



KfK 4694
März 1990

FLORESTAN- Materialtest

K. Wiehr
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 4694

FLORESTAN-Materialtest

K. Wiehr

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

FLORESTAN-Materialtest

Kurzfassung

Dieser Bericht beschreibt ein Experiment, welches das Ziel hatte, Zircaloyhüllen in einem hexagonalen Bündelverband mit einem Stabmittenabstand zu Stabdurchmesser Verhältnis von 1.2 durch Aufblähen der Hüllen unter Innendruck so stark wie möglich zu verformen. Der FLORESTAN-Materialtest, ein reines Materialuntersuchungsexperiment, wurde dazu, ähnlich wie der REBEKA-Materialtest, unter reaktoruntypischen Randbedingungen durchgeführt.

Das Bündel bestand aus 61 Brennstabsimulatoren mit Zircaloyhüllen. Bei einem nahezu konstanten Hüllrohrtemperaturverlauf von 800 °C wurden die Hüllen mit 84 bar Helium-Innendruck beaufschlagt. Die Hüllen befanden sich in stagnierender Wasserdampf Atmosphäre bei einem Systemdruck von 4 bar. Die plastische Verformung der Hüllen lief unter isothermen und nahezu adiabaten Bedingungen ab. Untypisch im Vergleich zu Reaktorstörfallbedingungen war die sehr niedrige Nachwärmeleistung, die nur zur Deckung der Wärmeverluste durch Naturkonvektion bzw. der Wärmeverluste der gut isolierten Teststrecke diente.

Zur Bewertung der erzielten Kühlkanalversperrung wurden nur die 37 inneren Stabhüllen herangezogen. Die Verformungszeiten von der Druckaufgabe bis zum Bersten betragen weniger als eine Minute. Die Verformungen der einzelnen Hüllrohre zeigten eine ausgebildete Koplanarität der Stellen maximaler Dehnung in axialer Bündelmitte. Dies führte sogar dazu, daß der 1 mm starke Bündelkasten Wölbungen nach außen aufwies.

Die Hüllrohre sind z.T. regelrecht ineinander verklemmt und gefaltet. Große Berstumfangsdehnungen von bis zu 91 % und eine daraus resultierende theoretische Kühlkanalversperrung für die inneren 37 Stäbe von 100 % über eine axiale Erstreckung von 7 cm sind das Ergebnis des Versuchs.

FLORESTAN-Material Test

Abstract

This report describes an experiment, which had the aim, to deform Zircaloy-claddings in a triangular bundle array with a pitch over diameter ratio of 1.2 as large as possible by ballooning under internal overpressure. The FLORESTAN-Material Test, which has to be regarded as a proper material test, was performed under test conditions not typical of a reactor.

The bundle consisted of 61 fuel rod simulators with Zircaloy claddings. At a nearly constant cladding temperature of 800 °C the claddings were pressurized with Helium-gas of 8.4 MPa. The atmosphere was stagnant steam of 0.4 MPa. The plastic deformation of the claddings developed under isothermal and nearly adiabatic conditions. A very low decay heat simulation, not typical of reactor accident conditions, was chosen to cover heat losses caused by natural convection of the steam and heat losses of the test section.

The assessment of the coolant channel blockage was concentrated on the clads of the 37 inner rod positions. The time of deformation from pressurization to burst was less than one minute. The plastic deformation of the claddings showed a pronounced coplanarity of the locations of the maximum ballooning at the axial midplane of the bundle. This resulted also in deformations of the bundle housing, i.e., the housing attained a convex shape.

The claddings of the rods partially were wrinkled into one another. The result of the experiment were large circumferential strains at burst up to 91 % and a resulting theoretical coolant channel blockage for the inner 37 claddings of 100 % over an axial length of 7 cm.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Versuchsrandbedingungen	2
2. Versuchseinrichtung	2
2.1 Brennstabsimulator	2
2.2 Bündelaufbau und Teststrecke	3
2.3 Instrumentierung	3
2.3.1 Instrumentierung des Bündels	3
2.3.2 Instrumentierung des Testkreislaufs	4
2.3.3 Angaben zur Meßgenauigkeit	4
2.4 Stromversorgung	4
2.5 Leistungsabgleich der Brennstabsimulatoren	5
2.6 Letzte Kontrolle unmittelbar vor Versuchsbeginn	5
2.7 Versuchsablauf	5
3. Ergebnis	6
3.1 Diskussion der Ergebnisse	7
3.1.1 Leistungssteuerung und Außenkranztemperatur	7
3.1.2 Temperaturen und Innendrucke	8
3.1.3 Bündelkastentemperaturen	10
3.2 Hüllrohrverformung	10
4. Zusammenfassung - Schlußfolgerungen	12
Literatur	13
Tabelle 1 Heizstabtemperaturen und Berstdrucke zum Berstzeitpunkt	14

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. Nr.		Seite
1	FLORESTAN Brennstabsimulator	17
2	Nennmaße des Brennstabsimulators (FLORSTAN)	18
3	Densitometerauswertung eines Temperaturscans von Heizstab 103	19
4	Gitterabstandshalter für Materialtest	20
5	FLORESTAN Versuchskreislauf (schematisch)	21
6	FLORESTAN-Materialtest Instrumentierungsplan des Bündels (Temperaturmeßstellen)	22
7	Schaltbild des Testkreislaufs	23
8	FLORESTAN-Materialtest Phasenbelegung der Transkuktoren	24
9	FLORESTAN-Materialtest Leistungsverläufe der Transduktorphasen	25
10	Versuchsablauf (Leistung, Temperatur, Druck)	26
11	Temperaturen der Eckstäbe des Außenkranzes	27
12	Temperaturen im Außenkranz	28
13	Temperaturen und Drücke der Eckstäbe des Außenkranzes	29
14	Temperaturen und Drücke des Außenkranzes ohne Eckstäbe	30

Abb. Nr.		Seite
15	Temperaturen und Drücke des 3. Kranzes	31
16	Temperaturen und Drücke des 2. Kranzes	32
17	Temperaturen und Drücke des Innenkranzes mit Zentralstab	32
18	FLORESTAN-Materialtest Berstzeiten der Zircaloy-Hüllrohre in Abhängigkeit von der Temperatur	34
19	FLORESTAN-Materialtest Temperaturen auf Hülle und Heizstab in axialer Mittelebene	35
20	Kastenwandtemperatur	36
21	FLORESTAN-Materialtest Bündelquerschnitt bei max. Kühlkanalversperrung	37
22	FLORESTAN-Materialtest Ansicht auf verformtes 61-Stabbündel (Mittelebene)	38
23	FLORESTAN-Materialtest Dehnungsprofile aller 61 Stäbe mit Kühlkanalversperrung	39
24	FLORESTAN-Materialtest Dehnungsprofil der 24 Stäbe des Außenkranzes mit Kühlkanalversperrung	40
25	FLORESTAN-Materialtest Dehnungsprofile der 37 Innenstäbe mit Kühlkanalversperrung	41

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Der Materialtest wurde im Rahmen der Konzept-Studie für einen Fortgeschrittenen Druckwasserreaktor (FDWR) durchgeführt. Dieser Reaktortyp soll sich im wesentlichen nur durch unterschiedliche Kernabmessungen von der bewährten Konstruktion des Druckwasserreaktors (DWR) unterscheiden, mit dem Ziel, die Uranausnutzung zu verbessern, d.h. höher zu konvertieren als der übliche DWR. Dies läßt sich erreichen durch eine Verringerung des Moderator- zu Brennstoffvolumenverhältnisses, womit eine Verschiebung des Energiespektrums der Neutronen vom thermischen zum epithermischen (härteren) Bereich erfolgt.

Konstruktiv läßt sich dies durch die Änderung der quadratischen Stabanordnung eines DWR mit einem Stabmittenabstand zu Stabdurchmesser Verhältnis von $p/d = 1.33$ in eine hexagonale, engere Stabanordnung für den FDWR erzielen. In verschiedenen Entwicklungsstufen - und dabei werden p/d -Verhältnisse von 1.26, 1.23, 1.17 und 1.12 diskutiert - soll dieses Ziel erreicht werden. Je kleiner das p/d -Verhältnis ausgeführt werden kann, desto höher wird die Konversionsrate, d.h. die Uranausnutzung des zu entwickelnden Kernkonzepts. Die engen Brennstabgitterkonzepte verursachen jedoch derzeit bezüglich des Nachweises der inhärenten Sicherheit noch Schwierigkeiten und zwar wegen zu großer Rechenunsicherheiten bei der Auswertung physikalischer Reaktorexperimente im Void-Fall.

1.2 Zielsetzung

Da für die weiteren, nicht ganz engen Brennstabgitterkonzepte Zircaloy-4 als Hüllrohrmaterial in Betracht gezogen wird, bestand das Ziel dieses ersten Hüllrohrverformungsexperimentes darin, Zircaloyhüllen in einem Bündel mit hexagonaler Stabanordnung und einem p/d -Verhältnis von 1.2 durch Aufblähen unter Innendruck so stark wie möglich zu verformen. Es mußte erwartet werden, daß bei einer hexagonalen Stabanordnung größere Kühlkanalversperrungen auftreten als bei einer quadratischen DWR-Anordnung. Einerseits ist der Stabmittenabstand kleiner, andererseits müssen sich die Hüllrohre in einer Sechseckanordnung weniger "quadratisch" verformen als in DWR-Anordnung, um große Kühlkanalversperrungen zu verursachen. Um die Grenzen einer möglichen maximalen Verformung und damit Kühlkanalversperrung abzustecken, wurde ein sog. FDWR-Materialtest durchgeführt. Dazu wurden Druck- und Temperaturverhältnisse gewählt, die größtmögliche Einzelstabdehnungen erwarten lassen /1/.

1.3 Versuchsrandbedingungen

Der Versuch wurde mit speziellen für den FDWR entwickelten Brennstabsimulatoren durchgeführt. Die Zircaloyhüllen hatten die Abmessungen 10.75x0.725 mm. Das Bündel bestand aus 61 Stäben in hexagonaler Anordnung mit einem $p/d = 1.2$.

Bei nahezu konstanter Hüllrohrtemperatur von 800 °C wurde der Innendruck der Stäbe von 9 bar auf 84 bar erhöht. Die Testatmosphäre war stagnierender Wasserdampf bei 4 bar Systemdruck. Dies ergab einen Differenzdruck von 80 bar, was bei 800 °C die größtmögliche Hüllrohrdehnung erwarten läßt. Durch die nahezu adiabaten Testbedingungen mußte die Leistung zur Aufrechterhaltung des Temperaturplateaus deutlich unter den 5 %-Wert der Nachwärmeleistung abgesenkt werden. Der Innendruckverlauf in den Stäben ergab sich in jedem Stab individuell je nach Dehnung.

2. Versuchseinrichtungen

2.1 Brennstabsimulator

Als die Entwicklungsarbeiten für ein neues Core eines DWR aufgenommen wurden und auch bis heute endgültige Abmessungen noch nicht festgeschrieben sind, wurden im KfK Brennstabsimulatoren der bewährten REBEKA-Bauserie auf FDWR-Verhältnisse modifiziert. Durch das engere p/d -Verhältnis mußte die leistungsfreisetzende Brennstablänge reduziert und damit auch der axiale Leistungsfaktor erhöht werden.

Für die ersten Experimente im Rahmen des FDWR-Programms wurde der Heizstabaufbau der REBEKA-Brennstabsimulatoren /2/ beibehalten, wobei jedoch die beheizte Länge auf 2024 mm verkürzt und der axiale Leistungsfaktor auf etwa 1.3 erhöht wurde (s. Abb. 1). Die Ringpellets wurden beibehalten und die Brennstabsimulatorhüllen je nach Versuchsziel als Zyr-4-Hüllen (alte DWR-Abmessungen) oder als Stahlhüllen, Glattrohr oder Rippenrohr, eingesetzt. Im vorliegenden Verformungsexperiment fanden Zircaloy-4-Hüllen ihren Einsatz. Abb. 2 zeigt die Nennmaße des FDWR-Brennstabsimulators. Die Herstellungsmethoden und die Qualitätskontrollen sind weitgehendst mit denen bei der REBEKA-Heizstabfertigung identisch. Abb. 3 gibt einen Temperaturscan /2/, d.h. das Ergebnis einer zerstörungsfreien Überprüfung der axialen Leistungsverteilung eines Heizstabes

wieder. Die Gesamtlänge der Brennstabsimulatoren einschließlich der oberen Kaltenden beträgt 5600 mm, wobei jedoch der Kaltendenbereich nur 6 mm im Außendurchmesser aufweist. Er simuliert im Bündelverband die Versperrung der Niederhaltevorrichtung eines FDWR-Kerns.

2.2 Bündelaufbau und Teststrecke

Die 61 Brennstabsimulatoren werden durch 6 Wabengitterabstandshalter (Werkstoff Nr. 4541), wie sie für den SNR 300 entwickelt wurden, in hexagonaler Anordnung gehalten. Der Aufbau und die Abmessungen des aus Streifenblechen gefertigten Abstandshalters ist aus Abb. 4 zu entnehmen.

Der axiale Abstand der Abstandshalter (AH) untereinander beträgt 400 mm, wobei die Oberkante des 3. AH 100 mm unterhalb der axialen Mitte der beheizten Länge des Brennstabsimulators positioniert ist (s. Abb. 4, rechts). Ferner ist in dieser Abbildung die axiale Positionierung der Innenthermoelemente (TI) sowie des in axialer Mittel angebrachten Außenhüllrohrthermoelementes angegeben. Die Thermoelementausführung und Anbringung ist identisch mit der bei den REBEKA-Bündelexperimenten [2].

Das untere Ende des sechseckigen Bündelführungskastens befindet sich auf gleicher axialer Höhe mit dem unteren beheizten Bündelende. Die gesamte Kastenlänge beträgt 4090 mm.

Abb. 5 gibt stark vereinfacht den Testkreislauf für die Thermodynamik- und Hüllrohrverformungsexperimente des FDWR-Programms wieder. Er entspricht in allen wesentlichen Komponenten denen der REBEKA-Bündelexperimente.

2.3 Instrumentierung

2.3.1 Instrumentierung des Bündels

In Abb. 6 ist die Positionierung der Stäbe im Bündel mit Stabdurchmesser, Stabmittenabstand, Kasteninnenmaß und Kastenwandstärke sowie die Positionierung der Thermoelemente in der Draufsicht im Bündel angegeben.

In den Kreisen sind neben den Stabnummern Punkte mit Zahlen z.T. von 1 bis 6 eingezeichnet, die die radiale Position der Innenthermoelemente angeben. 51 Stäbe sind mit je 3 Innenthermoelementen in axialer Mitte der beheizten Länge

versehen, wovon jedoch jeweils nur eines auf den Rechner geschaltet ist. 10 Stäbe besitzen jeweils 6 Innenthermoelemente in verschiedenen axialen Positionen, wovon jeweils 2 ebenfalls in axialer Mitte angebracht sind (siehe Tabelle auf Abb. 6). Nur 10 Stäbe besitzen ein außen auf die Zyr-Hülle aufgepunktetes Thermo-element (TH).

Die auf der Kastenaußenwand befestigten Thermoelemente sind mit TK 1-8 bezeichnet, wovon TK 3-5 in axialer Mitte (1012 mm) sitzen. Die übrigen Kasten-thermoelemente sind axial auf einer Mantellinie angeordnet.

Der Aufbau und die Anbringung aller Thermoelemente entspricht der REBEKA-Instrumentierung /2/.

2.3.2 Instrumentierung des Testkreislaufs

Abb. 7 zeigt das Schaltbild des Testkreislaufs mit Temperatur-, Druck-, Niveau- und Durchflußmeßstellen.

2.3.3 Angaben zu Meßgenauigkeit

Die Angaben zur Meßgenauigkeit können ebenfalls aus /2/ entnommen werden.

2.4 Stromversorgung

Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls wie bei REBEKA durch 3 Leistungstransduktoren, zwei dreiphasige 600 KVA- sowie einen kleineren einphasigen 200 KVA-Transduktor.

Bei Transduktor I ist jede Phase mit je 8 Stäben des Außenkranzes und bei Transduktor II mit je 12 Stäben des Innenbereiches belastet. Der Zentralstab wird von Transduktor III gespeist. Abb. 8 zeigt die Beschaltung der einzelnen Transduktorphasen.

2.5 Leistungsabgleich der Brennstabsimulatoren

Der Leistungsabgleich der einzelnen Stäbe des 61 Stab-Bündels erfolgte analog der Beschreibung in /2/ und zwar waren dabei 4 Iterationsschritte notwendig, bis die Innentemperaturen bei 550 °C eine Abweichung von weniger als ± 3 K zeigten. Die Abgleiche fanden wie auch der Verformungsversuch selbst in stagnierender Wasserdampfatmosfera statt.

2.6 Letzte Kontrollen unmittelbar vor Versuchsbeginn

Nach erfolgtem Leistungsabgleich der Brennstabsimulatoren wurden unmittelbar vor Versuchsbeginn noch einmal folgende Arbeiten durchgeführt:

- Überprüfung der Sicherheitsabschaltssysteme
- Überprüfung der Transduktoren und des Leistungsumschaltsystems
- Rechnerabgleich (Meßwertverstärker)
- Eichung aller Druck- und Differenzdruckaufnehmer über den Rechner
- Überprüfung aller Stäbe auf Dichtheit bei 80 bar über 9 min.
- Überprüfung aller Ventilstellungen
- Überprüfung der Dampfmassenströme und des Wasserspiegels im unteren Plenum der Teststrecke, um zu gewährleisten, daß in der Teststrecke selbst stagnierende Dampfverhältnisse bei 4 bar und etwa 145 °C vorlagen (Gleichgewichtszustand).

