

KfK 2956  
Mai 1980

# **In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall**

**Bericht über die Versuchsserie F**

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

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK

PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 2956

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten  
beim Kühlmittelverluststörfall  
Bericht über die Versuchsserie F

---

E.Karb  
M.Prüßmann  
L.Sepold

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

An der Erstellung dieses Berichts  
haben folgende Herren mitgearbeitet:

G. Harbauer  
M. Hespeler  
W. Knappschneider  
W. Legner  
W. Leiling  
H. Lukitsch  
B. Räßle  
K. Wagner

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse der Versuchsserie F zum Brennstabverhalten, die im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit im Kernforschungszentrum im DK-Loop des FR2-Reaktors durchgeführt werden.

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

Als Versuchsstäbe werden Prüflinge mit einer aktiven Brennstofflänge von 50 cm und radialen Abmessungen verwendet, die denen der DWR- (Druckwasserreaktor-) Stäbe entsprechen.

Die Versuchsreihe F bestand aus fünf Einzelstab-Versuchen, die mit vorbestrahlten Prüflingen vom 25.10. bis 22.11.1977 durchgeführt wurden. Der Nominalabbrand der Stäbe betrug 20 000 MWd/t.

Als Ausgangswerte für die Transienten wurden Innendrucke von 46 bis 83 bar (warm) eingestellt. Alle fünf Einzelstäbe barsten während der Aufheizphase, die Berstdrucke betrug 56, 53, 42, 72 bzw. 60 bar, die Bersttemperaturen 890, 893, 932, 835 bzw. 880 °C. Die größten Umfangsdehnungen betrug 59, 38, 27, 34 und 41 %.

Im Unterschied zu den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen zeigten die F-Versuchsstäbe nach dem Bersten eine Schüttung von zerteilten Brennstofftabletten im Bereich der Hüllrohraufweitung: Der durch das Aufblähen der Hülle zusätzlich entstandene Raum für den Brennstoff füllte sich mit Bruchstücken der während der Vorbestrahlung schon zersprungenen Pellets. Durch Nachrutschen von Brennstoff entstanden so z.T. ausgeprägte Verkürzungen der Pelletsäule.

Hinsichtlich der Berstdaten lassen sich in den F-Versuchen keine Besonderheiten gegenüber den Versuchen mit unbestrahlten Prüflingen erkennen.

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

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

---

Abstract

This report describes the results of the Test Series F, Tests F 1 through F 5, in the in-pile experimental program 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-LOCA 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 have a heated length of 50 cm, and their radial dimensions are identical with those of a commercial German PWR (Pressurized Water Reactor). The main parameter of the FR2-LOCA test program is the burnup.

The F tests were performed from Oct. 25, 1977 to Nov. 22, 1977. They were the first tests in this program to use pre-irradiated fuel rods. The nominal burnup of the test rods was 20 000 MWd/t. During the transient test, the test rods were subjected to rod powers between 36 and 41 W/cm and were pressurized with Helium to hot internal pressures between 46 and 83 bar.

The test rods burst during the heatup phase at pressures of 56, 53, 42, 72 and 60 bar, respectively. The burst temperatures were determined to be 890, 893, 932, 835 and 880 °C for test F 1 through F 5. The maximum total circumferential elongations amount to 59, 38, 27, 34 and 41 %, respectively.

The F tests revealed a fragmentation of the fuel after the irradiation (prior to the tests) and a disintegration of the fuel pellet column after the transient tests due to cladding ballooning. The posttest results indicated a significant reduction of the pellet stack length for all five test rods.

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

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

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

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einführung	1
1.1 Versuchsziele	1
1.2 Berichtsziel	1
1.3 Versuchsprogramm	2
2. Versuchsvorbereitung	4
2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge	4
2.2 Stabmontage	6
2.3 Neutronenradiografie	7
3. Prüflingsdaten	8
3.1 Allgemeine Daten	8
3.2 Daten der Prüflinge für die F-Versuchsserie	9
4. Versuchsablauf	11
5. Versuchsdaten	12
5.1 Messung der Versuchsdaten	18
5.2 Kühlmitteldaten	20
5.3 Prüflingsleistung	20
5.4 Prüflingsinnendruck	23
5.5 Hüllrohrtemperaturen	24
5.6 Temperaturanstieg der Hülle	27
6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	28
6.1 Durchstrahlungen der Stäbe	28
6.2 Fotodokumentation	30
6.3 Vermessung der Prüflinge	30
7. Brennstoffzustand vor dem Transientenversuch	43
8. Beurteilung der Ergebnisse	44
9. Literatur	46
Anhang	48

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
1. Vorbestrahlungseinsatz, vereinfacht	53
2. Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung Bündel F	54
3. Axiale Abbrandverteilung im Brennstab F 6	55
4. Zur Messung des Stabinnendrucks	56
5. Nuklearprüfling vereinfacht	57
6.1- Durchmesserabmaße und Einfüllspiel	58-
6.5 Prüflingseinsatz F 1 bis F 5	62
7. Thermoelemente am Prüflingshüllrohr	63
8. DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislauf- schema	64
9. Versuchsablauf, Schema	65
10. Reaktorphysikalisch bestimmte Prüflingsleistung für die F-Versuche	66
11.1 - Axiales Leistungsprofil am Prüfling	67-
11.5 Versuche F 1 bis F 5	71
12.1 - Normierte Axialprofile am Prüfling	72-
12.5 Versuche F 1 bis F 5	76
13.1 - Druck im Prüflingsplenum (P 74)	77-
13.5 im Versuch F 1 bis F 5	81
14.1 - Axiales Temperaturprofil,	82-
14.5 Versuch F 1 bis F 5	86
15.1 - Hüllrohrtemperaturen T 131 bis T 136	87-
15.5 im Versuch F 1 bis F 5	91
16. Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt) Versuch F 1	92
17. Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck	93
18. Temperaturdifferenzen bei 600 bis 900°C, BSS 05	94

	<u>Seite</u>
19. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Burst Temperature vs. Burst Pressure	95
20. Neutronenradiografie F 1 vor Versuch	96
21. (Bl. 1 und 2) Neutronenradiografie F 1 nach Versuch	97+ 98
22. (Bl. 1 und 2) Neutronenradiografie F 2 nach Versuch	99+ 100
23. (Bl. 1 und 2) Neutronenradiografie F 3 nach Versuch	101+ 102
24. (Bl. 1 und 2) Neutronenradiografie F 4 nach Versuch	103+ 104
25. (Bl. 1 und 2) Neutronenradiografie F 5 nach Versuch	105+ 106
26. In-pile-Versuch F 1, Ansicht und Röntgenbild	107
27. In-pile-Versuch F 2, Ansicht und Röntgenbild	108
28. In-pile-Versuch F 3, Ansicht und Röntgenbild	109
29. In-pile-Versuch F 4, Ansicht und Röntgenbild	110
30. In-pile-Versuch F 5, Ansicht und Röntgenbild	111
31. In-pile Test F 1, 20 000 MWd/t <sub>U</sub> , Burst Section	112
32. In-pile-Versuch F 2, Ansichten der Beulstelle	113
33. Burst Section, Test Fuel Rod F 3	114
34. FR2 In-Pile Test F 4, 20 GWd/t, Burst Section	115
35. In-pile-Versuch F 5, Ansichten der Beulstelle	116
36. FR2 In-Pile Tests, Cladding Length Change vs. Burst Temperature	117
37.1 - Abweichung der Wanddicke (µm) in Meßebeine	118-
37.5 Versuch F 1 bis F 5	122
38.1 - Meßwerte des Dehnungsprofils,	123-
38.5 In-pile-Versuch F 1 bis F 5	127
39. Wendelschrieb am Beispiel des Versuchs A 2.2	128

	<u>Seite</u>
40.1 Versuch F 1, Polarmessung 1 (311 mm von UKF)	129
40.2 Versuch F 1, Polarmessung 3 (376 mm von UKF)	130
41.1 Versuch F 2, Polarmessung 1 (399 mm von UKF)	131
41.2 Versuch F 2, Polarmessung 2 (421 mm von UKF)	132
42.1 Versuch F 3, Polarmessung 1 (316 mm von UKF)	133
42.2 Versuch F 3, Polarmessung 2 (345 mm von UKF)	134
43.1 Versuch F 5, Polarmessung 1 (305 mm von UKF)	135
43.2 Versuch F 5, Polarmessung 2 (344 mm von UKF)	136
44. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temp.	137
45. FR2 In-Pile Tests, Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	138
46. FR2 In-Pile Tests, Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop.	139
47. Abbrandstab F 6 (20 GWd/t <sub>U</sub> ), Querschliff	140
48. Cross Section, Test Fuel Rod F 6 20.000 MWd/t <sub>U</sub> , No Transient	141
49. Cross Sections, Test Fuel Rod F 6 20.000 MWd/t <sub>U</sub> , No Transient	142
50. Condition of Fuel. Test Fuel Rod F 6 20.000 MWd/t <sub>U</sub> , No Transient	143
51. FR2 In-Pile Tests F Fuel Particle Size Distribution	144

Verzeichnis der Tabellen

	<u>Seite</u>
1. In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten Test-Matrix	3
2. Prüflingsdaten, Sollwerte unbestrahlter Stäbe	8a
3. Gemessene Prüflingsdaten der F-Stäbe	10
4.1 - In-pile-Versuche zum Brennstabversagen, 4.4 Daten der Versuche F 1 bis F 5	13- 17
5. Anordnung der Hüll-TE in den Versuchen F 1 bis F 5	19
6. Kühlmitteldaten der F-Versuche	20
7. Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe F 1 bis F 5	25
8. Hülltemperaturgradienten der Versuche F1 bis F5	27
9. Längenänderung der Brennstoffsäule durch die F-Versuche	29
10. Längenänderung und Rißlage der F-Stäbe	31
11.1 Axial Profile of Rod Diameter Measurement, Test F1	33
11.2 Axial Profile of Rod Diameter Measurement, Test F2	34
11.3 Axial Profile of Rod Diameter Measurement, Test F3	35
11.4 Axial Profile of Rod Diameter Measurement, Test F4	36
11.5 Axial Profile of Rod Diameter Measurement, Test F5	37
12. Ovalität im Beulbereich der F-Versuchsstäbe	39
13. Umfangsdehnung im Beulbereich der F-Versuchsstäbe	39
14. Exzentrizität der Beule bei den F-Versuchsstäben	41
15. Krümmung der F-Versuchsstäbe	41
16.1 - Tabelle der Meßwerte vor Auslösung der Transiente, 16.5 F 1 bis F 5 (Anhang)	48- 52

## 1. Einführung

### 1.1 Versuchsziele

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

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

Mit der hier behandelten Versuchsserie F sollte erstmals das Verhalten von vorbestrahlten Prüflingen untersucht werden. Von den sechs bis zu einem Abbrand von 20.000 MWd/t bestrahlten Stäben F 1 - F 6 waren fünf einer Transiente auszusetzen, der Stab F 6 für die radiochemische Abbrandbestimmung sowie zur Untersuchung des Brennstoffzustandes nach der Bestrahlung zu verwenden.

### 1.2 Berichtsziel

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

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

### 1.3 Versuchsprogramm

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

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

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

Bei den vorbestrahlten Prüflingen (Versuchsgruppe C bis G) werden Abbrand und Innendruck variiert, wobei die angegebenen Druckbereiche in Anlehnung an (konservative) Berechnungen für deutsche DWR der 1200 MW-Klasse gewählt wurden.

Die in früheren Darstellungen aufgeführten Versuche mit Haltezeiten wurden gestrichen.

TABLE 1 TEST MATRIX

PNS 4237		FR2 IN-PILE TESTS ON FUEL BEHAVIOR					Test Matrix
Type of Test	Test-Group	Number of Rods Irradiated	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	
II Unirradiated Rods							
Main Parameter:	B1	-	190	7	0	55 - 90	
Internal Pressure:	B3	-	150	2	0		
III Irradaited Rods	C	6	190	5	2500	25 - 110	
	D	6	190	-	5000	cancelled	
Main Parameter:	E	6	190	5	8000	25 - 120	
Burnup	F	6	190	5	20000	45 - 85	
	G1	6	150	5	35000	50 - 90	
	G2	2	190	2	35000	60 - 125	
	G3	4	150	3	35000		

## 2. Versuchsvorbereitung

### 2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge

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

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

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

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

Die Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung der F-Serie kann Abb. 2 entnommen werden. Als Grundlage der angegebenen Abbrandwerte dienten die kalorimetrisch ermittelten Leistungen des Einsatzes. Als Endabbrand ergab sich daraus ein Wert von 20 653 MWd/t. Der entsprechende Wert aus der radiochemischen Abbrandanalyse des Stabes F 6 beträgt als axialer Mittelwert 2,4 at-%. Das entspricht 21 912 MWd/t ( $1 \text{ at-\%} \hat{=} 9\,130 \text{ MWd/t}_U$ ). Dieser Abbrandwert wird als gleich für alle sechs bestrahlten

Stäbe angesehen. Das axiale Abbrandprofil ist in Abb. 3 wiedergegeben. Es beruht auf drei axialen Abbrandproben, die radiochemisch untersucht wurden.

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

- Der Leistungsreaktor wird bis zum Erreichen eines Abbrandes von ca.  $35 \text{ GWd/t}_U$  nur ein- bis zweimal gezielt abgeschaltet. Die Vorbestrahlungsbündel im FR2 erleben dagegen aus verschiedenen Gründen eine ganze Reihe von Abschaltungen, die häufig mit Umladungen von Brennelementen und damit auch mit Leistungsänderungen verbunden sind. Als Beispiel dient die Betriebsgeschichte des Bündels F in Abb. 2 (die Dauer von Betriebspausen ist nicht enthalten).
- Beachtenswerte Unterschiede in den Betriebsdaten sind (beim frischen Brennstab):

	DWR	FR2
Kühlmitteltemperatur	320 °C	58 °C
Kühlmitteldruck	155 bar	2,4 bar
He-Einfülldruck bei 20 °C	22,5 bar	3 bar

Die äußere Hüllwandtemperatur des DWR-Stabes liegt um 200 bis 300 K höher als die des FR2-Versuchsstabes.

Entgegen dem beim DWR von außen auf die Stabhülle wirkenden Differenzdruck ist im FR2 der Stabinnendruck während der ganzen Vorbestrahlungszeit geringfügig höher als der Kühlmitteldruck.

## 2.2 Stabmontage

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

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

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

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

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

### 2.3 Neutronenradiografie

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

Der Nuklearprüfling wird zuerst nach der Montage, dann nach dem Versuch in (axial überlappenden) Teilaufnahmen radiografiert. Es wird also der Stab im ungebeulten Zustand nach der Vorbestrahlung und im gebeulten Zustand nach dem Versuch vergleichbar dargestellt. Zwischen diesen Aufnahmen wird der Prüflingseinsatz zwar einige Male umgesetzt, bleibt jedoch stets in vertikaler Lage. Bei der nachfolgenden Handhabung, d.h. beim Transport und während der Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen, ist das nicht mehr der Fall.

Infolgedessen sind für Aussagen zum Zustand der Brennstoffsäule vor und nach dem Versuch die NERA-Aufnahmen am ehesten geeignet. An die Bildschärfe darf allerdings kein allzu hoher Maßstab angelegt werden. Hier sind die geometrischen Verhältnisse der Durchstrahlungsanordnung und das Streuverhalten der thermischen Neutronen zu berücksichtigen. Die Darstellung der Zry-Hülle erfolgt nur wenig kontrastreich, da Zirkonium einen geringen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen hat.

### 3. Prüflingsdaten

#### 3.1 Allgemeine Daten

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

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

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

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

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

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

Tabelle 2

PRÜFLINGSDATEN Sollwerte unbestrahlter Stäbe

Hülle		Zry-4
Durchmesser außen	mm	10,75 $\pm$ 0,05
innen	mm	9,30 $\pm$ 0,04
Wandstärke	mm	0,725
Länge zwischen den Endstopfen	mm	880
Brennstoff		UO <sub>2</sub>
U 235-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		
Durchmesser	mm	9,11 $\pm$ <sup>[a]</sup> 0,01 / <sup>[c]</sup> 9,15 $\pm$ <sup>[b]</sup> 0,01
Länge	mm	11 $\pm$ 1,0
Säulenhöhe aktive Zone	mm	500 $\pm$ 5,5
Endpellets	je 1 Stück	beidseitig aktiver Zone
Dishing aktive Zone		beidseitig
Endpellets		einseitig
Dishingradius	mm	3,96 $\pm$ 0,2 / 3,98 $\pm$ 0,2
Dishingtiefe	mm	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Isolierpellets		
Durchmesser	mm	9,15 - 0,1
Länge	mm	8,0 $\pm$ 0,2
		3 Stück an jeder Seite der UO <sub>2</sub> -Säule
Freie Gasvolumen		
Dishing pro Tablette	mm <sup>3</sup>	16 $\pm$ 4
Dishing gesamt	cm <sup>3</sup>	0,736 $\pm$ 0,184
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 $\pm$ 0,07
Durchmesser des Federdrahtes	mm	1,55 $\pm$ 0,01
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

### 3.2 Daten der Prüflinge für die Versuchsserie F

Die verwendeten sechs Prüflinge haben die folgende Bezeichnung:

Nr. 37	—	F 1
Nr. 38	—	F 2
Nr. 39	—	F 3
Nr. 40	—	F 4
Nr. 43	—	F 5
Nr. 41	—	F 6 (Abbrandstab).

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

Die wichtigsten gemessenen Prüflingsdaten der sechs Stäbe sind in Tabelle 3 sowie in Abb. 6 zusammengefaßt.

Abb. 6.1 bis 6.5 zeigen die statistische Verteilung der gemessenen Hüllen- und Pelletdurchmesser, deren Mittelwerte sowie das daraus errechnete mittlere Einfüllspiel  $s_E$  für die Stäbe F 1 bis F 5.

Tabelle 3

## GEMESSENE PRÜFLINGSDATEN DER F-STÄBE

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	
Brennstablänge (mm)	972,87	972,86	972,86	972,97	972,87	972,98	
Länge der aktiven Zone (mm)	497,8	497,4	497,2	497,3	498,5	497,3	
Länge des Brennstabplenums (mm)	312,5	313,5	313,5	313,5	312,0	313,5	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	16,10	16,15	16,11	16,11	16,03	16,12	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	0,758	0,745	0,753	0,750	0,750	0,752	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	1,708	1,674	1,624	1,599	1,644	1,624	
	max.	10,771	10,770	10,767	10,763	10,759	10,765
Hüllaußendurchmesser (mm)	mittel	10,765	10,763	10,756	10,755	10,751	10,758
	min.	10,742	10,752	10,747	10,748	10,745	10,750
	max.	9,327	9,321	9,315	9,313	9,320	9,315
Hüllinnendurchmesser (mm)	mittel	9,314	9,310	9,304	9,301	9,306	9,303
	min.	9,303	9,299	9,292	9,289	9,297	9,291
	max.	0,753	0,754	0,753	0,744	0,739	0,745
Wandstärke (mm)	mittel	0,725	0,726	0,726	0,727	0,723	0,728
	min.	0,700	0,700	0,700	0,711	0,706	0,713
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )		10,44	10,44	10,44	10,44	10,45	10,45
	max.	9,108	9,110	9,109	9,109	9,108	9,107
Tablettendurchmesser (mm)	mittel	9,106	9,106	9,106	9,106	9,106	9,105
	min.	9,103	9,105	9,105	9,104	9,104	9,102
mittleres diametrales Einfüll- spiel (mm) [a]		0,208	0,204	0,198	0,195	0,200	0,198

[a] aus Meßdaten berechnet

#### 4. Versuchsablauf

Wie bei der Montage der Versuchsstäbe ist auch beim Versuch selbst die Freisetzung von Spaltprodukten unerwünscht und soweit wie möglich zu vermeiden. Im Sicherheitskonzept des Experiments wurde für den Versuch eine Mindest-Abklingzeit nach der Vorbestrahlung von 56 Tagen festgelegt.

Nach dieser Wartezeit wird der Prüfling bei abgeschaltetem Reaktor in das für den Betrieb mit schadhafte Prüflingen ausgelegte Dampf-Kontaminations- (DK)-Loop eingebaut (siehe Abb. 8).

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

Der Kreislauf wird dabei mit folgenden Daten betrieben:

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

Während dieses Stationärbetriebes erfolgen u.a. Messungen der Flußdichteprofile 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. 9). 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 ( $\sim 920$  °C) die Prüflingsleistung durch Reaktorscram praktisch abgeschaltet. Die Hülltemperatur beginnt langsam zu sinken. Nach Erreichen einer weiteren Temperaturmarke ( $\sim 740$  °C) wird der Kühldampfstrom wieder eingeschaltet; die Hülltemperatur sinkt schnell ab, ähnlich wie beim Abschrecken (Quenching) durch Flutung beim KVS im wirklichen Reaktor. Die beiden erwähnten Temperaturmarken ergeben sich aus dem nach /1/ angestrebten Referenztemperaturverlauf, dieser selbst in Anlehnung an eine für den heißesten Stab in einem DWR durchgeführte Berechnung.

Von den fünf F-Versuchen wurde in allen Versuchen, außer in F 4, das Quenching durchgeführt.

## 5. Versuchsdaten

Die Tabellen 4.1 bis 4.5 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßwerte der Versuche F 1 bis F 5 und einige von den Meßwerten abgeleitete Daten. Der Überblick über die wesentlichen Meßdaten im Stationärbetrieb als Ausgangswerte für die Transiente ist im Anhang (Tab. 16.1 bis 16.5) aufgelistet.

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	15,5 MW				
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$		1,029	Abbrand 20.000 MWd/t				
spezifische Stableistung	mittlere thermische		NTH	41,17 W/cm			
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C			34,7 bis 44,3 W/cm			
	aus Aufheizung um 300 K			34,5 bis 41,8 W/cm			
	mittlere reaktorphysikalische		NKPM	31,86 W/cm			
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)		Druck (bar)			
bei Beginn der Transiente		0		70,92			
Maximum		20,10		71,80			
beim Temperaturmaximum von T 134		42,00		62,08			
BERSTDRUCK		43,50		56,48 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		366	360	375	379	374	389
bei max. Innendruck nach 20,1 sec		622	598	633	629	596	616
rel. Maximum nach 41,0 bis 43,5 sec		818	787	832	821	771	803
beim Bersten nach 43,5 sec		786	787	832	810	762	803
abs. Maximum nach 93,4 bis 99,4 sec		911	931	939	854	941	803
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 815 + 75 K						890 °C	
BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)						33,5 cm	
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 134 bei 412 °C nach 4,60 sec				20,1 K/s			
bei 650 °C T 131 bis T 136				9,3 bis 12,6 K/s			
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136				23,6 bis 28,5 sec			
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135				83,5 sec			

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	10,7	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,017	Abbrand 20.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,42 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		29,4 bis 33,3 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		29,3 bis 35,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	27,63 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	60,95
Maximum	34,50	61,73
beim Temperaturmaximum von T131	54,40	56,66
BERSTDRUCK	57,50	53,42 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		346	354	359	358	349	353	
bei max. Innendruck nach 34,5 sec		675	660	679	715	685	703	
rel. Maximum nach 54,4 bis 57,5 sec		756	760	798	828	817	821	
beim Bersten nach 57,5 sec		748	760	798	828	817	819	
abs. Maximum nach 96,0 bis 98,5 sec		892	895	911	932	895	886	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	818 + 75 K						893	°C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	41	cm
--	----	----

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 131 bei 389 °C nach 5,60 sec		15,8	K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	7,5 bis 8,8	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	28,1 bis 33,6	sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 134	90,5	sec

LEISTUNG			
Reaktorleistung		NR	12,1 MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$ 1,021		Abbrand 20.000 MWd/t	
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTII	35,98 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		36,4 bis 38,8 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		34,5 bis 39,3 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	30,15 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	45,63
Maximum	41,50	46,33
beim Temperaturmaximum von T 133	57,00	42,40
BERSTD RUCK	57,00	42,40 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		356	354	360	368	364	358
bei max. Innendruck nach 41,5 sec		810	786	796	804	783	769
rel. Maximum nach 57,0 bis 58,5 sec		878	864	858	857	-.-	843
beim Bersten nach 57,0 sec		877	863	858	857	852	840
abs. Maximum nach 75,0 bis 81,0 sec		942	902	810	905	936	891
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 857 + 75 K						932 °C	

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

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 134 bei 399 °C nach 5,0 sec	20,2 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	9,9 bis 10,7 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	25,2 bis 28,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 131	70,0 sec

LEISTUNG		
Reaktorleistung	NR	16,0 MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,009	Abbrand 20.000 Mwd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH 40,95 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C	38,2 bis 40,2 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K	39,0 bis 41,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM 32,78 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	83,00
Maximum	22,00	83,87
beim Temperaturmaximum von T 133	35,50	77,13
BERSTDRUCK	37,00	72,41 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		347	352	358	366	364	380	
bei max. Innendruck nach 22,0 sec		611	628	632	643	644	655	
rel. Maximum nach 35,5 bis 37,5 sec		727	748	747	780	-	787	
beim Bersten nach 37,0 sec		726	738	737	779	779	785	
abs. Maximum nach 82,0 bis 84,0 sec		922	892	866	933	974	949	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	760 + 75 K						835	°C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	32,5 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 136 bei 429 °C nach 6,00 sec	20,1 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	10,5 bis 11,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	23,8 bis 25,2 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135	71,2 sec

LEISTUNG							
Reaktorleistung		NR	12,0 MW				
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$		1,020	Abbrand 20.000 MWd/t				
spezifische Stableistung	mittlere thermische		NTH	36,30 W/cm			
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C			35,8 bis 38,2 W/cm			
	aus Aufheizung um 300 K			34,5 bis 37,3 W/cm			
	mittlere reaktorphysikalische		NKPM	29,74 W/cm			
INNENDRUCK P74		Laufzeit (s)	Druck (bar)				
bei Beginn der Transiente		0	70,75				
Maximum		25,50	71,53				
beim Temperaturmaximum von T 131		45,50	66,20				
BERSTDRUCK		48,50	60,42 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		347	358	353	354	355	361
bei max. Innendruck nach 25,5 sec		636	648	623	635	633	642
rel. Maximum nach 45,5 bis 50,0 sec		798	815	797	815	807	802
beim Bersten nach 48,5 sec		787	814	796	812	804	801
abs. Maximum nach 86,5 bis 89,5 sec		811	870	827	929	931	874
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		805 + 75 K				880 °C	
BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)		32,5 cm					
TEMPERATURANSTIEG							
Maximum T 132 bei 405 °C nach 6,5 sec		19,0 K/s					
bei 650 °C T 131 bis T 136		9,7 bis 10,5 K/s					
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136		26,5 bis 28,5 sec					
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 134		83,5 sec					

### 5.1 Messung der Versuchsdaten

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

An der Stabhülle wird - am Umfang und über die Stablänge verteilt - an sechs Stellen in der aktiven Zone die Temperatur gemessen. Zur Verwendung kommen Ni/CrNi-Thermoelemente 1 mm  $\varnothing$  mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platinhülse, da die direkte Schweißverbindung Inconel/Zry problematisch ist. Der überstehende Teil der Pt-Hülse wird flachgedrückt und der so entstandene Lappen an das Hüllrohr gepunktet (s. Abb. 7). Die Anordnung der TE ist in Tabelle 5 angegeben. Der axiale Abstand zwischen zwei Meßstellen beträgt 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.

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.

Tabelle 5

## ANORDNUNG DER HÜLL-THERMOELEMENTE IN DEN VERSUCHEN F 1 BIS F 5

TE-Bezeichnung	axiale Lage (a) (Soll-Maße)	axiale Lage (Ist-Maße) und Umfangslage (b)				
		F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
T 131	200 mm	199 mm/30°	198 mm/165°	200 mm/276°	198 mm/27°	198 mm/65°
T 132	250 mm	250 mm/330°	248 mm/105°	250 mm/216°	248 mm/327°	248 mm/5°
T 133	300 mm	300 mm/270°	299 mm/45°	300 mm/156°	299 mm/267°	299 mm/305°
T 134	350 mm	350 mm/210°	349 mm/345°	350 mm/96°	349 mm/207°	349 mm/245°
T 135	400 mm	400 mm/150°	399 mm/285°	400 mm/36°	399 mm/47°	399 mm/185°
T 136	450 mm	450 mm/90°	450 mm/225°	450 mm/336°	449 mm/87°	450 mm/25°

(a) Abstand von Unterkante aktiver Zone (UKF)

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

## 5.2 Kühlmitteldaten

Die Kühlmitteldaten in den Versuchen F 1 bis F 5 unmittelbar vor Auslösung der Transiente gibt Tabelle 6 wieder.

Tabelle 6      Kühlmitteldaten der F-Versuche

Versuch	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Kühlmitteleintrittstemperatur T 115 (°C)	319	316	314	313	310
Kühlmittelaustrittstemperatur T 116 (°C)	340	336	331	334	327
Kühlmitteldruck in der Teststrecke [a] (bar)	59	61,5	62	59	60
Kühlmittelmengenstrom (kg/h)	117	120	120	116	120

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

## 5.3 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 Kühlmitteltempe-

raturen T 115 vor und T 116 nach dem Prüfling mit Thermoelementen. Zur Bestimmung von Dichte  $\rho$  und spezifischer Wärme  $c_p$  des Kühlmittels werden dessen Temperatur und Druck vor und hinter der Teststrecke (T5/P60 und T6/P61) gemessen und gemittelt. Die angegebene "mittlere Thermische Leistung" NTH ist auf die aktive Prüflingslänge von 50 cm bezogen.

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

Die mittlere thermische Leistung ergab sich in den Versuchen F 1 bis F 5 zu

NTH = 41,2 W/cm (F 1), 40,4 W/cm (F 2), 36,0 W/cm (F 3),  
41,0 W/cm (F 4) bzw. 36,3 W/cm (F 5).

- b) "Leistung aus Temperaturanstieg NA": Diese Methode erlaubt nach dem Versuch eine Abschätzung der lokalen Stableistung an den Stellen, die mit Thermoelementen bestückt sind. Es wird der während der Transiente gemessene Verlauf der Hülltemperatur verglichen mit den gerechneten Anstiegswerten für verschiedene Stableistungen <sup>[a]</sup> und daraus auf die Stableistung geschlossen.

Die Leistungen aus dem Temperaturanstieg für die F-Versuche sind in den Tabellen 4.1 bis 4.5 als Zahlenwerte und in den Abb. 11.1 bis 11.5 zusammen mit dem axialen Verlauf der thermischen Leistung dargestellt.

- c) "Reaktorphysikalische Leistung NKP": Mit der Annahme, daß die Prüflingsleistung proportional der Leistung entsprechender Abschnitte der die Teststrecke umgebenden Reaktorbrennelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brennelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Aufgrund der bei allen F-Versuchen sehr ähnlichen Neutronenflußverhältnisse ergab sich hier die

---

[a] Rechnungen des IKE Stuttgart (D. Steiner)

reaktorphysikalisch bestimmte max. Prüflingsleistung NKP als direkt proportional zur Brennelementgesamtleistung NBE:

$$\text{NKP} = k \cdot \text{NBE}$$

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 F-Versuche wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

$$k = 0,39 \text{ [(W/cm)/kW]}. \text{ [a]}$$

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA), liefert einen 20 % höheren k-Wert, nämlich 0,47 (W/cm)/kW. Beide k-Verläufe sind in Abb. 10 eingetragen.

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

Bei bereits vorbestrahlten Brennstabprüflingen ist neben der Flußdichte auch die Spaltstoffkonzentration axial nicht konstant.

Diese beiden Beiträge zum axialen Leistungsprofil,

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

---

$$\text{[a]} \quad k = f \cdot (\phi_{Pr.,max.} / \bar{\phi}_{Core}) = f \cdot \psi$$

abgeschätzt wurde  $f = 0,3$ ; gemessen wurde  $\psi \approx 1,3$

sind als normierte, d.h. auf den Mittelwert bezogene, Kurven zusammen mit dem daraus resultierenden Leistungsprofil (oberste Kurve) in den Abb. 12.1 bis 12.5 für die Versuche F 1 bis F 5 dargestellt.

Aus den mittleren Prüflingsleistungen lassen sich die relativen Leistungsprofile in absolute umrechnen. Für die thermisch bestimmte Leistung, zum Beispiel, ist der axiale Verlauf

$$NTH(Z) = NTH \cdot (N(Z)/\bar{N})$$

in den Abb. 11.1 bis 11.5 (Versuche F 1 bis F 5) aufgetragen. Auch der jeweilige axiale Formfaktor, d.h. das Verhältnis von Maximal- zu Mittelwert ist angegeben. In diesen Abbildungen sind ebenfalls die aus den Temperaturanstiegen der Thermo-elemente ermittelten Leistungswerte,  $N_A$ , an den jeweiligen axialen Positionen eingetragen. Die Streuung der Leistungswerte aus dem Anstieg spiegelt die lokalen Unterschiede der Leistung azimuthal und axial wieder. Auf keinen Fall läßt sich aus den Leistungspunkten ein axiales Profil ableiten.

#### 5.4 Prüflingsinnendruck

Die zeitlichen Druckverläufe der Versuche F 1 bis F 5 zeigen die Abb. 13.1 bis 13.5. Daraus ergeben sich die Berstzeitpunkte zu 43,5 s, 57,5 s, 57 s, 37 s und 48,5 s in der Reihenfolge der Versuche F 1 bis F 5.

Auf den Übersichtsblättern (Tab. 4) sind jeweils vier Druckwerte angegeben: (1) der bei Transientenbeginn im Prüfling herrschende Druck, der vorher bei Stationärbetrieb - also warm - eingestellt wurde, (2) der höchste gemessene Wert, (3) der Druckwert zur Zeit des Temperaturmaximums und schließlich (4) der Berstdruck. Als Berstdruck wird der Druck definiert, bei dem ein Abfall mit mehr als 10 bar/s beginnt; die zugehörige Zeit seit Transientenbeginn wird gemäß Abb. 17 Berstzeitpunkt genannt.

## 5.5 Hüllrohrtemperaturen

Die zeitlichen Verläufe der Hülltemperatur während der Transiente sind in den Abb. 14.1 bis 14.5 und 15.1 bis 15.5 dargestellt. In den Abb. 14 sind die axialen Hülltemperaturverläufe für einige ausgewählte Zeitschritte zusammen mit den Axialprofilen der Neutronenflußdichte und den Lagen der Ribstellen eingetragen. Die Abb. 15 zeigen die Verläufe der sechs 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, 200 mm v. UKF) bis zum obersten (T 136, 450 mm v. UKF). Der kurze Temperaturabfall bei  $t = 2$  s resultiert aus dem kurzfristig zunehmenden Kühlmittelstrom beim Entspannen des Kreislaufs. Bei etwa 30 s, 44 s, 45 s, 30 s bzw. 40 s (F 1 bis F 5) beginnt die Verformung der Stabhülle, und nach vorangegangener plastischer Aufweitung der Hülle platzt der Teststab.

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

Die gemessenen maximalen Temperatureinbrüche der fünf F-Versuche können Tabelle 7 entnommen werden. Für den Versuch F 1 sind außerdem die Temperatureinbrüche der sechs Temperaturmeßstellen in Abb. 16 vergrößert, d.h. als Ausschnitt aus Abb. 15.1, dargestellt. Bemerkenswert darin ist der Temperaturverlauf des T 136. Die größten Temperatureinbrüche liegen der Berststelle im allgemeinen am nächsten. Da das Thermoelement T 136 etwa 10 cm von der Ribstelle entfernt ist, sollte es keinen wesentlichen Temperaturabfall anzeigen. Doch ca. 0,5 s nach dem Bersten fällt T 136 innerhalb 5 s um 120 K ab. Die Ur-

sache dafür dürfte in einer Verkürzung der Brennstoffsäule liegen, die zur Freilegung der Meßstelle führt. Der Wiederanstieg von T 136 nach 14 s weist allerdings auf eine nahegelegene Wärmequelle hin. Nach Abschluß des Versuchs und Ausbau des Prüflings aus der Teststrecke liegt die Oberkante der Brennstoffsäule eindeutig unterhalb T 136, wie die Neutronenradiografie, Abb. 21, Blatt 2, zeigt.

Die axialen Temperaturverläufe nach dem Bersten, Abb. 14.1 bis 14.5, lassen den Ort der maximalen Verformung bzw. der Risse erkennen.

Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurde die Leistung zurückgenommen. Das Zuschalten der Dampfkühlung (Quenching) im weiteren Versuchsablauf erfolgte bei allen F-Versuchen, beim Versuch F 4 allerdings stark verzögert, d.h. erst bei einer Hülltemperatur von 290 bis 300 °C.

Tabelle 7

Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe  
F 1 bis F 5

Versuch	Temp.meßstelle	Zeitpunkt (s)	Temp.abfall (K)
F 1	T 134	41,5	170
F 2	T 135	57,5	15
F 3	T 133	57,0	118
F 4	T 133	35,5	104
F 5	T 133	48,5	91

Als Bersttemperatur wird die auf die Beulstelle gemäß Abb. 17 extrapolierte Hülltemperatur zum Zeitpunkt des Berstens bezeichnet. Auf den Übersichtsblättern der Tab. 4 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. 18; benutzt wird die mittlere Kurve.

Die bisher ermittelten Bersttemperaturen als Funktion des Berstdrucks sind in Abb. 19 in Relation zu den Ergebnissen der MRBT (Multi Rod Burst Tests) des ORNL [a] /4/ 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 wurde die Hülle indirekt beheizt.

Die obere ORNL-Kurve wurde für eine Aufheizrate von 28 K/s, die untere Kurve für isotherme Versuche (0 K/s) ermittelt. Die Aufheizraten der KfK-In-pile-Versuche liegen zwischen 6 und 20 K/s, bei zwei Versuchen bei 0 K/s.

Bis auf den Versuchspunkt F 4 liegen die Bersttemperatur/Berstdruck-Wertepaare der F-Serie etwas oberhalb des Bereichs der ORNL-Daten, aber im Streubereich der KfK-In-pile-Daten.

Bei der Extrapolation der Bersttemperatur aus den Meßwerten T 131 bis T 136 konnte eine azimutale Temperaturverteilung nicht berücksichtigt werden.

---

[a] Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

### 5.6 Temperaturanstieg der Hülle

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

Für die Beulstelle der Versuche F 1 bis F 5 wurden aus den Messungen der Hüll-TE und aus den relativen Leistungsverläufen die Hülltemperatur-Gradienten abgeschätzt, die in Tabelle 8 angegeben sind.

Tabelle 8

Hülltemperaturgradienten der Versuche F 1 bis F 5 (bei 650 °C Meßtemperatur)

---

Versuch	Hülltemperaturgradient (K/s)
F 1	10,5
F 2	8,7
F 3	10,1
F 4	11,1
F 5	10,1

## 6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen

### 6.1 Durchstrahlungen der Stäbe

Zur Kontrolle des Brennstoffzustandes sowie der Haftung der TE an der Prüflingshülle werden vor dem Versuch Durchstrahlungen des Prüflingseinsatzes in der Neutronenradiografieanlage des FR2 (NERA) vorgenommen. Als Beispiel diene die Abb. 20 des Prüflings F 1.

Nach dem Transientenversuch, d.h. nach Ausbau des Prüflingseinsatzes aus dem FR2 werden erneut Durchstrahlungen in der NERA durchgeführt. Es werden mehrere axial überlappende Aufnahmen des Prüflings sowie Aufnahmen unter verschiedenen Einstellwinkeln gemacht. Dabei wird versucht, vor und nach dem Transientenversuch die gleichen Abschnitte unter gleichen Winkeln zu neutrografieren.

Bei den NERA-Aufnahmen steht der Prüfling noch innerhalb des Dampfführungsrohrs (18 mm Innendurchmesser), das aus Edelstahl ist und daher kontrastreicher abgebildet wird als die weniger neutronenabsorbierende Zry-Hülle. Auch das beim Abschrecken durch den Riß in die Hüllrohre als Dampf eingedrungene Wasser, zum Zeitpunkt der Aufnahme z.T. noch als Kondensat vorhanden, erscheint dunkel (unterer Brennstoffbereich F 4, unterer Bereich Druckfeder im Gasplenum F 3 - F 5).

Aus den Aufnahmen (Abb. 21, Blatt 1 und 2, für F 1, bis zu Abb. 25, Blatt 1 und 2, für F 5) ist für diese Versuchsserie zu entnehmen:

- Die vorbestrahlten Stäbe zeigen vor dem Transientenversuch deutliche Risse im Brennstoff, die Pelletform ist noch erhalten.
- Nach dem Transientenversuch haben die Pelletbruchstücke den durch Hüllrohrdehnung entstandenen Raum in der Art einer losen Schüttung von Körnern ausgefüllt.

- Im Bereich größerer Dehnung ist aufgrund der Brennstoffbewegungen die ursprüngliche Pelletform nicht mehr zu erkennen.
- Durch Nachrutschen von Brennstoffteilchen in den Beulbereich hat sich die Länge der Brennstoffsäule bei allen Stäben deutlich verkürzt (siehe Tabelle 9).
- Bei den Versuchen F 2 bis F 5 sind die Prüflinge weniger stark aufgeweitet als bei F 1.

Tabelle 9

Längenänderung der Brennstoffsäulen

Versuch	Montagemaß [a] (mm)	Länge nach Versuch (mm)	Längendiffe- renz (mm)
F 1	498	415	- 83
F 2	497	480	- 17
F 3	497	475	- 22
F 4	497	468	- 29
F 5	498	450	- 48

[a] wird gleichgesetzt mit dem Maß nach der Bestrahlung

Neben den Radiografien werden in den Heißen Zellen Röntgenaufnahmen der Versuchsstäbe hergestellt (Abb. 26, 27, 28, 29, 30). Bei diesen Aufnahmen sind der Brennstoffzustand und die Stabhülle besser zu erkennen, als bei den NERA-Aufnahmen. Beim Vergleich der Röntgen- mit den NERA-Aufnahmen ist festzustellen, daß die Lage der Brennstoffstücke z.T. unterschiedlich ist. Dies ist auf den Transport und die nachfolgende Handhabung in den Zellen zurückzuführen. Das bei den Neutronenradiografien noch sichtbare Wasser dürfte wohl bei dem bis zur Röntgung stattgefundenen Transport und der Handhabung in waagrecht Lage ausgelaufen sein. Es wäre auf der Röntgenaufnahme aber ohnehin nicht sichtbar.

## 6.2 Fotodokumentation

In Gegenüberstellung mit den Röntgenaufnahmen ist auf den Abb. 26, 27, 28, 29, 30 ein Stab-Abschnitt mit der entsprechenden Ansicht der Rißstelle gezeigt. Die Aufnahmen wurden bald nach Abziehen des iDFR erstellt, wobei die noch haftenden TE z.T. sichtbar sind. Auf den weiteren Abb. 31, 32, 33, 34, 35 sind Detailaufnahmen der Beul- bzw. Rißstellen gezeigt. Die TE sind hier bereits entfernt.

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

## 6.3 Vermessung der Prüflinge:

Die Längenänderungen der F-Versuchsstäbe sowie die Rißlagen sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Evtl. Abweichungen der Stablängung durch die Stabkrümmung sind in den Daten vernachlässigt. Die Winkelangaben der Tabelle 10 wie auch an anderer Stelle in diesem Bericht sind von der Nullmarkierung (Kerbe am Prüfling) aus im Uhrzeigersinn bei der Stabansicht von unten zu verstehen.

Die axiale Rißlage wurde mit Hilfe eines Meßstabs bestimmt.

Tabelle 10      Längenänderung und Rißlage der F-Stäbe

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Gesamtlänge vor der Transiente (mm)	974,2	974,3	974,0	974,2	974,0
nach der Transiente (mm)	973,2	976,3	977,5	974,3	974,6
Bleibende Längung des Stabes (mm)	- 1,0	+ 2,0	+ 3,5	+ 0,1	+ 0,6
Riß-Anfang (mm von UKF')	311	403	321	310	309
Riß-Ende (mm von UKF')	373	417	341	338	340
Riß-Länge (mm)	62	14	20	28	31
Riß-Breite max. (mm)	6,1	2,6	6,0	9,0	8,0
Riß-Winkellage zur Kerbe	65°	345°	345°	145°	233°

In Abb. 36 sind die bisher ermittelten Stablängsdehnungen als Funktion der Bersttemperatur aufgetragen. Die Versuchspunkte der In-pile-Versuche sind mit der ORNL-Kurve, die aus out-of-pile durchgeführten Einzelstabversuchen ermittelt wurde /5/, verglichen. Alle KfK-In-pile-Versuchspunkte liegen oberhalb der ORNL-Kurve.

Die azimuthalen Rißlagen sind in den Abb. 37.1 bis 37.5 in die Diagramme der vor der Bestrahlung bestimmten Wandstärkeverteilung über dem Umfang eingezeichnet. Die Wandstärke ist darin 18°-weise als Abweichung vom Sollwert in ( $\mu\text{m}$ ) angegeben. Die angegebene Wandstärkeverteilung gilt für die Rißebeine, ist aber auch für den gesamten vermessenen Bereich von 200 mm in Stabmitte repräsentativ, da sich auf dieser Länge die Wandstärke axial unwesentlich verändert.

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

### Durchmesseränderung und Umfangsdehnung:

Die Ergebnisse der Durchmesseränderungen und Umfangsdehnungen der F-Stabhüllen sind in den Abb. 38.1 bis 38.5 dargestellt.

Die bleibende Durchmesserzunahme erstreckt sich über den gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs. Oberhalb der Brennstabmitte an der Versagensstelle haben sich die Beulen ausgebildet.

An den TE-Befestigungsstellen sind Einschnürungen von 1 - 3 %  $\Delta d/d_0$ , in einem Fall möglicherweise sogar bis zu 7 % (1 mm), entstanden. Dies deutet darauf hin, daß die zusätzliche wärmeabführende Oberfläche und wärmespeichernde Masse der TE lokal zu geringeren Hüllrohrtemperaturen führt. Besonders deutlich ist der Einfluß des Thermoelements T 133 am Versuchsstab F 1 zu erkennen. Hier hat das TE wahrscheinlich eine Doppelbeule verursacht. Dabei ist der untere Teil der Beule kleiner als der obere, in dem der Riß liegt.

Die bleibenden Durchmesserzunahmen sind in den Tabellen 11.1 bis 11.5 aufgelistet. Die Durchmesserangaben wurden aus dem Wendelschrieb entnommen, für die Rißzone wurden zusätzlich Querschnittsfotos ausgewertet.

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

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

Die drei Bereiche sind in Abb. 39 verdeutlicht. Sie zeigt einen typischen Wendelschrieb eines Versuchsstabes (hier Versuch A 2.2).

