KfK 3842
März 1985

# Datenbericht REBEKA-5

U. Harten, K. Wiehr
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M  K A R L S R U H E
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3842

# Datenbericht REBEKA-5

U. Harten, K. Wiehr

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung:

REBEKA-5 ist ein out-of-pile Hüllrohrverformungsexperiment in einer 7x7-Stabanordnung voller Druckwasserreaktorstablänge mit Fluten.

Der vorliegende Bericht ist eine graphische Zusammenstellung aller im REBEKA-5-Experiment gemessenen Versuchsdaten als Ergänzung zum REBEKA-5 Ergebnisbericht.

Eine detaillierte Meßstellenbeschreibung ermöglicht dem Benutzer des Datenmaterials eine eindeutige Zuordnung der Meßstellen. Für eine Detailauswertung stehen dem Interessenten alle Meßinformationen des Experimentes in der Datenbank des PHDR selbsterklärend zur Verfügung. Sie sind abgelegt unter dem Namen "REBEKA5".

Die Versuchsanlage wird erläutert und die Betriebszustandswerte während des Versuchsablaufs werden mit Hilfe einer graphischen Zusammenstellung beschrieben.

Im Bereich der maximalen Hüllrohrdehnungen im Bündel werden die Druck- und Temperaturverläufe eines jeden Stabes dargestellt.

Tabellarische Zusammenstellungen der Meßstellen und wichtiger Meßergebnisse geben dem Benutzer einen Überblick über den Versuchsablauf.

Darüber hinaus enthält der Bericht Vermessungskurven über die axialen Dehnungsprofile jedes einzelnen Zircaloyhüllrohres und Kühlkanalversperrungsprofile für Teilbereiche des Bündels sowie des gesamten Bündels. Die lokalen Berststellen der Zircaloyhüllen sind angegeben und den Meßebenen zuzuordnen.

Data Report REBEKA-5


## Abstract

REBEKA-5 is an out-of-pile cladding deformation experiment with reflooding in a 7x7 bundle configuration of full length of a pressurized water reactor fuel element. This data report is a graphic summary and includes all essential measured data of the REBEKA-5 test. It is a supplement to the final REBEKA evaluation report.

A detailed description of the measuring points is given. All measured data of the experiment are available at the data bank of PHDR. They are filed under the data set name "REBEKA-5"

The test loop and the operational procedure are described. Pressure and temperature transients of all individual rods at the axial elevation of maximum cladding strains are plotted.

The data report contains also measured axial strain profiles of the individual Zircaloy cladding tubes as well as calculated cooling channel blockages for subchannels and the whole bundle. The points of burst of Zircaloy claddings and their position relative to the measuring points are given.

Inhaltsverzeichnis


| | | Seite |
|---|---|---|
| 1. | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Allgemeine Zielsetzung | 1 |
| 1.3 | Spezielle Zielsetzung | 2 |
| 2. | Versuchsanlage und Versuchsablauf | 3 |
| 2.1 | Testkreislauf für Bündelexperimente | 3 |
| 2.2 | Teststrecke | 3 |
| 2.3 | Stromversorgung | 3 |
| 2.4 | Brennstabsimulator (BSS) | 4 |
| 2.4.1 | Leistungsabgleich der BSS | 4 |
| 2.5 | Instrumentierung | 5 |
| 2.6 | Instrumentierung des Bündels | 5 |
| 2.6.1 | Instrumentierung der Brennstabsimulatoren | 6 |
| 2.6.2 | Instrumentierung der Abstandshalter mit Fluidthermoelementen | 7 |
| 2.6.3 | Instrumentierung des Bündelkastens | 7 |
| 2.6.4 | Angaben zur Meßwertgenauigkeit | 8 |
| 2.7 | Versuchsablauf | 9 |
| 3. | Versuchsdaten | 19 |
| 3.1 | Systemdaten der Versuchsanlage | 19 |
| 3.2 | Überblick über Versuchsablauf | 23 |
| 3.3 | Temperatur- und Druckgeschichte aller 49 Einzelstäbe (Abbn. 17 - 65) | 25 |
| 3.4 | Alle Hüllrohr- und Heizstabhüllentemperaturverläufe in axialer Mittelebene, ausgenommen sind Einzeltemperaturmeßstellen, die bereits unter 3.3 dargestellt worden sind (Abbn. 66 - 85) | 51 |
| 3.5 | Axiale Hüllrohrtemperaturverläufe des dargestellten Stabes | 62 |
| 3.6 | Temperaturprofil am Bündelkasten (Abb. 90) | 65 |
| 3.7 | Fluidtemperaturen am Abstandshalter (AH) | 65 |
| 3.8 | Umfangsdehnungen der Zircaloy-4-Hüllrohre aller 49 Brennstabsimulatoren und daraus resultierende Kühlkanalversperrungen | 68 |