2.7 Versuchsablauf

Um eine nahezu stagnierende Dampfatmosfera im Bündel zu gewährleisten, wurden die Wasserzu- und -abströmventile im unteren Plenum der Teststrecke völlig geschlossen, nachdem das untere Teststreckenplenum mit Wasser von Siedetemperatur gefüllt worden war (s. Abb. 7). Nach erreichtem Gleichgewichtszustand (4 bar, 145 °C), wurde die Leistung auf das Bündel zugeschaltet. Die Stäbe der äußeren Reihe wurden über Transduktor I mit etwa 3 kW/Stab beaufschlagt, alle inneren Stäbe über Transduktor II und III mit etwa 2,9 kW/Stab. Nach Erreichen einer Temperatur von etwa 790 °C, gemessen mit Hilfe der Innenthermoelemente, wurde die Leistung heruntergeschaltet auf einen Wert, der zu einem Temperaturplateau bei 800 °C führen sollte. Diese Leistung sollte gerade ausreichend hoch sein, um Wärmeverluste der Teststrecke an den Dampf Führungskasten und das gut isolierte Druckrohr der Teststrecke sowie die Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion des Dampfes in der Teststrecke zu decken.

Die gewählten Leistungswerte für Transduktor 2 und 3 waren so gut, daß vor Versuchsbeginn, also der Druckaufgabe auf die Stäbe, keine Leistungskorrektur nötig war. Die Temperaturen des Außenkranzes, der von Transduktor 1 versorgt wurde, sanken jedoch ab, so daß die Leistung des Transduktors 1 dreimal erhöht und schließlich wieder etwas abgesenkt werden mußte, um auch für die Temperaturen der Außenstäbe ein Temperaturplateau von etwa 800 °C zu erreichen. Die Leistungswerte für die Innenstäbe lagen bei etwa 80 W/Stab, für die Außenstäbe nach den erfolgten Korrekturen bei etwa 750 W/Stab (s. Abb. 9). Etwa 30 Sekunden nach der letzten Leistungskorrektur und dem Erreichen des gewünschten Temperaturplateaus wurde der Druck in den Stäben von etwa 9 bar auf 84,1 bar erhöht und 10 Sekunden später die 61 Magnetventile geschlossen, wodurch die Gasversorgung von den Stäben abgekoppelt war.

Jeder Stab war nun ein in sich abgeschlossenes Drucksystem. Durch Hüllrohrverformungen, d.h. zunehmendes Dehnen der Stabhüllen sank der Innendruck bis zum Bersten der Hüllen individuell ab.

Etwa 15 Sekunden nach Bersten der letzten Stäbe wurde die Leistung abgeschaltet und das Bündel durch Zuschalten einer Dampfströmung (Öffnen von Ventil 7.3) gekühlt.

3. Ergebnis

Einen Überblick über den Verlauf, d.h. die Qualität des vollständigen Versuchsablaufes über die gesamte Zeit der Datenerfassung gibt Abb. 10 wieder. Der eigentliche Versuch, der mit der Druckerhöhung in den Brennstabsimulatoren (etwa 260 Sekunden) beginnt, erstreckt sich nur auf etwa 100 Sekunden der Gesamtzeit. Die Abbildung zeigt den Leistungsverlauf des Transduktors 2/Phase 3, die Temperaturverläufe des Zentralstabes und der diesen umgebenden 6 innersten Stäben sowie die dazugehörigen Innendruckverläufe. Etwa 10 Sekunden nach Zuschalten der Grundlast wird die Leistung auf etwa 2,9 kW/Stab hochgeschaltet. Die Innentemperaturen des Bündels in axiale Bündelmitte steigen mit etwa 5.5 K/s an. Bei etwa 790 °C wird die Leistung reduziert, um bei etwa 800 °C das gewünschte Temperaturplateau zu erreichen.

Das Ergebnis des Tests läßt sich zusammenfassen:

- a) Die Verformungszeiten von der Druckaufgabe bis zum Bersten, ausgewertet nach Kranzanordnung betragen:

Kranz Anzahl d.Stäbe	Berstintervall /s/		
	ohne Besonderheiten	Ausreißer	Eckstäbe (außen)
Außenkranz 23 + 1*St.	20.8 - 43.3	52.2	55.8 - 86.4
3. Kranz 18 St.	23.5 - 39.0	50.6	-
2. Kranz 12 St.	16.5 - 25.8	-	-
Innenkranz m. Zentrum 7 St.	12.8 - 22.6	-	-

* Bei einem Stab im Außenkranz (Nr. 123) sinkt der Innendruck des Stabes nach Druckaufgabe sehr rasch auf etwa 41.6 bar ab, was vermutlich auf ein nicht exaktes Schließen des Magnetventils zurückzuführen ist. Es findet keine Verformung der Zircaloyhülle statt.

- b) Es sind relativ große Berstumfangsdehnungen bis zu 91 % aufgetreten.
- c) Die maximale theoretische Kühlkanalversperrung der inneren 37 Zircaloyhüllen beträgt 100 % über eine axiale Erstreckung von etwa 70 mm.
- d) Es liegt eine ausgeprägte Koplanarität der Stellen maximaler Dehnungen im axialen Bereich von 1030 bis 1100 mm vor.

3.1 Diskussion der Ergebnisse

3.1.1 Leistungssteuerung und Außenkranztemperatur

Die Steuerung der Leistung der verschiedenen Transduktoren wurde bereits unter Pkt. 2.7 behandelt.

Die Auswirkung der Leistungsnachsteuerung von Transduktor I auf die Innentemperaturverläufe des Außenkranzes der Brennstabsimulatoren ist in Abb. 11 und 12 wiedergegeben. In Abb. 11 sind die Temperaturverläufe der 6 Eckstäbe, in Abb. 12 diejenigen der 6 mittleren Stäbe jeder Sechskantseite des Außenkranzes wiedergegeben. Da der 1 mm starke Bündelführungskasten nicht direkt beheizt ist, sondern durch das Bündel aufgeheizt werden muß, ist die Wärmeabgabe der

Eckstäbe an den Kasten höher als von den anderen Stäben des Außenkranzes. Dies ist deutlich im unterschiedlichen Verlauf der in den beiden Abbildungen geplotteten Temperaturen zu erkennen. Die Abbildungen zeigen, daß das Ziel, auch für den Außenkranz ein Temperaturplateau von 800 °C während der Verformung der Hüllrohre einzustellen, gut erreicht wurde. Nur die Temperaturen der Eckstäbe liegen im Mittel etwa 25 K tiefer.

3.1.2 Temperaturen und Innendrucke

Die Abbildungen 13-17 zeigen die Heizstabtemperaturen sowie die dazugehörigen Innendruckverläufe über dem Zeitabschnitt zwischen der Druckaufgabe und dem Bersten der Hüllrohre.

Abb. 13 gibt den Zeitausschnitt für die Eckstäbe des Bündels wieder. Die niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu den übrigen Stäben des Außenkranzes spiegeln sich in relativ langen Hüllrohrverformungszeiten wieder.

Abb. 14 zeigt die Temperatur- und Innendruckverläufe der übrigen 18 Stäbe des Außenkranzes (4. Ring). Die Druckaufgabe erfolgt aus einer He-Gasflasche über ein Druckminderventil. Nach etwa 10 Sekunden werden über die Magnetventile die gefüllten Brennstabsimulatoren abgeschlossen und die Druckaufgabeseite druckentlastet. Bei Stab Nr. 123 sinkt der Innendruck nach Schließen der Magnetventile sehr rasch auf 41.6 bar ab. Es findet keine Verformung der Zircaloyhülle statt. Ursache für das Absinken des Druckes in Stab 123 ist das nicht sofort korrekt schließende Magnetventil. Vermutlich behinderte ein Schmutzteilchen im Ventilsitz das korrekte Schließen. Die Verunreinigung wurde jedoch durch die Gasströmung ausgespült, so daß nach etwa 8 Sekunden Dichtigkeit erreicht wurde, worauf der konstante Druckverlauf bei 41.6 bar hinweist.

Die Abbildungen 15-17 geben die Temperatur- und Innendruckverläufe des 3., 2. und des Innenringes mit Zentralstab wieder. Die Plots zeigen nahezu konstante und gleich hohe Temperaturverläufe im Innenbereich des Bündels. Sie zeigen jedoch auch die hohe Empfindlichkeit der Temperatur auf die Hüllrohrverformung, hier auf die Berstzeiten.

Tabelle 1 gibt die in den Heizstabhüllen gemessenen Temperaturen zum Berstzeitpunkt sowie die dazugehörigen Berstdrucke für alle Hüllen der Brennstabsimulatoren wieder.

In Abb. 18 sind die gemessenen Heizstabtemperaturen zum Berstzeitpunkt über der Berstzeit aufgetragen. Die Heizstabtemperaturen stimmen zu diesem Zeitpunkt fast vollständig mit den Hüllrohrtemperaturen überein. Die radialen Temperaturgradienten in den Brennstabsimulatoren, die sich in der Aufheizphase gebildet haben, gleichen sich bis zum Verformungsbeginn wegen der isothermen und nahezu adiabaten Prozeßführung wieder aus. Abb. 19 zeigt die Verläufe von Heizstab- und Hüllrohrtemperatur von zwei verschiedenen Brennstabsimulatoren. Die gemessenen Heizstabtemperaturen zeigen von innen nach außen eine leicht fallende Tendenz des Temperaturniveaus für den Innenkranz bis zum dritten Kranz. Dies sind alle Stäbe mit praktisch der gleichen Stableistung. Da die konvektive Kühlung bei quasi stagnierender Dampf Atmosphäre (geringe Naturkonvektion ist nicht zu unterbinden) bei einer derartigen Versuchsführung nur relativ klein ist, wird der radiale Wärmestrom durch Strahlung in Richtung kälteres Dampfführungsrohr meßbar. Es bildet sich ein radiales Temperaturprofil im Bündel aus, was natürlich auch die Ausbildung azimuthaler Temperaturen auf dem Hüllrohrumfang zur Folge hat, mit zunehmender Tendenz nach außen. Eine genaue Betrachtung des Bündelquerschnitts (Abb. 21) bestätigt diese Aussage.

Die in Abb. 18 aufgetragenen Heizstabtemperaturen des Außenkranzes liegen zum Zeitpunkt des Berstens etwas höher im Vergleich zu den Temperaturen des inneren Bündelbereichs. Dafür gibt es zwei Gründe:

1. Die Leistung eines Brennstabsimulators des Außenkranzes ist etwa zehnmal höher als die eines Innenstabes. Die Brennstabsimulatoren des Außenkranzes heizen den Bündelkasten mit auf, der im Zeitintervall der Verformungsphase in axialer Bündelmitte eine um etwa 150 K niedriger liegende Temperatur als die Brennstabsimulatoren selbst aufweist. Dadurch entstehen einerseits azimuthale Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohrumfang, andererseits besteht ein radiales Temperaturprofil im Brennstabsimulator des Außenkranzes. Daher weisen die in Abb. 18 aufgetragenen Heizstabtemperaturen höhere Werte auf als die Hüllrohrtemperaturen. Die tatsächlichen Hüllrohrtemperaturen, die für das Bersten verantwortlich sind, liegen zum Berstzeitpunkt auf jeden Fall niedriger.
2. Wie die Abbildungen 13 und 14 zeigen, steigen die Heizstabtemperaturen des Außenkranzes auch während der Verformung noch leicht an. Bei den längsten Berstzeiten sind dies Werte bis zu etwa 15 K. Bei den kürzeren Berstzeiten sind es jedoch nur wenige Grade. Die für den Berstzeitpunkt aufgetragenen Heizstab-

temperaturen der Brennstabsimulatoren des Außenkranzes liegen daher alle etwas höher als die mittleren Temperaturen während der Verformungszeit.

3.1.3 Bündelkastentemperaturen

Abb. 20. zeigt die Kastentemperaturen im Zeitbereich der Hüllrohrverformung für verschiedene axiale Positionen. Die Temperaturverläufe TK 3.1 - TK 3.3 werden in axialer Bündelmitte gemessen. Bei 261,4 Sekunden erfolgt die Druckaufgabe. Bei 274 bzw. 278 Sekunden zeigen TK 3.1 - TK 3.3 einen Temperaturanstieg von etwa 20 K. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Zircaloyhüllen des äußeren Bündelkranzes den Bündelkasten berühren und beginnen, ihn zu verformen. Der Grad der Verformung des Kastens ist deutlich auf Abb. 21 zu erkennen. Diese Abbildung gibt einen Querschnitt durch das mit Epoxydharz ausgegossenen Bündel wieder.

3.2 Hüllrohrverformung

Die Konturen der verformten Zircaloyhüllen in Abb. 21 spiegeln die zeitliche Folge des Berstens der Zircaloyhüllen, die in Abb. 18 dargestellt ist, wieder. Die Hüllen des Innenkranzes mit Zentralstab bersten als erste Gruppe und die nun vom Innendruck entlasteten Hüllen werden von den sich noch verformenden Hüllen des zweiten Kranzes zusammengedrückt. Die Hüllen des dritten Kranzes bersten noch etwas später als die des zweiten Kranzes und zeigen eine weniger zusammengedrückte Kontur mit größeren kreisähnlichen Versperrungsflächen. Die Hüllen des Außenkranzes, die der Eckstäbe ausgenommen, bersten im Zeitintervall des zweiten und dritten Kranzes bei erhöhtem Druckniveau (siehe Tab. 1) und verursachen das Aufbeulen des Kastens. Sie sind relativ wenig zusammengedrückt, weisen jedoch alle starke azimutale Temperaturverteilungen auf, was das höhere mittlere Druckniveau beim Bersten gegenüber den Innenstäben (etwa 2-3 bar) erklärt. Die unterschiedliche Wandstärkenabnahme mit der dickeren Wandstärke zur kälteren Kastenwand hingerrichtet ist deutlich in der Abbildung 21 zu erkennen. Die Eckstäbe bersten als letzte und weisen nahezu kreisrunde Konturen der Hüllen auf.

Ein Teil der Hüllen des Außenkranzes birst unterhalb des mittleren Abstandshalters. Verantwortlich dafür ist die sich im Bündel durch Naturkonvektion ausbildende Strömung. Im Innenbereich des Bündels bildet sich eine schwach aufwärtsgerichtete Strömung aus, wohingegen im Außenbereich des Bündels eine

schwach abwärtsgerichtete Strömung, durch die kältere Kastenwand hervorgerufen, vorherrscht.

Abb. 22 zeigt eine Ansicht auf das verformte 61-Stabbündel im axialen Mittelbereich in der Mittelebene. Die starke Verformung der Hüllen im Mittelbereich des Bündels und eine ausgeprägte Koplanarität der Berststellen sind deutlich zu erkennen. Die ausgeprägte Koplanarität der Berststellen im Innenbereich des Bündels ist durch die nahezu adiabate Prozeßführung bedingt. Die Verformung beginnt im heißesten Bereich in Bündelmitte. Durch die sich verschwächende Wandstärke nimmt die Spannung zu, die Temperatur der Hülle bleibt jedoch konstant, da die äußere Kühlung fehlt. Damit nimmt die Dehnung an der Stelle einmal begonnener Verformung weiter zu. Es entsteht eine ausgeprägte koplanare, lokale Hüllrohrverformung.

In einem Bündelexperiment mit ähnlichem integralen Hüllrohrtemperaturverlauf, jedoch bei repräsentativer Wärmeleistung und Kühlung während der Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles, führt eine lokal sich vergrößernde Hüllrohroberfläche lokal auch zu einer Hüllrohrtemperaturabsenkung und es kommt zu einer Verlangsamung bzw. zum Stillstand der Verformung. Andere axiale Hüllrohrbereiche, bei denen der Spalt zwischen Wärmequelle und Hülle kleiner ist, erreichen nun höhere Temperaturen und beginnen zu verformen. Dieser negative Temperaturreckkopplungseffekt über eine sich vergrößernde Hüllrohroberfläche fehlt jedoch beim FLORESTAN-Materialtest. Das axiale Leistungs- bzw. Temperaturprofil bei fehlender Kühlung der Hülle ist also die Ursache für diese koplanare Dehnung im inneren Bereich des Bündels.

Abb. 23 zeigt die Dehnungsverläufe aller 61 Hüllen über der axialen beheizten Länge sowie die sich daraus errechnende Kühlkanalversperrung.

Betrachtet man die Dehnungsverläufe der Hüllen des äußeren Kranzes und der inneren 37 Hüllen getrennt (Abb. 24 und 25), so werden die oben beschriebenen Phänomene noch deutlicher. Die Außenhüllen zeigen zwei Dehnungsmaxima, eines in axialer Bündelmitte, das zweite unterhalb des nächsten Abstandshalters. Die 37 Innenhüllen dagegen weisen ein ausgeprägtes Dehnungsmaximum etwas oberhalb der Bündelmitte auf. Dabei treten Umfangsdehnungszunahmen von bis zu 91 % auf. Daraus errechnet /3/ sich für den Innenbereich des Bündels eine theoretische Kühlkanalversperrung von 100 % über einen axialen Bereich von etwa 7 cm. Die Rechnung berücksichtigt jedoch nicht die starke Einfaltung der

Hüllrohrkonturen, sondern errechnet Sechseckkonturen, die die Kühlkanäle versperren. Das tatsächliche Bild der Verformungen (Abb. 21) zeigt, daß selbst bei so hohen Verformungsgraden noch kleine Kühlkanalöffnungen selbst im Bereich maximaler Kühlkanalversperrung vorhanden sind.

