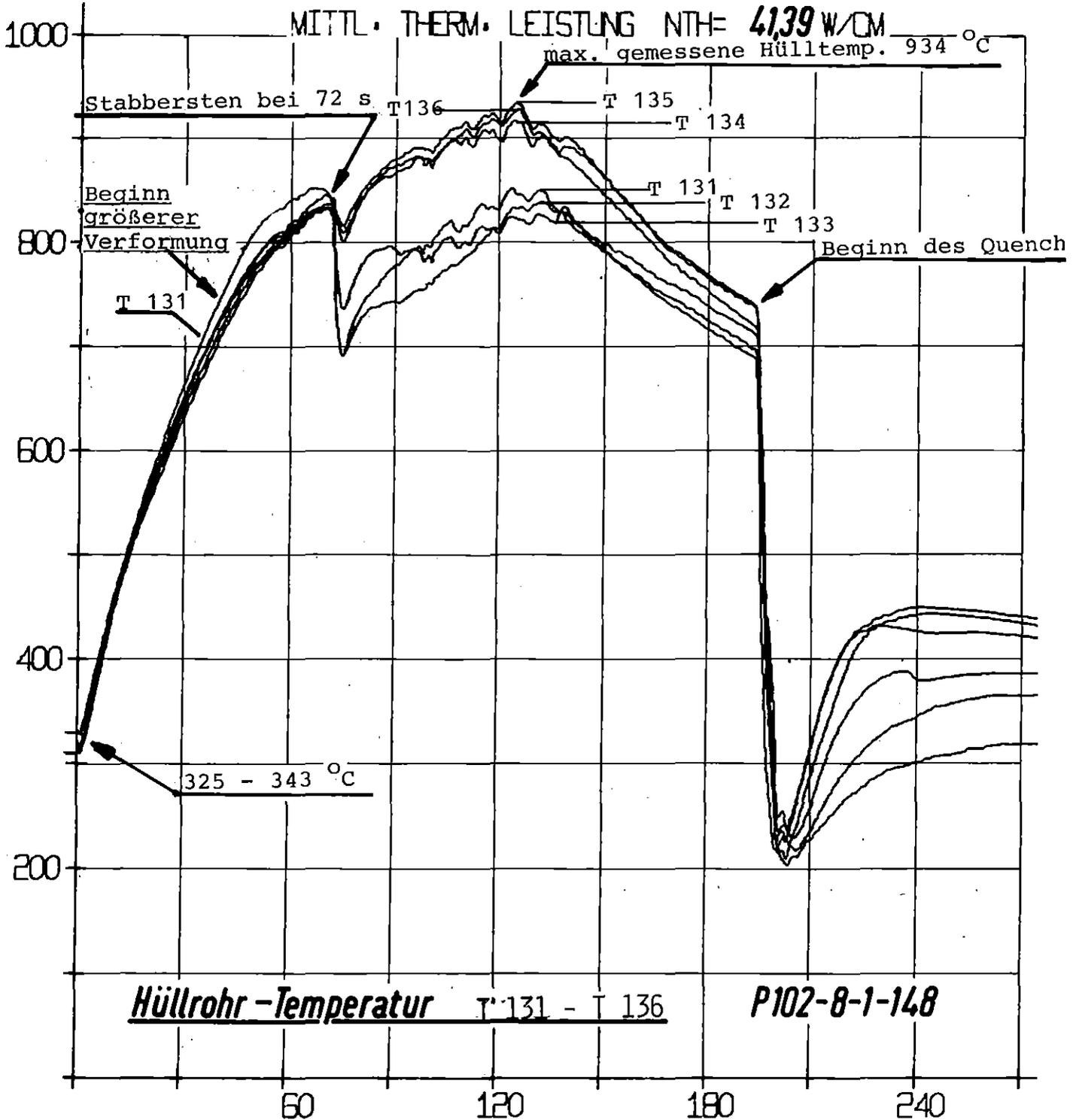


ABB.00032 15.02.77 ZEIT 11H16M41S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

HÜLLROHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH B 1.5

ABB. 11.10

(GRO-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. B1.6  
 VOM 04.05.77

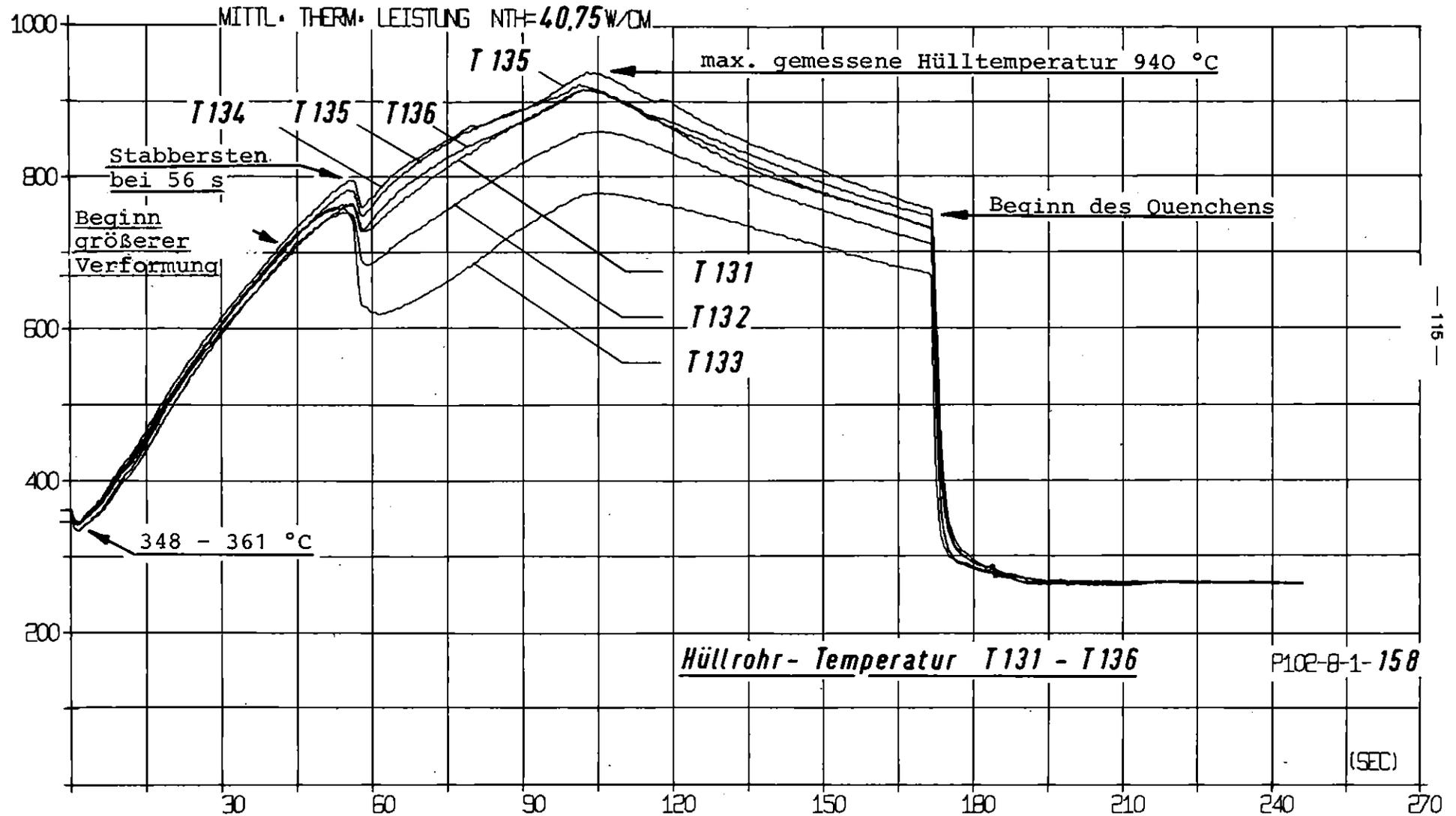


ABB.00032 04.05.77 ZEIT 11:57M21S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. B1.7  
VOM 20.09.78

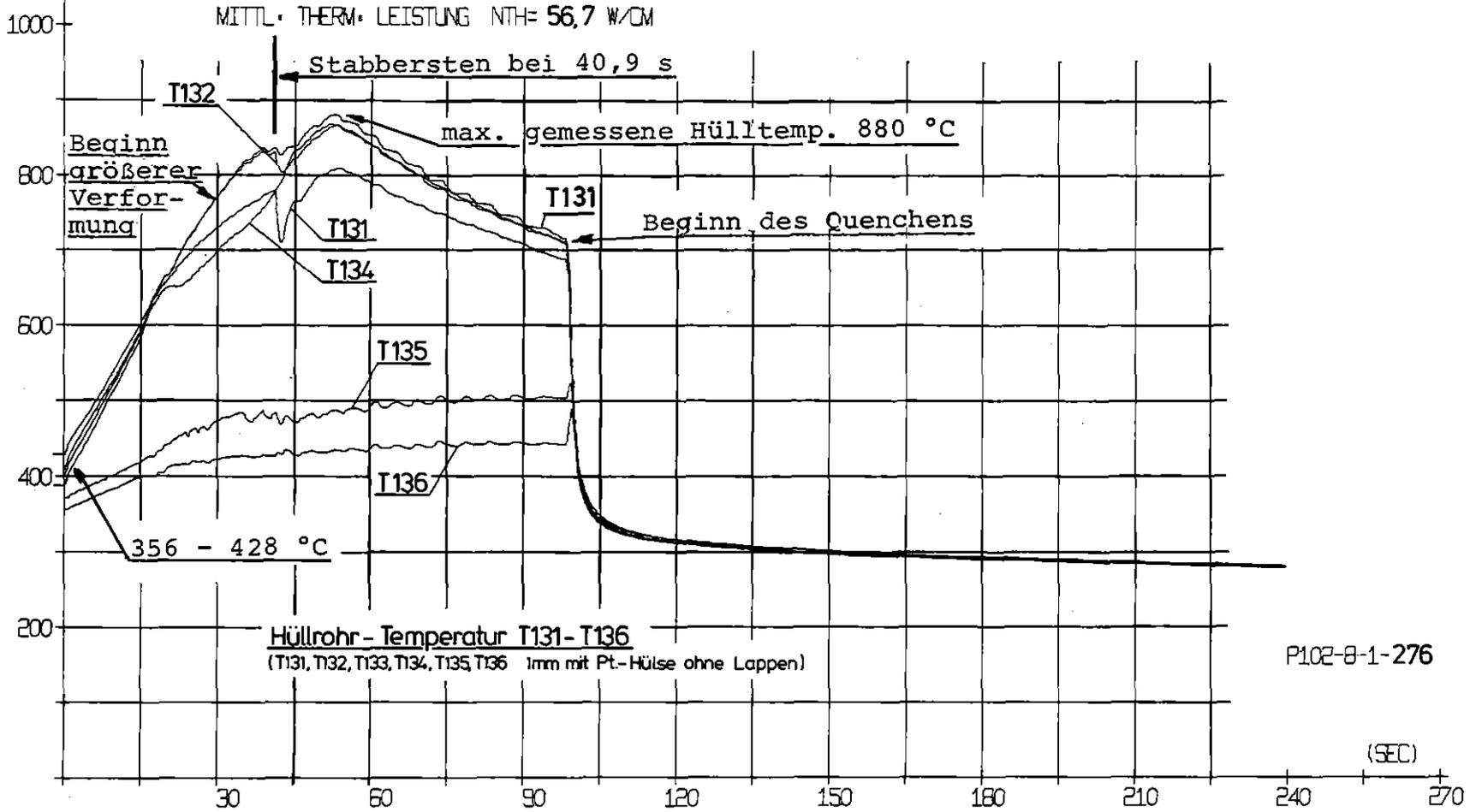


ABB.00032 20.09.78 ZEIT 13:03M10S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B3.1**  
 VOM 05.05.77

HÜLLROHRTEMPÉRATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH B 3.1

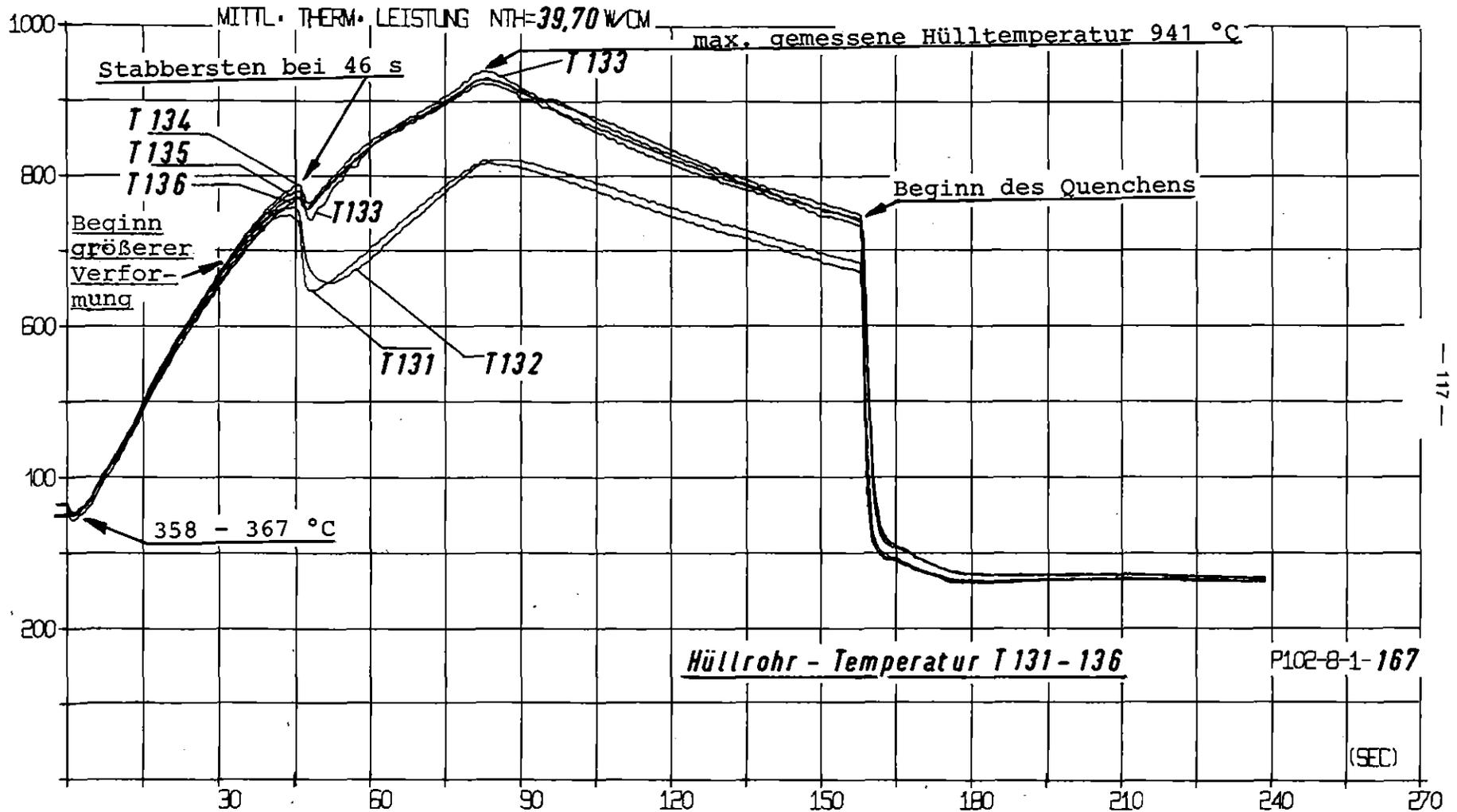


ABB.00032 05.05.77 ZEIT 11H20M34S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

ABB. 11.13

(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. **B3.2**  
VOM 01.06.77

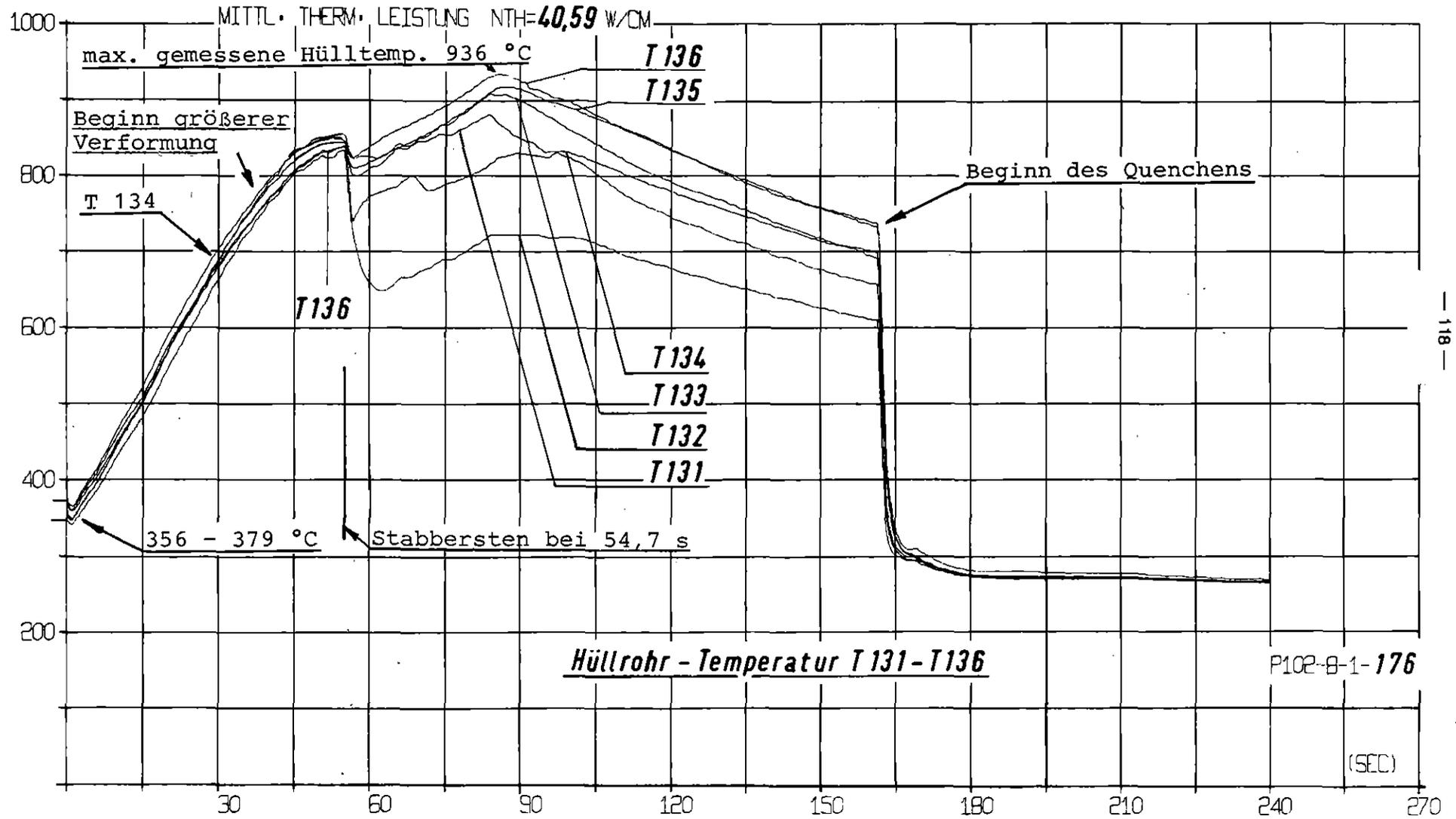
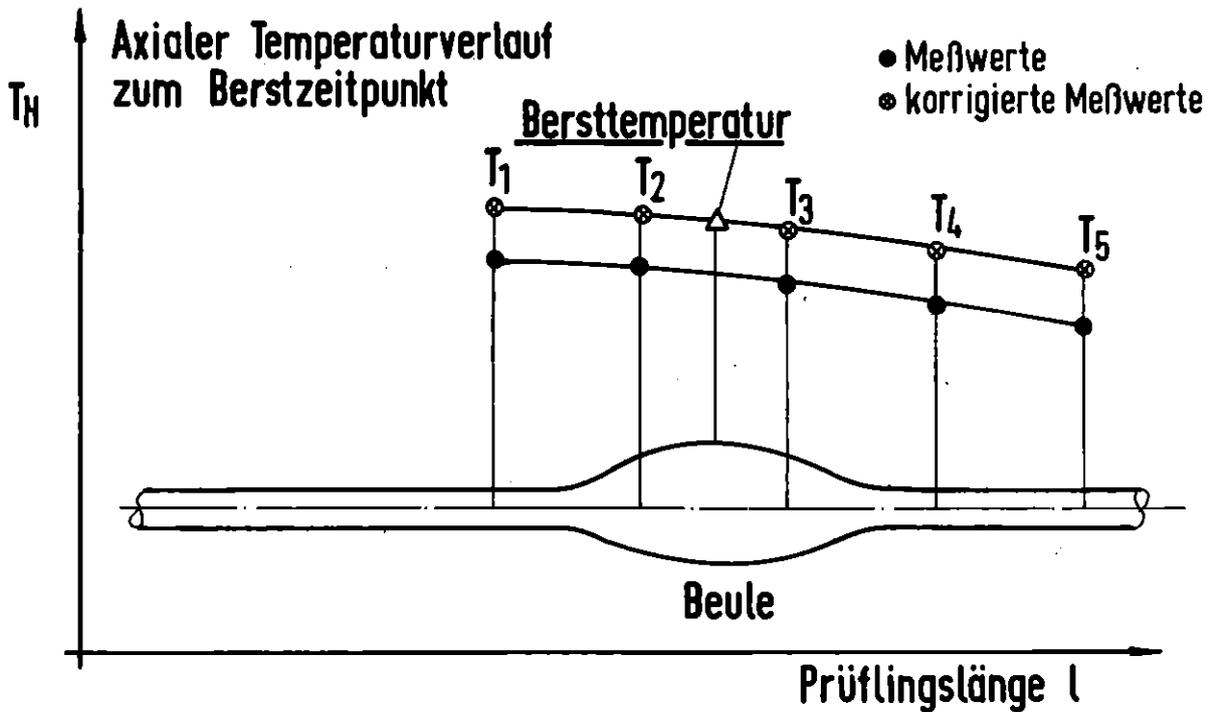
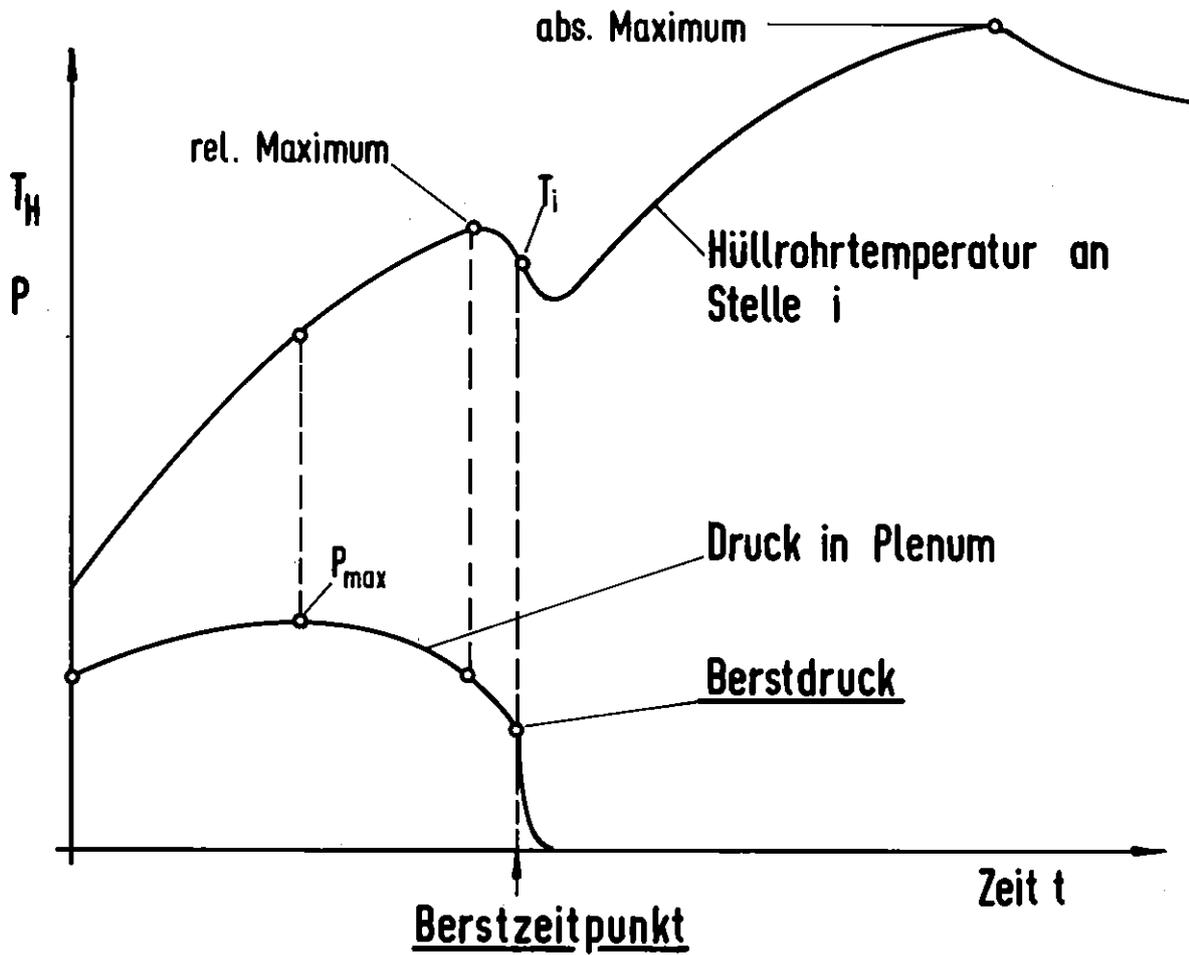


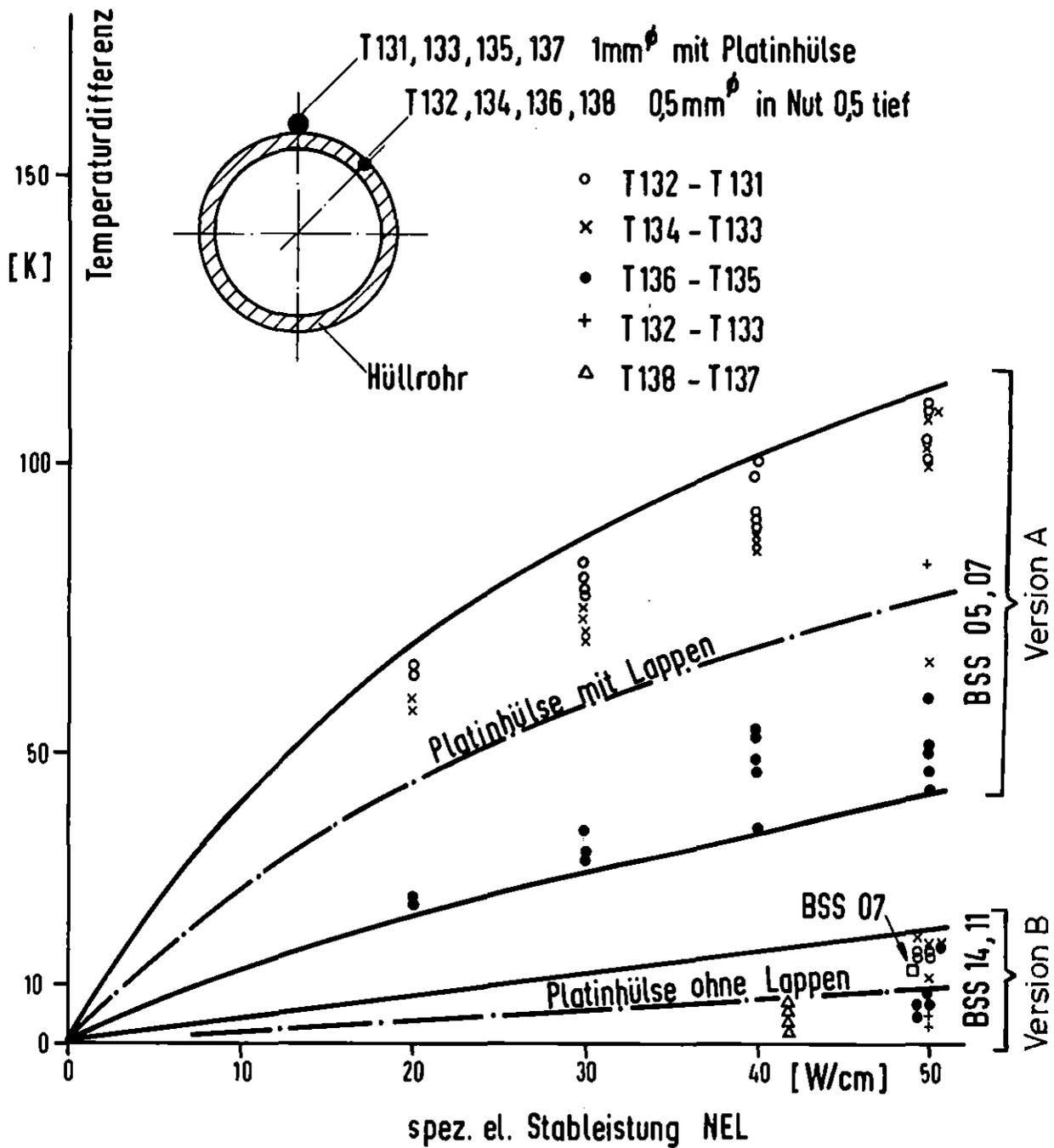
ABB.00032 01.06.77 ZEIT 13H33M38S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6



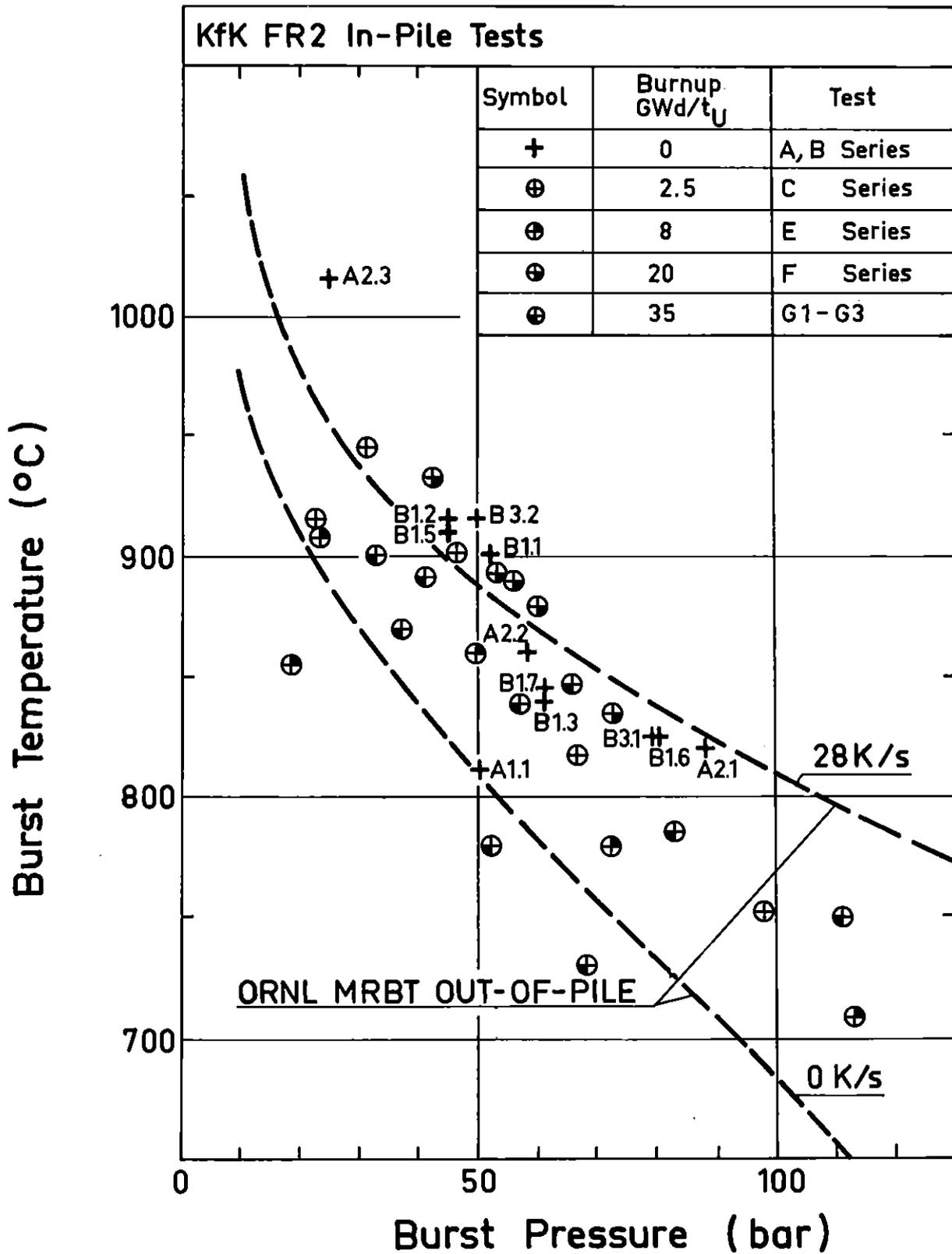
RBT/IT-1977  
PNS-4237-91.1

**Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck**

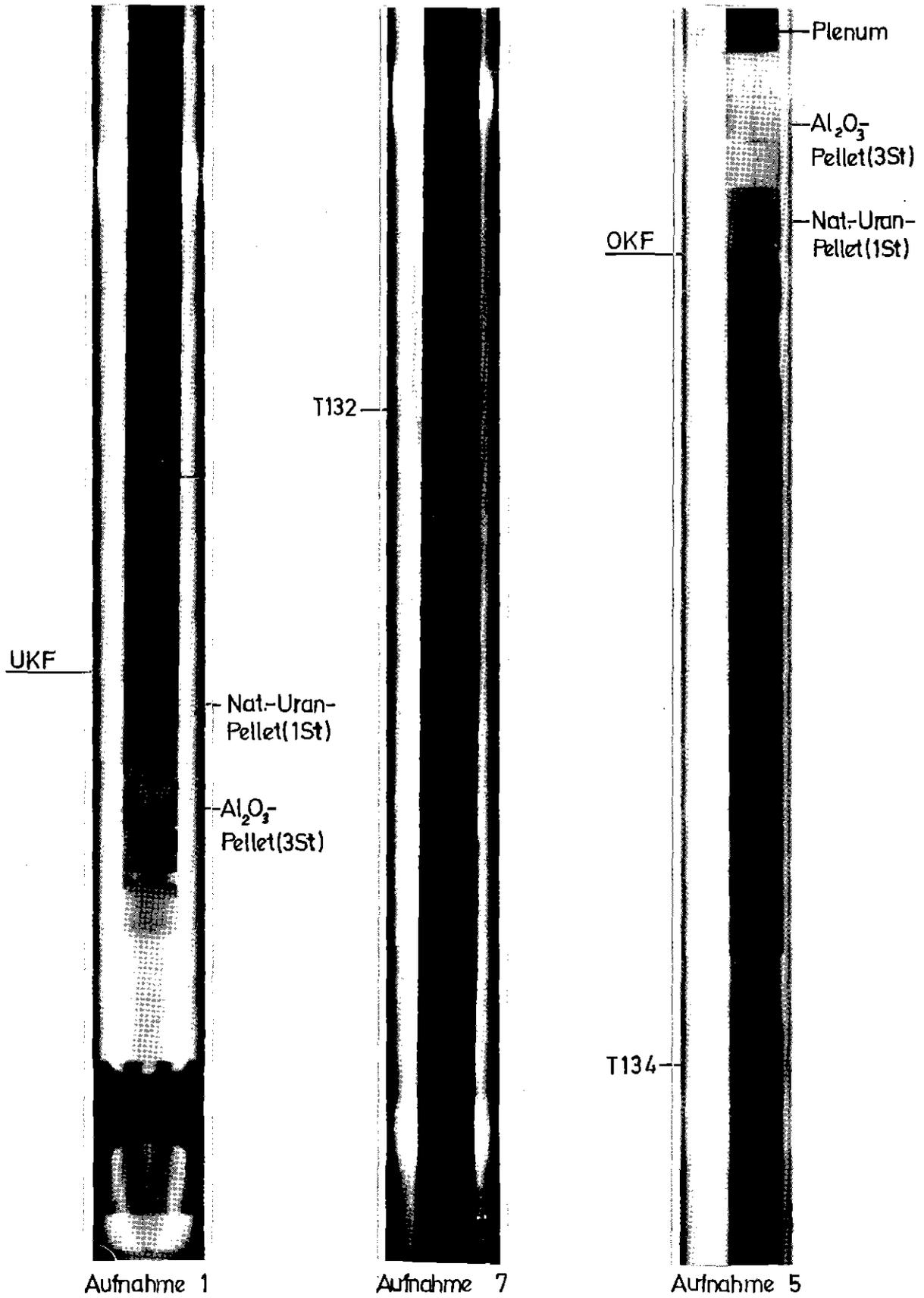
Abb.:12

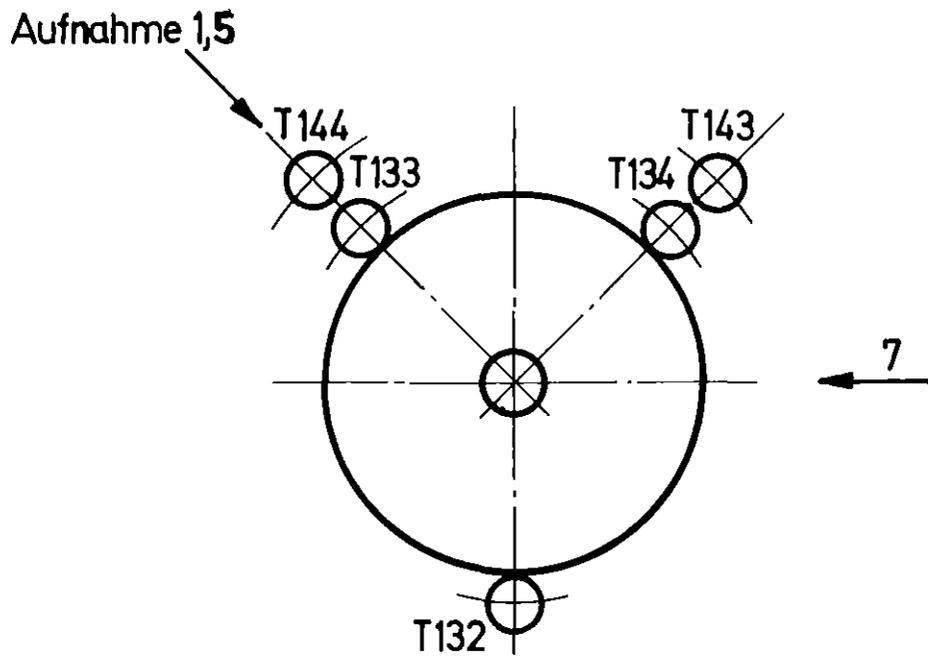


Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900°C (Transiente) Abb.: 13

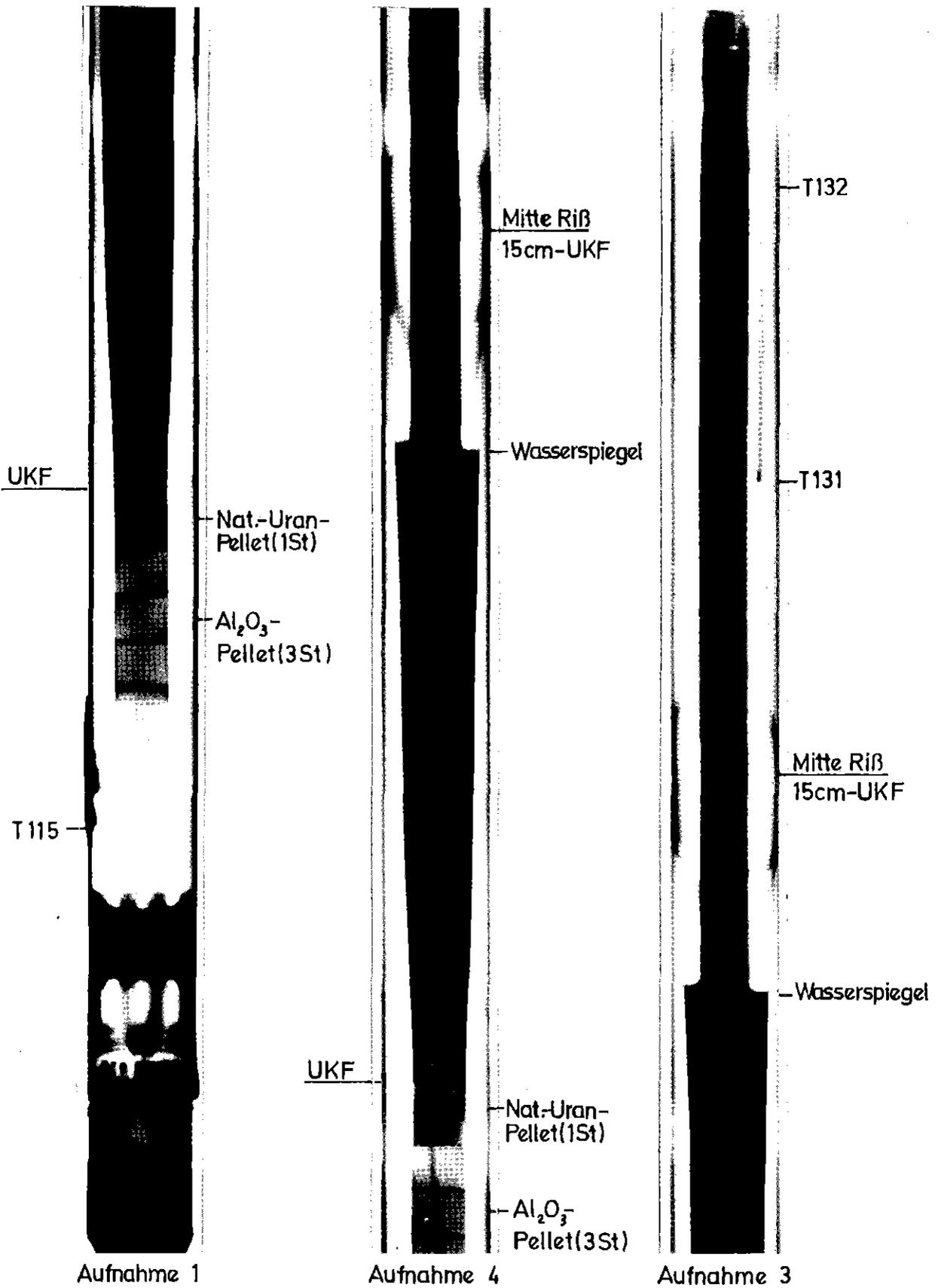


FR2 In-Pile Single Rod Test in Steam  
 Burst Temperature vs. Burst Pressure Abb:14