Tabelle 11.1

Axial Profile of Rod Diameter Measurement

Test F 1

mm from UKF [a]	$d/d_o$ [b]	Comments
0	1,00	
35	1,05	
67	1,10	
112	1,15	
224	1,20	
251	1,25	
257	1,30	
261	1,35	
265	1,40	
271	1,45	
280	1,50	
310	(1,56)	} rupture opening $\left(\frac{\Delta U}{U_o}\right)_{\max} = 0,59$ at 323 mm
374	(1,33)	
378	1,30	
390	1,25	
420	1,20	
437	1,15	
450	1,10	
472	1,05	
500	1,00	

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b]  $d_o$  = 10,765 mm as-received average

Tabelle 11.2

Axial Profile of Rod Diameter Measurement

Test F 2

mm from UKF [a]	d/d <sub>o</sub> [b]	Comments
0	1,00	
32	1,05	
70	1,10	
357	1,15	
371	1,20	
379	1,25	
399	(1,35)	rupture opening $\left(\frac{\Delta U}{U_o}\right)_{\max} = 0,38$
421	(1,29)	
430	1,25	at 412 mm
445	1,20	
453	1,15	
465	1,10	
475	1,05	
500	1,00	

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b] d<sub>o</sub> = 10,763 mm as-received average

Tabelle 11.3

Axial Profile of Rod Diameter Measurement

Test F 3

mm from UKF [a]	d/d <sub>o</sub> [b]	Comments
0	1,00	
63	1,05	
275	1,10	
312	1,15	
320	1,20	
321	(1,24)	rupture opening $\left(\frac{\Delta U}{U_o}\right)_{\max} = 0,27$ at 328 mm
341	(1,26)	
345	1,20	
348	1,15	
448	1,10	
472	1,05	
500	1,00	

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b] d<sub>o</sub> = 10,756 mm as-received average

Tabelle 11.4

Axial Profile of Rod Diameter Measurement

Test F 4

mm from UKF [a]	d/d <sub>o</sub> [b]	Comments
0	1,00	
72	1,05	
142	1,10	
215	1,15	
258	1,20	
300	1,25	
310	(1,27)	} rupture opening
338	(1,34)	
342	1,30	} $\left(\frac{\Delta U}{\bar{U}_o}\right)_{\max} = 0,34$ at 337 mm
350	1,25	
390	1,20	
437	1,15	
455	1,10	
478	1,05	
500	1,00	

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b] d<sub>o</sub> = 10,755 mm as-received average

Tabelle 11.5

Axial Profile of Rod Diameter Measurement

Test F 5

mm from UKF [a]	d/d <sub>o</sub> [b]	Comments
0	1,00	
42	1,05	
77	1,10	
120	1,15	
165	1,20	
270	1,25	
305	1,30	
309	(1,35)	} rupture opening
340	(1,39)	
343	1,35	$\left(\frac{\Delta U}{U_o}\right)_{\max} = 0,41$ at 332 mm
348	1,30	
384	1,25	
397	1,20	
420	1,15	
447	1,10	
475	1,05	
500	1,00	

[a] UKF = bottom of fuel stack

[b] d<sub>o</sub> = 10,751 mm as-received average

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

Im Rißbereich wird der Umfang mittels Querschliffbildern ermittelt. Die Ovalität  $D_{\max} - D_{\min}$  wird Polarschrieben (Wendelschriebe ohne Längsvorschub des Stabes) entnommen. Die Polarschriebe erfassen die Ovalität möglichst nahe der Rißstelle. Die Abb. 40.1 und .2 bis 43.1 bis .2 zeigen die Polarschriebe der Versuchsstäbe der F-Reihe, Tabelle 12 gibt die Ovalitäten der F-Stäbe im Beulbereich wieder.

Da die Umfangsdehnung im Rißbereich nicht kontinuierlich gemessen werden kann, wird sie in diesem Bereich an mindestens drei Stellen bestimmt.

Die Ergebnisse der Umfangsmessung und der prozentualen Umfangszunahme  $\Delta U/U_0$  sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die maximal ermittelten Umfangszunahmen der Stäbe F 1 bis F 5 sind demnach: 59 %, 38 %, 27 %, 34 %, 41 %. Sie liegen alle in Rißmitte.

Diese größten Umfangszunahmen der Hülle sind in Abb. 44 zusammen mit den anderen Versuchspunkten dieses Versuchsprogramms eingetragen und mit den von BMI [a] in /6/ und den von KfK/IRB in /7/ angegebenen Umfangsdehnungen als Funktion der Temperatur verglichen. Die BMI-Daten sind aus Versuchen mit bestrahlten Hüllrohren, die KfK/IRB-Daten aus Bündelversuchen mit Brennstab-simulatoren (REBEKA-Programm) gewonnen worden. Die Versuchspunkte der F-Reihe liegen im Streubereich der Punkte aus den übrigen Versuchen des hier beschriebenen Vorhabens.

#### Exzentrizität der Beule

Zur Feststellung der Beulenlage in bezug auf die Stablängsachse wurden die Mantelschriebe der verformten Stäbe an drei Umfangswinkelpaaren ( $0^\circ/180^\circ$ ,  $60^\circ/240^\circ$ ,  $120^\circ/300^\circ$ ) verwendet. Die

---

[a] Battelle-Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, U.S.A.

Tabelle 12

Ovalität im Beulbereich der F-Versuchsstäbe

Versuch		F1		F2		F3		F4 *		F5	
Stab	Nr.	37		38		39		40		43	
Polar-schrieb	Nr.	1	3	1	2	1	2			1	2
Abstand v. UKF	mm	311	376	399	421	316	345			305	344
D <sub>min</sub>	mm	16,2	13,0	13,5	13,7	12,1	12,3			13,7	13,7
D <sub>max</sub>	mm	17,4	15,2	13,9	14,1	12,9	13,1			14,2	14,7
Ovalit.	mm	1,20	2,20	0,47	0,41	0,84	0,81			0,48	0,99

\* kein Polarschrieb möglich, da zu starke Krümmung

Tabelle 13

Umfangsdehnung im Beulbereich der F-Versuchsstäbe

Versuch			F1	F2	F3	F4	F5
Stab	Nr.		37	38	39	40	43
unteres Rißende	U	mm	52,7	45,6	42,6	42,8	45,7
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	56	35	26	27	35
Mitte Riß	U	mm	53,8	46,5	43,0	45,3	47,7
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	59	38	27	34	41
oberes Rißende	U	mm	45,0	43,6	41,8	45,3	46,9
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	33	29	24	34	39

daraus ermittelten Stabachsen im Beulbereich wurden mit den Stabachsen außerhalb der Beulbereiche verglichen. Die Differenz der beiden jeweiligen Werte wird als Exzentrizität der Beule angegeben. Für die Versuche der F-Reihe sind die Werte in Tabelle 14 aufgelistet.

#### Krümmung:

Ebenfalls aus den Mantelschrieben wird die Stabkrümmung abgeleitet. Die Maximalwerte liegen bei 350 - 460 mm von UK aktive Zone, d.h. am oberen Ende der Brennstoffsäule. Die Auslenkung beträgt 1,5 bis 4,6 mm (siehe Tabelle 15).

Im Beulbereich zeigen die F-Stäbe etwa die gleichen Auslenkungen von der Stablängsachse. Die azimutale Lage der Krümmung zum Riß ist so, daß die Krümmungssinnenseite nahe am Riß liegt. Besonders deutlich ist dies bei den Stäben F 4 und F 5 mit 175° bzw. 170° zwischen Riß und Auslenkung des Stabs durch Krümmung.

#### Volumenzunahme des gebeulzten Stabes

Um die Volumenvergrößerung der verformten Versuchsstäbe zu erfassen, wurden die Volumina aus den Wendelschrieben ermittelt. Dabei wurden die Stäbe in genügend kleine Abschnitte eingeteilt und die Volumina der Abschnitte aus den Außendurchmessern berechnet. Für die Hüllwandstärke und das Brennstoffvolumen wurden die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelvolumina 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 Abb. 45 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche F 1 bis F 5 wie auch für andere bestrahlte und unbestrahlte Stäbe aufgetragen. Es zeigt sich,

Tabelle 14

Exzentrizität der Beule bei den F-Versuchsstäben

Versuch		F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Stab	Nr.	37	38	39	40	43
Abstand von UKF	mm	342	410	331	324	330
Lage zum Riß	Grad	175	15	130	175	167
zur Nullmarke	Grad	240	0	115	330	40
Exzentrizität	mm	1,0	0,1	0,3	0,8	0,5

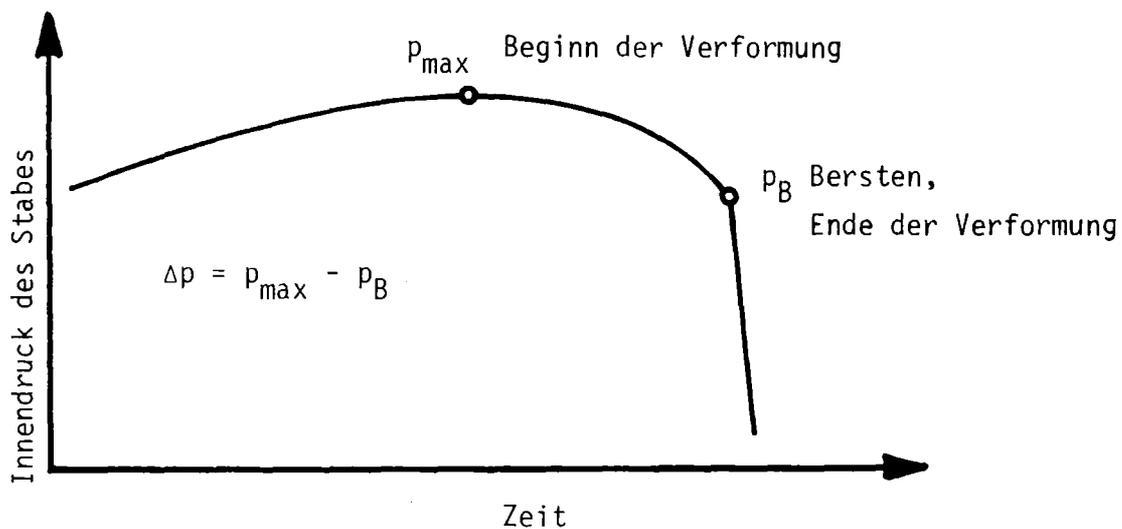
Tabelle 15

Krümmung der F-Versuchsstäbe

Versuch		F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
Stab	Nr.	37	38	39	40	43
max. Krümmung	mm	3,4	1,9	1,8	4,6	1,5
Abstand von UKF	mm	390	460	360	350	360
Lage zur Nullmarke	Grad	270	120	115	320	30
Krümmung im Beulbereich	mm	3,4	1,5	1,8	4,6	1,5
Abstand vom UKF	mm	380	420	350	350	350
Lage zum Riß	Grad	155	135	130	175	170

daß die Versuchspunkte recht gut einer Geraden folgen. Das bedeutet einen linearen Zusammenhang zwischen Volumenzuwachs bzw. Gesamtverformung des Stabes und der maximal bestimmten Umfangszunahme. Eine Ausnahme bildet Versuch A 1.1, er wurde im Gegensatz zu den übrigen Versuchen nicht mit einem flachen, sondern mit einem steilen Leistungsprofil (axialer Formfaktor 1,4) durchgeführt.

In Abb. 46 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 im Schema veranschaulicht.



Schema

Innendruckverlauf während der Hüllverformung

Der Zusammenhang zwischen der Volumenvergrößerung des Stabes und der Innendruckabnahme erscheint linear. Wesentlich außerhalb der Geraden liegt der Versuchspunkt A 2.3 (Bersten im  $\beta$ -Gebiet des Zirkons).

## 7. Brennstoffzustand vor dem Transientenversuch

Von den sechs Versuchsstäben der Serie F wurde der Stab F 6 nicht im Transientenversuch getestet. Er wird u.a. zur Beurteilung des Brennstoffzustands nach der Vorbestrahlung, also vor dem Versuch, herangezogen.

Aus den Querschnitten des Stabes F 6 läßt sich entnehmen, daß die vorbestrahlten Stäbe vor der Transiente schon gebrochene Brennstofftabletten hatten. Die Bruchstücke der Tabletten saßen allerdings noch so zusammen, daß die Pelletform noch einwandfrei erhalten war. Das zeigen auch die NERA-Aufnahmen vor dem Versuch, wie z.B. die Abb. 20 des Stabes F 1.

Zwei Querschnitte des Stabes F 6 geben Abb. 47 (65 mm von Unterkante Brennstoff) und Abb. 48 (208 mm von Unterkante Brennstoff) wieder. Das Bruchmuster sieht in verschiedenen Brennstoffebenen im Prinzip gleich, im Detail unterschiedlich aus. Das verdeutlicht auch noch die Abb. 49. Das Aussehen des Brennstoffs im Stab F 6 wird als typisch für alle Stäbe der F-Serie angesehen.

Nach dem Entfernen der Hülle des F 6-Stabes zerfiel der Brennstoff in Teile (siehe Abb. 50). Die Größe der Bruchstücke des Brennstoffs wurde durch den Transientenversuch im Mittel nicht geändert, wie die Auswertung einer Siebanalyse für die Stäbe F 4, F 5 und F 6 in Abb. 51 zeigt. Hier sind die Teilchengrößen der Pelletbruchstücke des Stabes F 6 (ohne Versuch) mit denen der Stäbe F 4 und F 5 (mit Versuch) verglichen.

## 8. Beurteilung der Ergebnisse

Die Untersuchungen der F-Prüflinge nach der Bestrahlung im FR2-Reaktor zeigen, daß der Brennstoff gerissen ist, die Pellets zerbrochen sind. Der Vergleich mit Brennstoff ähnlich großen Abbrands aus Leistungsreaktoren konnte bisher nur qualitativ anhand von Stab-Querschnittsbildern durchgeführt werden. Es zeigten sich keine systematischen Unterschiede im Rißmuster, in der Größe und Anzahl der Bruchstücke, so daß man den Brennstoff der im FR2 bestrahlten F-Stäbe in dieser Hinsicht als typisch für den Leistungsreaktor ansehen kann.

Durch den Versuch (LOCA-Transiente) wird dem Brennstoff durch die Aufweitung der Hülle mehr Raum gegeben. Der Brennstoff verliert im Beulenbereich die Tablettenform und liegt als Schüttung vor, die den aufgebeulten Bereich der Hülle auffüllt. Durch diese Umstrukturierung des Brennstoffs ergibt sich eine Verkürzung der aktiven Zone, im Falle der F-Stäbe von bis zu 83 mm (Versuch F 1).

Dieses Stabverhalten ist bei den Versuchen mit nicht vorbe-strahlten Prüflingen nicht beobachtet worden.

Wann genau im Verlauf einer Transiente die Pellets auseinander fallen und insbesondere, ob dies den Verformungsvorgang beeinflusst, konnte bisher noch nicht geklärt werden. Es ist allerdings zu vermuten, daß kein wesentlicher Einfluß auf die Verformung vorliegt, da die Berstdaten wie Bersttemperatur, Berstdruck und plastische Hüllverformung aus den F-Versuchen keine Besonderheiten bezüglich des Brennstabverhaltens im Vergleich mit unbestrahlten Prüflingen erkennen lassen.

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

Danksagung

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

Besonderer Dank gilt den Herren Dr. Kapulla und Heine für die Mitwirkung bei der Abbrandbestimmung und der Ermittlung der Flußdichteprofile während der Versuche, Herrn A. Grünhagen für die Aufbereitung der CALAS-Meßwerte, Herrn K. Baumgärtner für die Durchführung der konstruktiven Arbeiten zu den Versuchseinsätzen und Herrn F. Schmitt für die Betreuung des DK-Kreislaufs am FR2.

## 9. Literatur

- /1/ Karb, E.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zur Untersuchung des Brennstabver-  
sagens. In KfK 2101 (1974), S. 94 - 112
- /2/ Karb, E.:  
Ergebnisse von In-pile-Experimenten im FR2 zum Brenn-  
stabverhalten bei Kühlmittelverlust-Störfällen.  
In KfK 2570 (Dez. 1977), S. 195 - 203
- /3/ Sepold, L.; Prüßmann, M.:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /4/ Chapman, R.H.:  
Multirod Burst Test Program, Progress Report for January -  
March 1978, NUREG / CR O 255, ORNL / NUREG / TM-217,  
August 1978
- /5/ Chapman, R.H.; Cathcart, J.V. and Hobson, D.O.:  
Status of Zircaloy Deformation and Oxidation Research at  
Oak Ridge National Laboratory, presented at Specialists'  
Meeting on the Behavior of Water Reactor Fuel Elements  
under Accident Conditions, September 13-16, 1976,  
Spaatind (Nord-Torpa), Norway, USERDA Report CONF-760997-2,  
NTIS, 1976.
- /6/ Bauer, A.A. et al.:  
Evaluating Strength and Ductility of Irradiated Zircaloy,  
Quarterly Progress Report January - March, 1978,  
NUREG / CR-0085, BMI-2000, June 1978

- /7/ Erbacher, F.; Neitzel, H.J.; Wiehr, K.:  
Deformation Mechanism of Zircaloy Fuel Cladding in a LOCA  
and Interaction with the Emergency Core Cooling,  
Transactions of the ANC 1979 Conference, Vol. 31,  
TANSO 31 1-666 (1979)

Anhang

Tabelle 16.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: F 1

Datum: 25.10.1977

Uhrzeit: 14.03.07

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	491 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	481 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	319 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	340 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	371 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	350 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	348 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	345 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	366 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	360 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	375 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	379 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	374 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	388 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	61 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	57 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	57 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	71 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	276 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	284 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	522 °C
35	T 116/ T 115	Temperaturdiff. Prüfling	20,5 K
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	48 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	53-55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	62 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	839 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

Anhang

Tabelle 16.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: F 2

Datum: 31.10.1977

Uhrzeit: 12.06.17

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	484 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	476 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	316 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	365 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	342 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	339 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	336 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	347 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	354 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	360 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	358 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	349 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	353 °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	61 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	288 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	512 °C
35	T 116/ T 115	Temperaturdiff. Prüfling	18,8 K
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	54-57 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	817 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	120 kg/h

Anhang

Tabelle 16.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: F 3                      Datum: 2.11.1977                      Uhrzeit: 11.55.48

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	468 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	462 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	331 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	362 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	338 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	336 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	333 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	357 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	354 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	361 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	369 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	365 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	359 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	65 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	46 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	280 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	495 °C
35	T 116/ T 115	Temperaturdiff. Prüfling	16,3 K
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	48 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	52-55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	802 mbar
	m	Dampfmengenstrom	120 kg/h

Anhang

Tabelle 16.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: F 4 Datum: 22.11.1977 Uhrzeit: 12.12.13

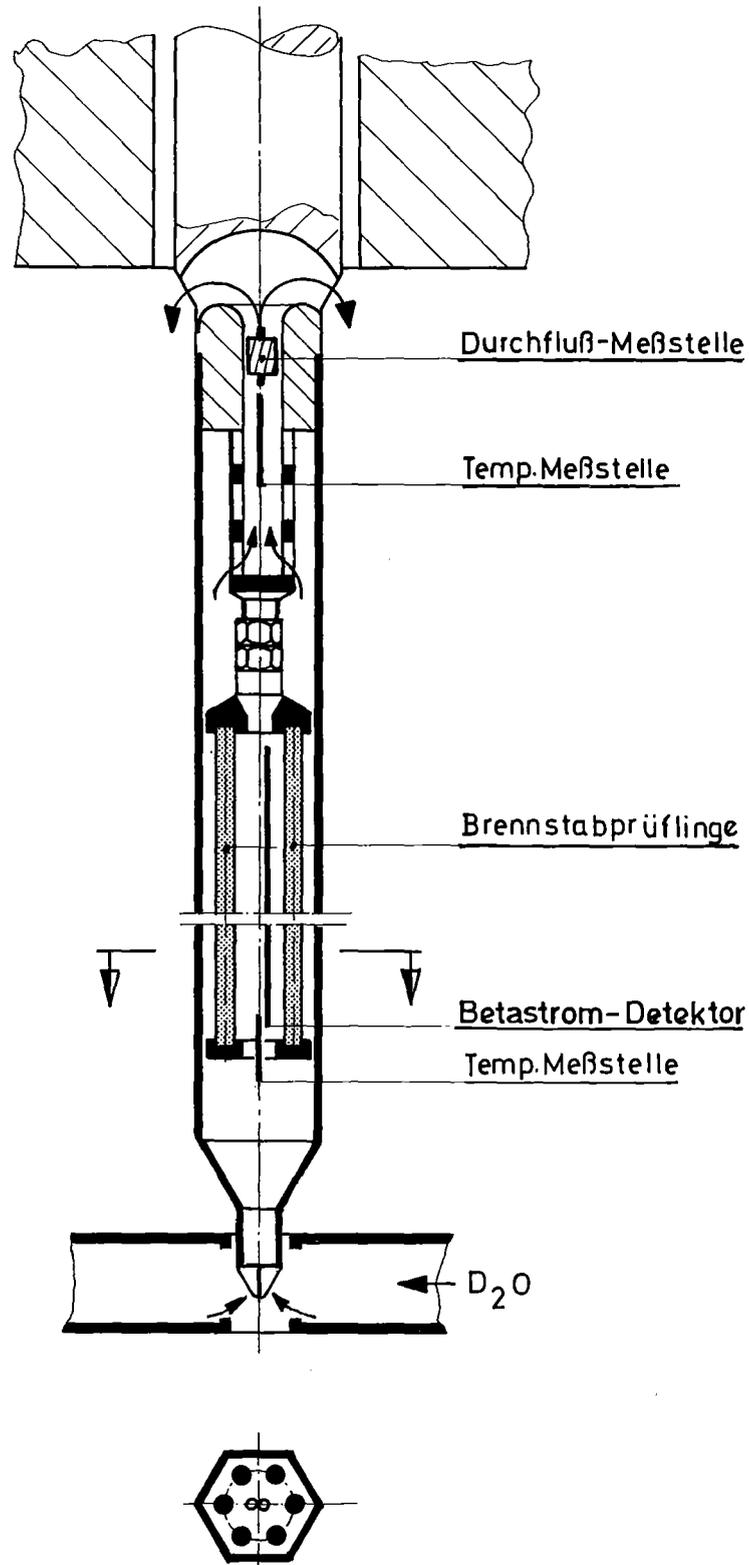
CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	460 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	456 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	313 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	334 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	362 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	338 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	336 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	332 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	347 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	352 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	358 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	365 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	363 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	379 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	61 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	57 bar
18	P 63	Druck vor Blende	56 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	57 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	83 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	277 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	283 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	486 °C
35	T 116/ T 115	Temperaturdiff. Prüfling	19,9 K
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	53 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	59-61 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	62 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	803 mbar
	m	Dampfmengenstrom	116 kg/h

Anhang

Tabelle 16.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: F 5 Datum: 28.10.1977 Uhrzeit: 11.59.20

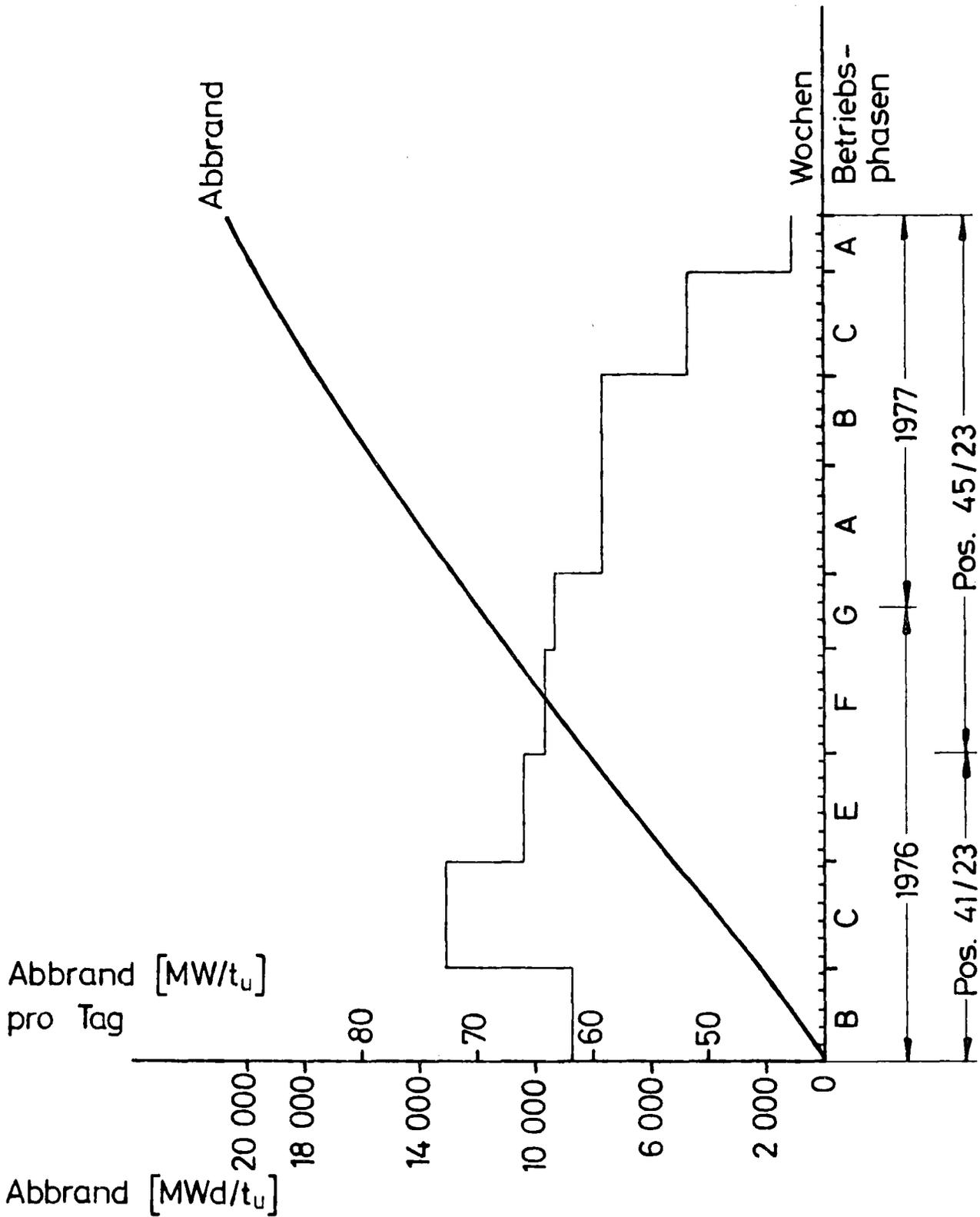
CALAS-Adresse	Meßstelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	465 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	460 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	310 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	327 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	359 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	335 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	334 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	330 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	347 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	359 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	354 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	355 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	356 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	360 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	62 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	58 bar
18	P 63	Druck vor Blende	57 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	57 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	71 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	285 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	491 °C
35	T 116/ T 115	Temperaturdiff. Prüfling	16,6 K
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	45 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	49-52 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	63 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	835 mbar
	m	Dampfmengenstrom	120 kg/h

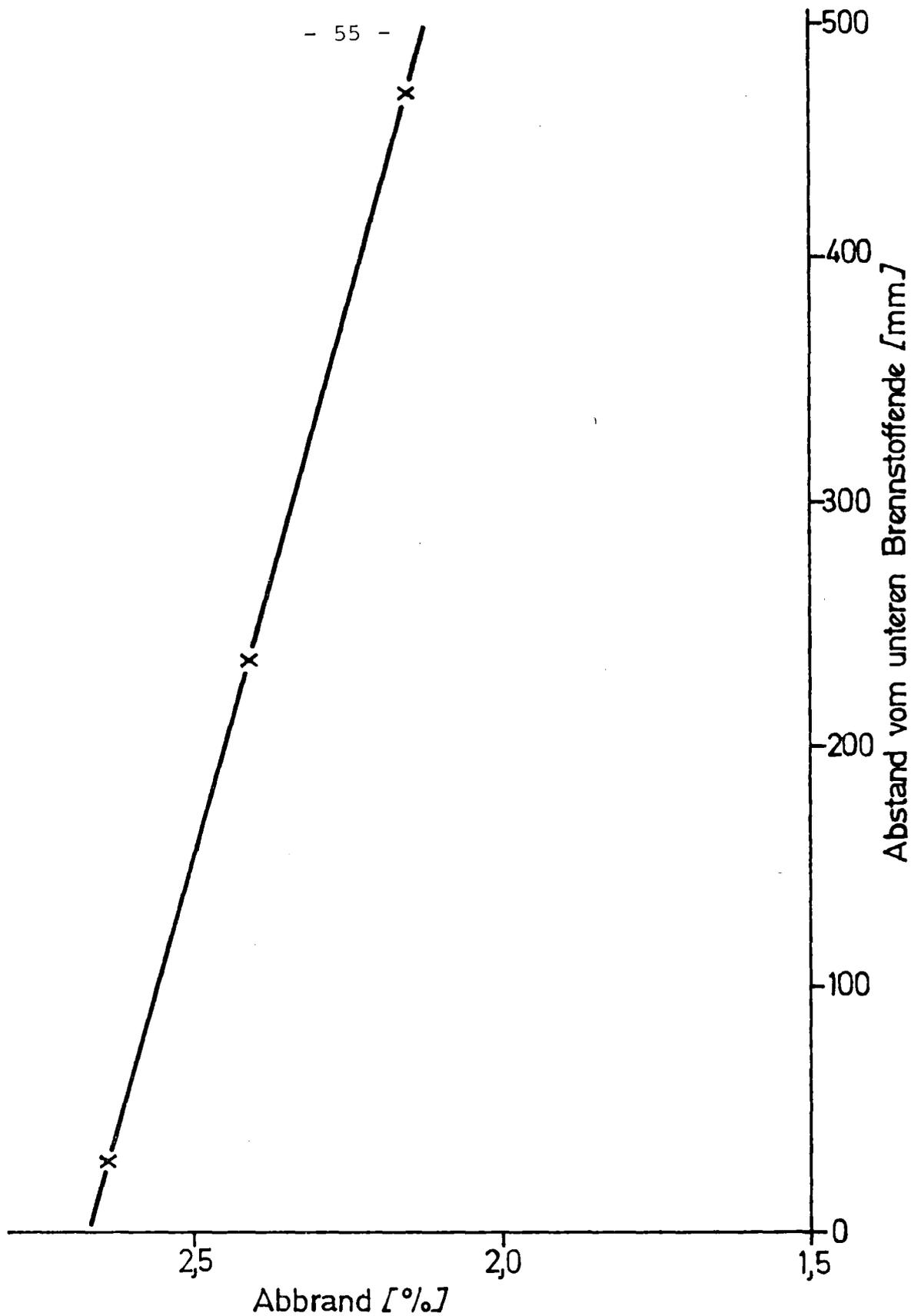


**kfk** IT 78  
PNS 4237-147

# Vorbestrahlungseinsatz vereinfacht

Abb.: 1

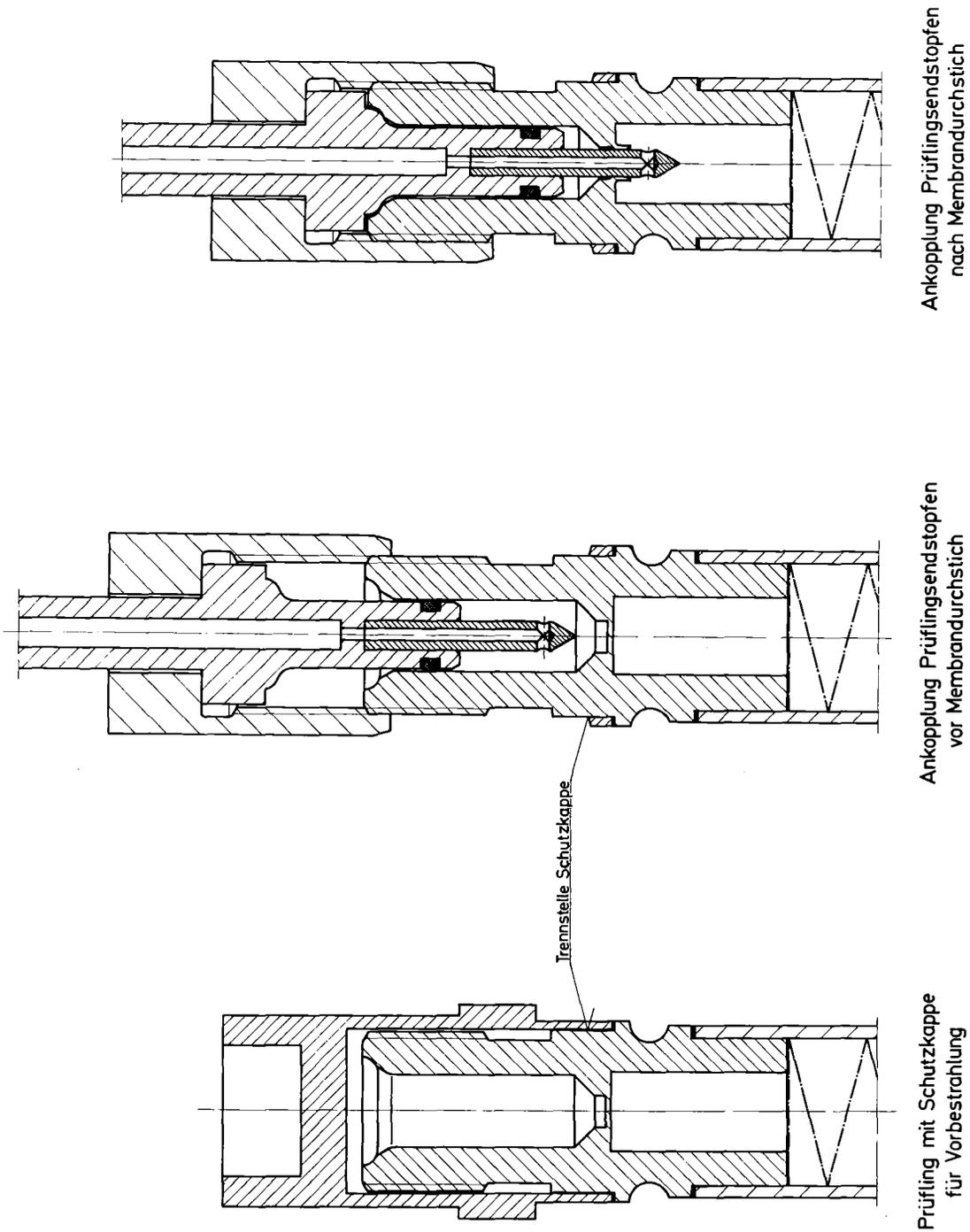




**KfK** IT 79  
PNS 4237-250

Axiale Abbrandverteilung im  
Brennstab F6

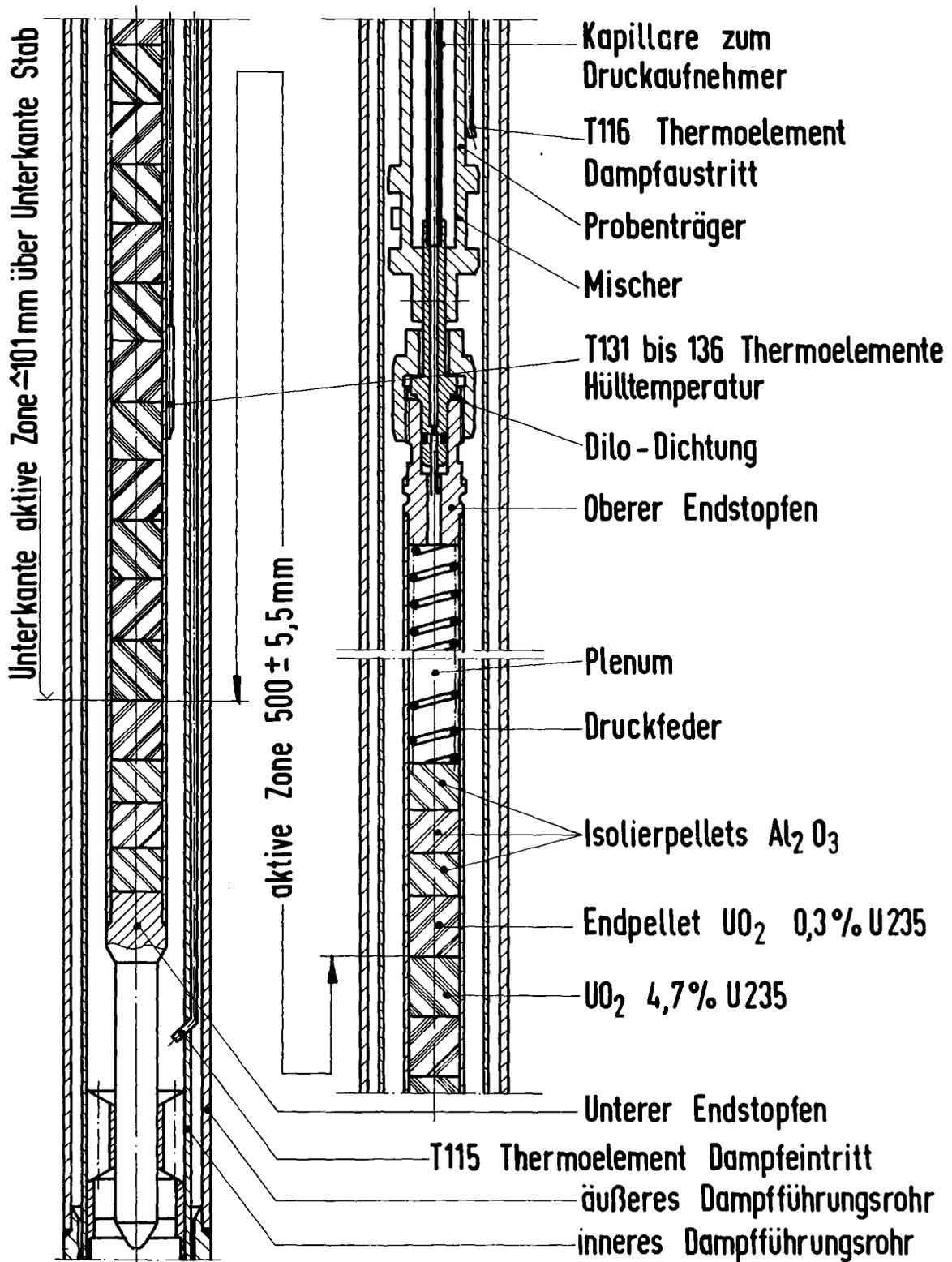
Abb: 3



IT78 PNS4237-18

Zur Messung des Stabinnendruckes

Abb.:4

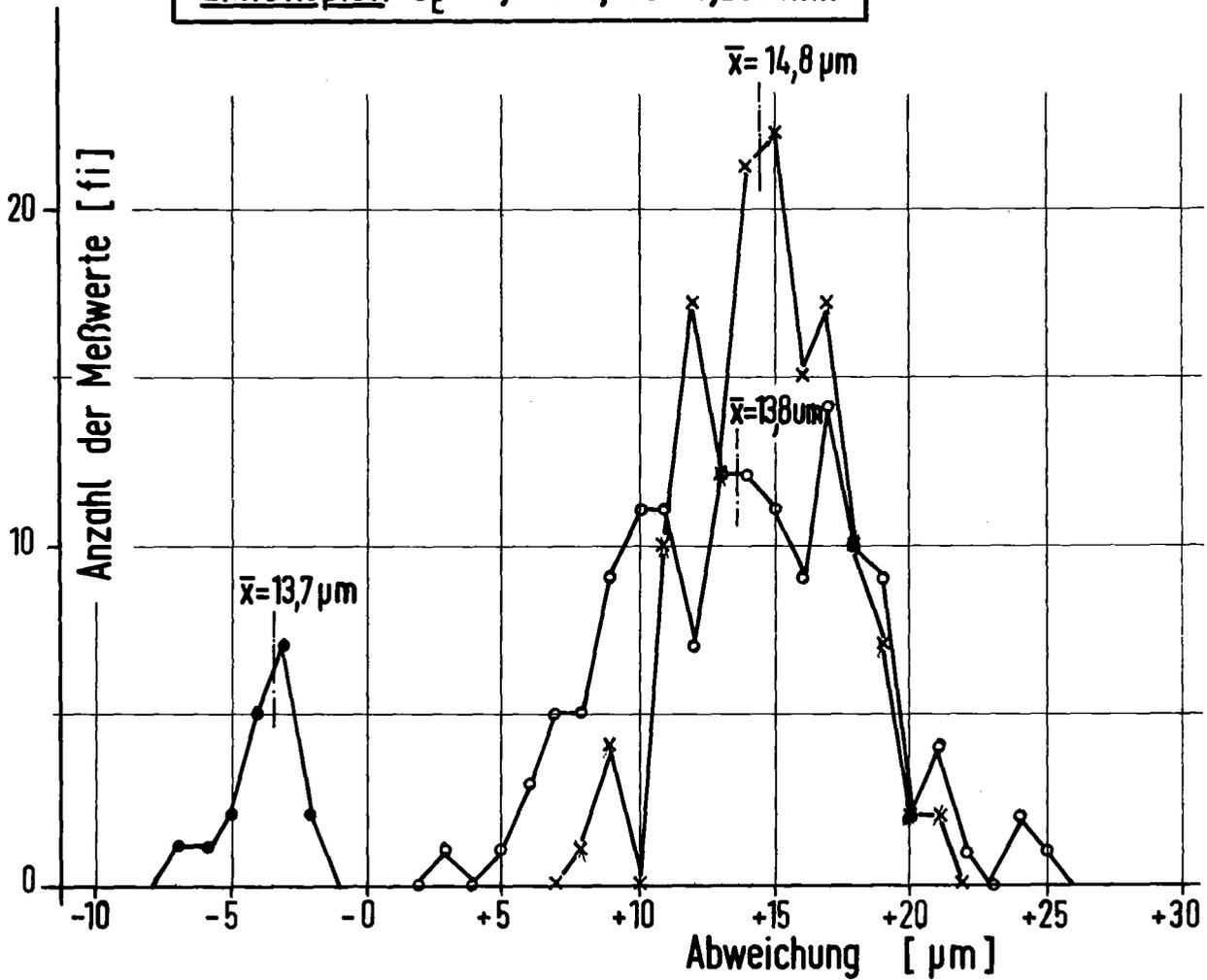


RBT/IT-1977  
PNS 4237-88

# Nuklear-Prüfling vereinfacht

Abb.: 5

**Einfüllspiel:  $S_E = 9,314 - 9,106 = 0,208 \text{ mm}$**

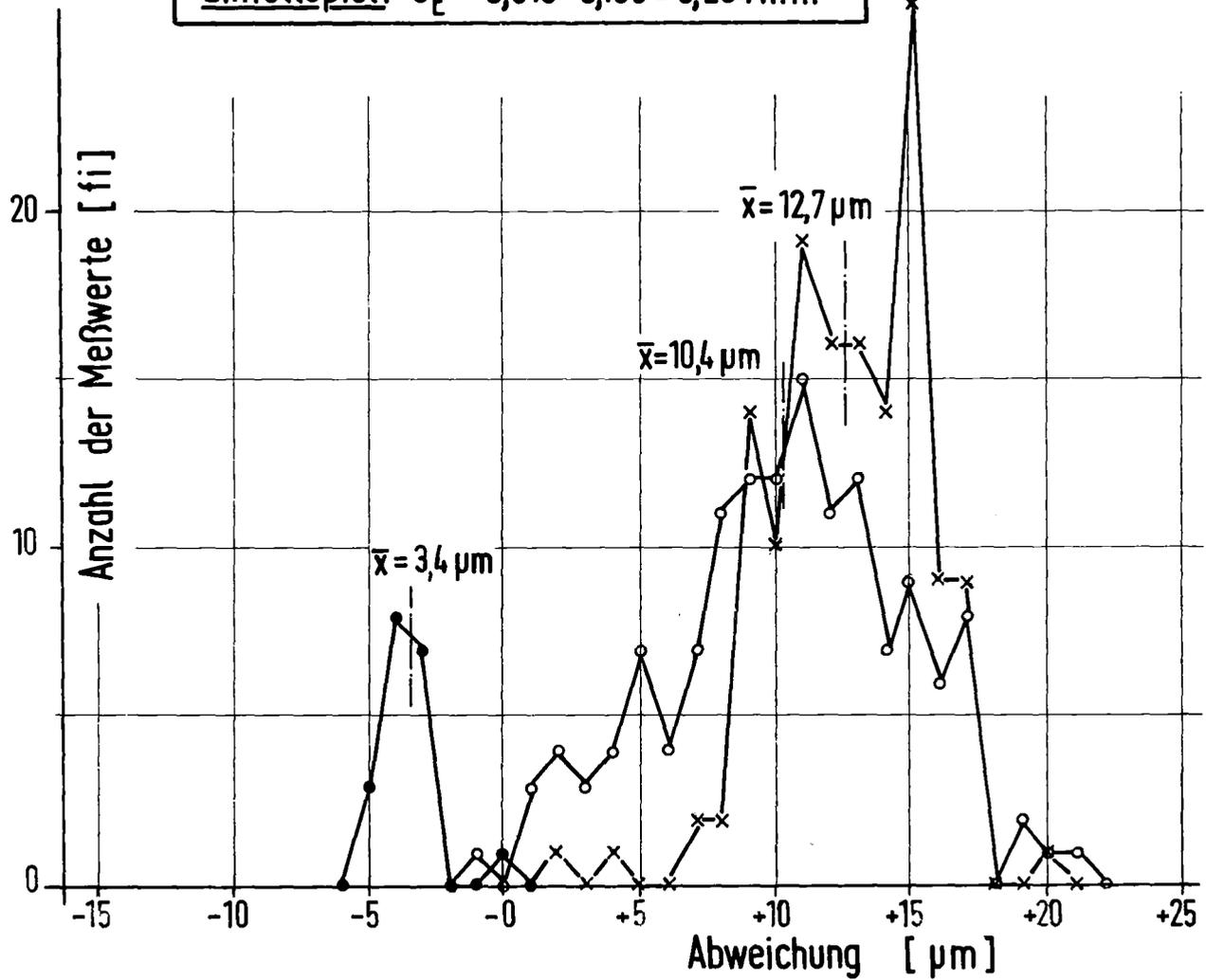


<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß: 10,750 mm
	Mittelwert $\bar{x} = 10,765 \text{ mm}$	Istmaß + 0,021 mm + 0,008 mm
○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß 9,300 mm	
	Mittelwert $\bar{x} = 9,314 \text{ mm}$	Istmaß + 0,027 mm + 0,003 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß: 9,110 mm
	Mittelwert $\bar{x} = 9,106 \text{ mm}$	Istmaß - 0,002 mm - 0,007 mm



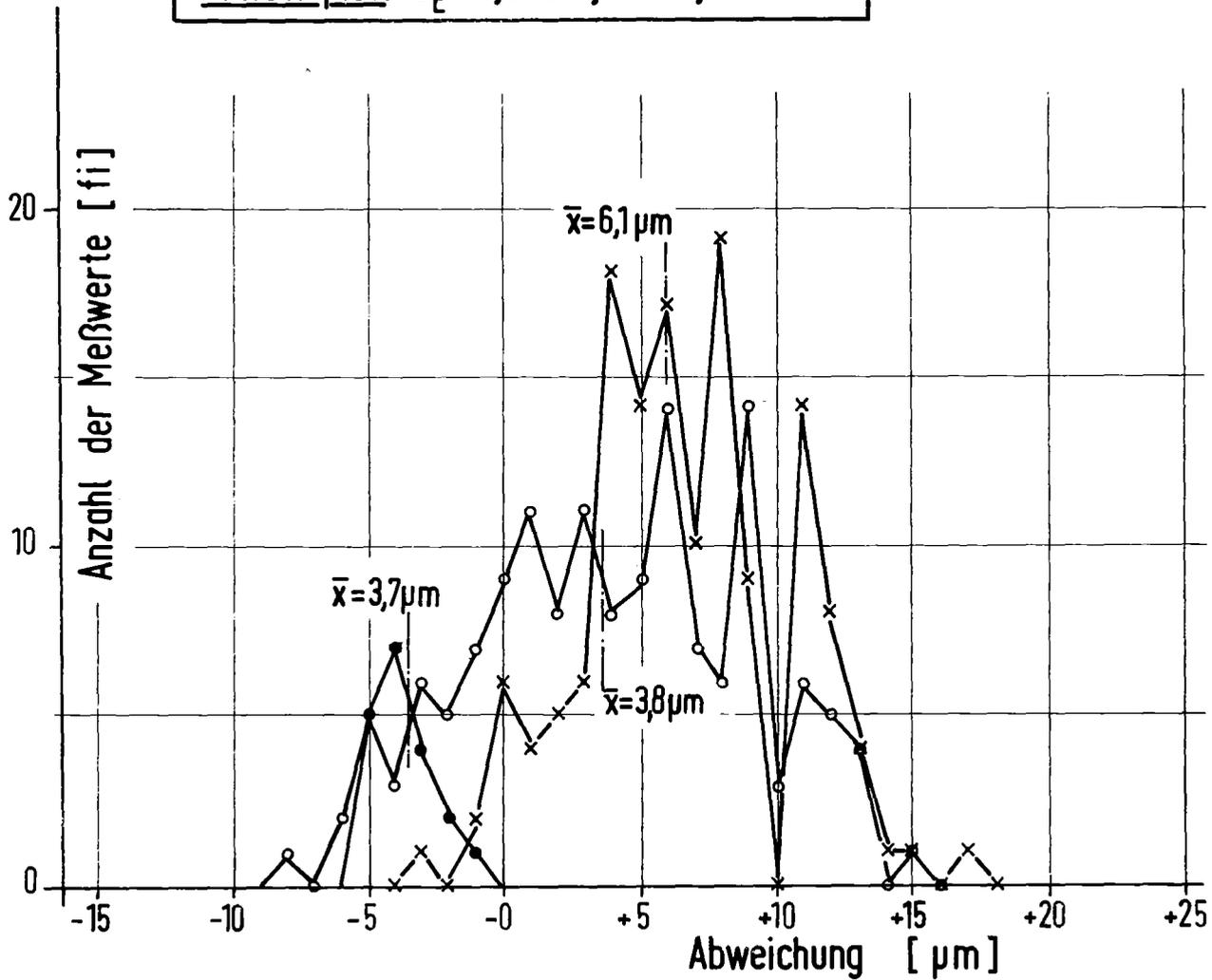
**Durchmesserabmaße und Einfüllspiel Prüflingsein-  
satz Nr.: F1 Stab Nr.: 37** Abb.: 6.1