4. Zusammenfassung - Schlußfolgerungen

- Die Verformungszeiten von der Druckaufgabe (80 bar bei 800 °C) bis zum Bersten sind kleiner als eine Minute.
 - Es stellt sich eine ausgeprägte Koplanarität der Berststellen in axialer Bündelmitte ein.
 - Die maximale Umfangsdehnung beträgt 91 %.
 - Daraus errechnet sich eine theoretische Kühlkanalversperrung von 100 % über eine axiale Länge von 7 cm.
 - Trotzdem verbleiben praktisch, wenn auch stark verformt, noch offene Kühlkanäle zwischen den Brennstabsimulatoren.
-
- Das Verformungspotential der Zircaloyhüllen in hexagonaler Geometrie ist sehr groß,
 - Ein Hüllrohrverformungsexperiment unter repräsentativen Kühlbedingungen mit FDWR-Hüllrohr und richtigem p/d ist erforderlich.

Literatur

- /1/ H.G. Weidinger, G. Cheliotis, H. Watzinger, H. Stehle; Loca-Fuel Rod Behaviour of KWU-Pressurized Water Reactors, CSNI-Report No. 13, Spatind, Norway, Sept. 1976
- /2/ K. Wiehr, REBEKA-Bündelversuche, Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zircaloyhüllen und einsetzender Kernnotkühlung. Abschlußbericht, KfK 4407, Mai 1988
- /3/ H.J. Neitzel, Ermittlung der Kühlkanalversperrung im Stabbündel bei Experimenten zum Kühlmittelverluststörfall eines Druckwasserreaktors. Im Anhang des KfK-Berichts Nr. 3842, März 1985 (Datenbericht REBEKA 5)

Transd. 1/3 x 8
Außenkranz

Stab Pos.	Stab Nr.	Berstzeit [sec]	Heizstabtemperatur		Druck		Trans. Phase/Stab
			Kanal Nr.	Temp. °C	Kanal Nr.	bar	
27	11	86.4	30	766,7	228	69,5	1.1.1
36	12	38.8	31	791,9	219	69,5	1.1.2
44	13	25.6	32	806	211	68,8	1.1.3
51	16	29.5	33	800,3	204	68	1.1.4
57	21	64	34	781,9	198	65,5	1.1.5
58	24	34	35	805,9	197	65	1.1.6
59	31	25.6	36	811,2	196	67	1.1.7
60	42	26	37	804,1	195	67	1.1.8
61	57	58	38	784,3	194	68	1.2.1
56	61	31,6	39	802,3	199	68	1.2.2
50	63	20,8	40	810,3	205	67,5	1.2.3
43	66	52,2	41	792,3	212	63,5	1.2.4
35	67	85,4	42	766,4	220	69,0	1.2.5
26	71	43,3	43	787,9	229	65	1.2.6
18	75	29,5	44	804,5	240	65,5	1.2.7
11	90	34,8	45	798,1	247	64	1.2.8
5	116	55,8	46	775,1	253	69	1.3.1
4	117	42,2	47	793,5	254	66	1.3.2
3	119	27	48	803,4	255	63,5	1.3.3
2	120	29,2	49	799,1	256	67,5	1.3.4
1	121	81,8	50	784,9	261	61,5	1.3.5
6	123	-	51	-	252	-	1.3.6
12	124	26	52	807,1	246	67	1.3.7
19	125	41,8	53	797,8	236	65,5	1.3.8

TAB. 1 Heizstabtemperaturen und Berstdrücke zum Berstzeitpunkt

Transd. 2/3 x 12
Innere Kränze

Stab Pos.	Stab Nr.	Berstzeit [sec]	Heizstabtemperatur		Druck		Trans. Phase/Stab
			Kanal Nr.	Temp. °C	Kanal Nr.	bar	
28	115	37,8	54	785,3	227	66	2.1.1
37	126	31	60	790,7	218	65	2.1.2
45	127	28,2	61	793,6	210	64	2.1.3
52	129	32,2	62	788,8	203	61,5	2.1.4
53	130	23,5	63	796,6	202	63,5	2.1.5
54	131	26,6	64	795,4	201	64,5	2.1.6
55	122	32,2	65	790,9	200	65	2.1.7
49	133	29,2	71	795,3	206	65	2.1.8
42	134	30,6	72	795,7	213	63	2.1.9
34	135	50,6	73	785	221	63,5	2.1.10
25	136	30,6	74	790	230	63,5	2.1.11
17	137	29	75	792,6	241	62,5	2.1.12
10	138	39	76	786,6	248	64	2.2.1
9	143	28,5	77	791,6	249	67	2.2.2
8	139	26,6	83	787,6	250	61,5	2.2.3
7	140	31,2	84	788,4	251	63,5	2.2.4
13	141	25,2	85	791,8	245	59,5	2.2.5
20	142	30	86	794,4	235	60	2.2.6
29	145	25,8	90	795,7	226	62,5	2.2.7
38	144	22,9	93	799,4	217	66	2.2.8
46	146	20,0	94	799,6	209	64	2.2.9
47	148	22,6	95	801,7	208	61,5	2.2.10
48	147	22,4	96	798	207	63,5	2.2.11
41	149	19,6	102	804,1	214	62,5	2.2.12

TAB. 1 Heizstabtemperaturen und Berstdrücke zum Berstzeitpunkt

Transd. 2/3 x 12
 Transd. 3/1 x 1
 Innere Kränze
 Zentralstab

Stab Pos.	Stab Nr.	Berstzeit [sec]	Heizstabtemperatur		Druck		Trans. Phase/Stab
			Kanal Nr.	Temp. °C	Kanal Nr.	bar	
33	151	24,5	106	798,2	222	64	2.3.1
24	150	23,3	109	797,3	231	63	2.3.2
16	152	23,4	110	790,7	242	65	2.3.3
15	154	22,6	114	800,3	243	64	2.3.4
14	153	18,6	117	794,6	244	67,5	2.3.5
21	156	16,5	118	799,6	234	61,5	2.3.6
30	158	16,7	119	803,2	225	66	2.3.7
39	157	20,6	125	805,2	216	63	2.3.8
40	159	22,6	126	807,2	215	64	2.3.9
32	160	12,8	127	805,1	223	67,5	2.3.10
23	163	15,9	128	803,5	232	66	2.3.11
22	161	12,8	132	802,4	233	67,5	2.3.12
31	155	13,9	135	807,1	224	64,5	3.1.1

TAB. 1 Heizstabtemperaturen und Berstdrücke zum Berstzeitpunkt

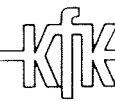
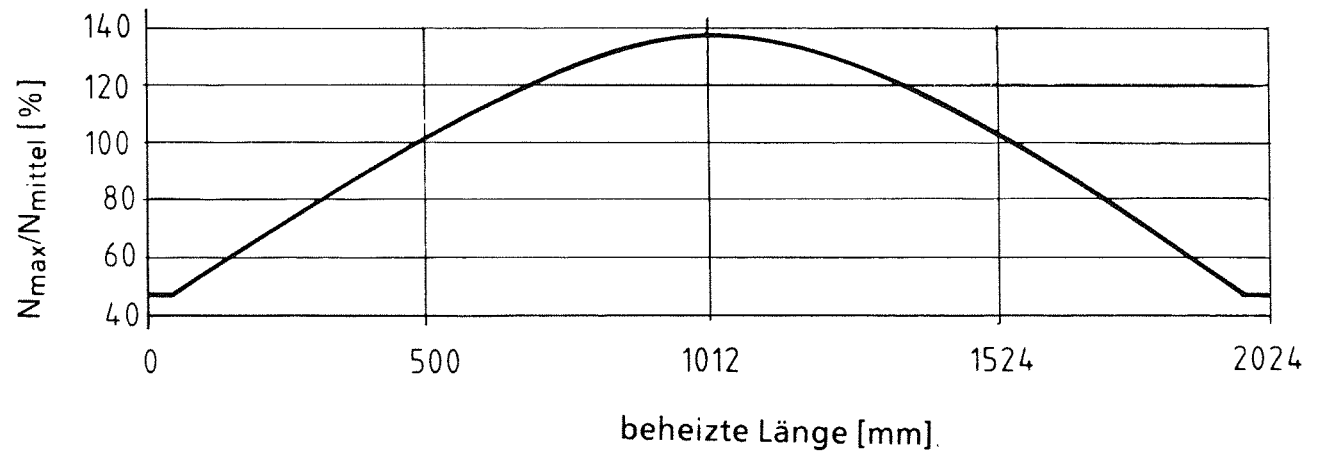
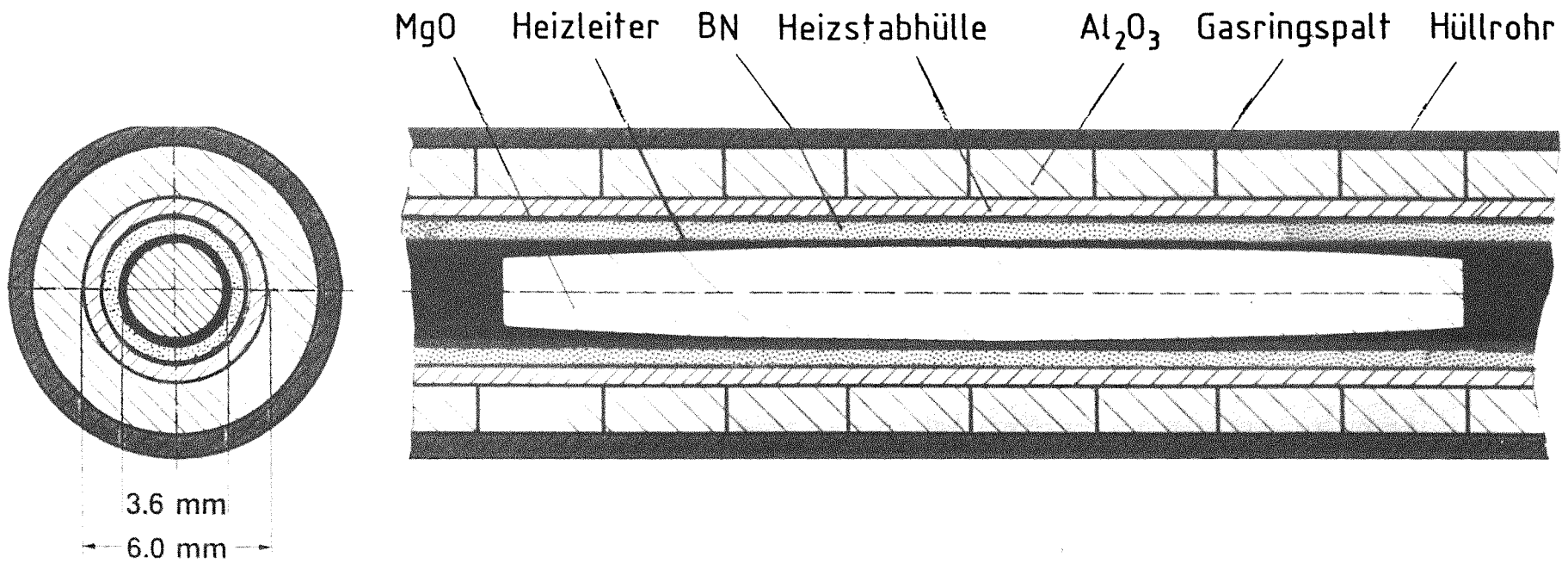
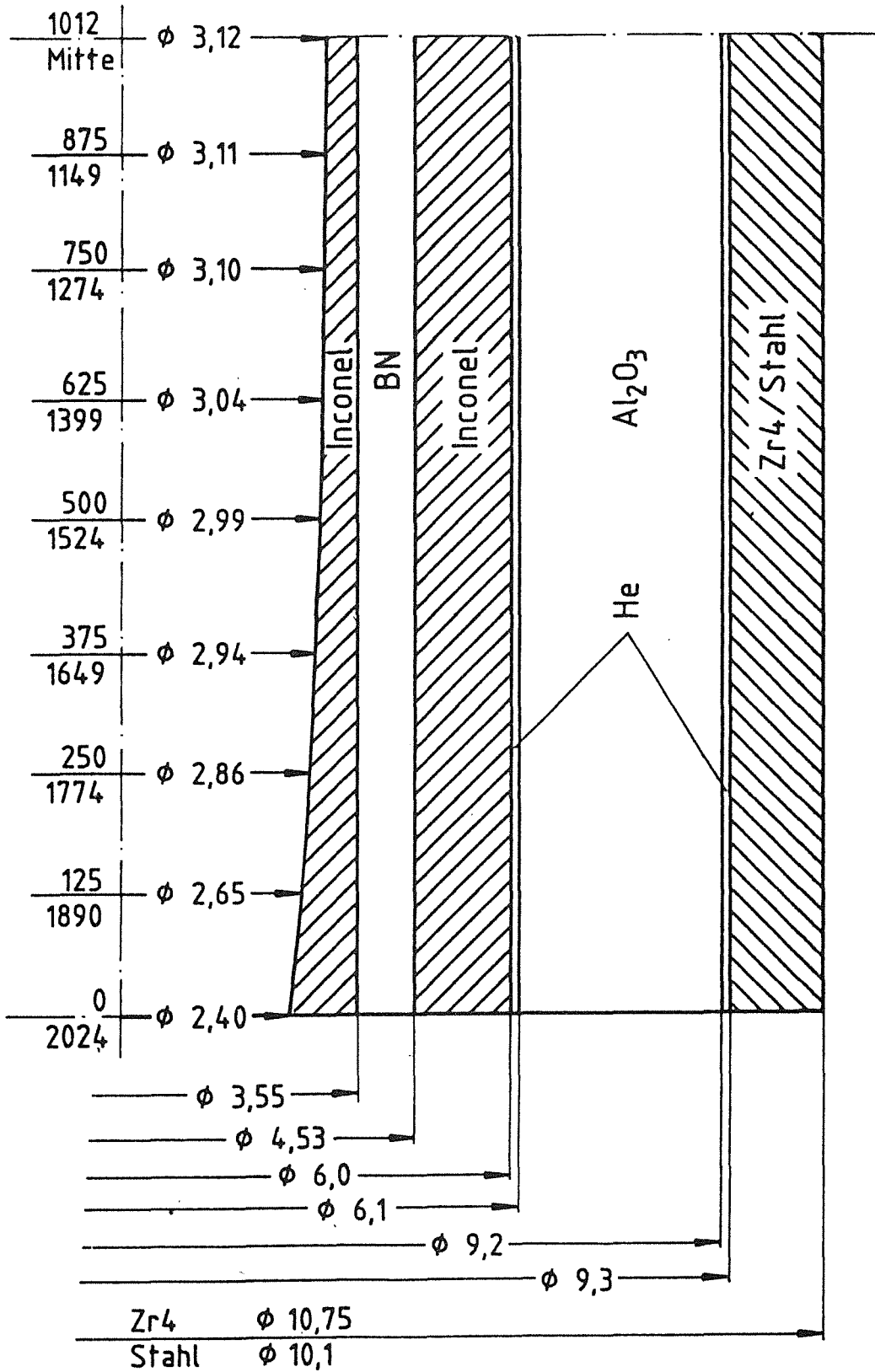


Abb. 1 FLORESTAN Brennstabsimulator



alle Maße in mm



Abb. 2 Nennmaße des Brennstabsimulators (FLORESTAN)