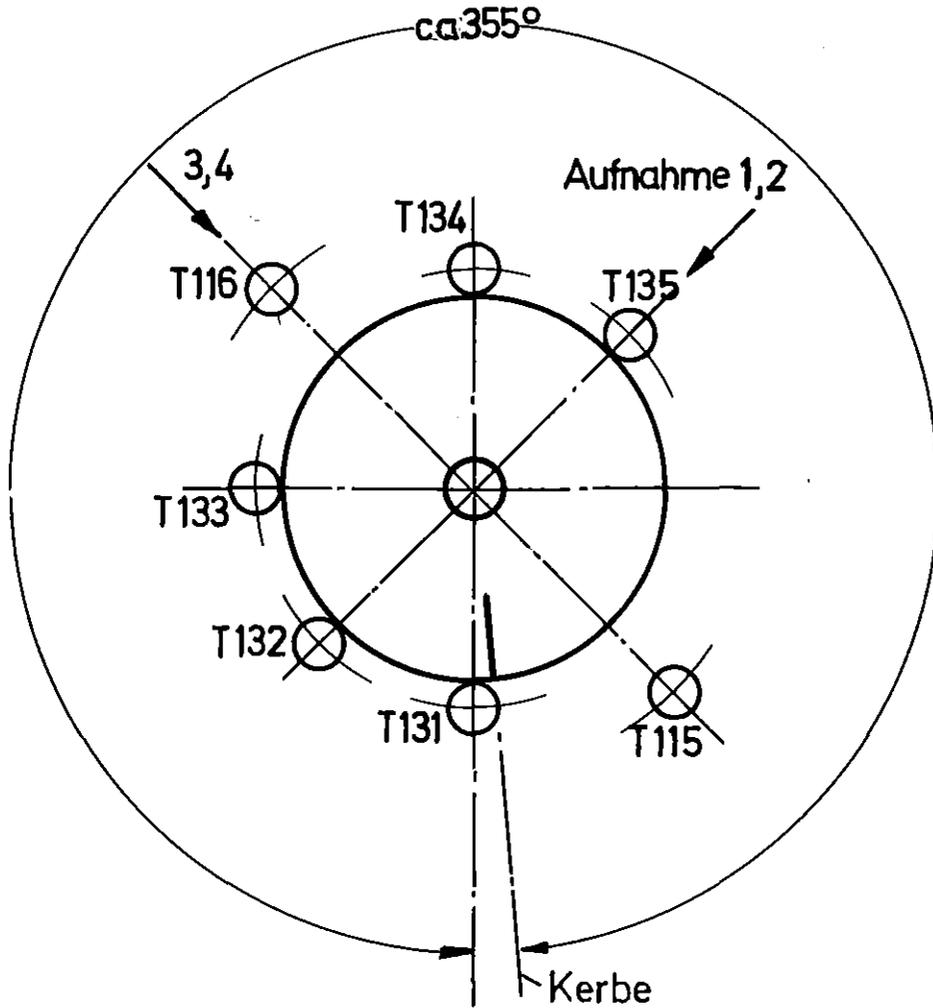
Ansicht von oben



**KTK** IT-80  
PNS4237-478.4

FR2 In-pile Versuche. A2.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

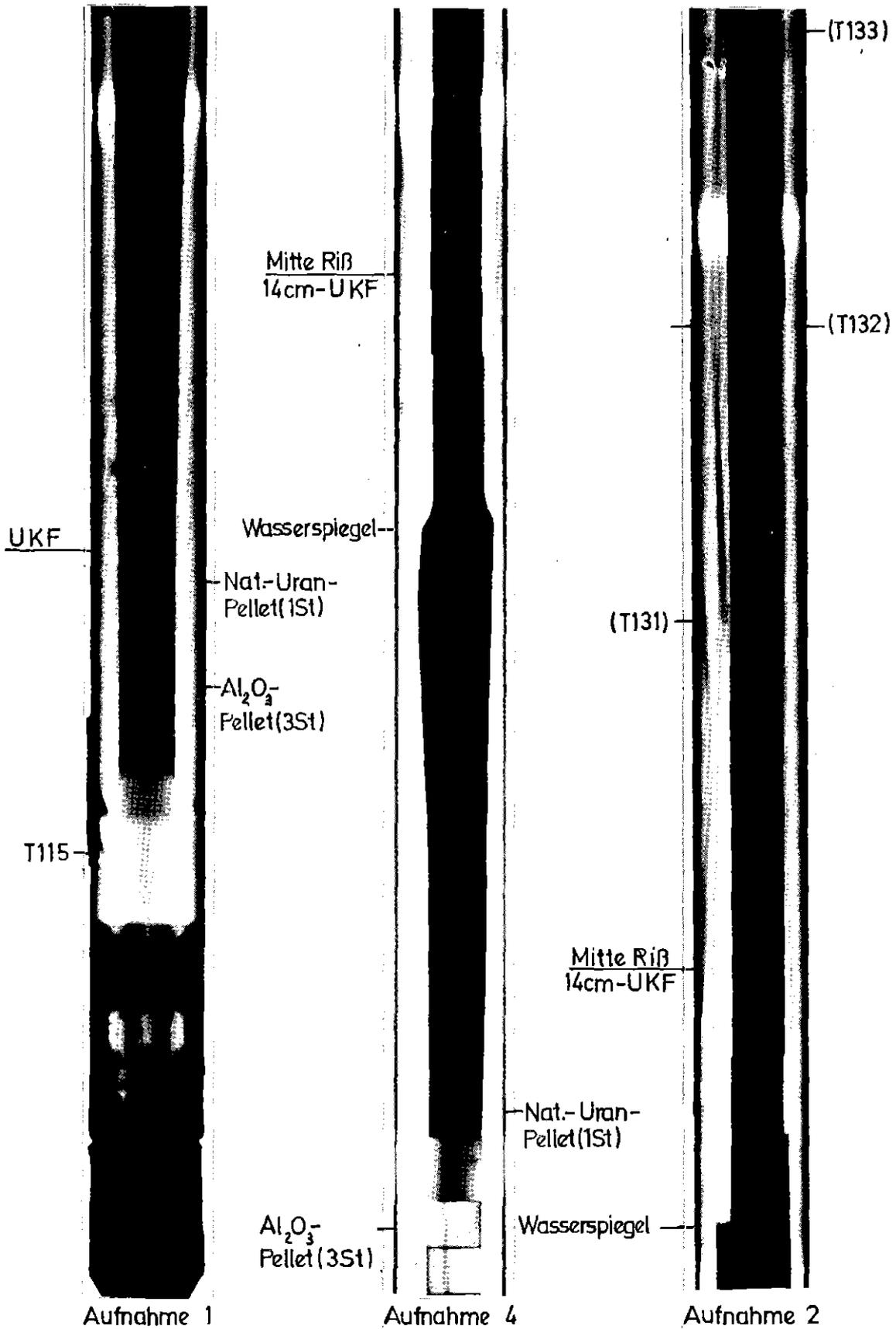
Abb.: 16.1



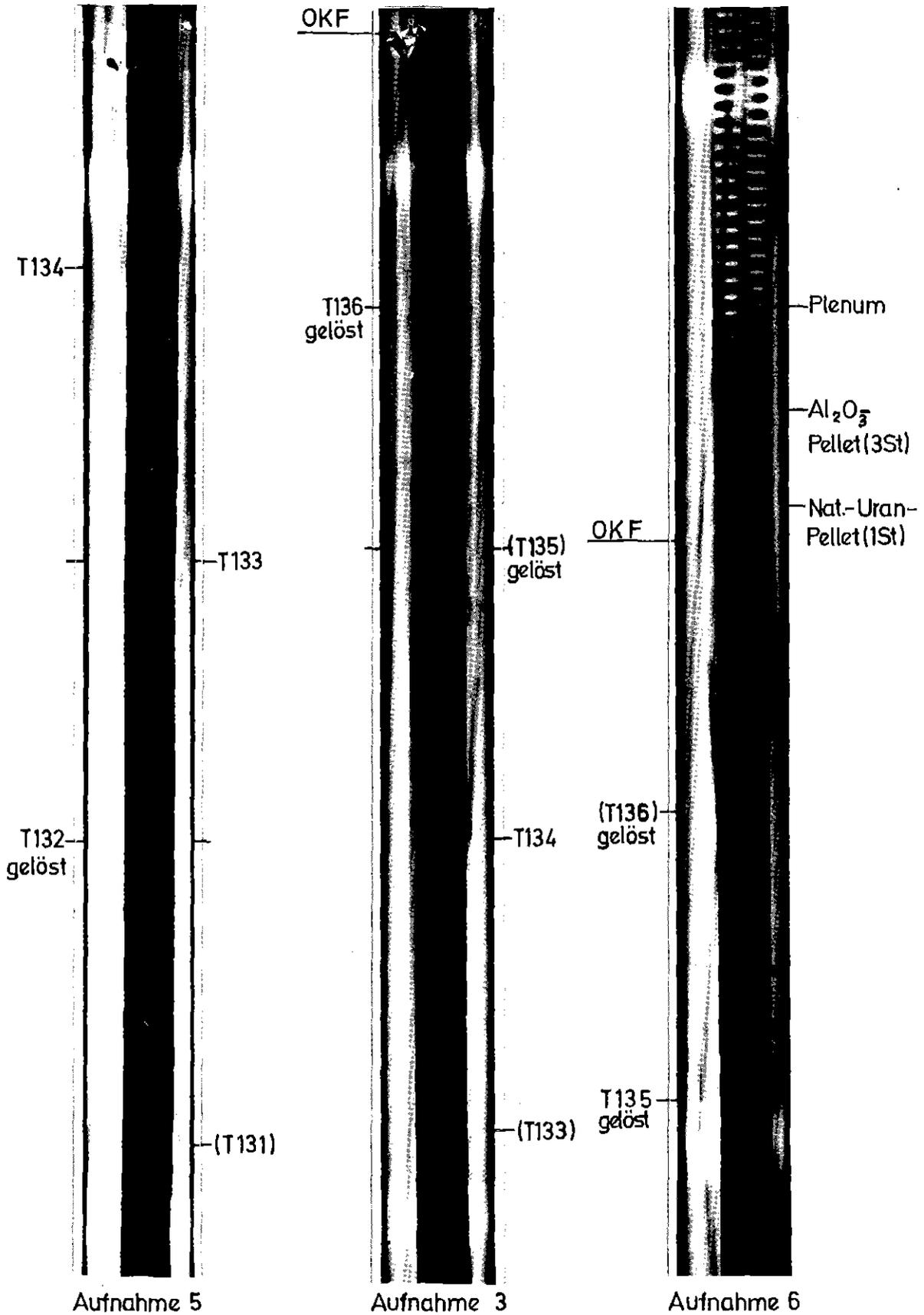
Ansicht von oben

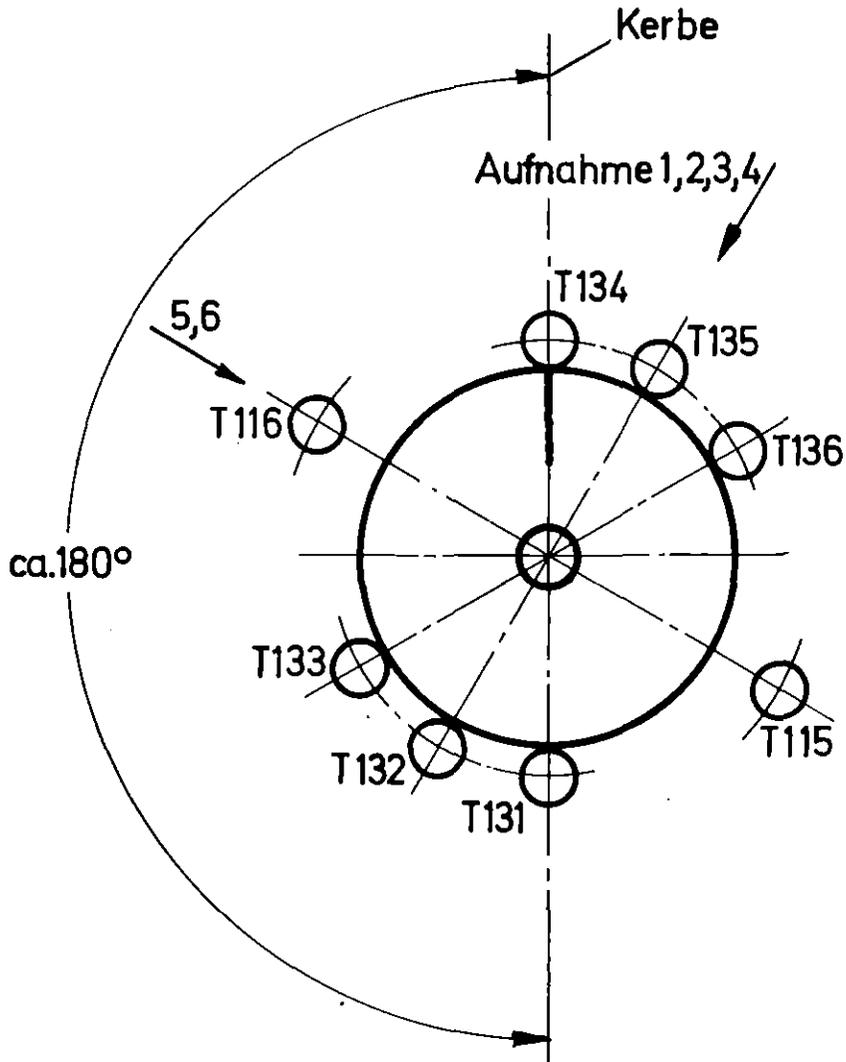
# FR2 In-pile Versuche. A2.2

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen. Abb.:16.2



KIK IT-80  
PNS4237-478.5



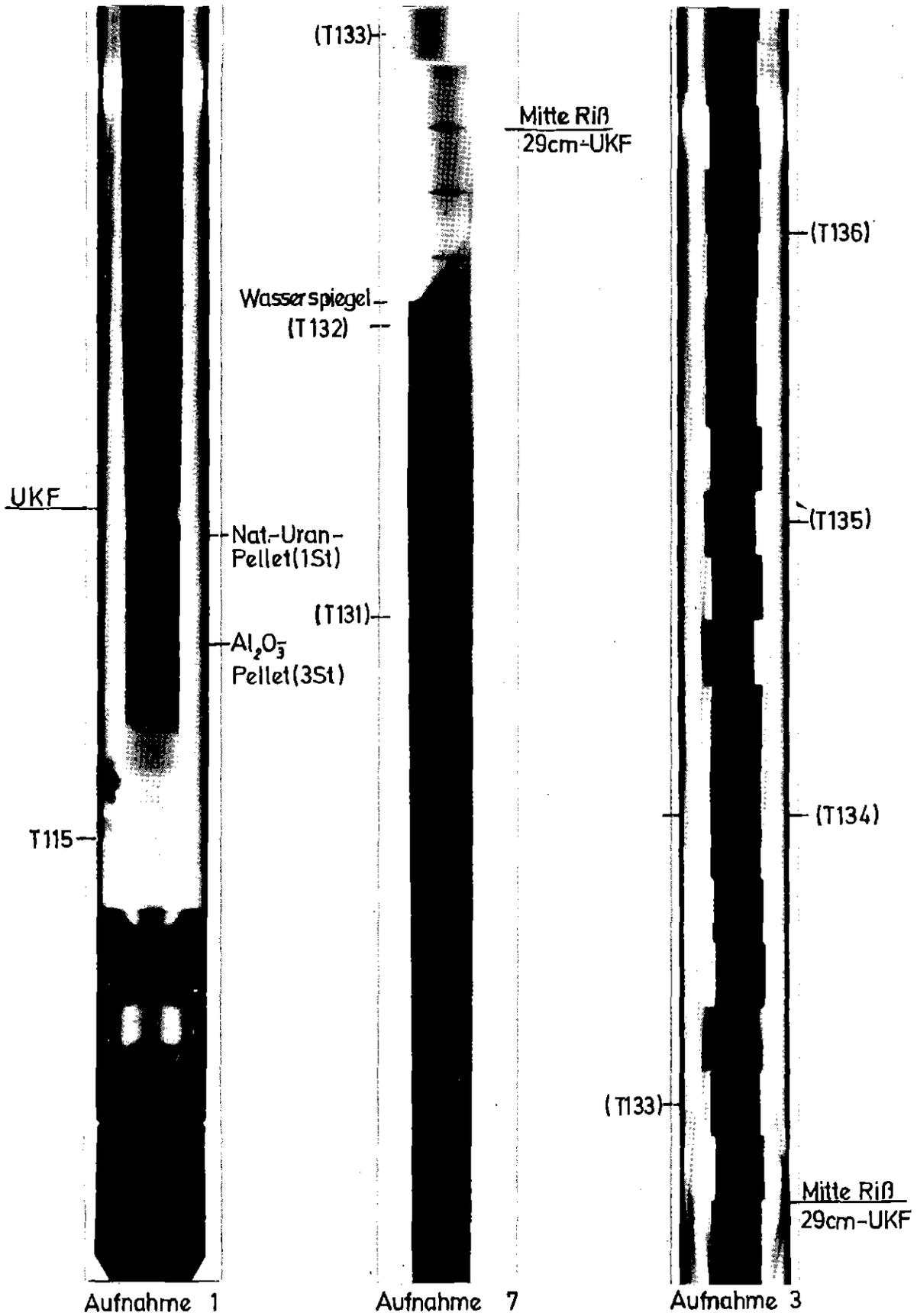


Ansicht von oben

# FR 2 In-pile Versuche. A2.3

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

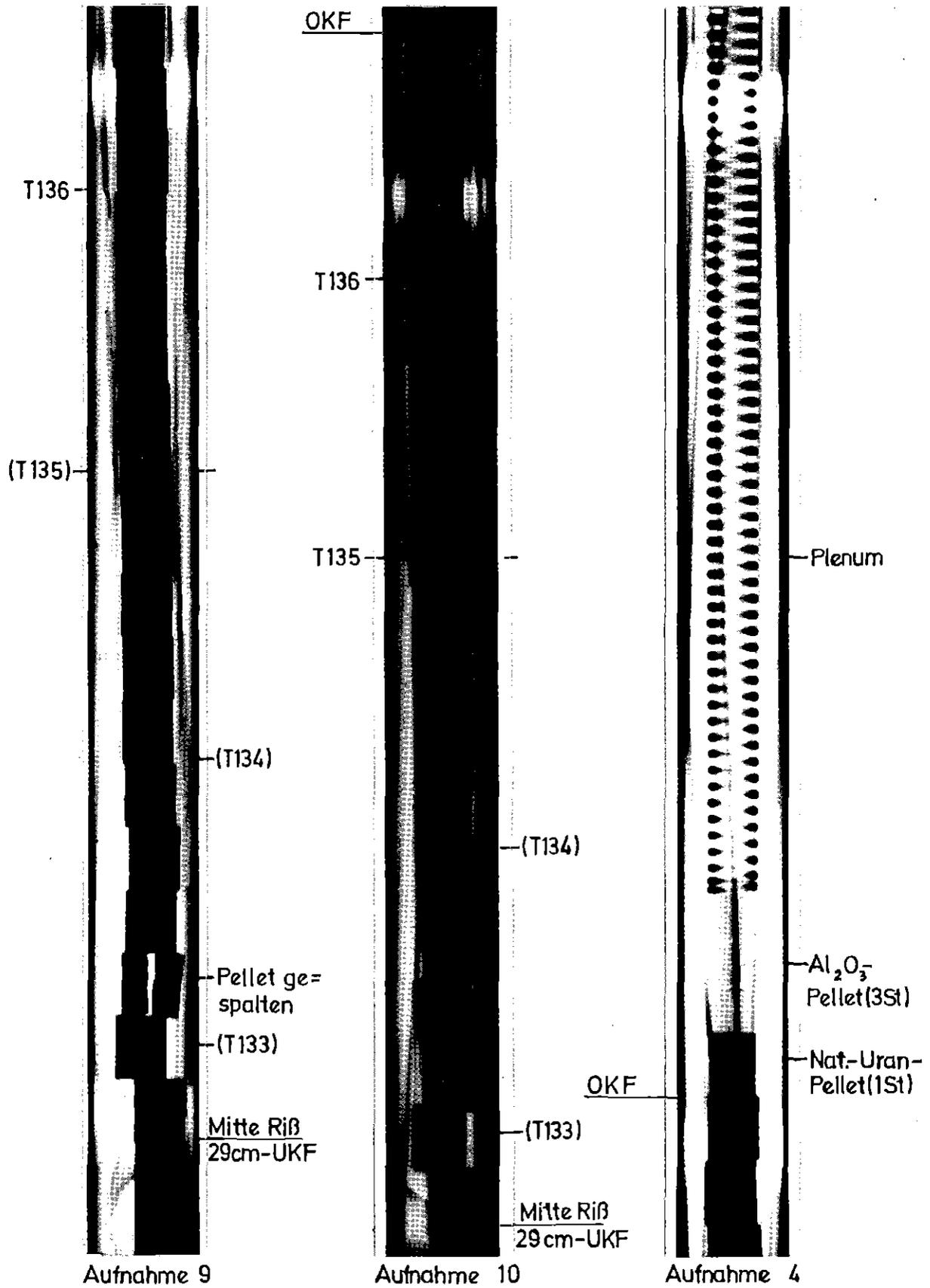
Abb.:17.3

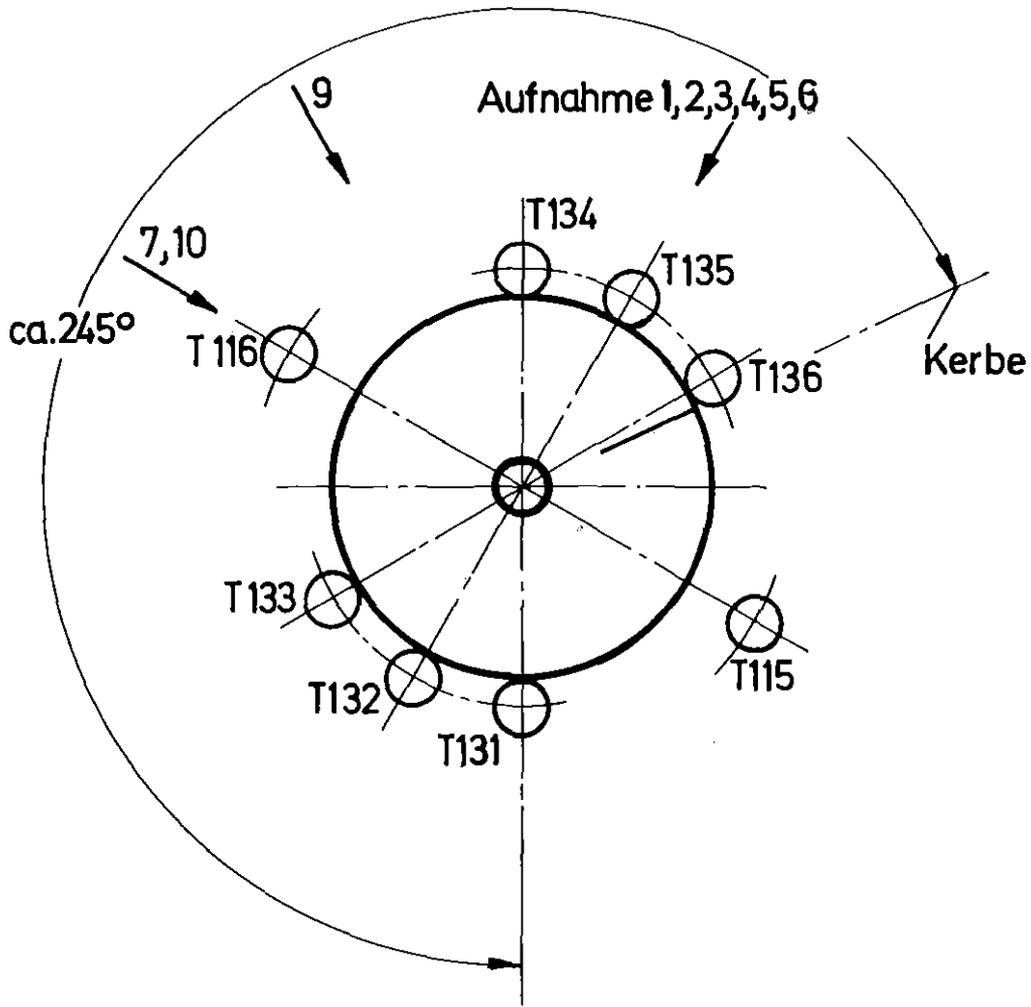


**KIK** IT-80  
PNS4237-478.6

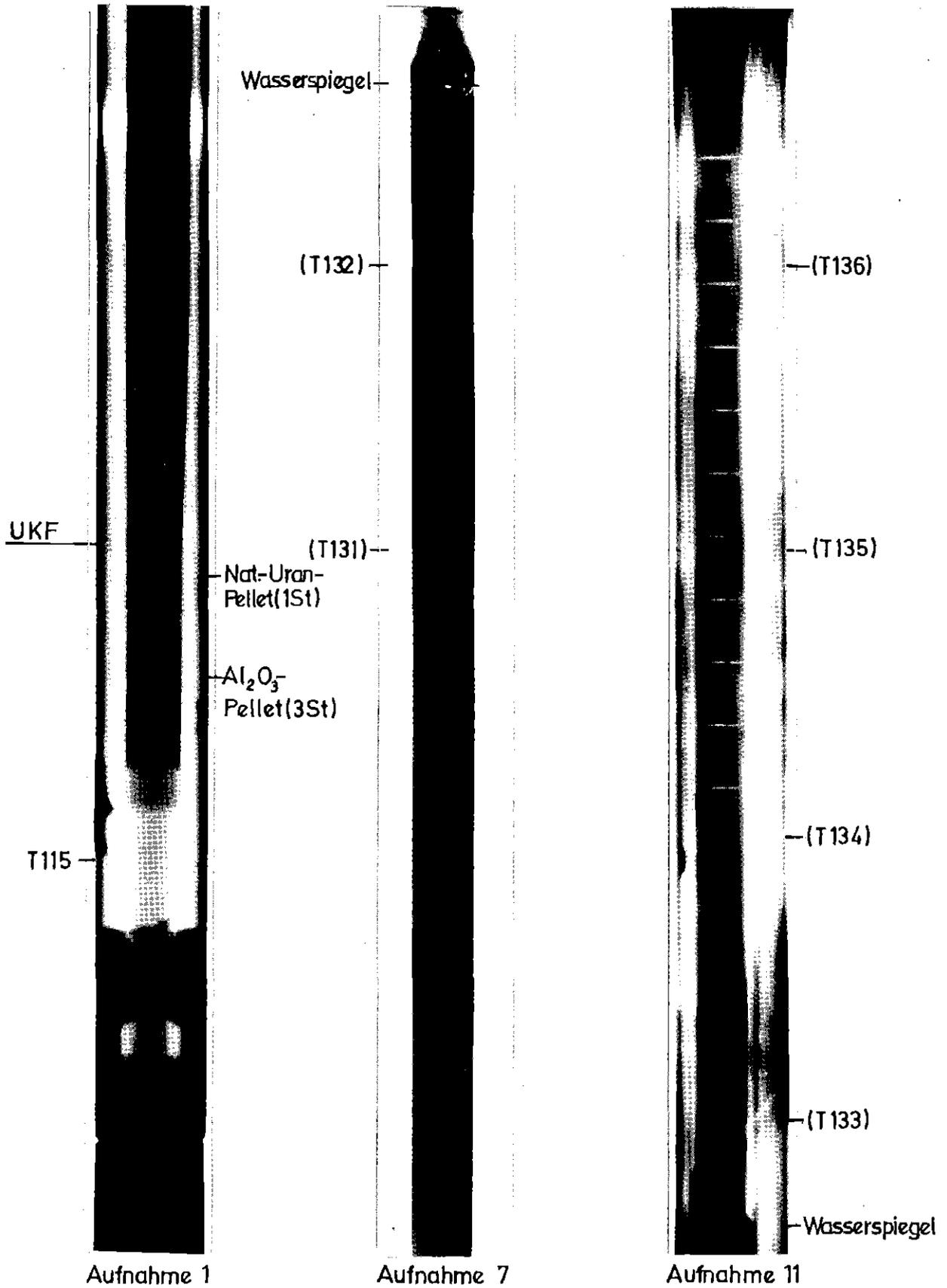
FR2 In-pile Versuche. B1.1  
Neutronenradiografie nach Versuch