4. Zusammenstellung wichtiger Meßstellen (Tab. 1) 99
Tabellarische Zusammenfassung der Versuchsergebnisse (Tab. 2)

5. Kanalliste und Datenzuordnung

6. Faltblatt der Abbildung 7

7. Literaturangaben 110

8. Anhang 111

Verzeichnis der Abbildungen


| Abb. Nr. | | Seite |
|---|---|---|
| 1 | Versuchskreislauf für Hüllrohrverformungsexperimente Bündel Tests. | 10 |
| 2 | Phasenbelegung der Transduktoren | 11 |
| 3 | Konstruktionszeichnung des Brennstabsimulators mit Stufenheizleiter | 12 |
| 4 | Nennmaße des Brennstabsimulators | 13 |
| 5 | Axiales Leistungsprofil | 14 |
| 6 | Schaltbild der Teststrecke mit Temperatur-, Druck-, Niveau- und Durchflußmeßstellen | 15 |
| 7 | Instrumentierungsplan des Bündels | 16 |
| 8 | Thermoelementanbringung | 17 |
| 9 | Schematische Darstellung der Versuchsführung | 18 |
| 10 | Elektrische Phasenleistung des Bündels | 20 |
| 11 | Drücke in der Versuchsanlage | |
| 12 | Temperaturen in der Versuchsanlage | 21 |
| 13 | Massendurchsätze in der Versuchsanlage | |
| 14 | Wasserstand Teststrecke und Behälter 5 | 22 |
| 15 | Temperaturverläufe der 25 Innenstäbe | 24 |
| 16 | Druckverläufe der 25 Innenstäbe | |
| 17-65 | Druck- und Temperaturverlauf aller 49 Einzelstäbe | 26 |
| 66-85 | Temperaturverlauf in axialer Mittelebene | 52 |
| 86-87 | Druck- und Temperaturverlauf zwischen den mittleren Abstandshaltern von Stab 14 und 46 | 63 |
| 88-89 | Axialer Temperaturverlauf von Stab 48 und 23 | 64 |
| 90 | Temperaturprofil Bündel-Kasten | 66 |
| 91-93 | Fluidtemperaturen am Abstandshalter I, IV, V | 66-67 |
| 94 | Berstdehnungen und Berstlagen | 69 |
| 95-143 | Dehnungsprofil von Stab 37 bis Stab 13 | 70-94 |
| 144 | Dehnungsprofil der 49 Stäbe | 95 |
| 145 | Dehnungsprofil der 25 Innenstäbe | 95 |
| 146 | Dehnungsprofil der 9 Innenstäbe | 96 |
| 147 | Kühlkanalversperrung durch 49 Stäbe | 97 |
| 148 | Kühlkanalversperrung durch 25 Innenstäbe | 97 |
| 149 | Kühlkanalversperrung durch 9 Innenstäbe | 98 |
| 7 | Faltblatt von Abb. 7 | 109 |

# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Bei einem Kühlmittelverluststörfall (KVS) mit doppelendigem Bruch im kalten Strang einer Hauptkühlmittelleitung, dem Auslegungsstörfall eines Druckwasserreaktors, können die Brennstabhüllen Temperaturen erreichen, bei denen sie unter der Wirkung des inneren Überdruckes aufblähen bzw. bersten, und somit zu einer lokalen Verengung der Kühlkanäle führen.