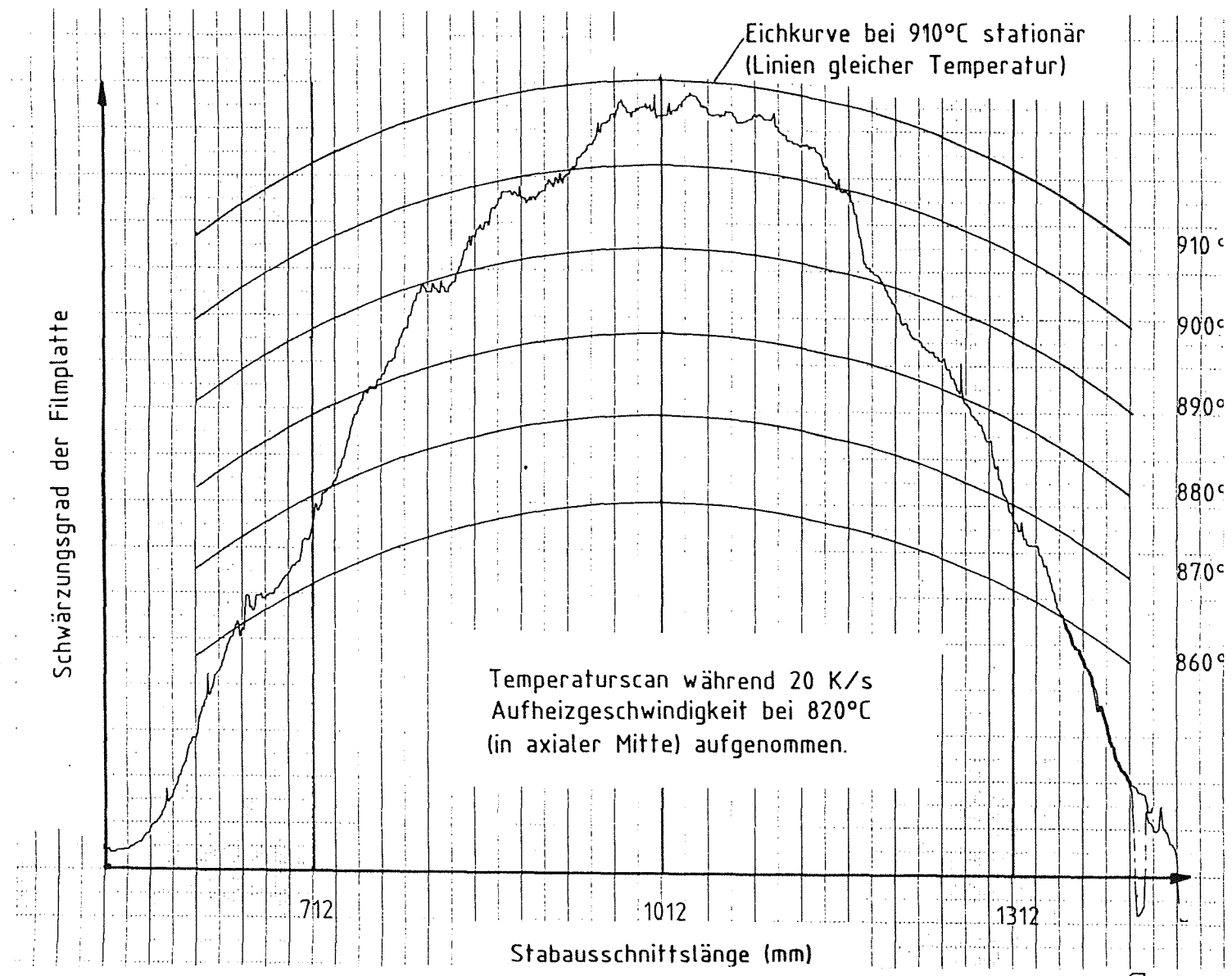


Abb. 3 Densitometerauswertung eines Temperaturscans von Heizstab 103

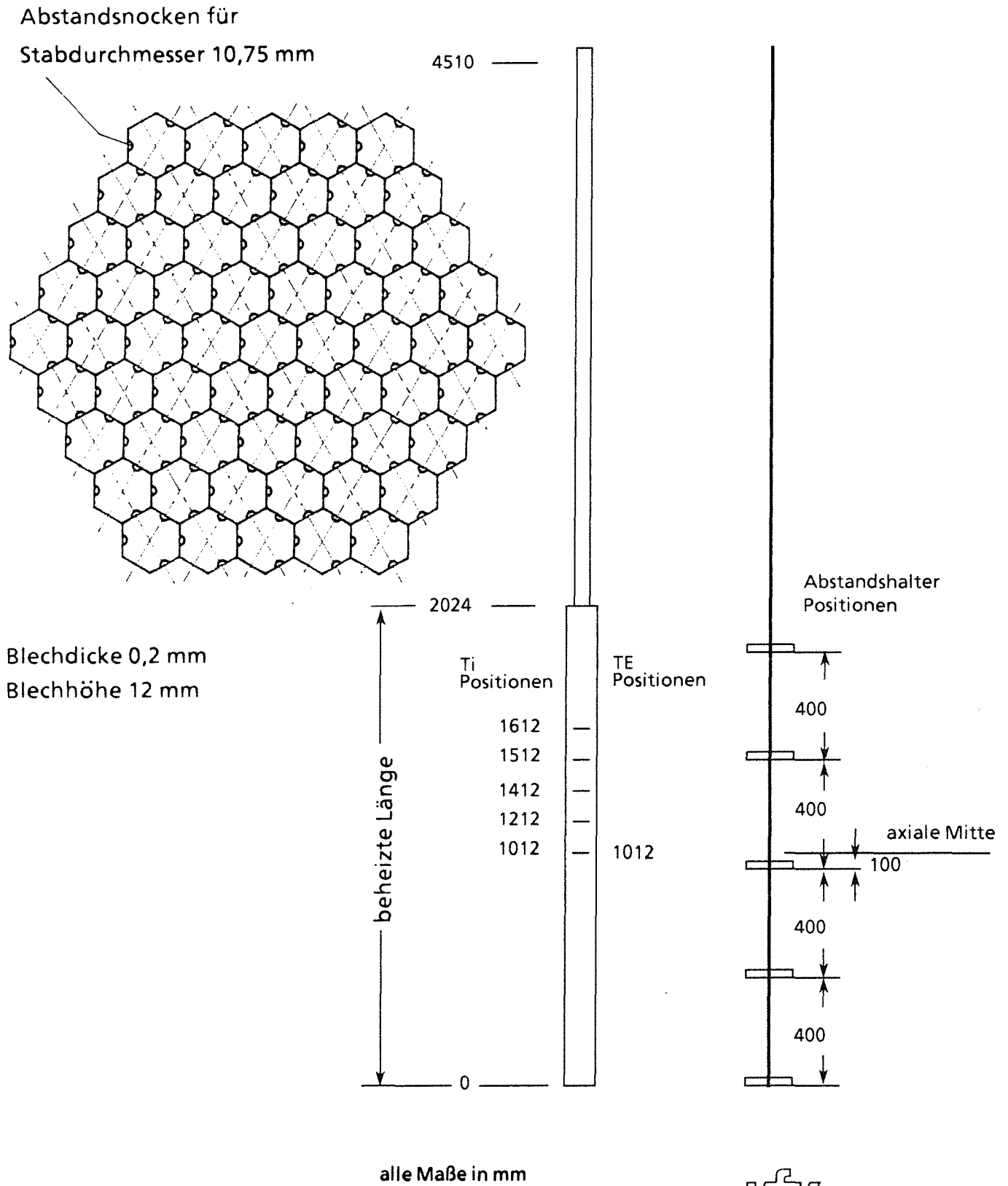
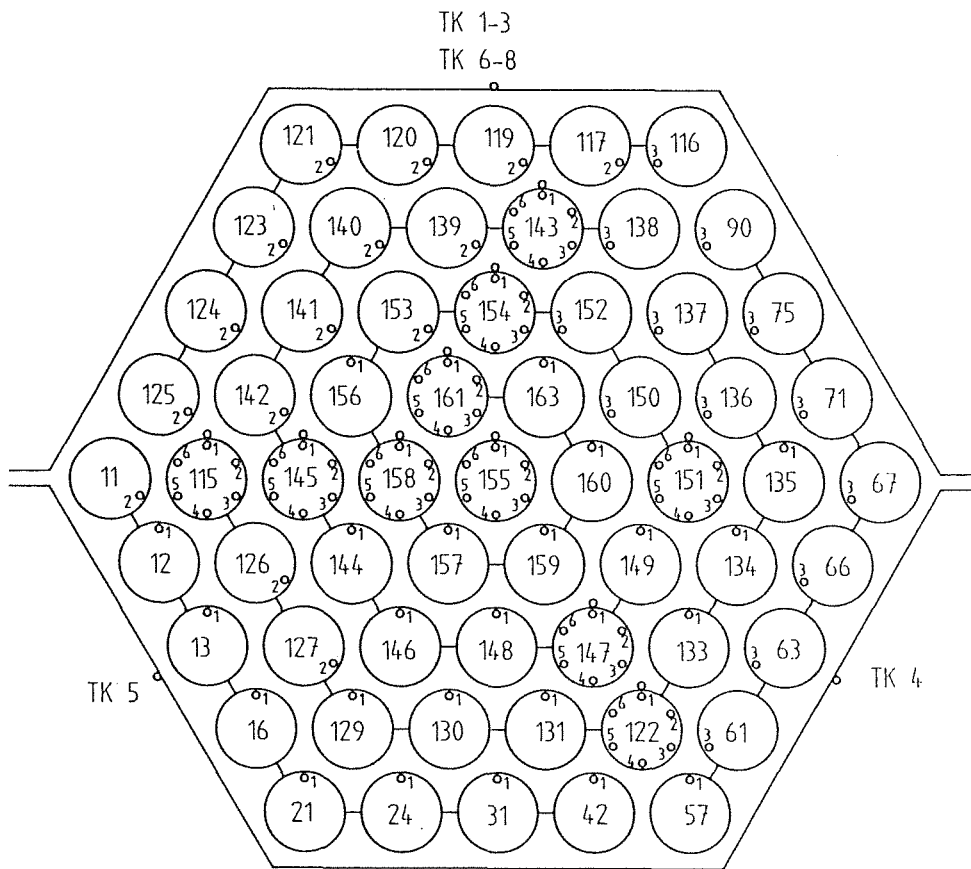


Abb. 4 Gitterabstandshalter für Materialtest



unteres beheiztes Bündelende = 0 mm

oberes beheiztes Bündelende = 2024 mm

Ti und TE Positionen werden in axialer Richtung von unten nach oben angegeben

z.B. TI 115/3 → Stab 115 drittes TI in Tabelle auf 1512 mm

Pos.	Stab Nr.	Ti - Position	TE - Pos.	Anzahl	Pos.	Stab Nr.	Ti - Position	TE - Pos.	Anzahl
27	11	1012			1	28	115 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
36	12	1012			1	37	126 1012		1
44	13	1012			1	45	127 1012		1
51	16	1012			1	52	129 1012		1
57	21	1012			1	53	130 1012		1
58	24	1012			1	54	131 1012		1
59	31	1012			1	55	122 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
60	42	1012			1	49	133 1012		1
61	57	1012			1	42	134 1012		1
56	61	1012			1	34	135 1012		1
50	63	1012			1	25	136 1012		1
43	66	1012			1	17	137 1012		1
35	67	1012			1	10	138 1012		1
26	71	1012			1	9	143 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
18	75	1012			1	8	139 1012		1
11	90	1012			1	7	140 1012		1
5	116	1012			1	13	141 1012		1
4	117	1012			1	20	142 1012		1
3	119	1012			1	29	145 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
2	120	1012			1	38	144 1012		1
1	121	1012			1	46	146 1012		1
6	123	1012			1	47	148 1012		1
12	124	1012			1	48	147 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
19	125	1012			1	41	149 1012		1
						33	151 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
						24	150 1012		1
						16	152 1012		1
						15	154 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6+1
						14	153 1012		1
						21	156 1012		1
						30	158 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6-1
						39	157 1012		1
						40	159 1012		1
						32	160 1012		1
						23	163 1012		1
						22	161 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6-1
						31	155 1012, 1212, 1512, 1012, 1412, 1612	1012	6-1



Abb. 6 FLORESTAN - Materialtest
Instrumentierungsplan des Bündels (Temperaturmeßstellen)

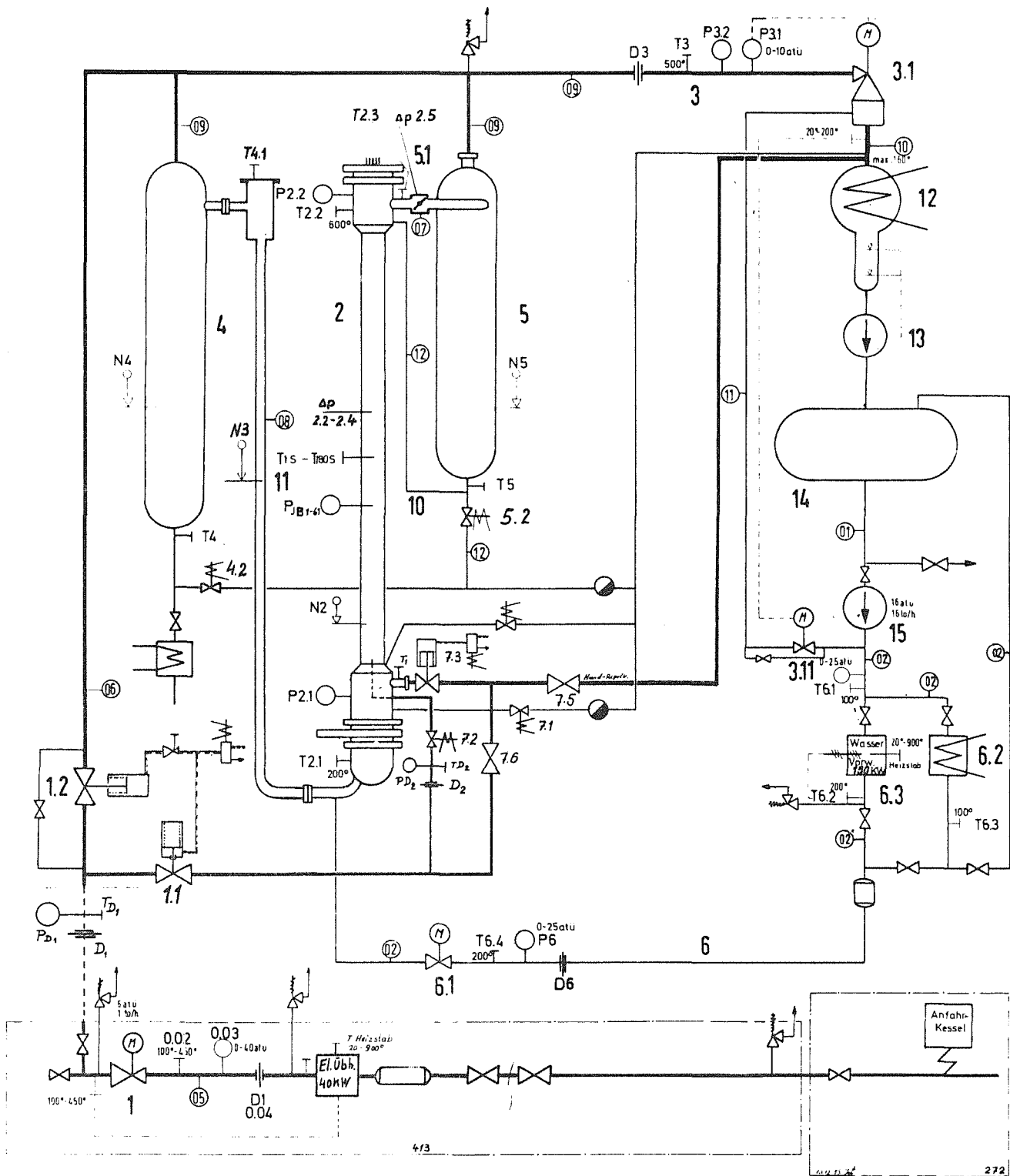
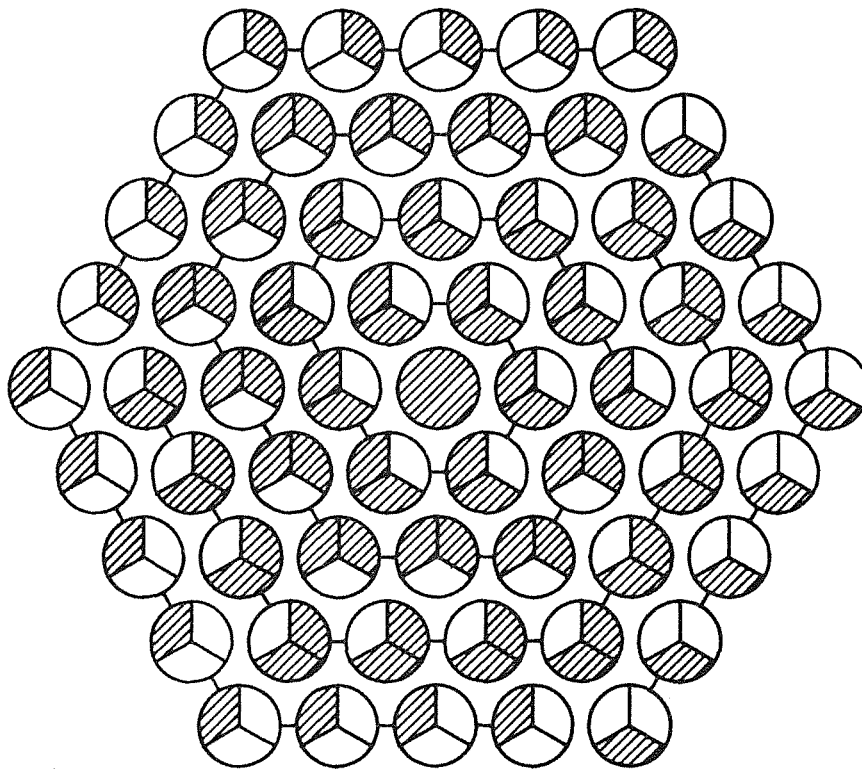