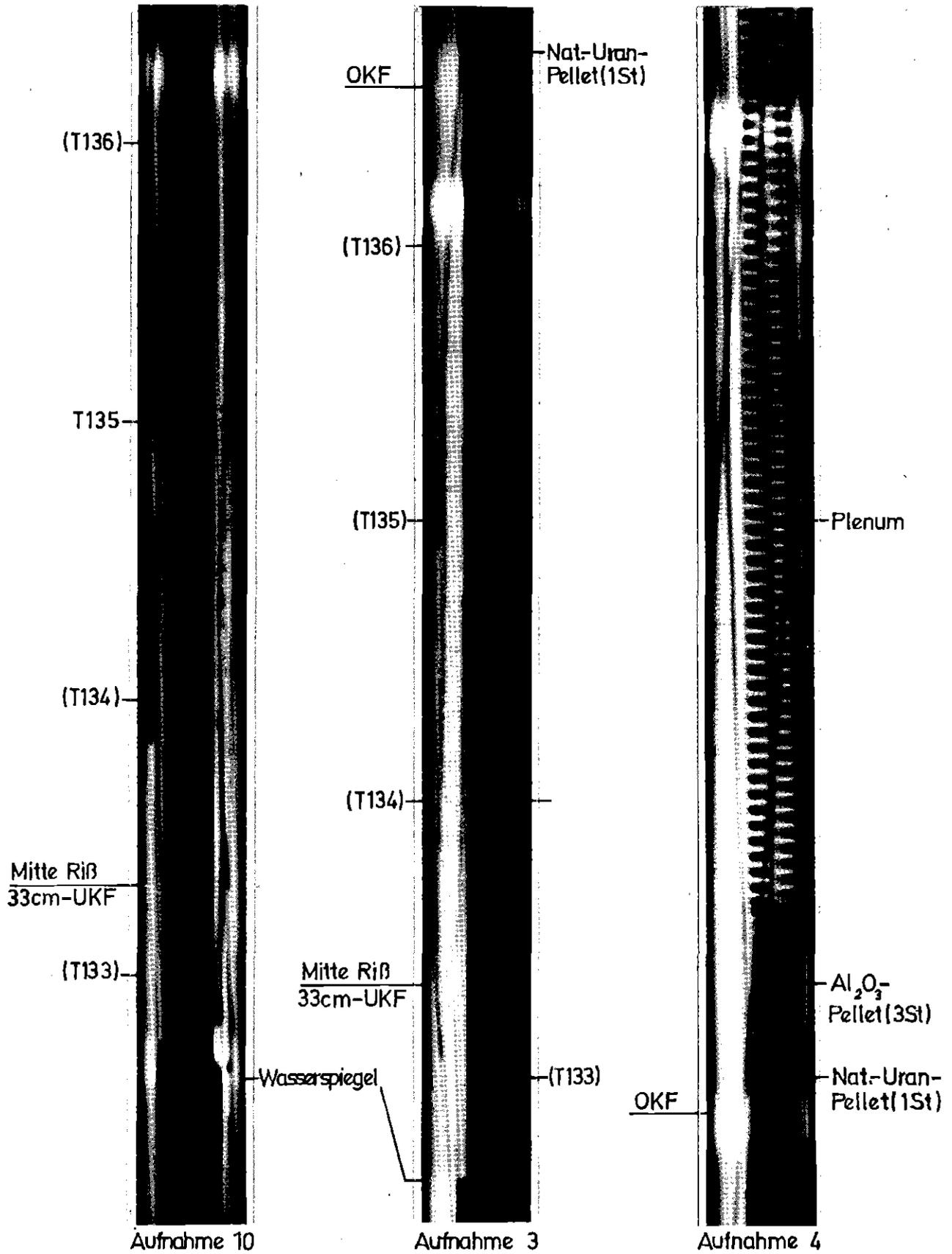
Bl. 1  
Abb.: 18.1



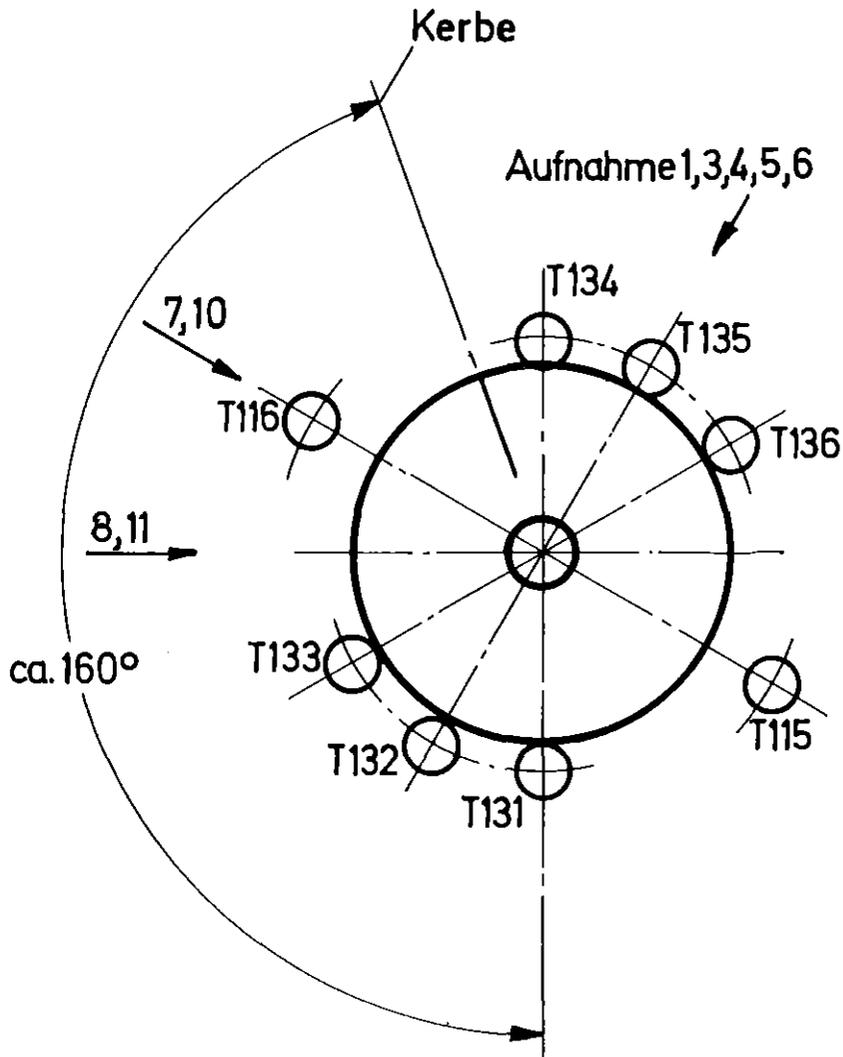


Ansicht von oben

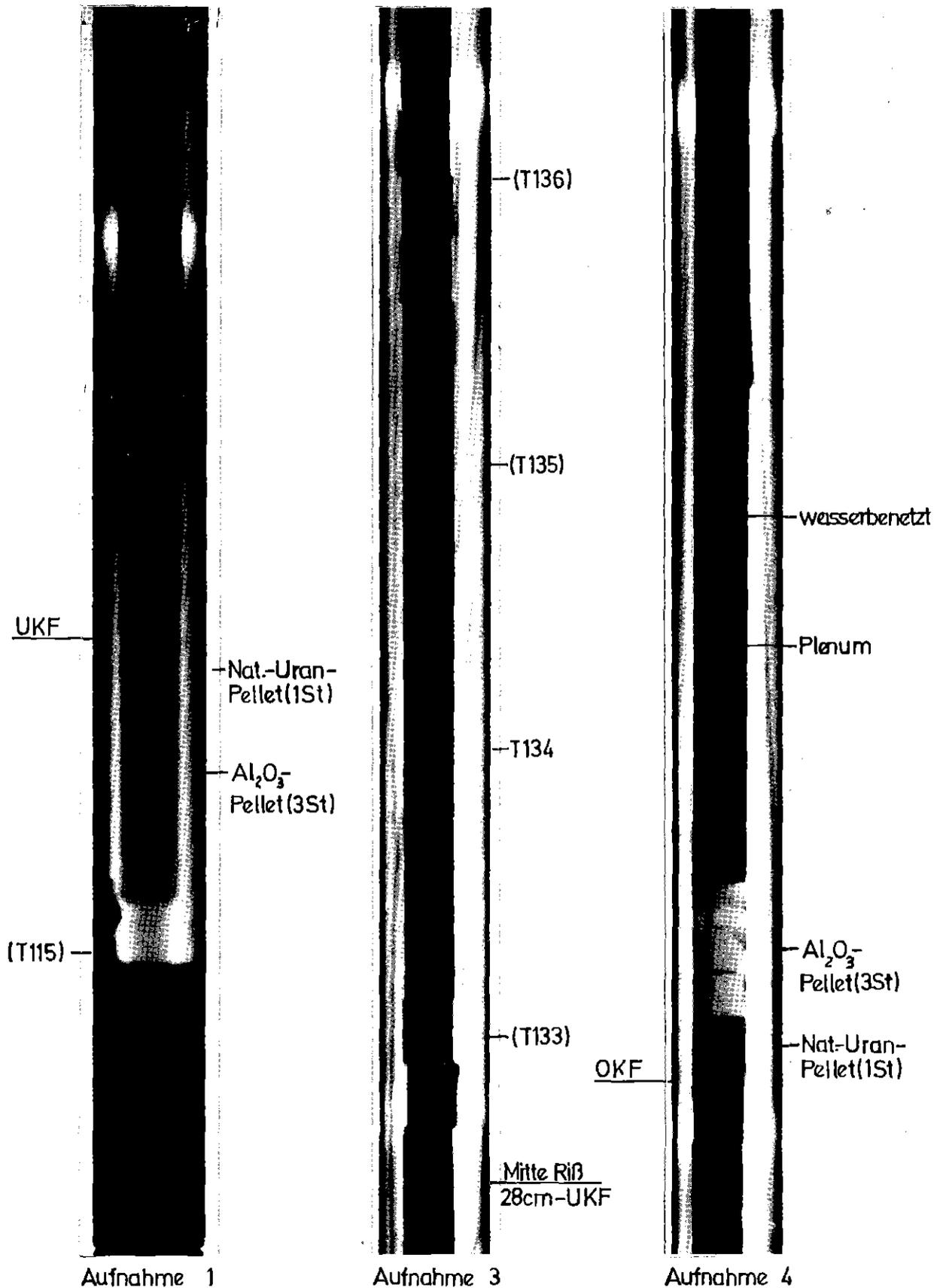




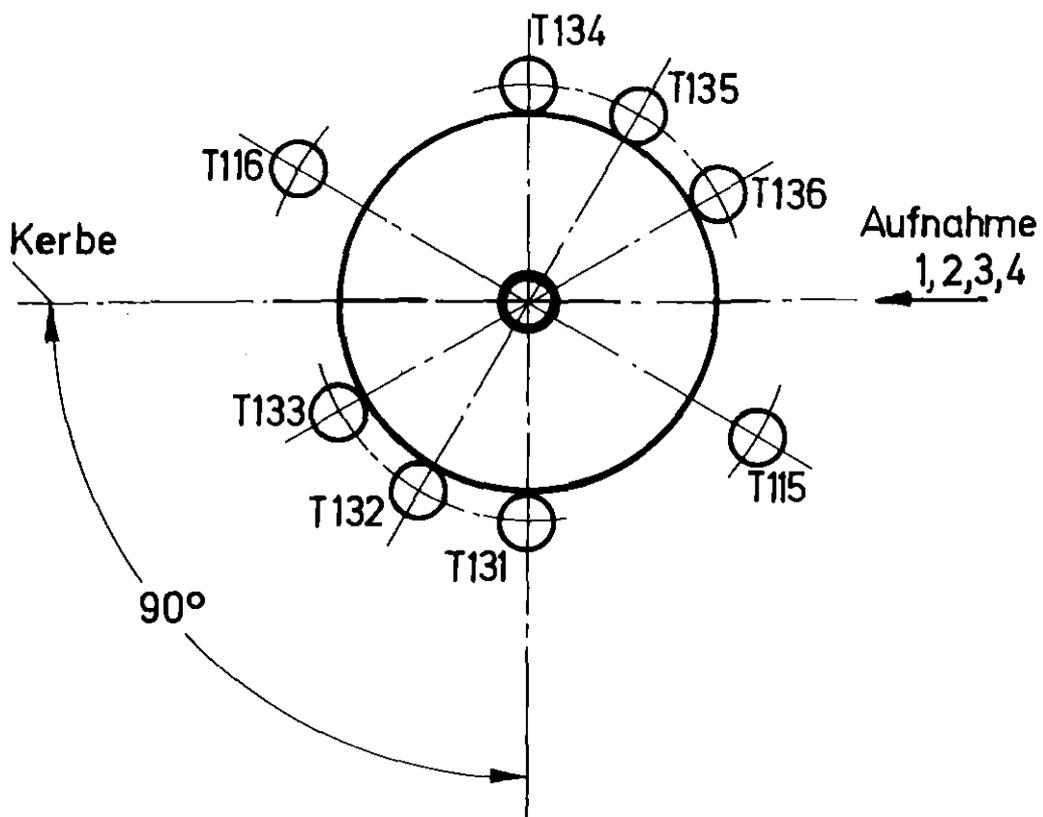
**KfK** IT-80  
PNS4237-478.7



Ansicht von oben



KfK  
IT-80  
PNS4237-478.8



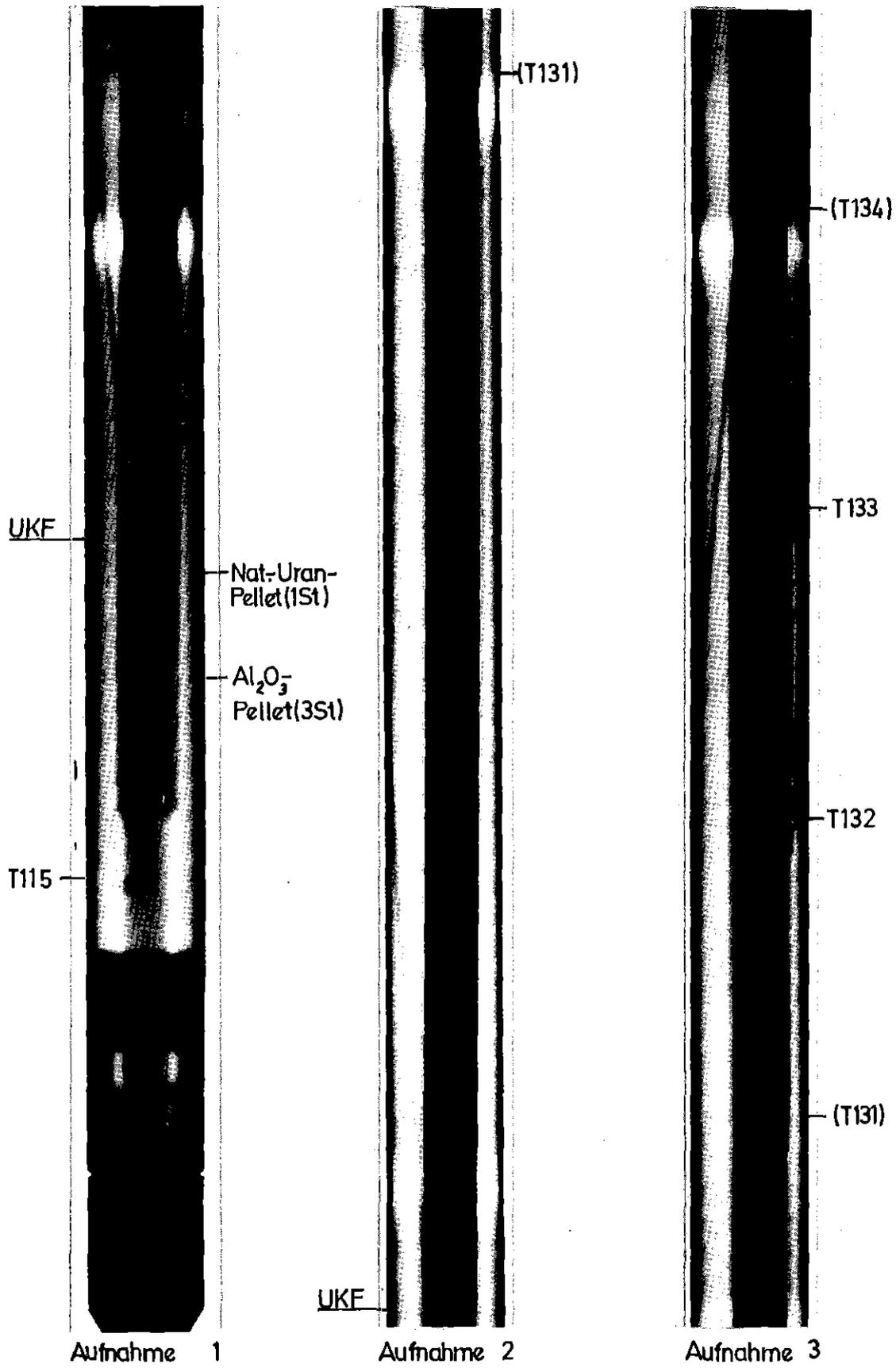
Ansicht von oben

**KfK** T-80  
PNS4237-476.8

# FR 2 In-pile Versuche. B1.3

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

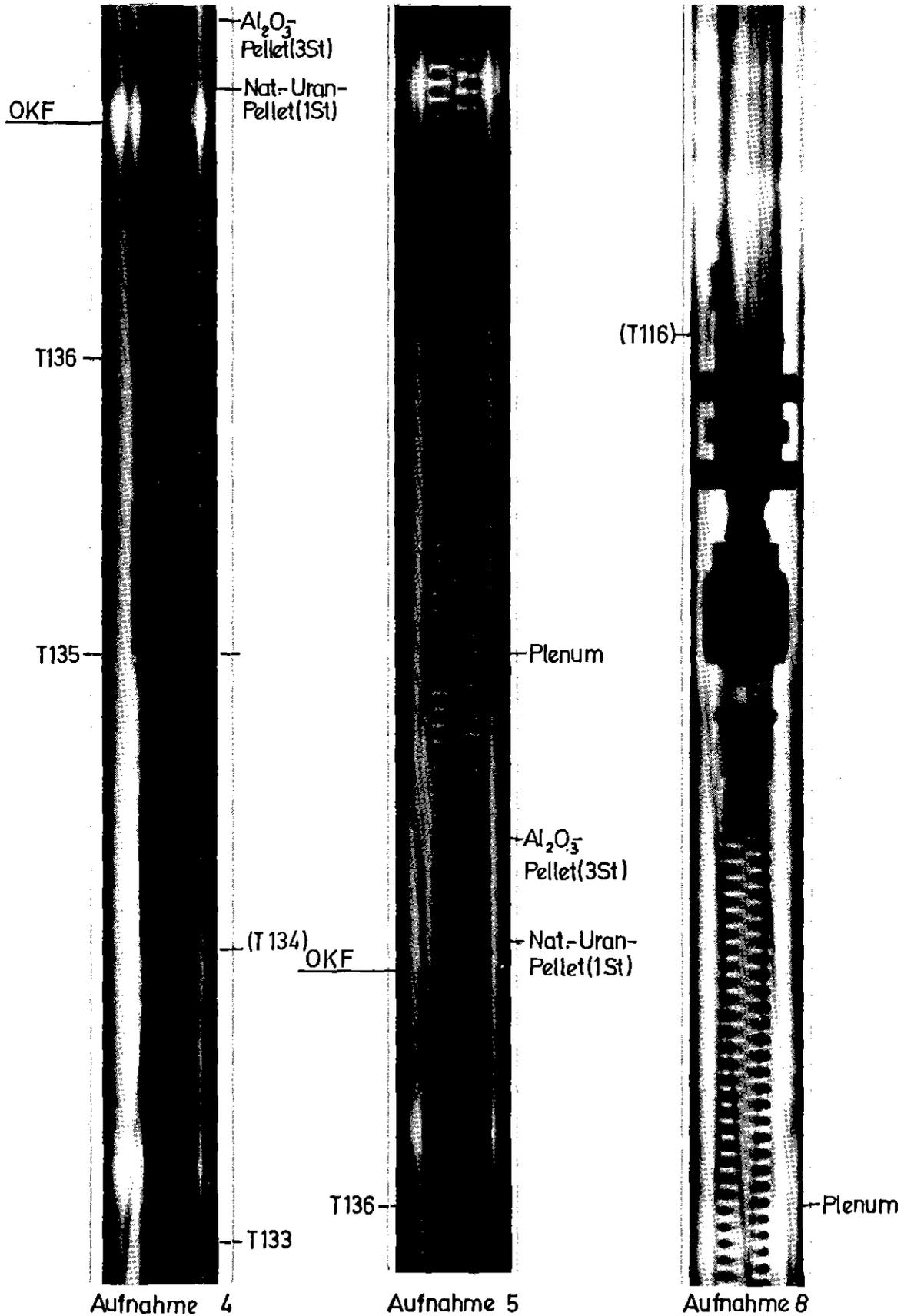
Abb.: 20.2



**KfK** IT-80  
PNS4237-478.9

FR2 In-pile Versuche. B1.4  
Neutronenradiografie nach Versuch

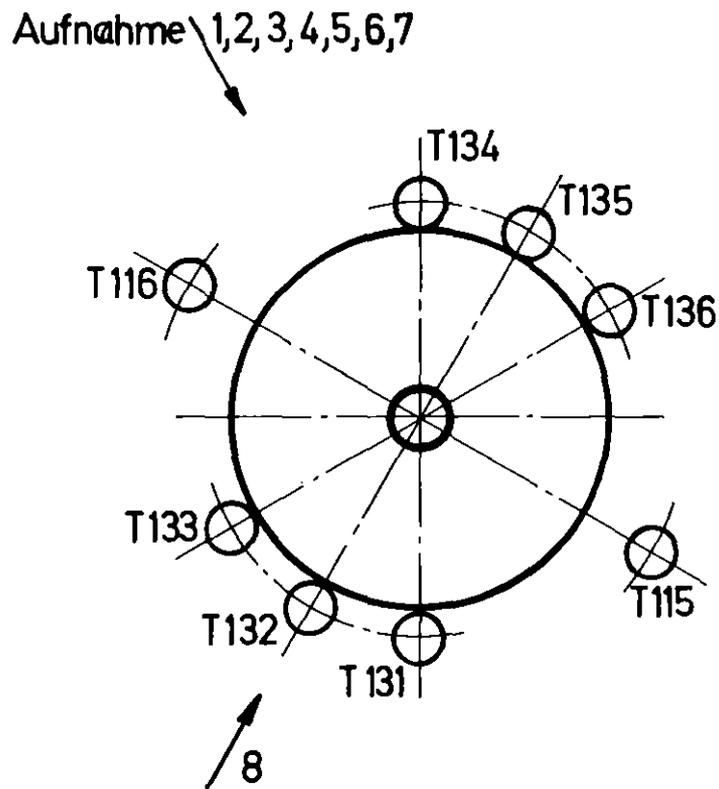
B1.1  
Abb.:21.1



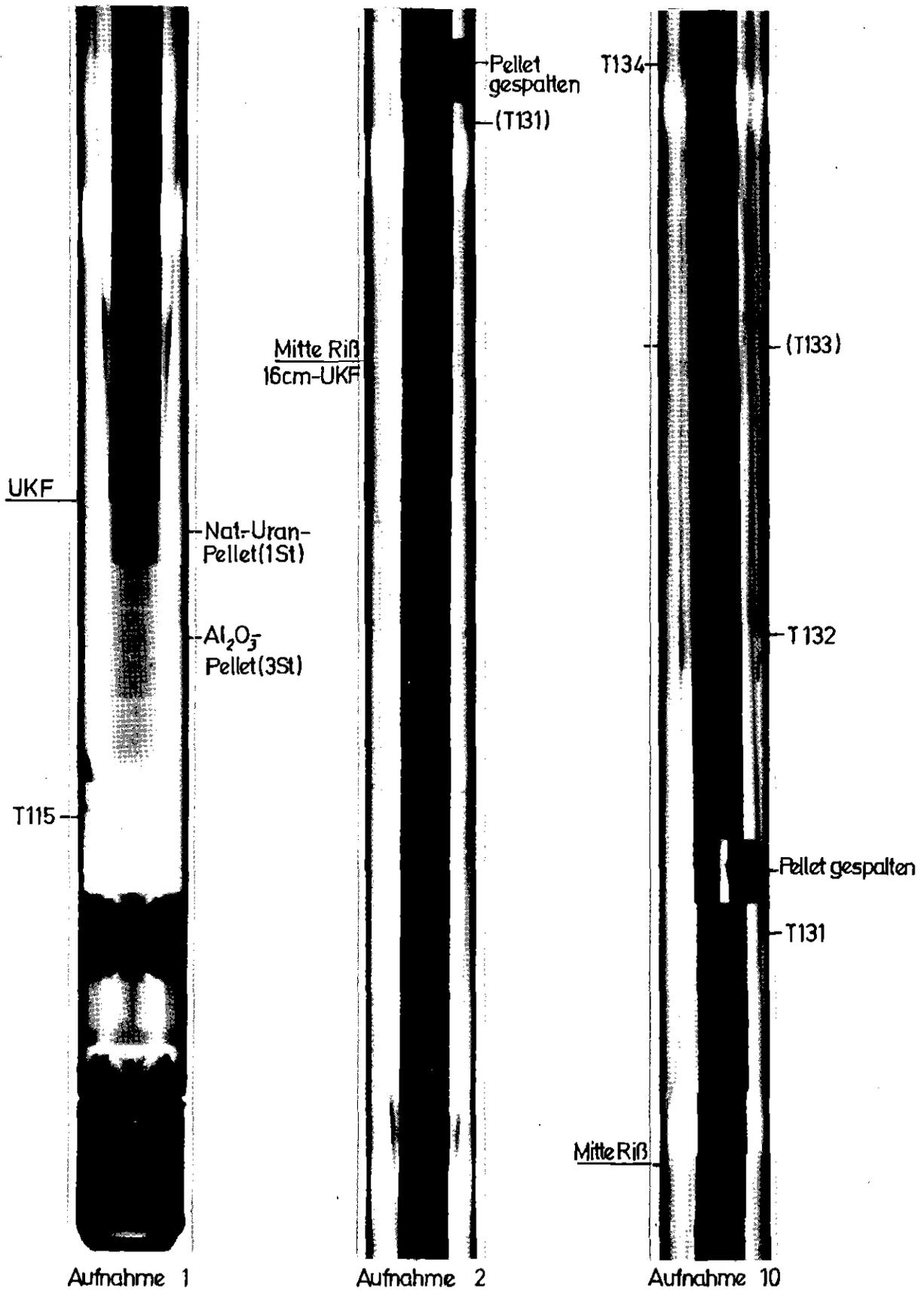
KfK  
IT-80  
PNS4237-478.9

FR2 In-pile Versuche. B1.4  
Neutronenradiografie nach Versuch

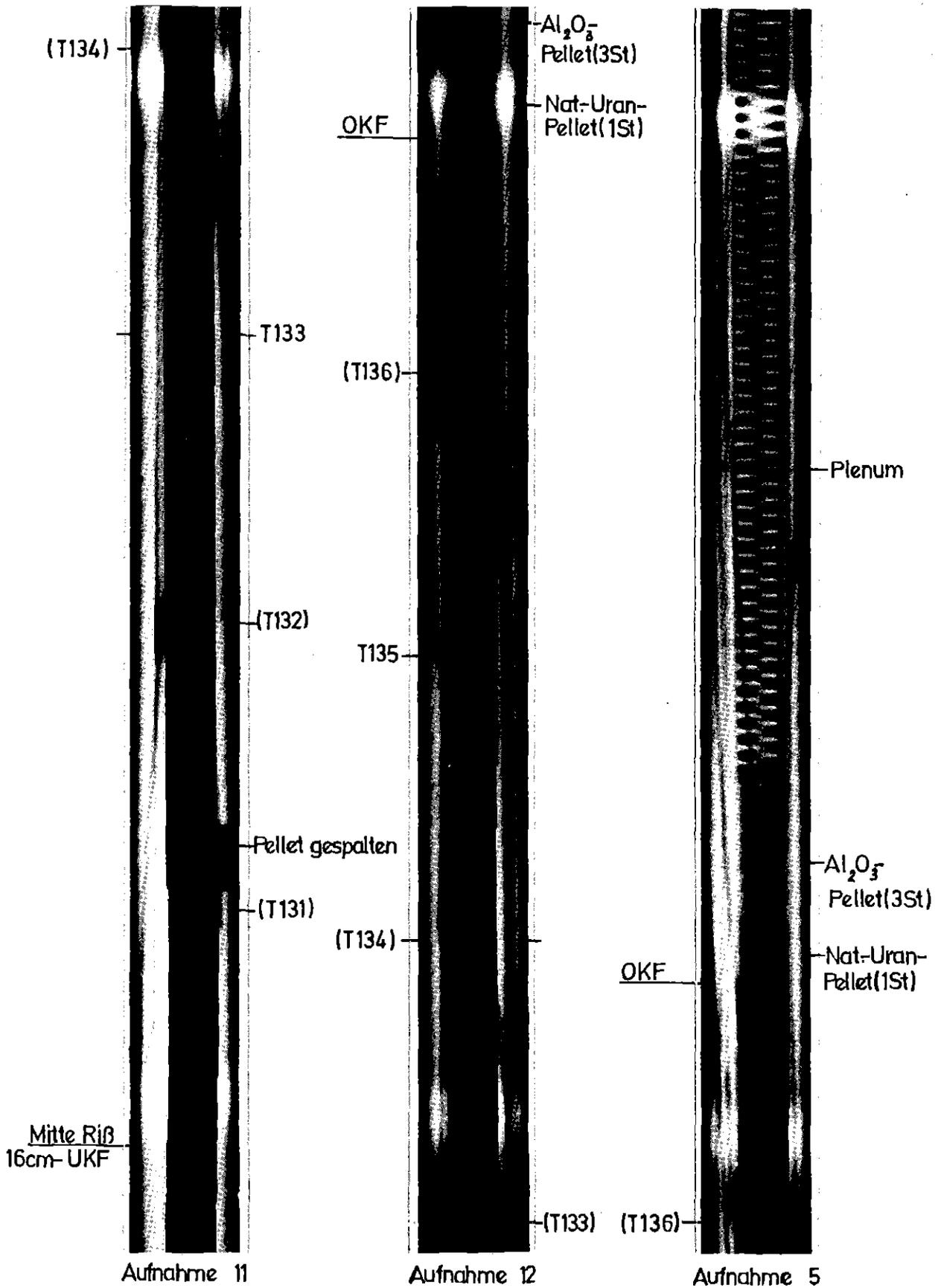
B1.2  
Abb.:21.2



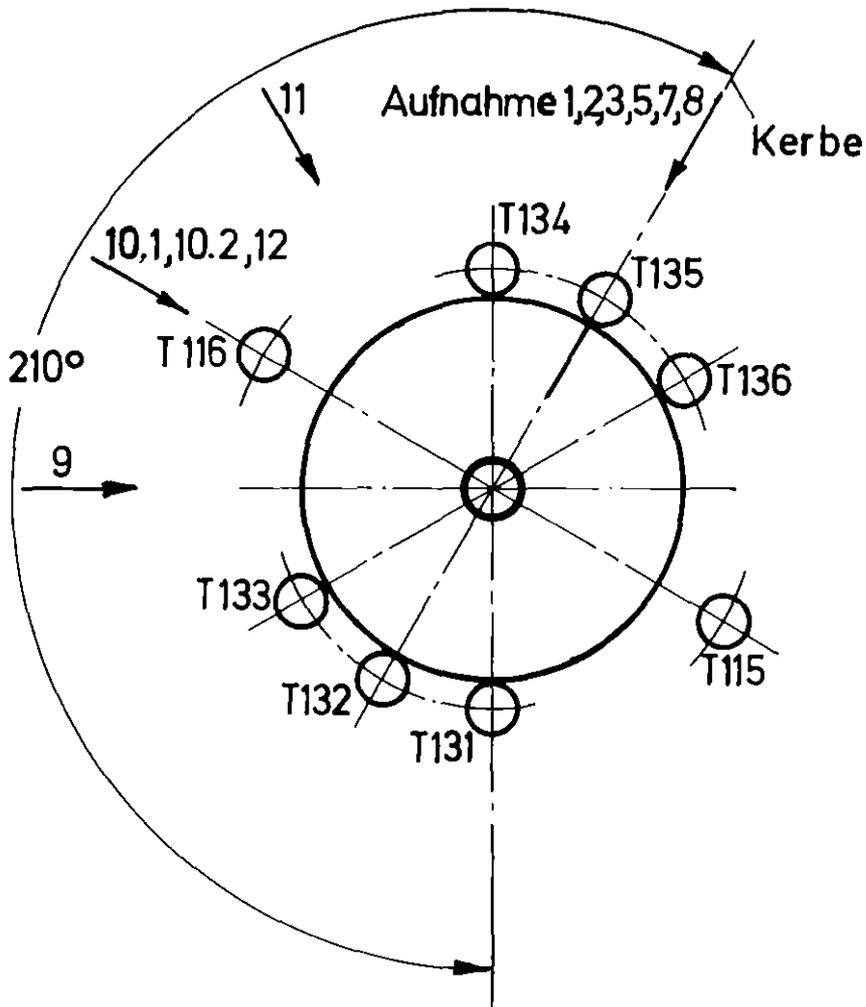
Ansicht von oben



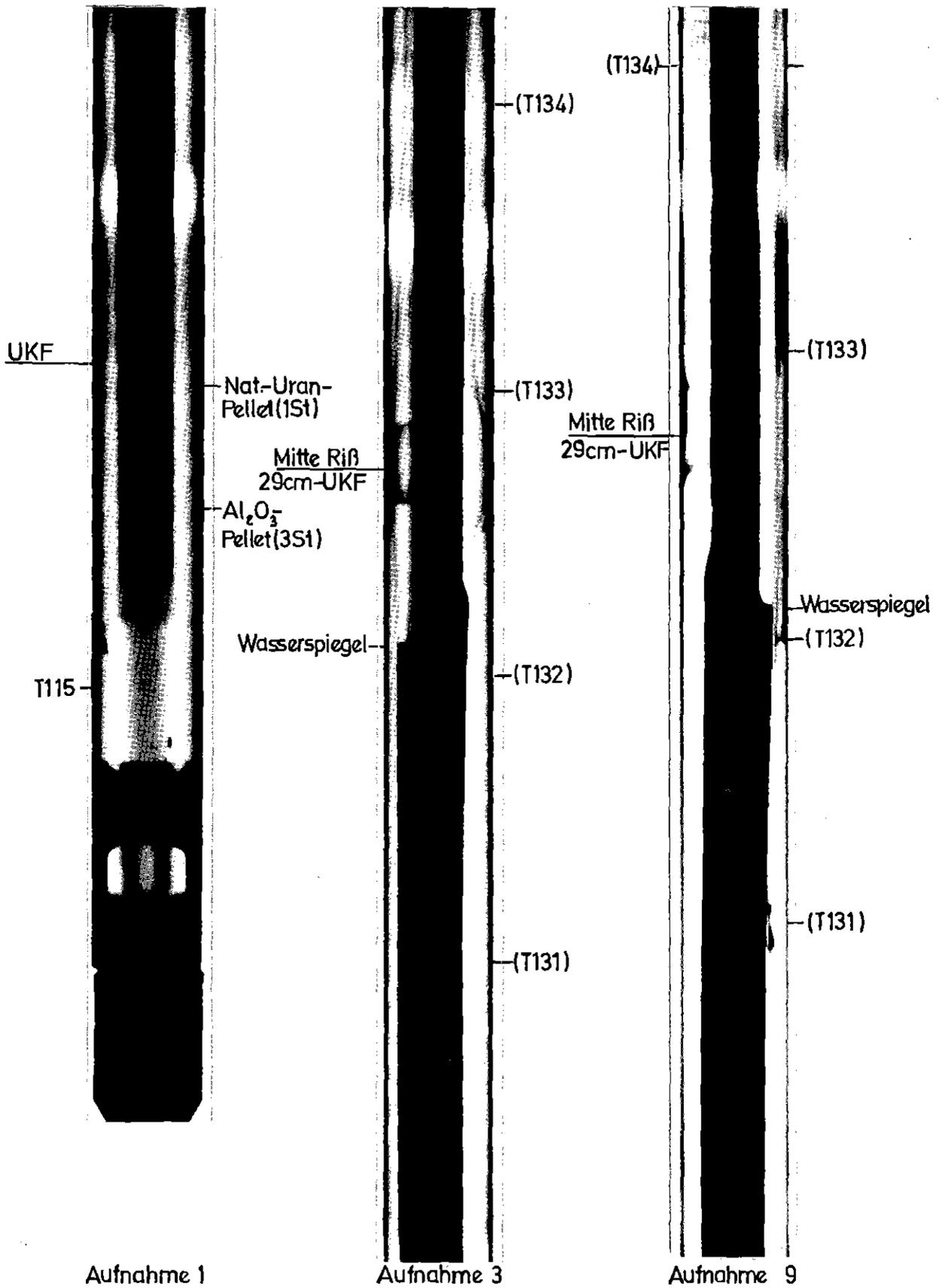
**KIK** IT-80  
PNS4237-478.10

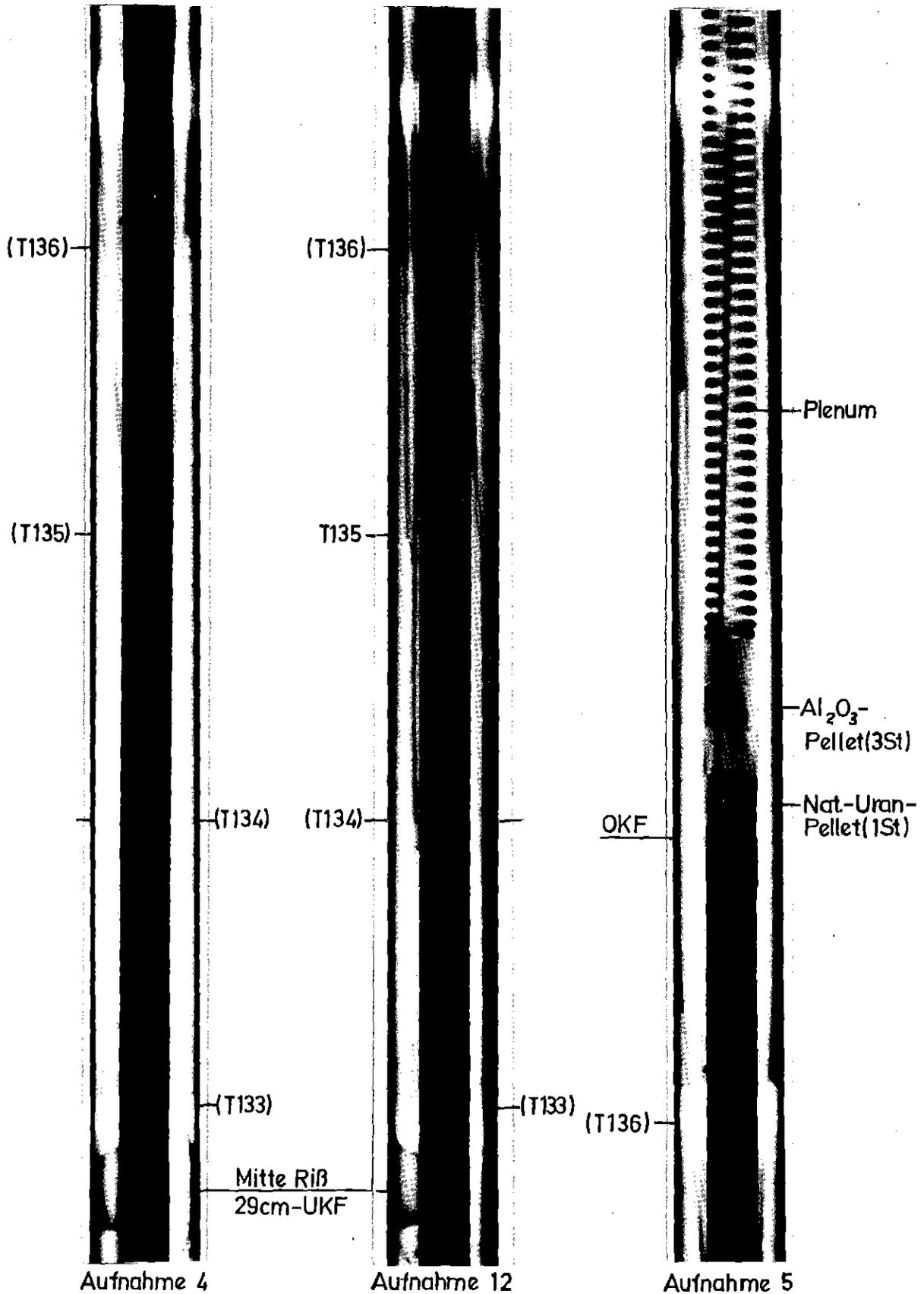