Im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit wird zum analytischen Nachweis einer ausreichenden Nachkühlbarkeit des Reaktorkerns das Programmsystem SSYST entwickelt. Aufgabe des im folgenden beschriebenen Vorhabens ist die Bereitstellung experimenteller Informationen zur Verifikation und Weiterentwicklung dieses Programmsystems.

## 1.2 Allgemeine Zielsetzung

Das out-of-pile Versuchsprogramm zum Aufblähvorgang von Zircaloy-Brennstabhüllen in der Wiederauffüll- und Flutphase eines KVS wird ebenfalls im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit der KfK durchgeführt. Es trägt den Namen REBEKA. (REaktortypische Bündel Experimente KArlsruhe).

Die Versuche haben zum Ziel, den Aufblähvorgang von Zircaloy-Brennstabhüllen an Einzelstäben sowie in Bündelgeometrien voller Länge zu untersuchen. Wesentliche Merkmale der Versuche bestehen darin, daß die Wechselwirkung zwischen Hüllrohrverformung und Kernnotkühlung berücksichtigt und eine meßtechnische Erfassung des zeitabhängigen Aufblähvorganges der Zircaloy-Hülle durchgeführt wird.

Die Versuche haben im einzelnen folgende Ziele:

- Ermittlung des zeitabhängigen Aufblähvorganges an Einzelstäben,
- Ermittlung der Beeinflussung des Aufblähvorganges durch die einsetzende Kernnotkühlung,
- Untersuchung der thermischen und mechanischen Wechselwirkung benachbarter Stäbe beim Aufblähen im Stabbündel,
- Gewinnung von Aussagen über eine mögliche Versagensfortpflanzung sowie
- Untersuchungen über Ausmaß und Verteilung von Kühlkanalversperrungen.

## 1.3 Spezielle Zielsetzung

Das Ziel des Experimentes REBEKA-5 besteht darin, nachzuweisen, daß trotz Verwendung von Brennstabsimulatoren mit stufenlosem cosinusförmigen axialen Leistungsprofil und einer deutlich höheren Anzahl von verformungsfähigen Zircaloyhüllen im Bündel keine größeren Kühlkanalversperrungen auftreten würden, verglichen mit den Ergebnissen bei kleineren Bündelanordnungen, wenn die Verformung der Hüllrohre unter thermohydraulischen Randbedingungen der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles stattfinden würde.

Die bei den bisherigen Experimenten verwendeten Brennstabsimulatoren wiesen bei voller simulierter Brennstablänge zwar ein axiales, cosinusförmiges Leistungsprofil auf, dieses war jedoch in 7 Leistungsstufen angelegt. Der axiale Mittelteil des Bündels hatte über eine Länge von 1300 mm konstante Leistung. Eine Frage, die offen blieb, war, ob ein homogenes cosinusförmiges axiales Leistungsprofil mit einem Leistungsmaximum in der axialen Mitte nicht möglicherweise doch zu einer verstärkten Koplanarität der Stellen maximaler Dehnungen im Bündel und damit zu einer höheren Kühlkanalversperrung führen könnte.

In den Bündelexperimenten REBEKA-3 und -4 waren Hinweise zu erkennen, die vermuten ließen, daß bei größeren Bündelanordnungen, bei denen sich eine größere Anzahl von Brennstabhüllen gegenseitig beeinflussen können, auch größere Kühlkanalversperrungen, vor allem axial ausgedehntere, auftreten könnten. In den bisherigen Bündelversuchen waren jeweils nur 9 bzw. in REBEKA-4 nur 8 Brennstabsimulatoren mit Zircaloy-4-Hüllen und Innendruck versehen. Die äußere Reihe bestand bei diesen Experimenten aus nicht verformbaren Brennstabsimulatoren, die nur die thermische Umgebung für die inneren 3x3 Stäbe zu simulieren hatten. In REBEKA-5 wurde das Bündel nun auf 7x7 Stäbe vergrößert und, um eine ausgeprägte Stab-zu-Stab-Wechselwirkung zu ermöglichen, alle 49 Brennstabsimulatoren mit Zry-4-Hülle versehen und mit Innendruck beaufschlagt.