Abb. 7 Schaltbild des Testkreislaufts








Transduktor 1

-  Phase 1 L 1
-  Phase 2 L 2
-  Phase 3 L 3
-  Zentralposition: Transduktor 3

Tranduktor 2

-  Phase 1 L 4
-  Phase 2 L 5
-  Phase 3 L 6



**Abb. 8 FLORESTAN - Materialtest
Phasenbelegung der Transduktoren**

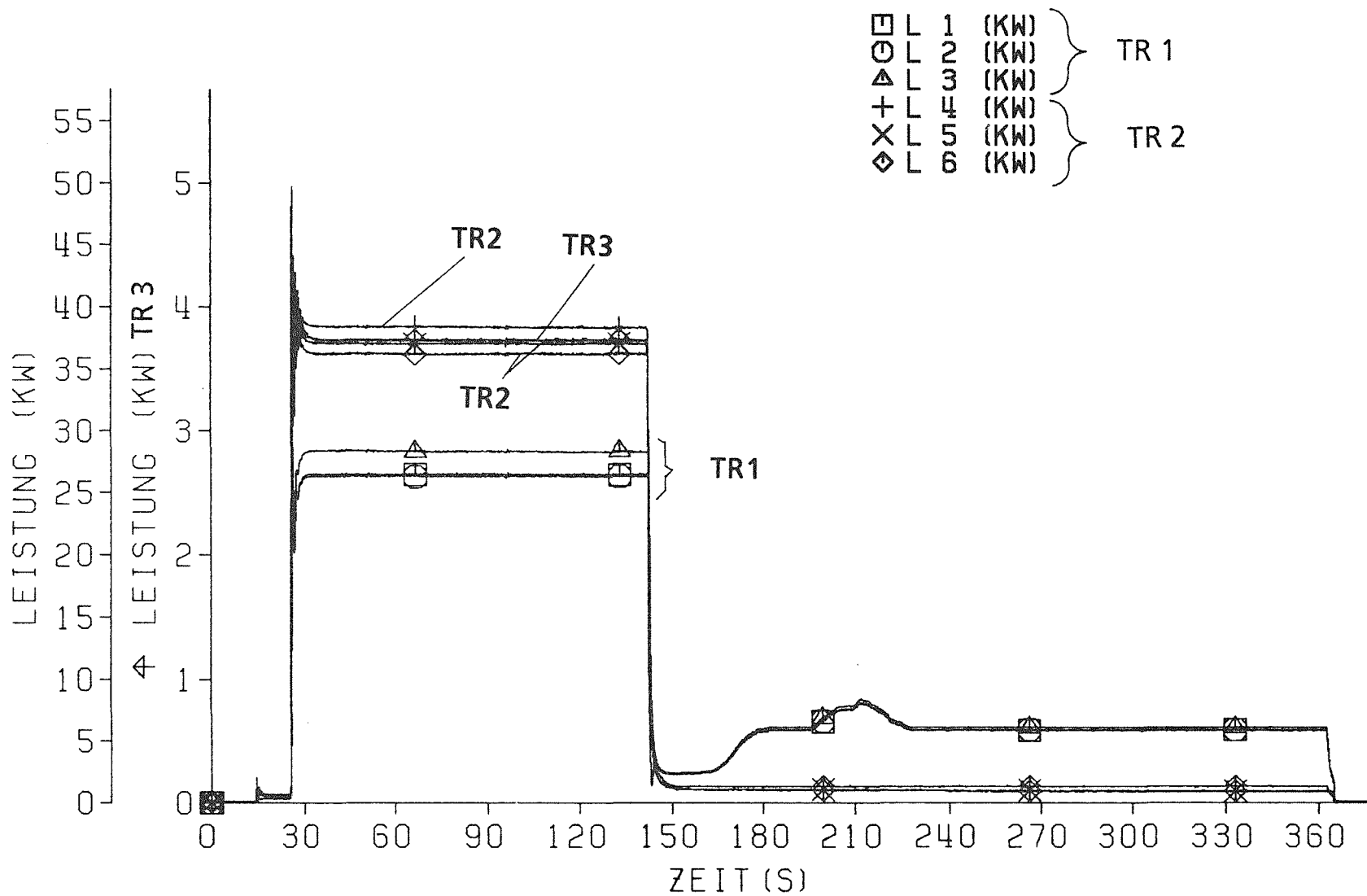


Abb. 9 FLORESTAN - Materialtest
Leistungsverläufe der Transduktorphasen

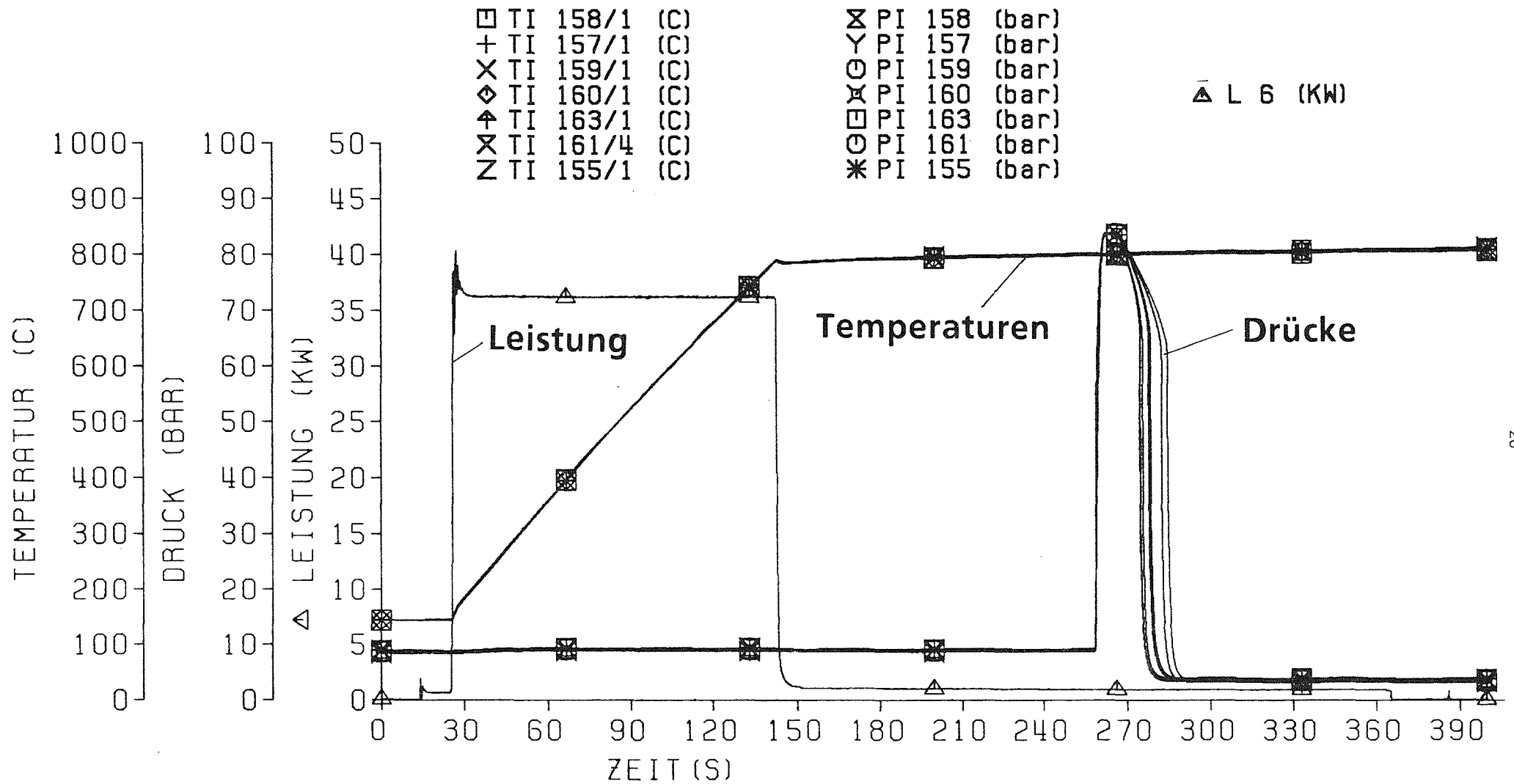


Abb. 10 Versuchsablauf (Leistung, Temperatur, Druck)