**KfK** IT-80  
PNS4237-478.10

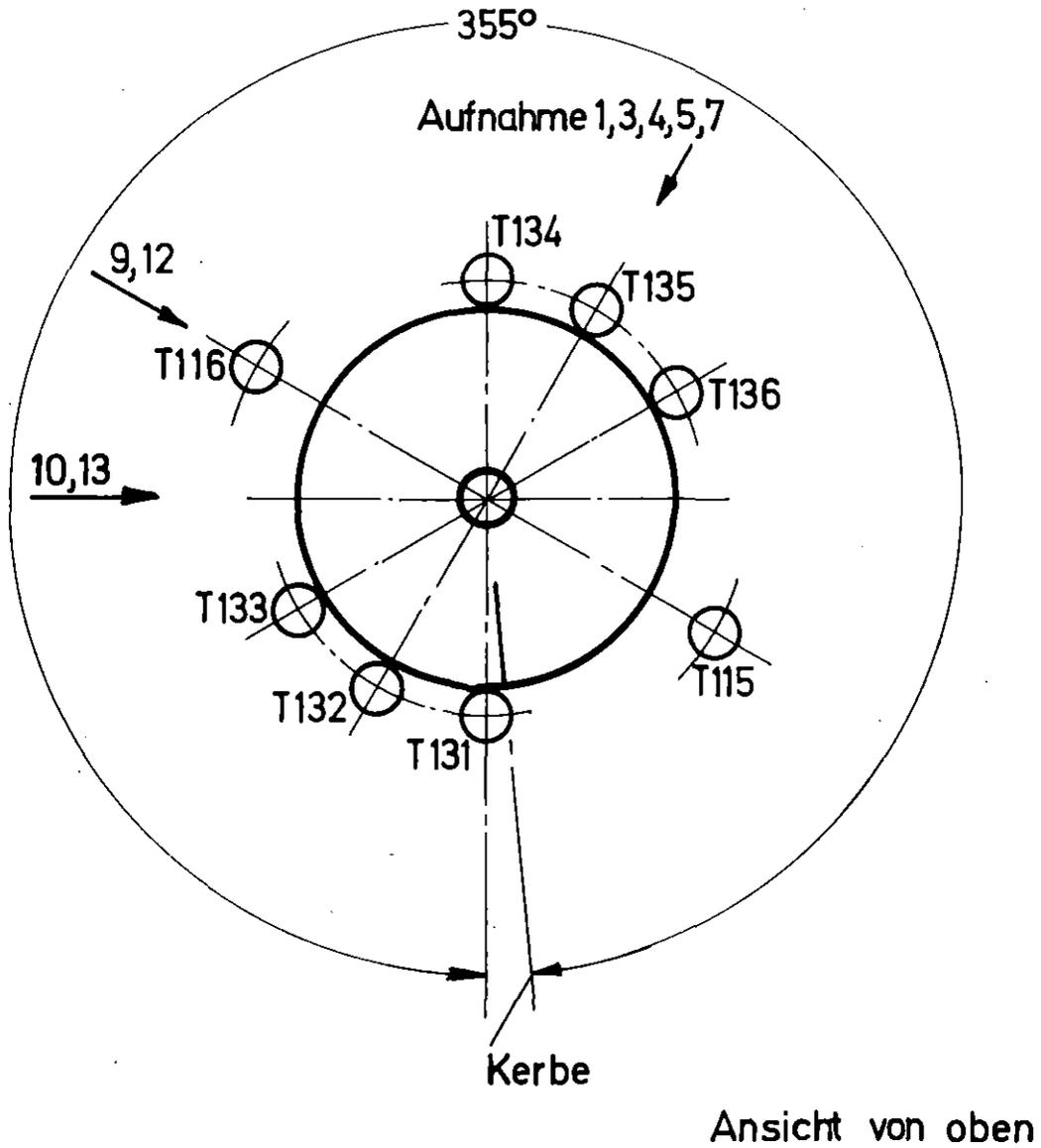


Ansicht von oben





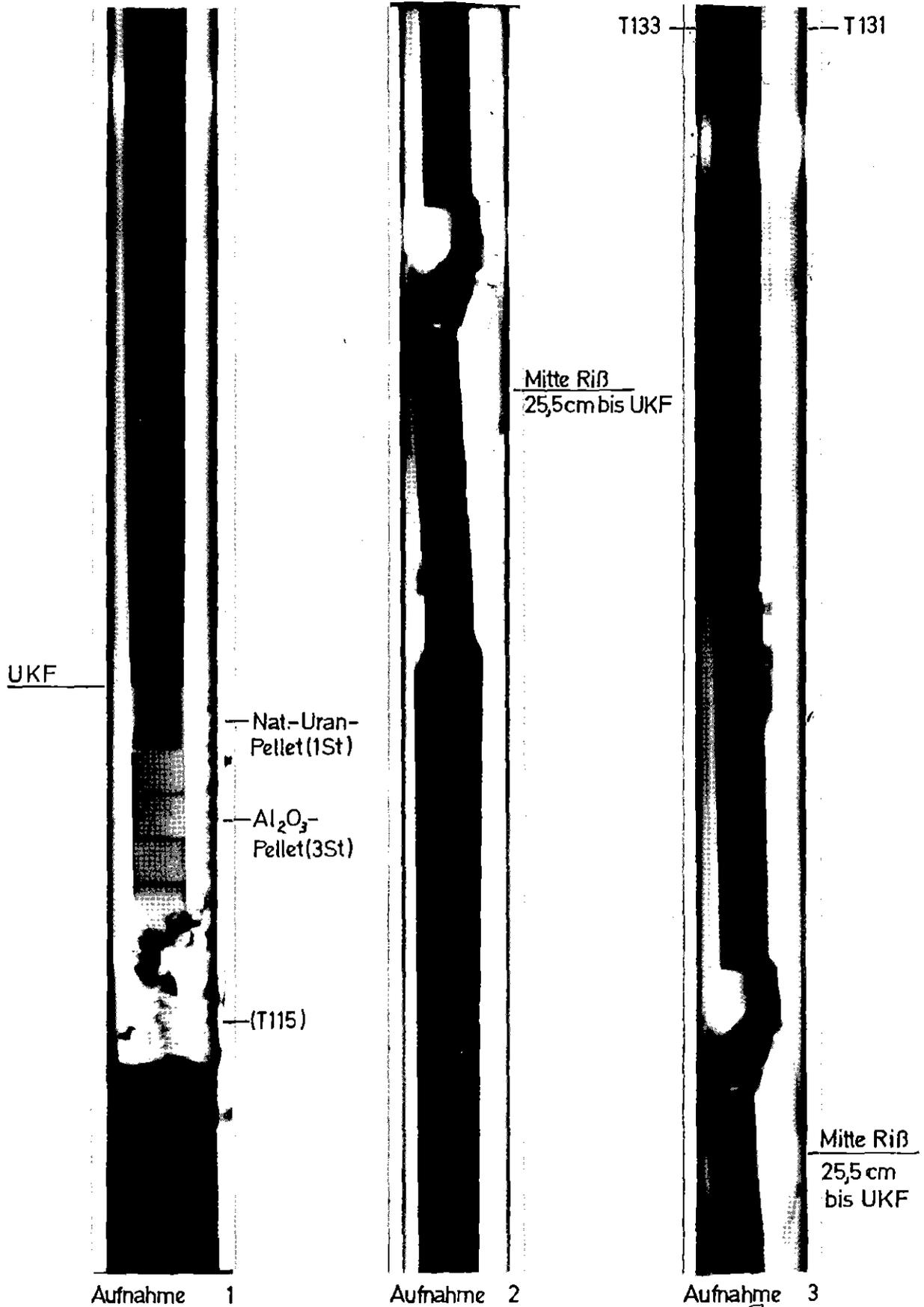
KIK IT-80  
PNS4237-478.11



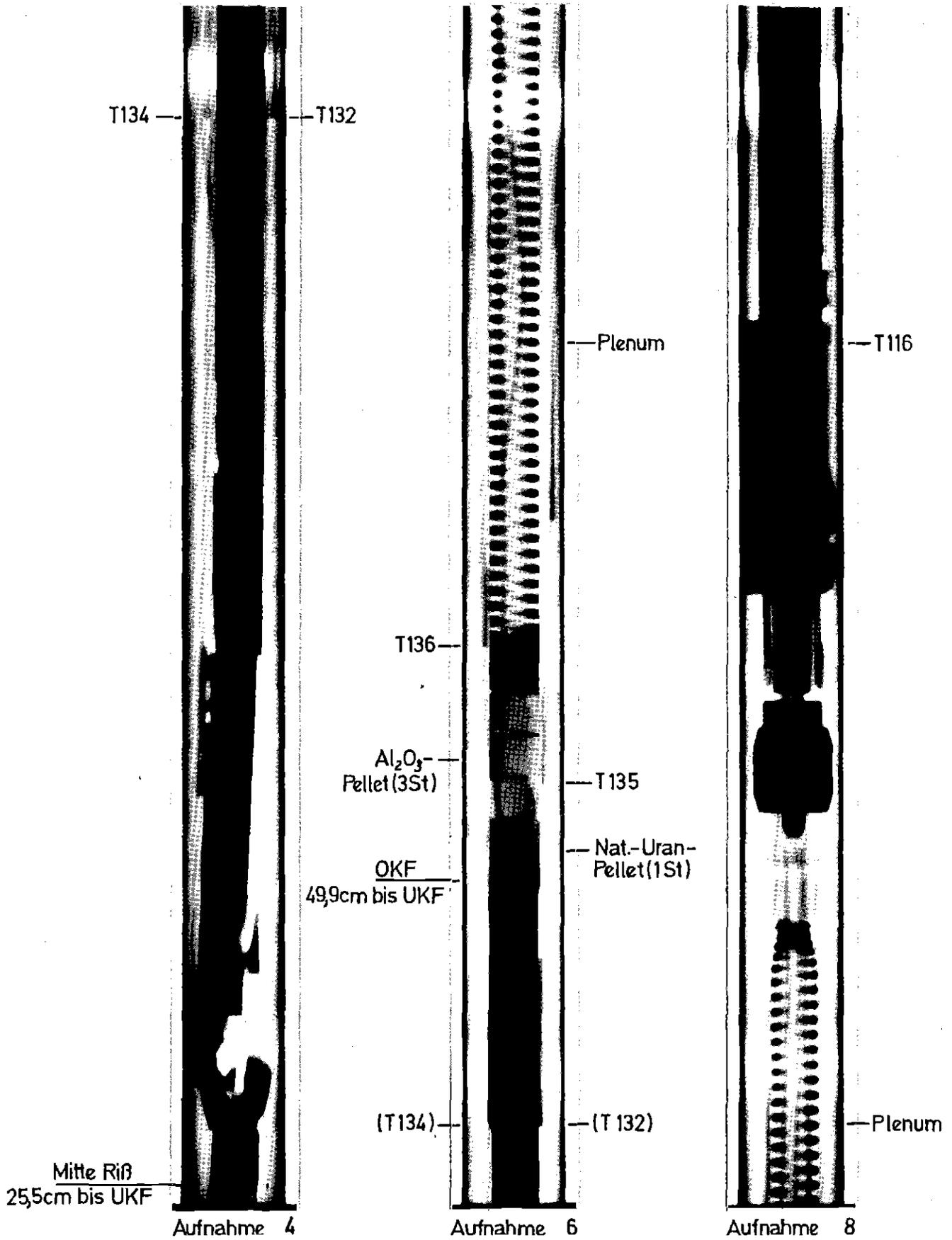
# FR 2 In-pile Versuche. B1.6

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

Abb.:23.3



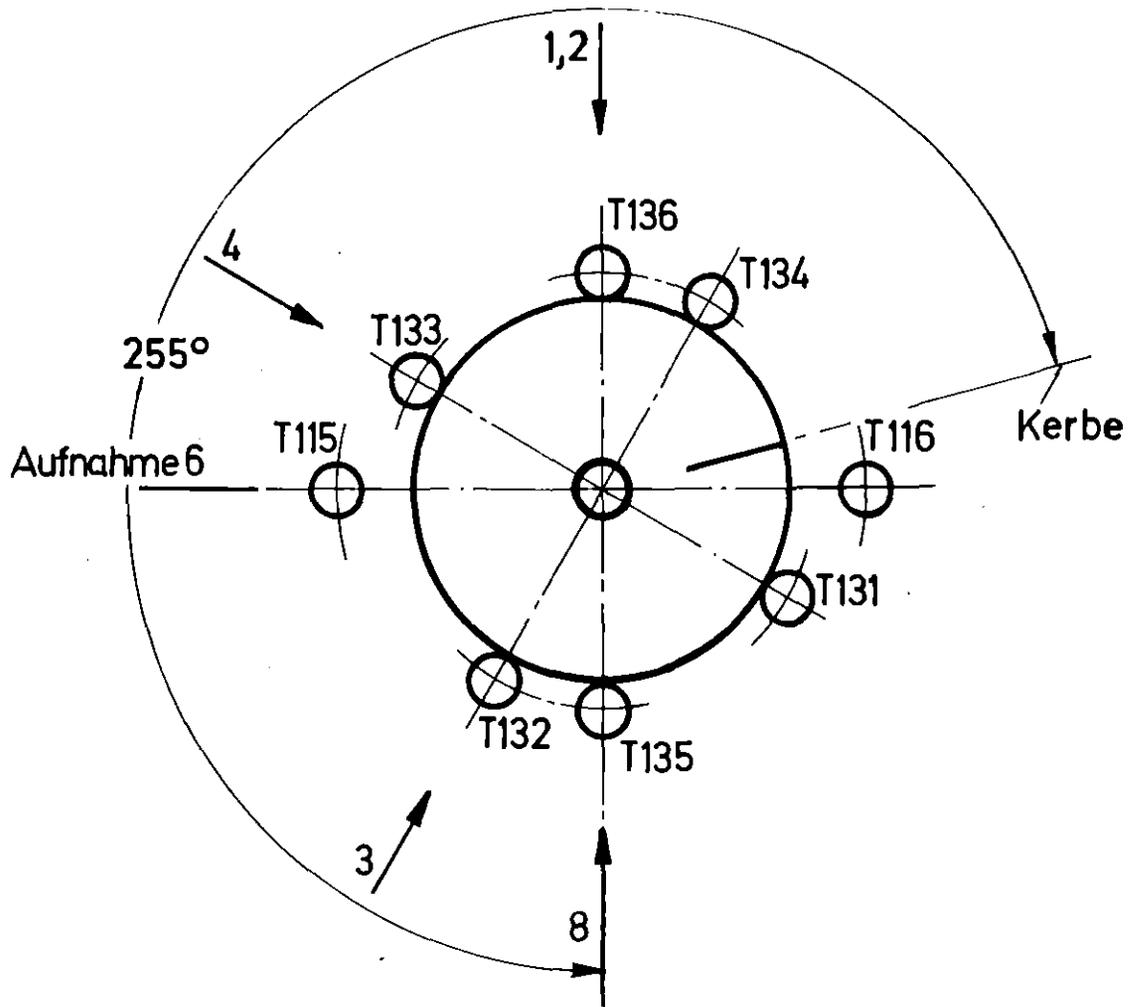
**KIK** IT 80  
PNS4237-478.30



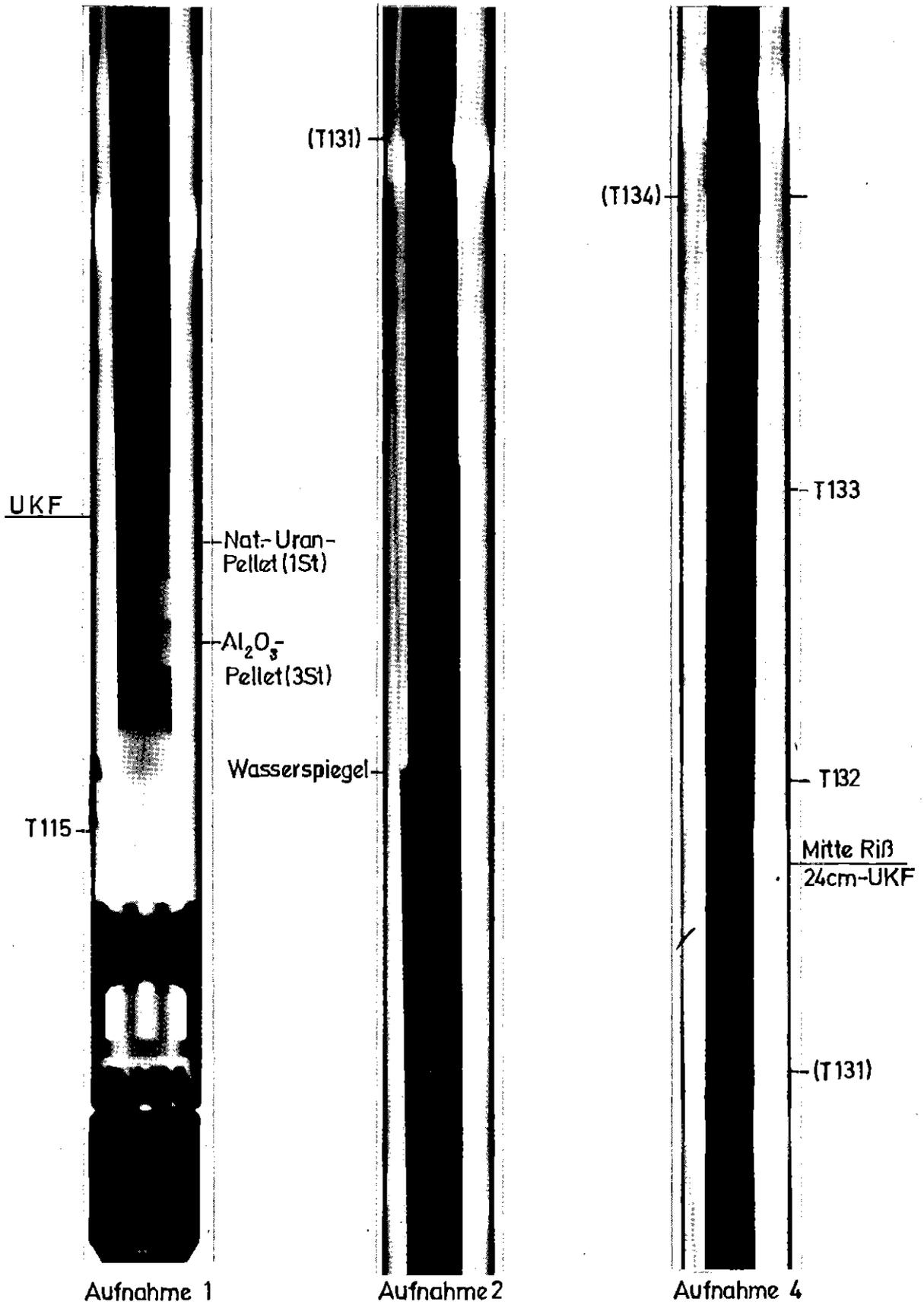
**KfK** IT 60  
PNS 4237-478.30

FR2 In-pile Versuche. B1.7  
Neutronenradiografie nach Versuch

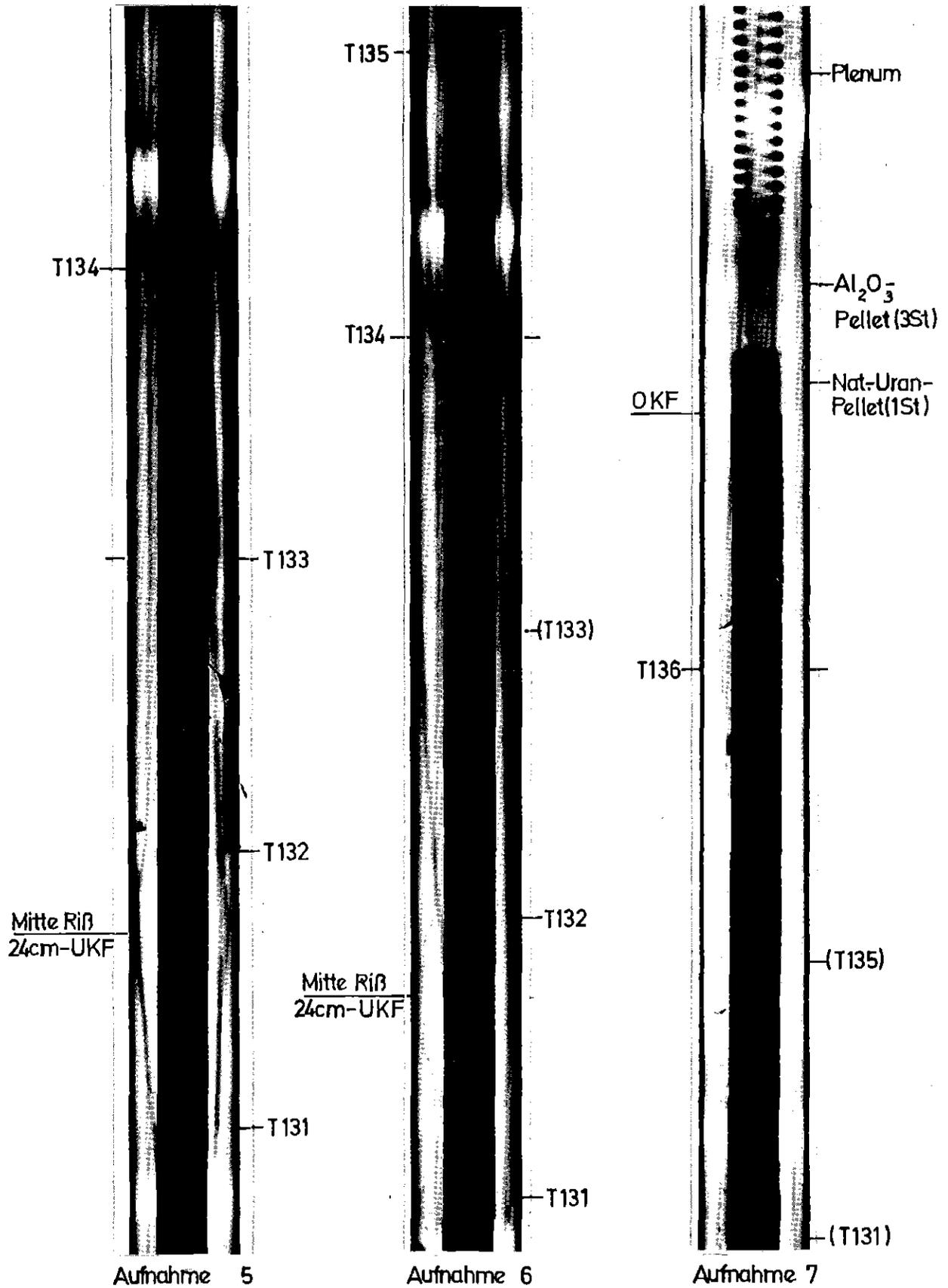
B1.2  
Abb.: 24.2



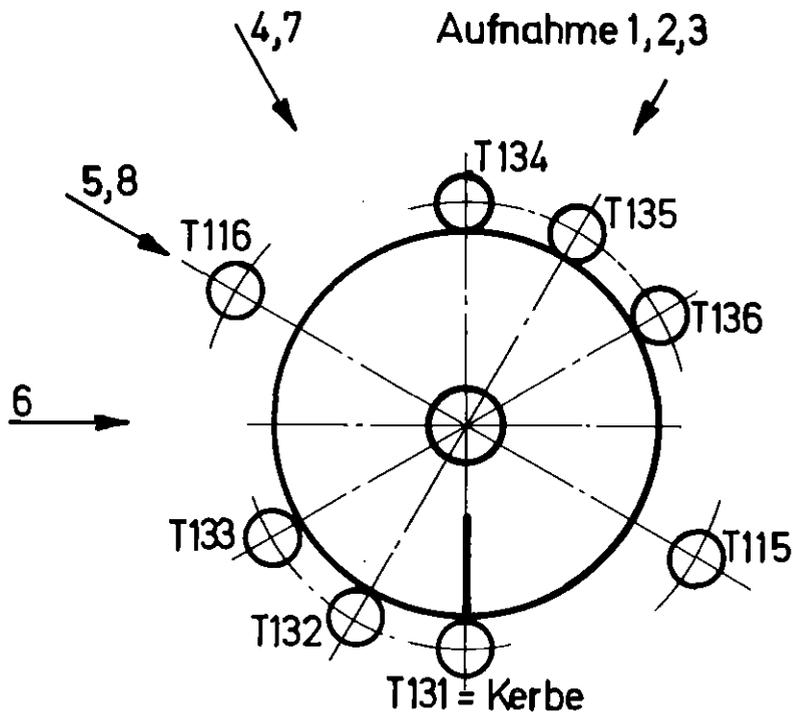
Ansicht von oben



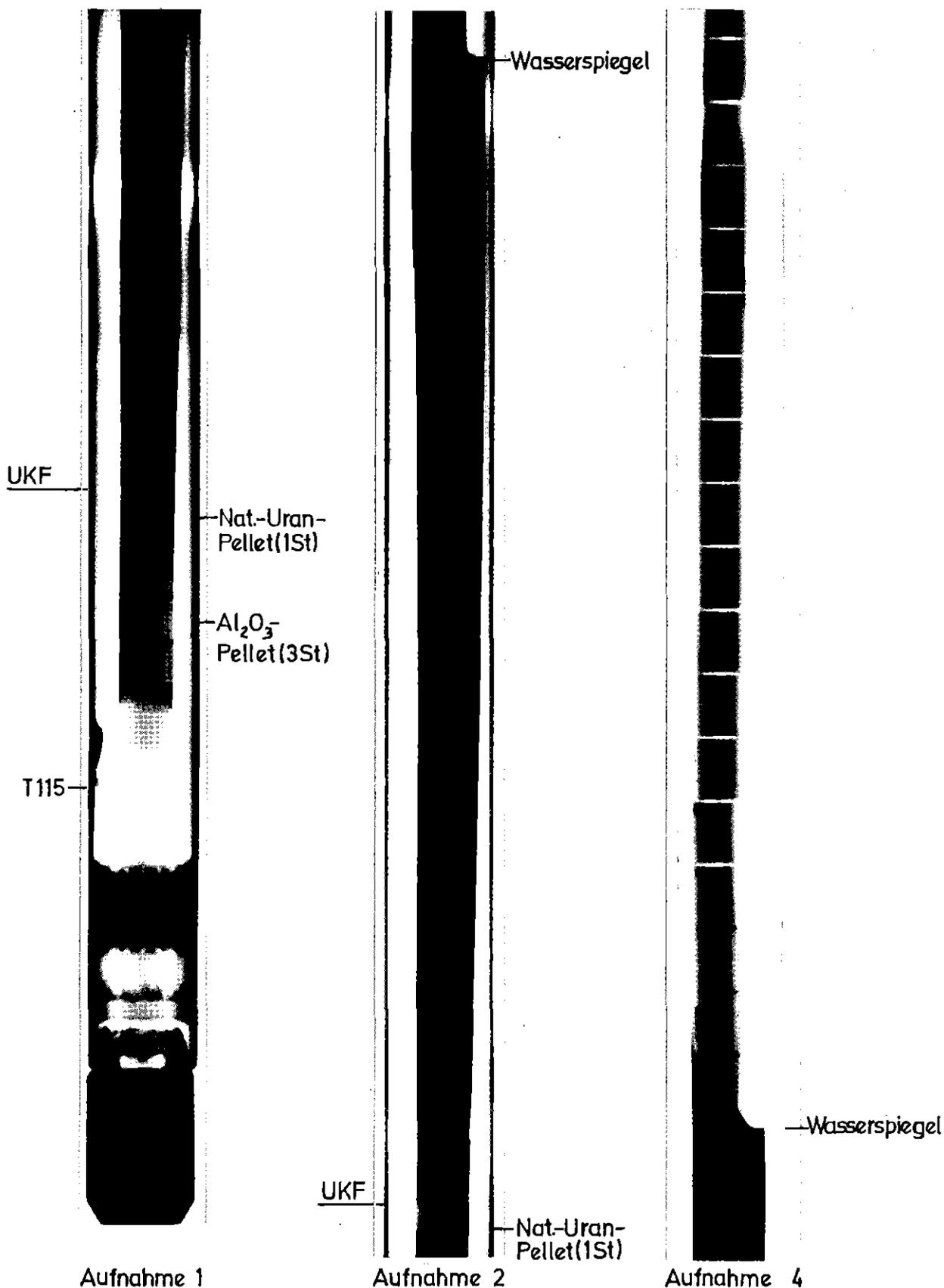
**KIK**  
IT-80  
PNS4237-478.12



**KIK** IT-80  
PNS4237-478.12



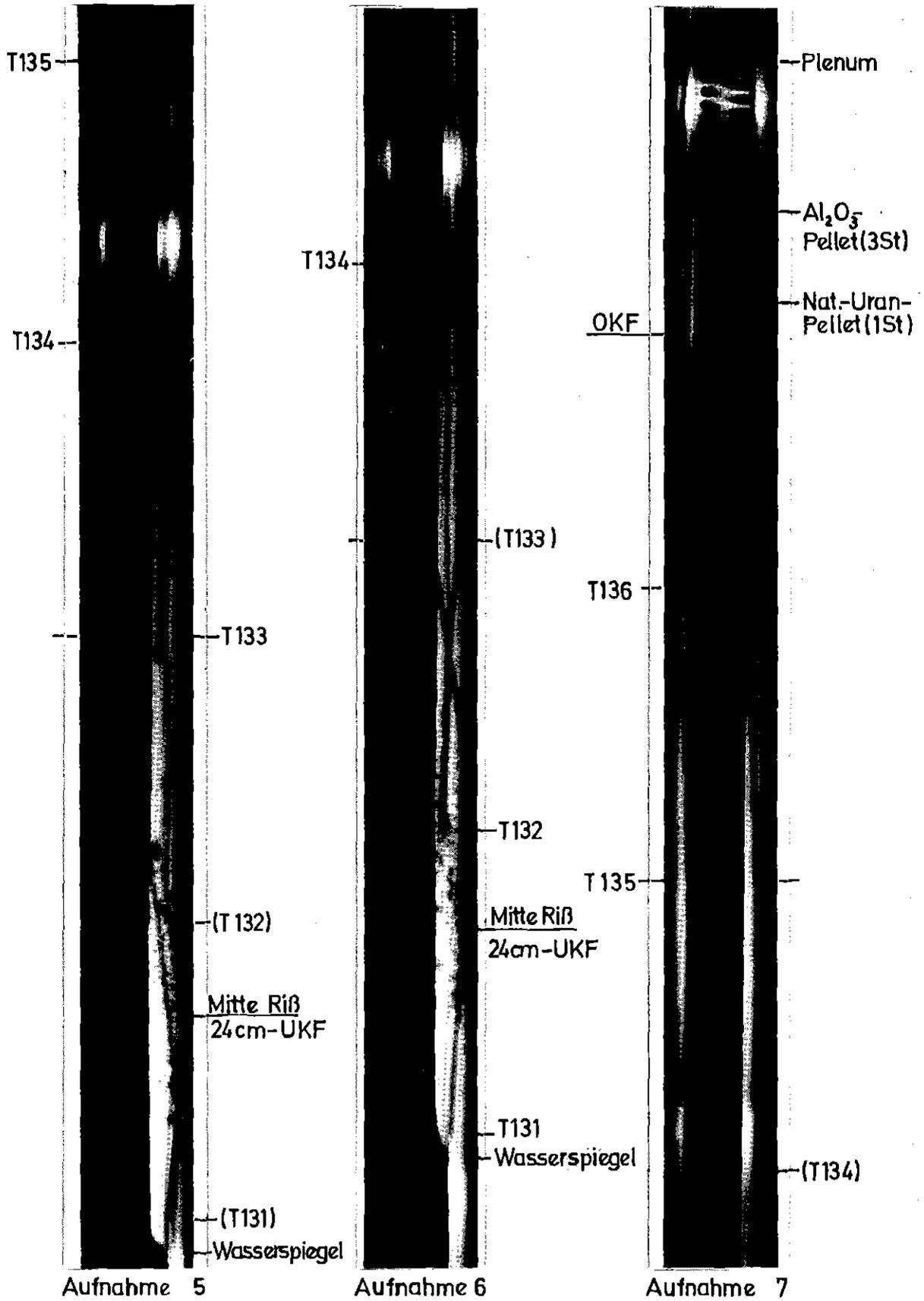
Ansicht von oben



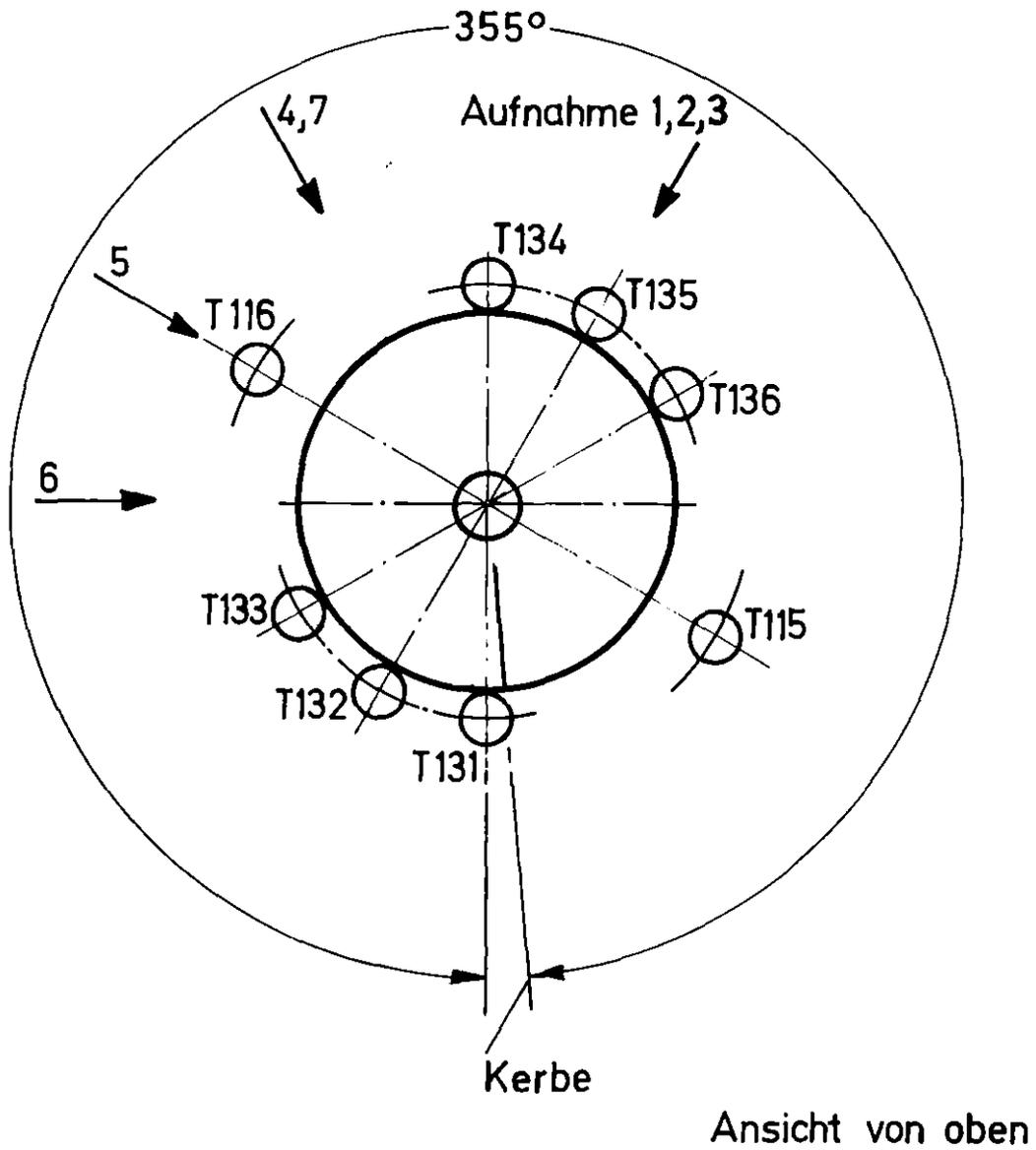
**KfK** IT-80  
PNS4237-478.13

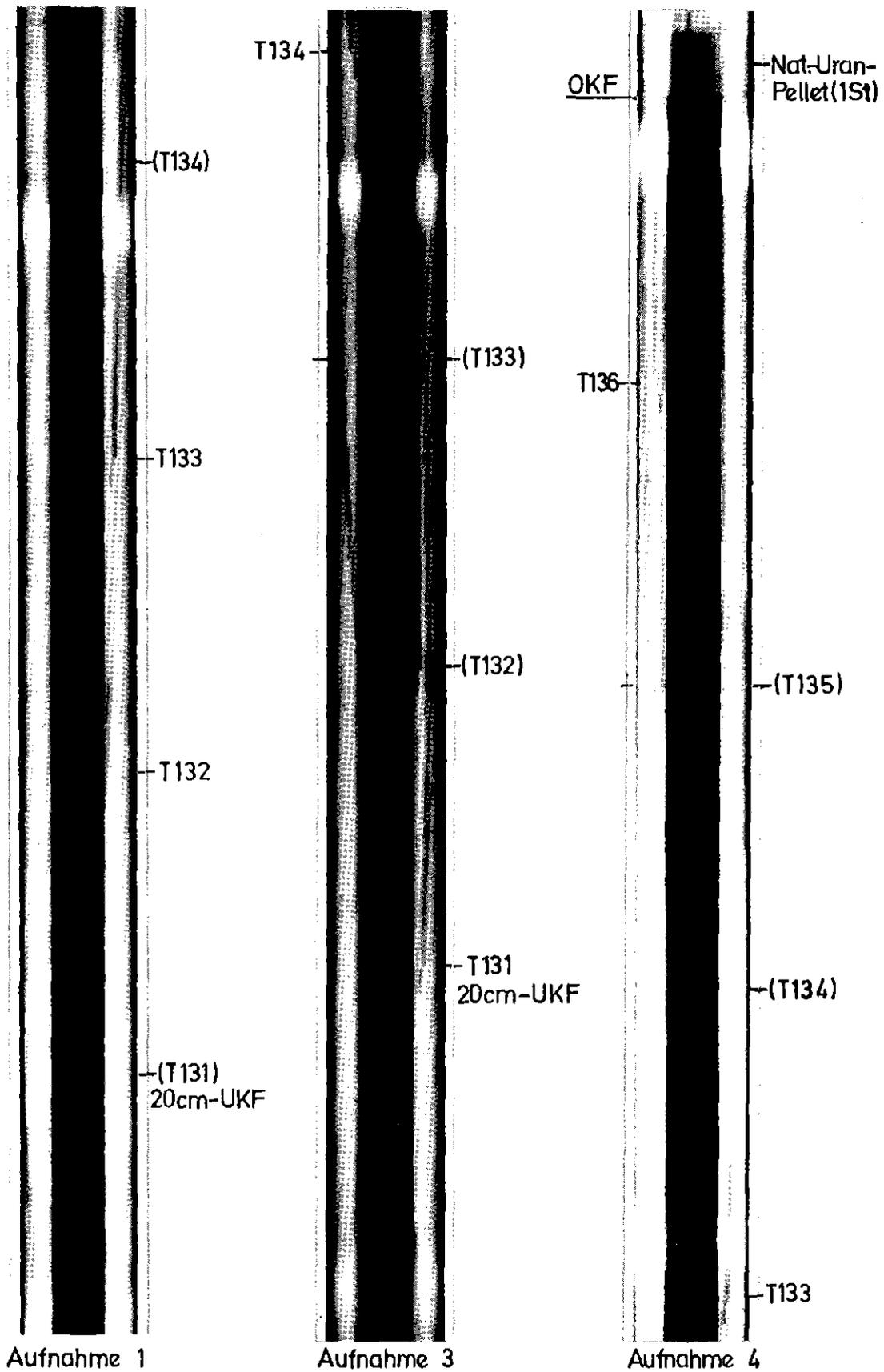
FR2 In-pile Versuche. B3.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