## 2. Versuchsanlage und Versuchsablauf

### 2.1 Testkreislauf für Bündelexperimente

Abb. 1 zeigt ein stark vereinfachtes Schema des Testkreislaufs. Vom Dampfkessel (9) kommend, teilt sich der überhitzte Dampfstrom. Der eine Teilstrom durchströmt den Abscheidetank (2) und die Teststrecke (1) in Abwärtsrichtung und tritt am unteren Ende der Teststrecke gemeinsam mit dem Flutwasser wieder aus. Der zweite Dampfteilstrom nimmt seinen Weg über den Dampfumformer (4) und vereinigt sich vor dem Eintritt in den Kondensator (5) wieder mit Teilstrom 1. Hinter der Kühlmittelpumpe (7) wird das notwendige Speisewasser für den Kessel abgezweigt. Das Flutwasser wird am Boden der Teststrecke eingespeist und verläßt während der Wiederauffüllphase die Teststrecke wieder am unteren Ende zusammen mit dem Dampfteilstrom 1. Durch Schließen des Ventils 7.4 wird die Flutphase eingeleitet. Die Bezeichnungen I bzw. II an den Pfeilen geben die Strömungsrichtung des Dampfes bzw. des Wassers während der Wiederauffüll- (I) bzw. Flutphase (II) des Experimentes an.

### 2.2 Teststrecke

Da für REBEKA-5 die Bündelgröße auf 7x7 Stäbe erhöht wurde, mußte die Teststrecke (2), die das Bündel aufnimmt, geändert werden. Das äußere Druckrohr (159x3 mm) hat einen Innendurchmesser von 153 mm ø. Im Druckrohr sitzt der viereckige Bündelführungskasten aus Edelstahl mit Innenabmessungen von 101x101 mm und einer Wandstärke von 1 mm, in dem sich das Bündel befindet. Zwischen dem Bündelführungskasten und dem Teststreckendruckrohr steht stagnierender Wasserdampf.

Gegenüber den bisherigen Bündelexperimenten 1-4 wurde bei REBEKA-5 die axiale Position des Bündels in der Teststrecke verschoben. Das untere beheizte Ende des Bündels befand sich nicht wie bisher 170 mm oberhalb des Wasserspiegels im unteren Behälterplenum, sondern mit dem Wasserspiegel in einer Ebene. Mit dem Schließen des Ventils 7.4 wurde dadurch ohne Zeitverzögerung der Flutvorgang eingeleitet.

### 2.3 Stromversorgung

Die höhere erforderliche Leistung für das 49-Stab-Bündel lieferten für diesen Versuch zwei dreiphasige Transduktoren von je 600 kVA. Die drei Phasen des

Transduktors 1 wurden mit je 8 parallel geschalteten Stäben der äußeren Stabreihe des Bündels belegt. Transduktor 2 wurde mit je 9 Stäben in den einzelnen Phasen belastet, wobei der jeweils 9. Stab der Phasen 1 und 2 außerhalb des Testbündels in einem wasserdurchströmten Rohr angeordnet waren. Der 9. Stab der Phase 3 war der Zentralstab. Die 2 zusätzlichen Stäbe außerhalb der Teststrecke waren notwendig, um die 3 Phasen des Transduktors-2 gleichmäßig zu belasten, d.h. Transduktorschieflast zu vermeiden, was wegen der Schaltung des Sicherheitsabschaltsystems erforderlich war.

(Phasenbelegung der Transduktoren s. Abb. 2 - Transduktor-3 wurde nicht wie ursprünglich vorgesehen eingesetzt).

Im Versuch werden die 2x3 Phasenleistungen der Transduktoren gemessen.