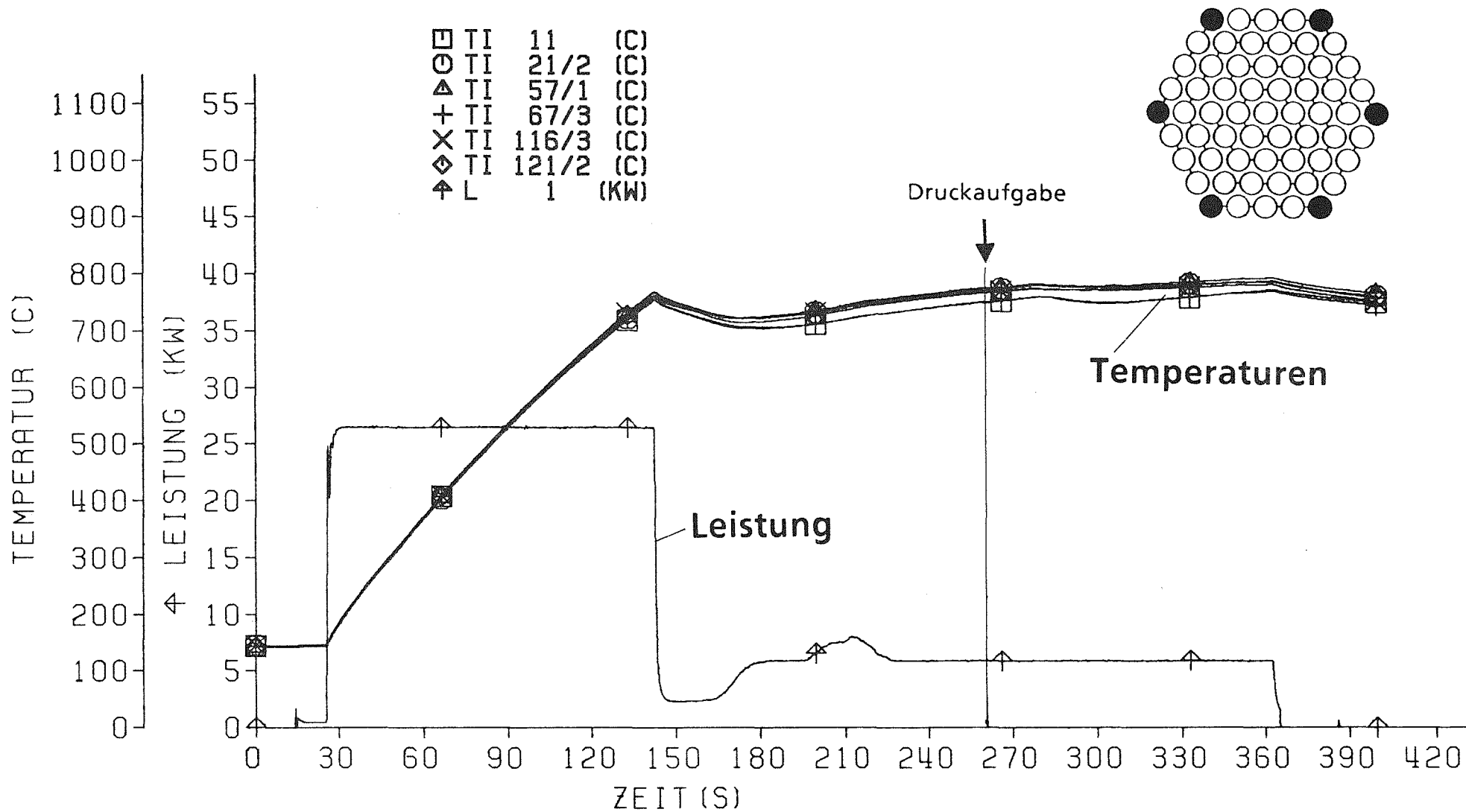


Abb. 11 Temperaturen der Eckstäbe des Außenkranzes

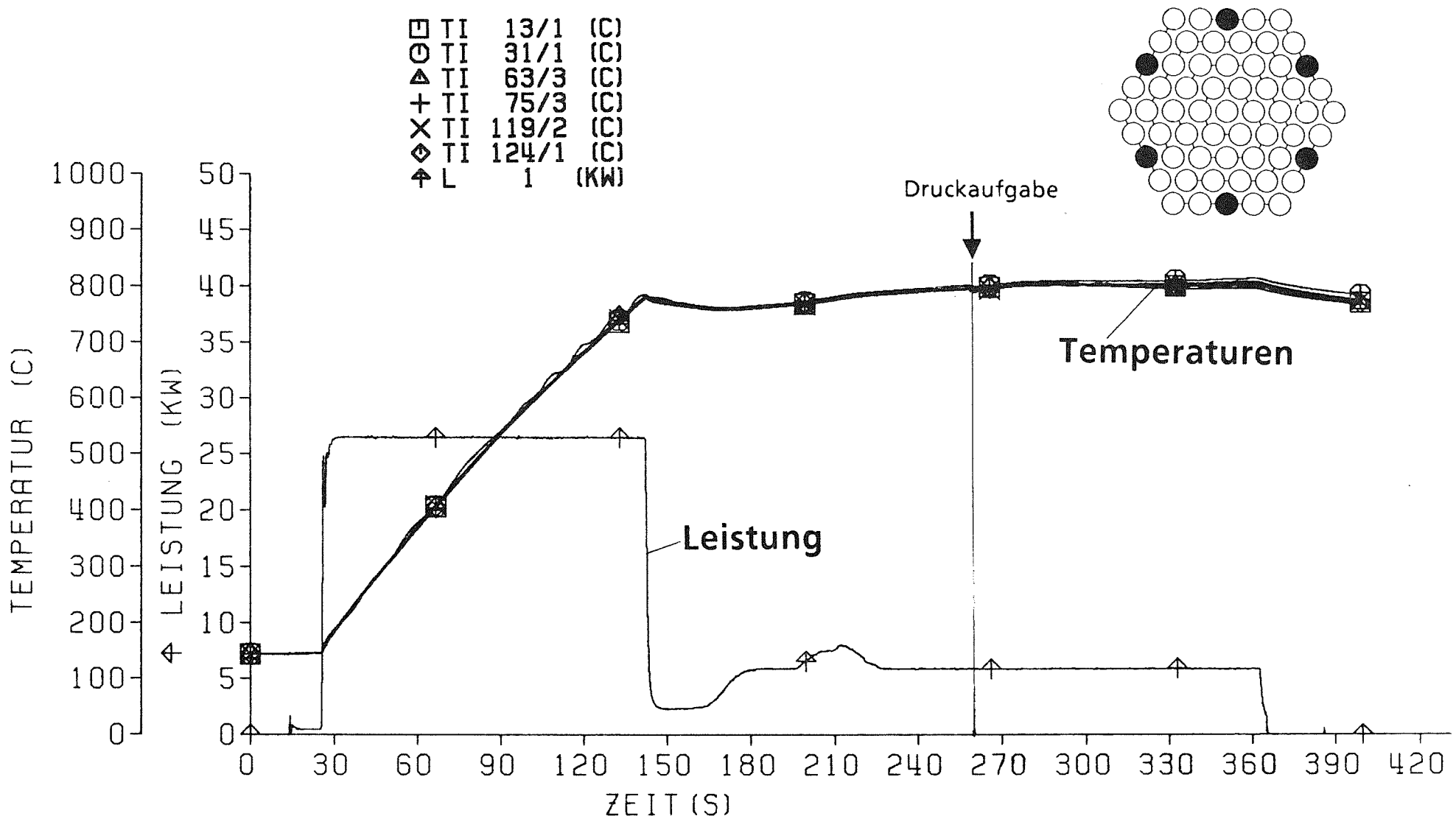


Abb. 12 Temperaturen im Außenkranz

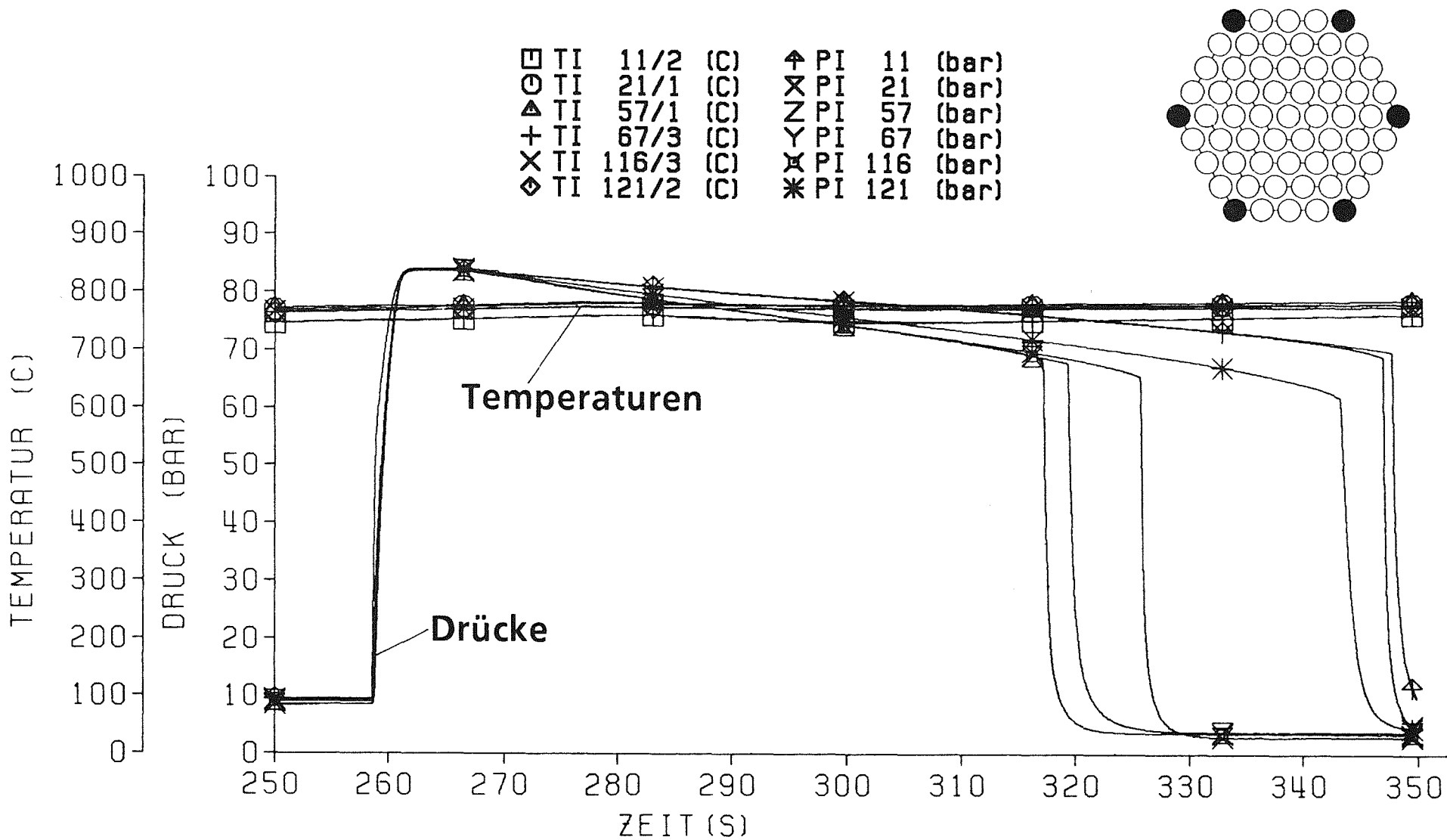


Abb. 13 Temperaturen und Drücke der Eckstäbe des Außenkranzes

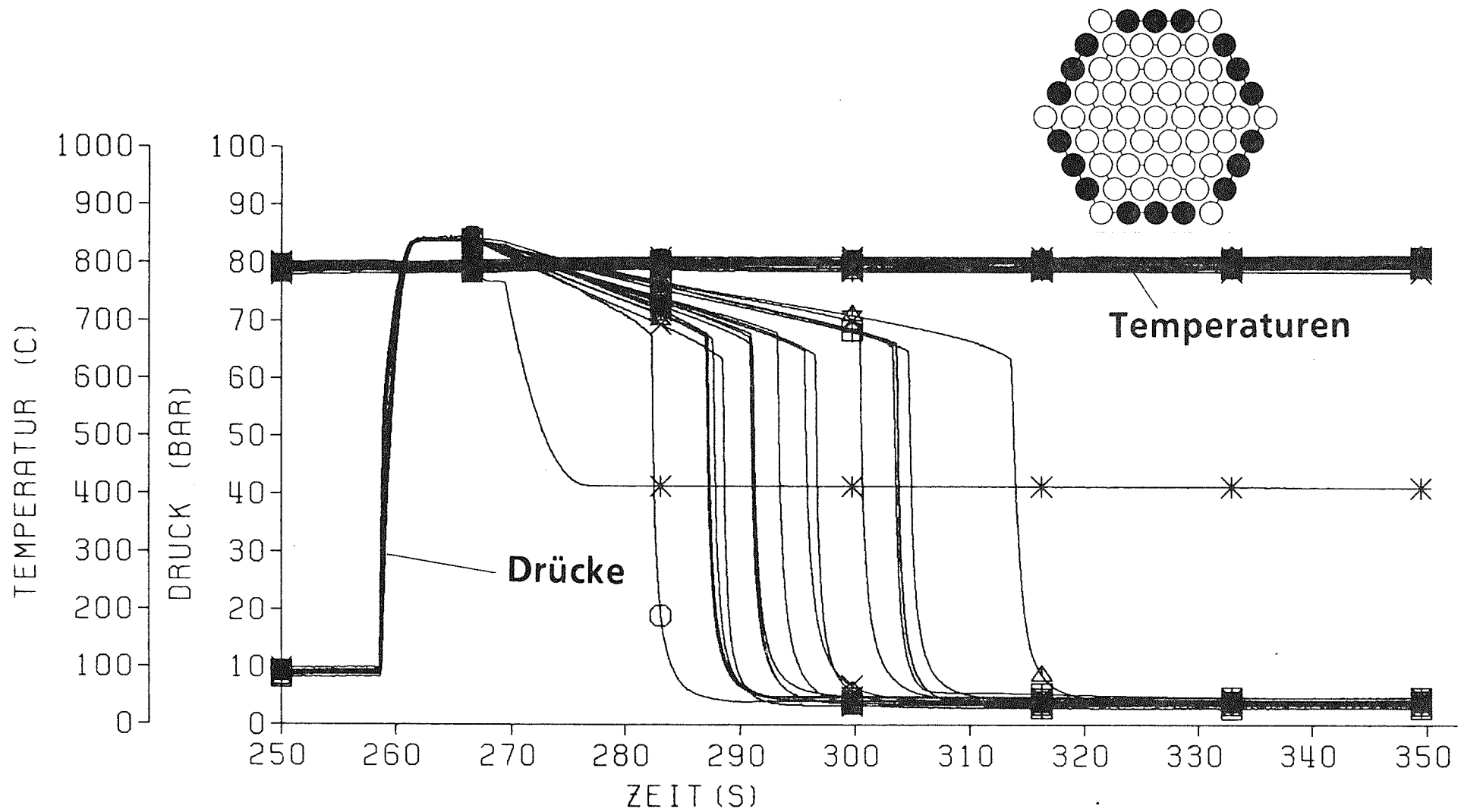


Abb. 14 Temperaturen und Drücke des Außenkranzes ohne Eckstäbe

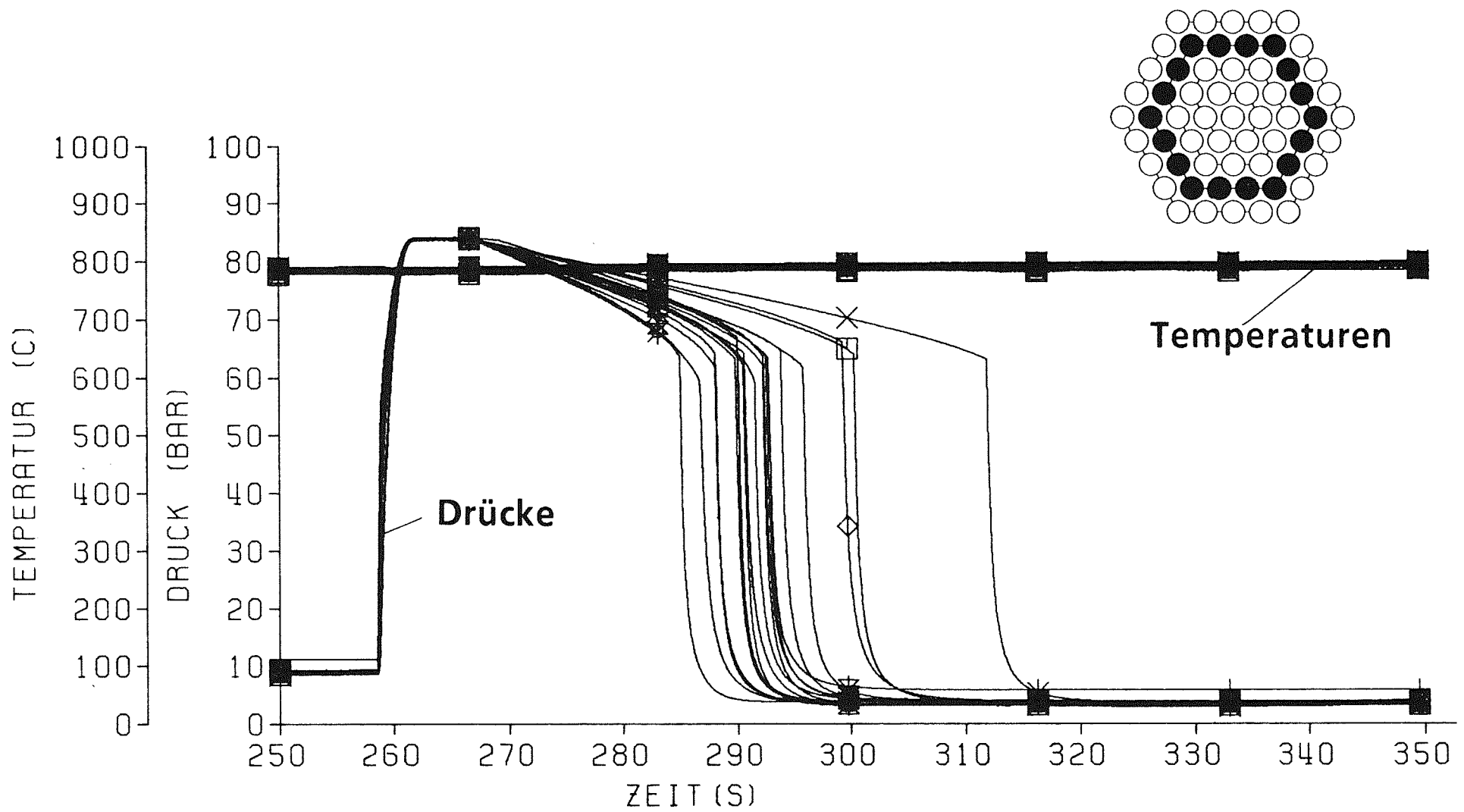


Abb. 15 Temperaturen und Drücke des 3. Kranzes

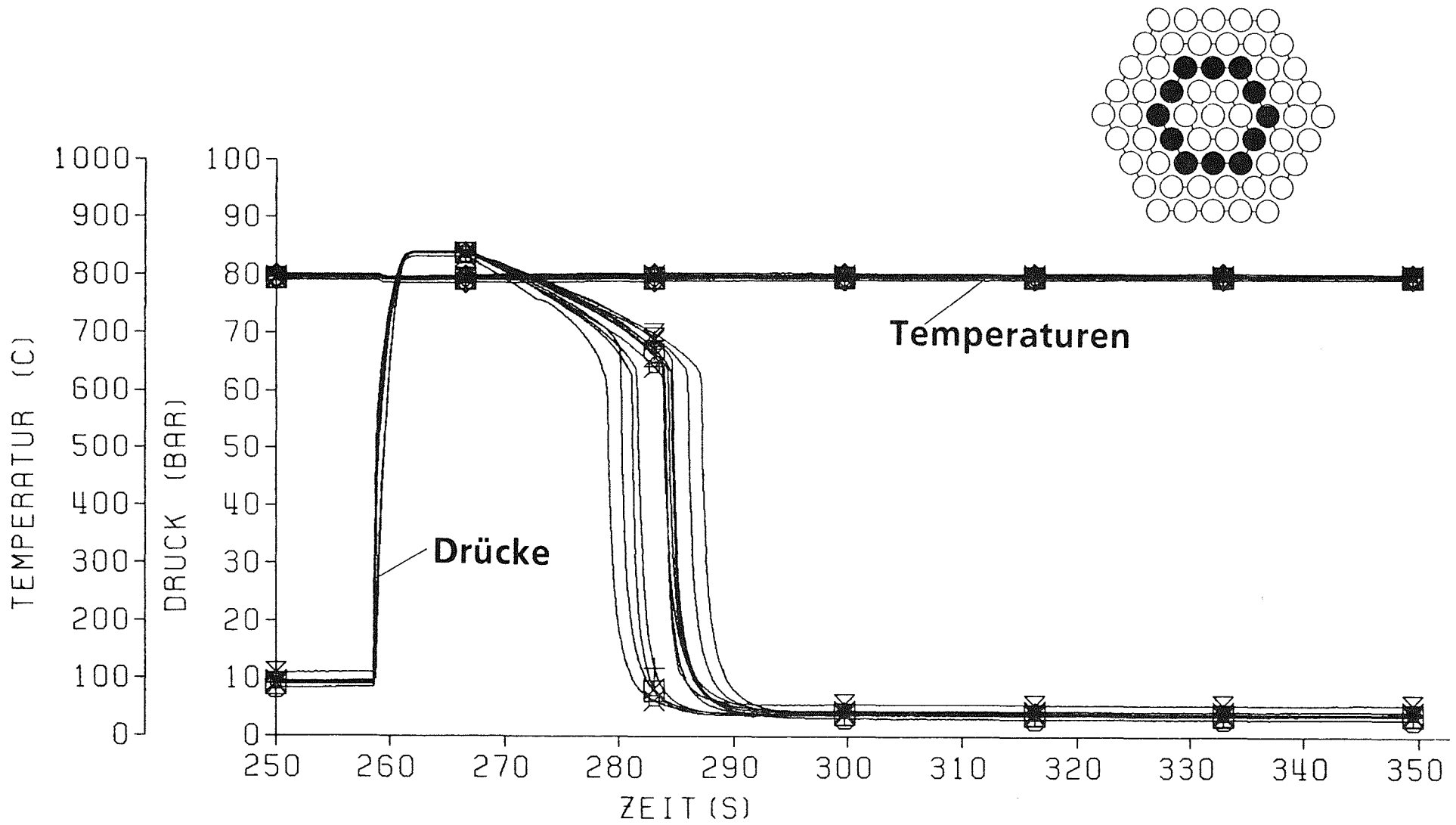


Abb. 16 Temperaturen und Drücke des 2. Kranzes

- | | | | | | | | |
|---|----|-------|-------|---|----|-------|-------|
| □ | TI | 158/1 | (C) | × | TI | 155/1 | (C) |
| ○ | PI | 159 | (bar) | Y | PI | 157 | (bar) |
| △ | TI | 157/1 | (C) | ⊗ | PI | 160 | (bar) |
| + | TI | 159/1 | (C) | * | PI | 155 | (bar) |
| X | TI | 160/1 | (C) | ⊗ | PI | 158 | (bar) |
| ◇ | TI | 163/1 | (C) | □ | PI | 163 | (bar) |
| ↑ | TI | 161/4 | (C) | ○ | PI | 161 | (bar) |

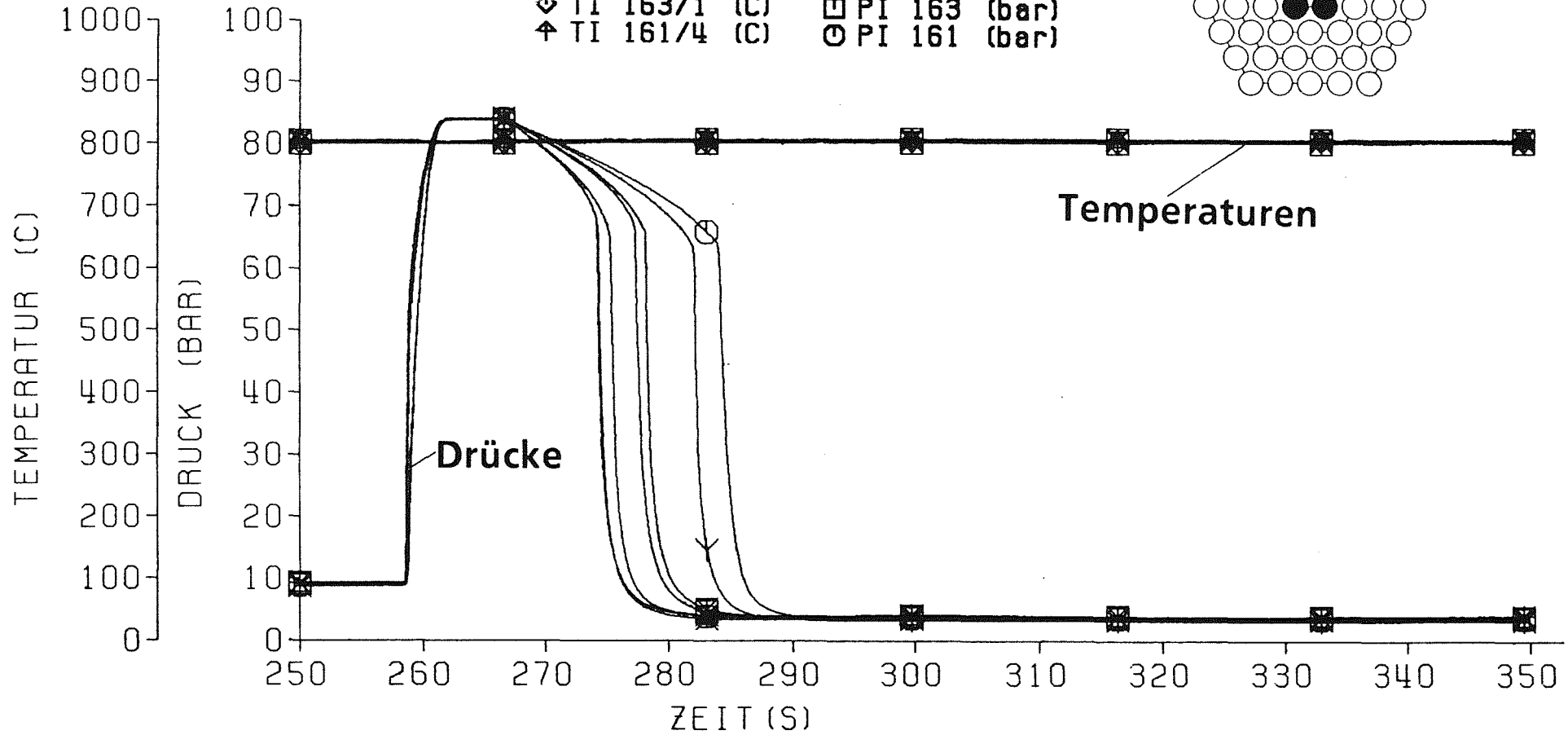
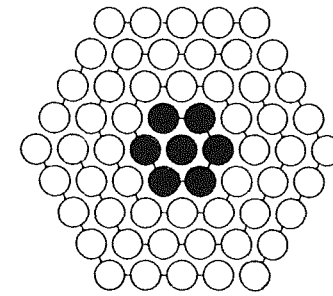