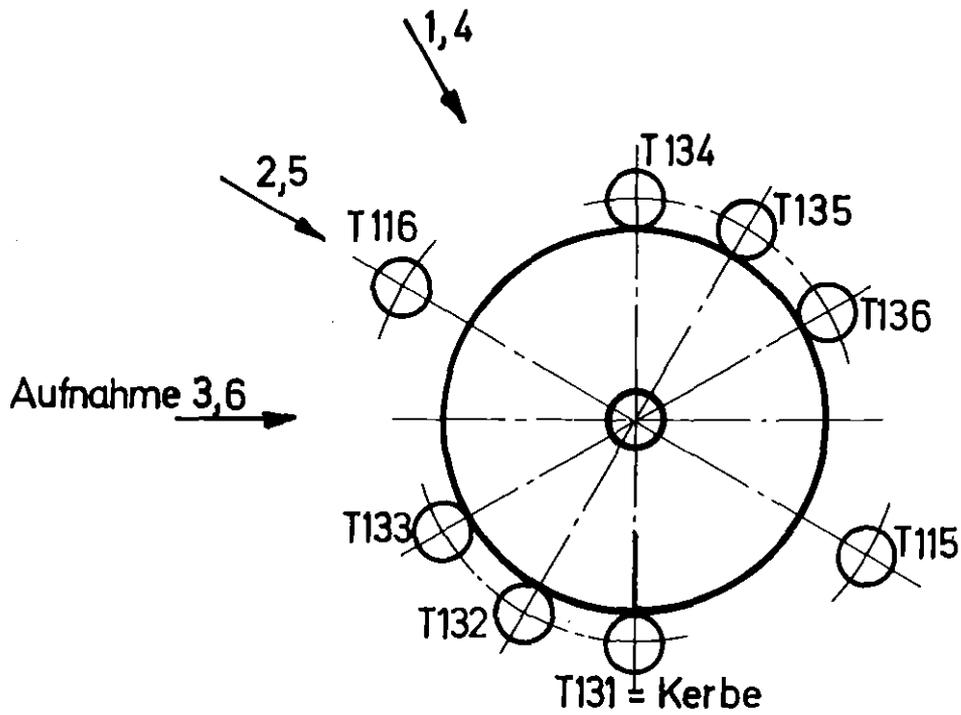
Bl.1  
Abb.: 26.1



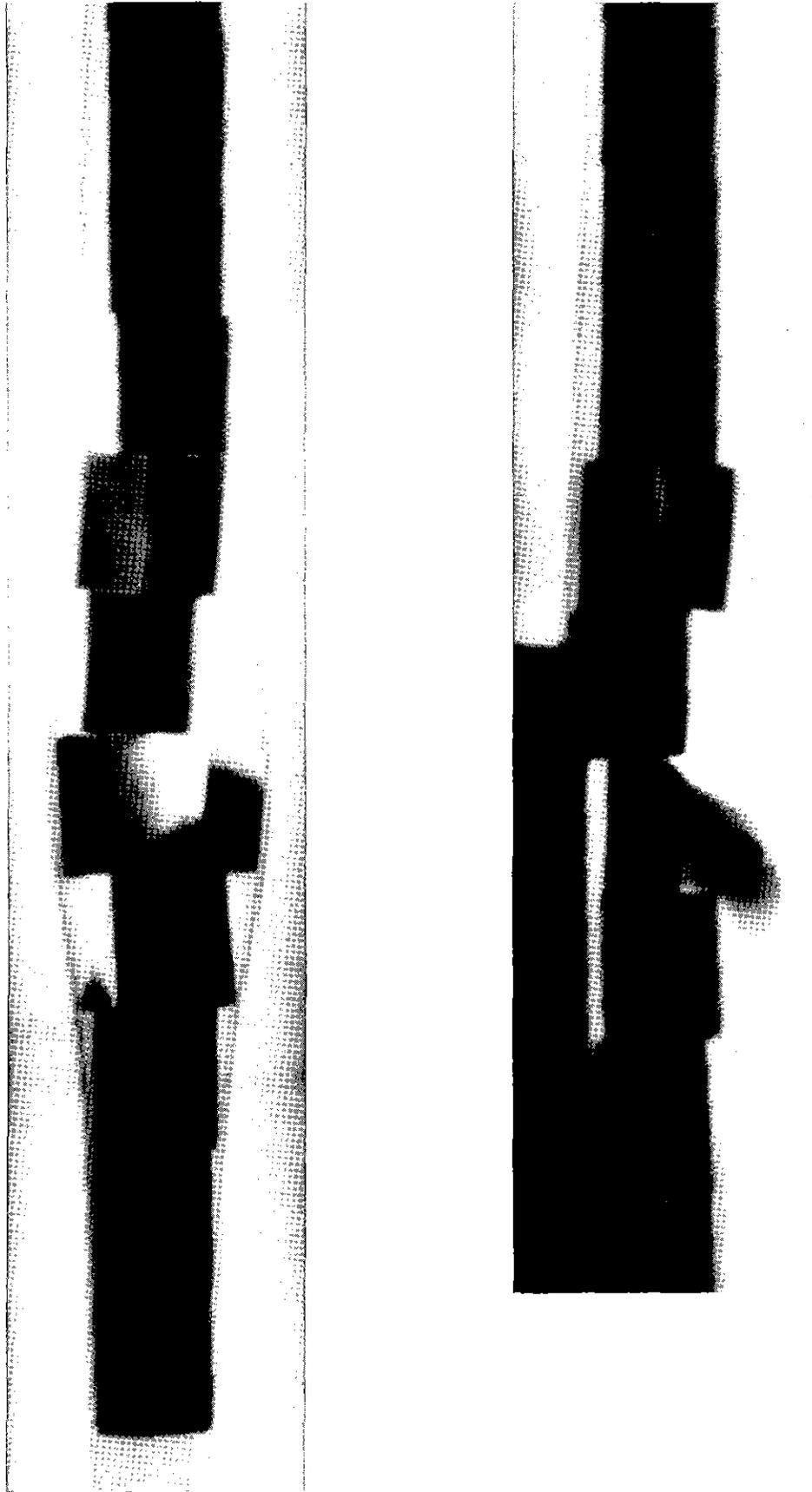
**KfK** IT-80  
PNS4237-478.13







Ansicht von oben



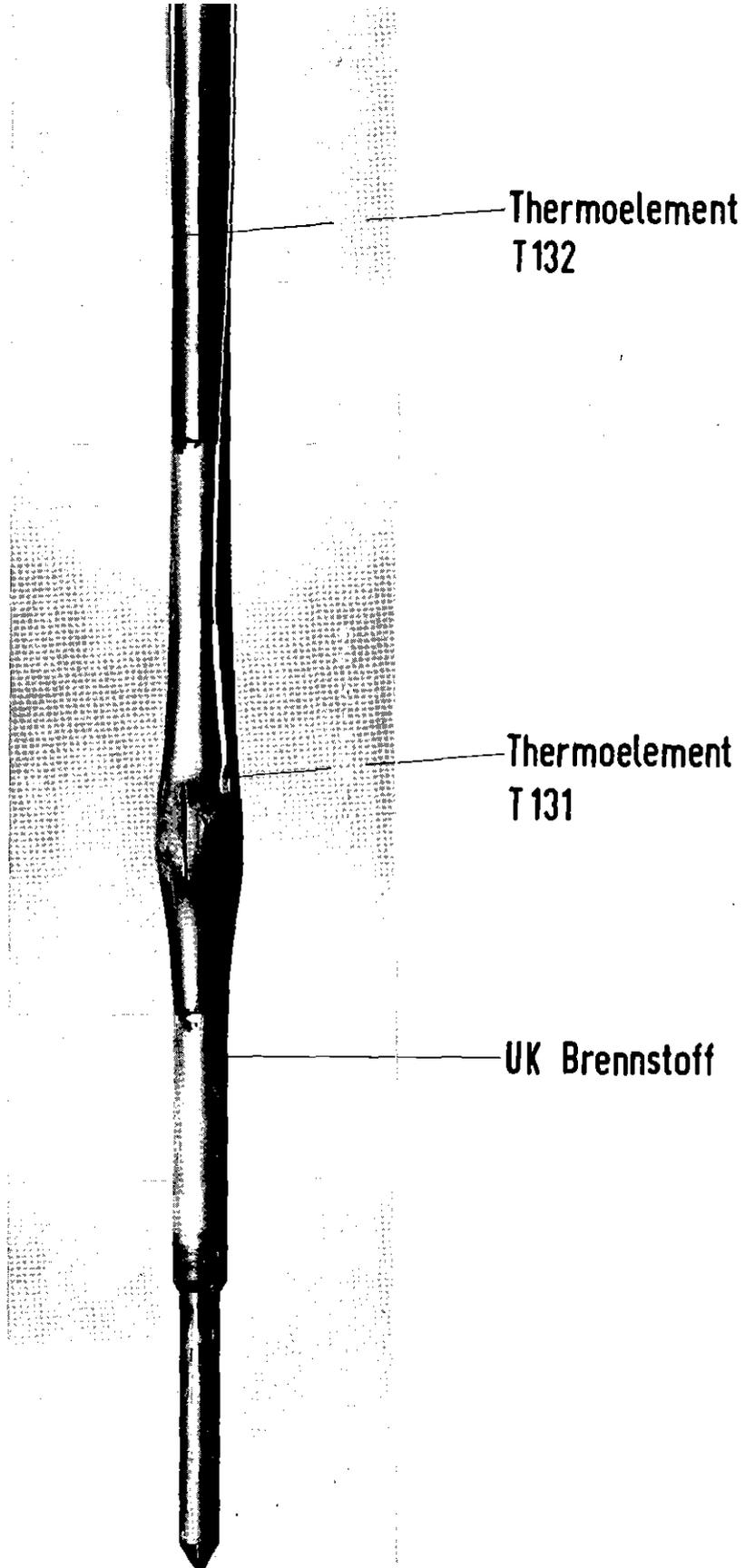
RBT/IT - 1977  
PNS 4237-94

# In - pile - Versuche zum Brennstabverhalten

Versuch A1.1

Röntgenaufnahmen , Beulzone

Abb.: 28.1



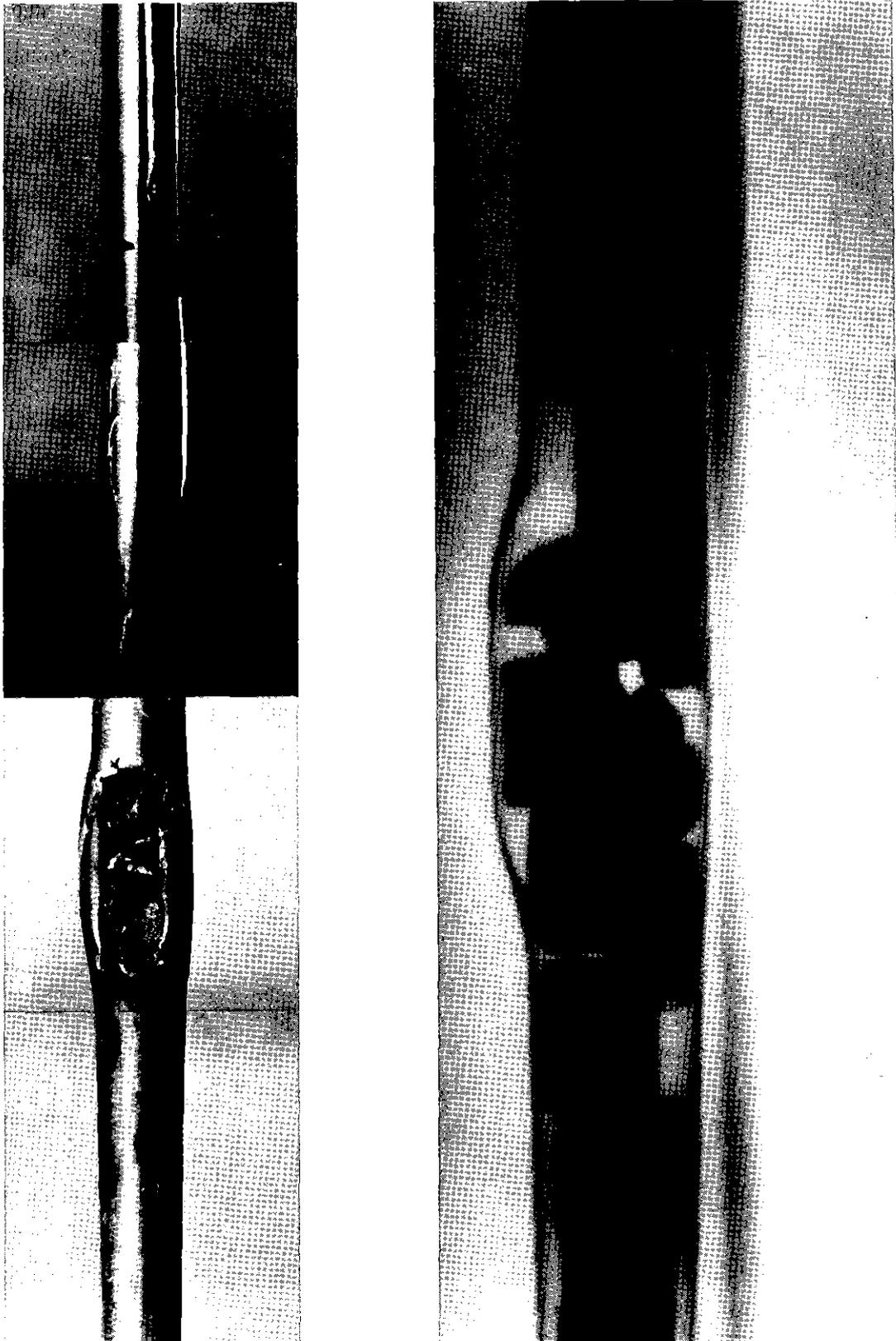
RBT/IT-1977  
PNS 4237-93.1

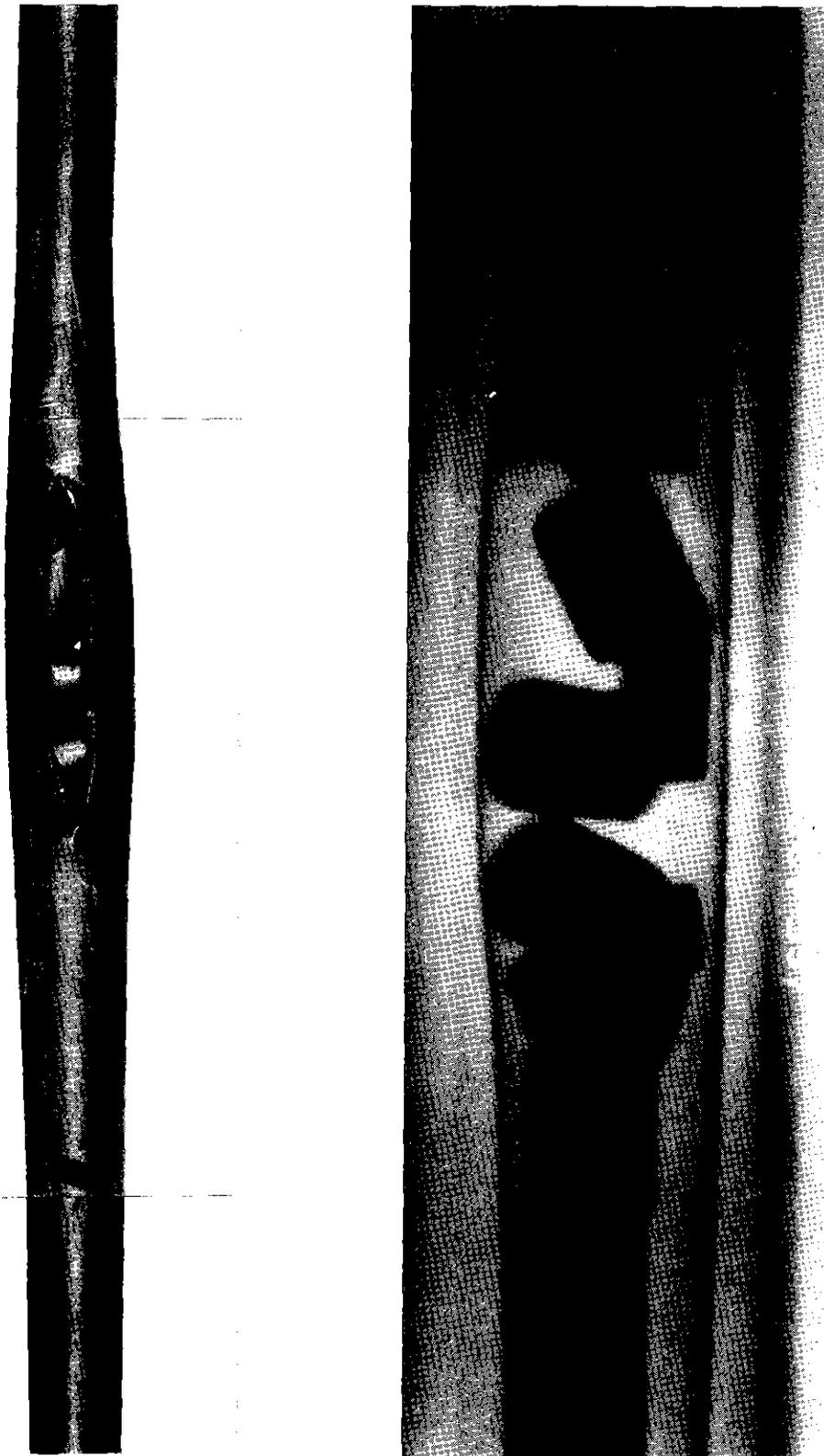
# In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten

## Versuch A1.1

Unteres Prüflingsende

Abb.: 28.2



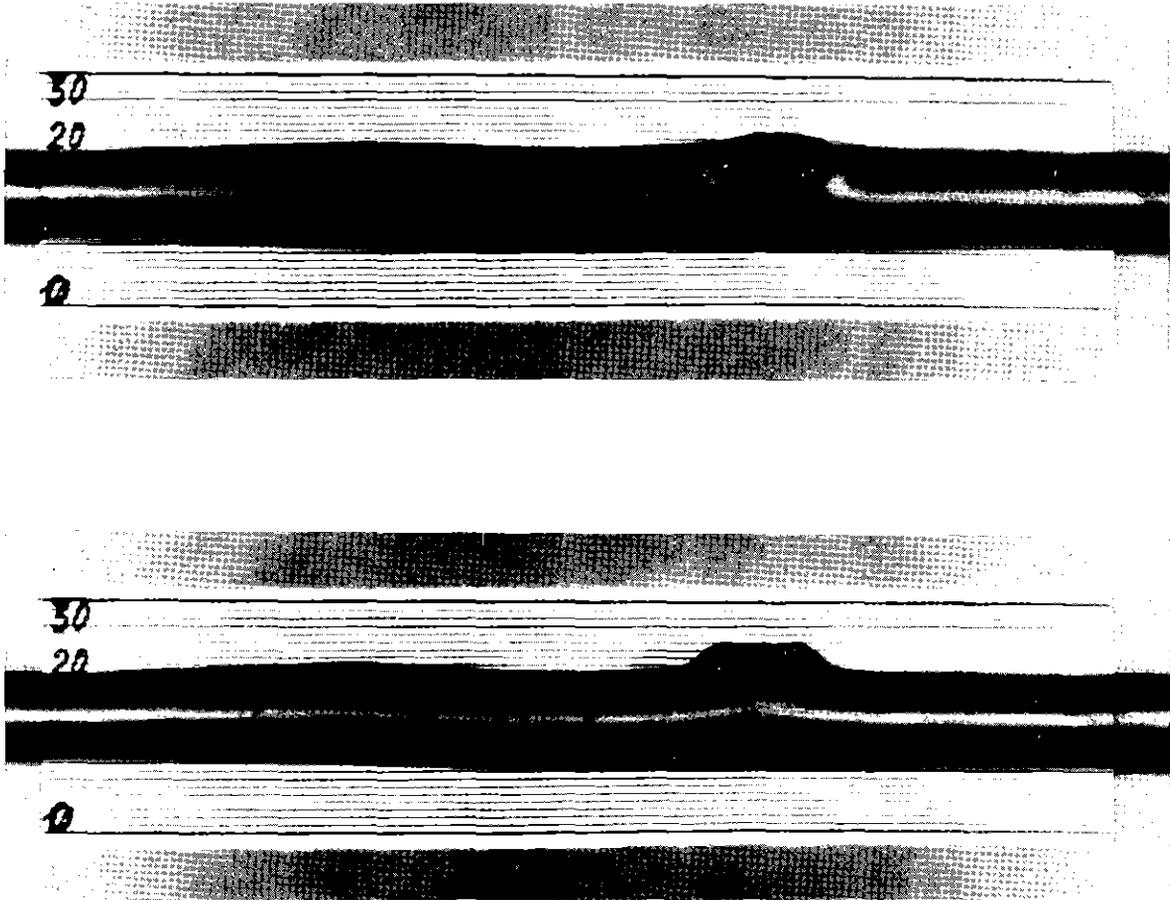


---

**KfK** IT 78 PNS4237-173

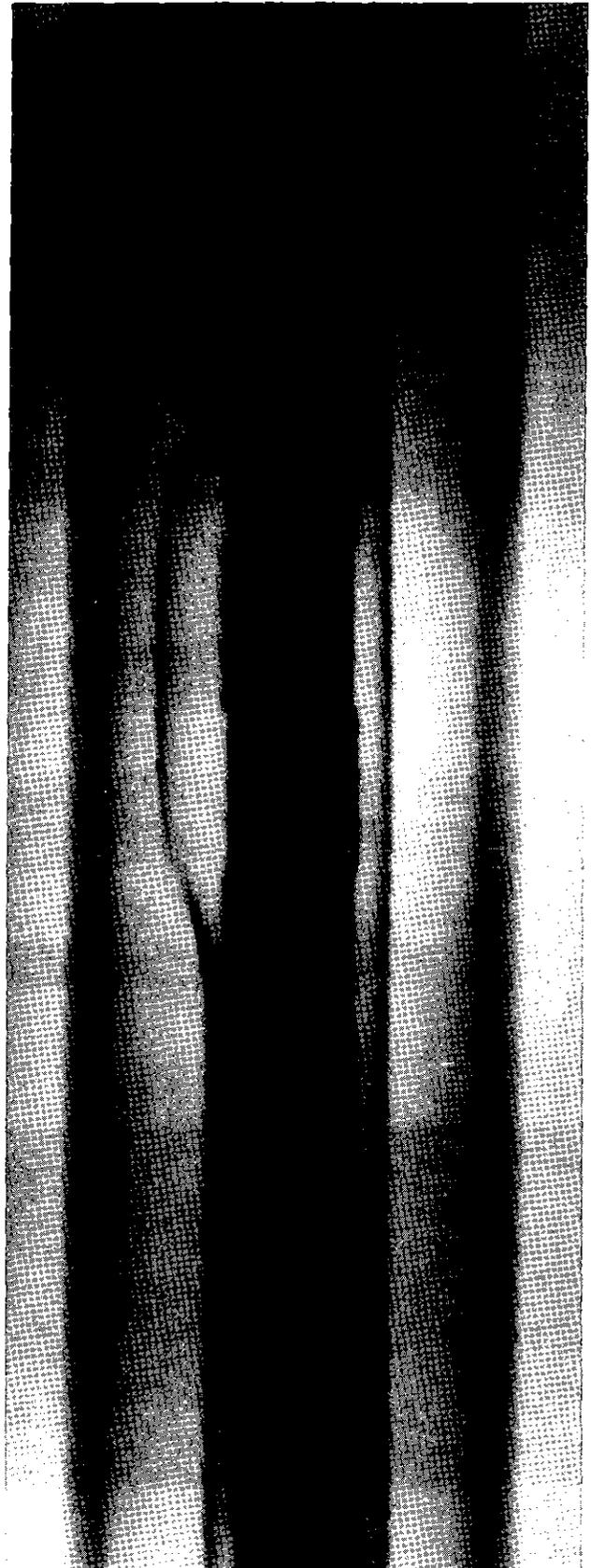
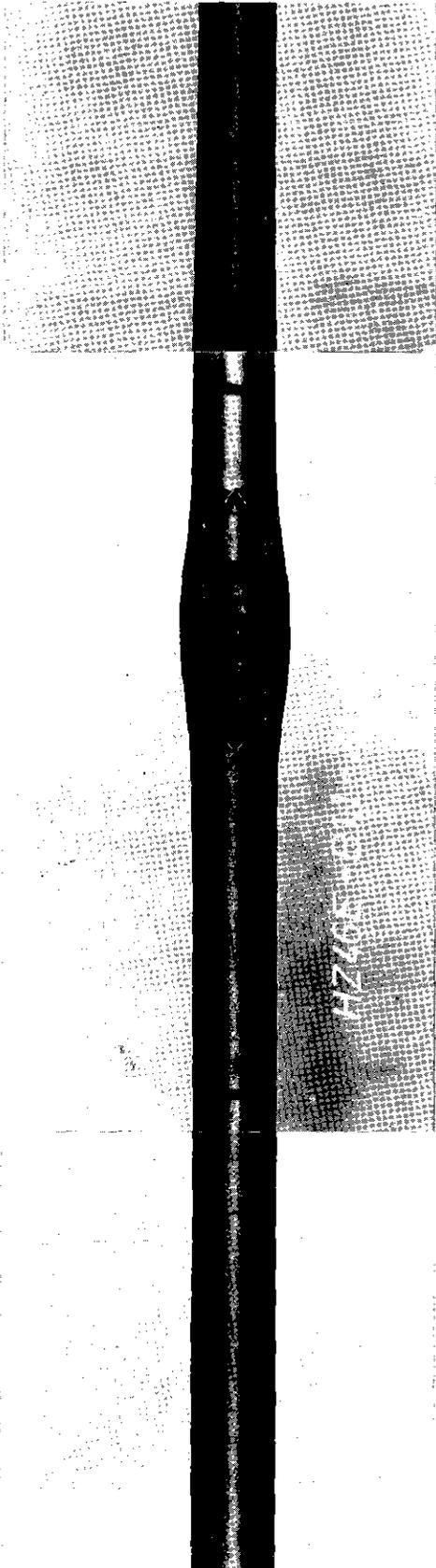
In - pile - Versuch A2.2  
Ansicht und Röntgenbild

Abb.:30



IT 78 PNS4237-121

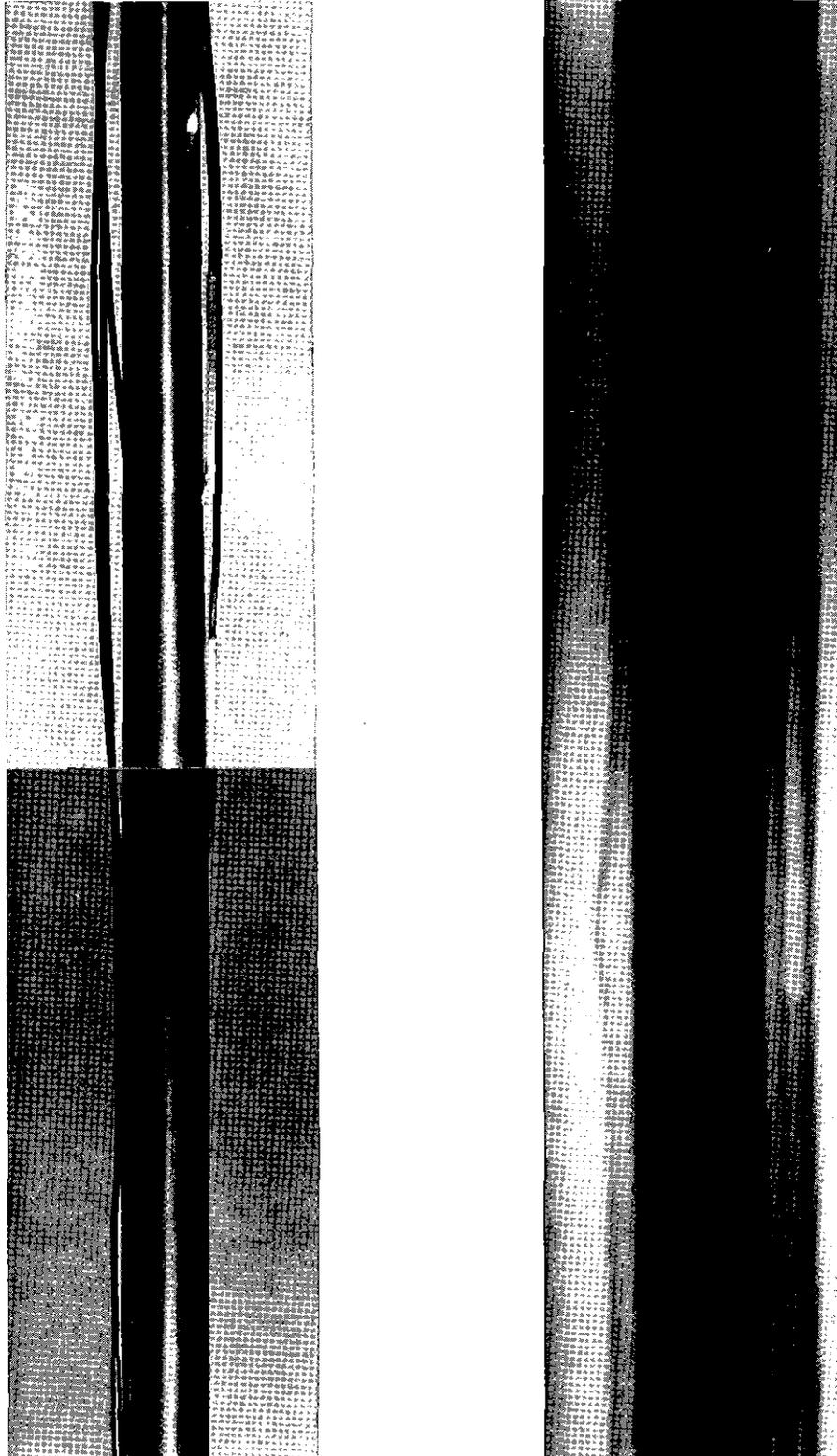
In-pile Versuch A 2.3  
Ansichten und Röntgenbild Abb.:31



**KfK** IT 78 PNS4237-176

In-pile-Versuch B1.1  
Ansicht und Röntgenbild

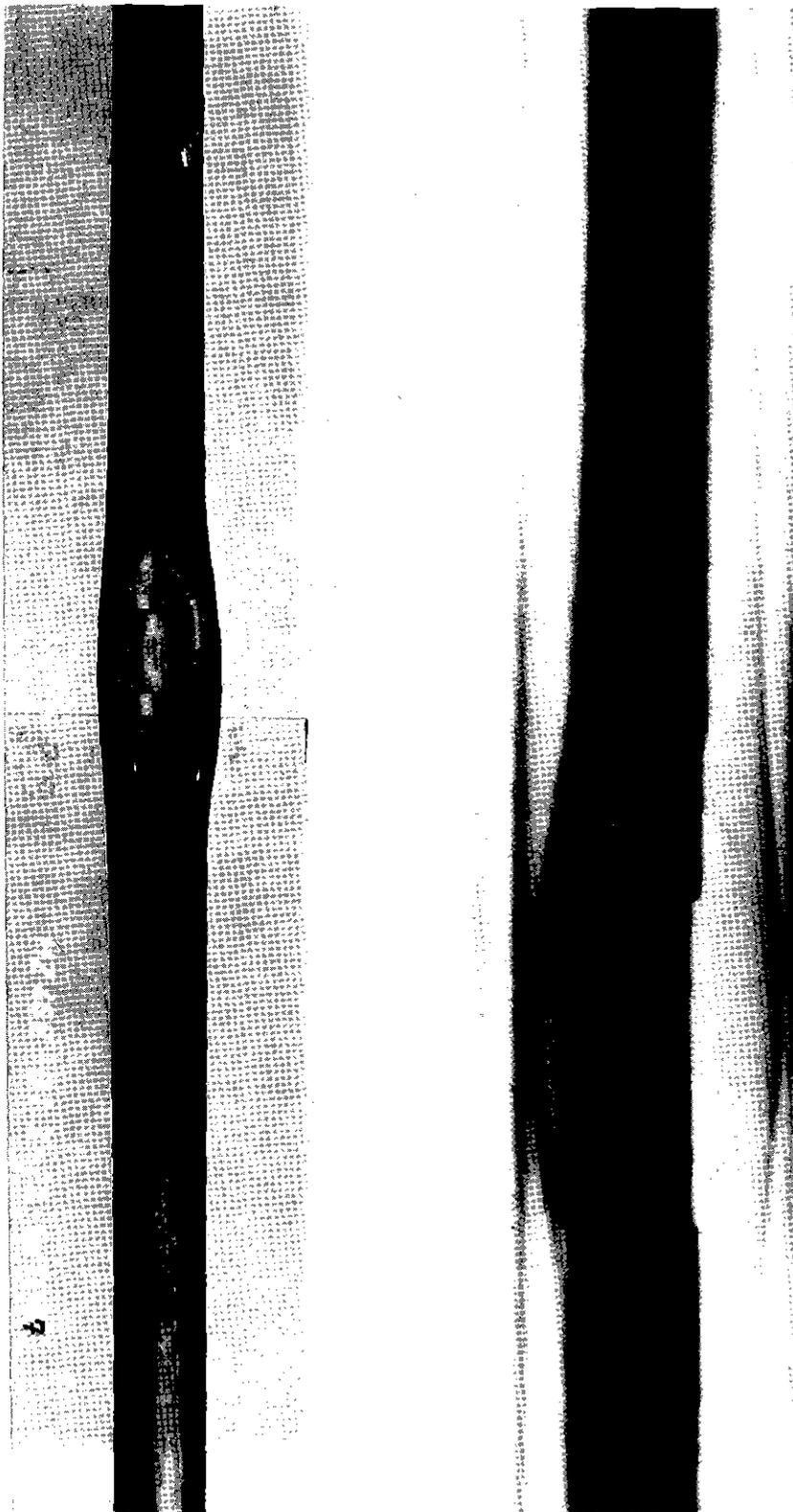
Abb.:32



IT 78 PNS4237-123

In-pile Versuch B 1.2  
Ansicht und Röntgenbild

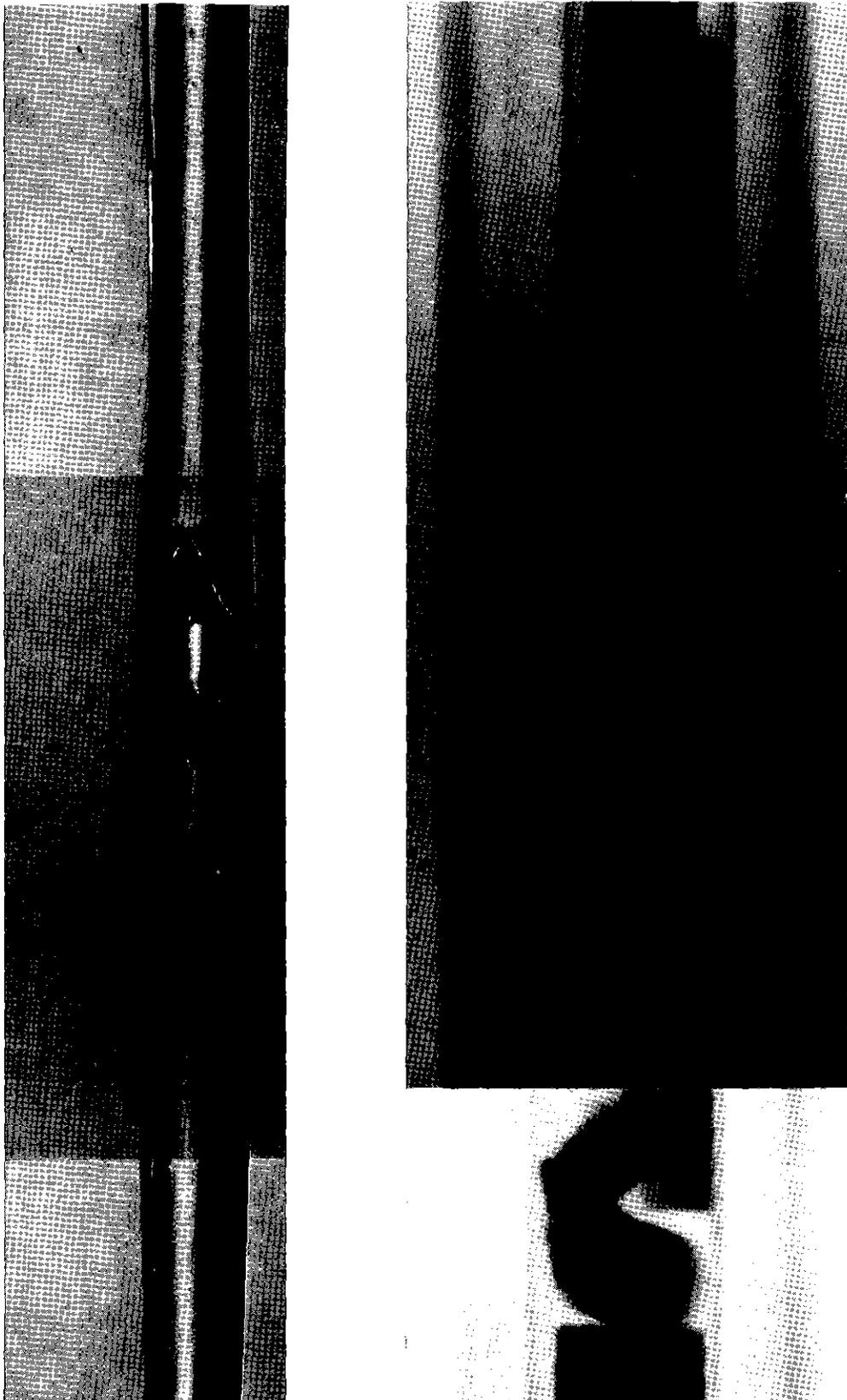
Abb.:33

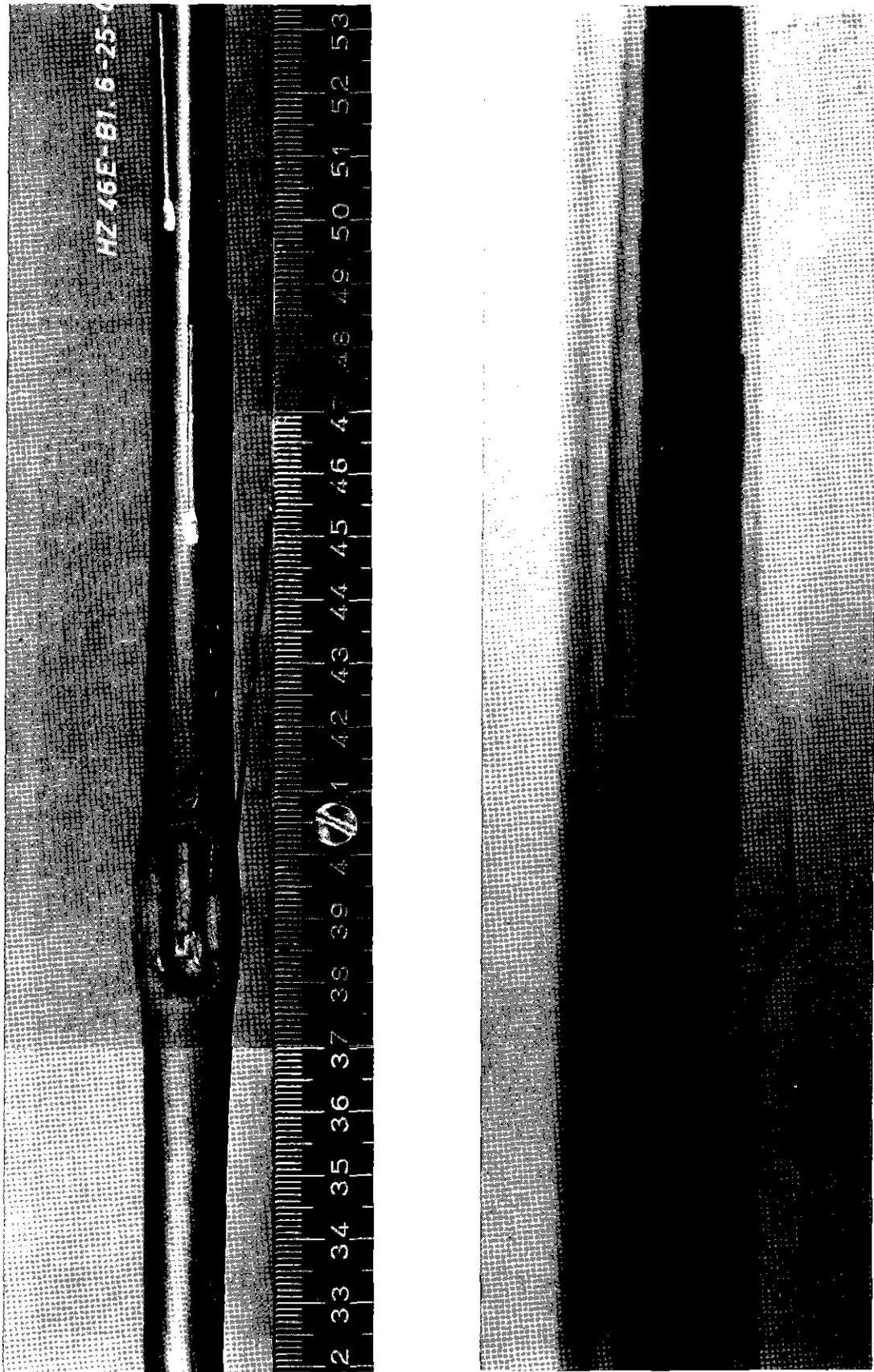


**kfk** IT-79  
PNS4237-179

In-pile Versuch B 1.3  
Ansicht und Röntgenbild

Abb.: 34

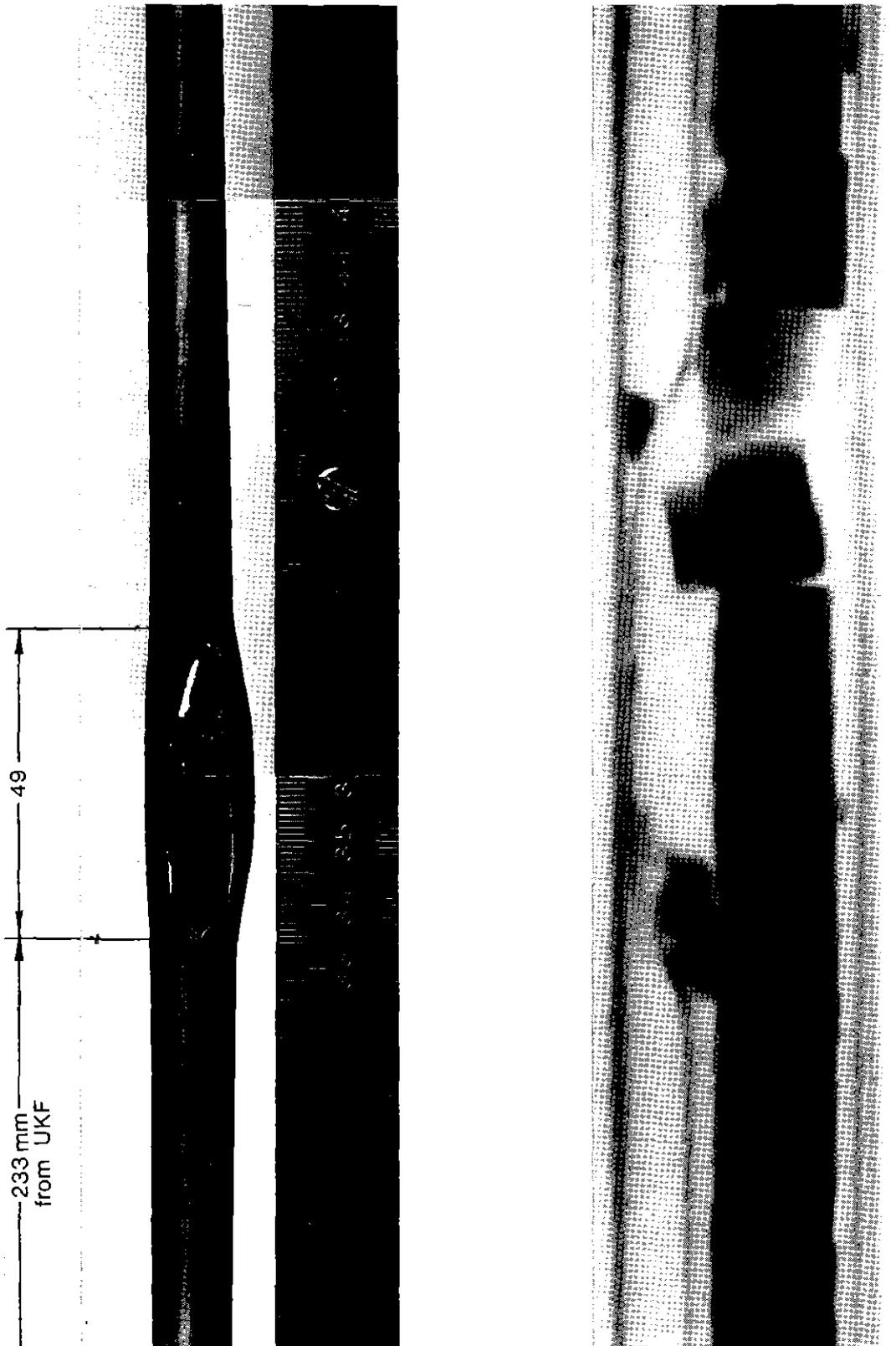




**kf** IT 79  
PNS4237-224

In-pile-Versuch B1.6  
Ansicht und Röntgenbild

Abb.:36

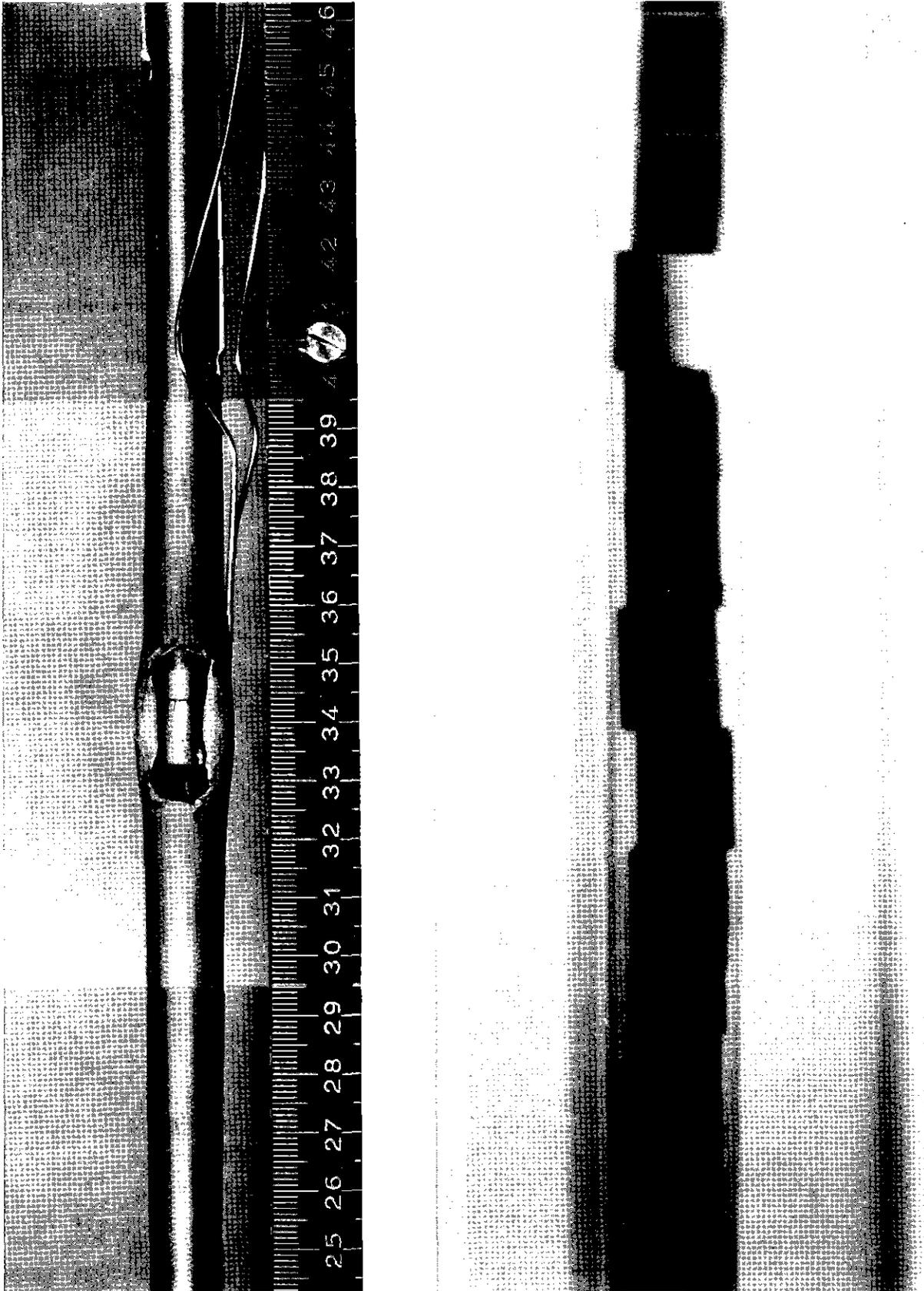


IT 1980  
PNS 4237-483

FR2 In-Pile Tests. Test B1.7

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone

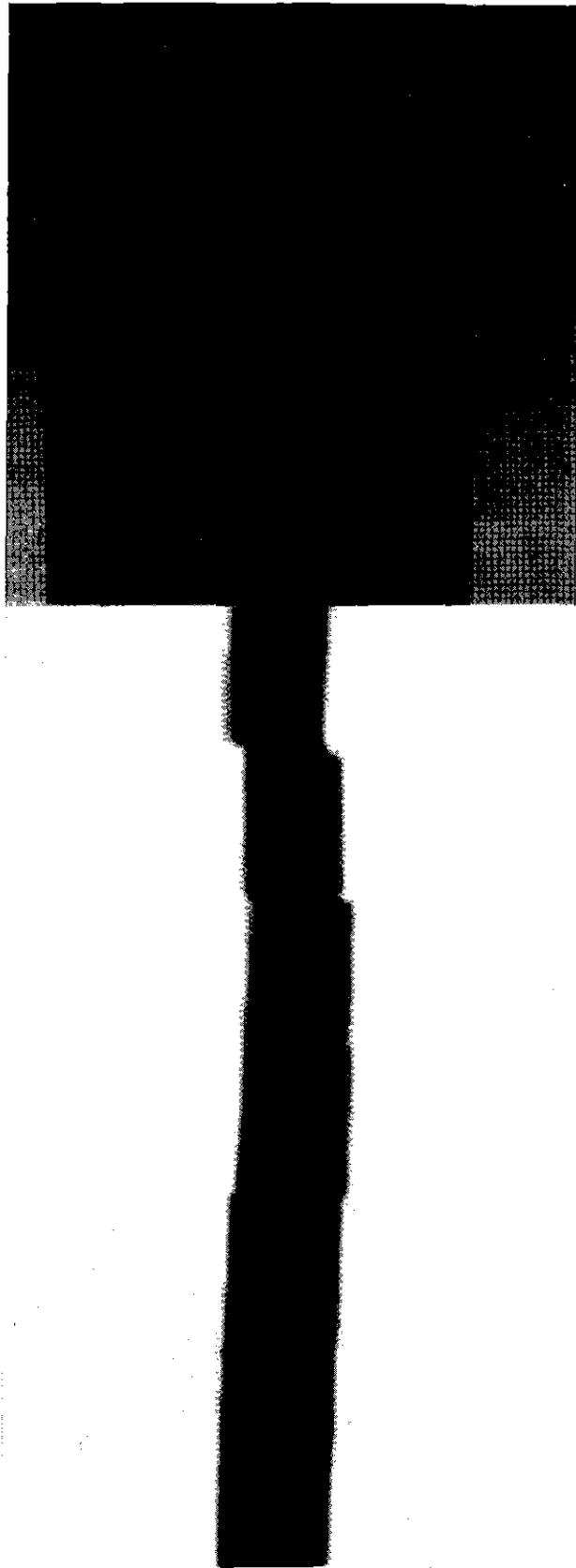
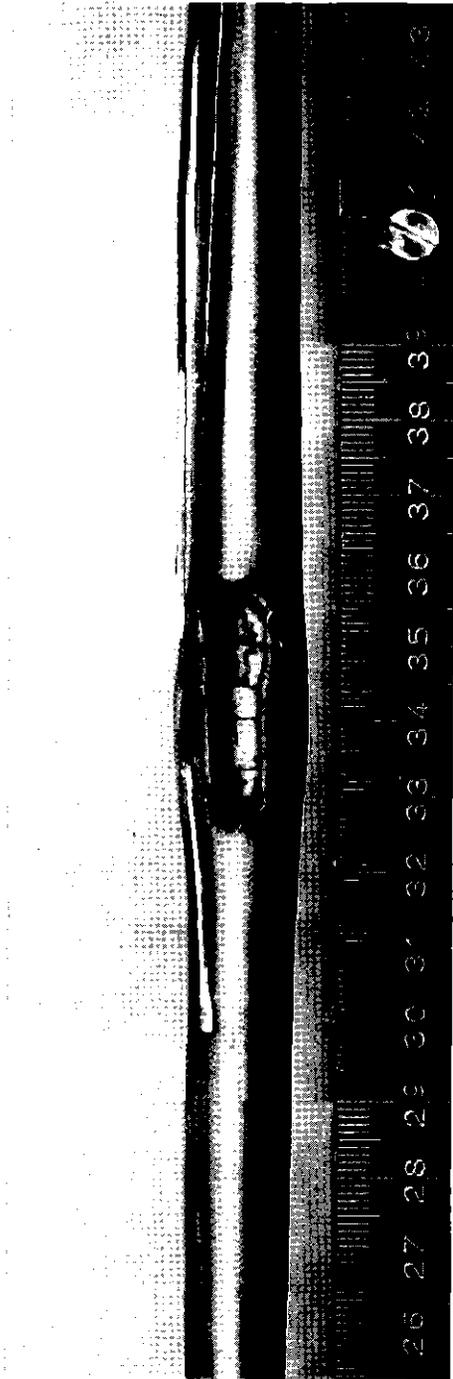
Abb.:37