## 2.4 Brennstabsimulator (BSS)

Die Abb. 3 zeigt die Konstruktionszeichnung des Brennstabsimulators (BSS) mit stufenförmigem axialen Heizleiter wie er für die REBEKA-Bündelversuche 1-4 verwendet wurde. Die Volumina der oberen und unteren Stabplena entsprechen denen eines DWR-Brennstabes. Der prinzipielle Aufbau des BSS bleibt in der neuen Version bis auf das axiale Leistungsprofil unverändert. Abb. 4 gibt die Nennmaße des BSS mit stufenlosem, cosinusförmigen Leistungsprofil an.
Die daraus resultierende axiale Leistungsverteilung ist in Abb. 5 angegeben.

### 2.4.1 Leistungsabgleich der BSS

Bei der Herstellung der Brennstabsimulatoren treten gewisse Toleranzen in der beheizten Länge und damit im Gesamtwiderstand der einzelnen BSS auf. Jeweils 8 bzw. 9 BSS liegen parallel an einer Phase eines Transduktors und 24 bzw. 27 BSS an einer gemeinsamen Stromversorgungsquelle, einem Transduktor. Der leistungsgeregelte Transduktor kann jedoch nur als Einheit geregelt werden, das bedeutet, daß geringe Unterschiede in den Gesamtwiderständen der einzelnen Stäbe zu unterschiedlichen Aufheizrampen in der Wiederauffüllphase führen müssen. Da die plastische Verformung der Zircaloyhüllen sehr sensibel von der Temperatur abhängt, muß dafür Sorge getragen werden, daß die spezifische Stableistung, d.h. die Aufheizrampe im Bereich der plastischen Verformung für die einzelnen Stäbe im Bündel möglichst gleich ist. In einem Abgleichsexperiment wurden Vorschaltwiderstände für die einzelnen Stäbe so bestimmt,

daß die Stäbe in axialer Mittelebene gleiche Hüllrohrtemperaturen aufwiesen. Da die Widerstände über nicht lineare Beziehungen mit den Temperaturen verknüpft sind (mit den geänderten Widerständen ändert sich die gesamte Temperaturverteilung) wurde dieser Vorgang iterativ so lange wiederholt, bis alle Hüllrohroberflächentemperaturen ausreichend genau (± 3 K) gleich waren.

Dazu wurde das Bündel von einer gleichmäßigen Ausgangstemperatur von 140 °C mit einer Stableistung von etwa 8 KW/Stab auf etwa 450-500°C bei schwacher Kühlung (etwa 2 m/s abwärtsgerichteter Dampfströmung) aufgeheizt. Der Abgleich erfolgte in zwei Gruppen (Transduktor 1 und 2), jedoch gleichzeitig. Der Stab mit der niedrigsten Aufheizrampe in jeder Gruppe wurde als Referenzstab gewählt und festgehalten. Die übrigen Stäbe jeder Gruppe erhielten Vorwiderstände, die von einem Erweiterungsprogramm des Programmsystems "Neff" (Unterprogramm "WABGL") errechnet werden. Dieser Vorgang des Abgleichversuchs wurde etwa drei- bis viermal wiederholt, bis die Hüllrohroberflächentemperaturen am Ende der Rampe bei etwa 450-500 °C ausreichend genau gleich waren. Bei diesem Abgleichsvorgang werden auch unterschiedlich hohe Wärmeverluste z.B. der Eckstäbe an die kältere Bündelkastenwand ausgeglichen, d.h. diese Stäbe erhalten eine etwas höhere Stableistung als die übrigen Stäbe der Gruppe. Für die Stäbe, die nur Innenthermoelemente besitzen, werden die Bezugs-Hüllrohrtemperaturen bestimmt, indem bei Nachbarstäben mit Innen- und Außenthermoelementen der Temperaturunterschied errechnet wird und von der gemessenen Innentemperatur der Stäbe ohne Außenthermoelemente abgezogen wird.