Abb. 17 Temperaturen und Drücke des Innenkranzes mit Zentralstab

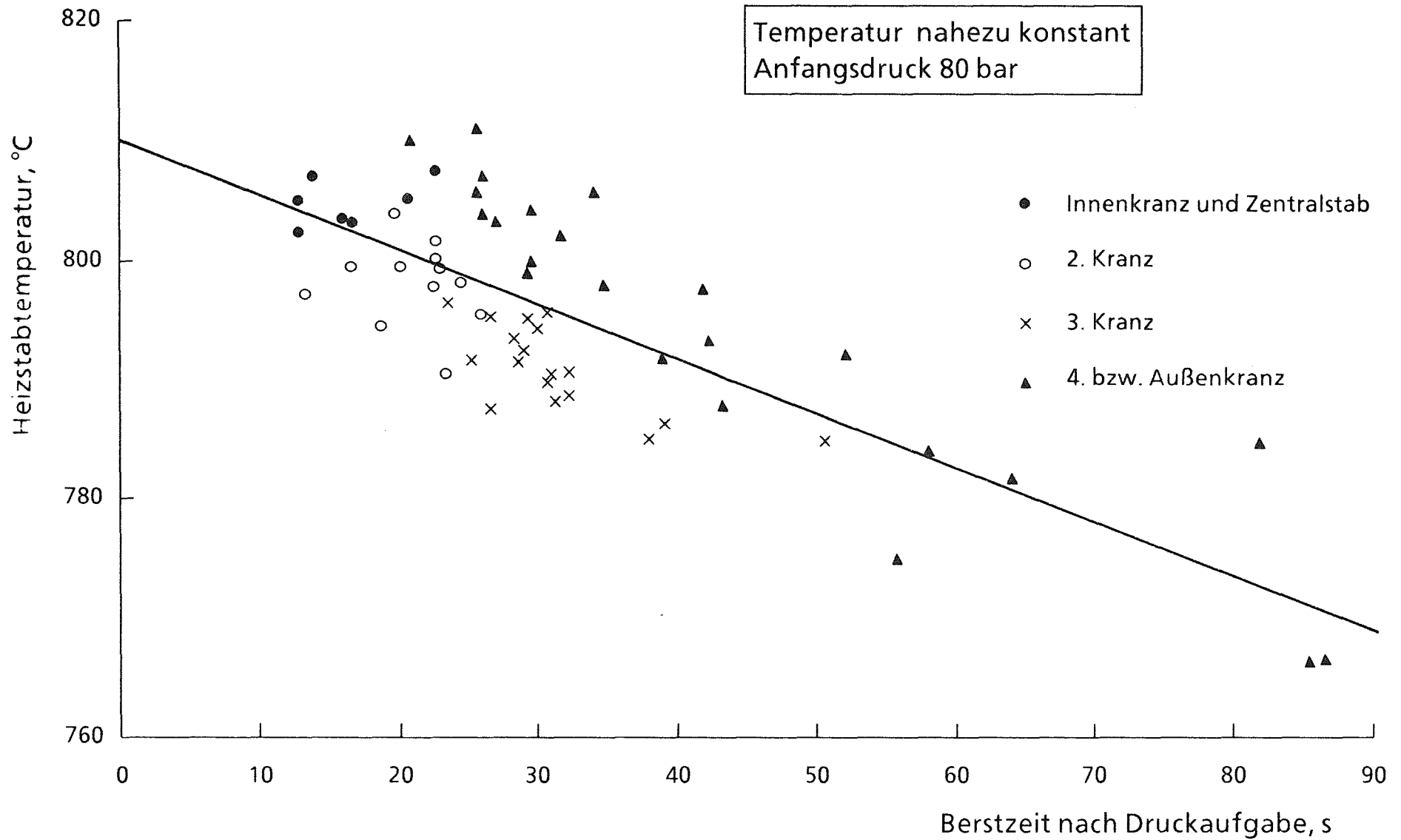


Abb. 18 FLORESTAN - Materialtest
Berstzeiten der Zircaloy-Hüllrohre in Abhängigkeit von der Temperatur

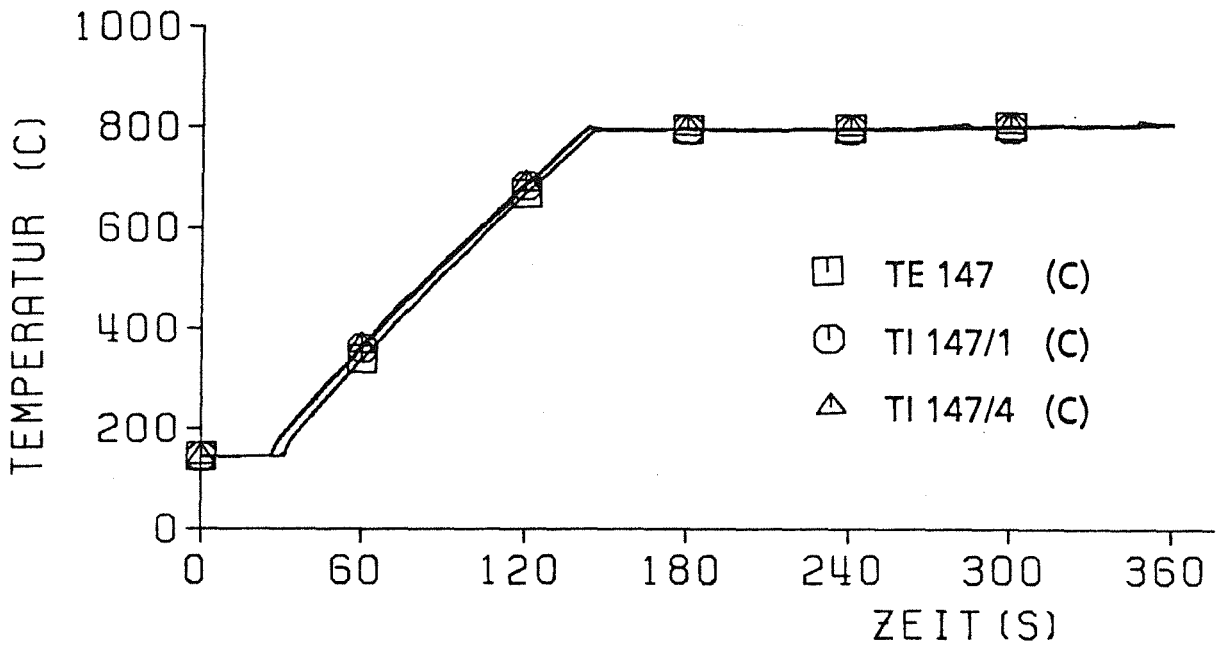
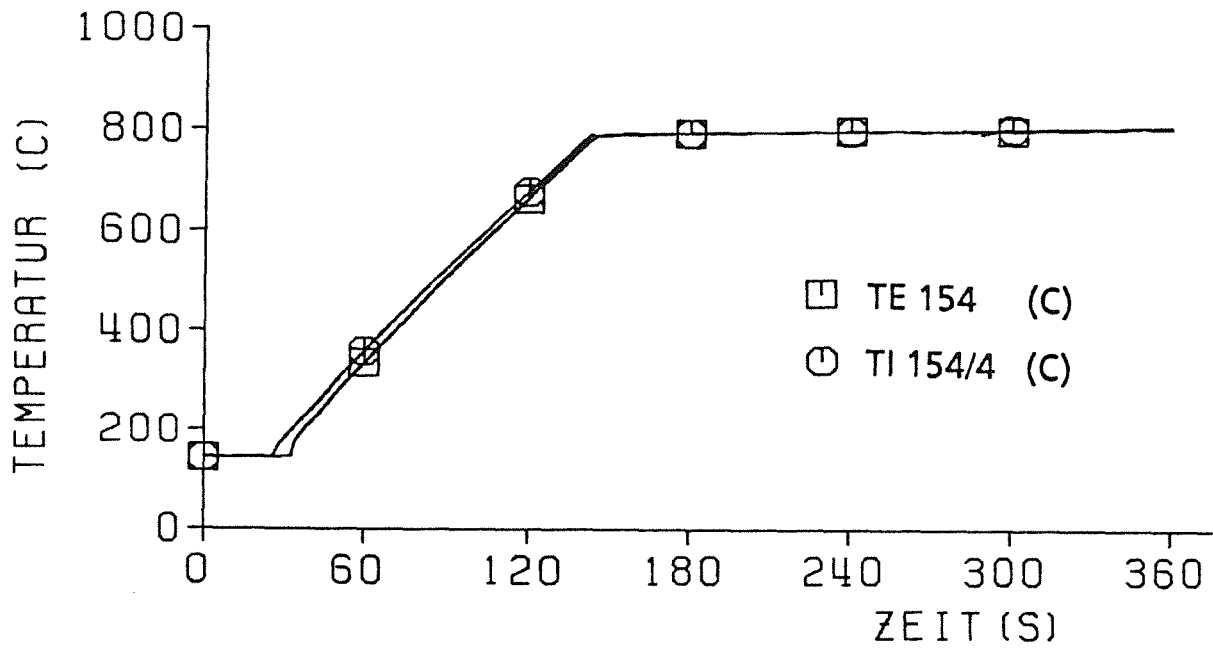


Abb. 19 FLORESTAN-Materialtest
Temperaturen auf Hülle und Heizstab in
axialer Mittelebene

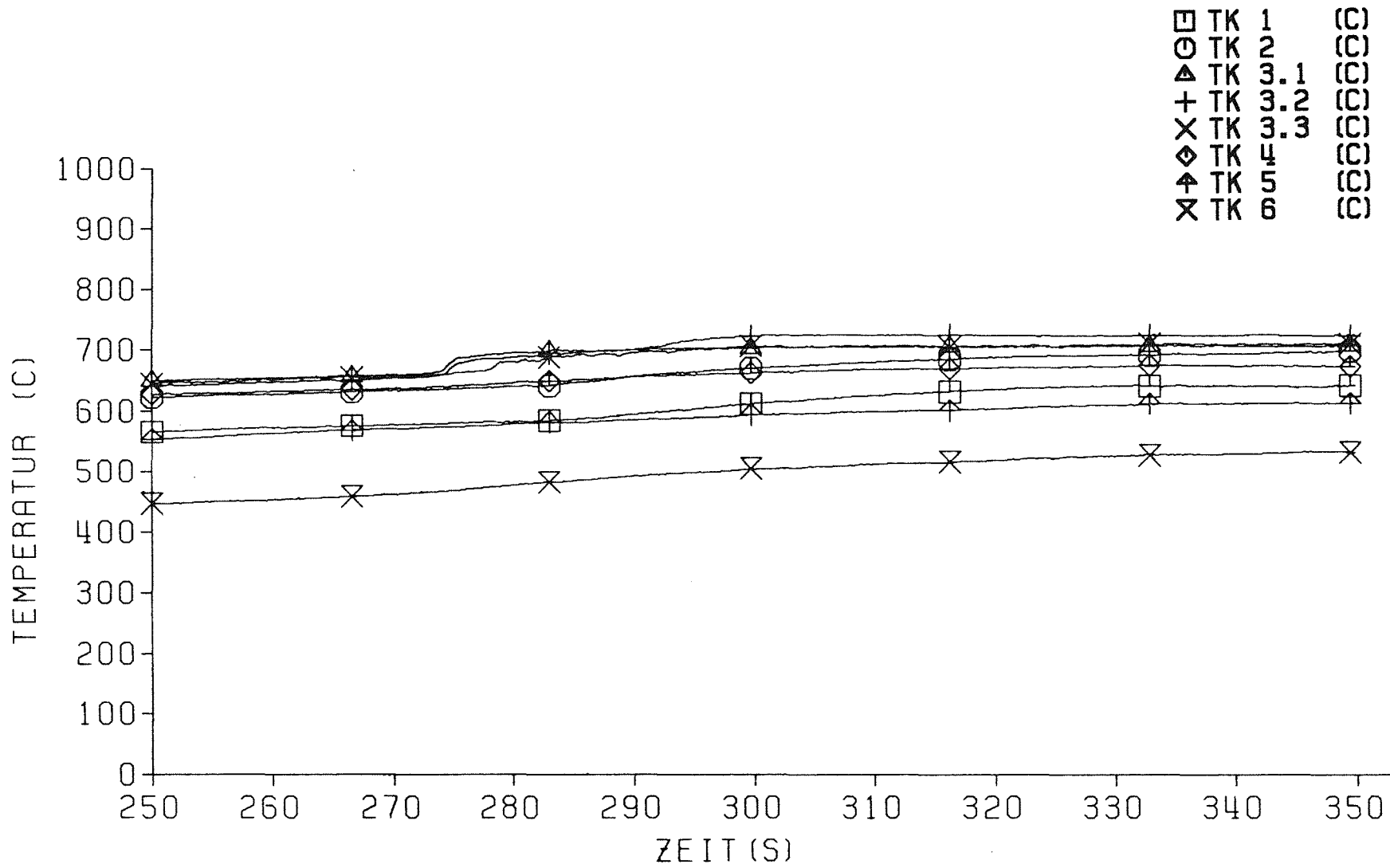
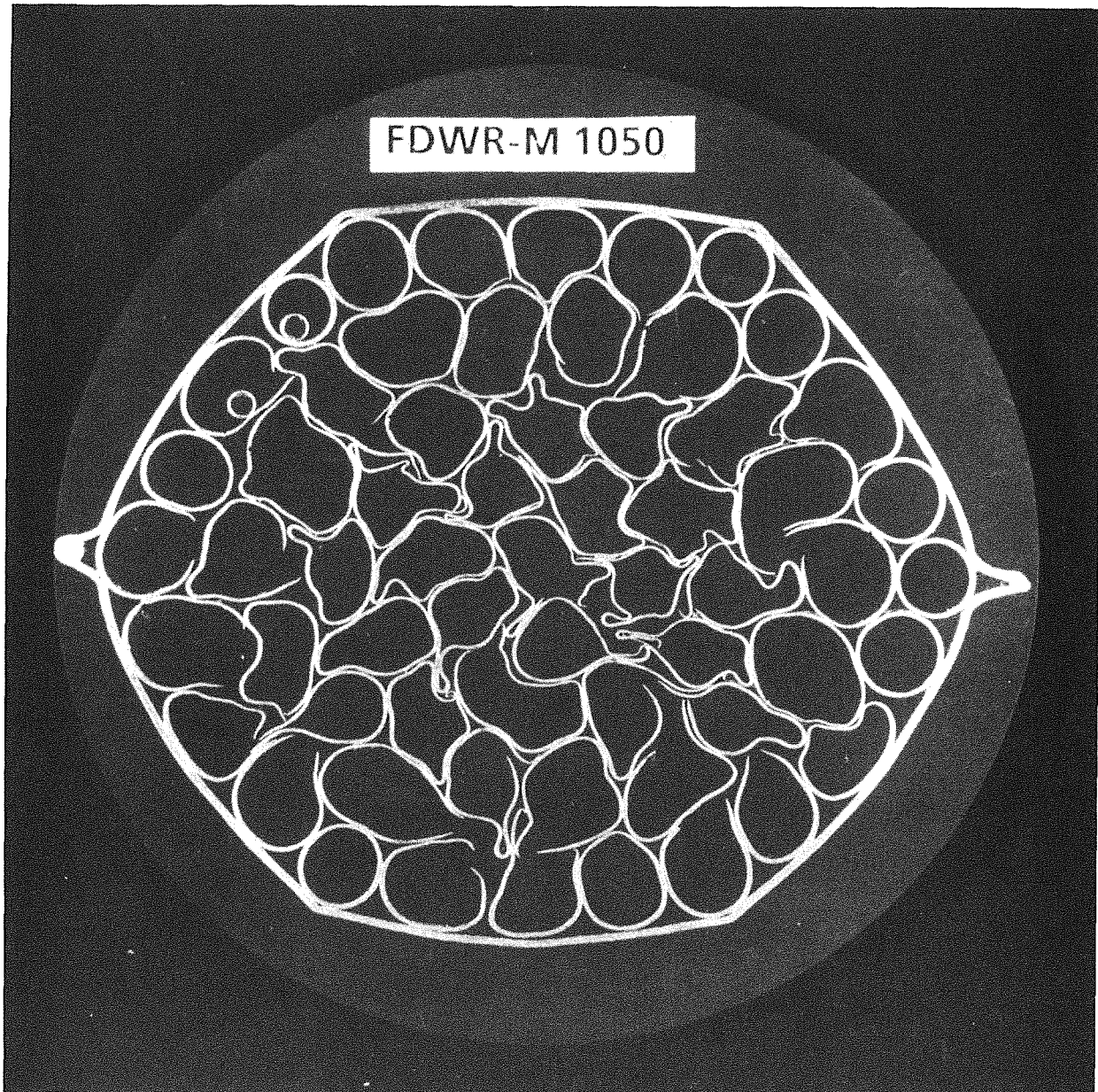
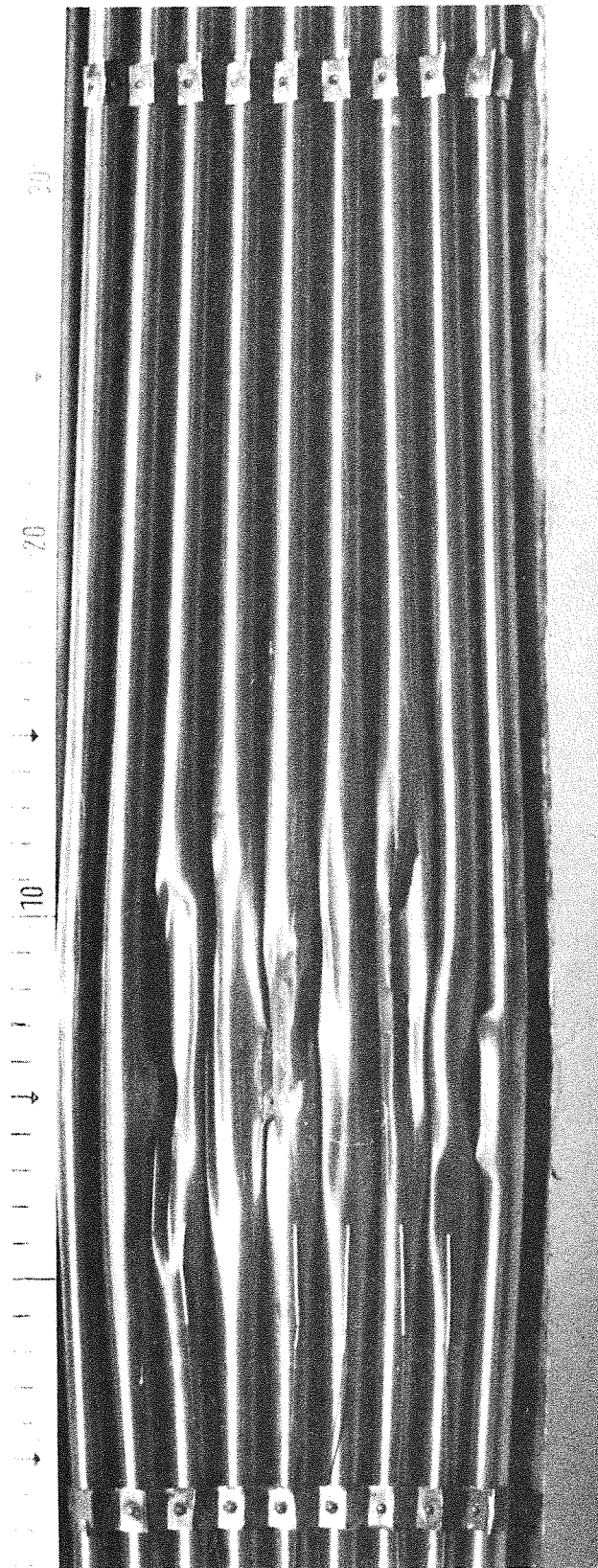