**KfK** IT 79  
PNS4237-225

In-pile-Versuch B3.1  
Ansicht und Röntgenbild

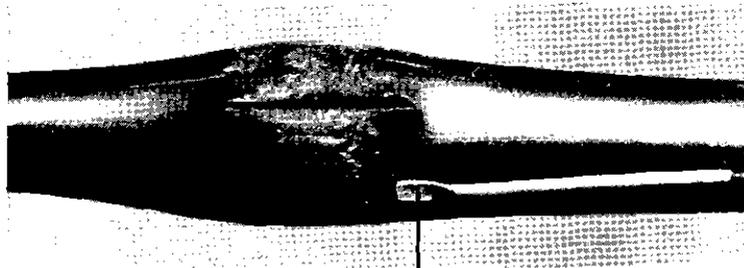
Abb.:38



**KfK** IT 79  
PNS 4237-226

**In-pile-Versuch B 3.2  
Ansicht und Röntgenbild**

**Abb.: 39**



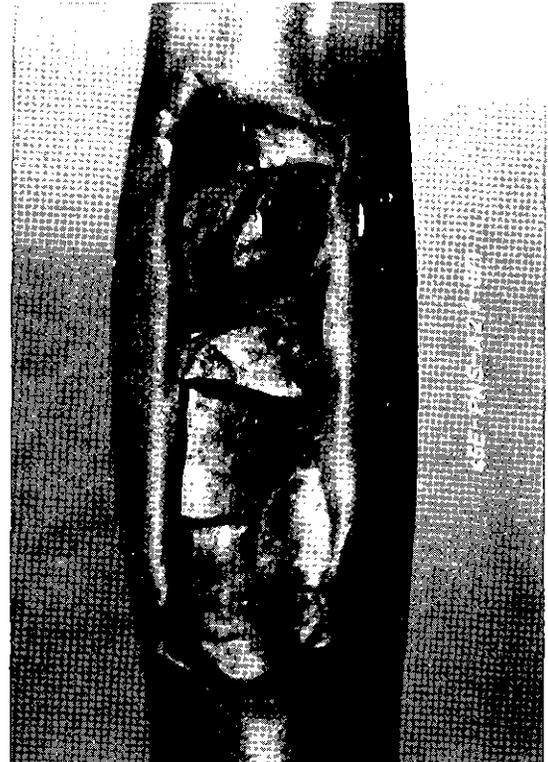
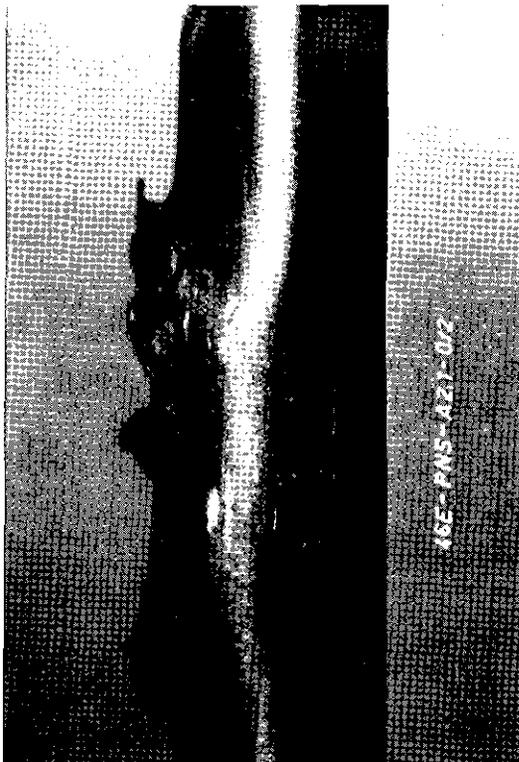
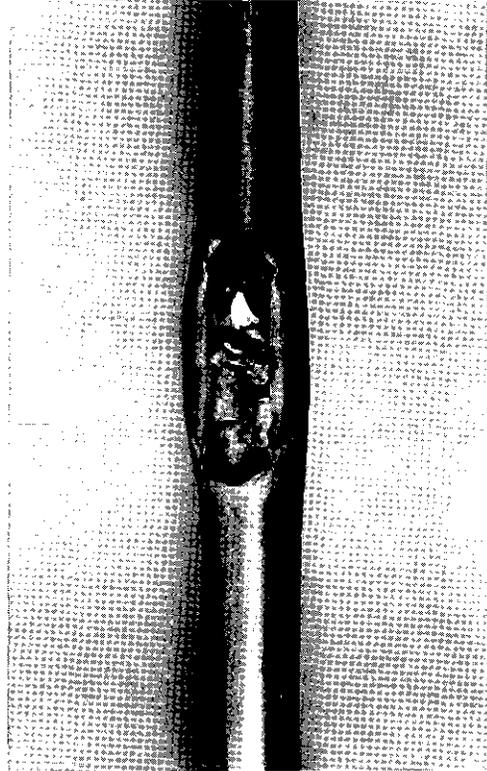
T131

Beulstelle rd. 40mm von UKF



T131 entfernt



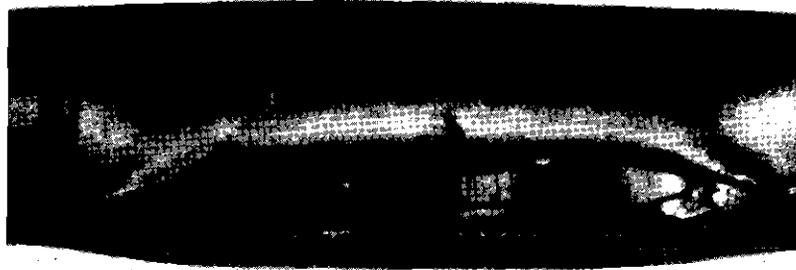


**GRK** IT-78  
PNS4237-61

In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten

Berstelle Versuch -A2.1

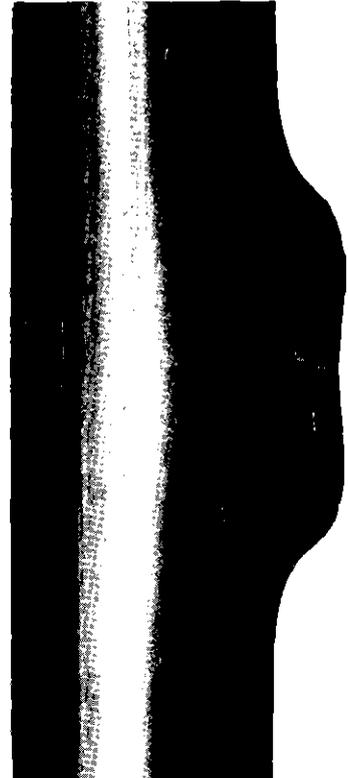
Abb.:41



IT78 PNS 4237-172

In-pile - Versuch A2.2  
Ansichten der Beulstelle

Abb.: 42

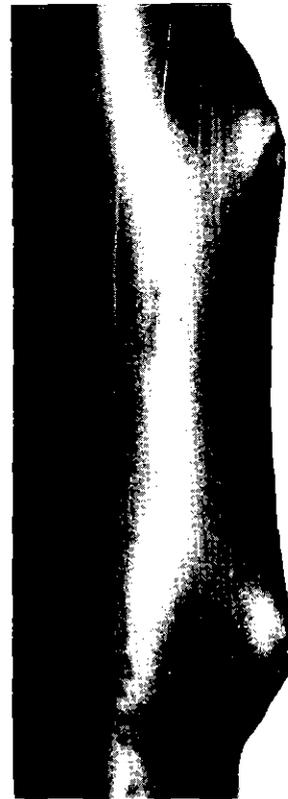
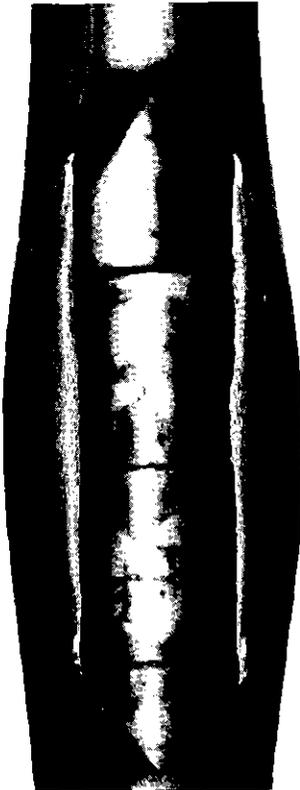
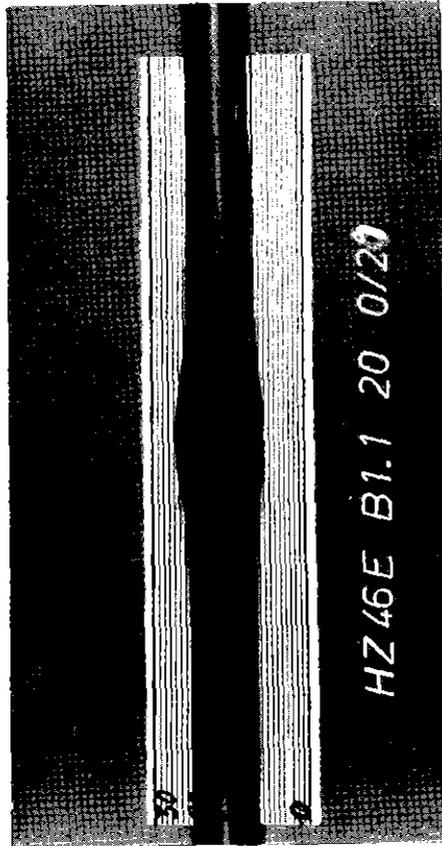


**GRK** IT-78  
PNS4237-63

In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten

Berststelle Versuch -A2.3

Abb.:43

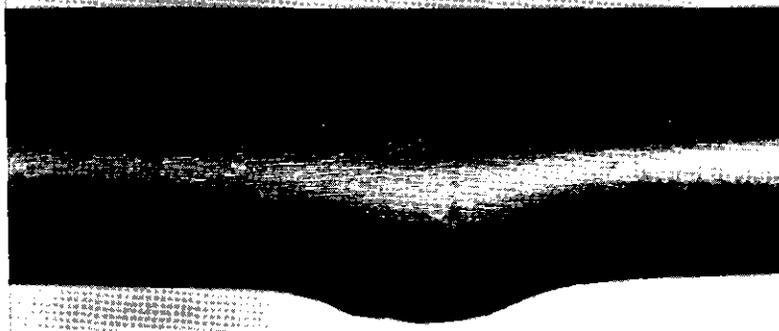
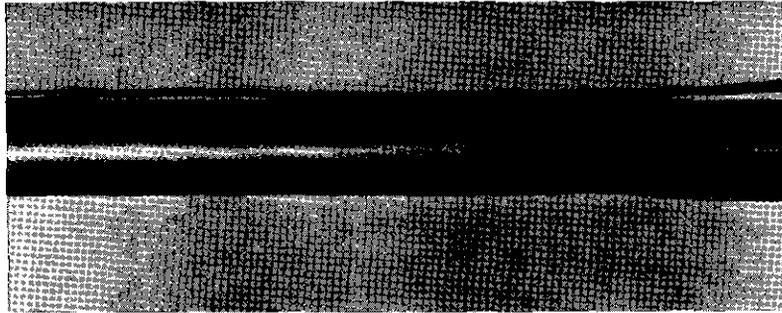


IT-78  
PNS4237-64

In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten

Berststelle Versuch -B1.1

Abb.: 44



$T_B = 915 \text{ } ^\circ\text{C}$

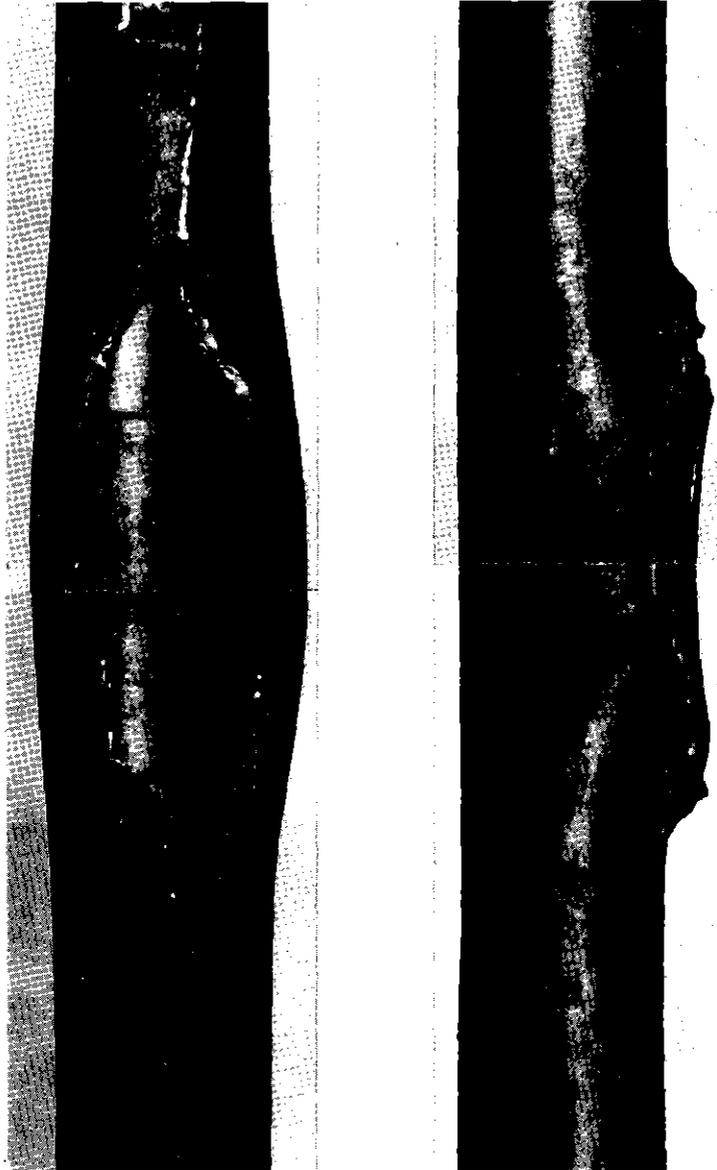
$P_B = 45,2 \text{ bar}$

$\Delta U/U_0 = 0,249$

---

**OK** RBT-IT 1977  
PNS 4237-101

**Brennstabverhalten, In-pile-Versuch  
Nr. B1.2, Ansichten der Beulstelle Abb.: 45**



$T_B = 850 \text{ }^\circ\text{C}$

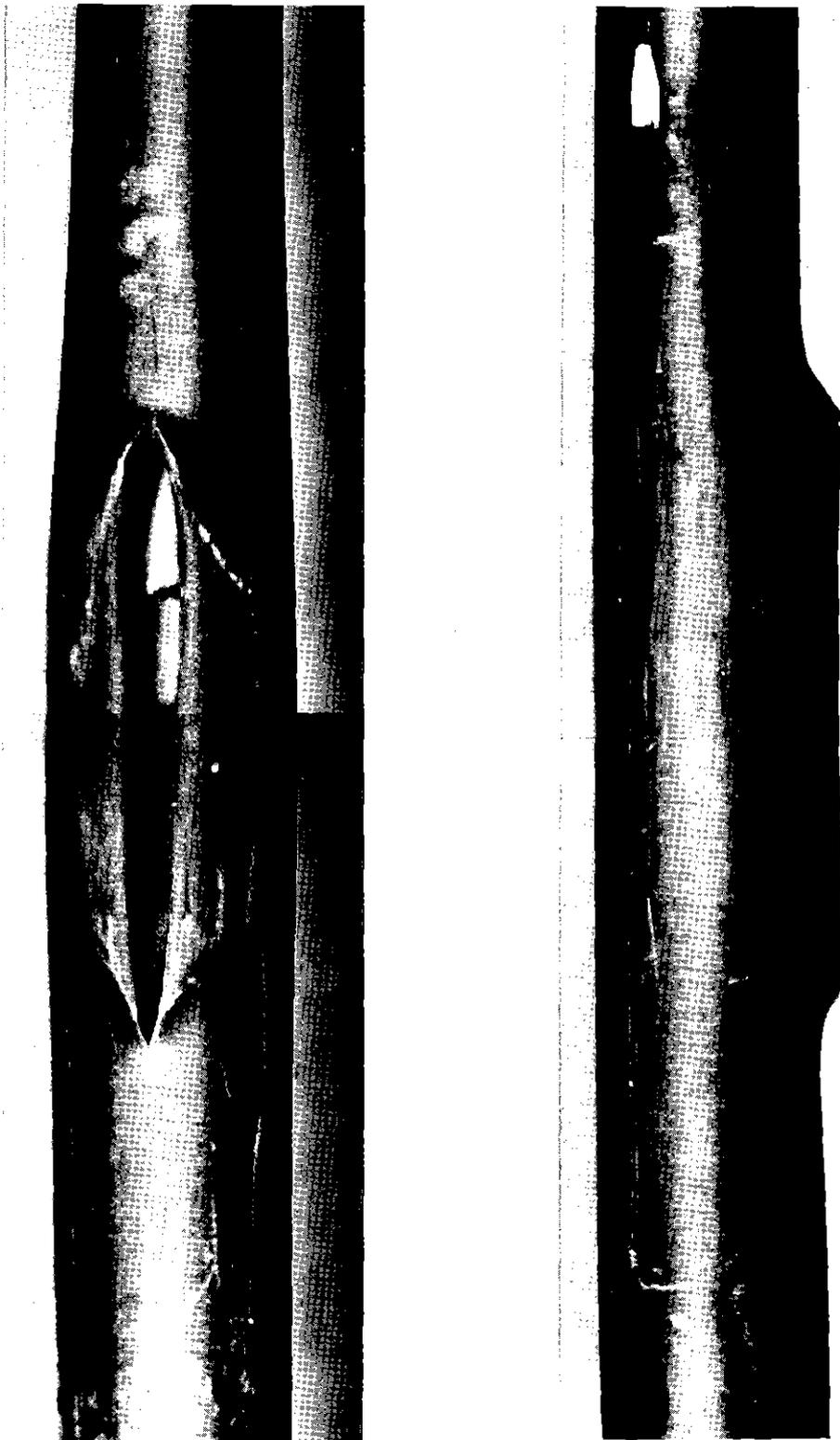
$P_B = 61,2 \text{ bar}$

$\Delta U/U_0 = 0,333$

**GIK**  
RBT-IT 1977  
PNS 4237-102

Brennstabverhalten, In-pile-Versuch  
Nr. B1.3, Ansichten der Beulstelle

Abb.: 46



In-pile - Versuch B 1.5  
Ansichten der Beulstelle

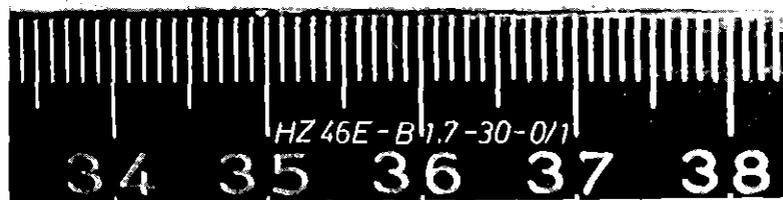
Abb.: 47



**KfK**  
KIT 79  
PNS 4237-227

In-pile-Versuch B1.6  
Ansichten der Beulstelle

Abb.:48

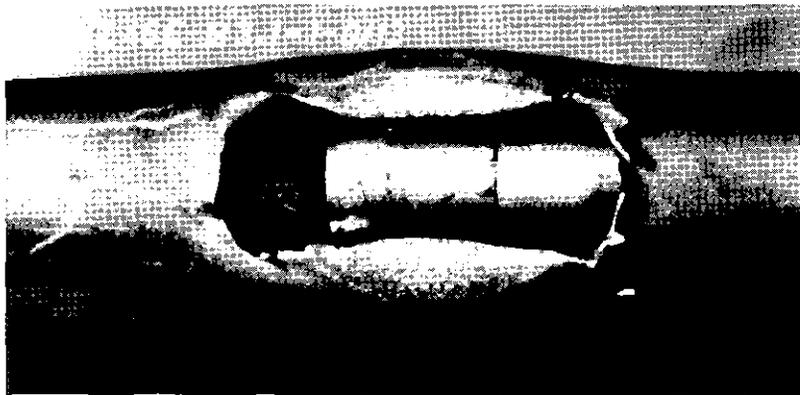
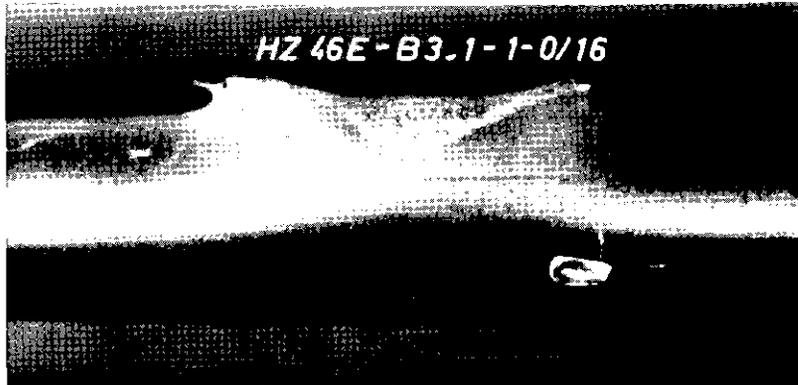


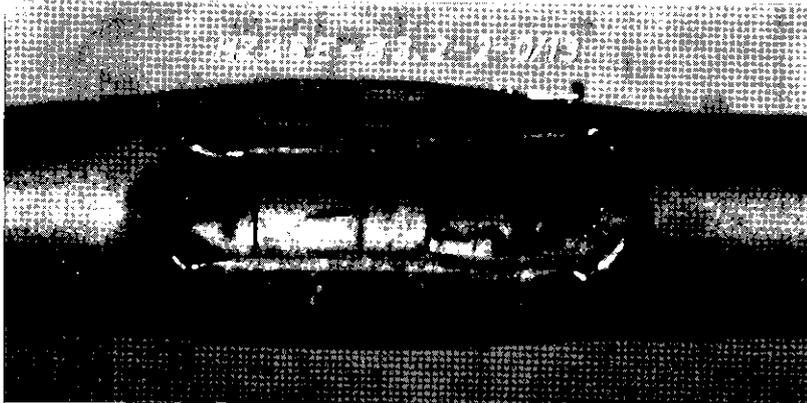
IT 1980  
PNS 4237-484

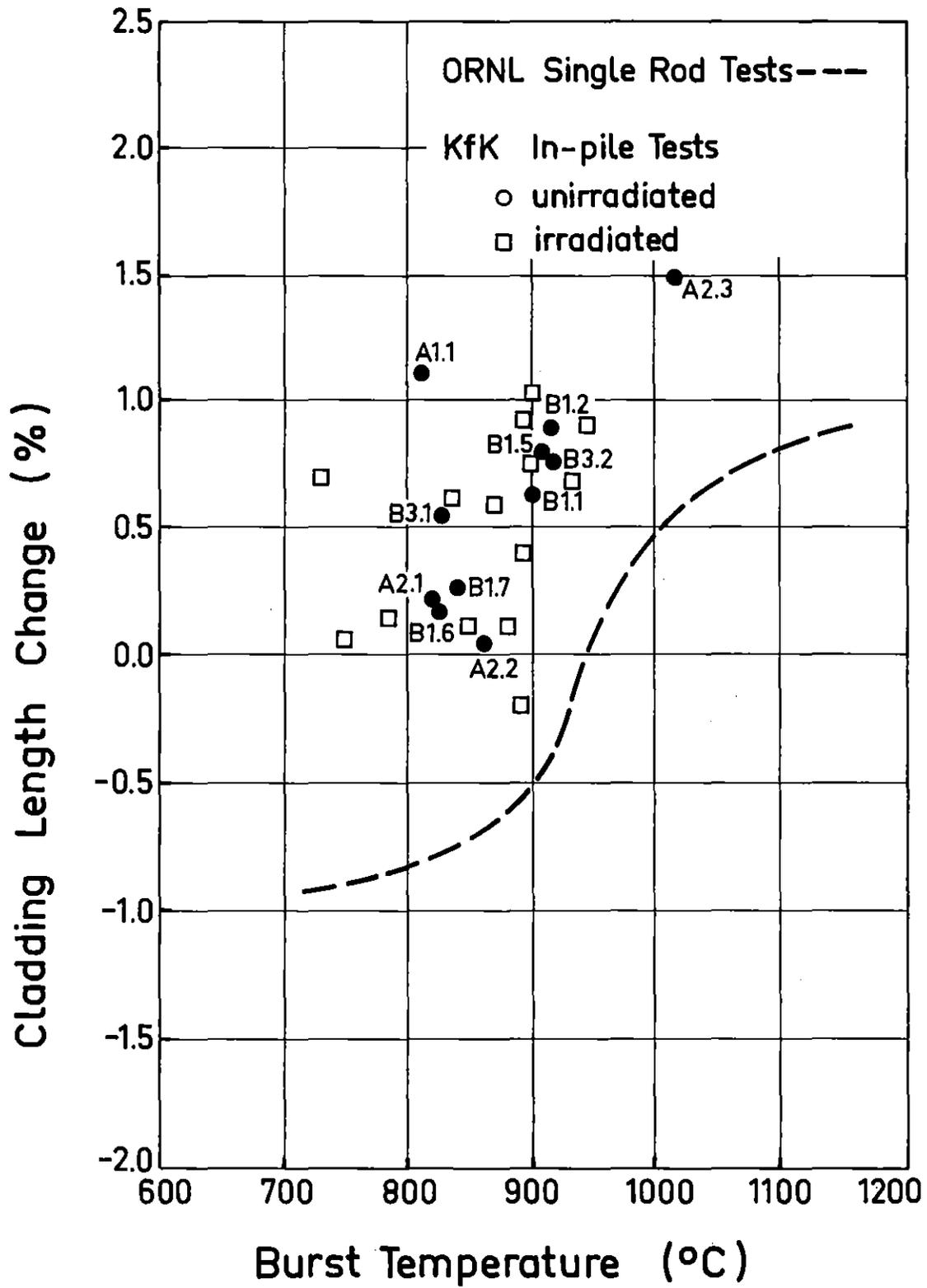
FR 2 In-Pile Tests. Test B1.7

Views of the Ruptured Zone

Abb.:49



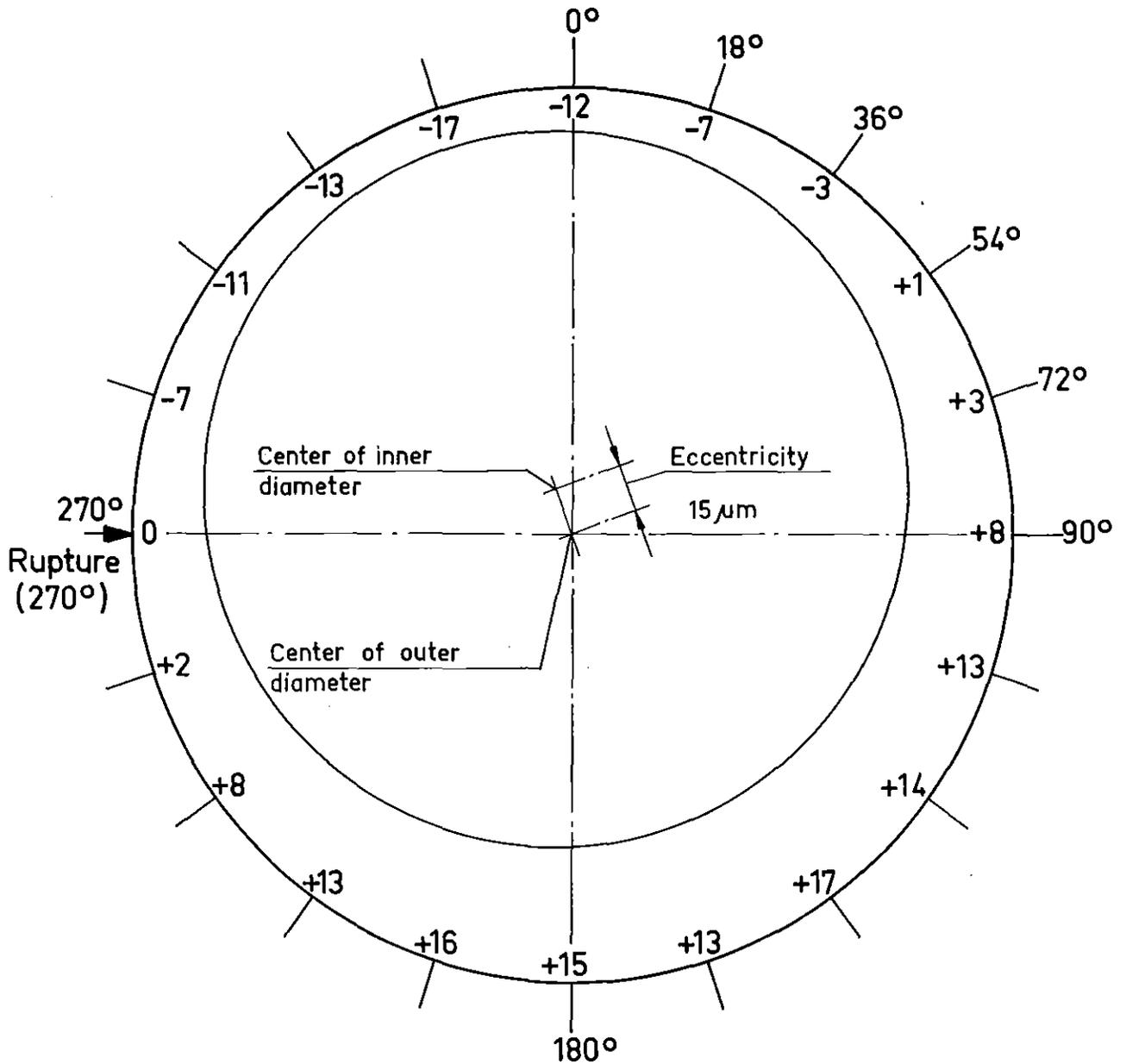




# FR2 In-Pile Tests

Cladding Length Change vs. Burst Temperature

Abb.:52



Bottom view

Measuring plane No. 13  
Measuring plane: 170mm from UKF  
Rupture midplane: 40mm from UKF