Einfüllspiel:  $S_E = 9,310 - 9,106 = 0,204 \text{ mm}$



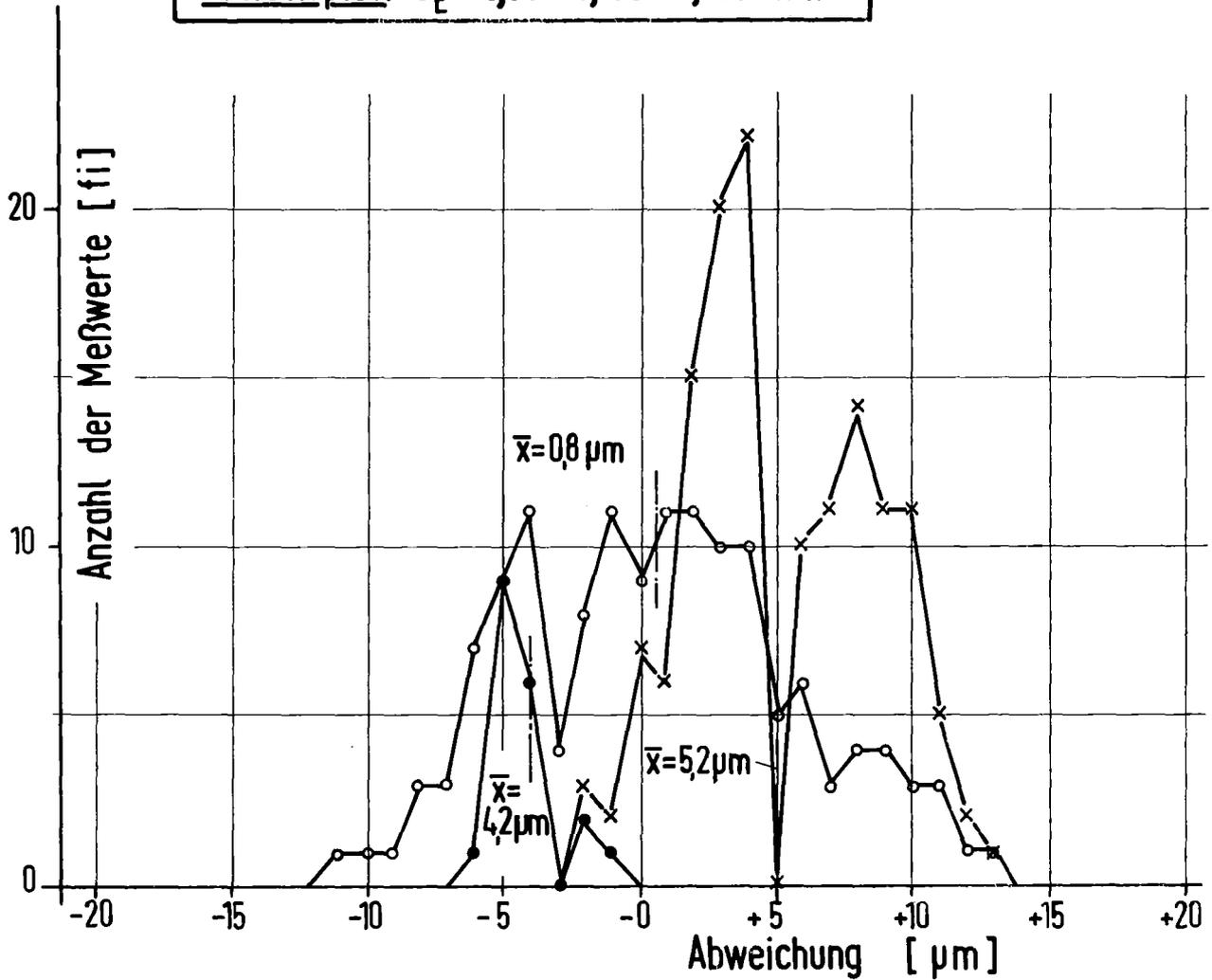
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß:	10,750 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	+ 0,020 mm + 0,002 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß	9,300 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	+ 0,021 mm - 0,001 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß:	9,110 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	± 0,000 mm - 0,005 mm

**Einfüllspiel:  $S_E = 9,304 - 9,106 = 0,198 \text{ mm}$**



<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß: 10,750 mm
	Mittelwert $\bar{x} = 10,756 \text{ mm}$	Istmaß + 0,017 mm - 0,003 mm
○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß 9,300 mm	
	Mittelwert $\bar{x} = 9,304 \text{ mm}$	Istmaß + 0,015 mm - 0,008 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß: 9,110 mm
	Mittelwert $\bar{x} = 9,106 \text{ mm}$	Istmaß - 0,001 mm - 0,005 mm

**Einfüllspiel:  $S_E = 9,301 - 9,106 = 0,195$  mm**



Hüllrohr × Außendurchmesser : Nennmaß: 10,750 mm  
 Mittelwert  $\bar{x} = 10,755$  mm Istmaß + 0,013 mm  
 - 0,002 mm

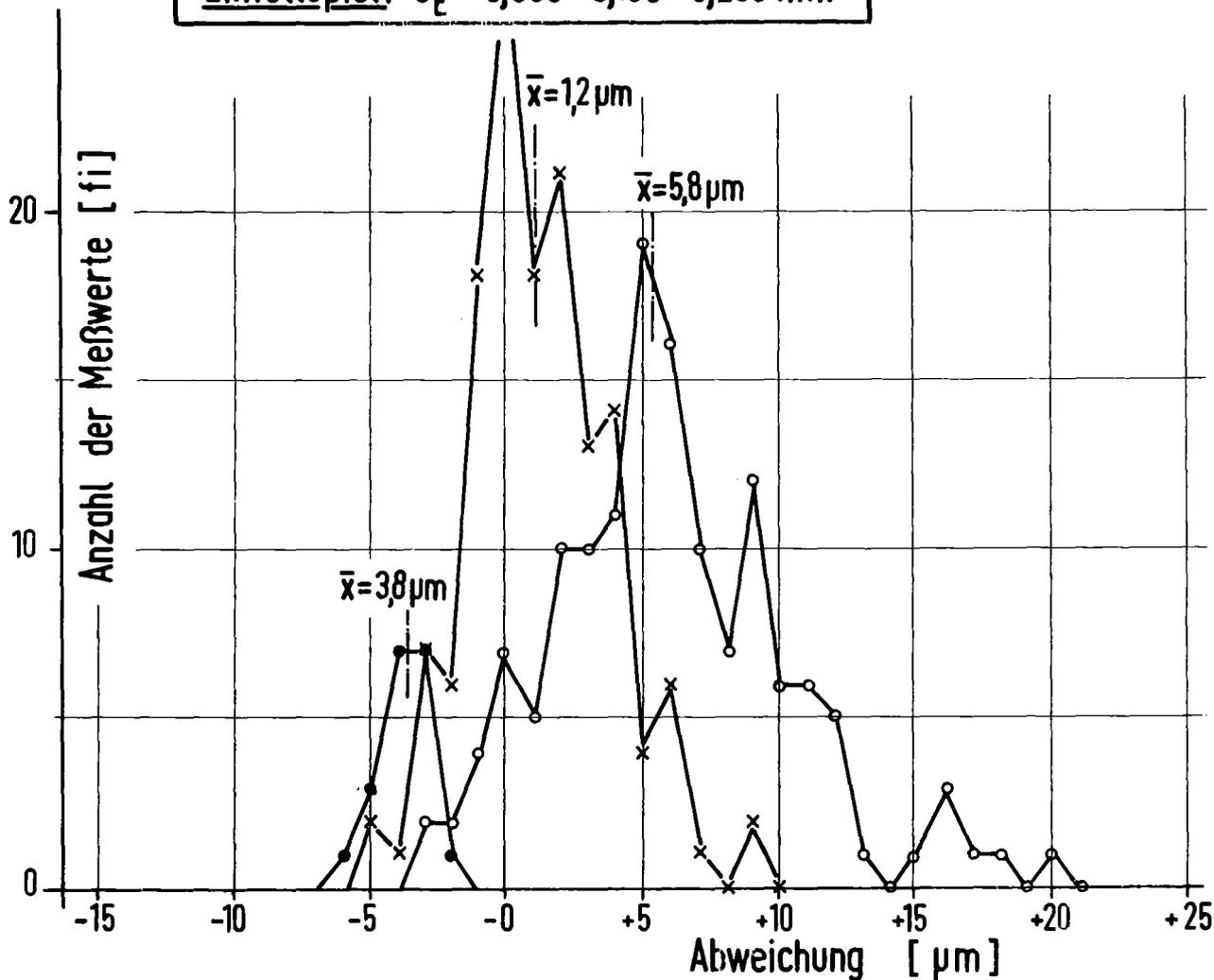
○ Innendurchmesser : Nennmaß 9,300 mm  
 Mittelwert  $\bar{x} = 9,301$  mm Istmaß + 0,013 mm  
 - 0,011 mm

Pellet ● Außendurchmesser : Nennmaß: 9,110 mm  
 Mittelwert  $\bar{x} = 9,106$  mm Istmaß - 0,001 mm  
 - 0,006 mm

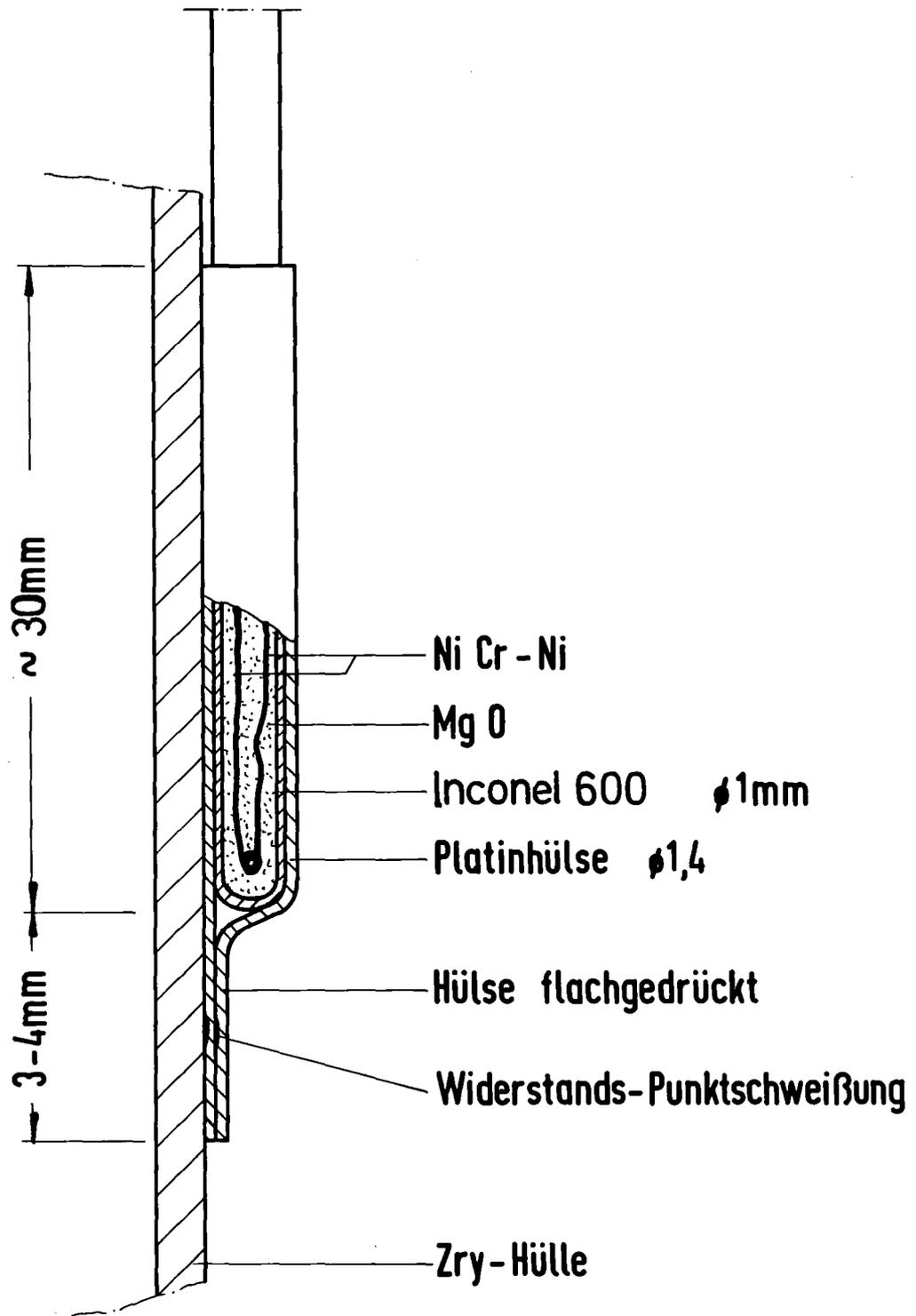


**Durchmesserabmaße und Einfüllspiel Prüflingsein-  
 satz Nr.: F4 Stab Nr.: 40** Abb.: 6.4

**Einfüllspiel:  $S_E = 9,306 - 9,106 = 0,200$  mm**



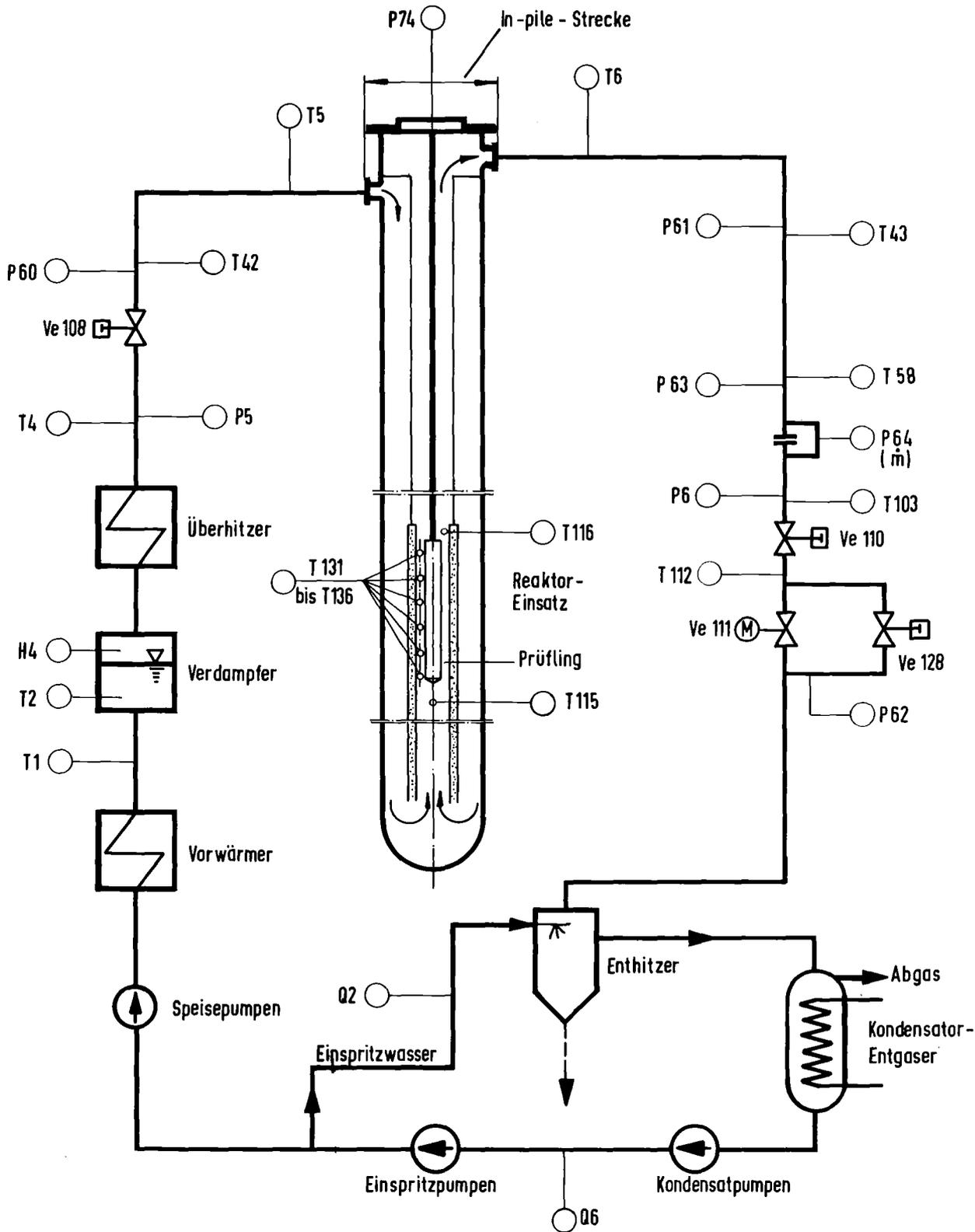
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß:	10,750 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	+ 0,009 mm - 0,005 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß	9,300 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	+ 0,020 mm - 0,003 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß:	9,110 mm
	Mittelwert $\bar{x} =$	Istmaß	- 0,002 mm - 0,006 mm



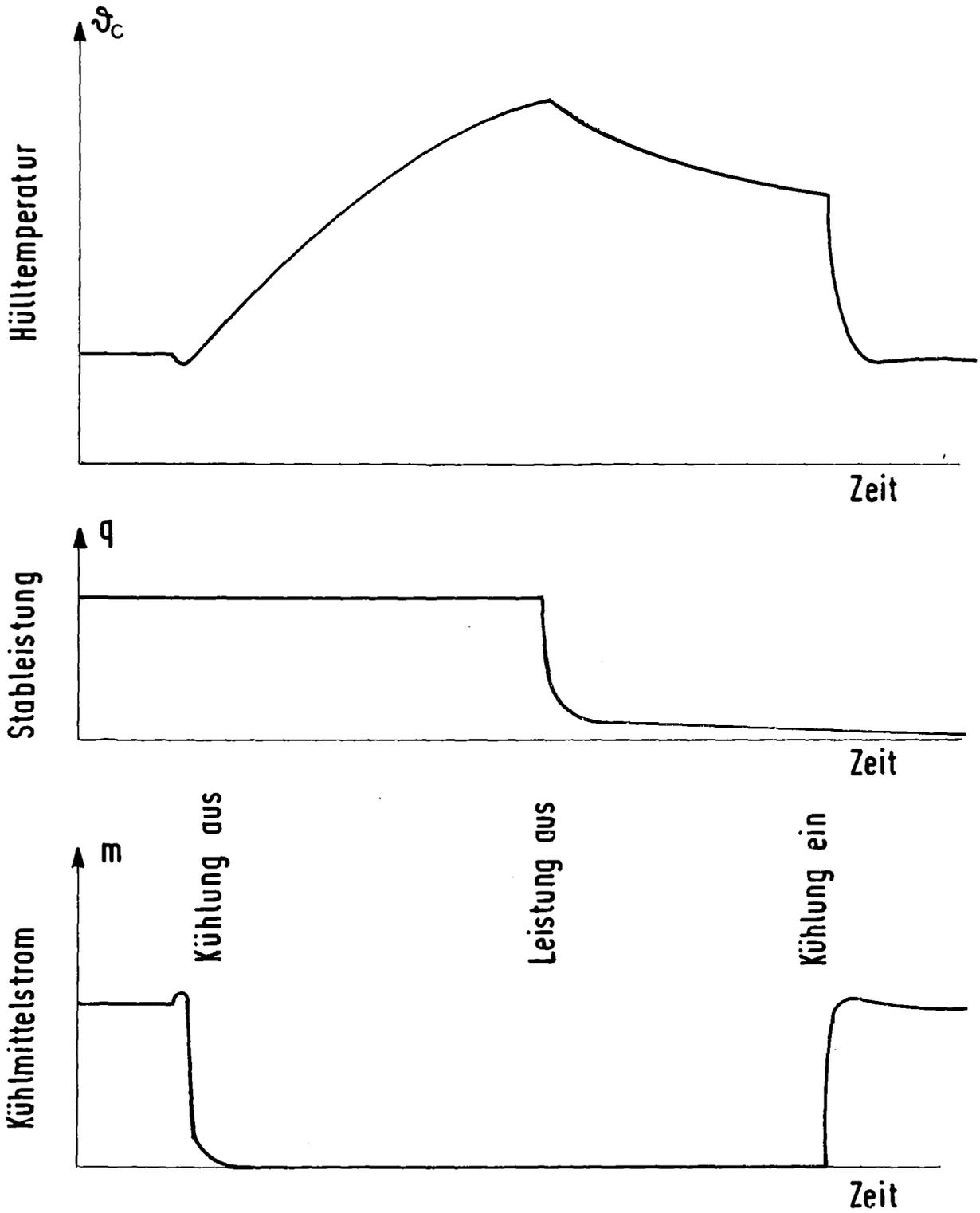
RBT/IT-1977  
PNS 4237-92

# Thermoelement am Prüflings-Hüllrohr

Abb.: 7



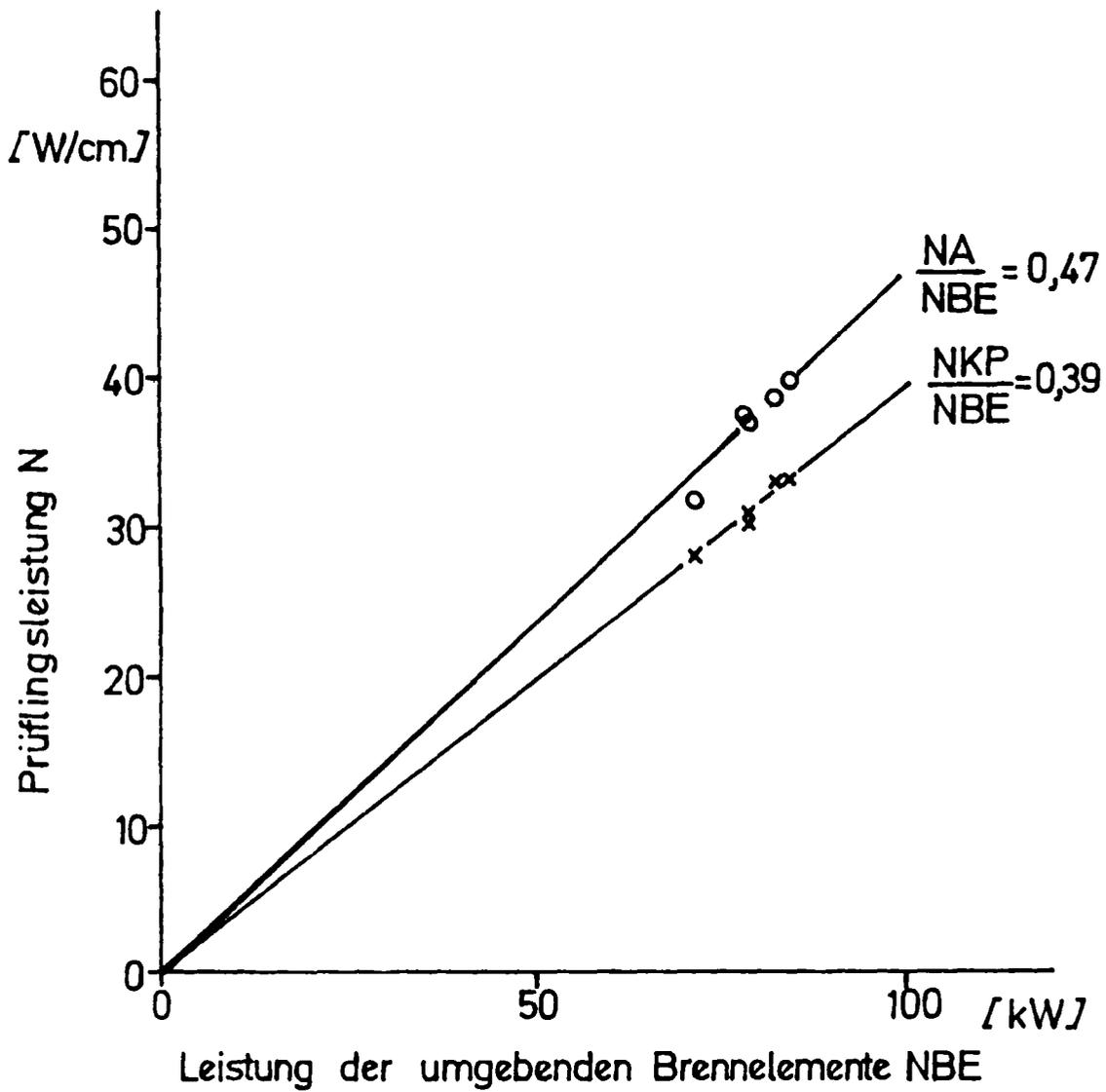
**DK-Loop am FR2. Stark vereinfachtes Kreislaufschema**  
Abb.: 8



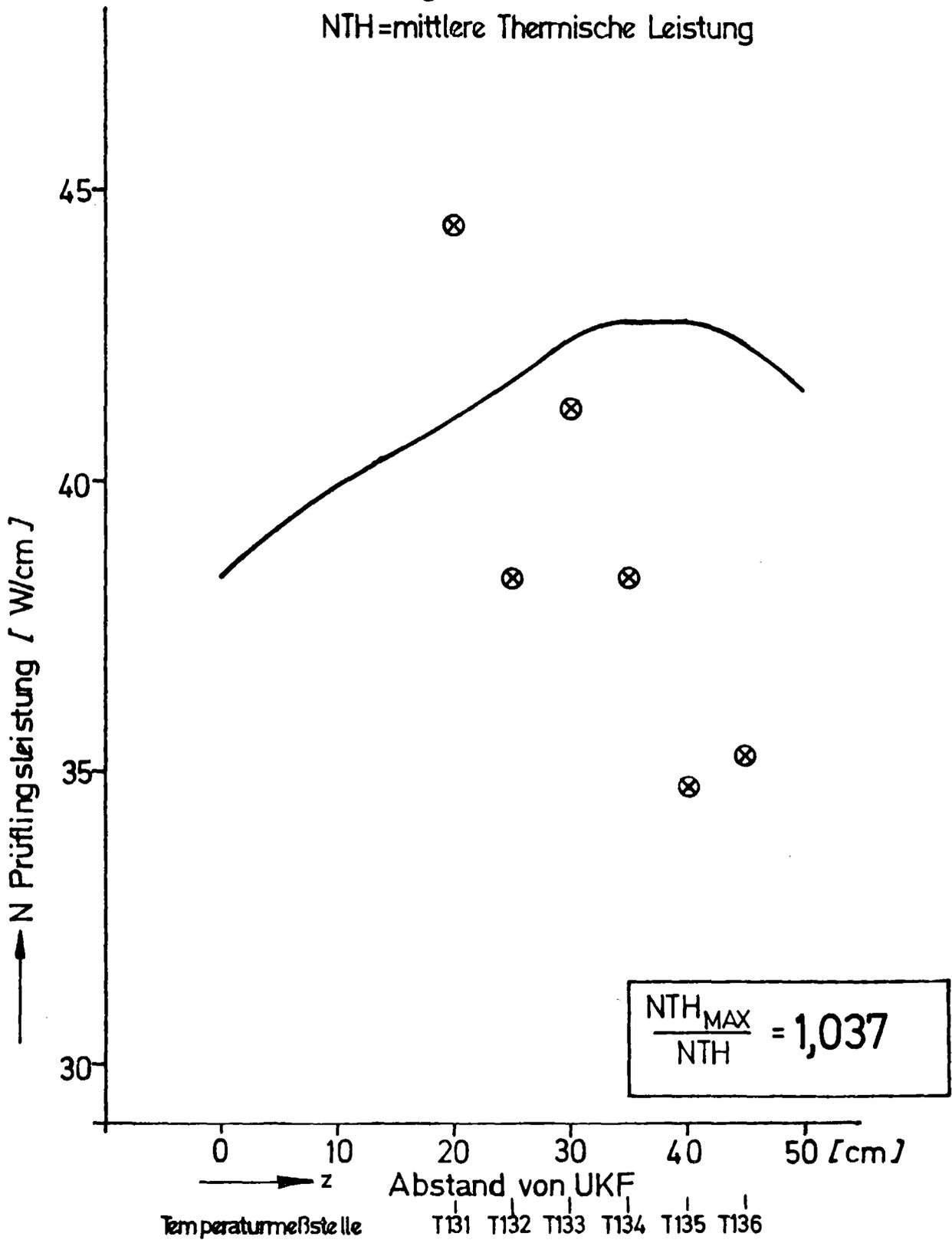
RBT/IT-1977  
PNS 4237-59.1

# Versuchsablauf, Schema

Abb.: 9



- ⊗ Leistung aus Temperaturanstieg bei 650°C = NA
- Thermische Leistung =  $NTH(z) = NTH \cdot (N(z) / \bar{N})$   
NTH = mittlere Thermische Leistung

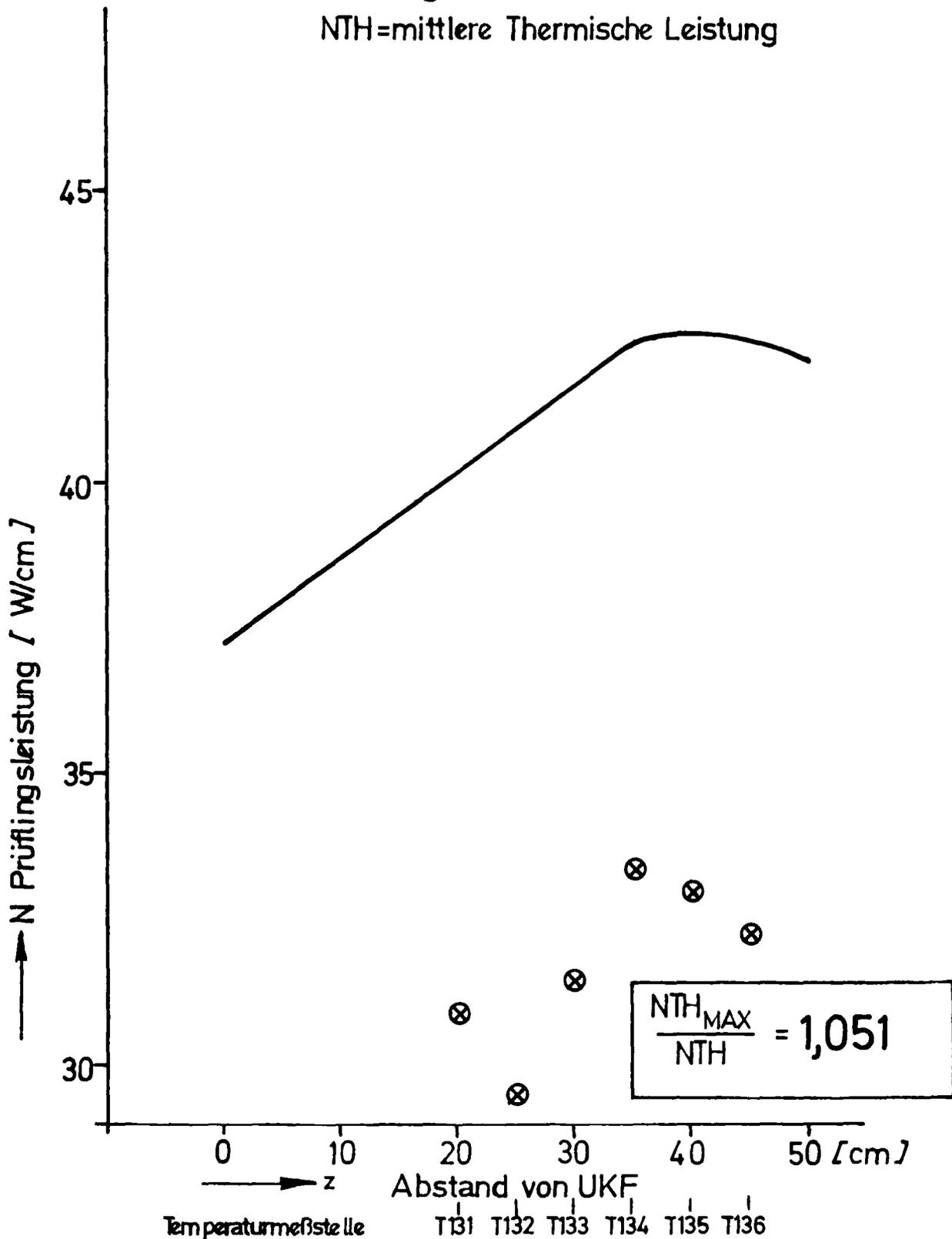


KfK  
IT 79  
PNS 4237-247.14

Axiales Leistungsprofil am Prüfling  
Versuch: F 1                      Stab Nr.: 37

Abb.: 11.1

- ⊗ Leistung aus Temperaturanstieg bei 650°C = NA
- Thermische Leistung =  $NTH(z) = NTH \cdot (N(z) / \bar{N})$   
NTH = mittlere Thermische Leistung

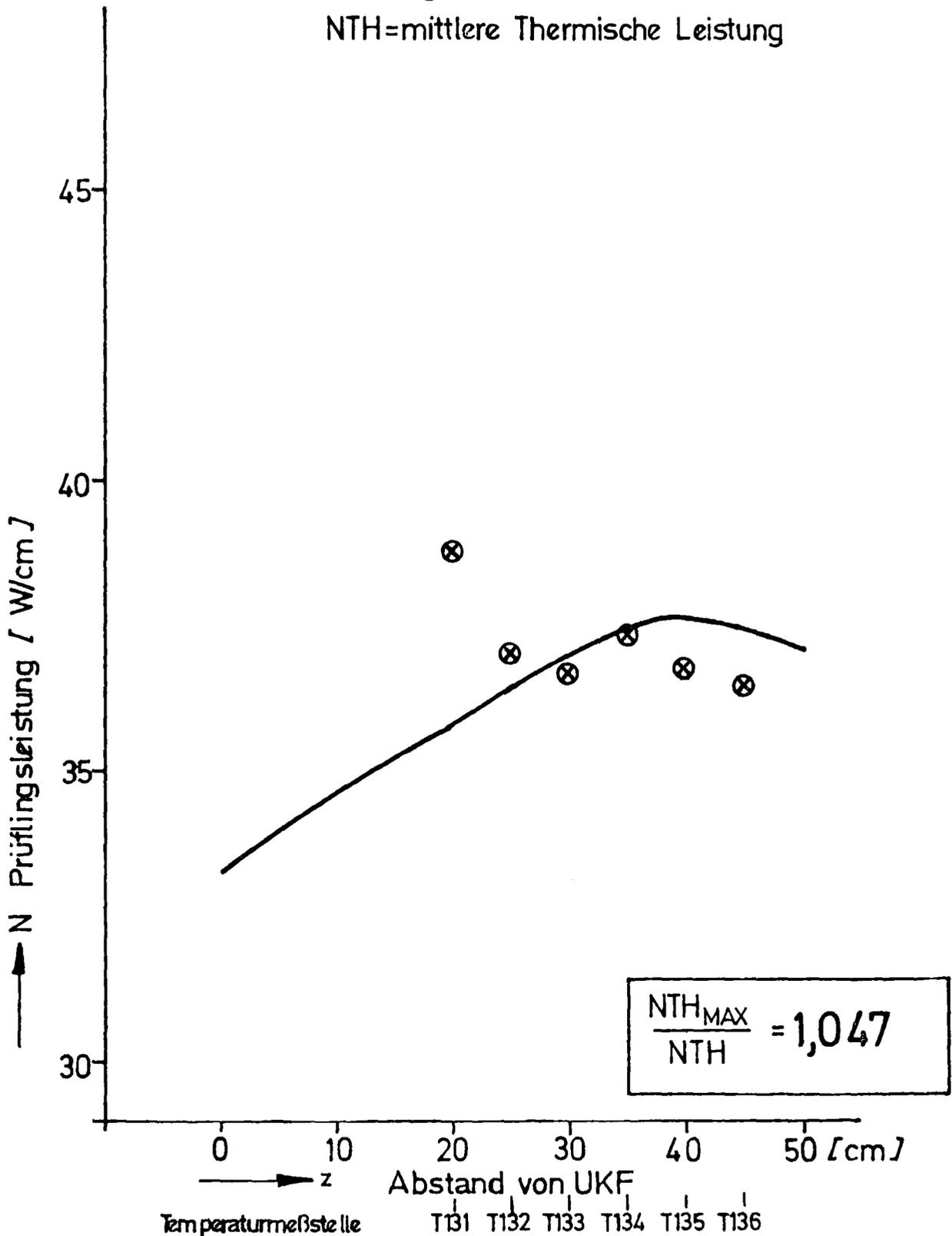


KfK  
IT 79  
PNS 4237-247.15

Axiales Leistungsprofil am Prüfling  
Versuch: F2                      Stab Nr.: 38

Abb.: 11.2

- ⊗ Leistung aus Temperaturanstieg bei 650°C = NA
- Thermische Leistung =  $NTH(z) = NTH \cdot (N(z) / \bar{N})$   
NTH = mittlere Thermische Leistung

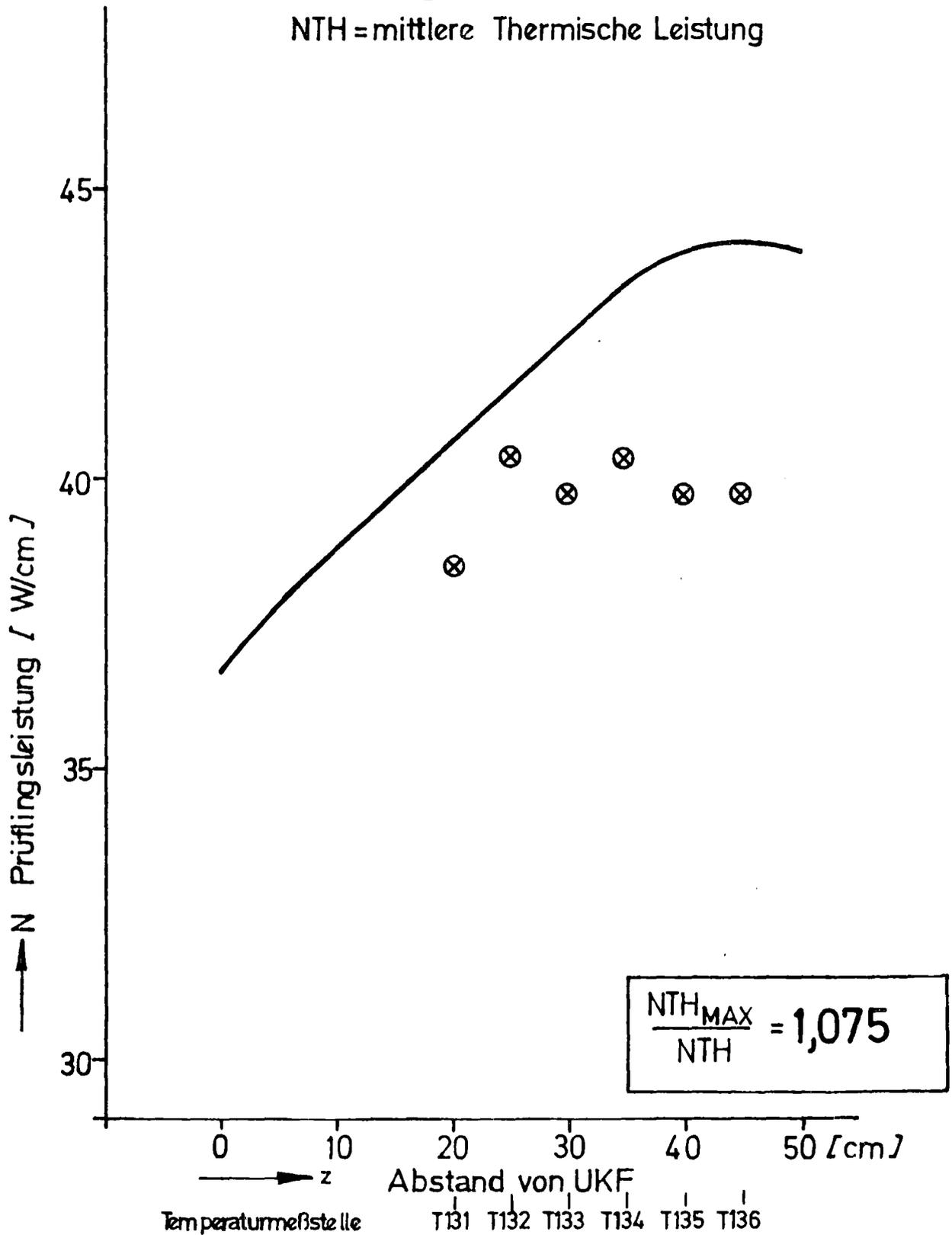


KfK  
IT 79  
PNS 4237-247.16

Axiales Leistungsprofil am Prüfling  
Versuch: F 3      Stab Nr.: 39

Abb.: 11.3

- ⊗ Leistung aus Temperaturanstieg bei 650°C = NA
  - Thermische Leistung =  $NTH(z) = NTH \cdot (N(z) / \bar{N})$
- NTH = mittlere Thermische Leistung

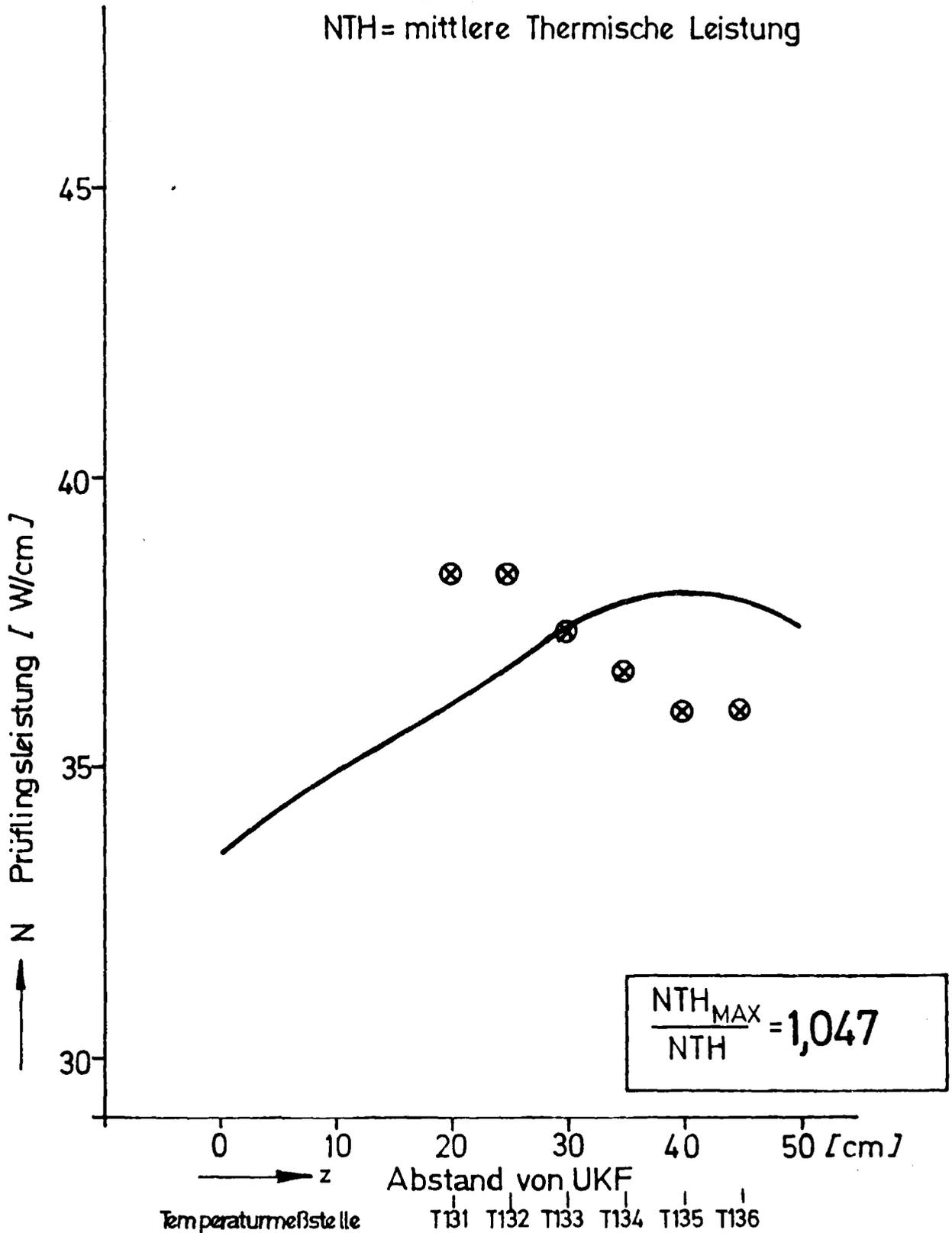


KIK IT 79  
PNS4237-247.17

Axiales Leistungsprofil am Prüfling  
Versuch: F 4                      Stab Nr.: 40

Abb.: 11.4

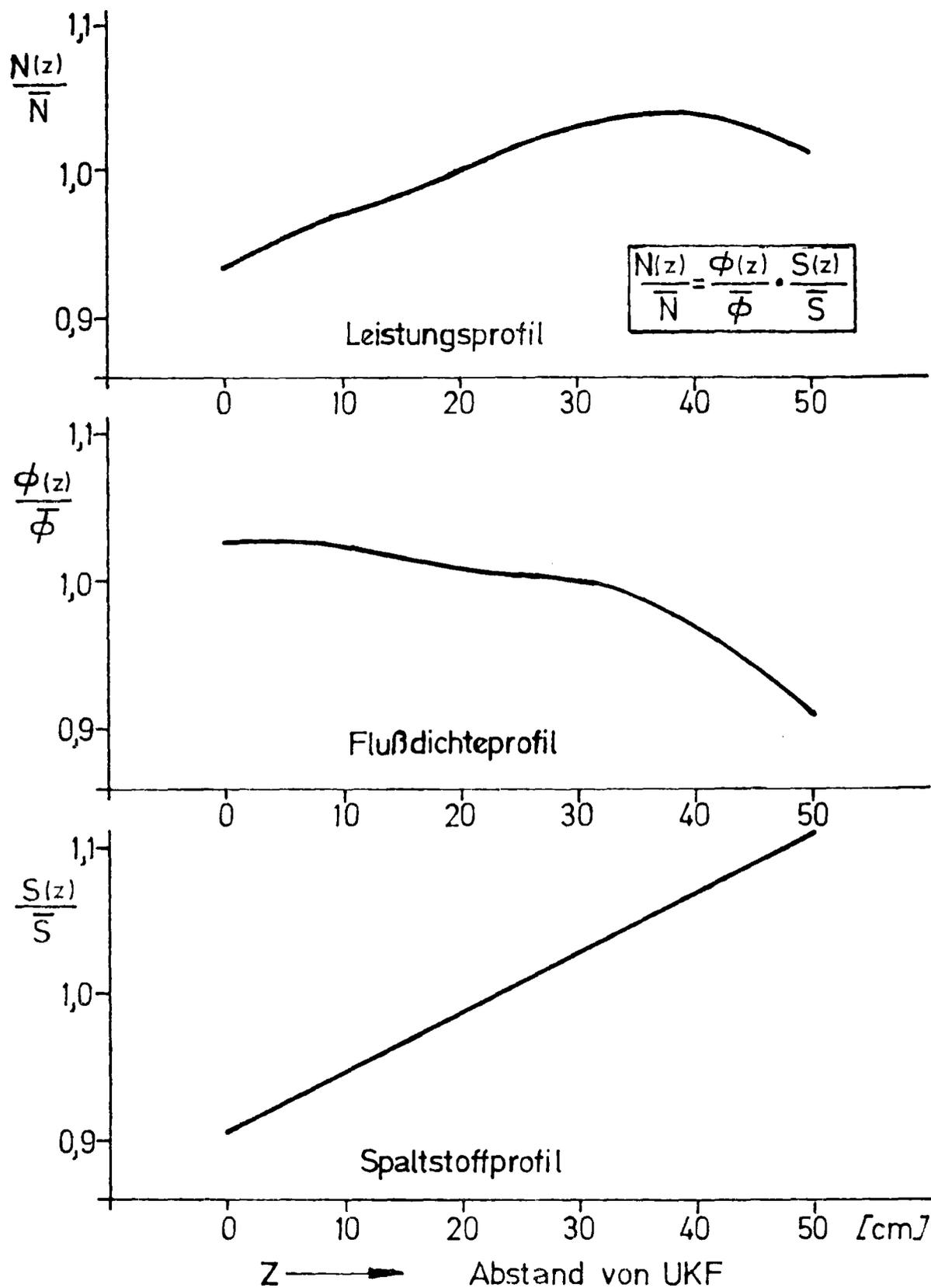
⊗ Leistung aus Temperaturanstieg bei 650°C = NA  
— Thermische Leistung =  $NTH(z) = NTH \cdot (N(z)/\bar{N})$   
NTH = mittlere Thermische Leistung