## 2.5 Instrumentierung

Abb. 6 zeigt das Schaltbild der Teststrecke mit Temperatur-, Druck-, Niveau- und Durchflußmeßstellen.

Tab. 1 faßt die wesentlichen für die Auswertung und den Datenreport wichtigen Meßstellen zusammen.

## 2.6 Instrumentierung des Bündels

Abb. 7 zeigt die Bündelgeometrie mit Stabdurchmesser, Stabmittenabstand, Abstandshalterstärke, Kasteninnenmaß und Kastenwandstärke sowie die Positionierung der Thermoelemente in der Draufsicht im Bündel.

### 2.6.1 Instrumentierung der Brennstabsimulatoren

In den Kreisen sind neben den Stabnummern Punkte mit den Zahlen 1, 2 und 3 eingezeichnet, die die radiale Position der Innenthermoelemente angeben. In der 0,7 mm starken Inconel-600-Hülle des Heizstabes sind 0,36 mm starke Mantelthermoelemente in Nuten eingelegt. Die Thermopaarung ist NiCr/Ni, die Isolierung MgO, die Meßspitze isoliert. Im Bereich der Meßspitze von ca. 30 mm sind die Thermoelemente eingelötet, in der übrigen Nut lediglich verstemmt. Die Normalinstrumentierung sieht drei im Winkel von 120° versetzte Thermoelemente in gleicher axialer Position (Mittelebene) vor. Links in Abb.8 ist eine Detailvergrößerung der Thermoelement-Einbettung gezeigt (Ti).

Die Punkte außen an den Kreisen zeigen Winkelpositionen der Außenthermoelemente an. Zur Messung der Temperaturen der Zircaloyhüllen werden Mantelthermoelemente verwendet, deren vorderes Ende an der Meßspitze mit einer etwa 30 mm langen Platinhülse versehen ist. Es handelt sich dabei ebenfalls um NiCr/Ni-Mantelthermoelemente mit isolierter Meßspitze und einem Außendurchmesser von 0,5 mm, über die jedoch ein Platinröhrchen der Abmessung 0,75 x 0,12 mm geschoben und auf einen Enddurchmesser von 0,72 mm heruntergehämmert wird. Dieses Thermoelement wird mit Hilfe einer kleinen Spezialpunktschweißmaschine durch fünf Punktschweißungen im Bereich der Platinhülse auf der Zry-4-Hülle befestigt, wodurch ein enger Kontakt zwischen Brennstabsimulatorhülle, Platinhülse und Thermoelement entsteht. Der Schweißstrom fließt dabei überwiegend durch die Platinhülse, ohne das Thermoelement zu beschädigen. Das nach oben bzw. unten aus der Platinhülse austretende Mantelthermoelement wird auf kürzestem Wege in die äußeren Kühlkanäle des Bündels geführt, um zwischen äußerer Stabreihe und der Kastenwand das Bündel zu verlassen. Rechts in Abb.8 ist eine Ausschnittsvergrößerung eines mit Platinhülse versehenen Thermoelementes gezeigt. Die wiedergegebene Schnittstelle liegt zwischen zwei Punktschweißungen. Sie zeigt einen guten Kontakt zwischen Brennstabsimulatorhülle, Platinhülse und Thermoelement. Sind mehrere Thermoelemente auf einer Mantellinie auf verschiedenen axialen Höhen angeordnet, so stehen an den Punkten mehrere Zahlenwerte, z.B. 1-8. Die Tabelle auf Abb. 7 gibt die Stabposition, die Stabnummern, die axialen Positionen der Innen-, Mantel- und Kastenthermoelemente an sowie die Gesamtzahl der TE`s, die auf jedem Stab angebracht sind. Z.B. enthält Stab 23 3 Innen-TE`s (TI) auf 1950 mm Höhe (axiale Mitte), 8 Mantelthermoelemente (TH) auf 150, 500 ..... 3900 mm und ein Ispra-TE (TS) auf 1950 mm.

Die axialen TE-Positionen werden von oben nach unten gezählt, wobei sich das obere beheizte Bündelende bei 0 mm und das untere beheizte Bündelende bei 3900 mm befindet.