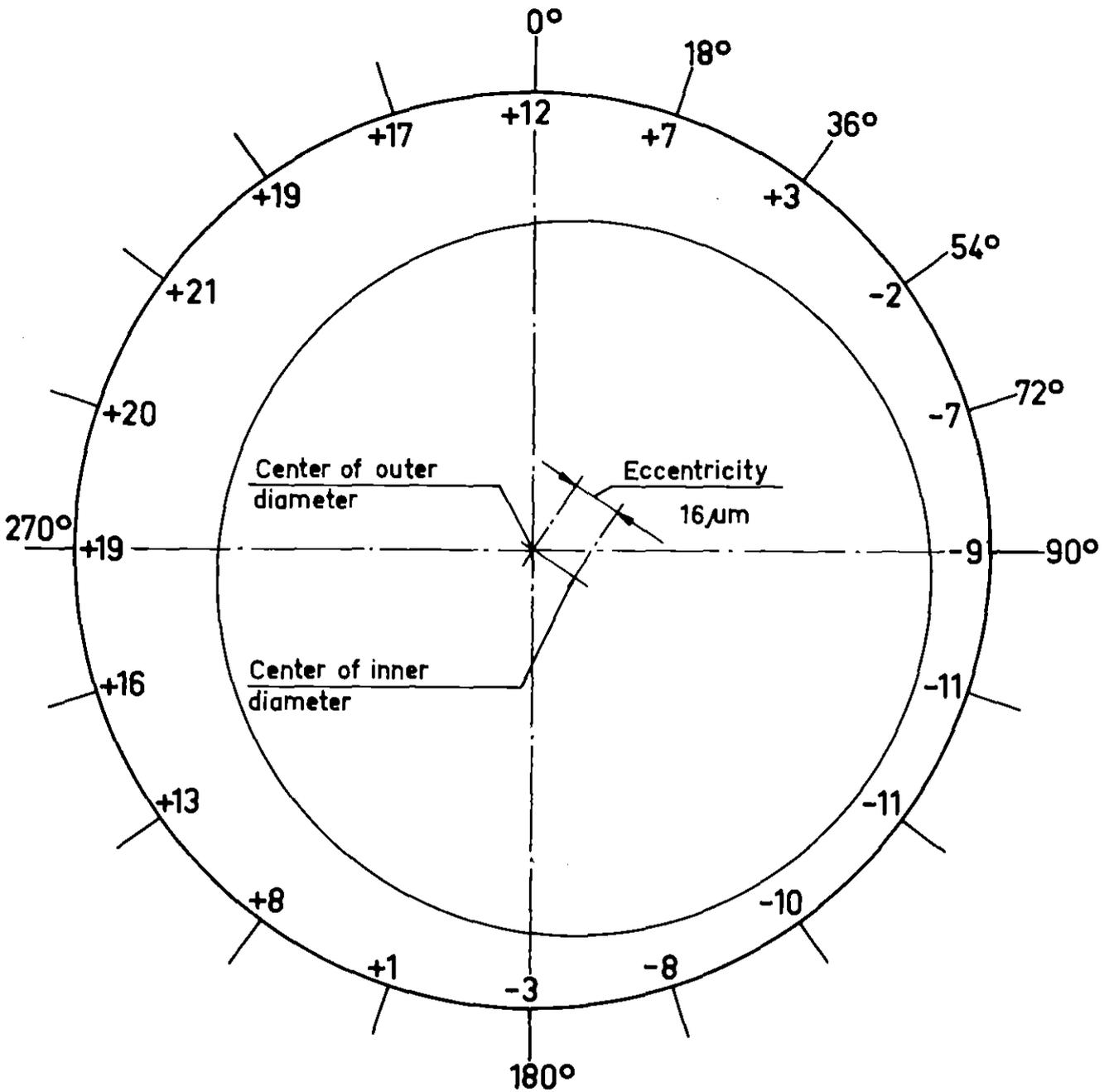
TEST A1.1; ROD 15

**KIK**  
IT 1980  
PNS 4237-359.1

## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.1



Bottom view

Measuring plane: 1-14

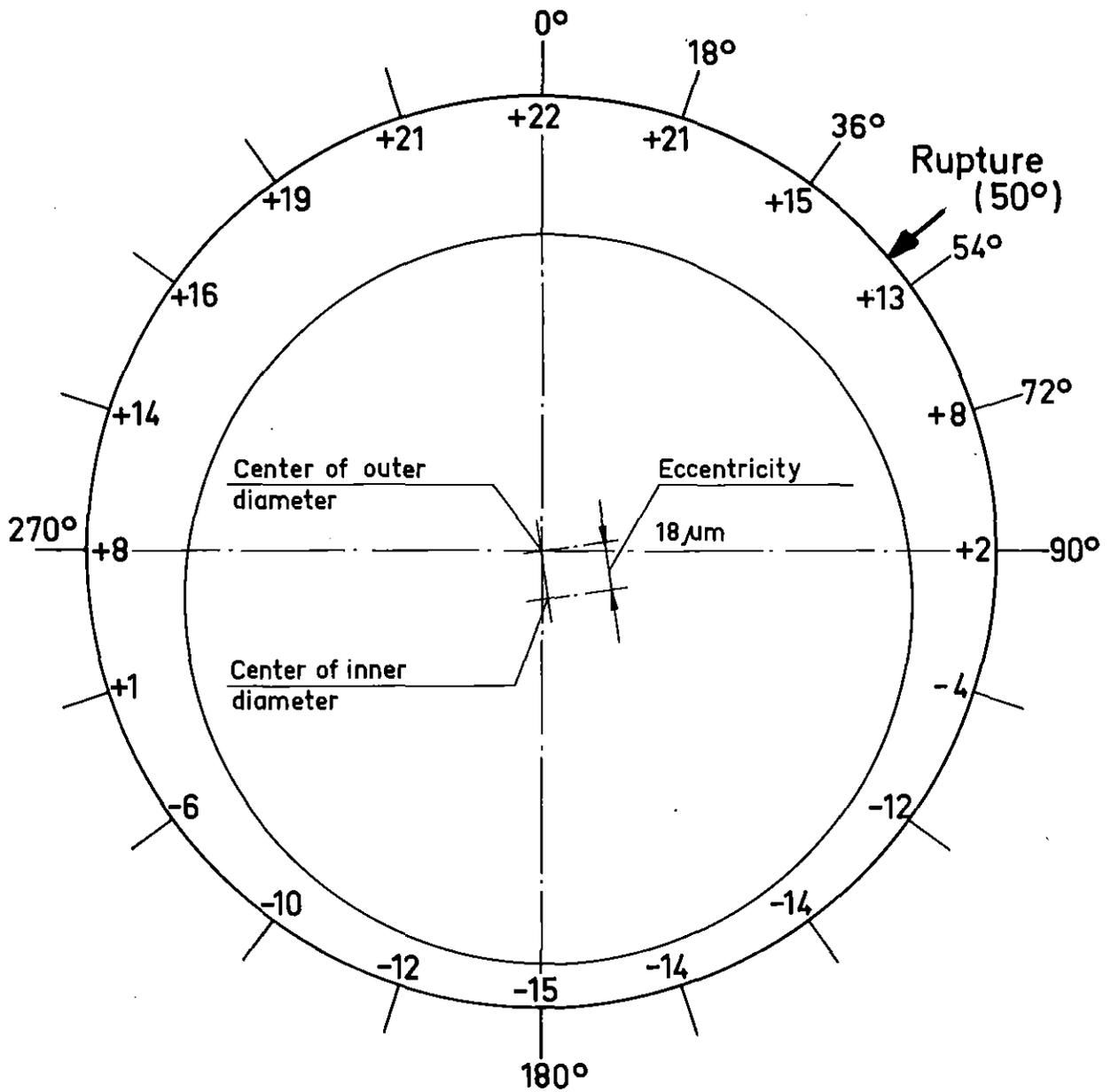
TEST A1.2; ROD 14

KIK IT 1980  
PNS 4237-359.2

## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.2



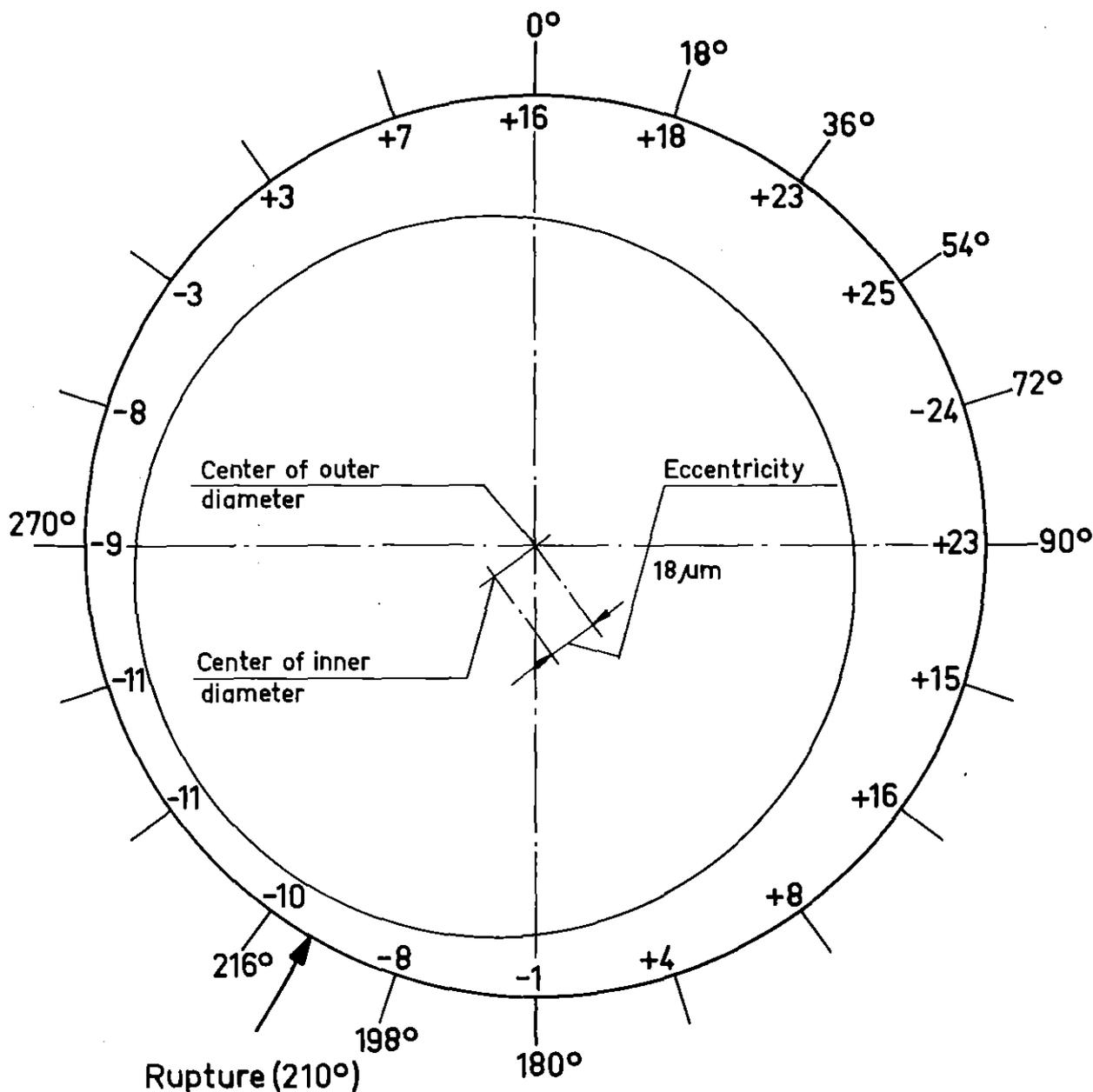
Bottom view

Measuring plane No. 9  
Measuring plane: 230 mm from UKF  
Rupture midplane: 237 mm from UKF

TEST A2.1; ROD16

## FR 2 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: 155mm from UKF  
 Rupture midplane: 237mm from UKF

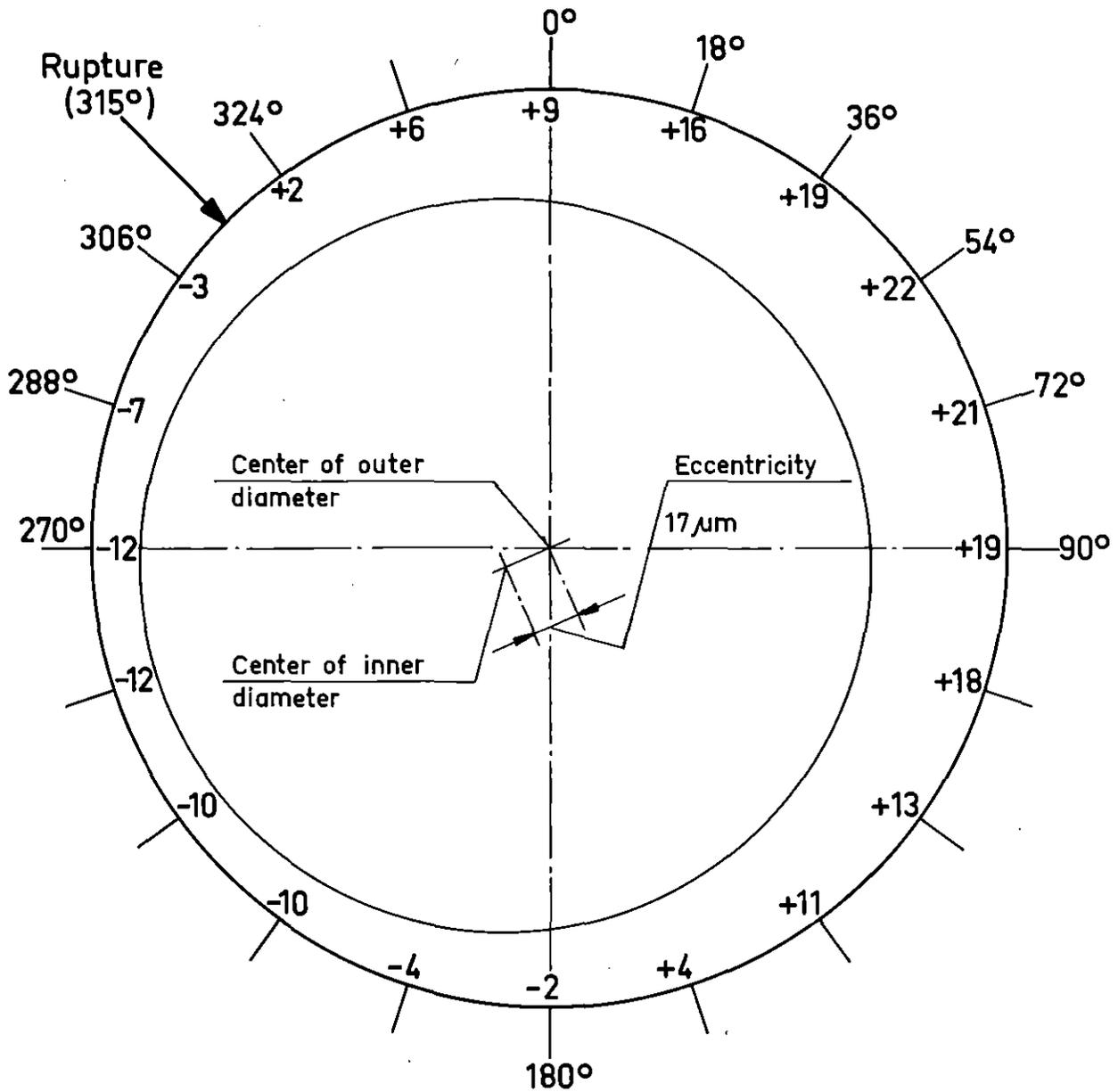
TEST A2.2; ROD 17

**KFK**  
 IT 1980  
 PNS4237-359.4

## FR 2 In-pile tests

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

Abb.: 53.4



Bottom view

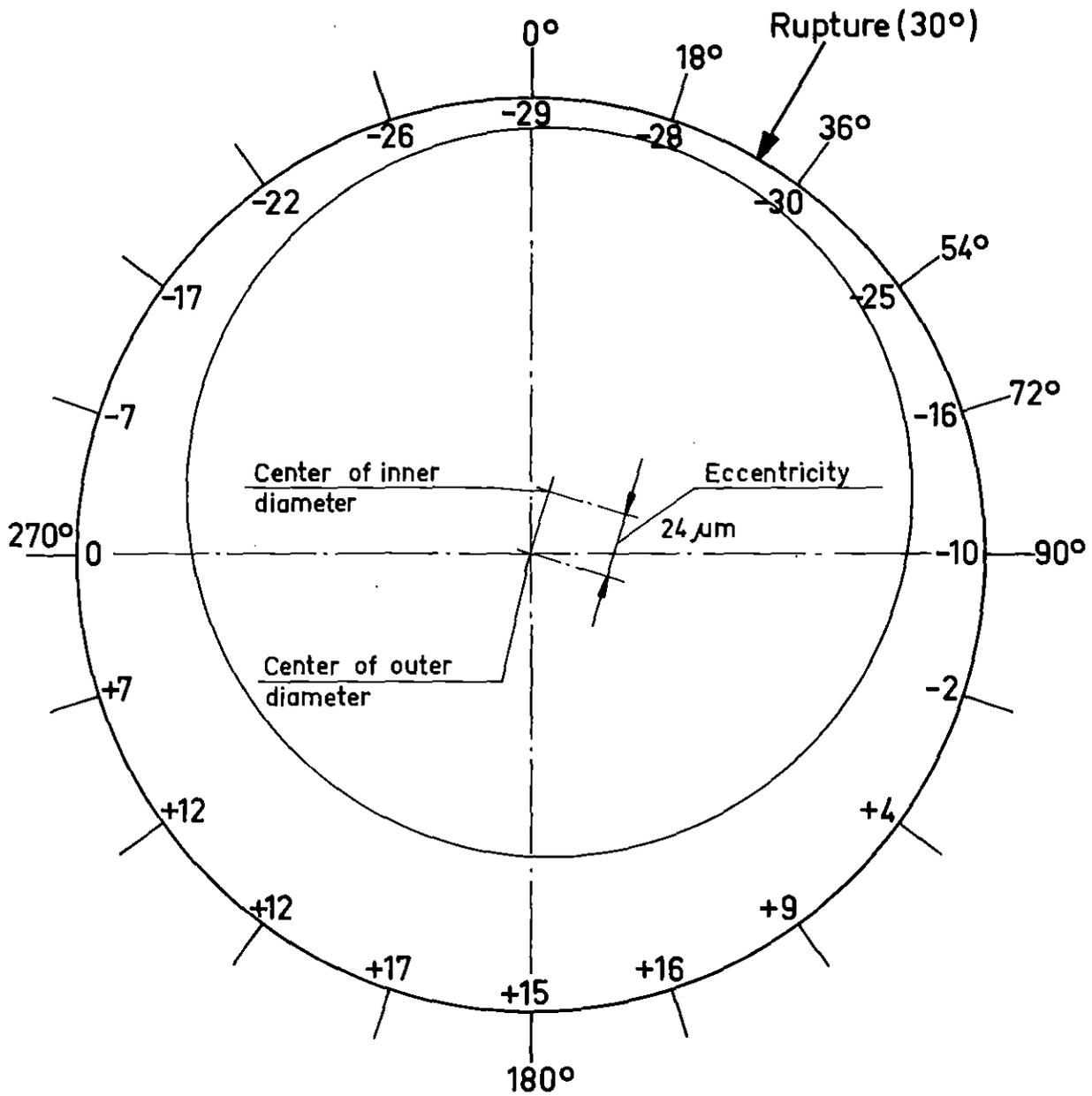
Measuring plane No.14  
Measuring plane: 155mm from UKF  
Rupture midplane: 144 mm from UKF

TEST A2.3; ROD18

## FR 2 In-pile tests

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

Abb.:53.5



Bottom view

Measuring plane No. 5

Measuring plane : 290mm from UKF

Rupture midplane : 290mm from UKF

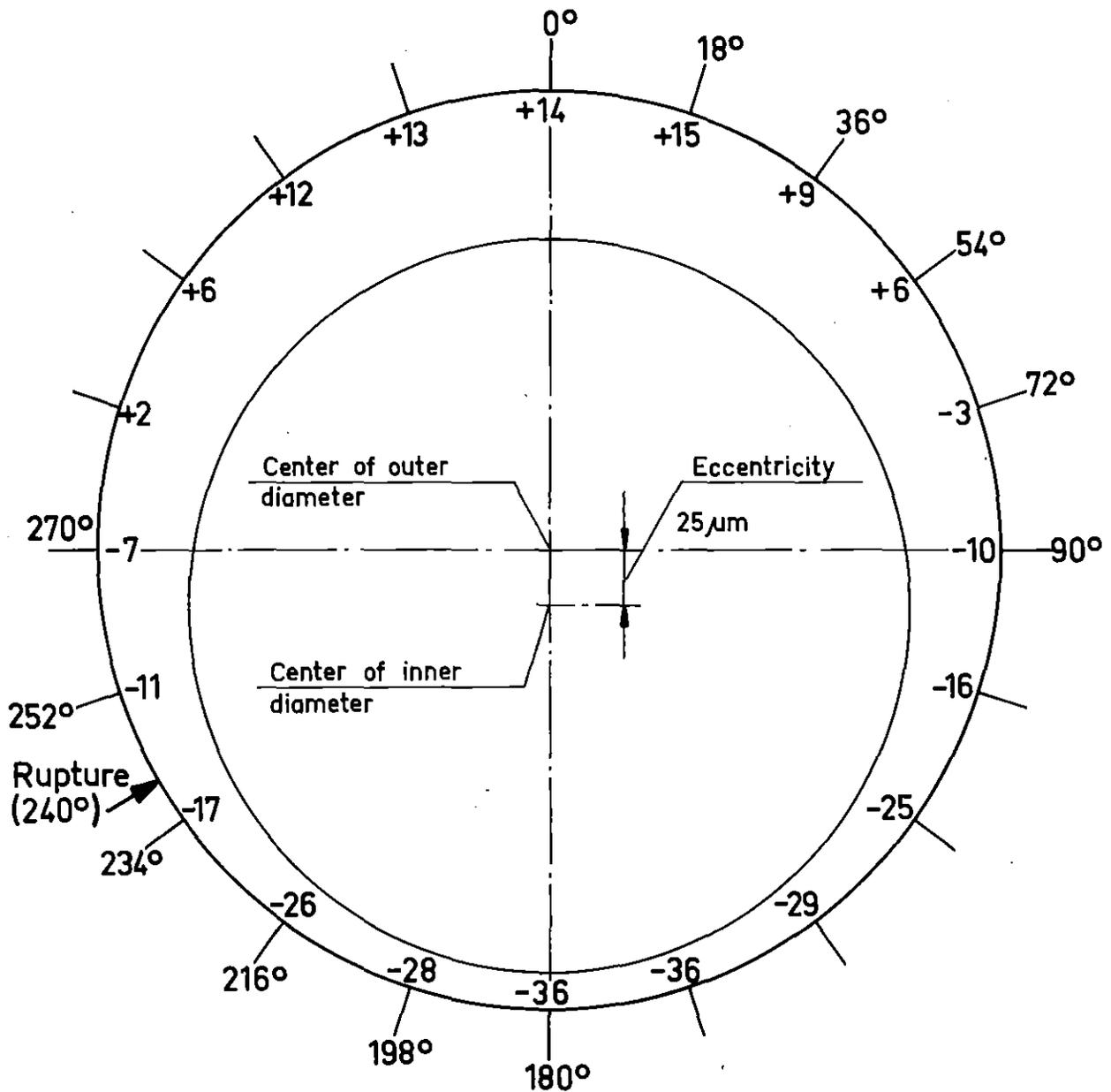
TEST B1.1; ROD 20

**KIK**  
IT 1980  
PNS 4237-359.6

## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.6



Bottom view

Measuring plane No.2

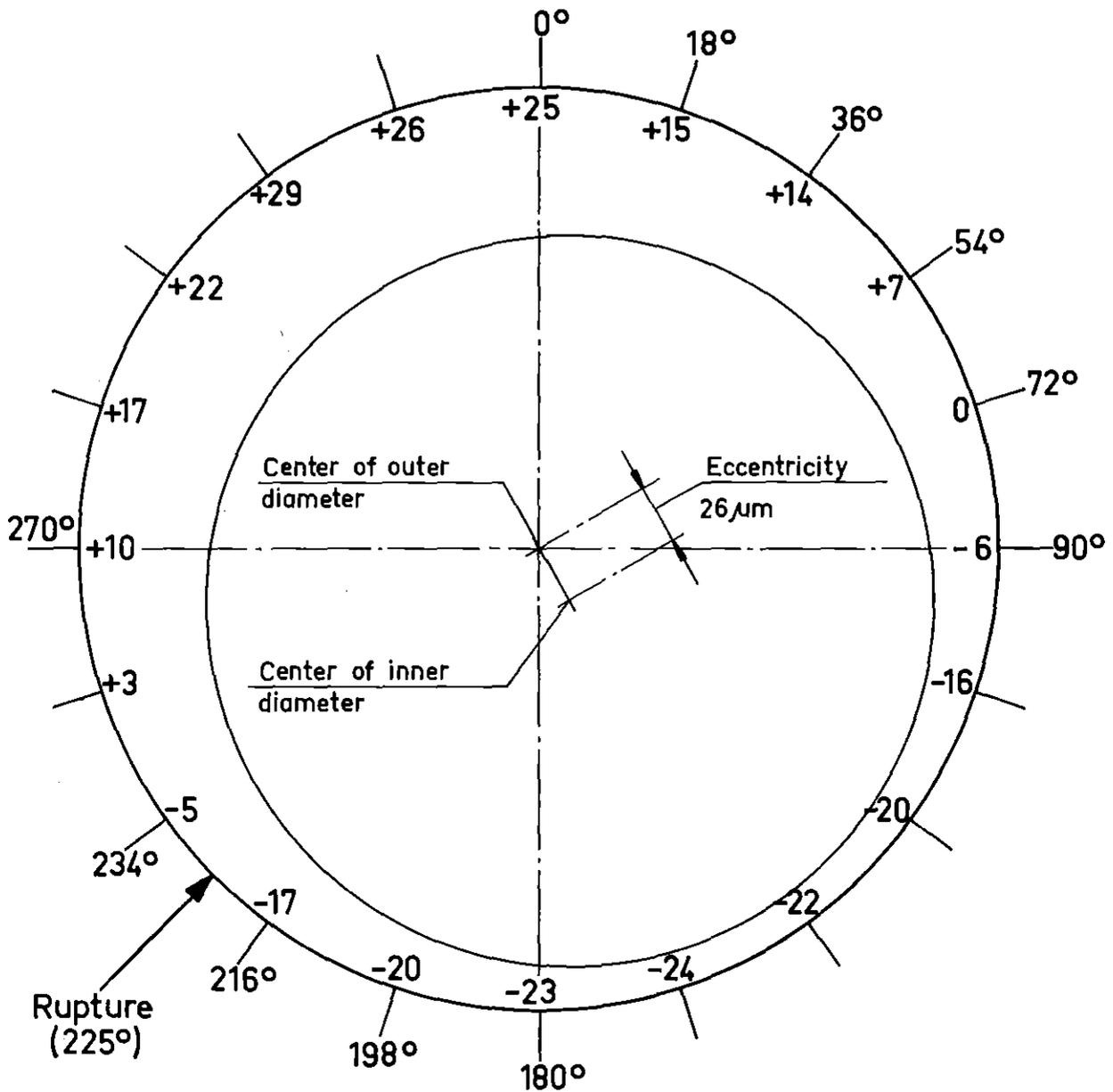
Measuring plane : 335 mm from UKF

Rupture midplane: 338 mm from UKF

TEST B1.2, ROD 21

## FR2 In-pile tests

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



Bottom view

Measuring plane No. 6

Measuring plane: 275mm from UKF

Rupture midplane: 280mm from UKF

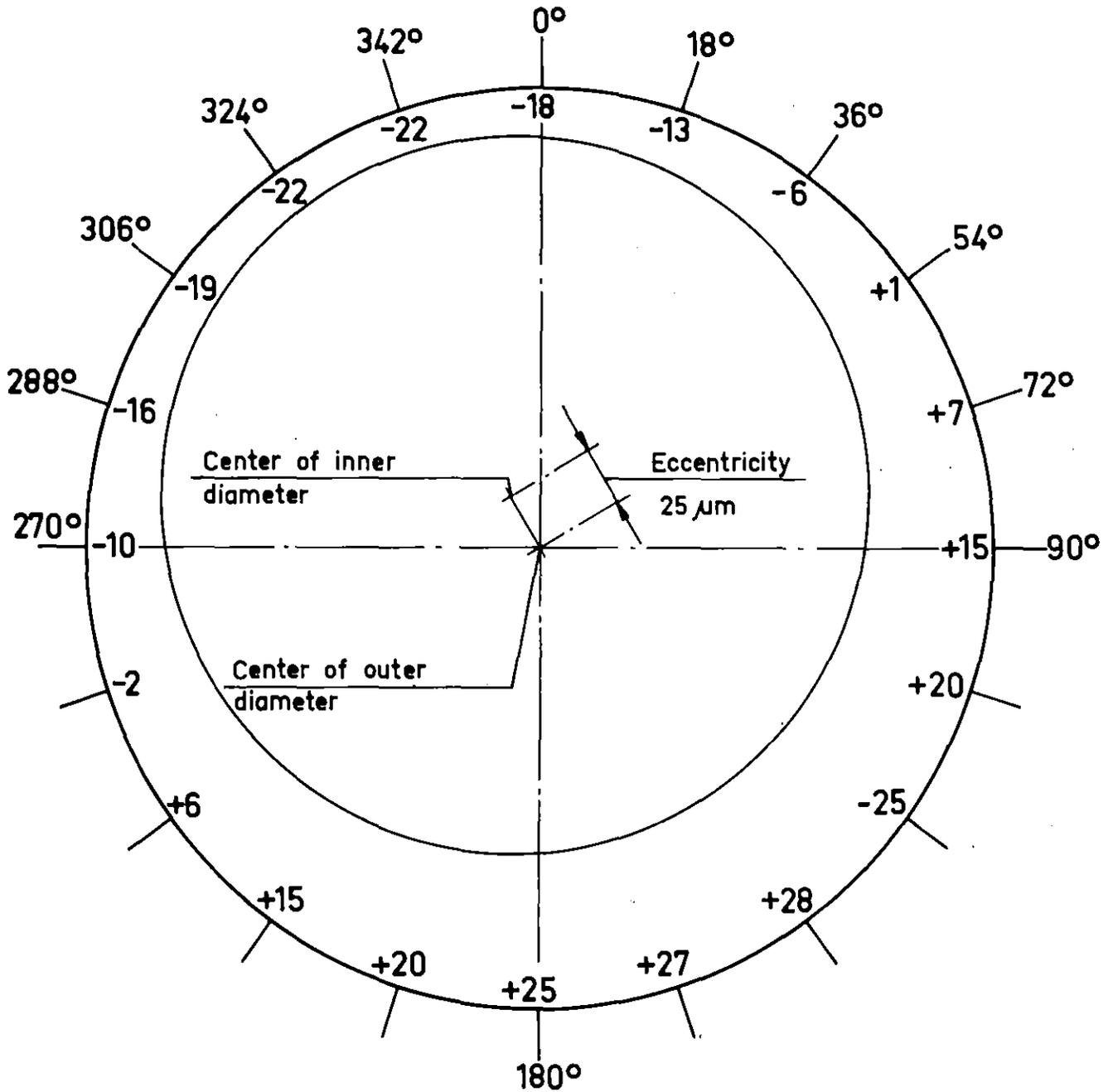
TEST B1.3; ROD 22

KIK IT 1980  
PNS 4237-359.8

## FR 2 In-pile tests

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

Abb.: 53.8



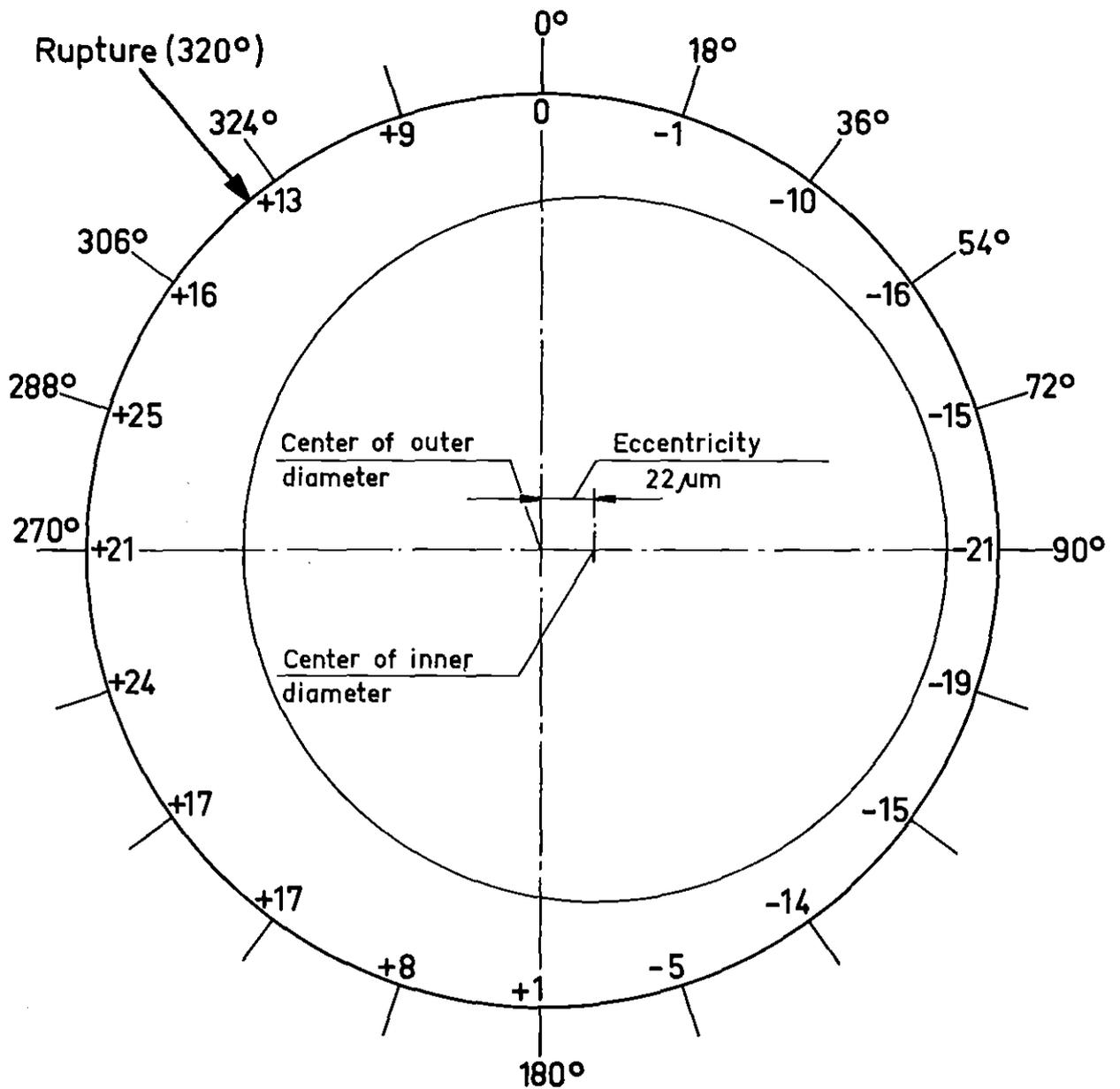
Bottom view

Measuring plane: 1-14

TEST B1.4; ROD 23

## FR 2 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: 159 mm from UKF

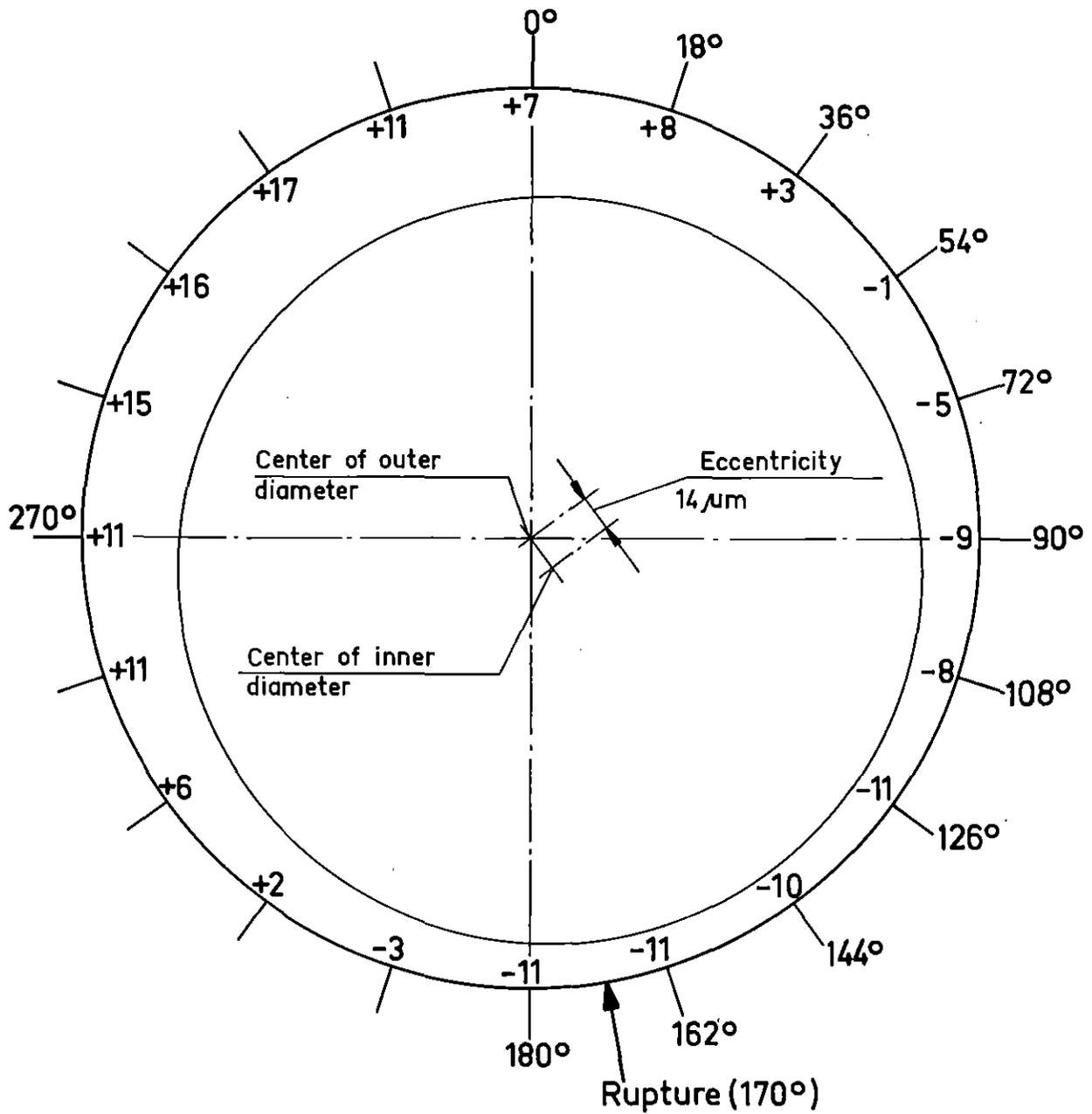
TEST B1.5; ROD 24

**KIK** IT 1980  
PNS 4237-359.10

## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.10



Bottom view

Measuring plane No.5

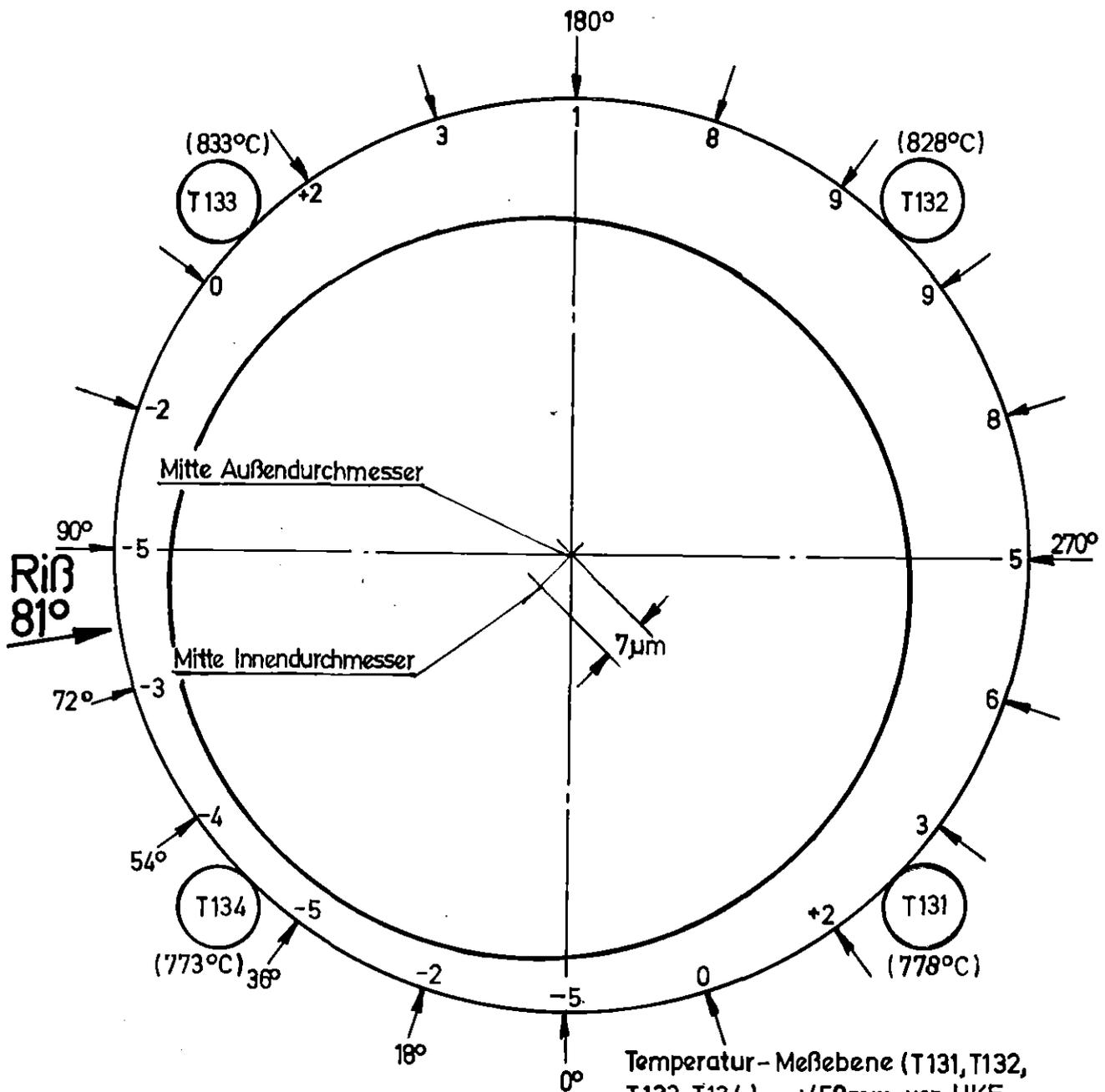
Measuring plane: 290 mm from UKF

Rupture midplane: 290 mm from UKF

TEST B1.6; ROD 25

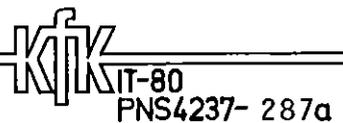
## FR2 In-pile tests

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

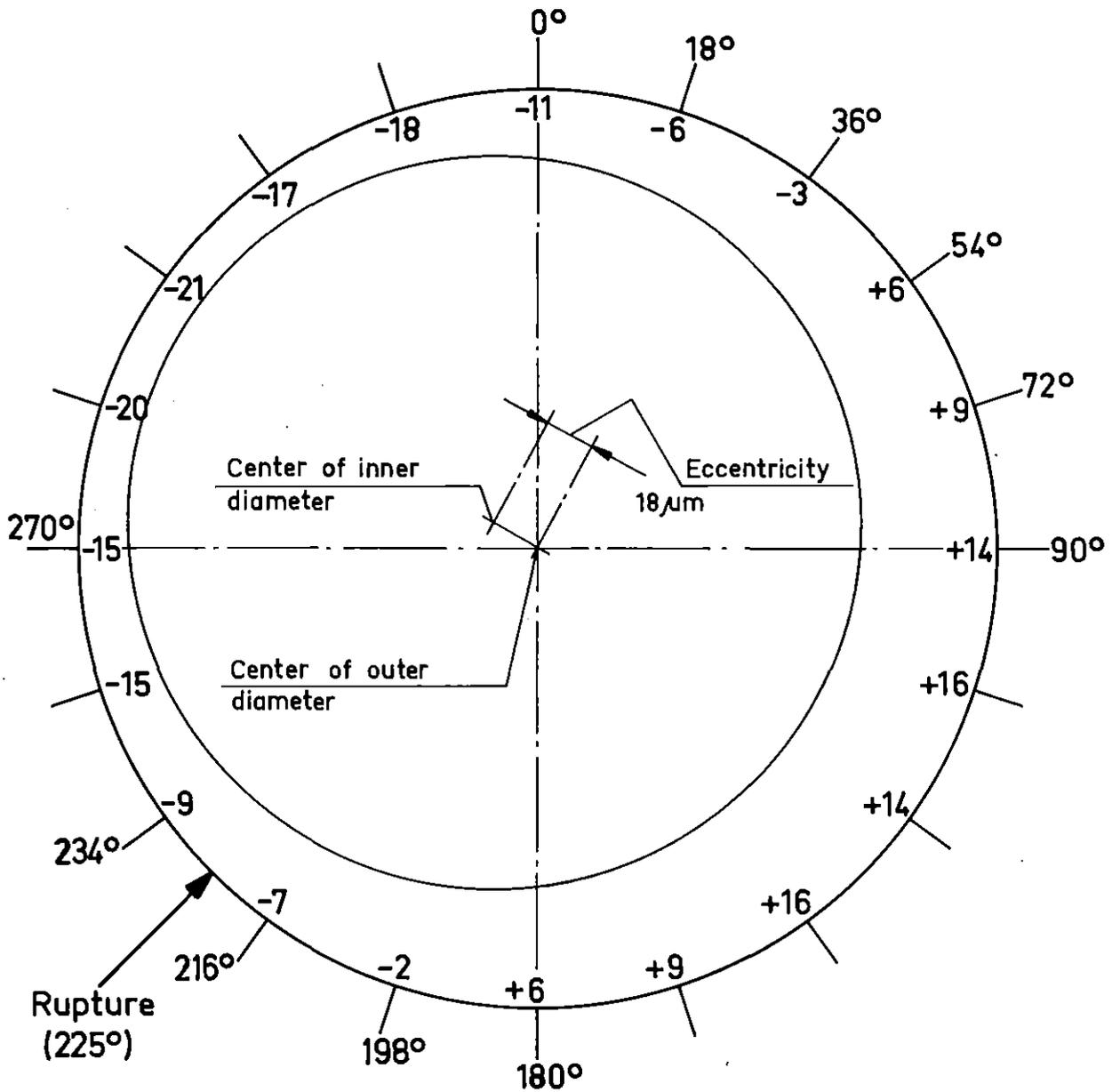


Ansicht von unten

Temperatur-Meßebeine (T131, T132, T133, T134) : 450 mm von UKF  
 (Temperatur zum Berstzeitpunkt)  
 Wändicken-Meßebeine : 260 mm von UKF  
 Wändicken als Abweichungen vom Nominalmaß : 0,725 mm in [µm]  
 Rißmitte : 258 mm von UKF