KIK  
IT79  
PNS4237-247.18

Axiales Leistungsprofil am Prüfling  
Versuch: F 5                      Stab Nr.: 43

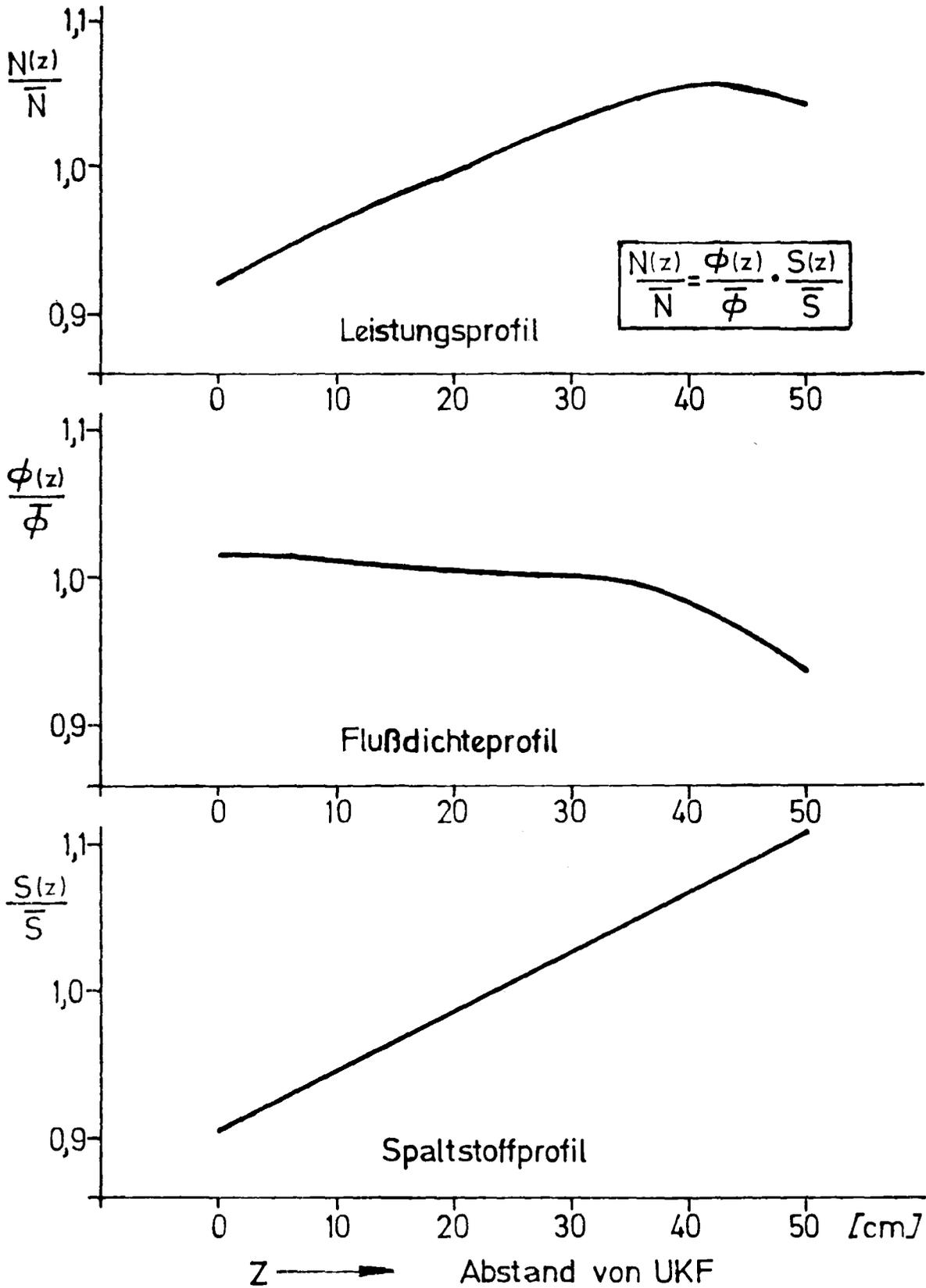
Abb.: 11.5

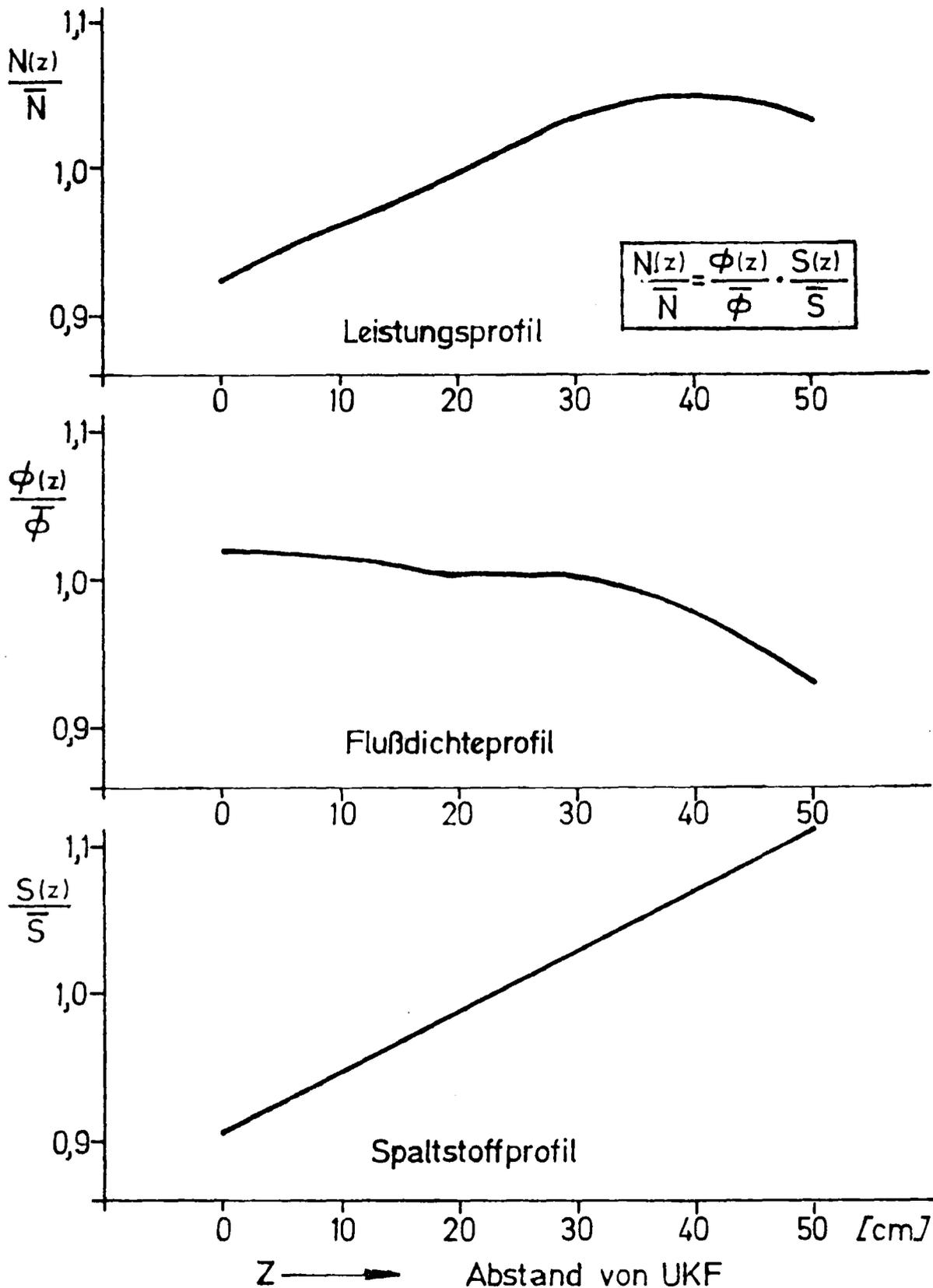


KIK IT 79  
PNS4237-248.14

Normierte Axialprofile am Prüfling  
Versuch: F1      Stab Nr.: 37

Abb: 12.1

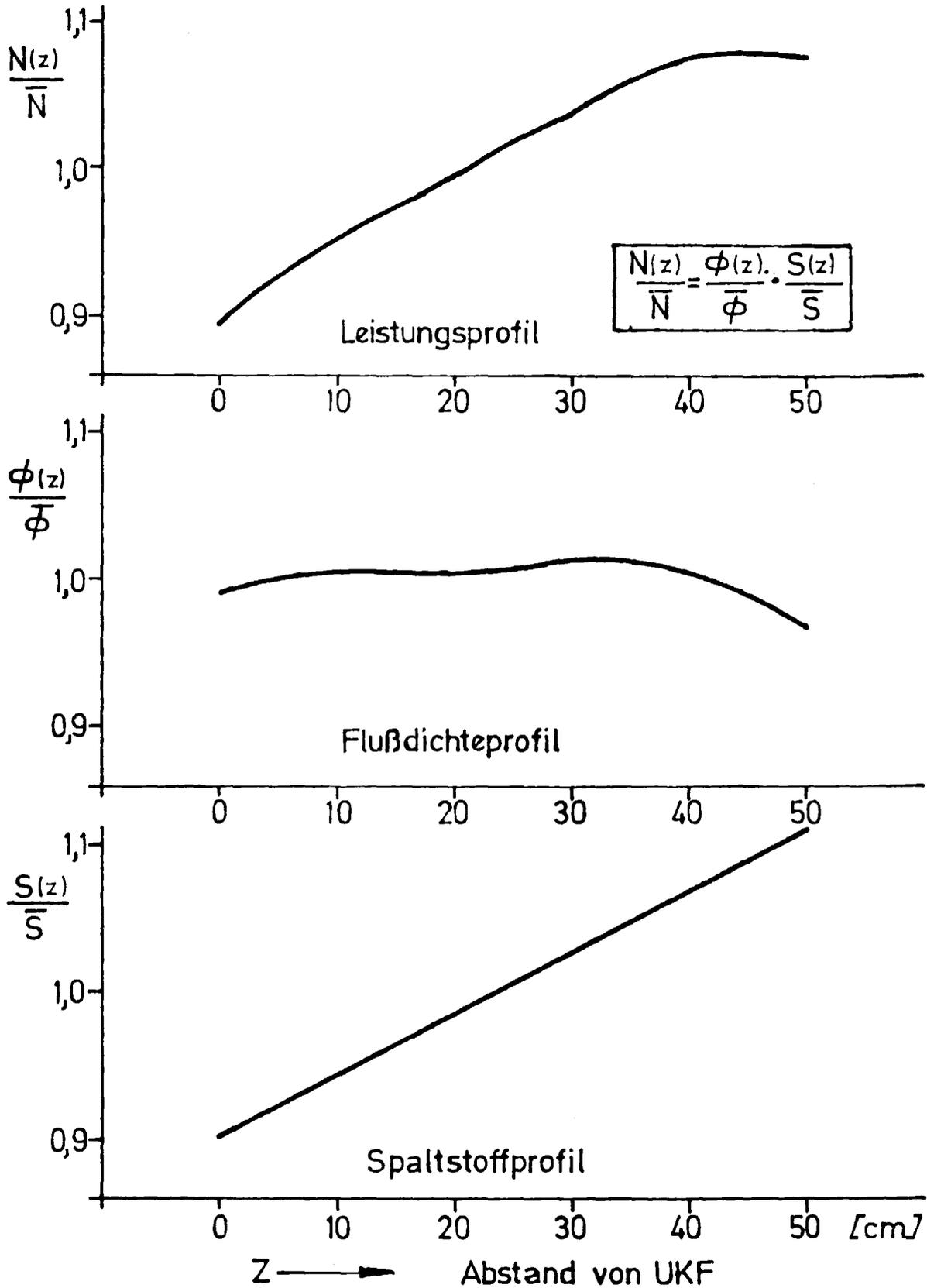


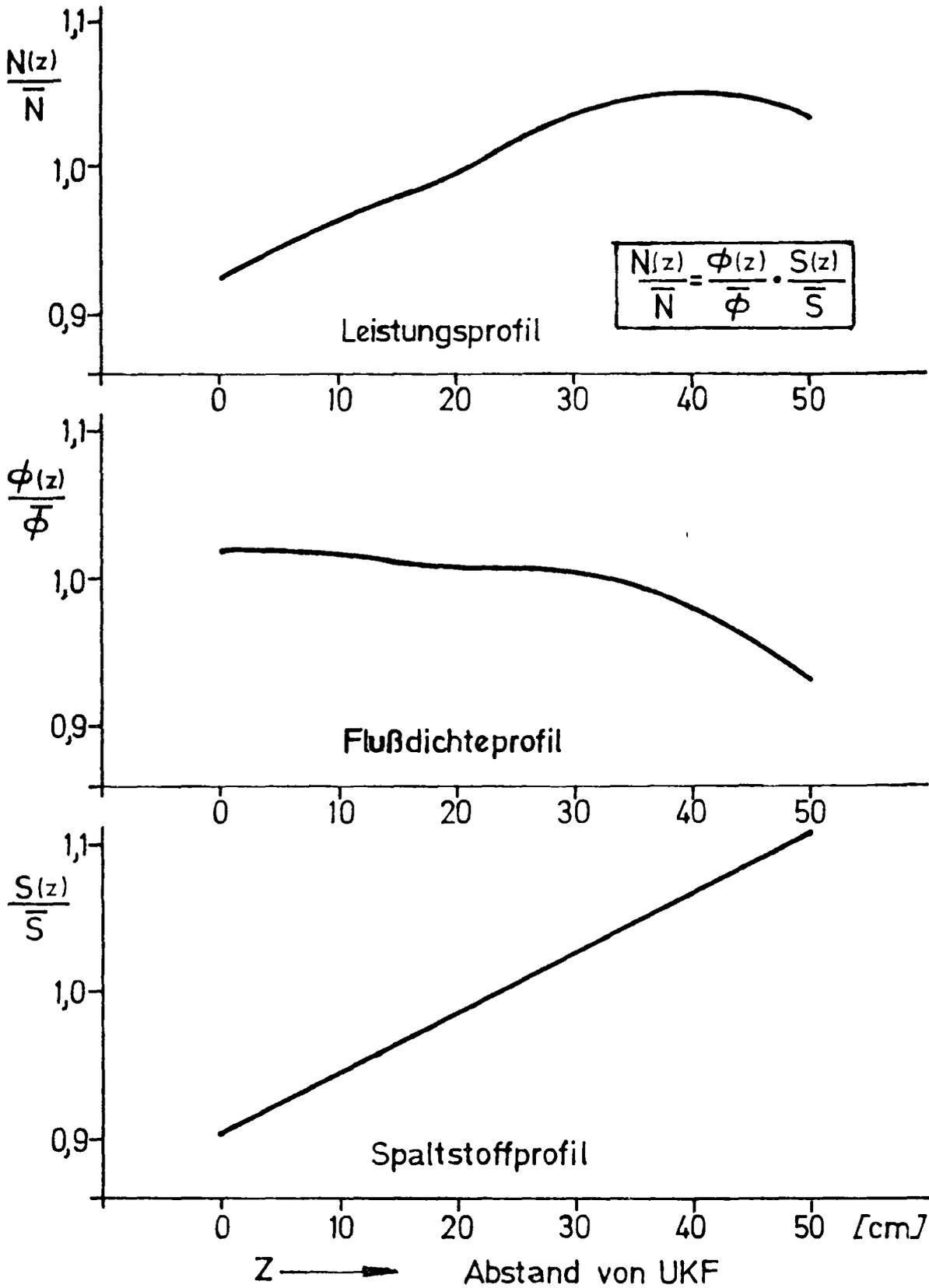


**KfK** IT 79  
PNS4237-248.16

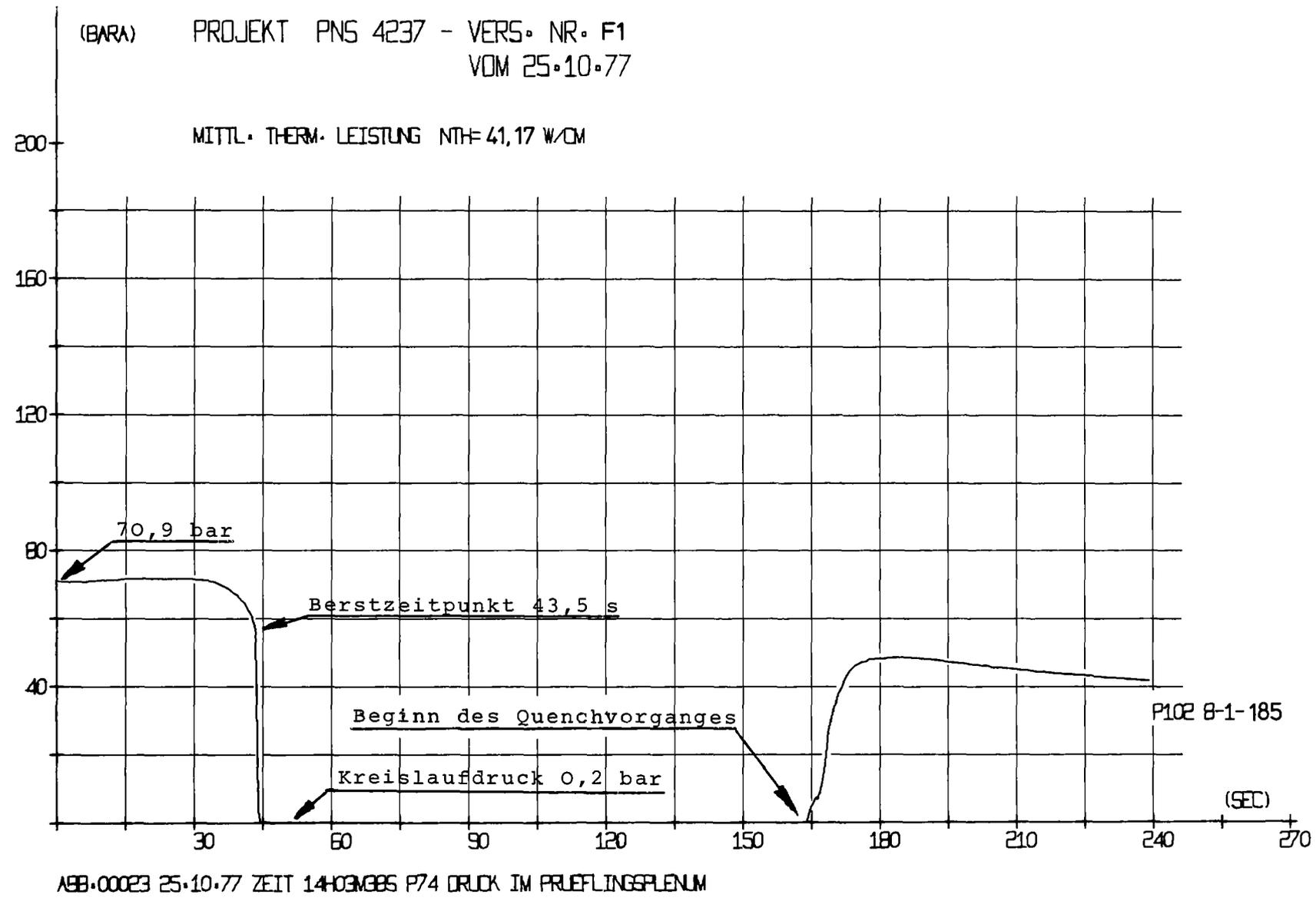
Normierte Axialprofile am Prüfling  
Versuch: F3      Stab Nr.: 39

Abb: 12.3

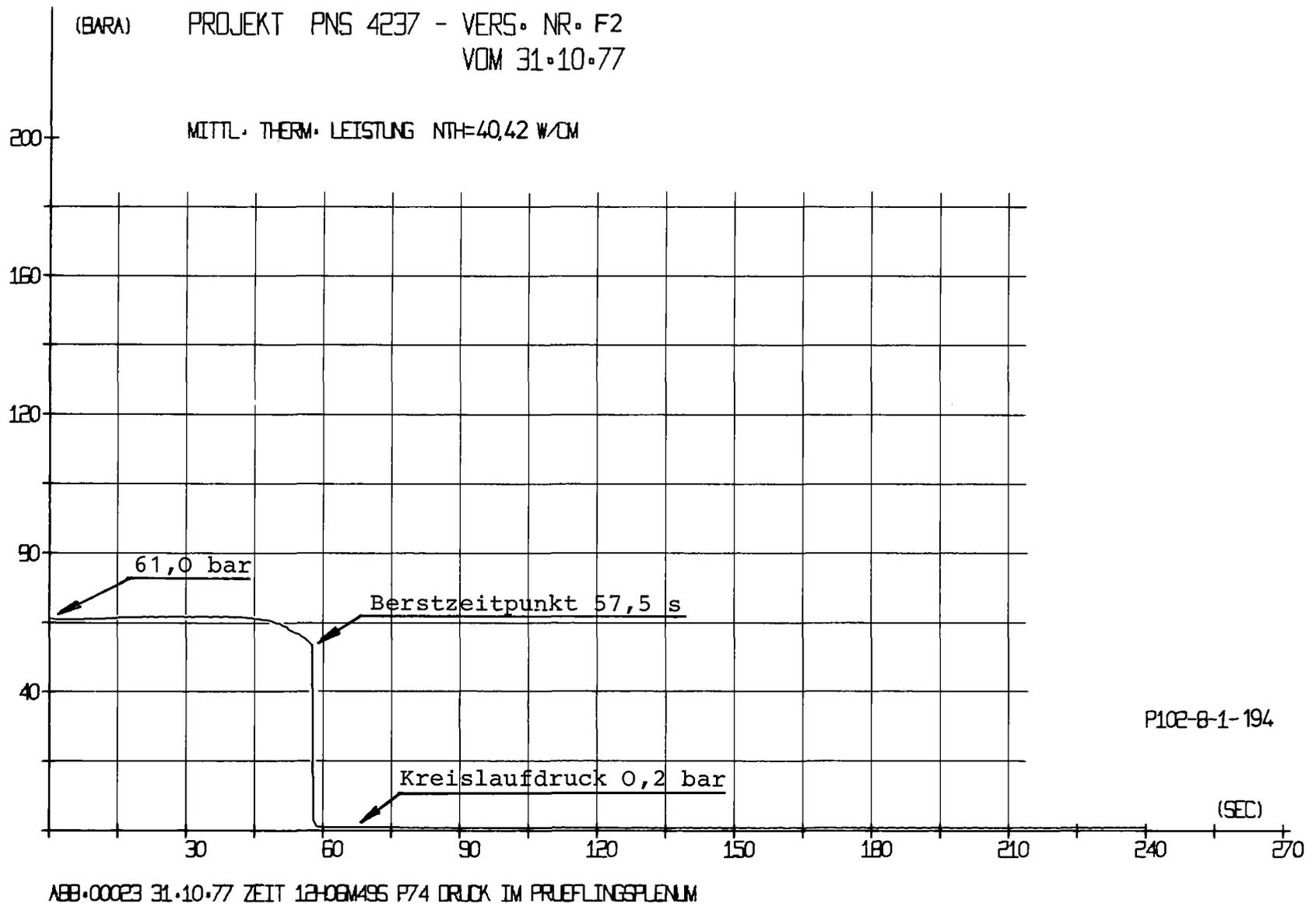




Druck im Prüflingsplenum - (P74) im Versuch F 1  
Abb.: 13.1



Druck im Prüflingsplenum -(P74) im Versuch F2  
Abb.:13.2



Druck im Prüflingsplenum - (P74) im Versuch F 3  
Abb.: 133

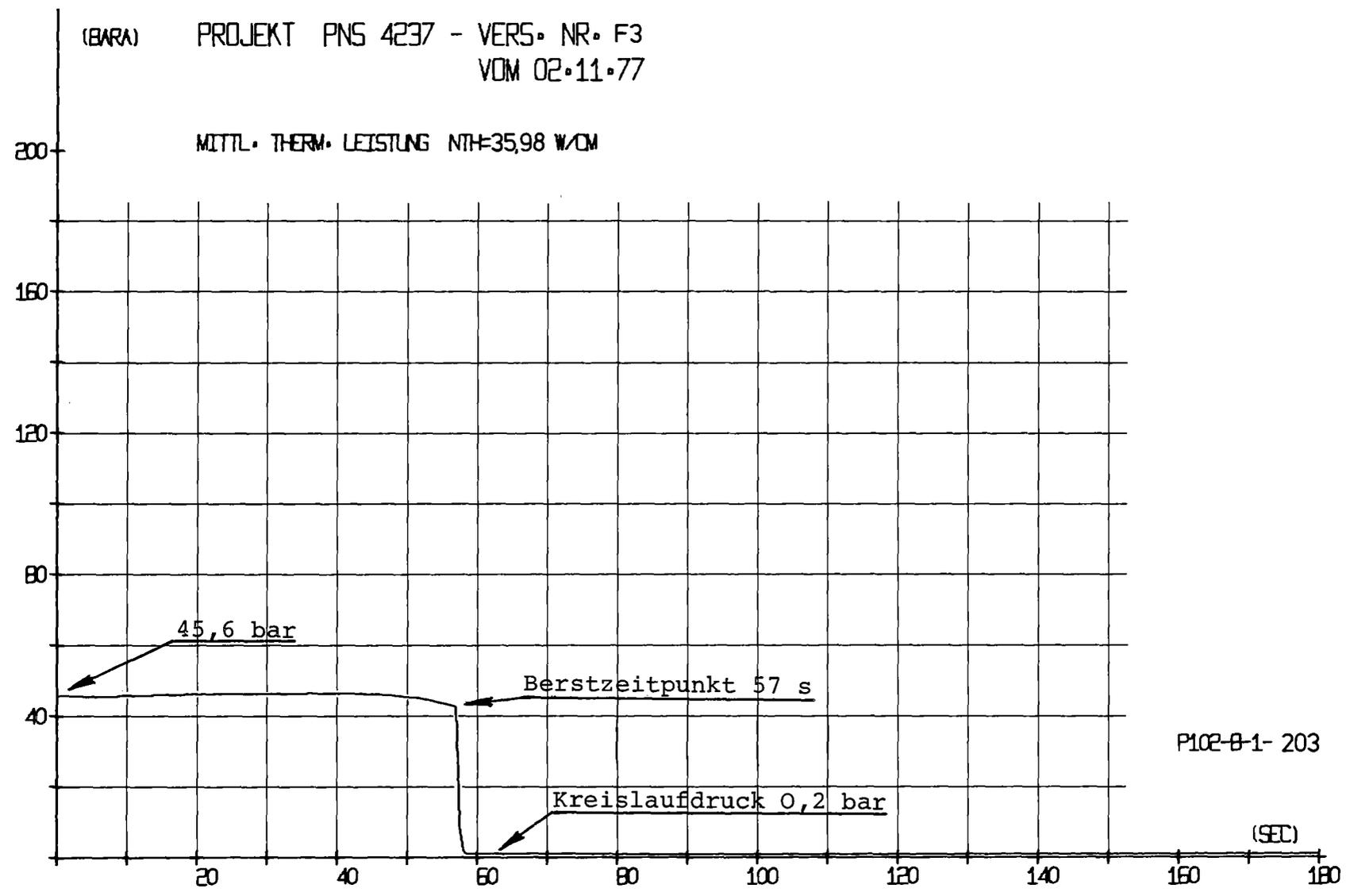


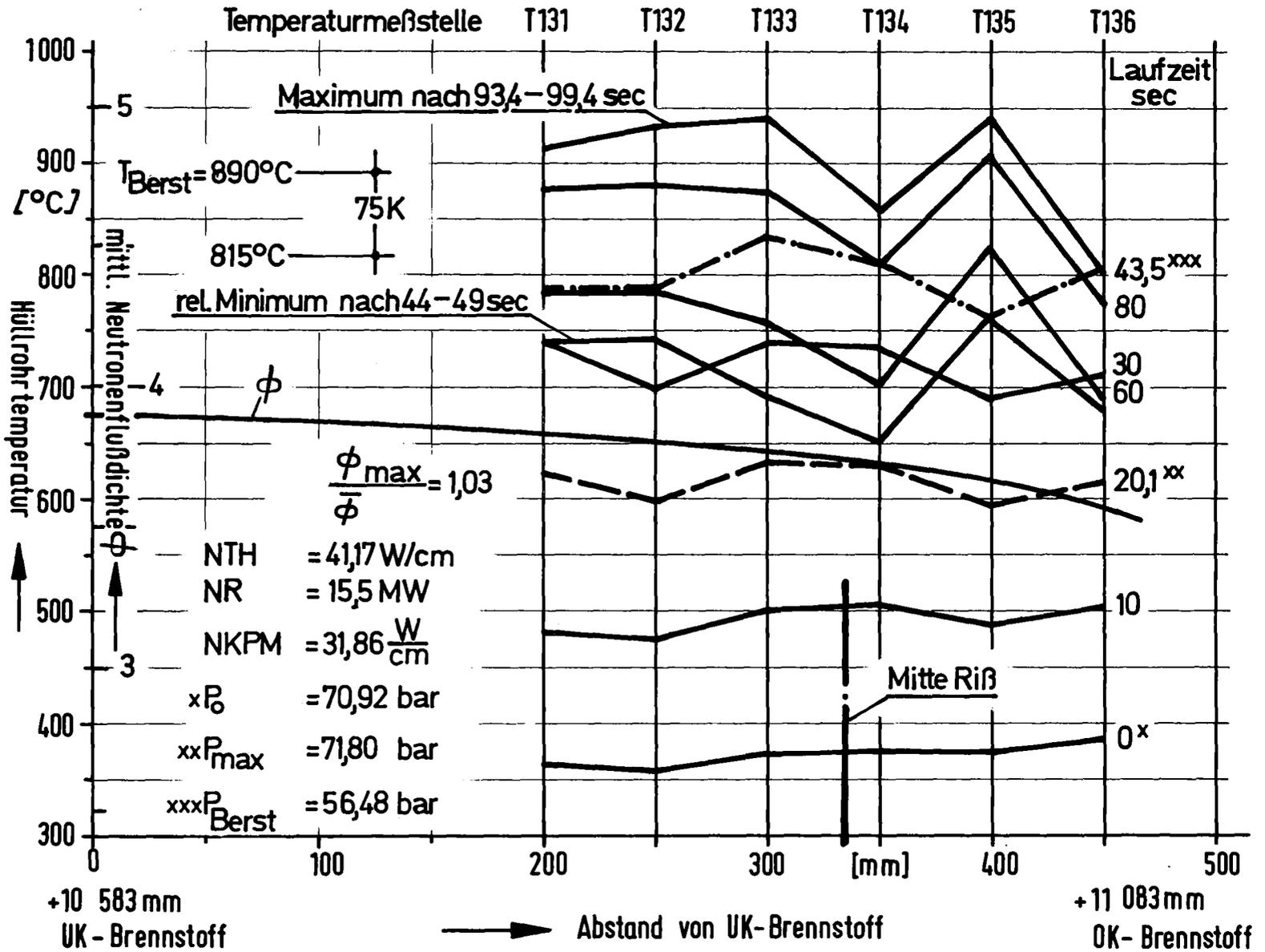
ABB.00023 02.11.77 ZEIT 11:58:55 P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM





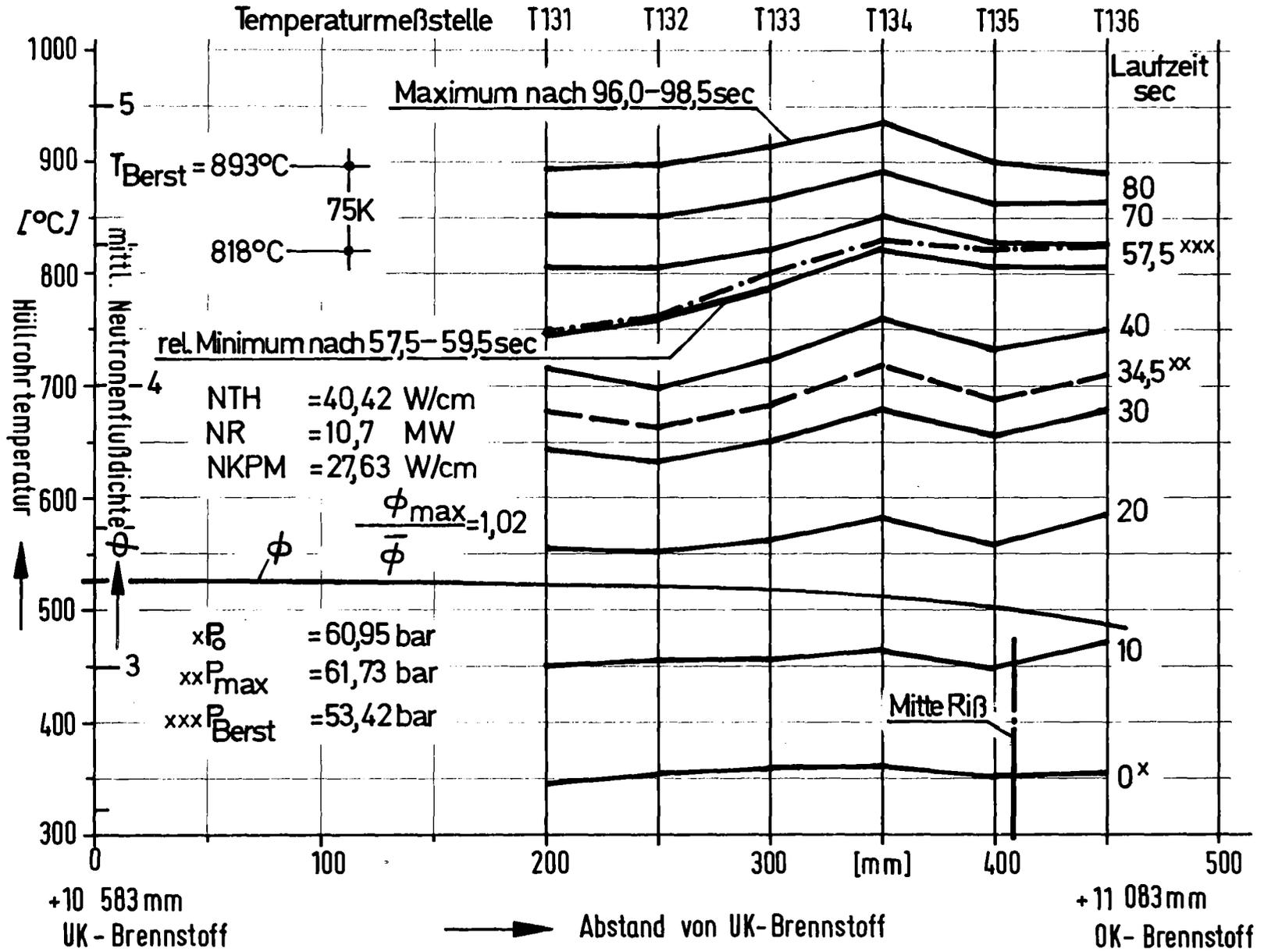
**Axiales Temperaturprofil**  
**Versuch : F1      Stab : 37      Abb. : 14.1**

KTK IT 1978 PNs4237-84.14



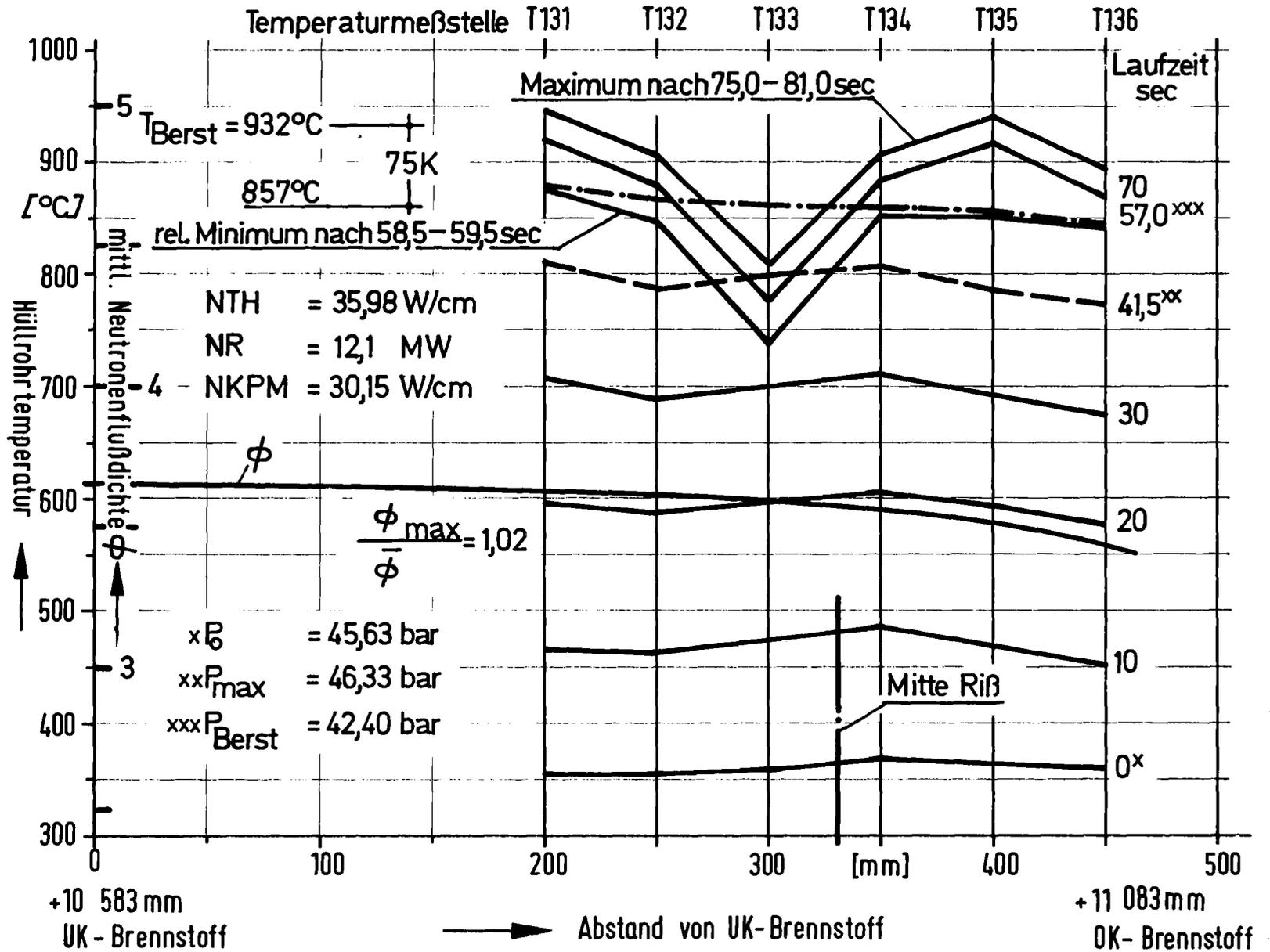
**Axiales Temperaturprofil**  
**Versuch: F 2      Stab: 18      Abb.: 14.2**

KIK IT 1978 PMS4237-84.15



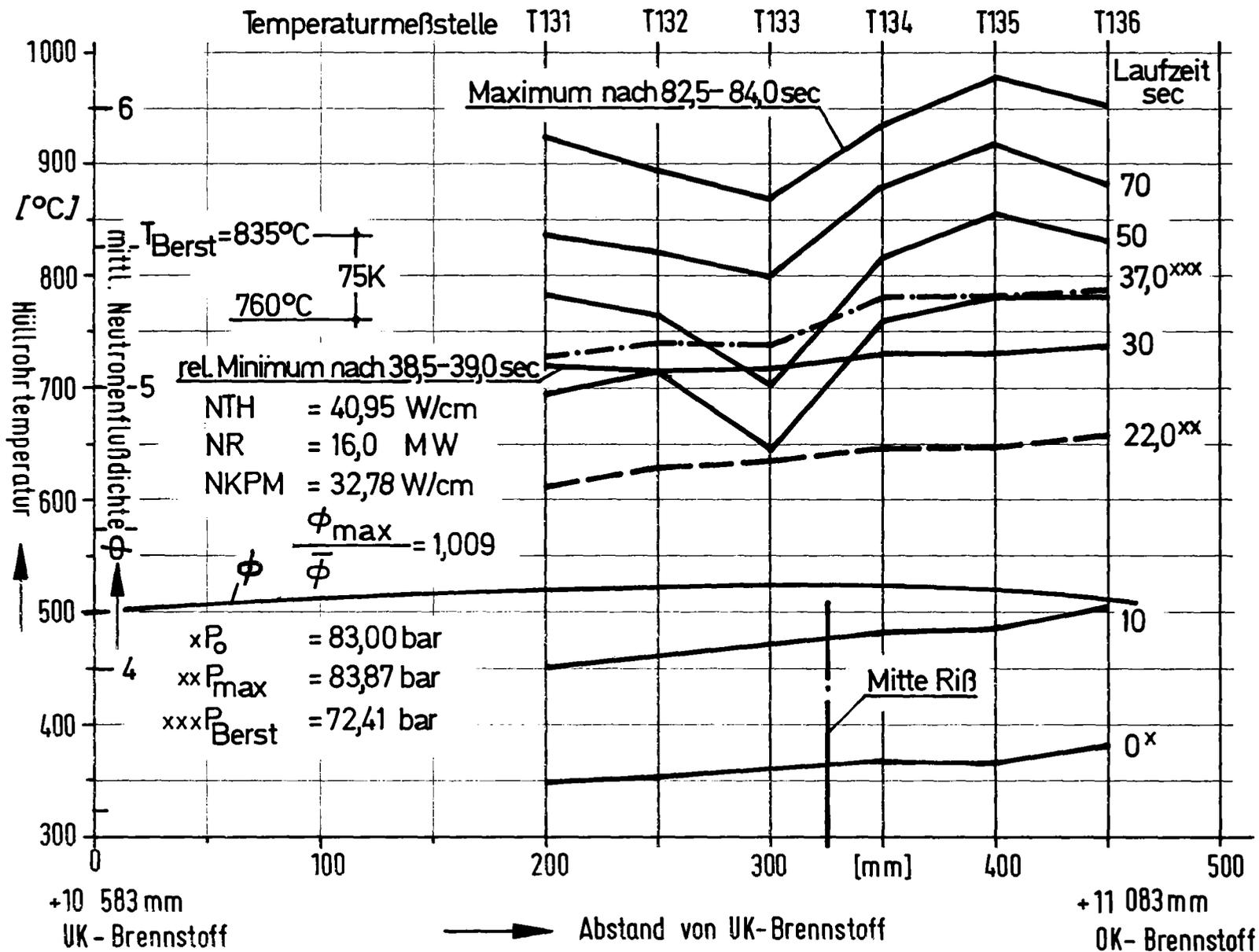
**Axiales Temperaturprofil**  
**Versuch: F 3**      **Stab: 39**      **Abb.: 14.3**

**KIK**  
 IT 1978 PNS 4237-84,16



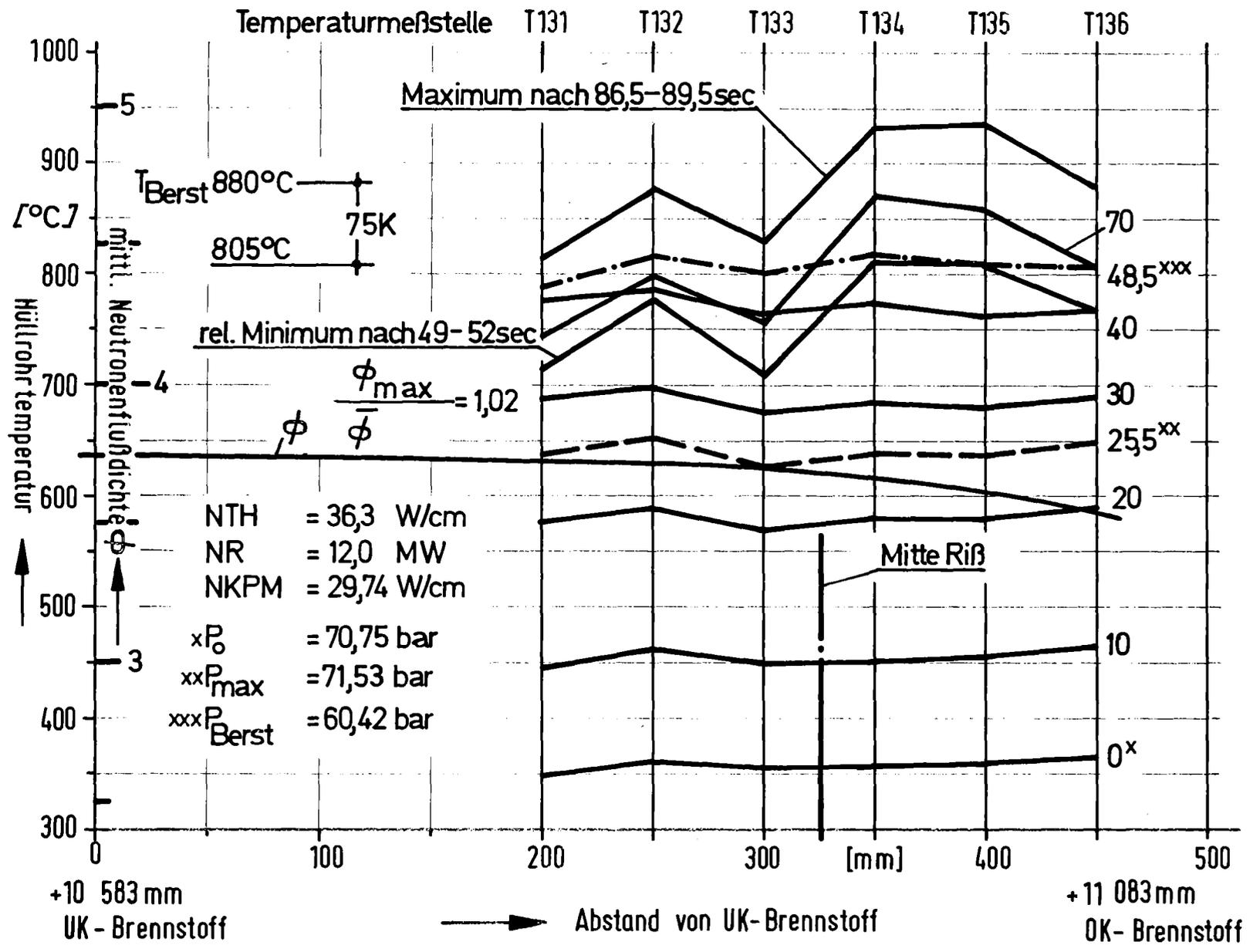
**Axiales Temperaturprofil**  
**Versuch: F 4**      **Stab: 40**      **Abb.: 14.4**