Abb. 20 Kastenwandtemperatur



KIK IRB

Abb. 21 FLORESTAN - Materialtest
Bündelquerschnitt bei max. Kühlkanalversperrung



KfK IRB

Abb. 22 FLORESTAN - Materialtest
Ansicht auf verformtes 61-Stabbündel
(Mittelebene)

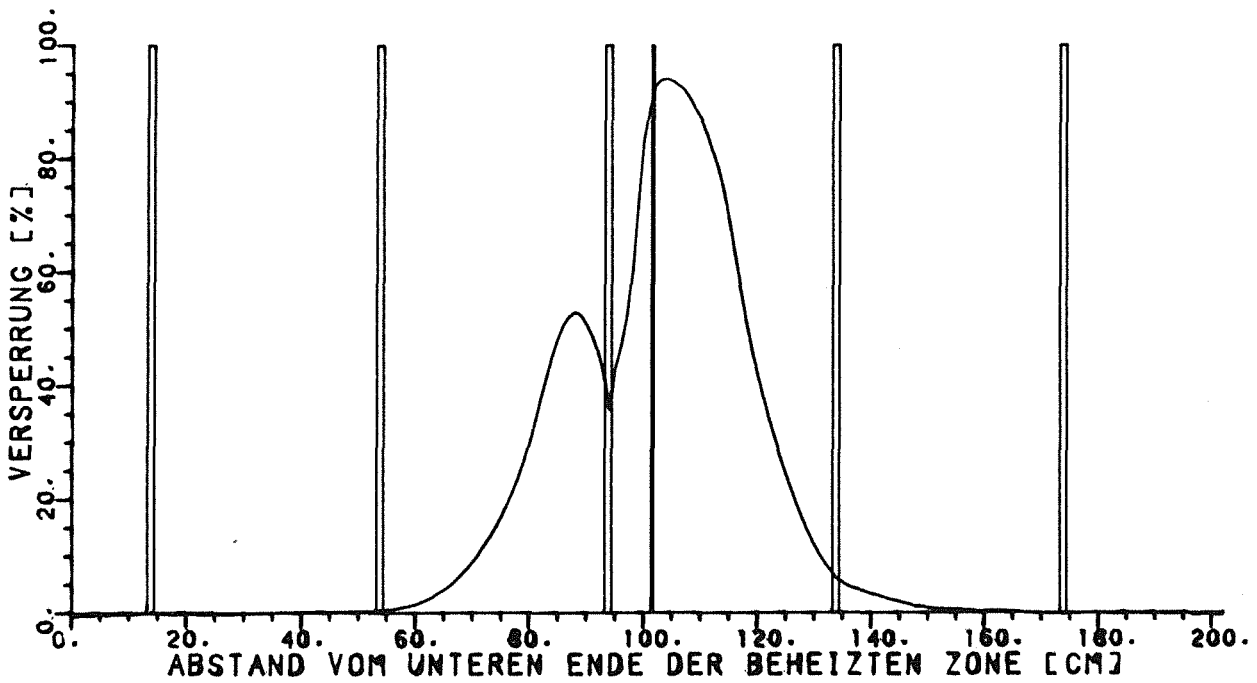
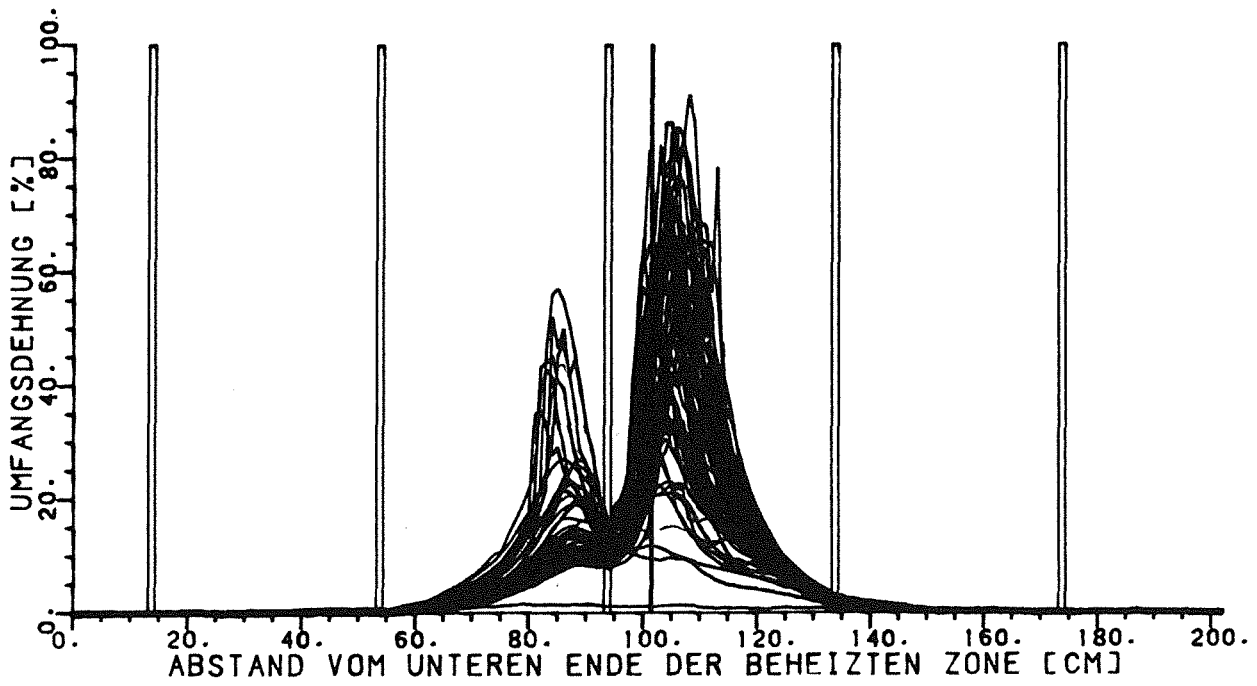


Abb. 23 FLORESTAN - Materialtest
Dehnungsprofile aller 61 Stäbe mit Kühlkanal-
versperrung

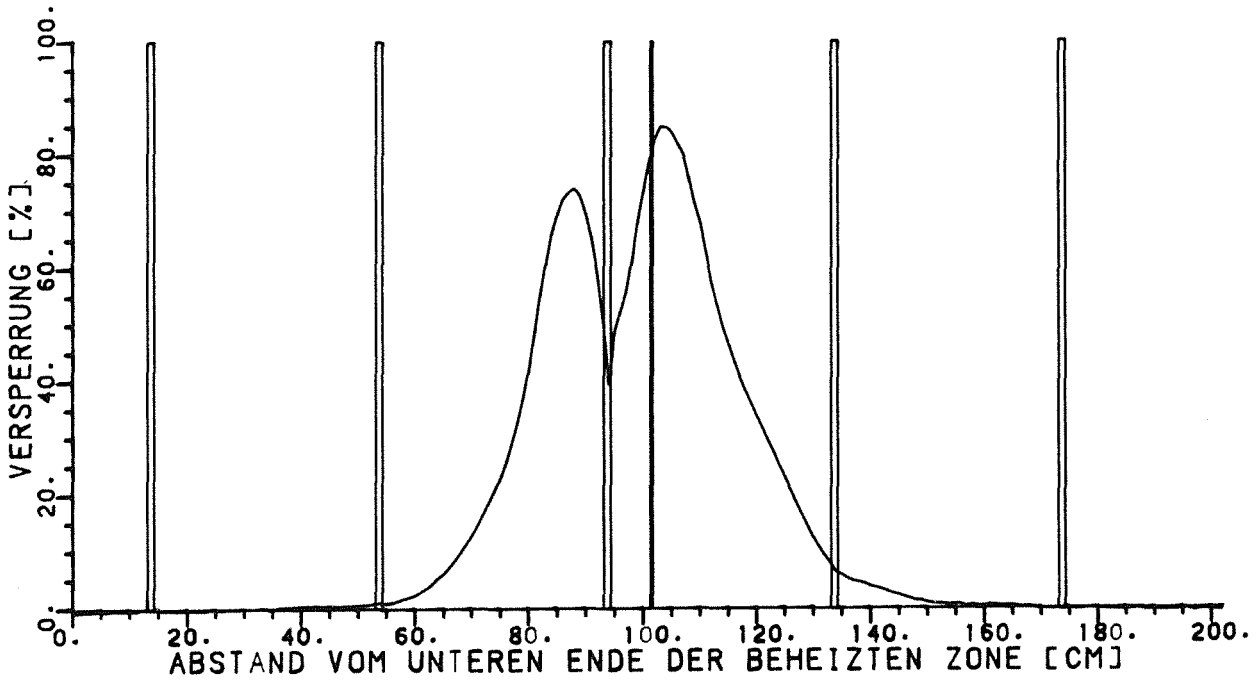
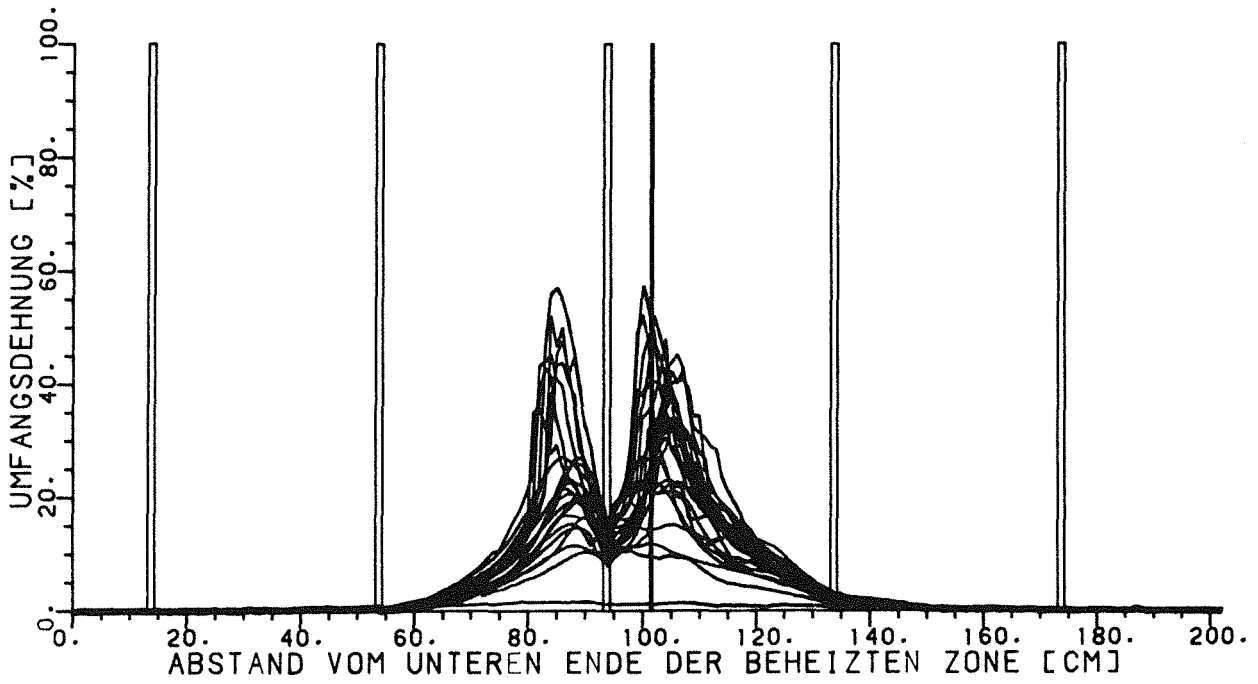


Abb. 24 FLORESTAN - Materialtest
Dehnungsprofile der 24 Stäbe des Außen-
kranzes mit Kühlkanalversperrung

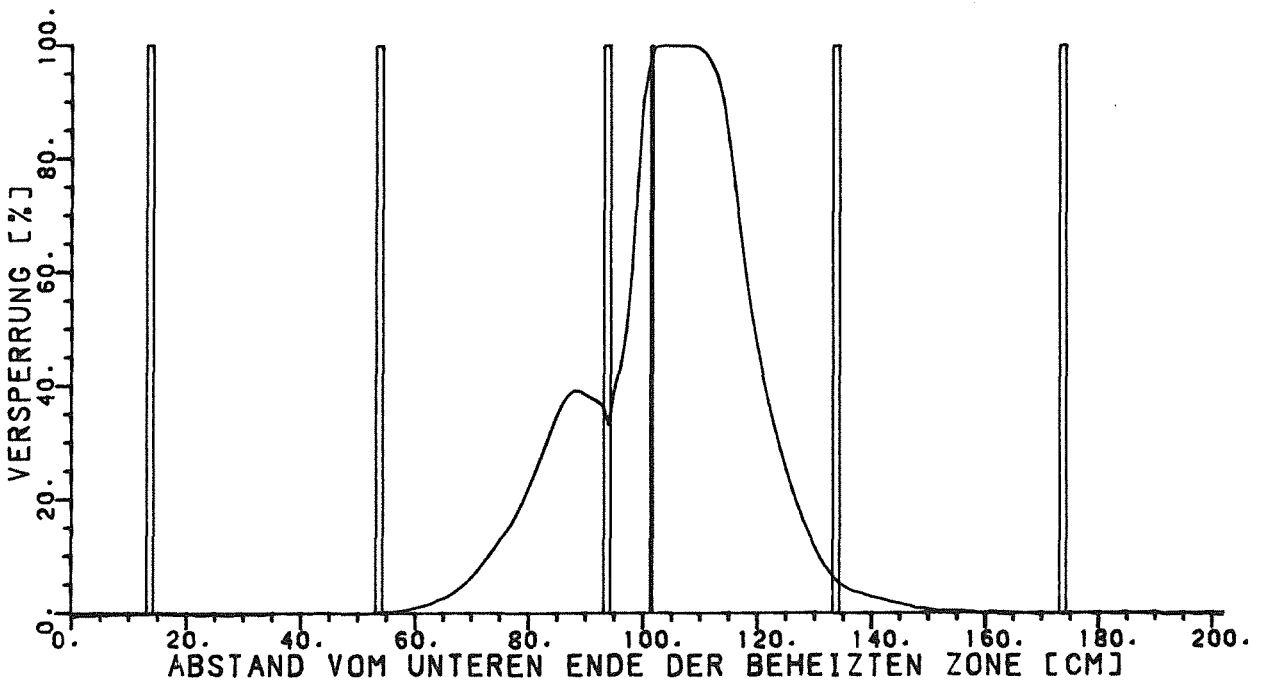
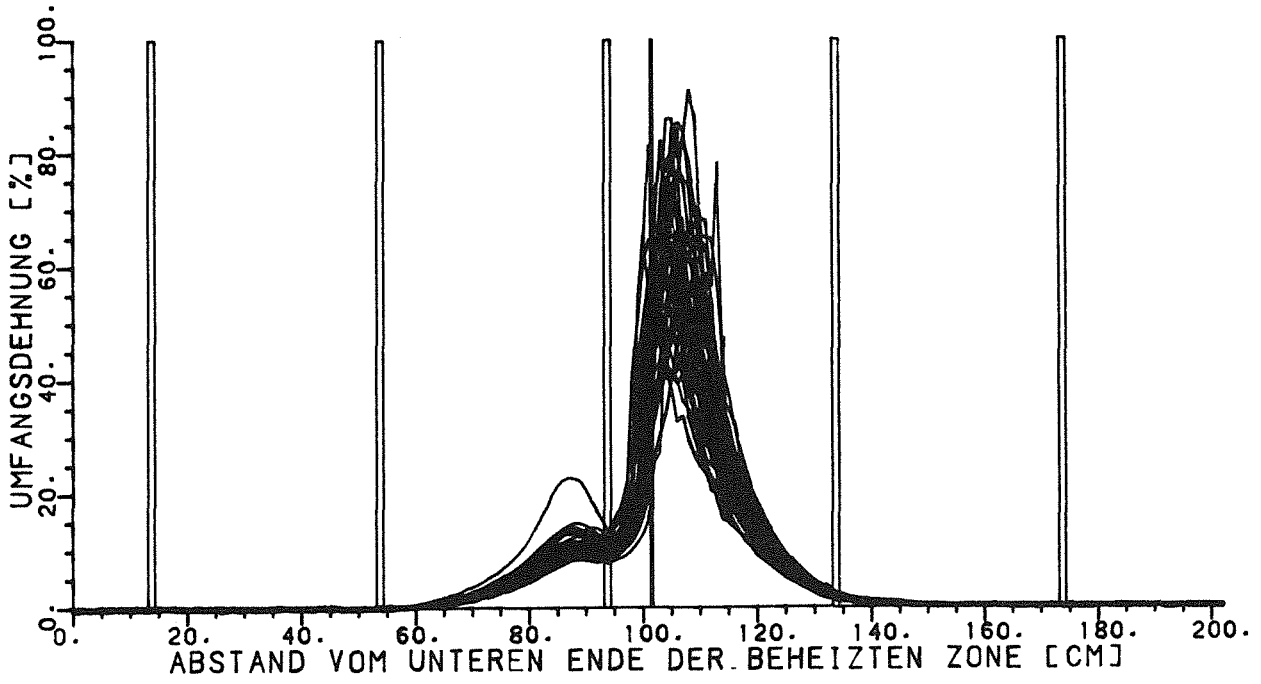


Abb. 25 FLORESTAN - Materialtest
Dehnungsprofile der 37 Innenstäbe mit
Kühlkanalversperrung