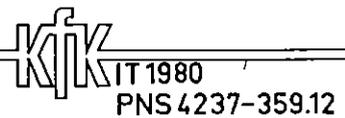


Umfangsverteilung der Wändicke und der Hülltemperatur im Versuch B1.7 Abb.: 53.12



Bottom view  
Measuring plane No. 8  
Measuring plane: 245 mm from UKF  
Rupture midplane: 239 mm from UKF

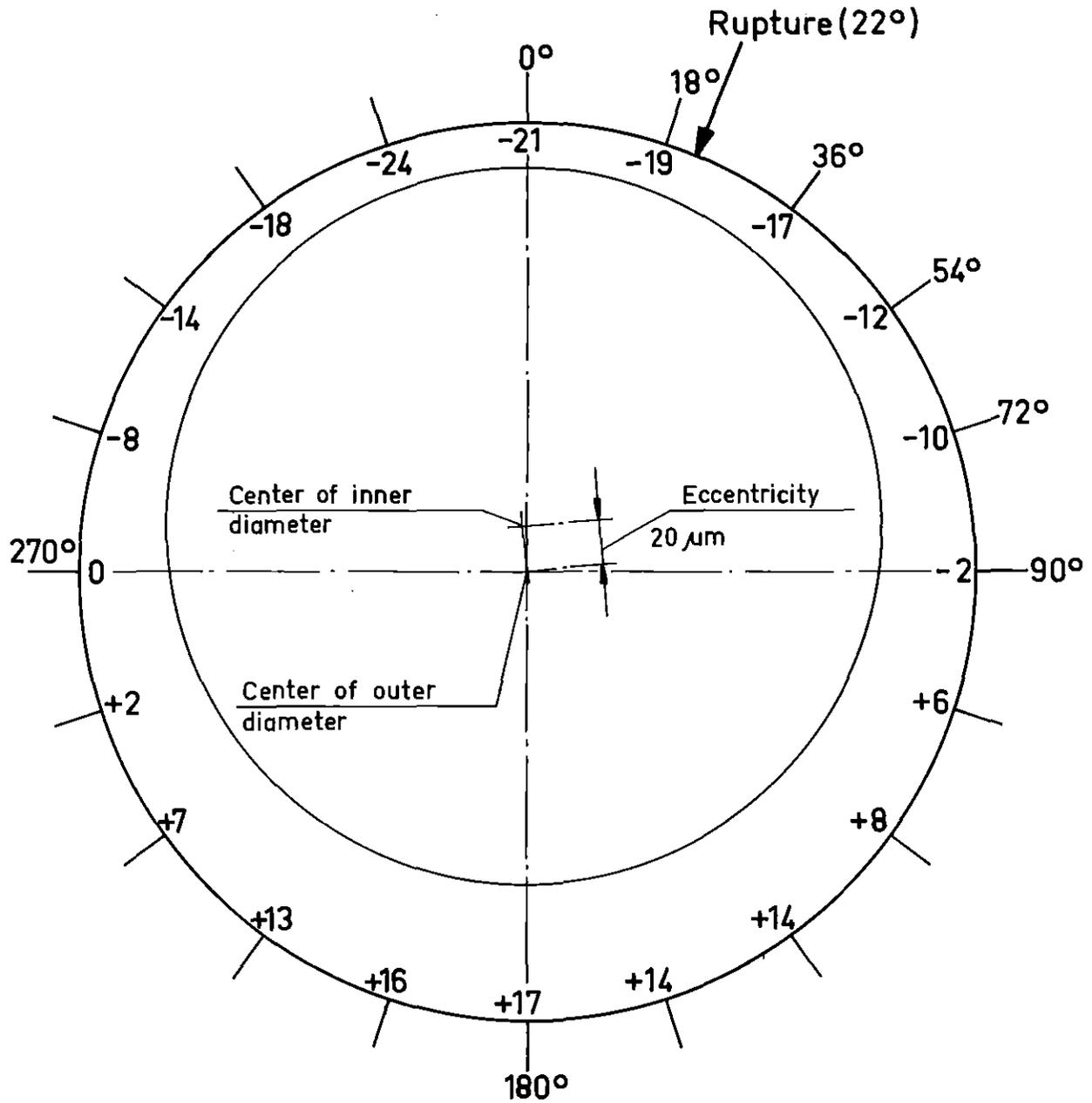
### TEST B3.1; ROD 1



## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.13



Bottom view

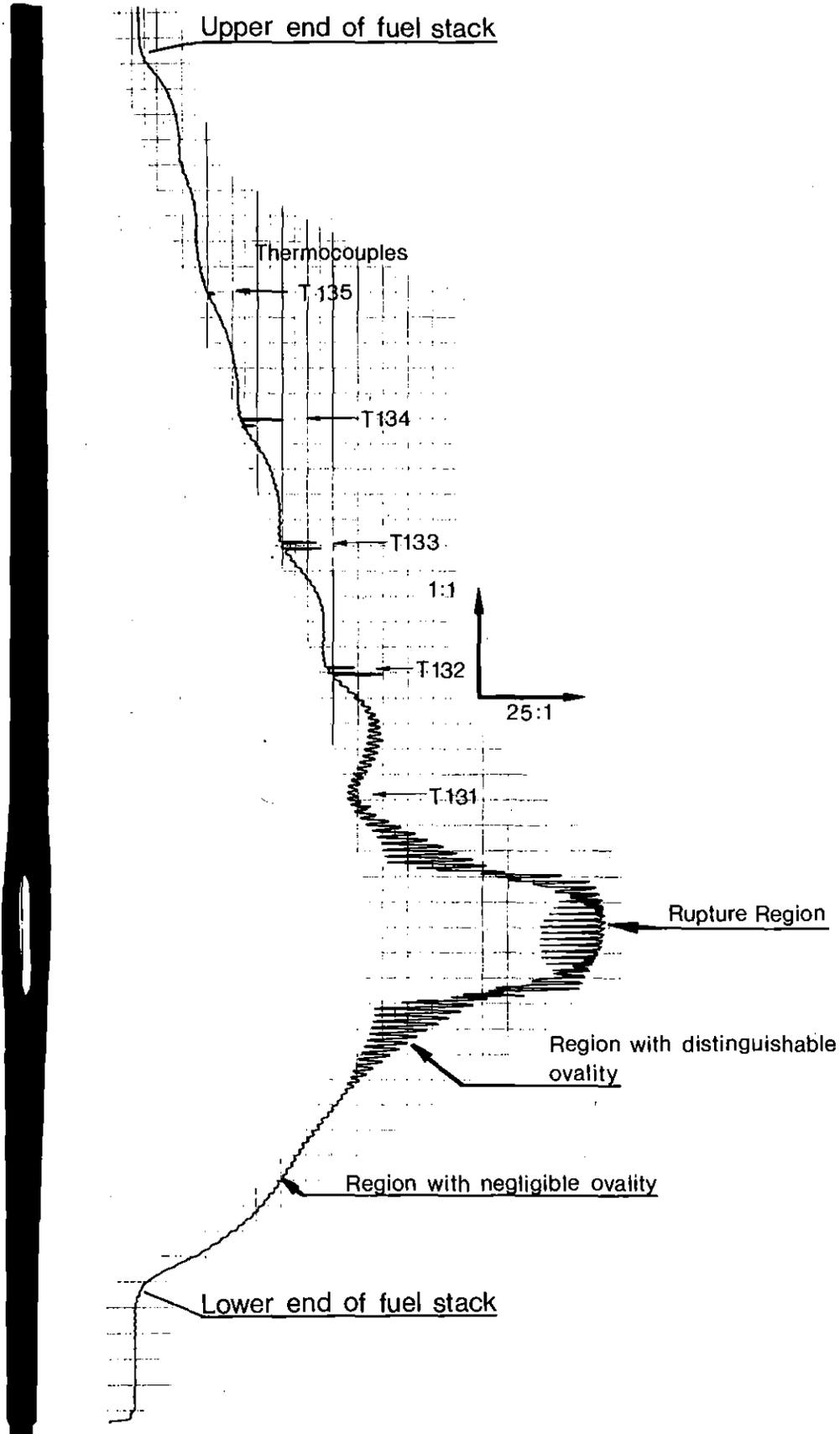
Measuring plane No. 8  
Measuring plane: 245 mm from UKF  
Rupture midplane: 242 mm from UKF

TEST B3.2; ROD 2

## FR2 In-pile tests

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

Abb.: 53.14

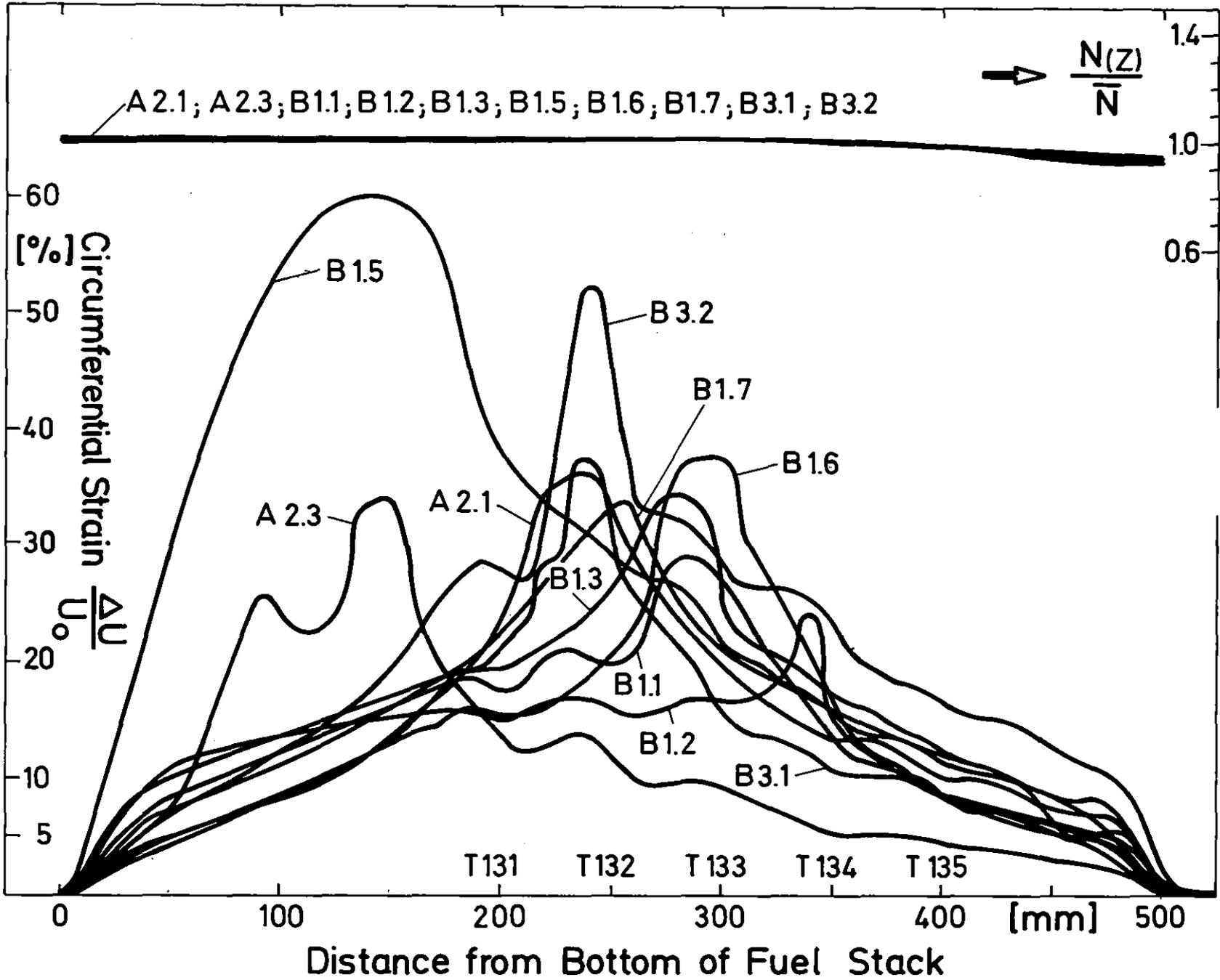


IT 1980  
PNS 4237-400

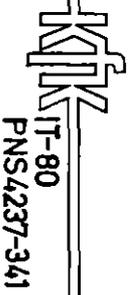
## FR 2 In-Pile Tests.

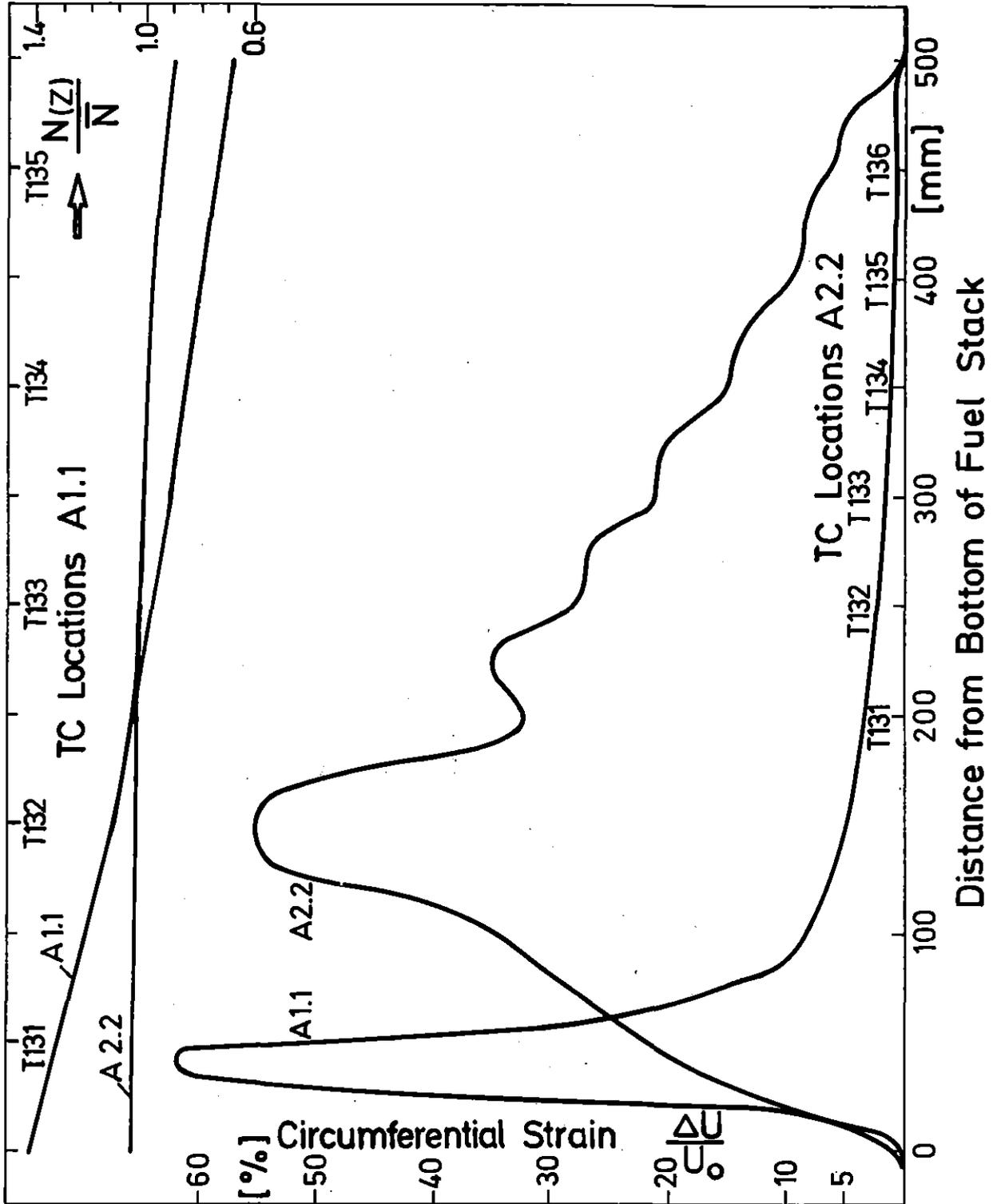
Typical spiral profile;  
posttest measured rod diameters of test A2.2

Abb.: 54



**FR 2 In-Pile Tests.**  
Circumferential Elongations and Axial Power Profiles of the  
A and B Tests (unirradiated)  
Abb.: 55

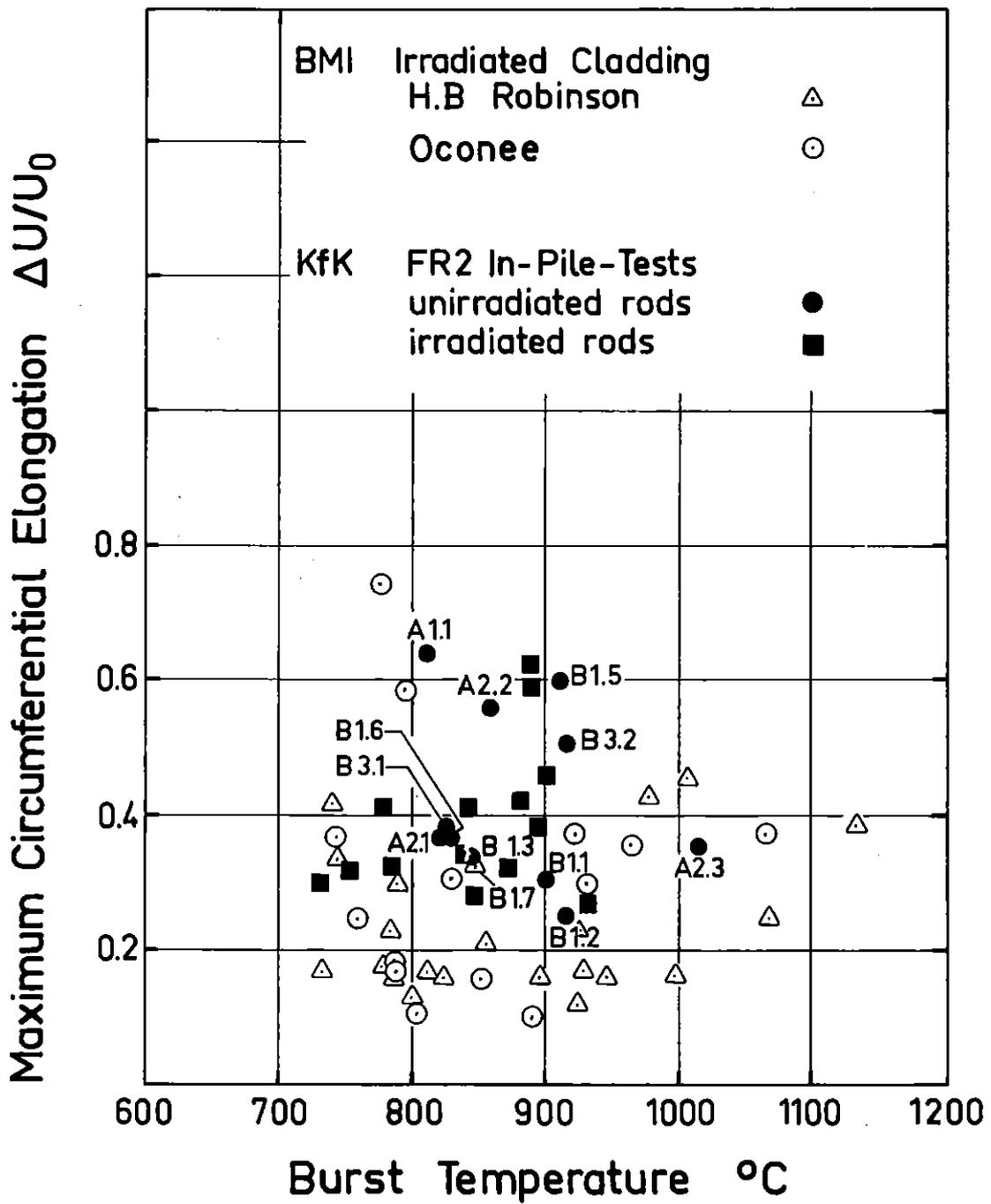




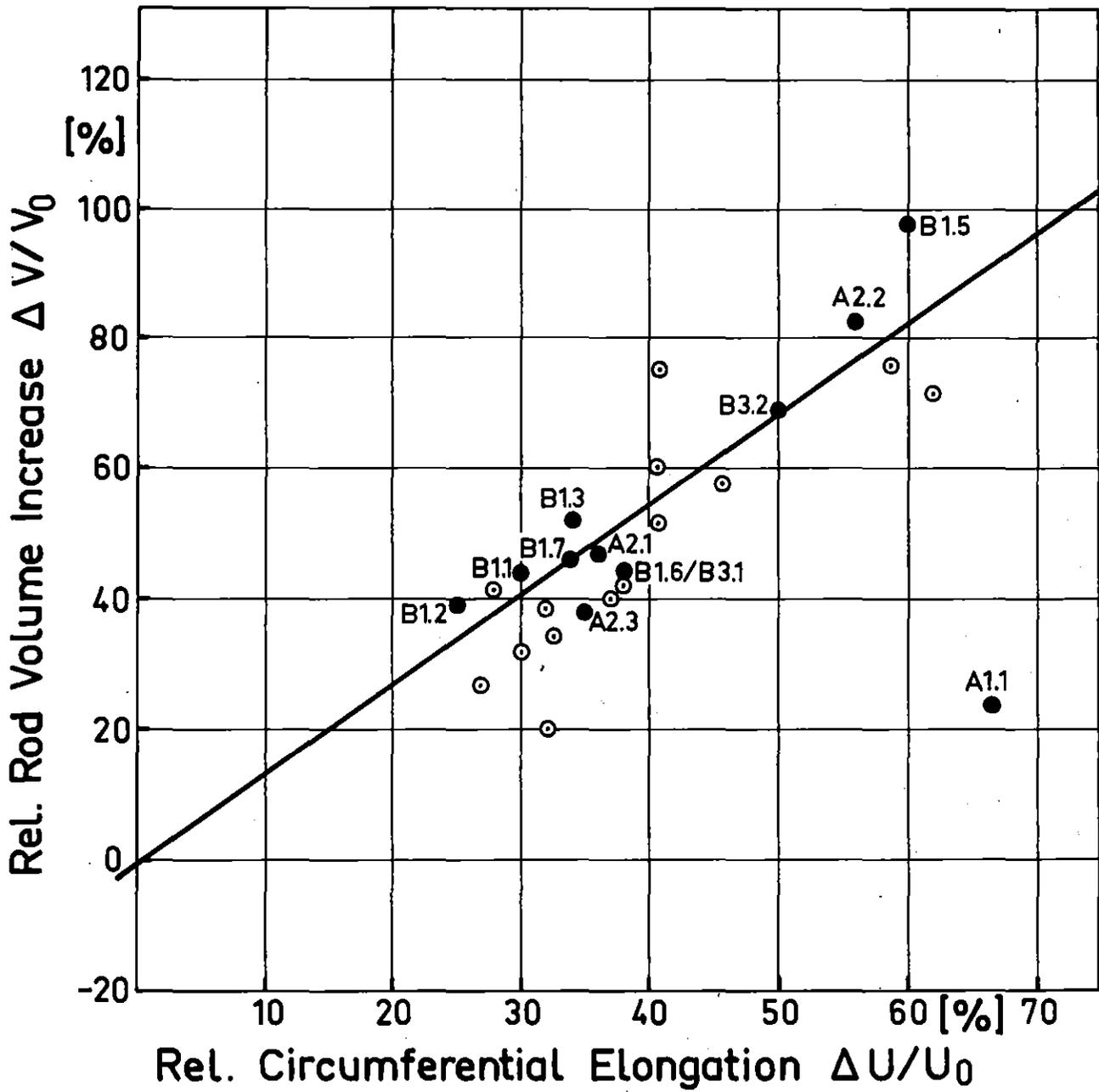
## FR2 In-Pile Tests.

Circumferential Elongations and Axial Power Profiles of the  
A1.1 and A2.2 Tests (unirradiated)

Abb.: 56



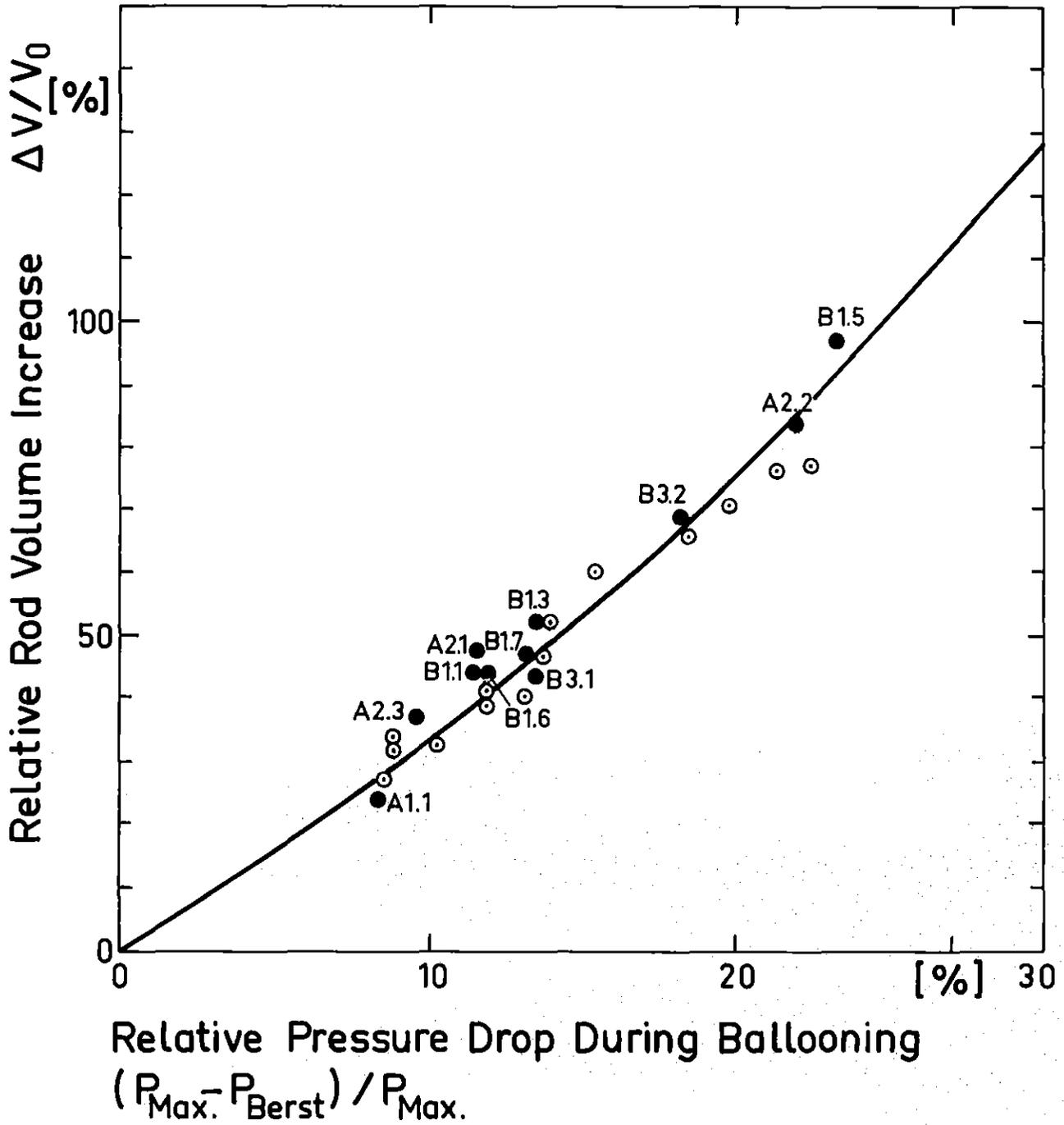
FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam  
Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temperature  
Abb: 57



## FR2 In-Pile Tests

Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation

Abb.: 58



## FR 2 In-Pile Tests

Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop

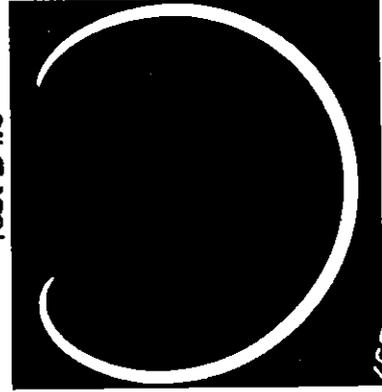
Abb.: 59



Test A 2.3



Test B 1.5



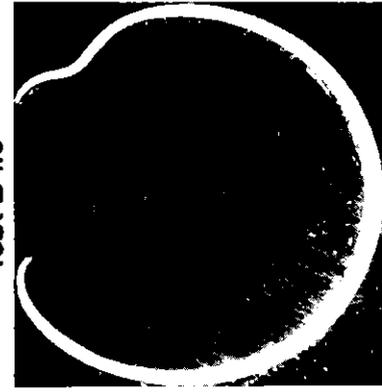
Test B 1.7



Test A 2.2



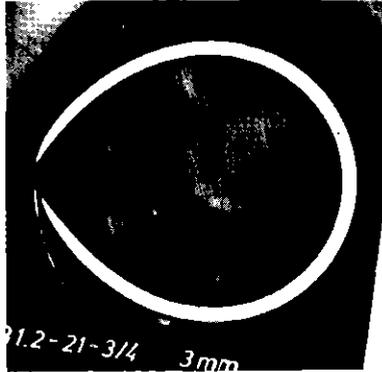
Test B 1.3



Test B 3.2



Test A 2.1



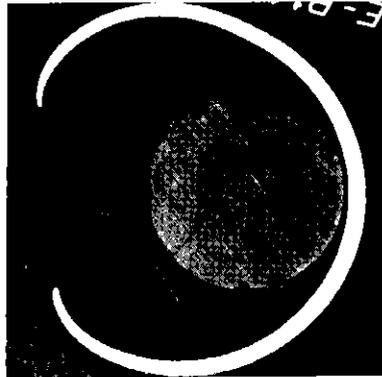
Test B 1.2



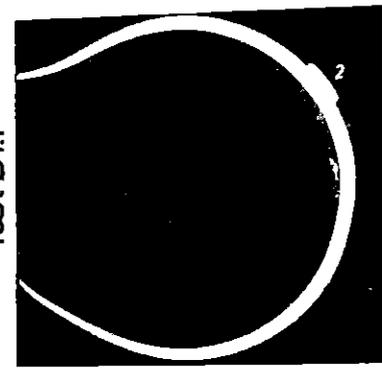
Test B 3.1



Test A 1.1



Test B 1.1



Test B 1.6

IT-80  
PNS4237-487

### In-pile Tests in FR2

Cross Sections of the A- and B-Test Rods (Unirradiated)

Abb. 60

A n h a n g I

Tabelle 13: Unveröffentlichte Berichte über die In-pile-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten unter LOCA-Bedingungen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen

1. Unveröffentlichte Versuchsberichte

<u>Versuch</u>	<u>Berichtsdatum</u>
A 1.1	Juni 1977
A 2.3	Mai 1978
B 1.2	Juli 1978
A 2.1	Okt. 1978
A 2.2	Okt. 1978
B 1.1	Dez. 1978
A 1.2	Jan. 1979
B 1.3	März 1979
B 1.5	Juli 1979
B 3.2	Aug. 1979
B 3.1	Sept. 1979
B 1.6	Sept. 1979

2. unveröffentlichte Metallografie-Berichte

A 2.3	Jan. 1978
B 1.2	April 1978
A 2.1	Aug. 1978
A 2.2	Mai 1979
B 1.1	Mai 1979
B 1.5	Nov. 1979
B 1.6	Jan. 1980
B 3.1	Febr. 1980
B 1.3	März 1980
B 3.2	April 1980

A n h a n g   I I

Meßwerte vor Auslösung der Transiente,  
Versuche der Serie A und B.

Tabelle 14.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: A 1.1

Datum: 8.10.75

Uhrzeit: 22:42:09

CALAS-Adresse	McB-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	461 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	295 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	281 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	308 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	325 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	337 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	338 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	331 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	330 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	306 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	320 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	324 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	321 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	327 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	-
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	57 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	58 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,1 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	54 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	268 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	284 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	538 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	10,8 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	52 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	31 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	35-36 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	62 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	239 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h

Tabelle 14.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: A 1.2

Datum: 29.10.75

Uhrzeit: 17:01:00

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	94 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	273 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	311 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	324 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	87 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	314 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	345 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	341 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	336 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	375 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	351 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	355 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	324 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	311 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	76 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	55 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	59 bar
18	P 63	Druck vor Blende	55 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	58 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	2,1 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	54 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	267 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	279 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	522 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	20,1 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	100 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	29 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	36-38 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	56 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	854 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: A 2.1      Datum: 6.7.76      Uhrzeit: 11:58:54

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	466 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	302 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	307 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	334 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	367 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	341 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	340 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	337 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	333 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	369 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	389 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	408 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	388 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	388 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	-
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	59 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	55 bar
18	P 63	Druck vor Blende	54 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	55 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	101 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	274 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	282 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	494 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	27,1 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	80 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	41 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	46-49 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	60 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	830 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h

Tabelle 14.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: A 2.2

Datum: 13.8.76

Uhrzeit: 10:46:01

CALAS-Adresse	Meßstelle	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	305 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	327 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	365 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	344 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	343 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	336 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	336 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	350 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	356 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	364 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	360 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	374 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	280 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	50 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	40 bar
18	P 63	Druck vor Blende	36 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	31 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	74 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	276 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	282 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	543 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	20,2 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	58 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	43 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	47-49 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	61 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	796 mbar
	m	Dampfmengenstrom	112 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: A 2.3

Datum: 2.9.76

Uhrzeit: 12:31:54

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	501 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	320 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	373 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	350 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	349 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	342 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	342 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	370 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	367 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	372 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	371 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	365 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	365 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	52 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	42 bar
18	P 63	Druck vor Blende	39 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	32 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	26 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	277 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	540 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	20,5 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	51 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	54-56 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	63 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	857 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	119 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.6: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.1 Datum: 26.10.76 Uhrzeit: 13:24:57

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	470 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	305 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	307 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	327 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	362 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	339 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	337 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	334 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	331 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	348 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	348 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	354 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	377 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	369 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	390 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE.	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	59 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	58 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	500 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	18,2 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	62 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	44 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	49-50 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	765 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

## Anhang II

Tabelle 14.7: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.2

Datum: 2.12.76

Uhrzeit: 11:12:12

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	461 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	292 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	292 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	311 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	340 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	318 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	318 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	314 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	312 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	316 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	325 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	330 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	329 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	336 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	329 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	59 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	55 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	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	55 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	275 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	281 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	493 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	17,1 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	40 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	48 °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	820 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	118 kg/h

Tabelle 14.8: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.3

Datum: 4.1.77

Uhrzeit: 16:00:02

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	502 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	318 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	317 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	377 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	356 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	355 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	352 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	348 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	356 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	360 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	363 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	371 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	388 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	398 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	59 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	59 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	70 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	280 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	543 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	18,4 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	59 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	51-52 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	846 mbar
	m	Dampfmengenstrom	119 kg/h

Tabelle 14.9: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.4      Datum: 18.1.77      Uhrzeit: 15:31:45

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	499 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	315 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	310 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	331 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	363 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	343 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	343 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	340 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	336 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	340 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	336 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	344 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	349 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	359 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	352 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	61 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	58 bar
18	P 63	Druck vor Blende	57 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	58 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	65 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	20,6 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	45 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	52 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	55-56 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	64 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	831 mbar
	m	Dampfmengenstrom	119 kg/h

Tabelle 14.10: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.5

Datum: 15.2.77

Uhrzeit: 11:16:12

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	467 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	461 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	301 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	296 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	317 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	343 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	324 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	322 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	320 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	316 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	330 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	325 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	331 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	341 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	343 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	342 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	59 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	56 bar
18	P 63	Druck vor Blende	55 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	55 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	57 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	277 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	283 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	494 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	18,8 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	38 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	52 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	60 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	779 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.11: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.6

Datum: 4.5.77

Uhrzeit: 11:56:31

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	513 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	327 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	334 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	364 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	345 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	344 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	340 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	336 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	349 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	349 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	356 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	361 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	360 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	360 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	64 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	88 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	280 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	544 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	18,8 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	47 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	47-52 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	806 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	119 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.12: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 1.7 Datum: 20.9.78 Uhrzeit: 13:03:10

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	-
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	502 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	318 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	344 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	383 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	361 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	359 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	355 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	655 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	428 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	400 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	389 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	409 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	371 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	356 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	62 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	61 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	69 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	282 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	288 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	26,9 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	63 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	52 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	56-57 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	824 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	119 kg/h

Anhang II

Tabelle 14.13: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 3.1 Datum: 5.5.77 Uhrzeit: 11:18:43

CALAS-Adresse	Meßstelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	317 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	340 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	363 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	344 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	343 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	339 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	336 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	359 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	363 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	368 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	367 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	367 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	366 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	59 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	56 bar
18	P 63	Druck vor Blende	55 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	56 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	90 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	278 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	283 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	19,7 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	51 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	43 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	46-48 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	61 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	837 mbar
	m	Dampfmengenstrom	116 kg/h

Tabelle 14.14: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: B 3.2

Datum: 1.6.77

Uhrzeit: 13:33:04

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	515 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	502 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	317 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	370 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	351 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	350 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	346 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	343 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	363 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	357 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	363 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	379 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	372 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	375 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	59 bar
18	P 63	Druck vor Blende	58 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	59 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	60 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	545 °C
35	T116/T115	Temperaturdiff. Prüfling	19,1 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	15 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	44 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	48-54 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	64 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	849 mbar
	m	Dampfmengenstrom	120 kg/h

### Danksagung

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

Besonderer Dank gilt den Herren G. Harbauer, H. Hespeler, K. Knappschneider, W. Legner, W. Leiling, H. Lukitsch, B. Räßple, 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.