KfK IT 1978 PNS-4237-84.17

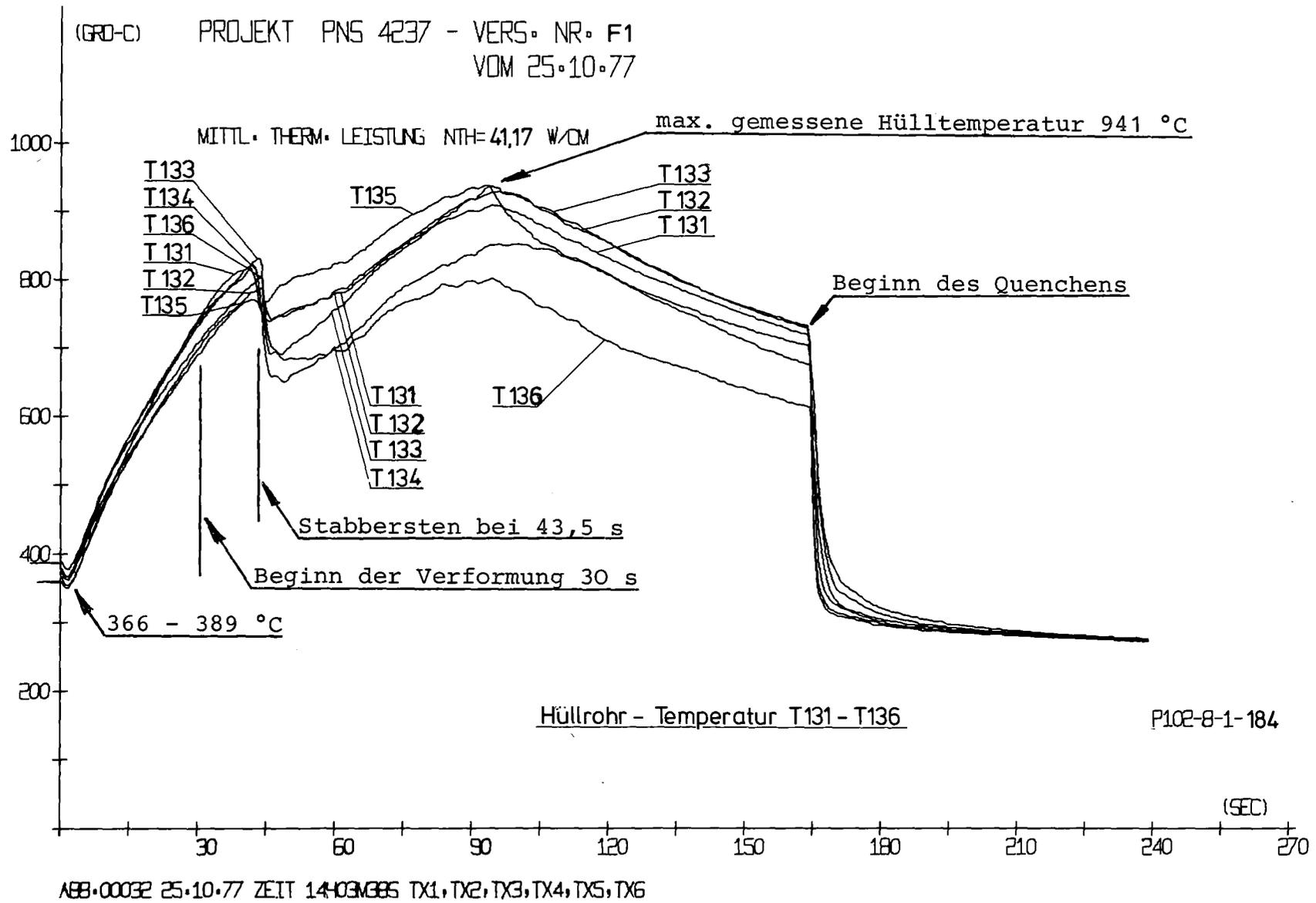


**Axiales Temperaturprofil**  
**Versuch: F5**      **Stab: 43**      **Abb.: 14.5**

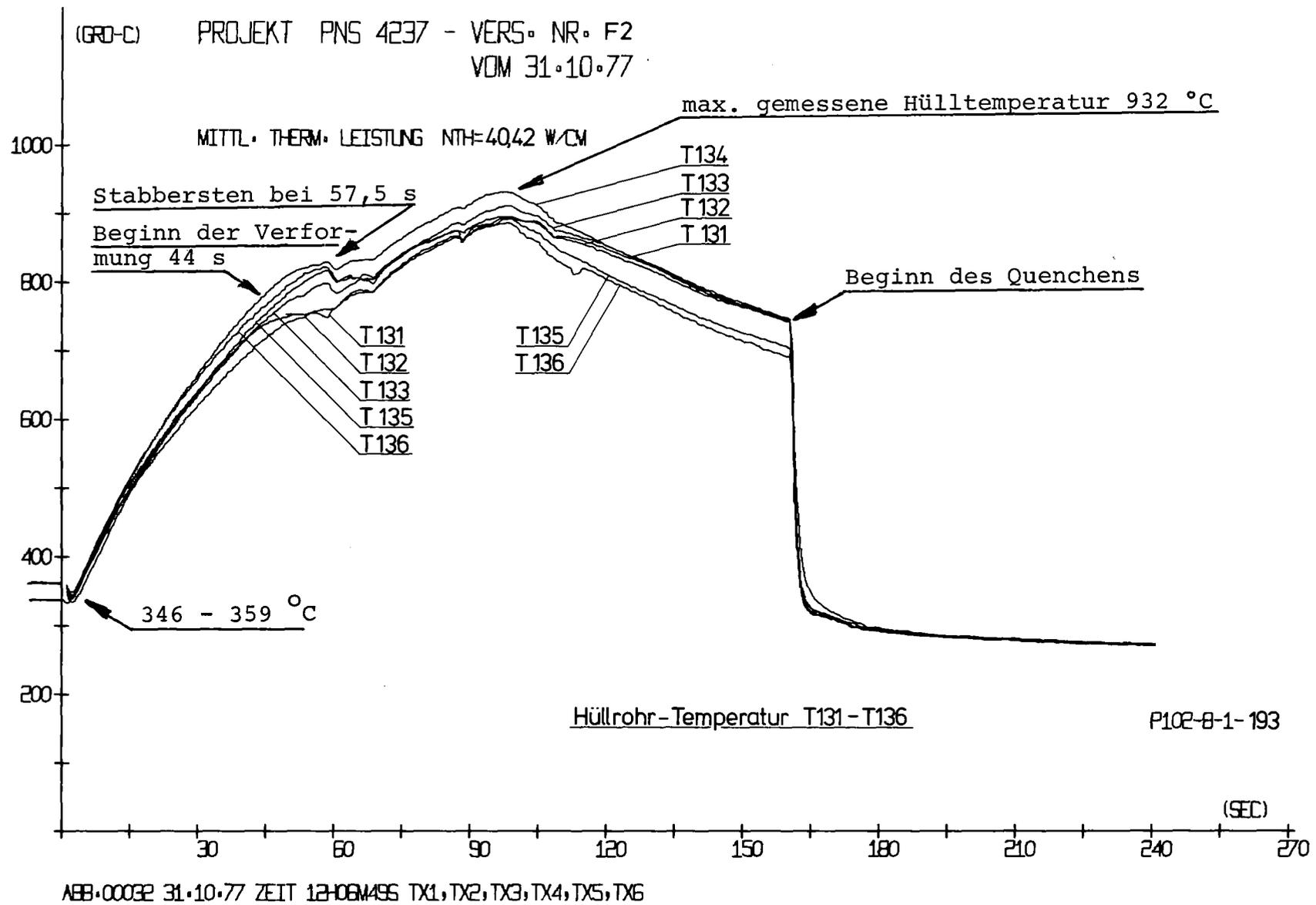
KTK IT 1978 PMS4237-84,18



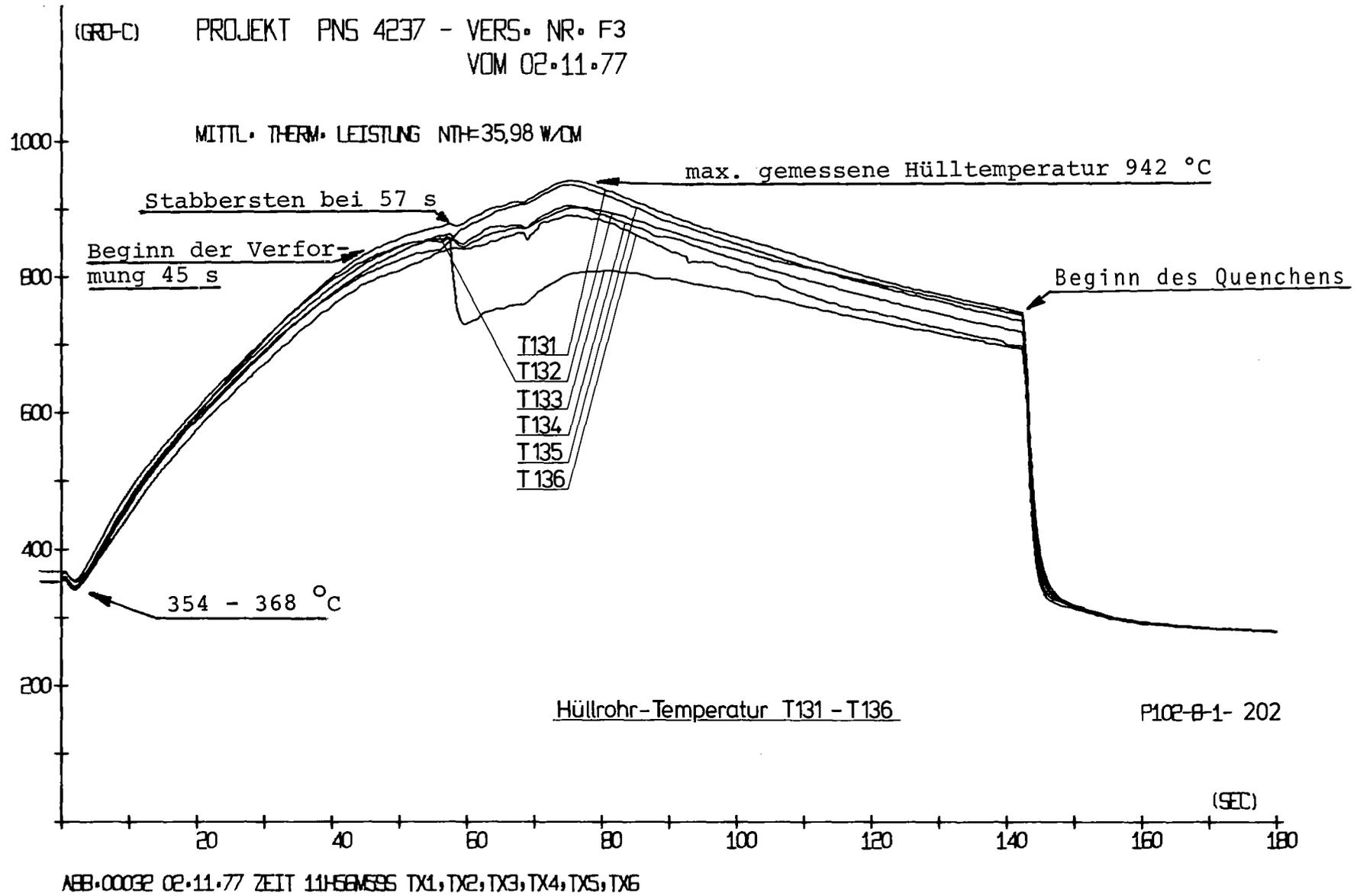
Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136 im Versuch F 1  
Abb.:15.1



Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136 im Versuch F2  
Abb.:15.2



Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136 im Versuch F3  
Abb.: 15.3



(GRD-C) PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. F4  
VOM 22.11.77

MITTL. THERM. LEISTUNG  $NTH=40,95 \text{ W/CM}$

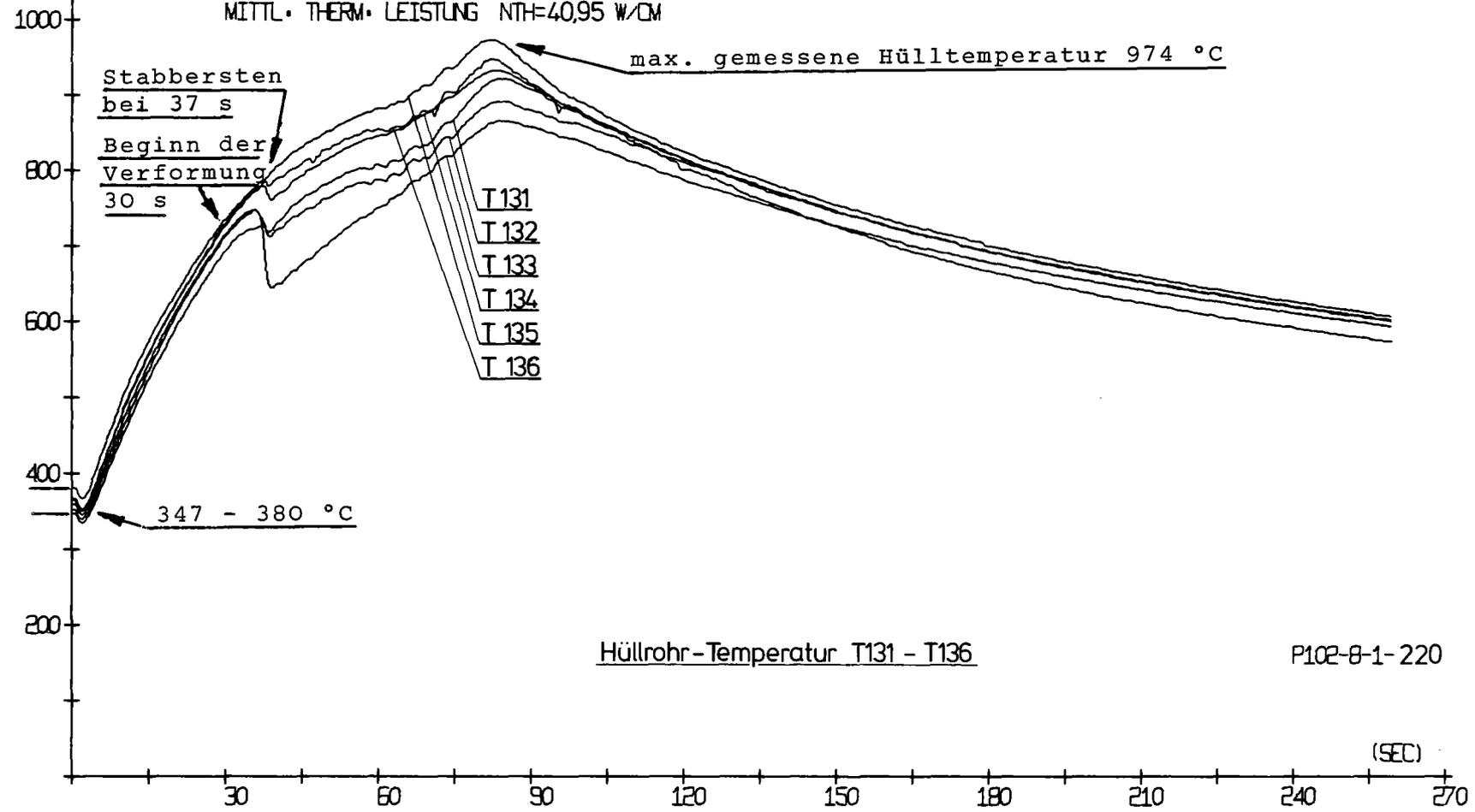


ABB.00032 22.11.77 ZEIT 12-12M47S TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6

Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136 im Versuch F4  
Abb.: 15.4

Hüllrohrtemperaturen T131 bis T136 im Versuch F5  
Abb.: 15.5

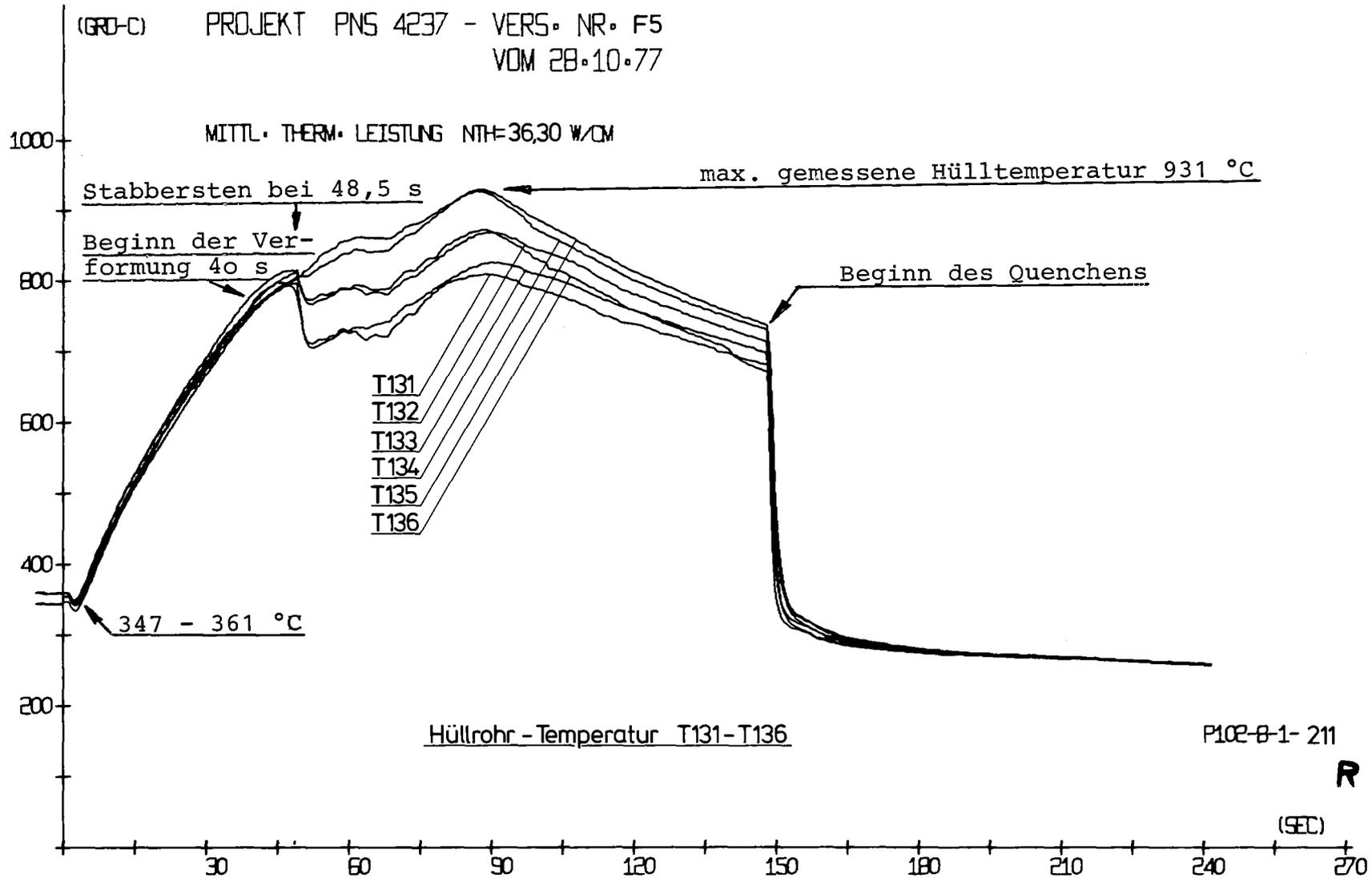
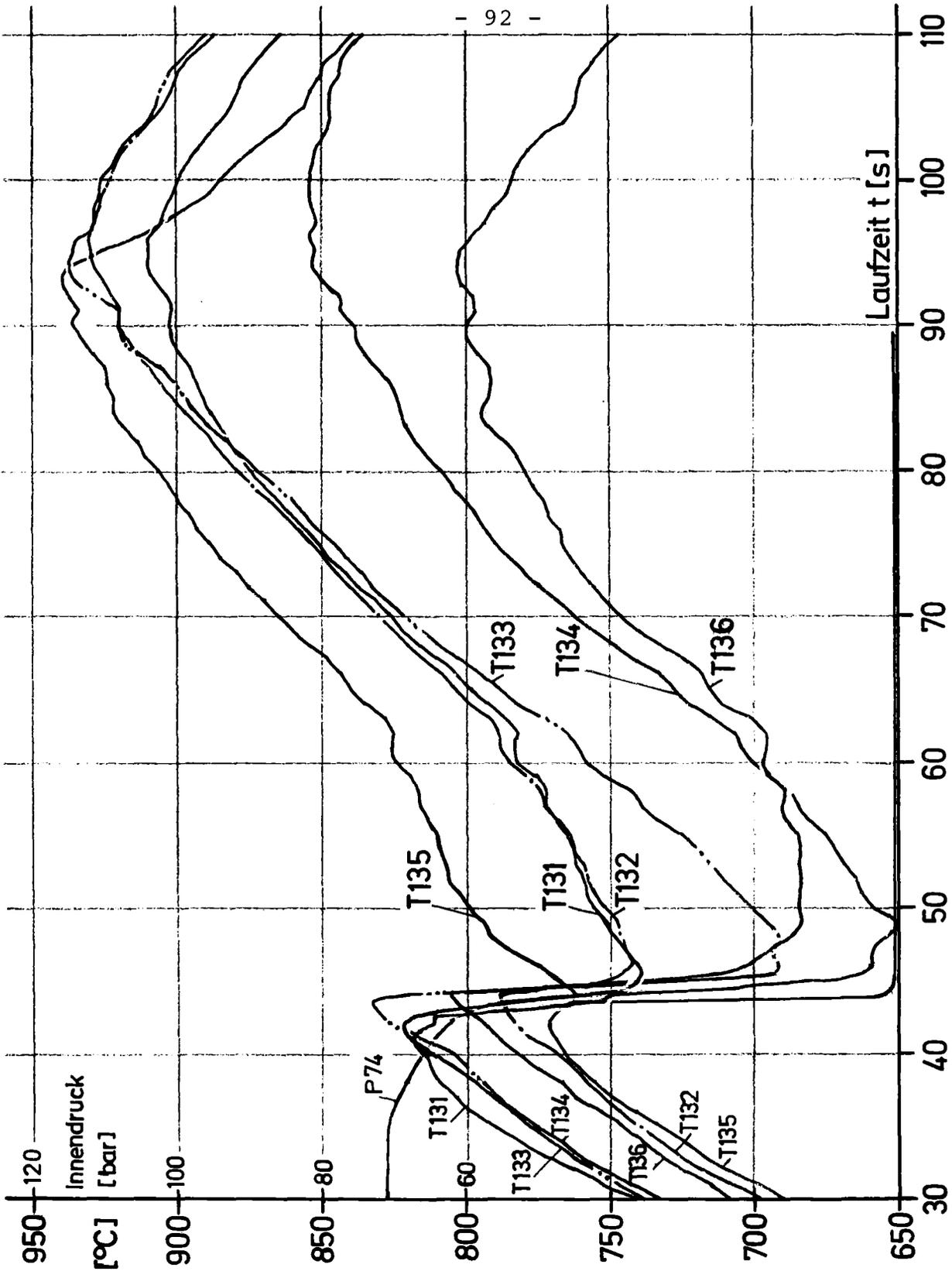
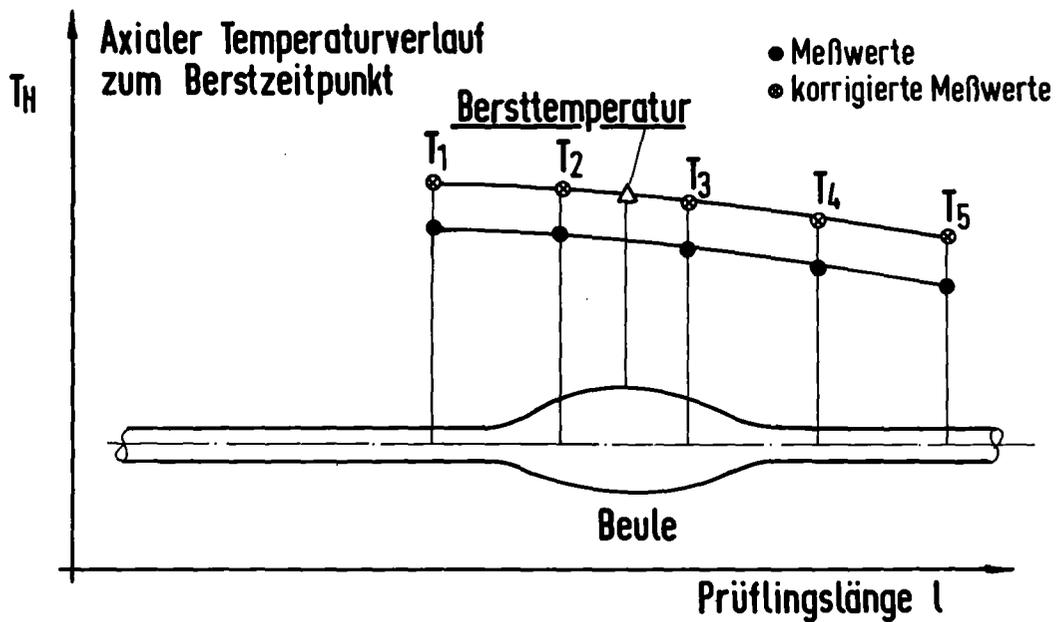
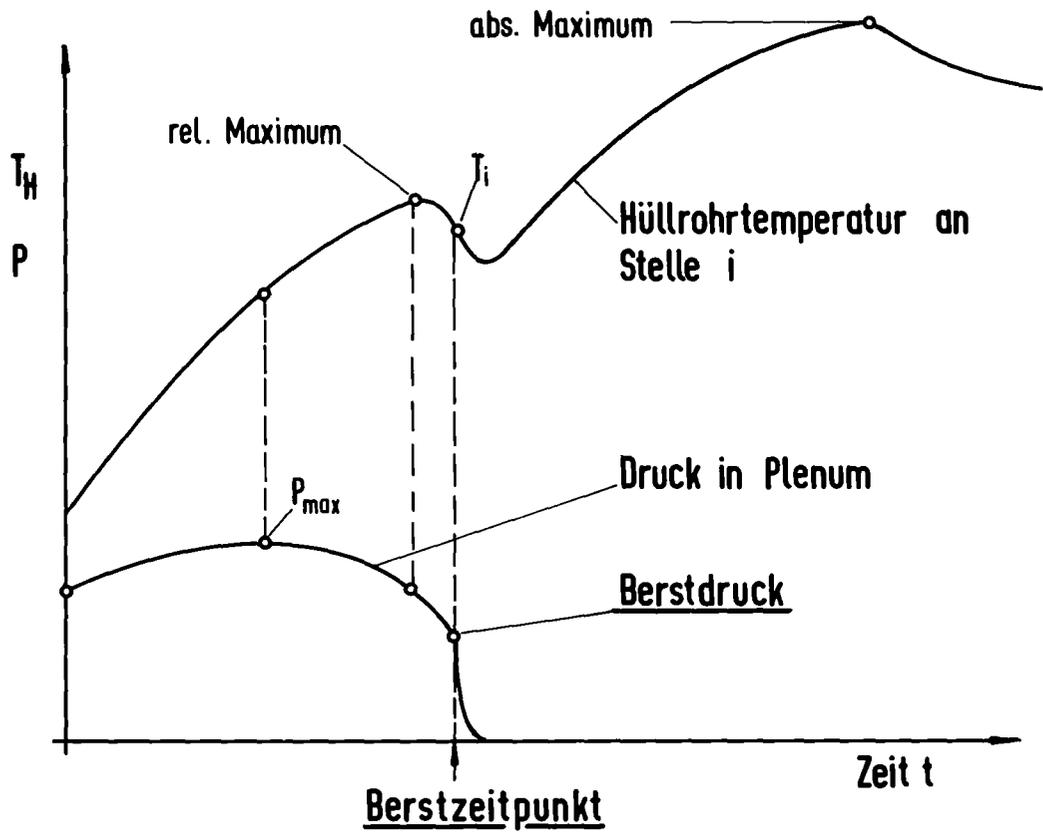


ABB.00032 28.10.77 ZEIT 12:00MLBS TX1, TX2, TX3, TX4, TX5, TX6



IT 78  
PNS 4237-150

In-pile Versuch F1  
Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt) Abb:16

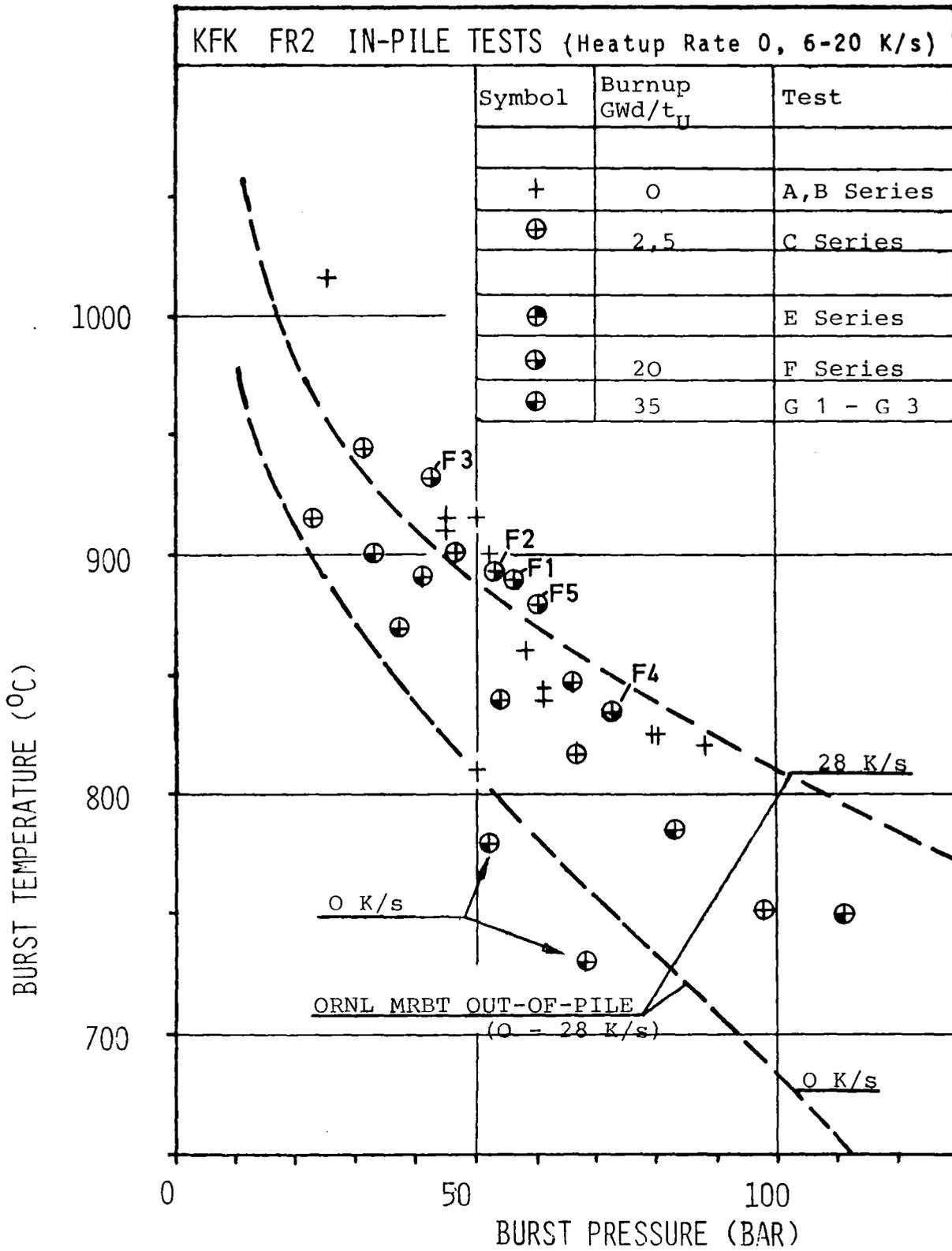


**GRK**  
RBT/IT-1977  
PNS-4237-91,1

Schema zur Definition von Bersttemperatur  
und Berstdruck

Abb.: 17



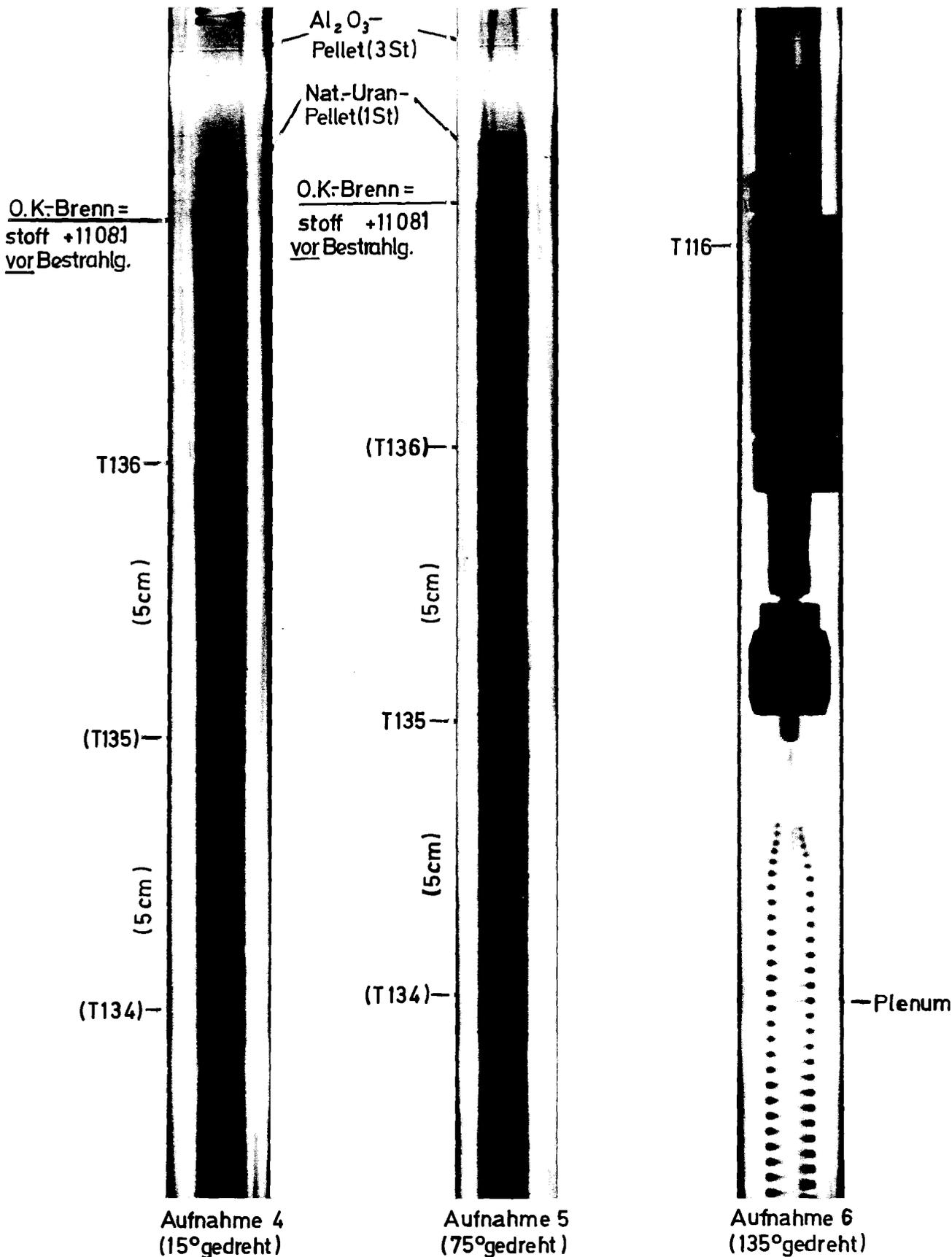


IT 1979

PNS 4237-223.14

FR2 IN-PILE SINGLE ROD TEST IN STEAM  
BURST TEMPERATURE VS. BURST PRESSURE

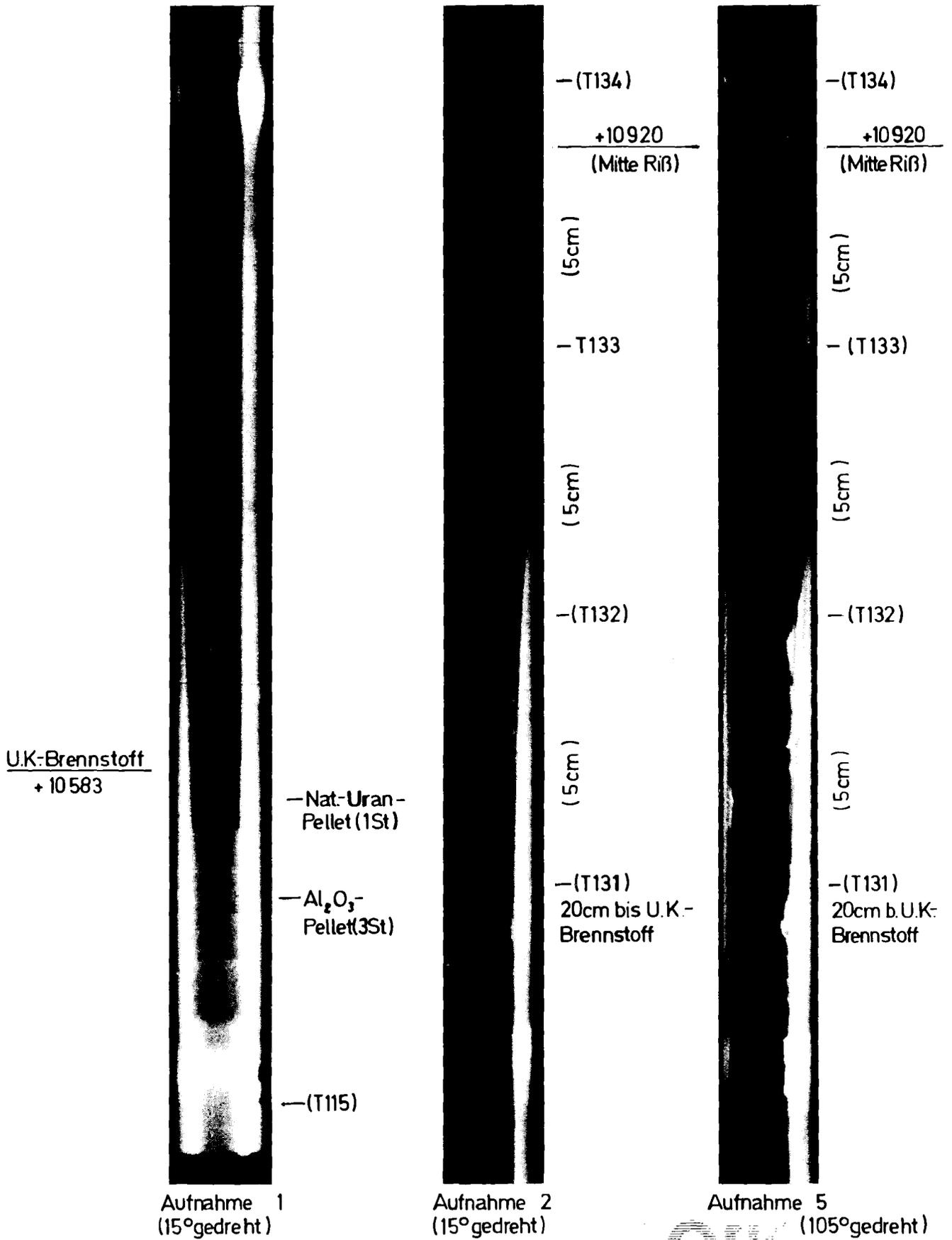
Abb:19



IT78  
PNS4237-239

Neutronenradiografie F1  
vor Versuch

Abb.:20



Neutronenradiografie F1  
nach Versuch

IT 78  
PNS 4237-137

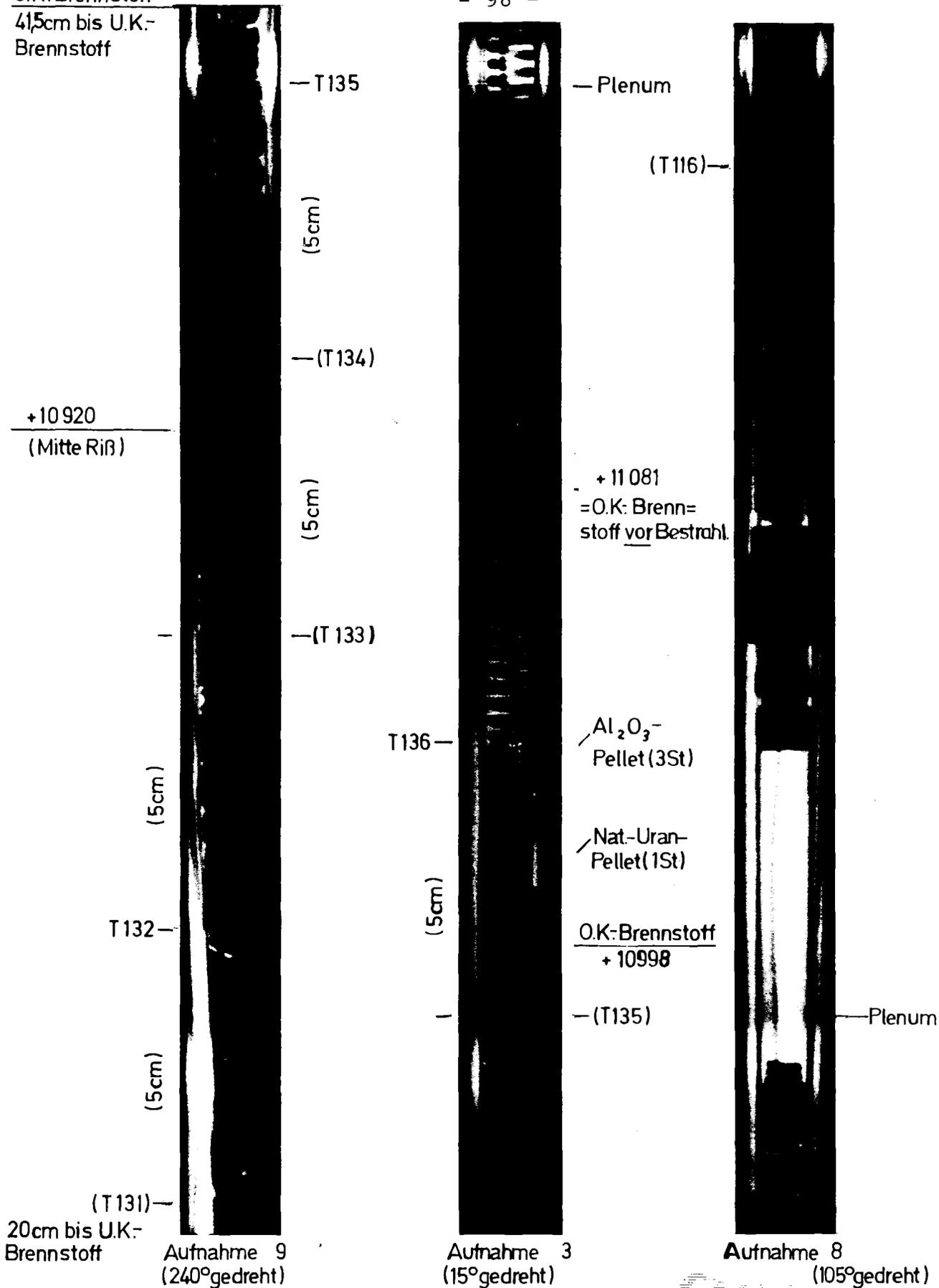
Bl.1

Abb.:21

O.K.-Brennstoff

4,5cm bis U.K.-  
Brennstoff

- 98 -



Aufnahme 9  
(240°gedreht)

Aufnahme 3  
(15°gedreht)

Aufnahme 8  
(105°gedreht)

IT 78  
PNS 4237-138

Neutronenradiografie F1  
nach Versuch

Bl.2  
Abb.:21

U.K.-Brennstoff  
+10 583

-Nat.-Uran-  
Pellet(1St)

-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-  
Pellet(3St)

(T115)-

Prüflingsspitze  
+ 10 482

Aufnahme 1  
(142°gedreht)

+10 993  
(Mitte Riß)  
(5cm)  
(T135)-

-(T131)  
20cm bis U.K.-  
Brennstoff  
(5cm)

(T134)-

(5cm)

-(T133)

(5cm)

-T132

Aufnahme 2  
(142°gedreht)

Aufnahme 3  
(142°gedreht)



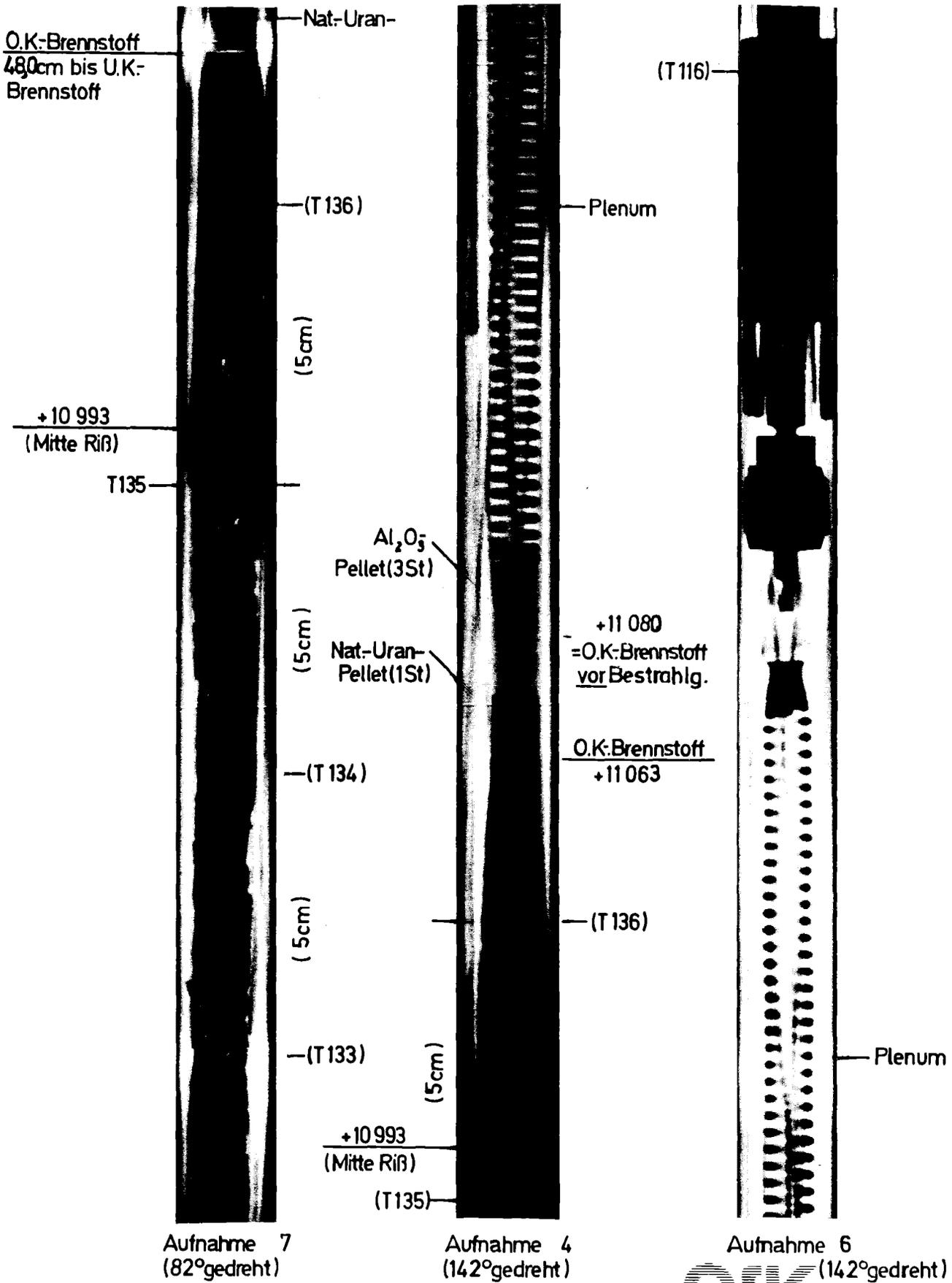
IT 78

PNS 4237-139

Neutronenradiografie F2  
nach Versuch

Bl.1

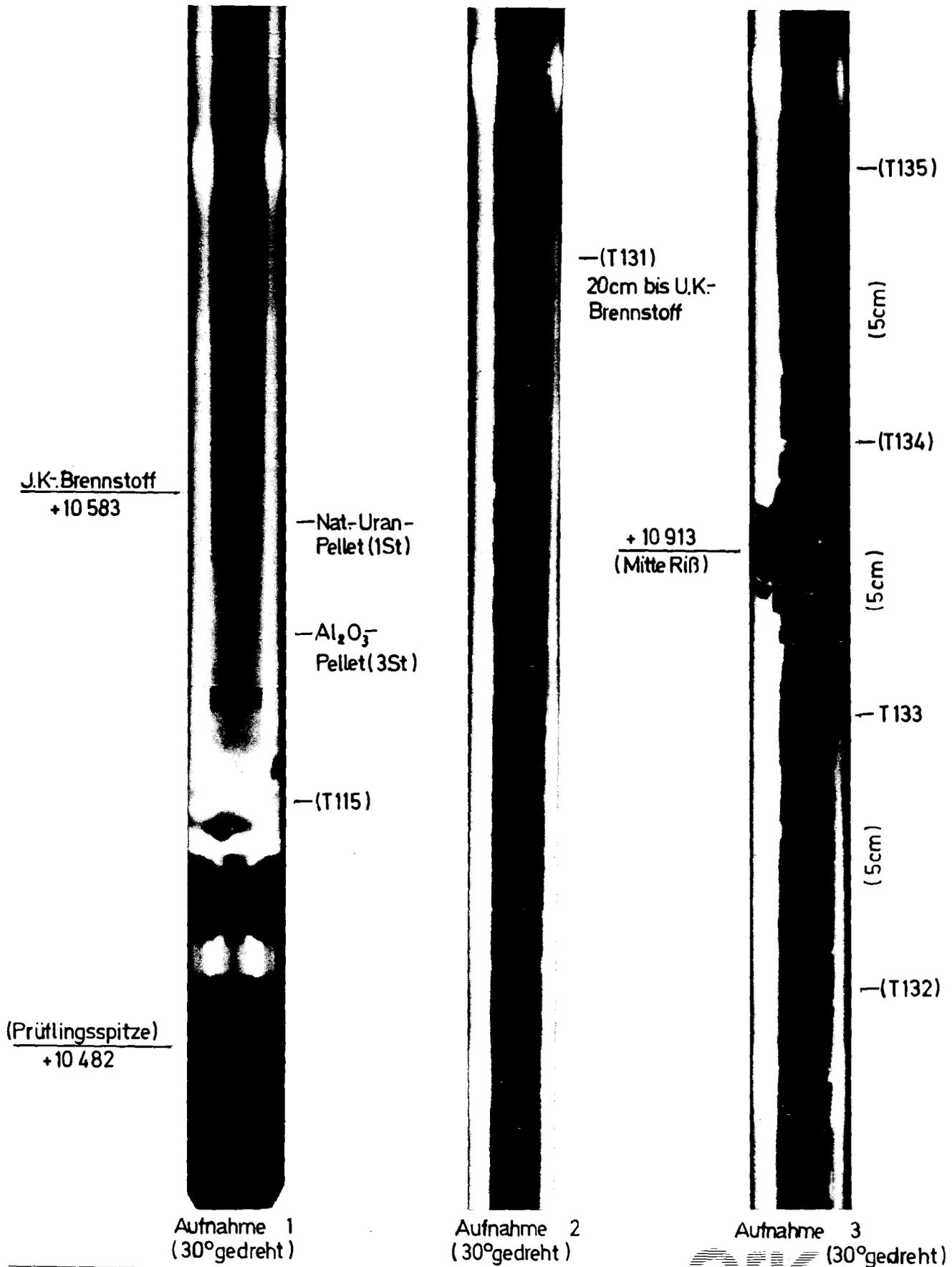
Abb:22



IT 78  
PNS4237-140

Neutronenradiografie F2  
nach Versuch

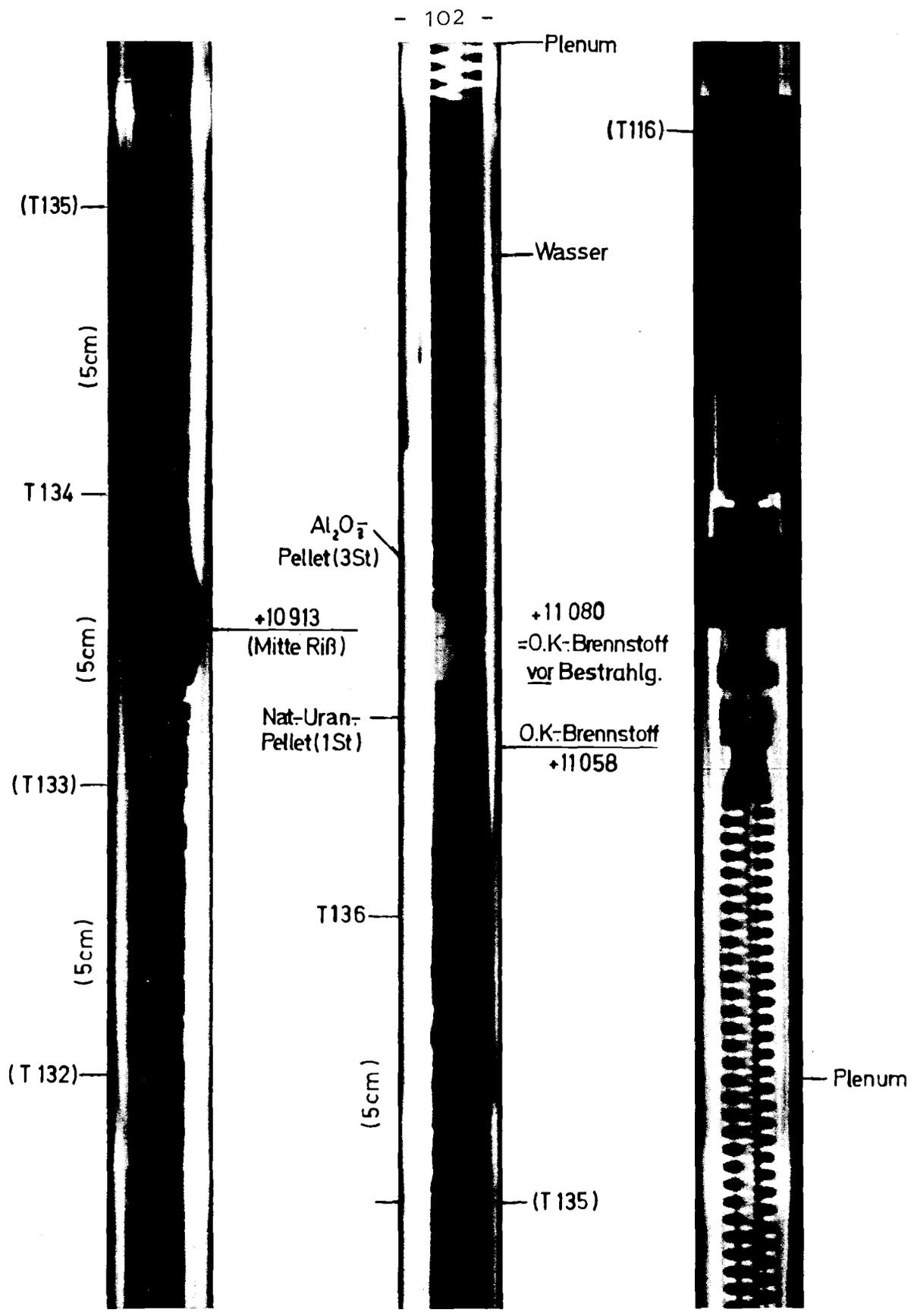
Bl.2  
Abb:22



IT 78  
PNS4237-141

Neutronenradiografie F3  
nach Versuch

Bl.1  
Abb:23



Aufnahme 7  
(150°gedreht)

Aufnahme 4  
(30°gedreht)

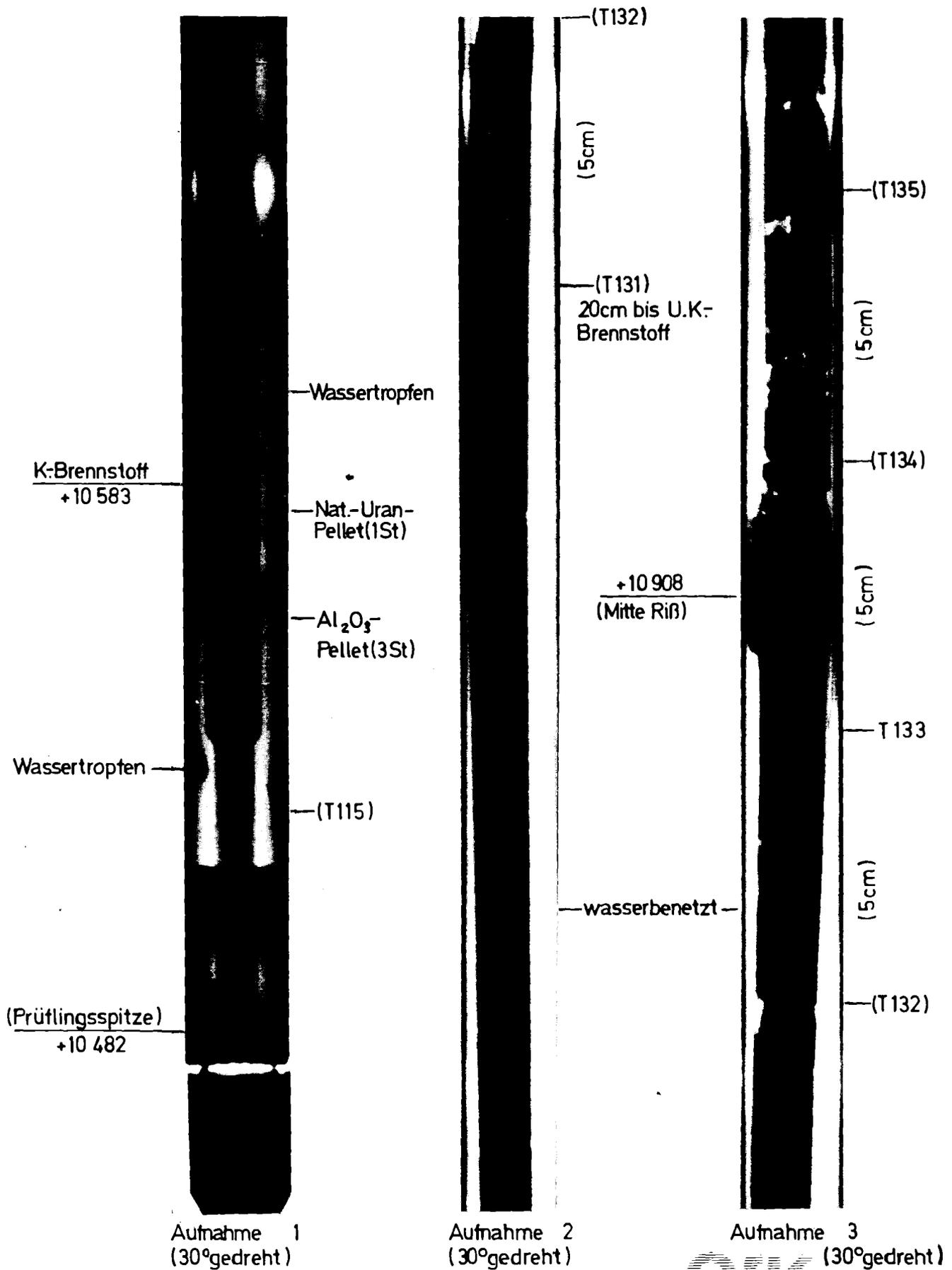
Aufnahme 6  
(30°gedreht)



IT 78  
PNS 4237-142

Neutronenradiografie F3  
nach Versuch

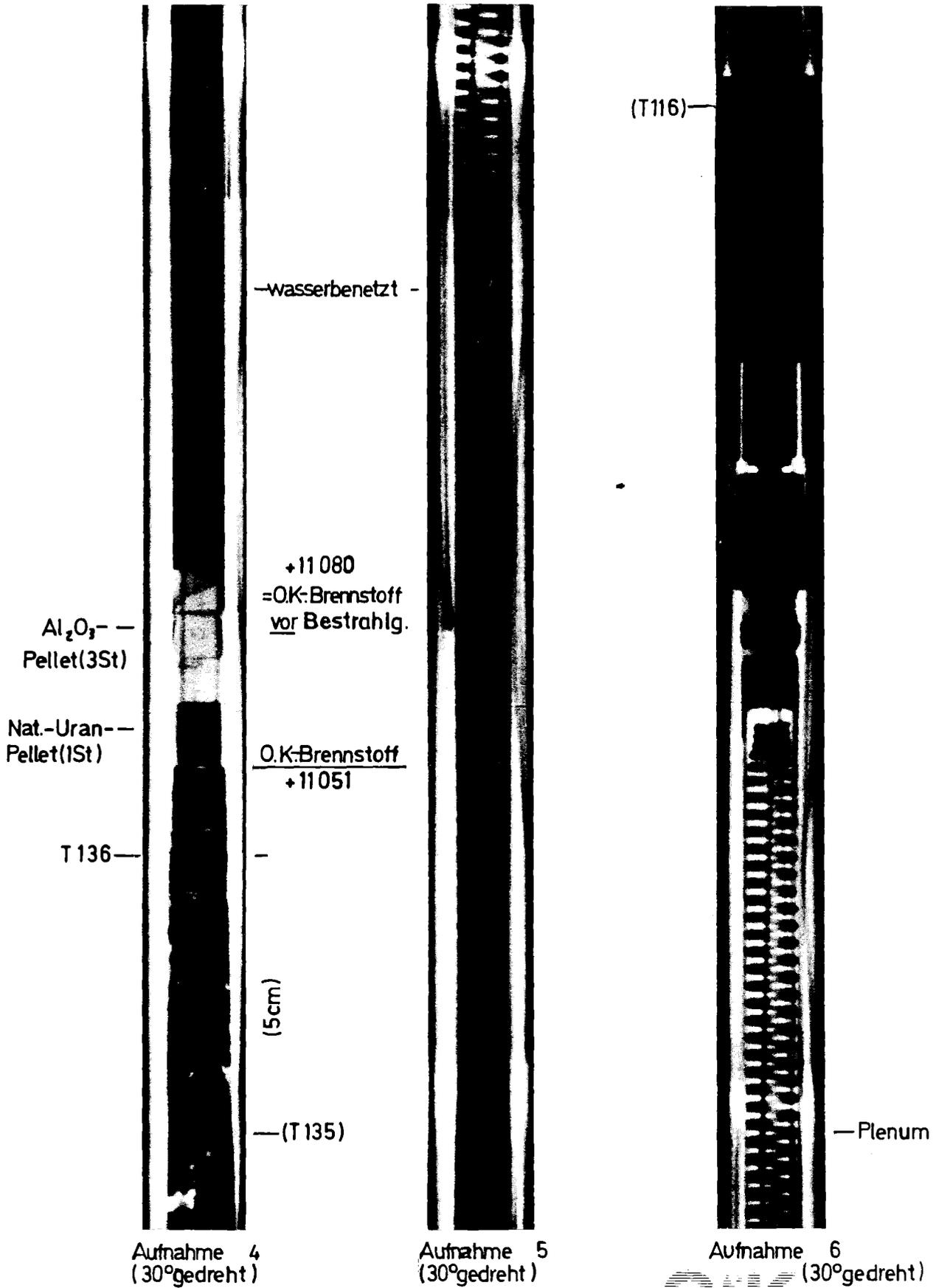
Bl.2  
Abb:23



Neutronenradiografie F4  
nach Versuch

IT 78  
PNS4237-143

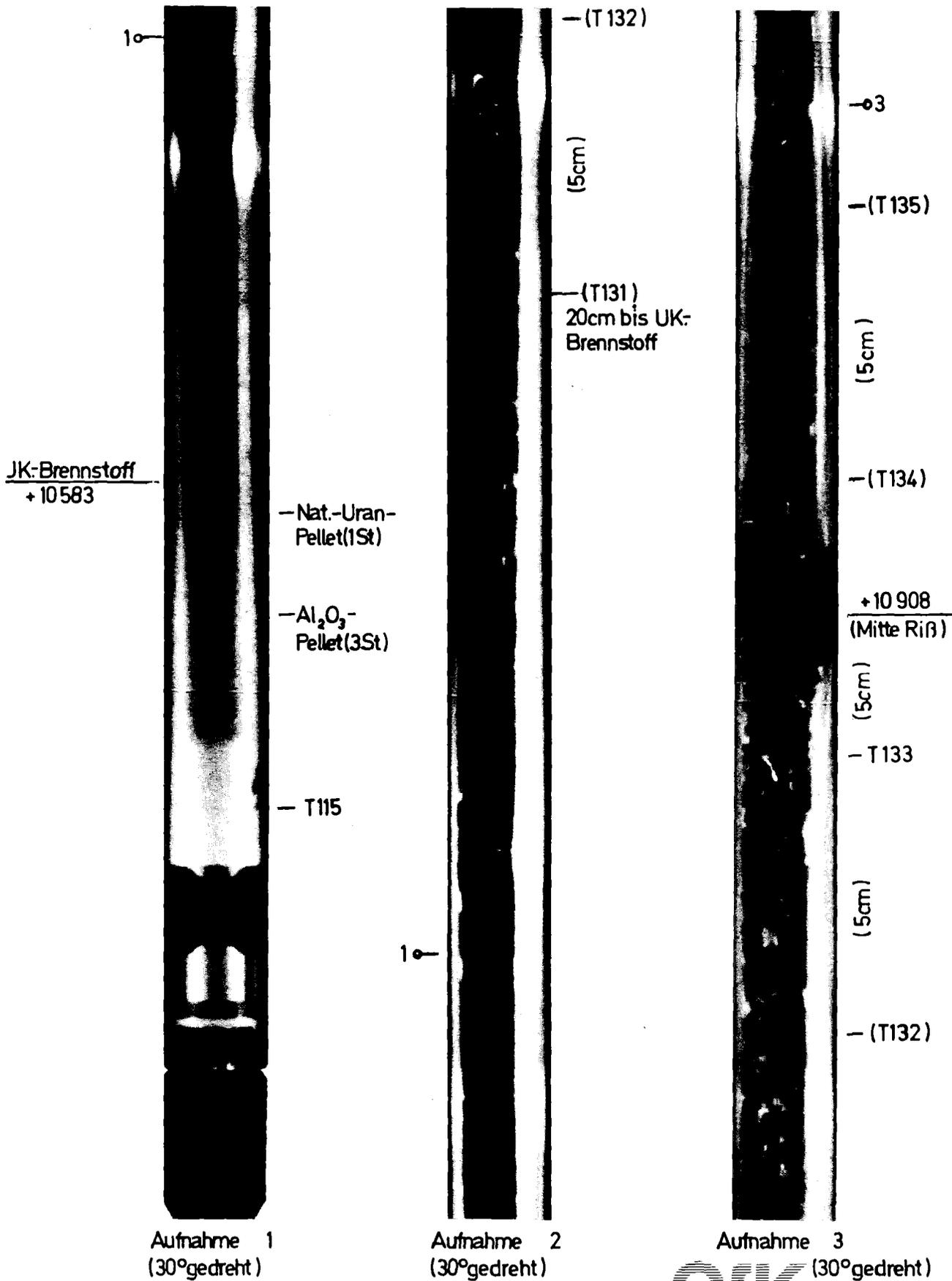
Bl.1  
Abb:24



IT 78  
PNS 4237-144

Neutronenradiografie F4  
nach Versuch

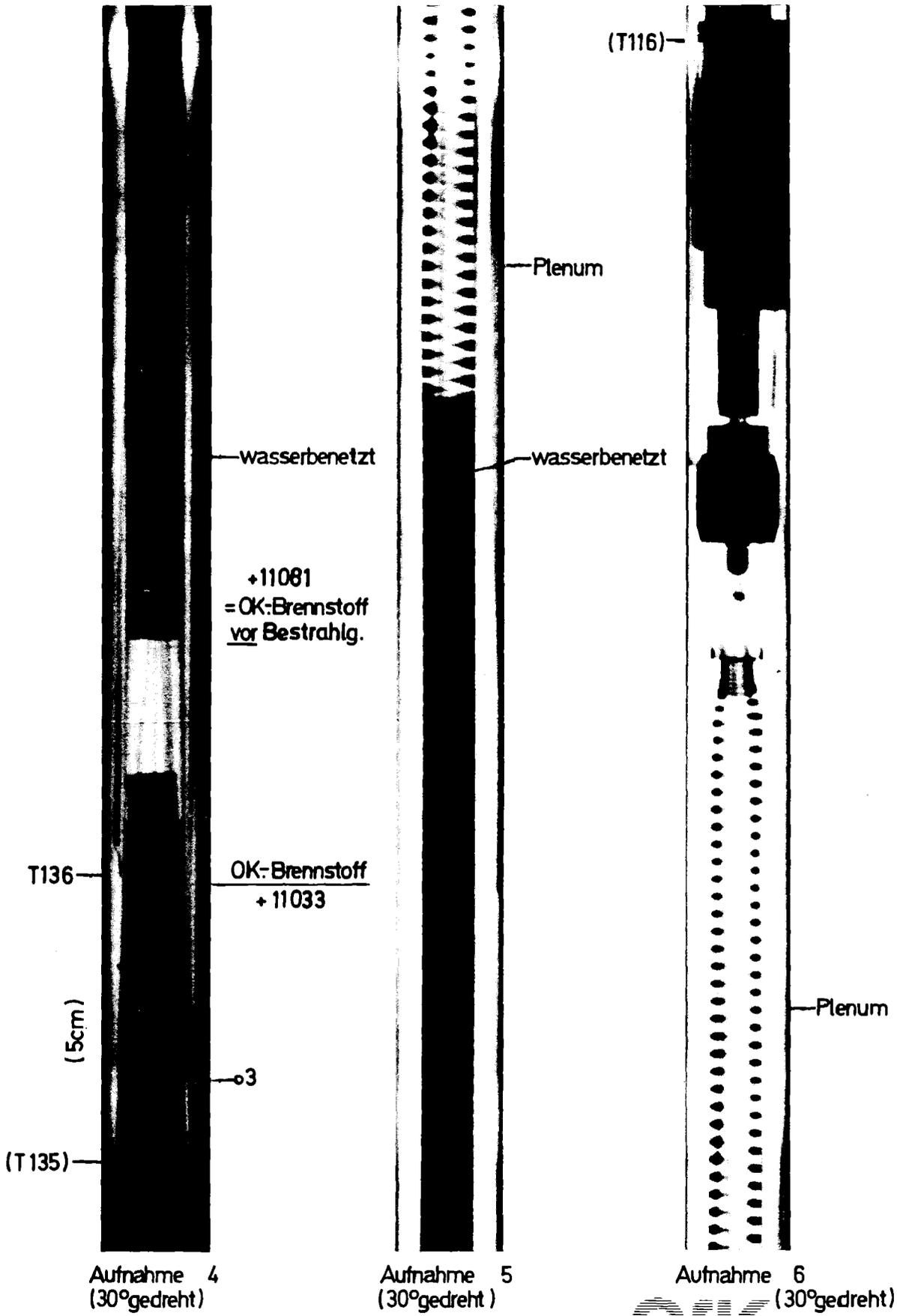
Bl. 2  
Abb. 24



Neutronenradiografie F5  
nach Versuch

**QIK** IT 78  
PNS4237-145

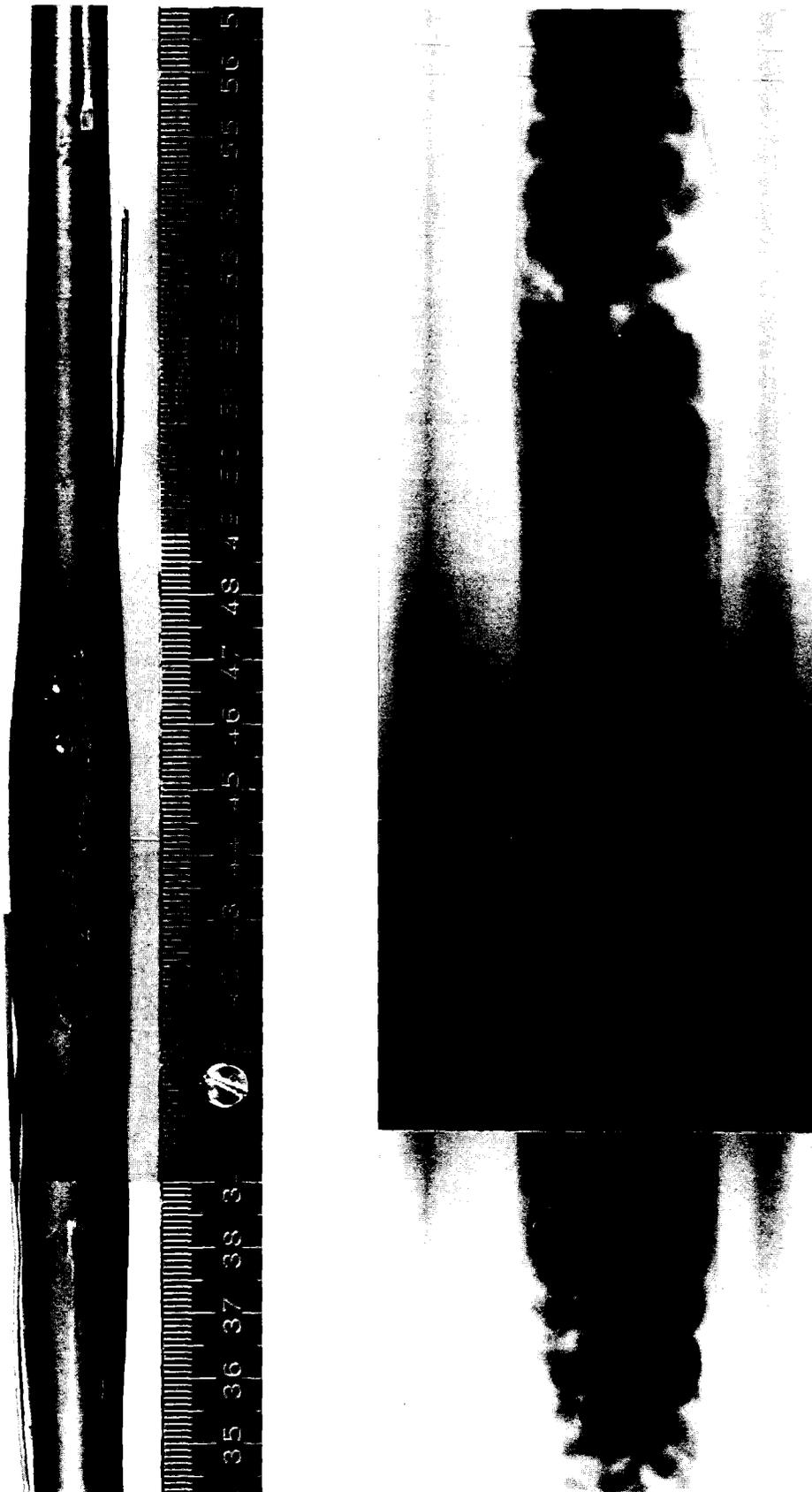
Bl.1  
Abb.25



IT 78  
PNS 4237-146

Neutronenradiografie F5  
nach Versuch

Bl.2  
Abb.:25

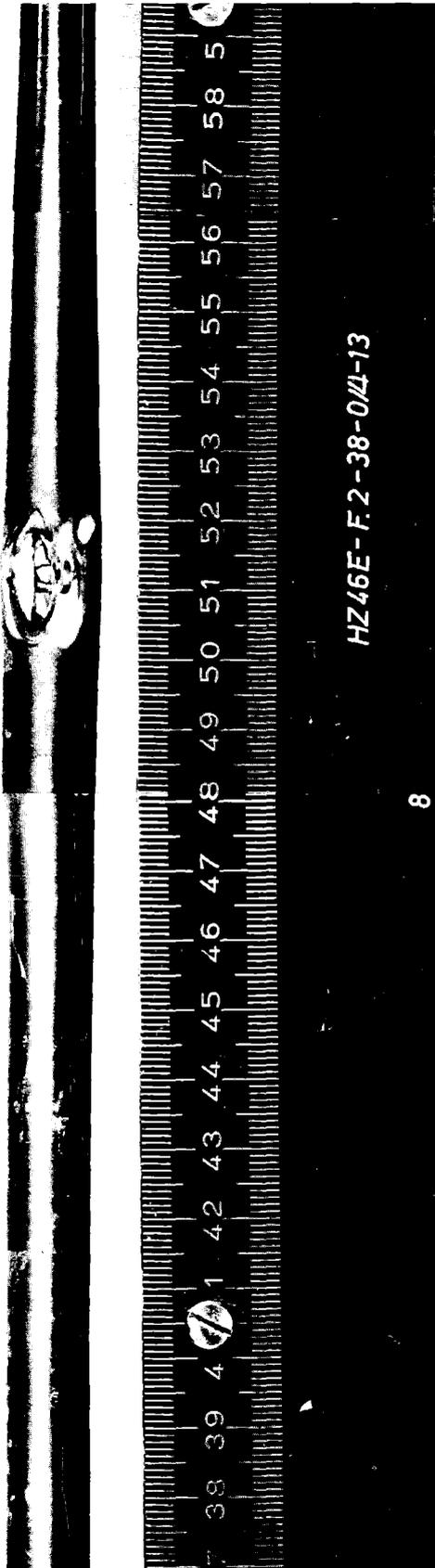


---

**KJK** IT79  
PNS4237-240

In-pile-Versuch F1  
Ansicht und Röntgenbild

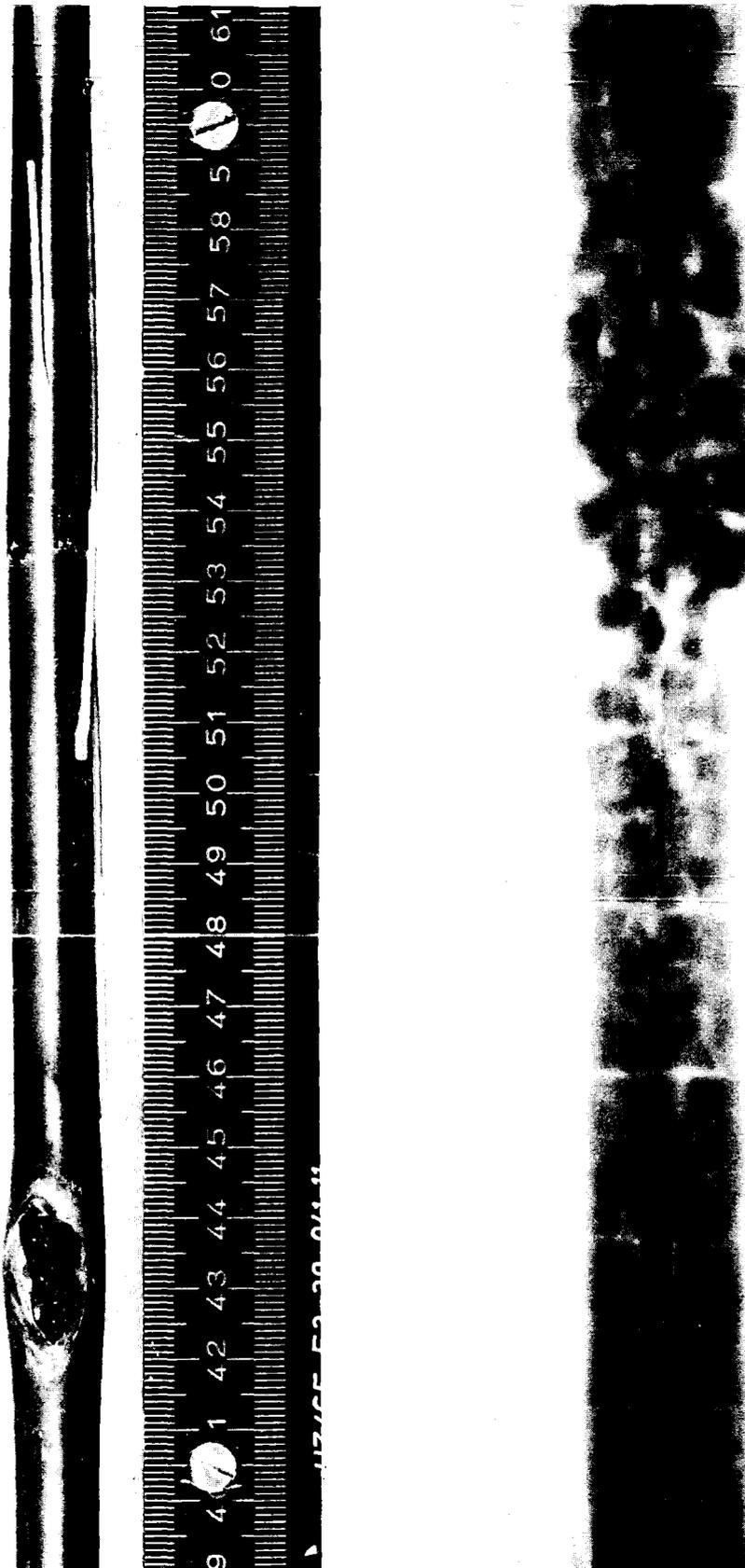
ABB. 26



**kfk**  
KIT79  
PNS4237-241

# In-pile-Versuch F 2 Ansicht und Röntgenbild

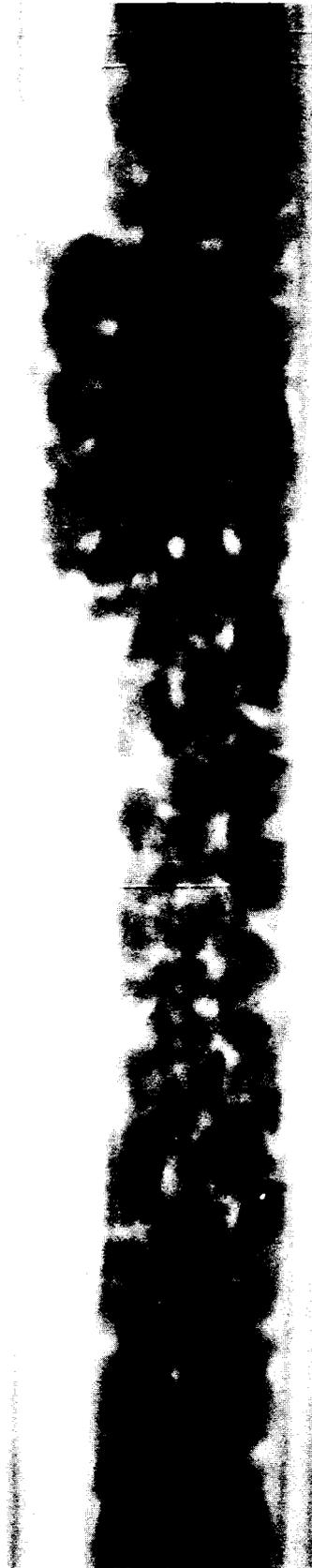
ABB. 27



**KfK**  
IT79  
PNS4237-242

In-pile-Versuch F 3  
Ansicht und Röntgenbild

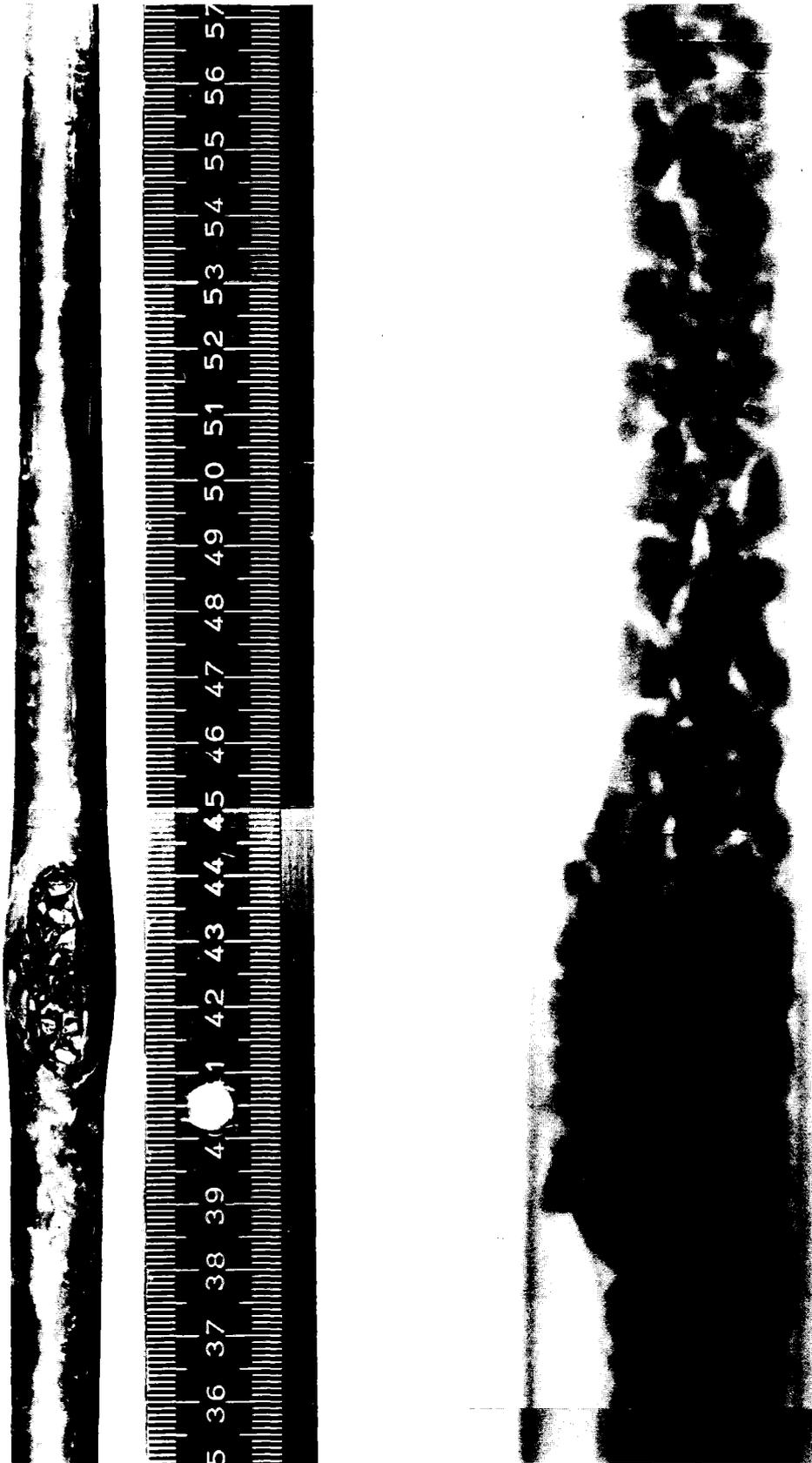
ABB. 28



**KfK** IT 79  
PNS 4237-243

# In-pile-Versuch F 4 Ansicht und Röntgenbild

ABB. 29



**KfK** IT79  
PNS 4237-244

In-pile-Versuch F 5  
Ansicht und Röntgenbild

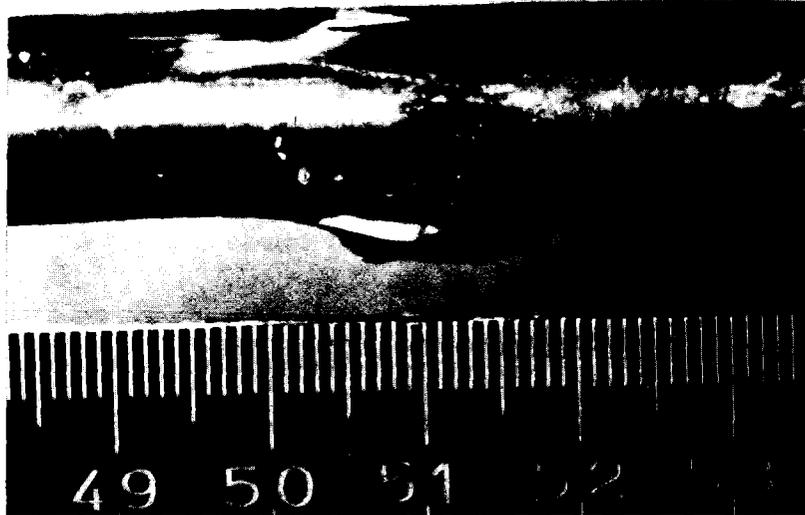
ABB. 30



IT 78 PNS4237-125

In-Pile Test F1, 20000MWd/tu  
Burst Section

ABB. 31

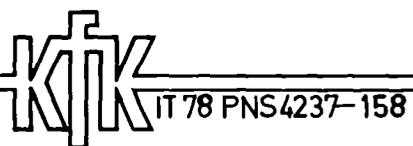


HZ-46E-F2-38-0/15



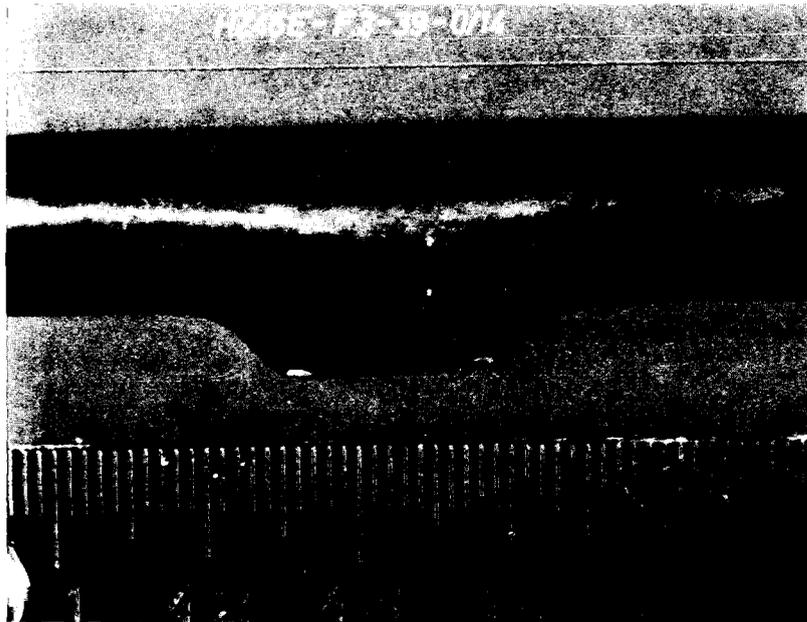
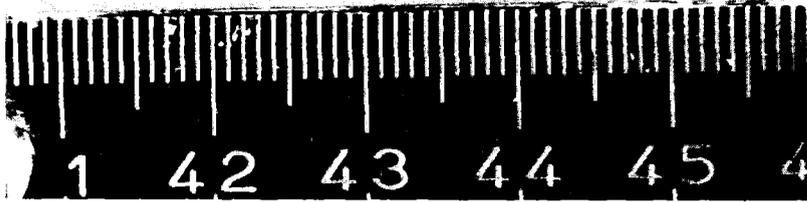
HZ-46E-F2-38-0/1

$T_B = 893^\circ\text{C}$   $P_B = 53,4\text{bar}$



In-pile-Versuch F2  
Ansichten der Beulstelle

Abb.:32



IT 78 PNS 4237-162

Burst Section, Test Fuel Rod F3  
20 000 MWd/tu

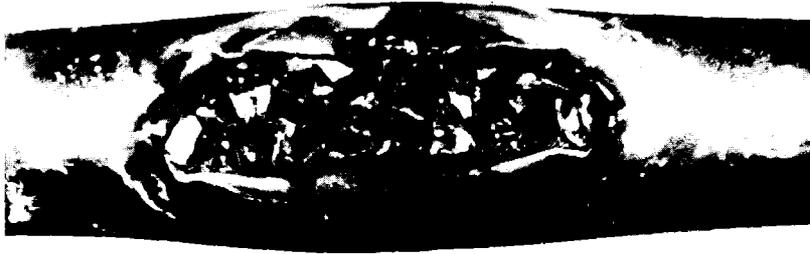
ABB. 33



FR2 In-Pile Test F4, 20 GWd/t

Burst Section

ABB. 34

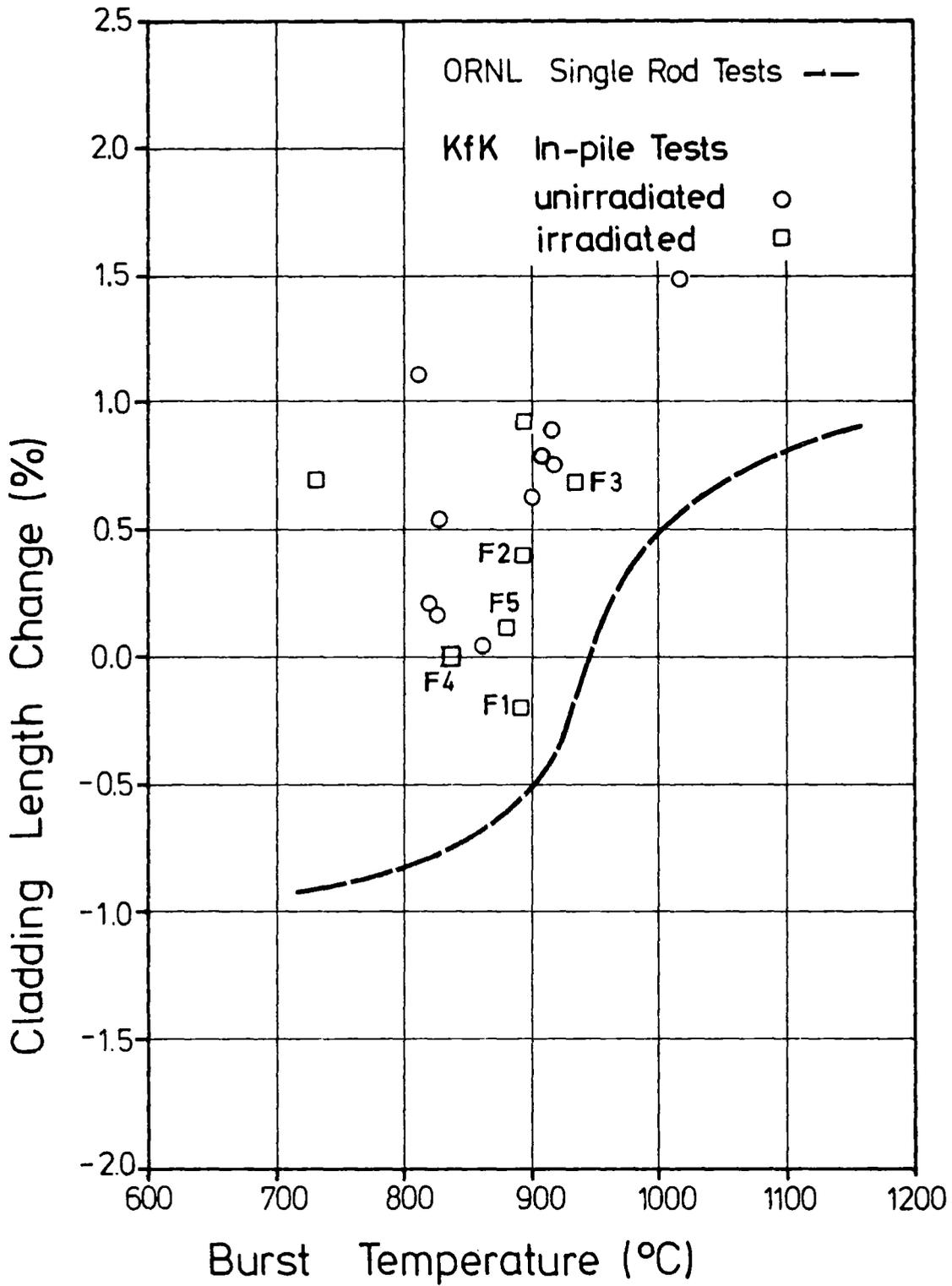


---

**kfk** IT79  
PNS4237-245

# In-pile-Versuch F 5 Ansichten der Beulstelle

ABB. 35

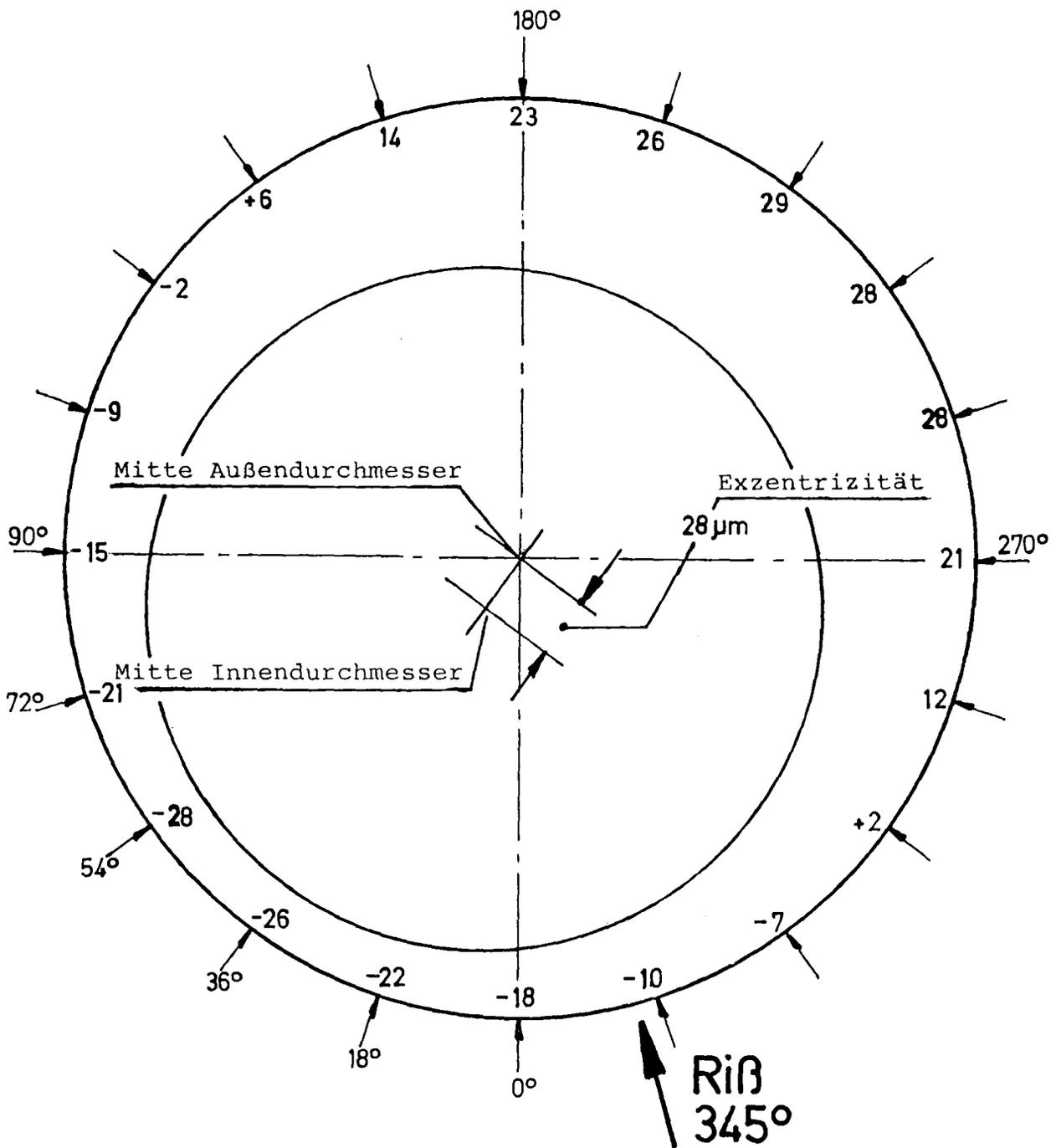


FR2 In-pile Tests

Abb.:36

Cladding Length Change vs. Burst Temperature





Ansicht von unten

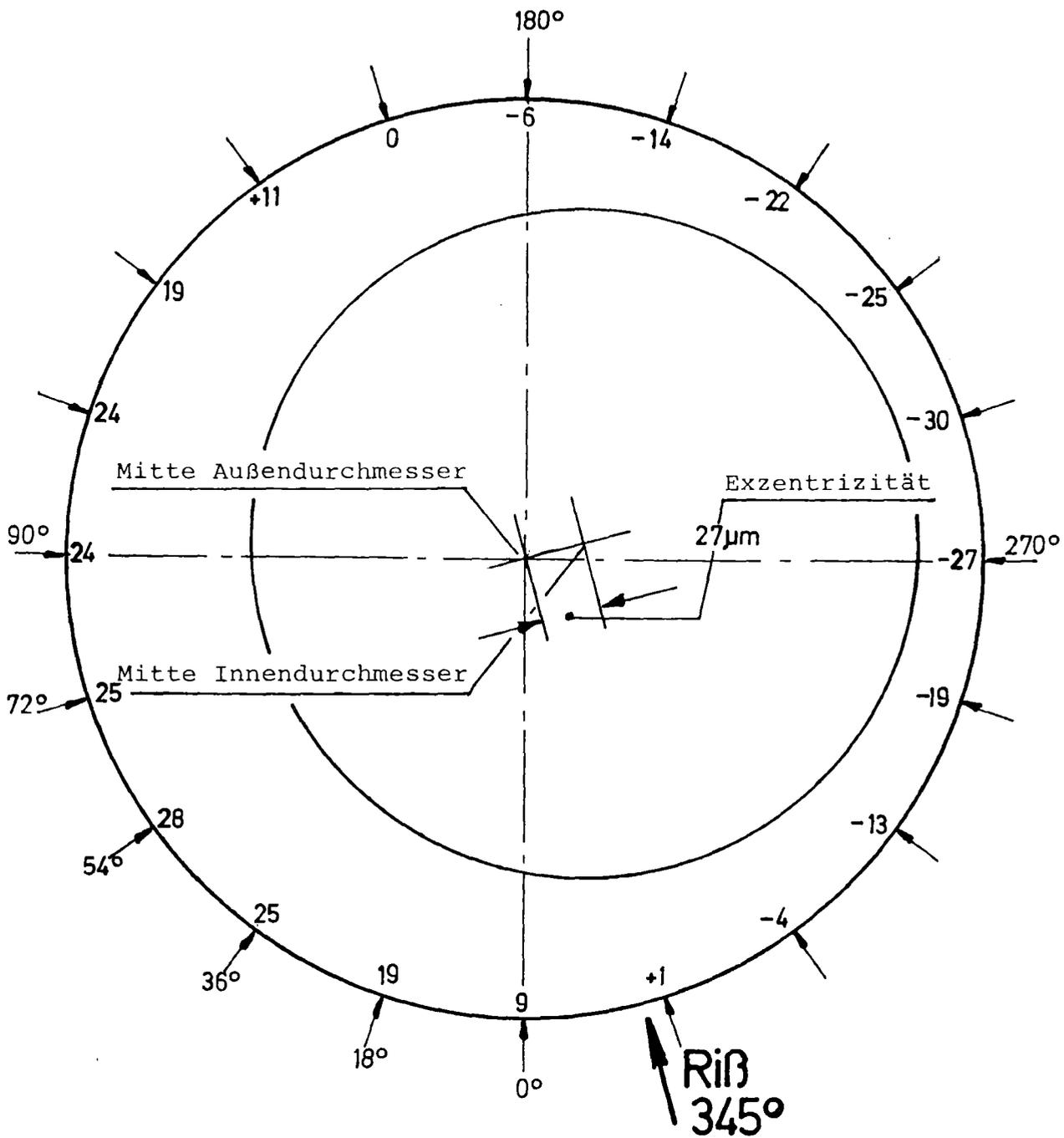
Meßebeene 1 : 350 mm von UKF  
Rißmitte : 410 mm von UKF



IT 1979  
PNS 4237-235.15

ABWEICHUNG DER WANDDICKE (µm) IN MESSEBENE 1  
VERSUCH NR. F 2 STAB NR. 38

ABB.: 37.2



Ansicht von unten

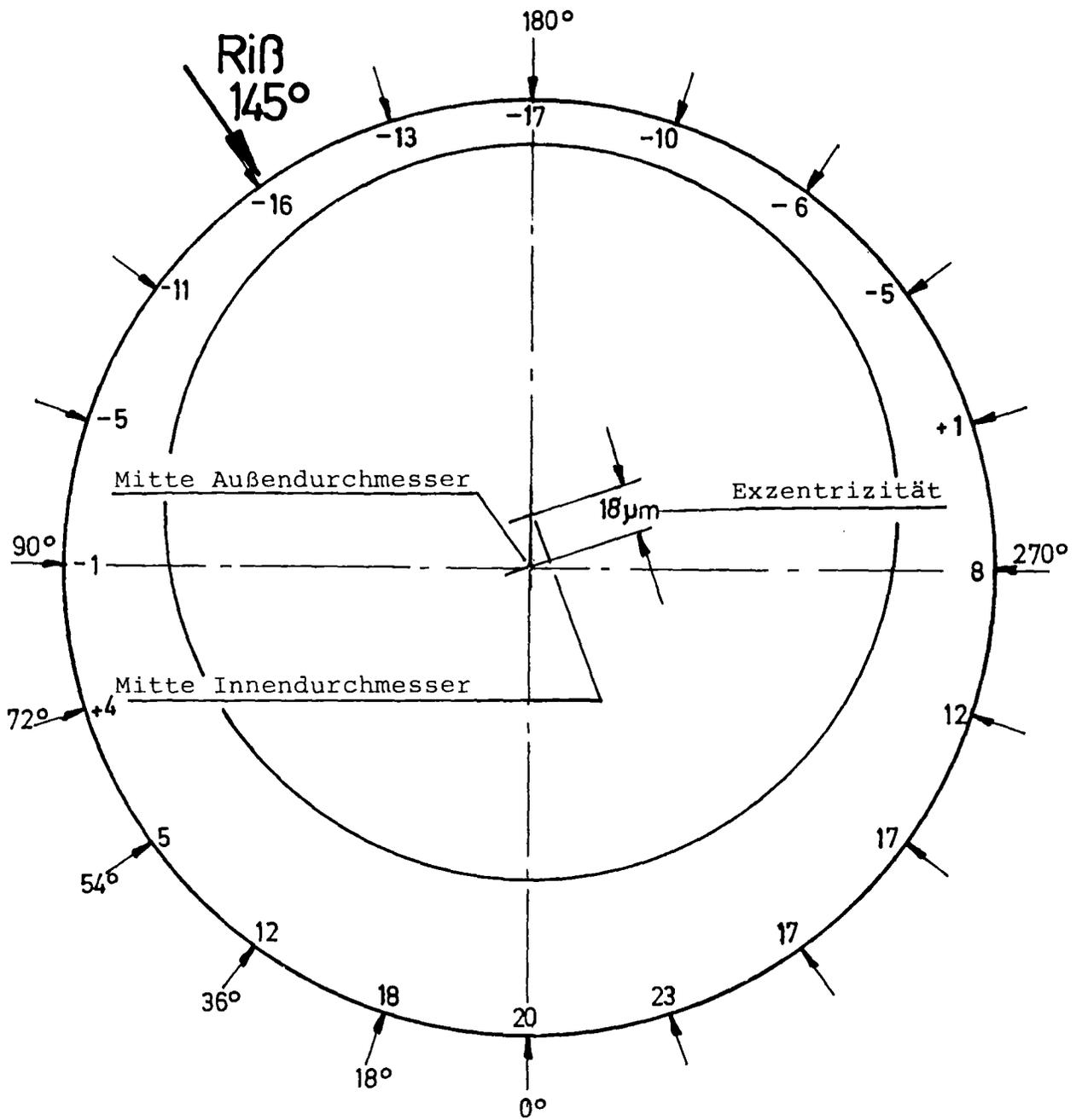
Meßebene 2 : 335 mm von UKF  
 Rißmitte : 331 mm von UKF



IT 1979  
 PNS 4237-235.16

ABWEICHUNG DER WANDDICKE (µm) IN MESSEBENE 2  
 VERSUCH NR. F 3 STAB NR. 39

ABB.: 37.3



Ansicht von unten

Meßebene 3 : 319 mm von UKF  
 Rißmitte : 324 mm von UKF

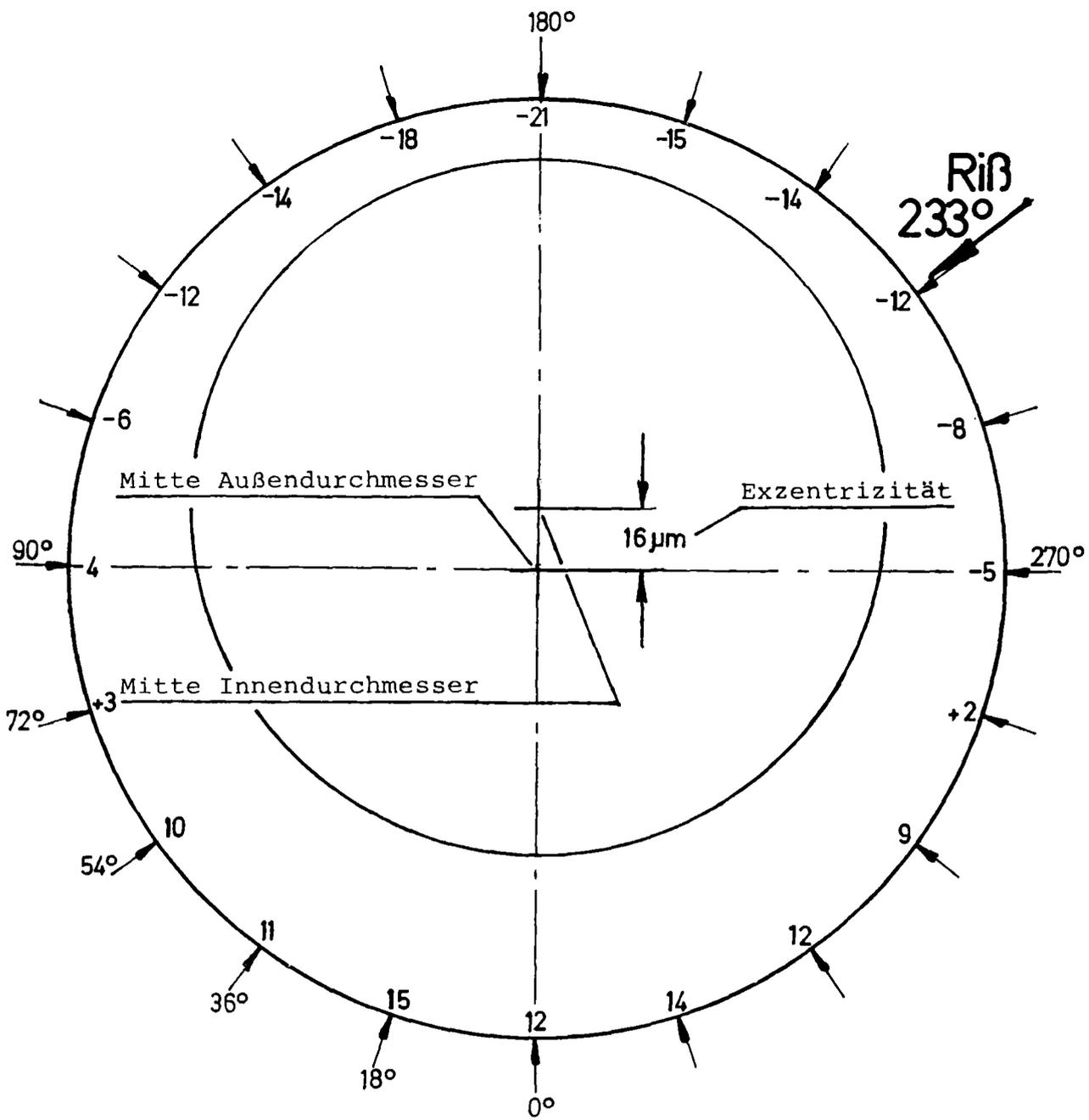


IT 1979

PNS 4237-235.17

ABWEICHUNG DER WANDDICKE (µm) IN MESSEBENE 3  
 VERSUCH NR. F 4 STAB NR. 40

ABB.: 37.4



Ansicht von unten

Meßebeine 3 : 319 mm von UKF

Rißmitte : 325 mm von UKF

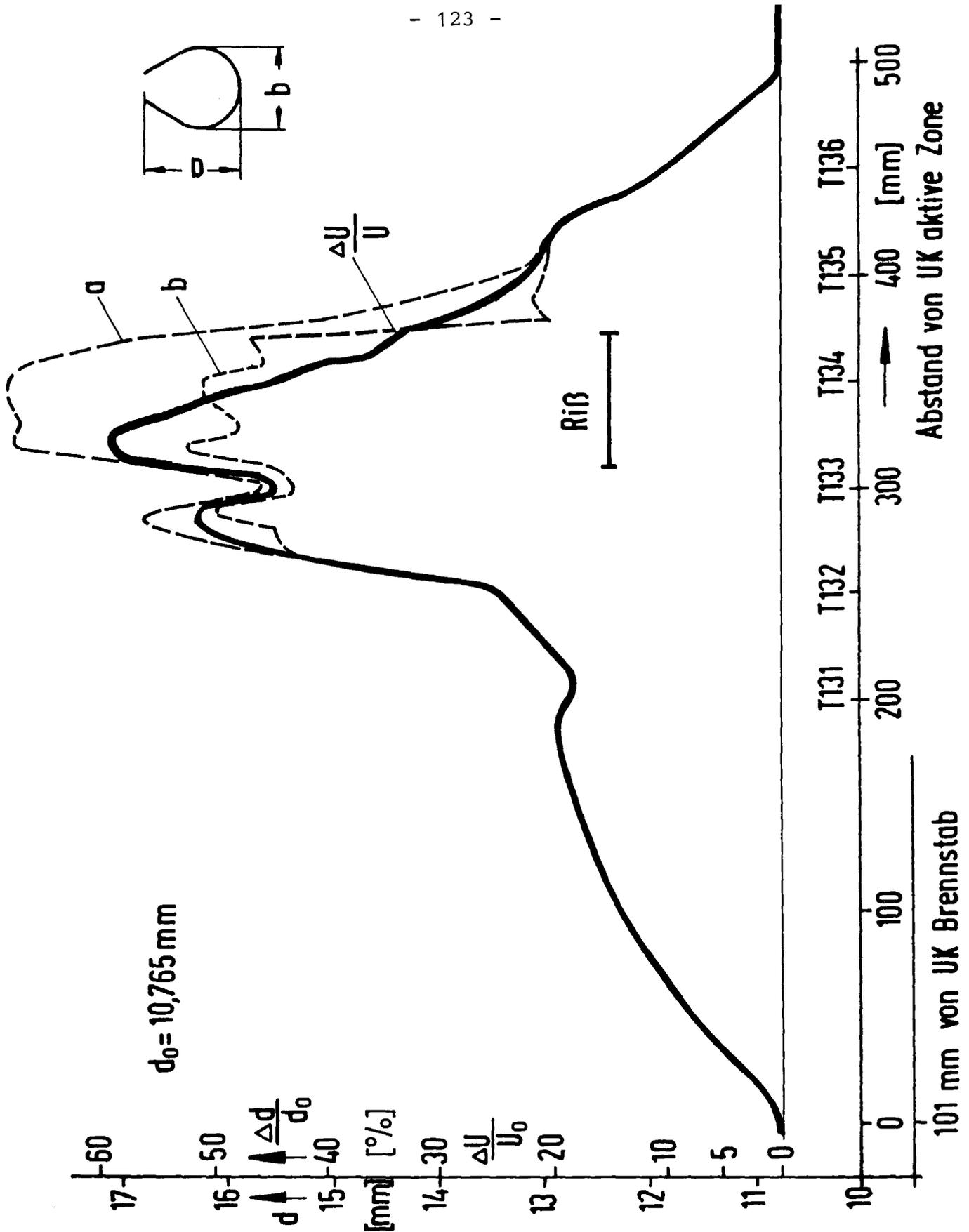


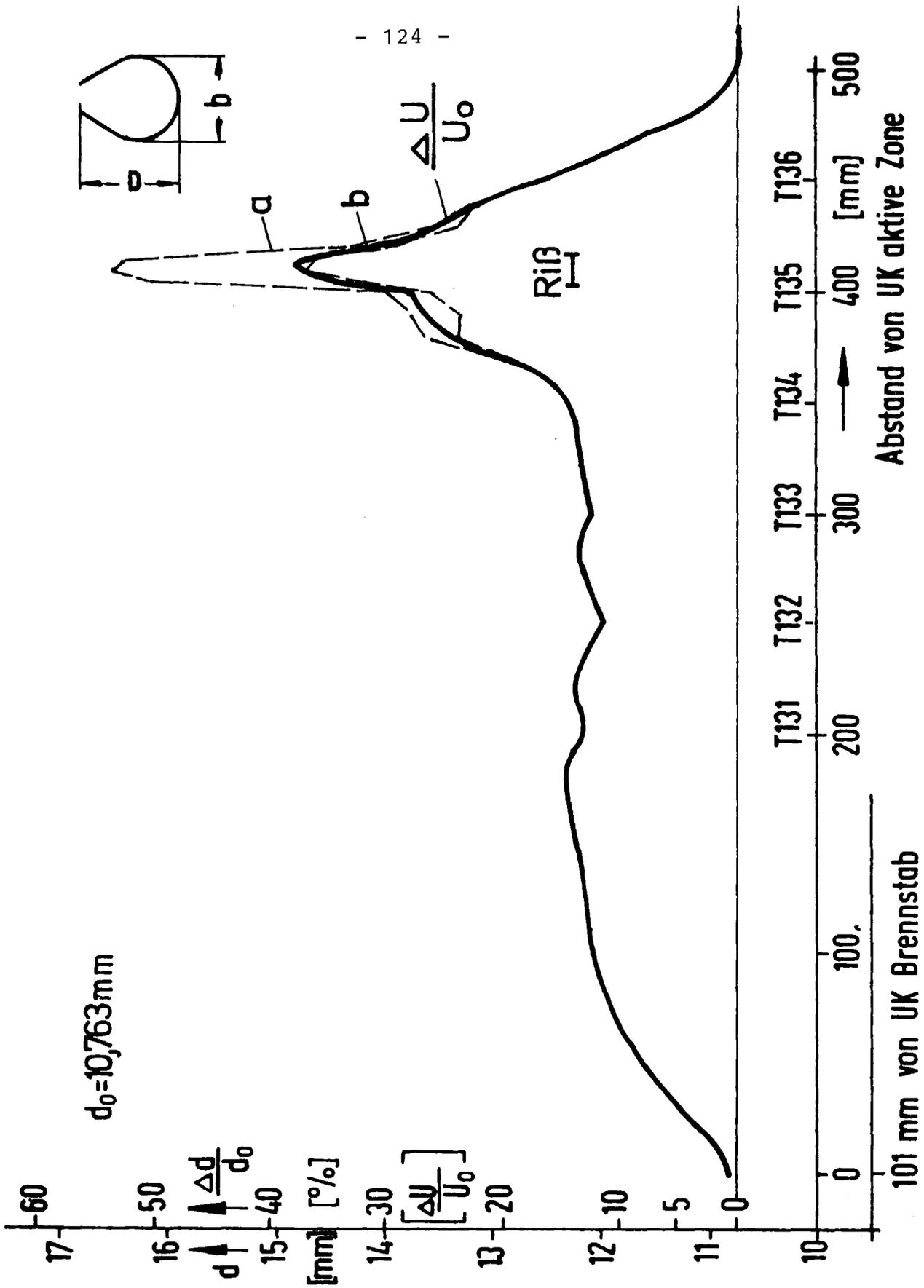
IT 1979

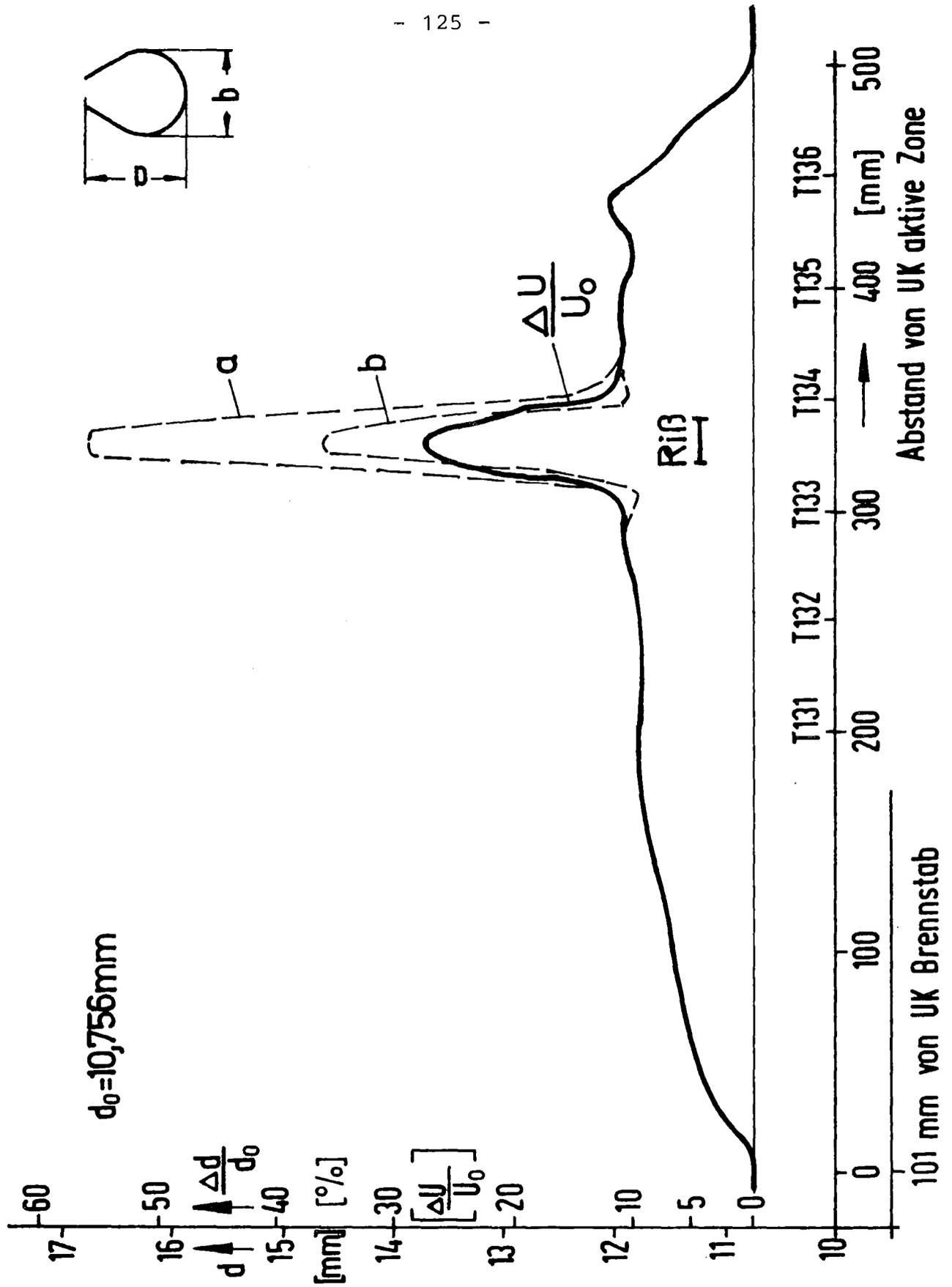
PNS 4237-235.18

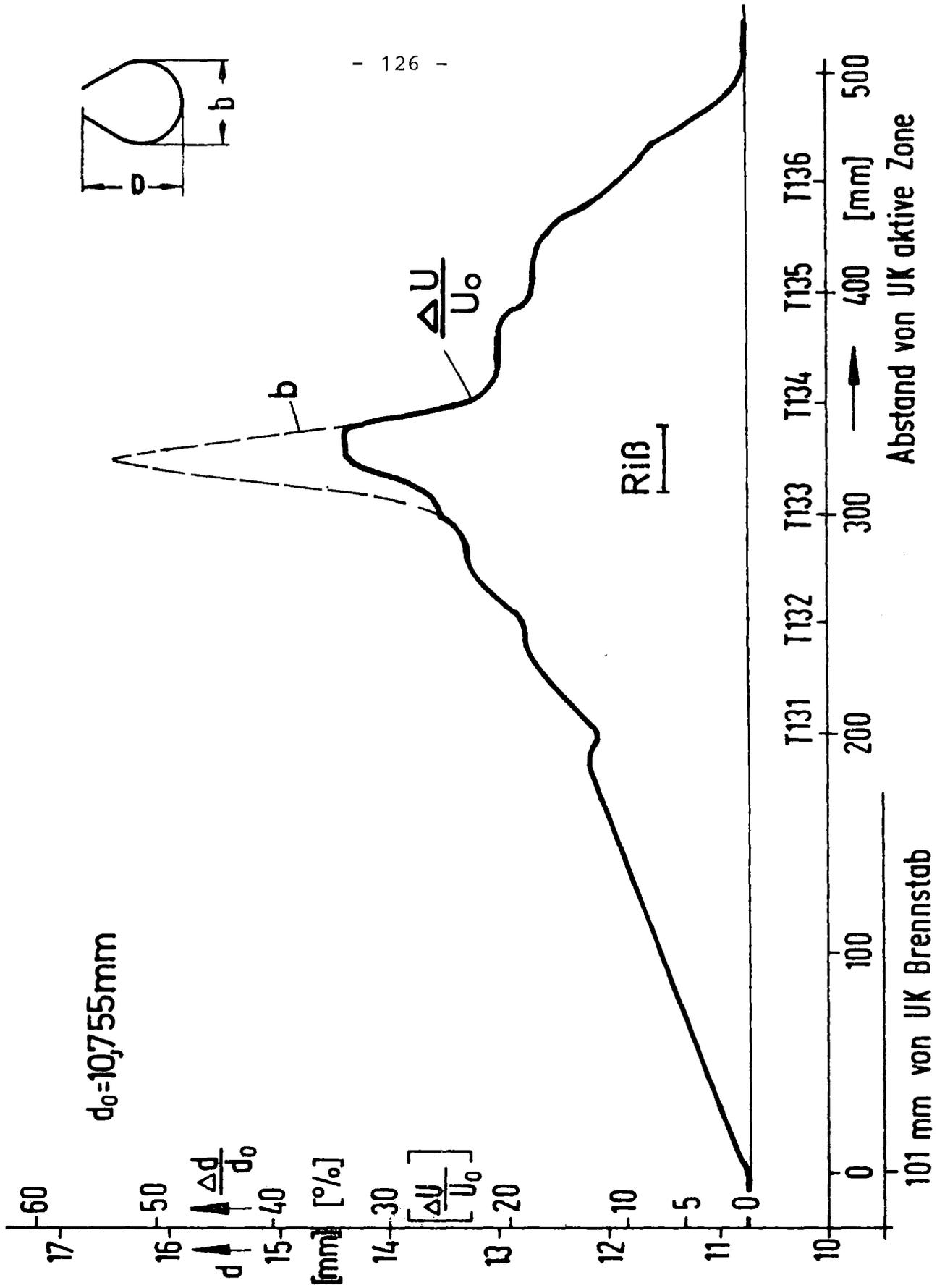
ABWEICHUNG DER WANDDICKE (µM) IN MESSEBENE 3  
VERSUCH NR. F 5 STAB NR. 43

ABB.: 37.5



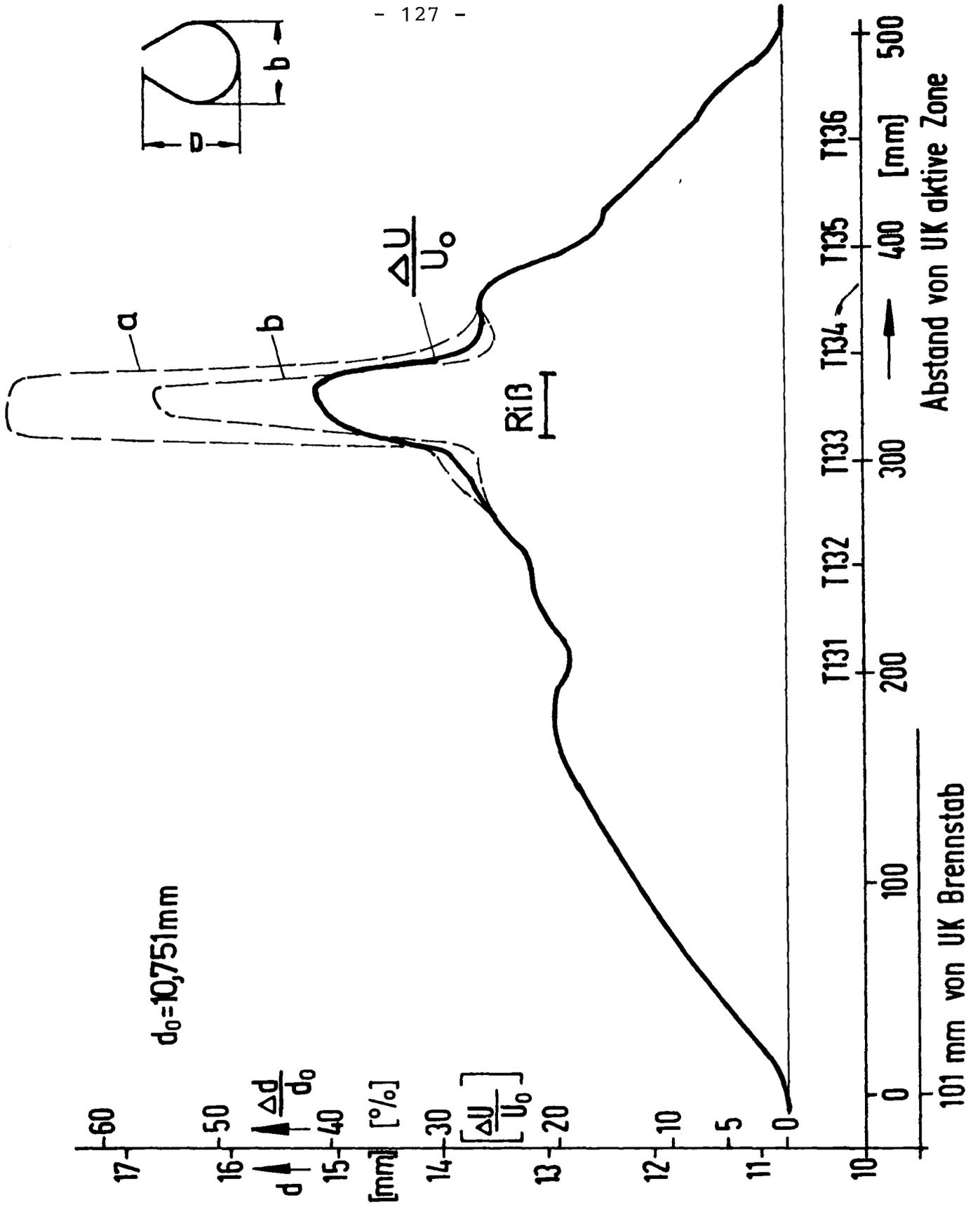






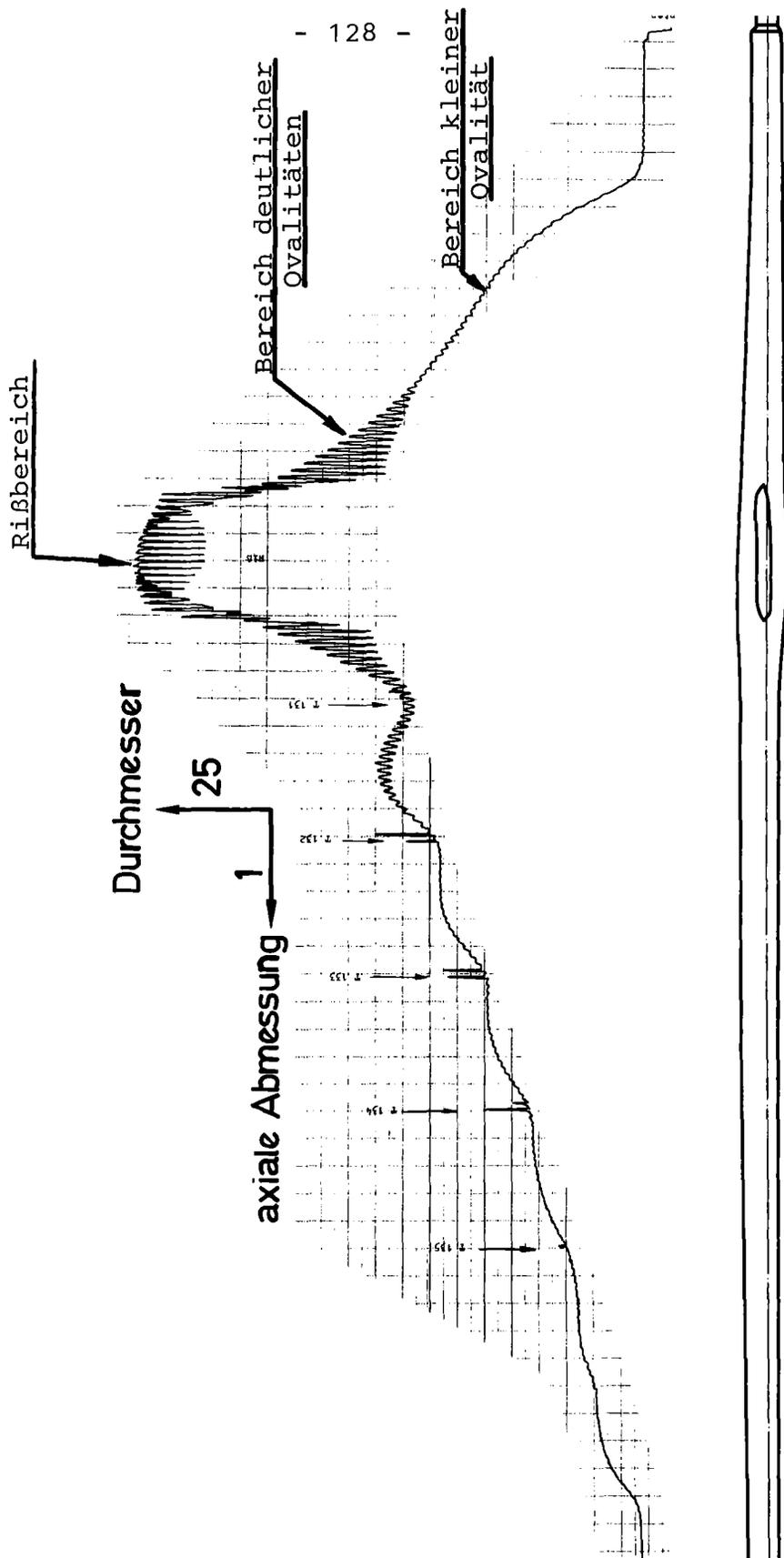
In-pile-Versuch F 4      Stab Nr.: 40  
 Meßwerte des Dehnungsprofils

Abb.: 38.4



In-pile-Versuch F5 Stab Nr.: 43  
 Meßwerte des Dehnungsprofils

Abb.: 38.5



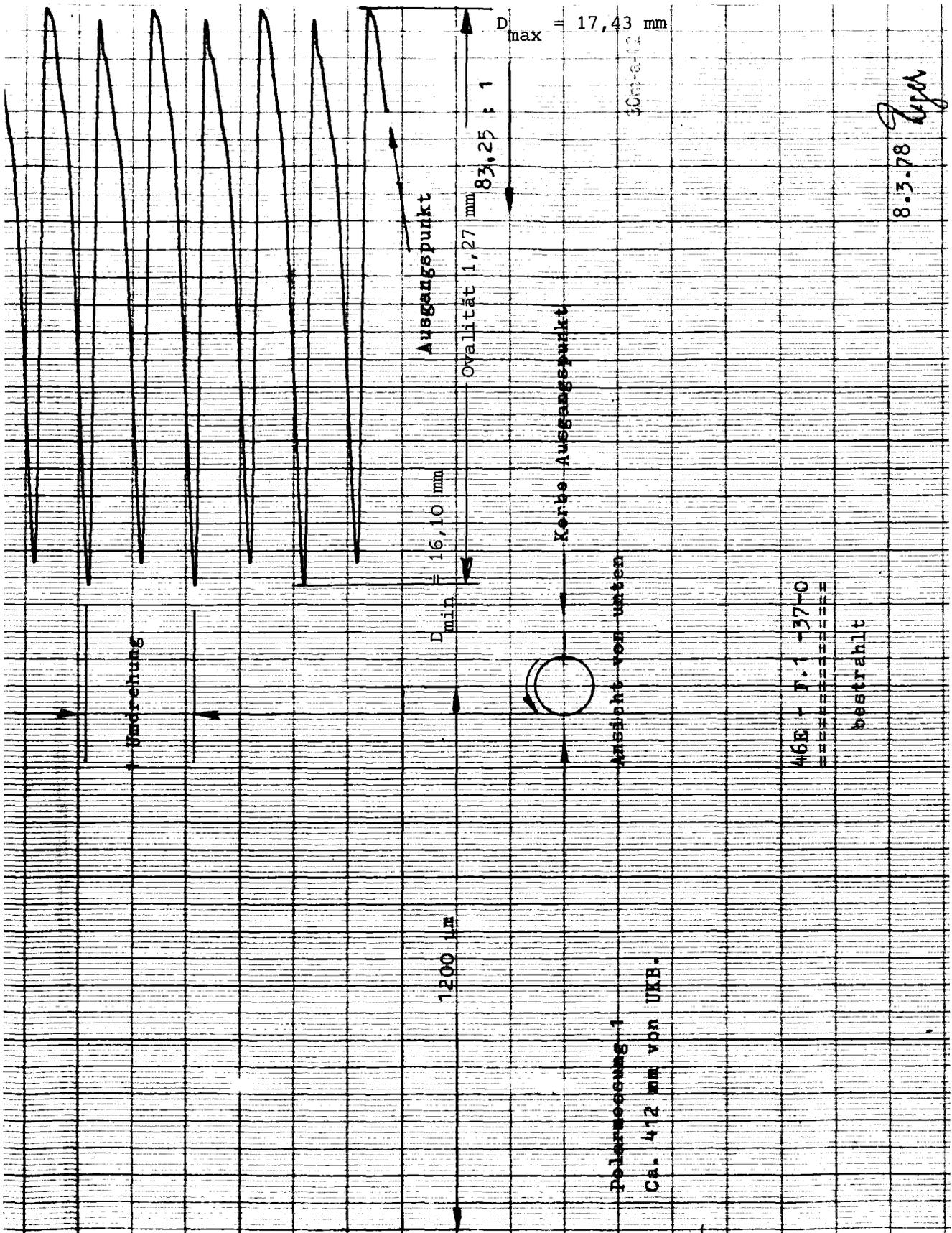
kfk

IT 1979

PNS 4237-237

WENDELSCHRIEB  
AM BEISPIEL DES VERSUCHS A 2.2

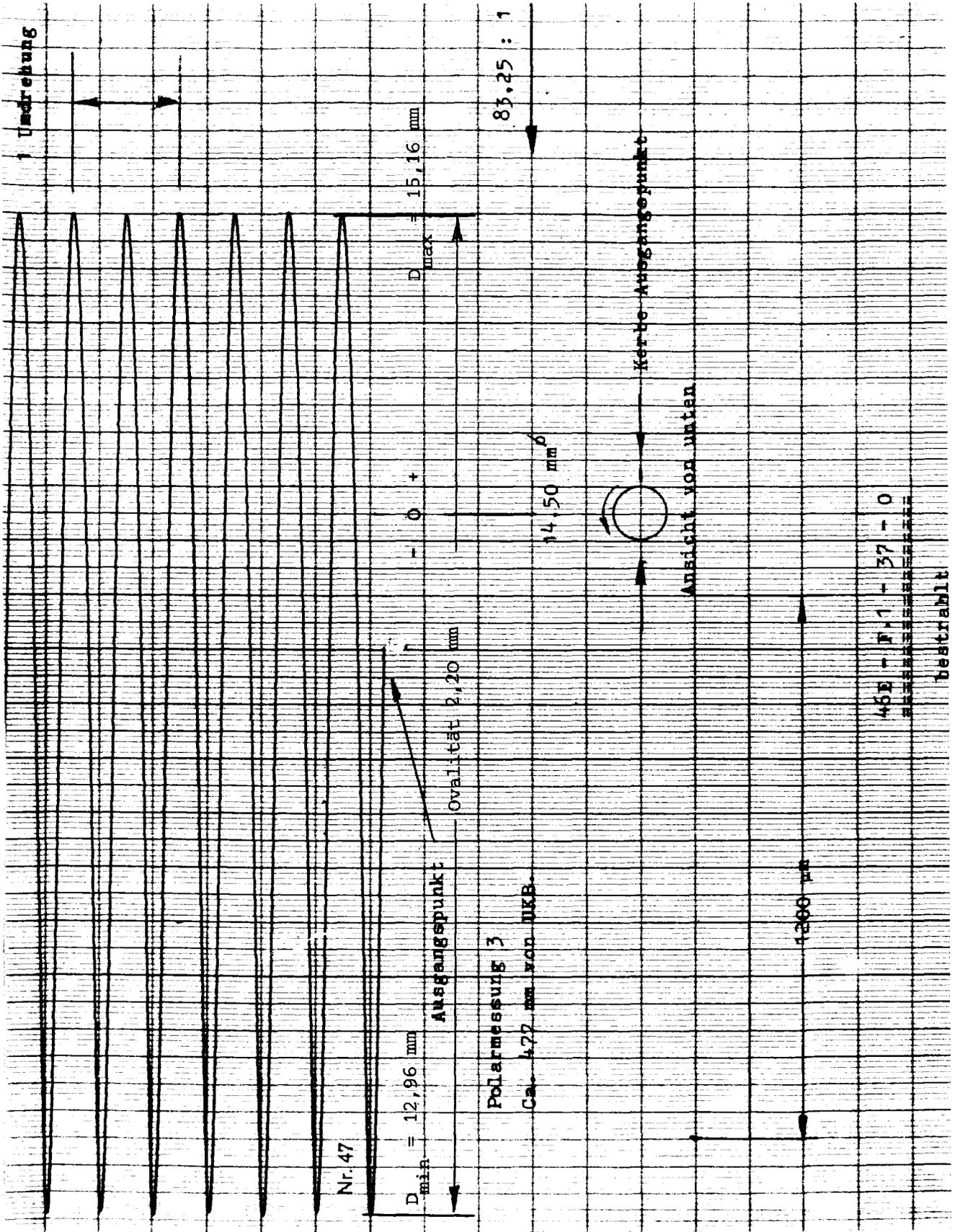
Abb.:39



POLARMESSUNG 1 (311 MM VON UKF)

VERSUCH F 1 STAB NR. 37

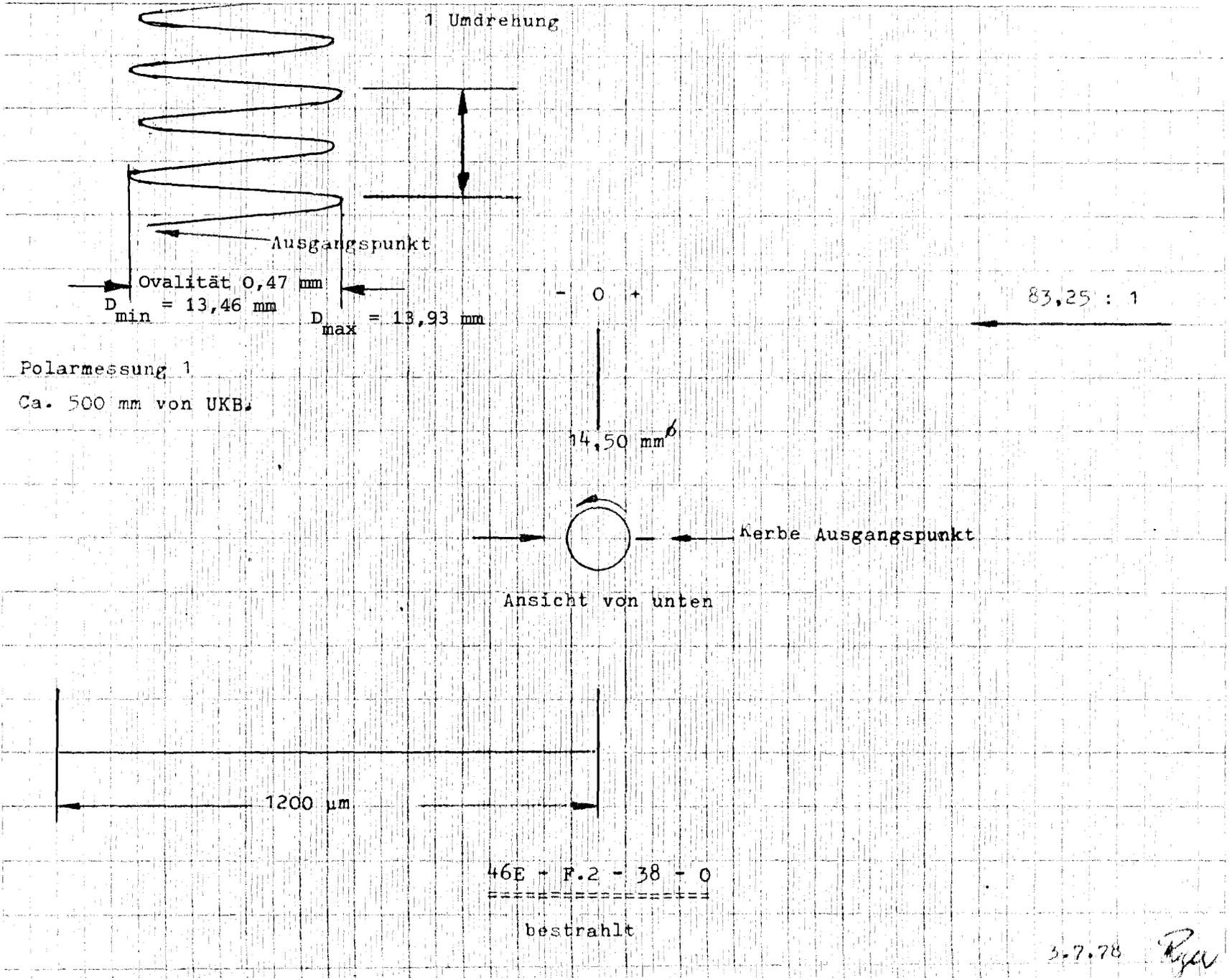
Abb.:40.1

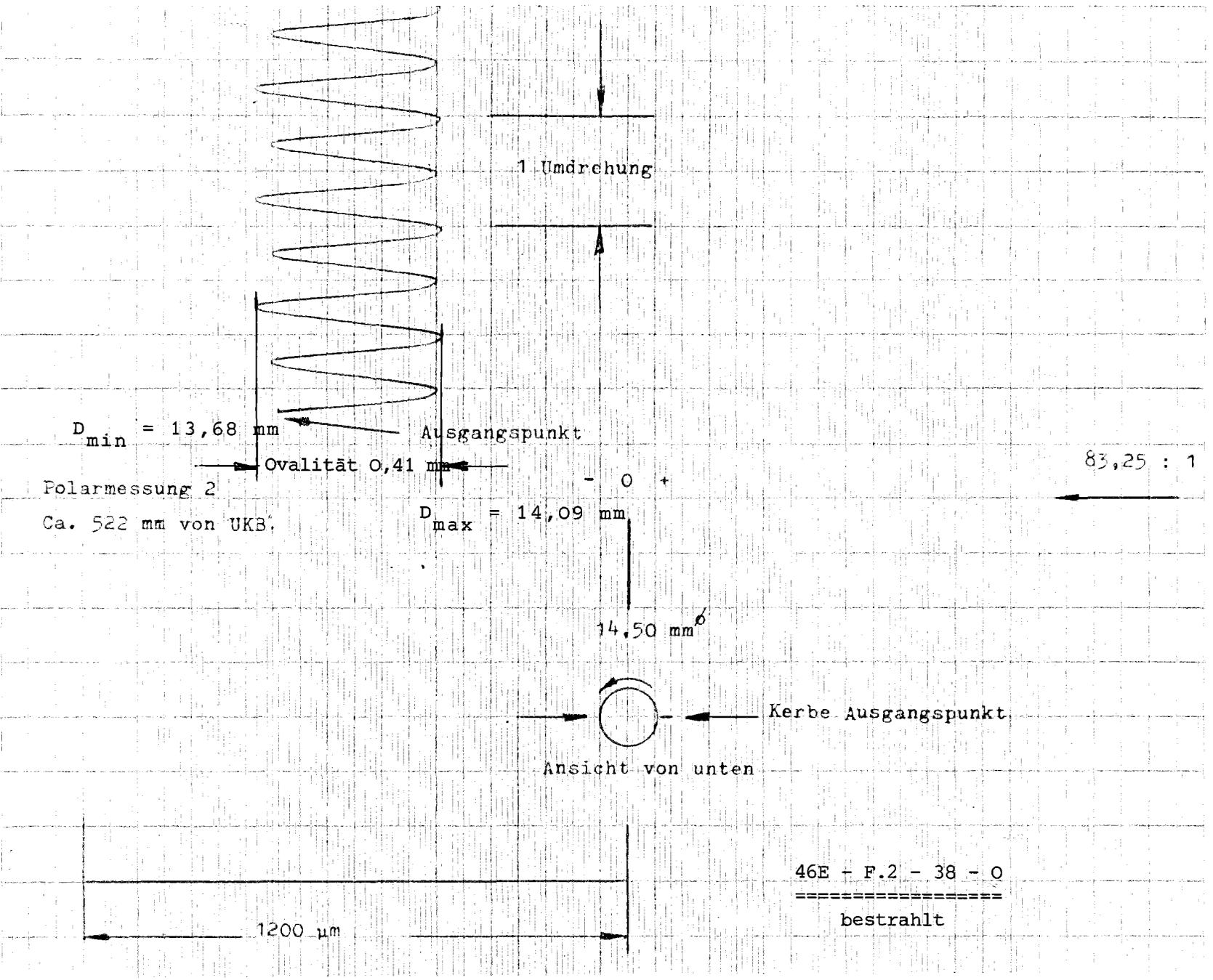


POLARMESSUNG 3 (376 MM VON UKF)

VERSUCH F 1 STAB NR. 37

Abb.:40.2

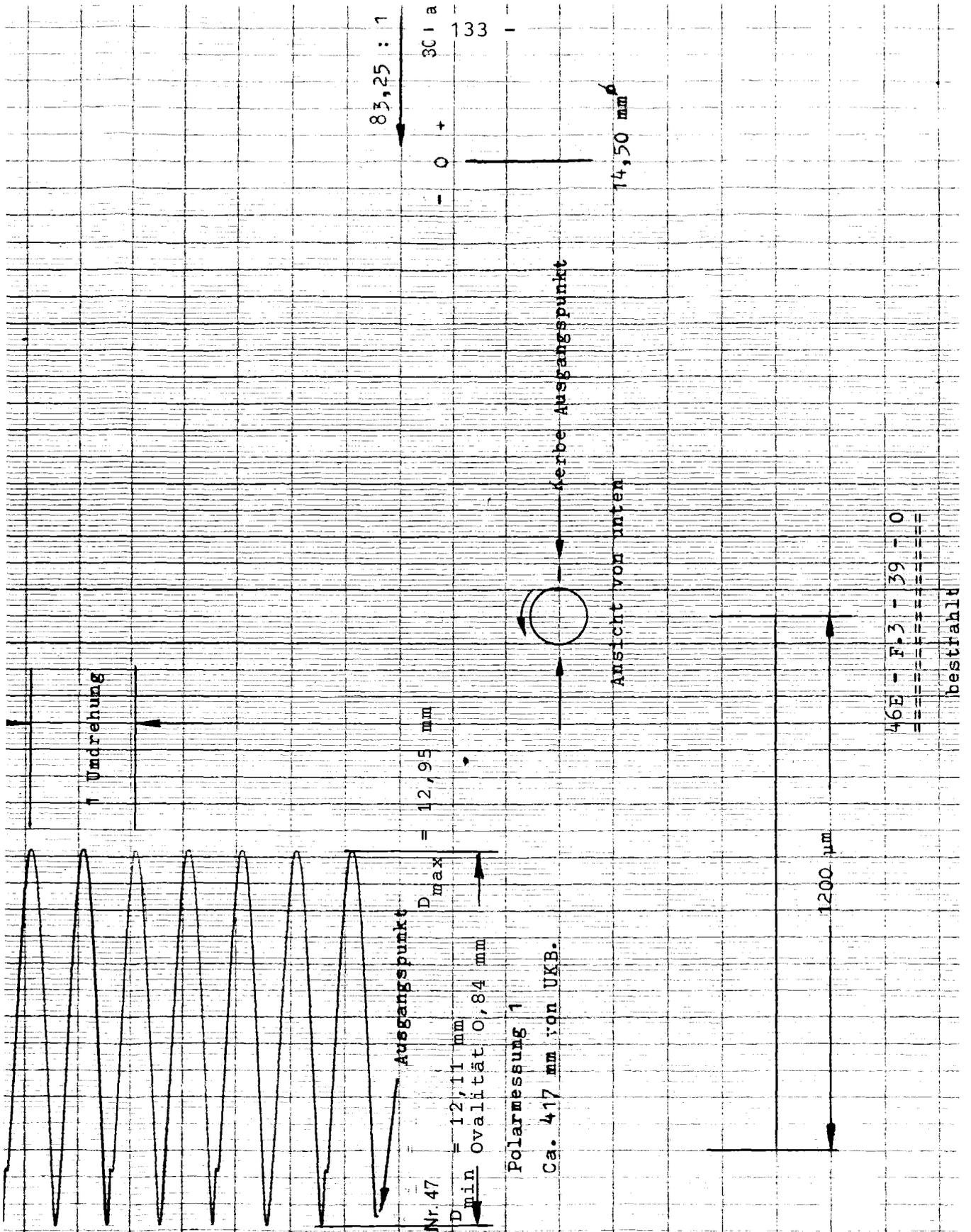




POLARMESSUNG 2 (421 MM VON UKB)

VERSUCH F 2 STAB NR. 38

Abb.: 41.2

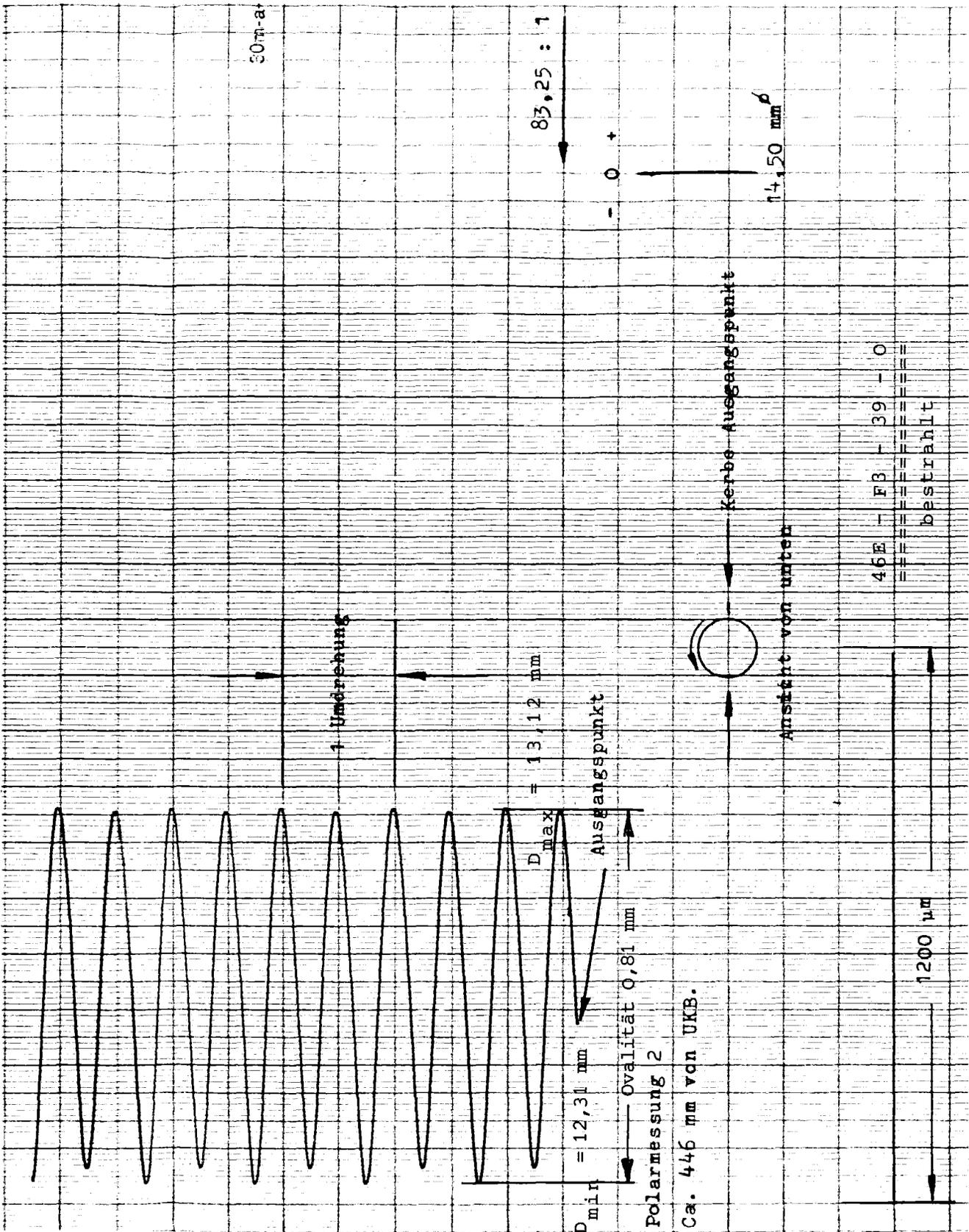


POLARMESSUNG 1 (316 MM VON UKF)

VERSUCH F 3 STAB NR. 39

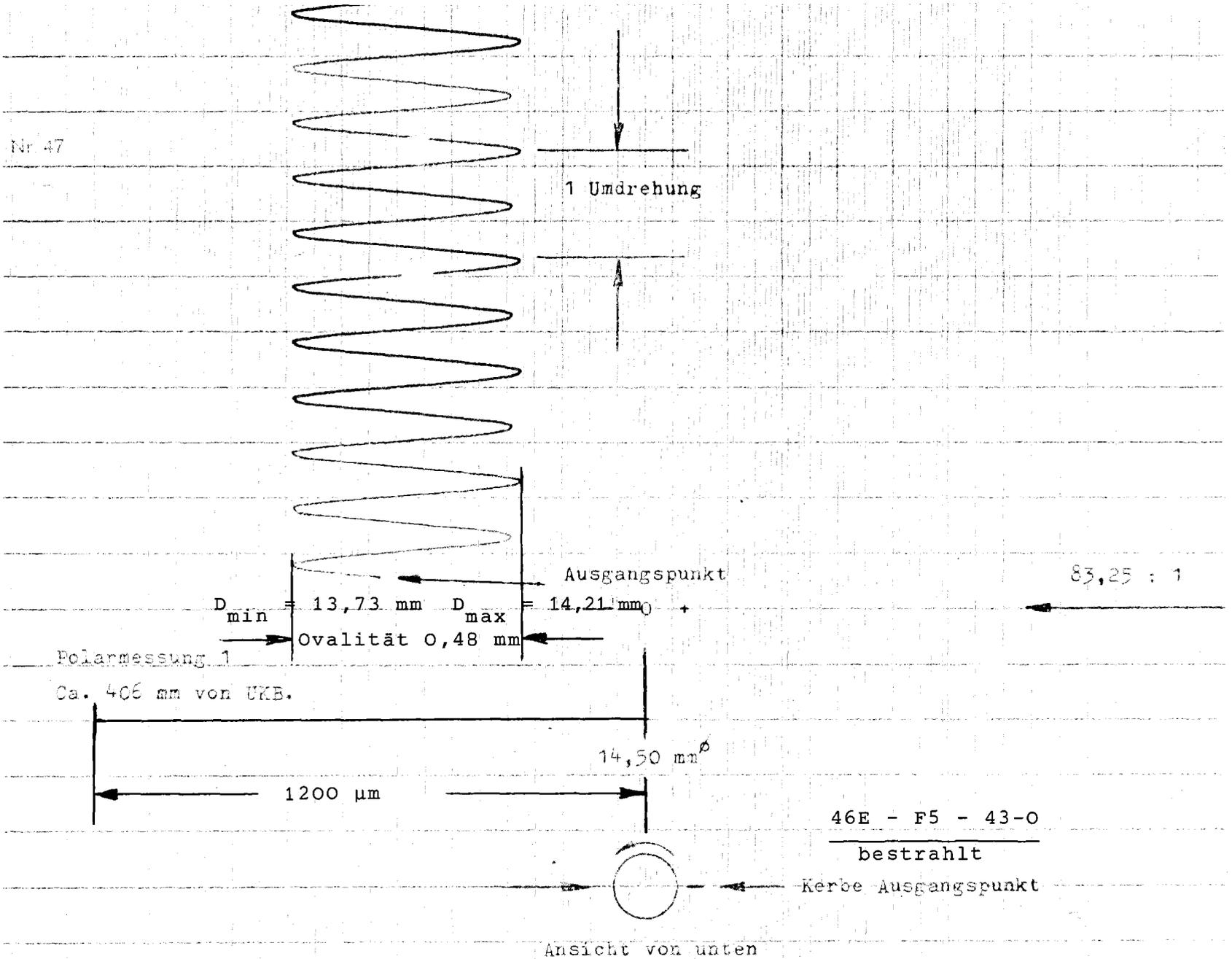


Abb.:42.1



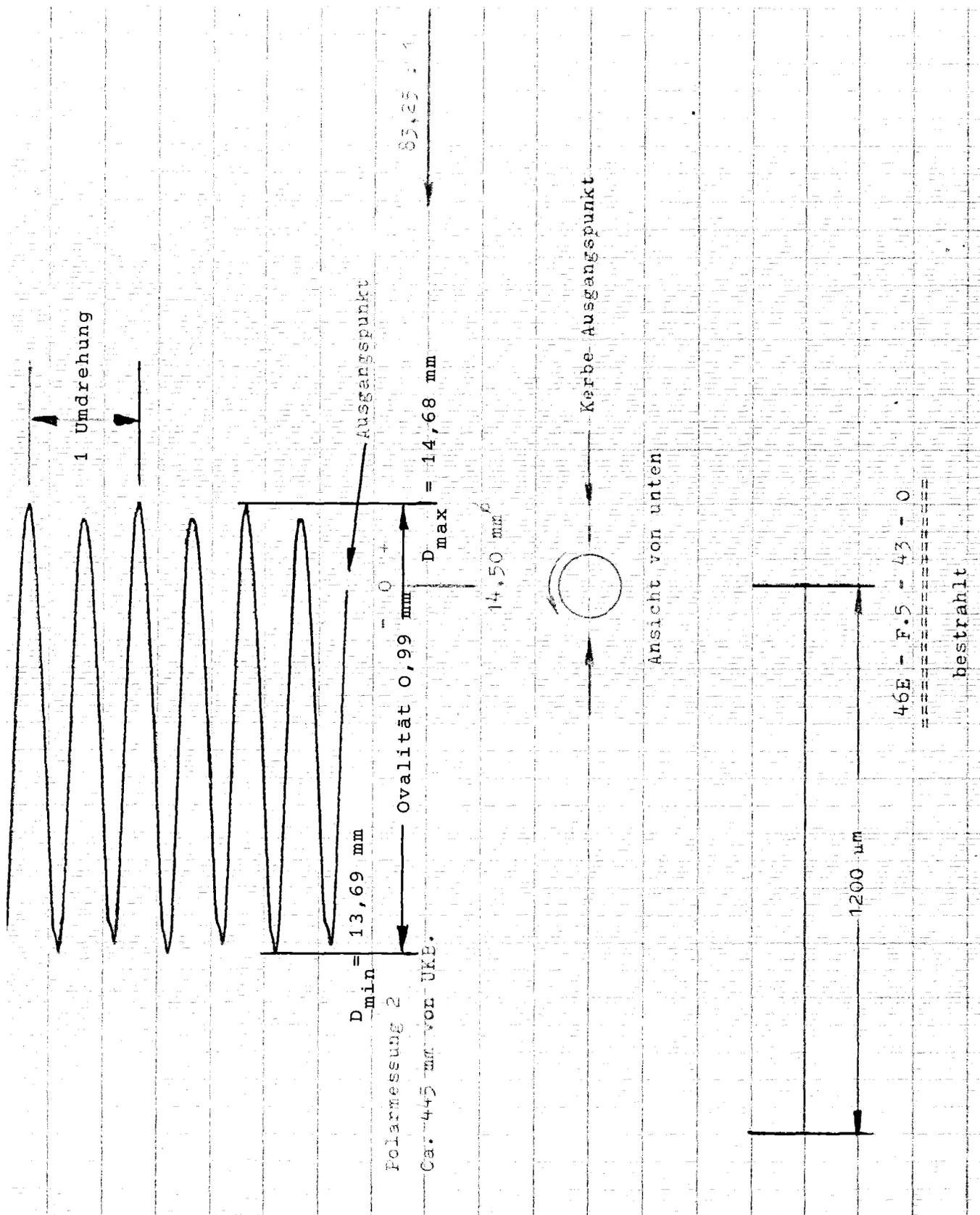
POLARMESSUNG 2 (345 MM VON UKF)  
VERSUCH F 3 STAB NR. 39

Abb.:42.2



POLARMESSUNG I (305 MM VON UKF)  
VERSUCH F 5 STAB NR. 43

Abb.: 43.1

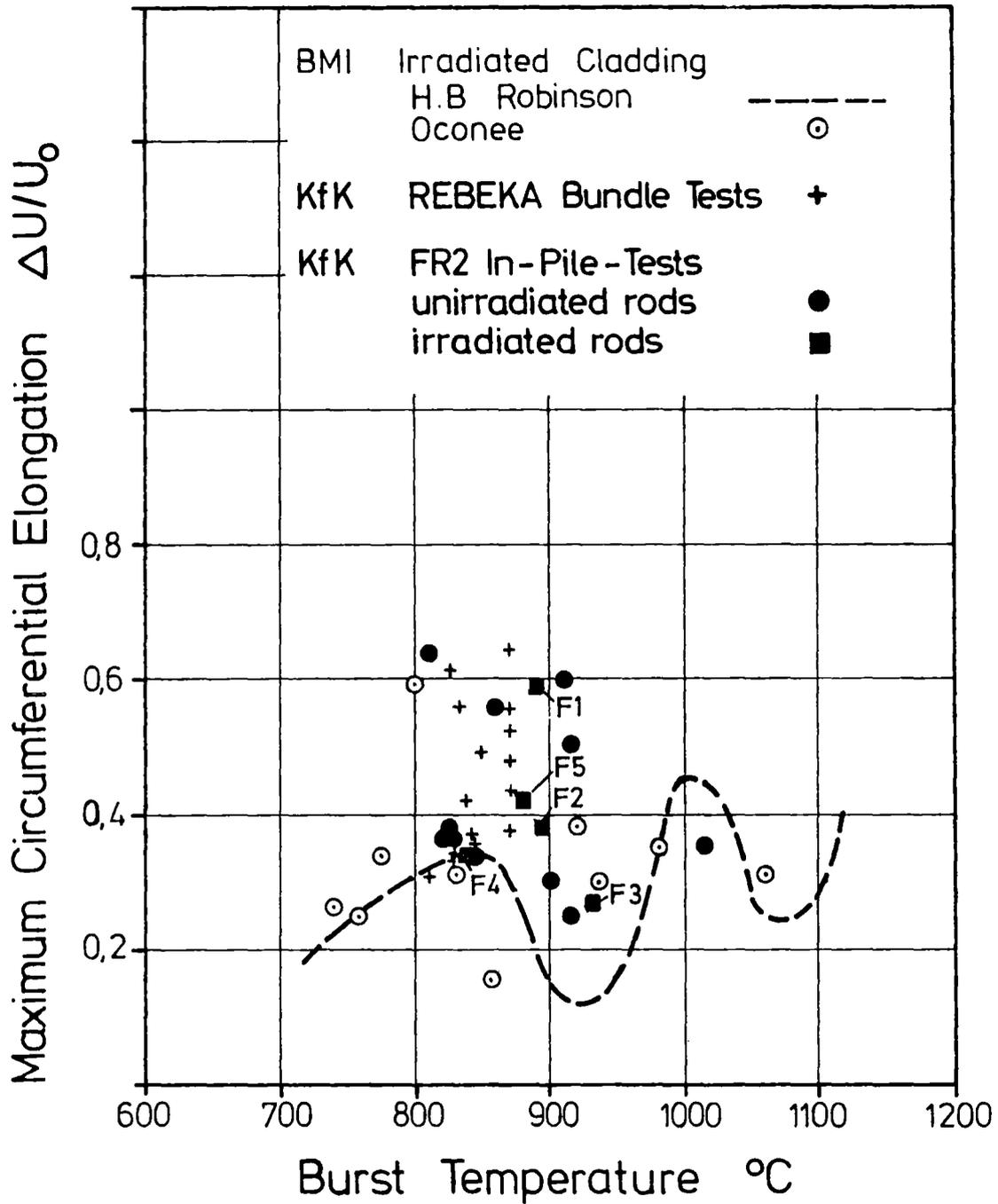


POLARMESSUNG 2 (344 MM VON UKF)

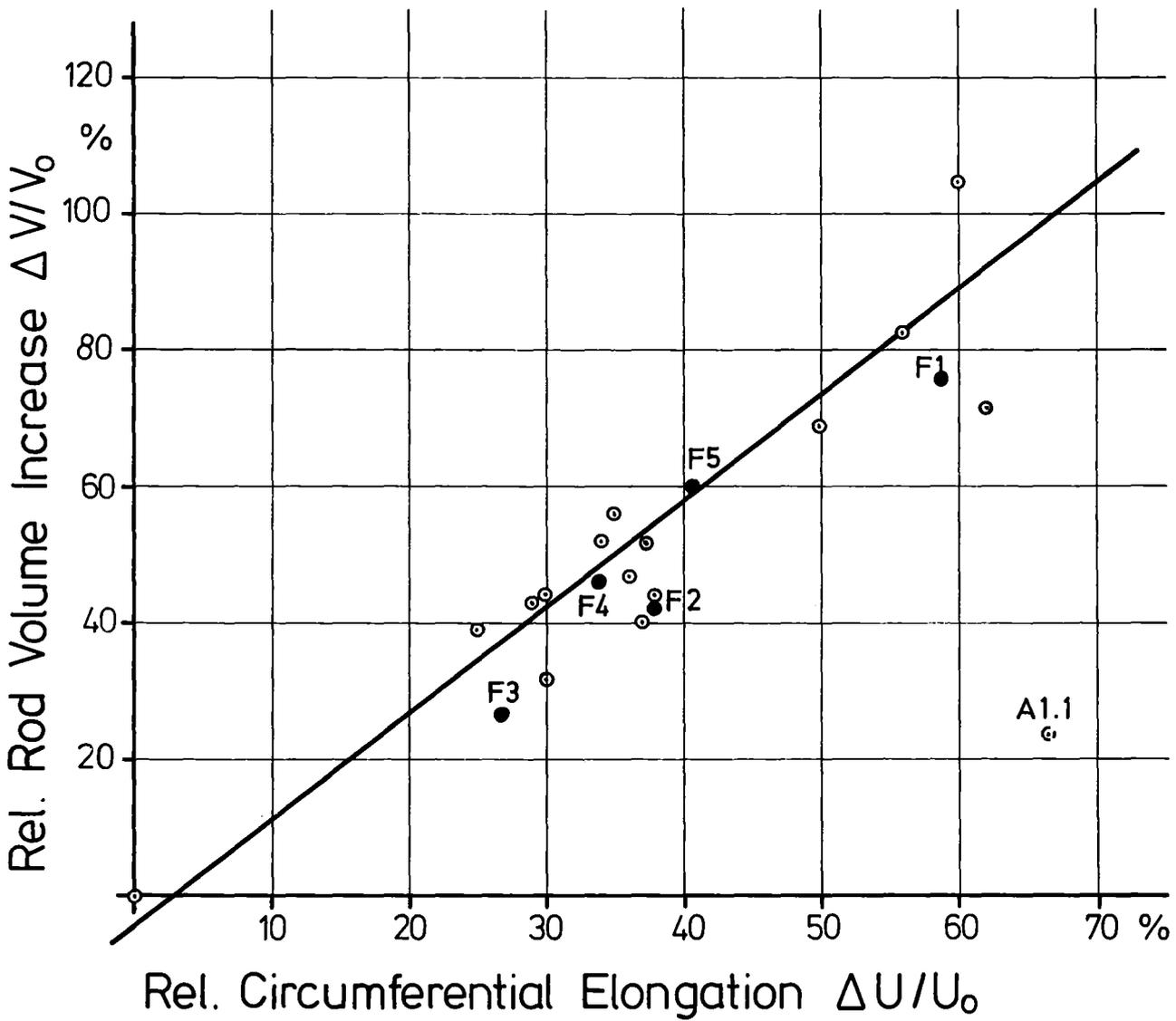
VERSUCH F5 STAB NR. 43



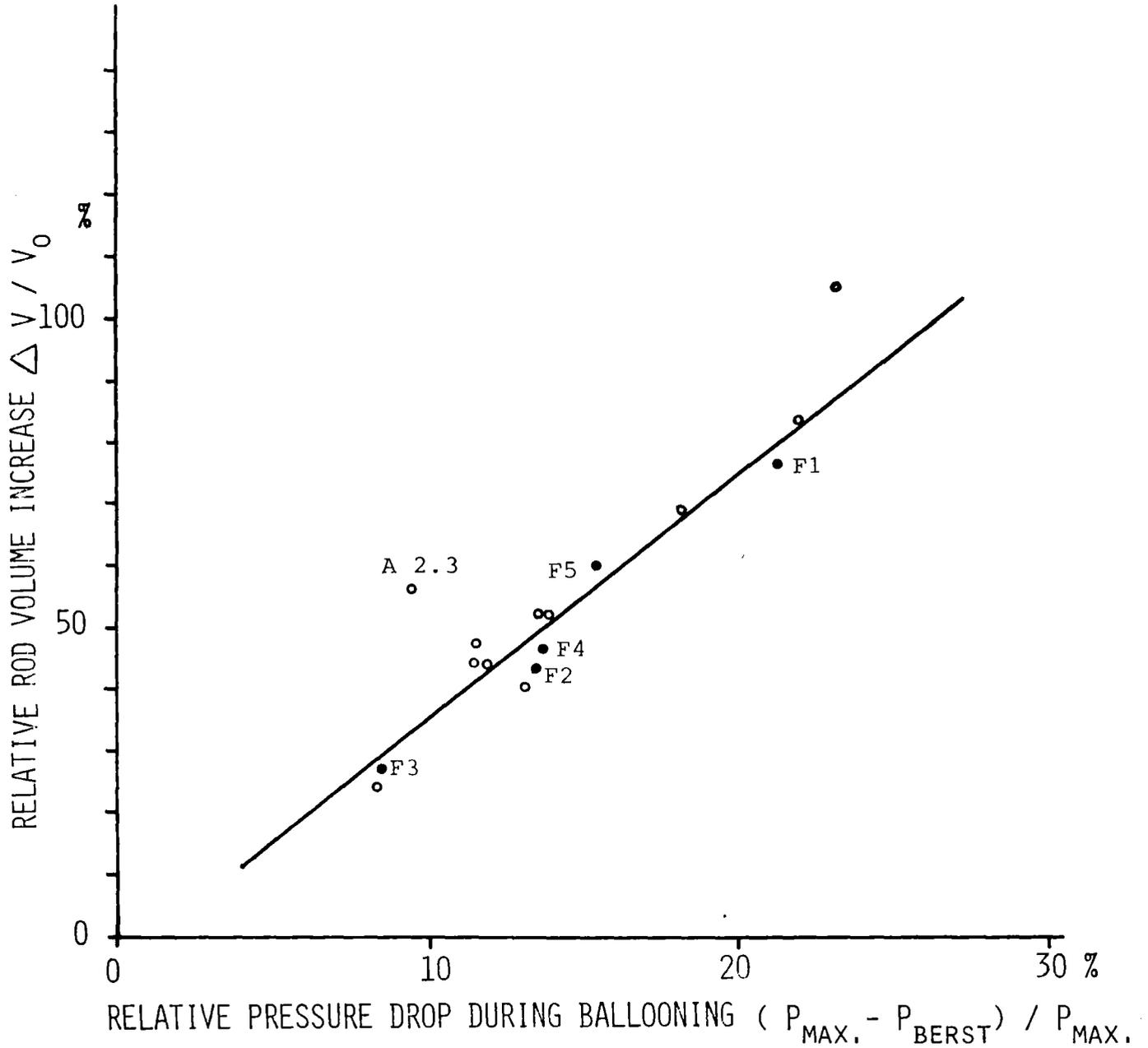
Abb.:43.2

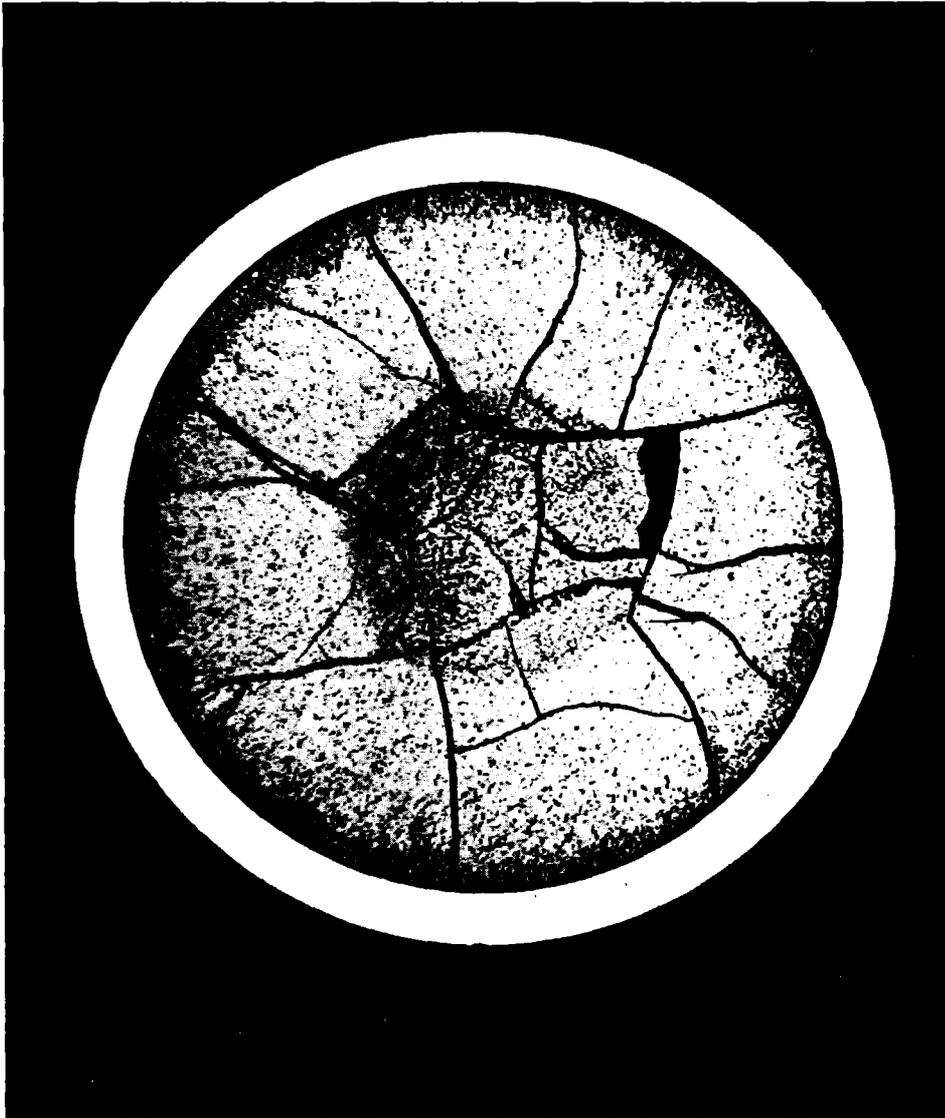


FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Abb.: 44  
 Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temperature



FR2 In-Pile Tests  
Relative Volume Increase of Burst Rods  
vs. Relative Circumferential Elongation      Abb.:45





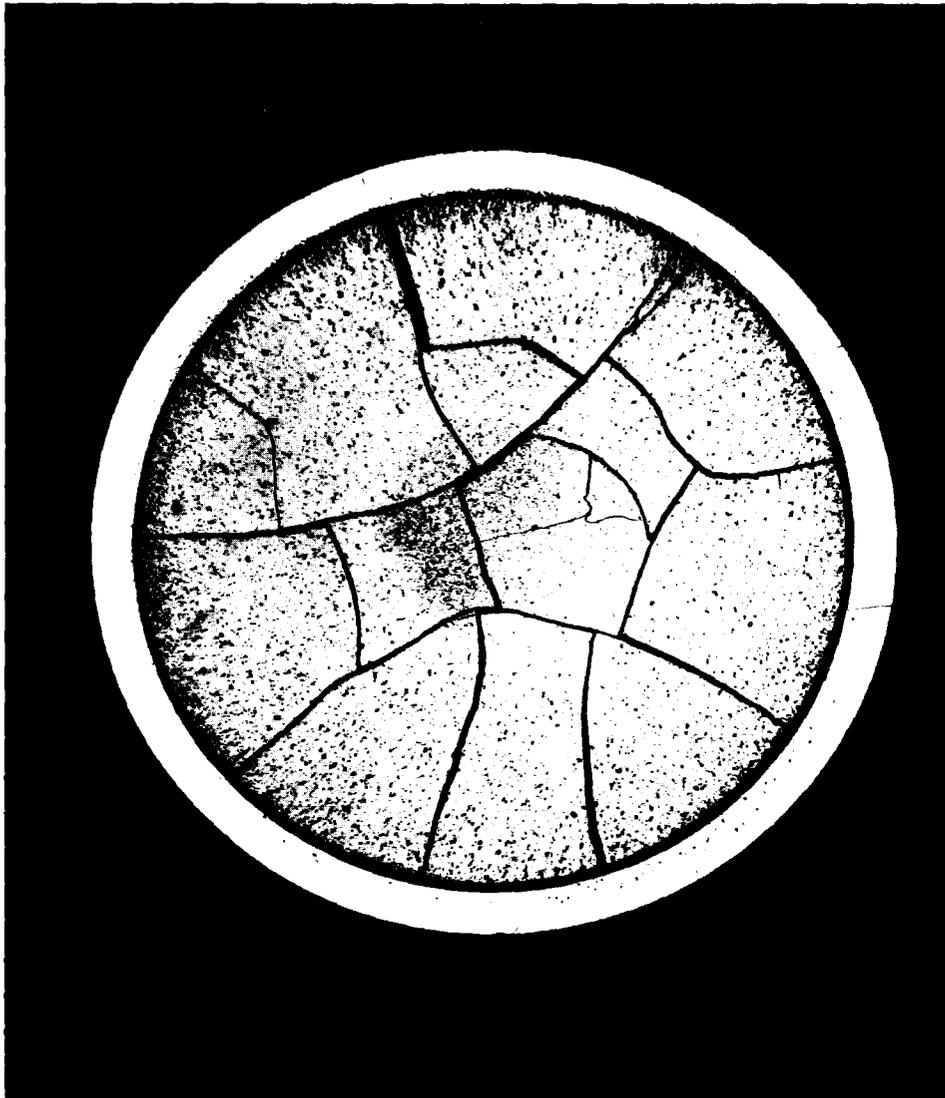
Aufn. HZ -46E - F6 - 41 - 8/3  $\overbrace{\hspace{1.5cm}}^{2\text{mm}}$

---

**KJK** IT 78 PNS 4237-160

Abbrandstab F6 (20 GWd/t<sub>u</sub>)  
Querschliff

Abb:47



HZ-46E-F6-41-7/3 10x

2 mm

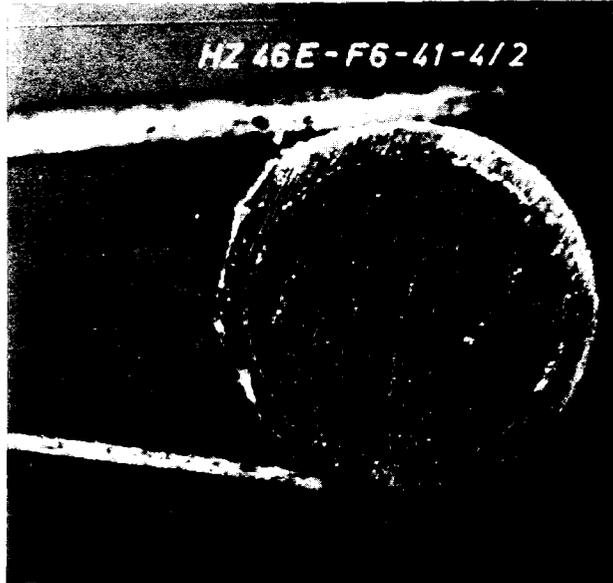
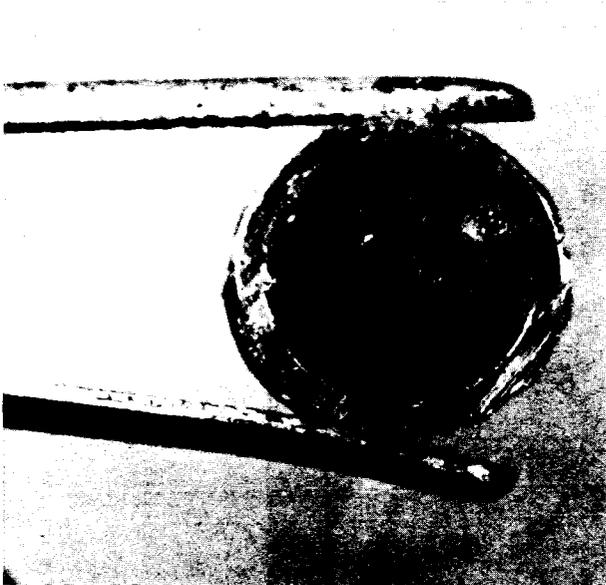
208mm v UKF



IT 78 PNS 4237-164

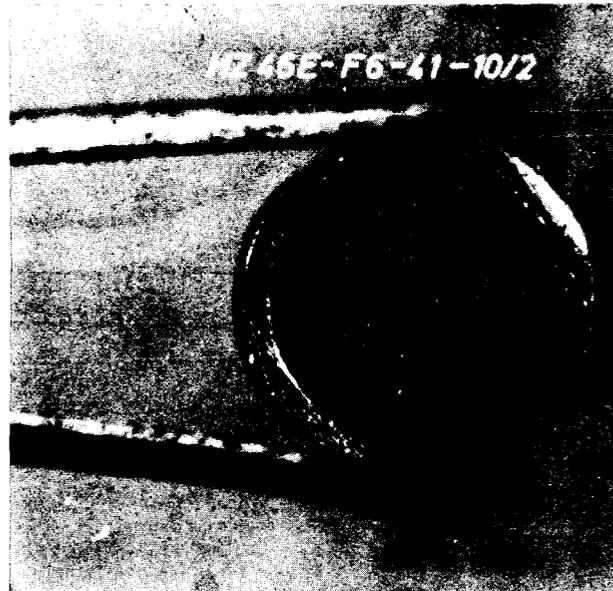
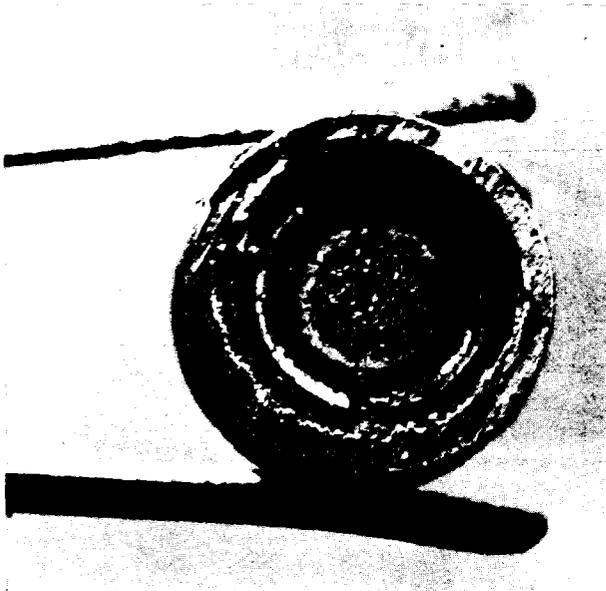
Cross Section , Test Fuel Rod F6  
20 000 MWd/t<sub>u</sub>, No Transient

Abb.:48



464

387



033

76

---

**KFK** IT 78 PNS 4237-163

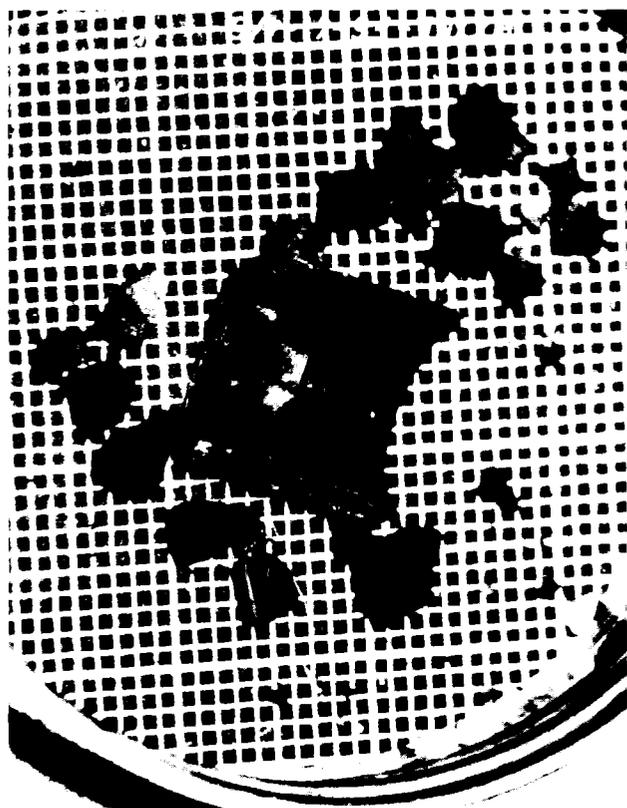
Cross Sections, Test Fuel Rod F 6  
20 000 MWd/t<sub>u</sub>, No Transient

Abb.: 49

439  
421



Cladding  
Cut  
axially



Upper half



Lower half



IT 78 PNS 4237-166

Condition of Fuel. Test Fuel Rod F6  
20000 MWd/ $t_u$ , No Transient

Abb.: 50