Die Bezeichnungen auf den Kurvenabbildungen sind wie folgt zu lesen: z.B. TH 23/8 = das 8. Thermoelement auf Stab 23 von oben gezählt, also auf Position 3900 mm = unteres beheiztes Ende.

### 2.6.2 Instrumentierung der Abstandshalter mit Fluidthermoelementen

Die axialen Positionen der 8 Abstandshalter (AH) sind in Abb. 5 angegeben. Die Steghöhe der Abstandshalterbleche beträgt 38 mm. An einigen ausgewählten Positionen im Bündel sind Fluidthermoelemente (0,5 mm ø Mantelthermoelemente NiCr/Ni) an Abstandshaltern angebracht, und zwar an den Abstandshaltern I, IV und V. Die Meßspitzen befinden sich 5 mm unterhalb der jeweiligen Abstandshalterunterkante (UK) als auch 15 mm oberhalb der jeweiligen Abstandshalteroberkante (OK).

Die radialen Positionen im Bündel sind aus Abb. 7 zu entnehmen.
Auf den Kurvendarstellungen sind die Positionen der Fluidthermoelemente an den Abstandshaltern gemäß folgender Nomenklatur gekennzeichnet:
z.B. TAH 4/5/2 o

1. Ziffer = Ordnungszahl des AH in seiner axialen Position von oben gezählt
2. Ziffer = Ordnungszahl in x - Achsenrichtung des AH-Bleches
3. Ziffer = Ordnungszahl in y - Achsenrichtung des AH-Bleches
4. o bzw. u = o ≙ 15 (mm) oberhalb OK-AH
   u ≙ 5 (mm) unterhalb UK-AH

### 2.6.3 Instrumentierung des Bündelkastens

Die auf der Kastenaußenwand befestigten 0,5 mm ø Mantelthermoelemente sind auf Abb. 7 mit K 1 - K 10 gekennzeichnet. Davon befinden sich K 1-7 auf einer Mantellinie an den axialen Positionen von 150 - 3750 mm. In der axialen Mittelebene des Bündels ist der Kasten zusätzlich mit 3 weiteren Thermoelementen K 8-K 10 versehen (1950 mm).

Auf den Meßkurvendarstellungen sind die Temperaturschriebe der Kasten-TE's mit TK 1-10 bezeichnet.

### 2.6.4 Angaben zur Meßgenauigkeit

Der maximale Fehler bei der Meßwertfassung setzt sich aus dem systematischen und dem statistischen Fehler des Rechners und der Meßwertgeber zusammen.

1) Rechner PDP 11/03:

Das Fehlerband des Rechners vom Eingang der Verstärker bis zur Aufzeichnung auf der Magnetplatte setzt sich wie folgt zusammen:

a) Fehler des Rechners, bezogen auf eine 14 bit Zahlendarstellung:
14 bit $\pm$ 1 bit (letztes signifikantes bit) $\leq \pm$ 0,006 %

b) Fehler der Verstärker: $\leq \pm$ 0.044 %

2) Temperaturmessung:

Die Thermoelemente wurden nach 1/2 DIN-Genauigkeit bestellt und laut Eichschein innerhalb dieser Toleranz geliefert.

1/2 DIN-Genauigkeit heißt:

Abweichung bis 400 $^{o}$C < $\pm$ 1,5 $^{o}$C = $\pm$ 0,375 %

Abweichung bis 800 $^{o}$C < $\pm$ 3 $^{o}$C = $\pm$ 0,375 %

Stichprobenweise Nacheichungen im eigenen Hause haben bestätigt, daß die Meßwertgenauigkeit, die in den Eichprotokollen angegeben wird, auch nach dem Aufhämmern der Platinhülsen unverändert gut geblieben ist.

3) Mengenmessung

Die Meßblenden wurden nach dem Versuch ausgebaut und nachgeeicht. Die Abweichungen gegenüber der Auslegungs-Blendenrechnungen ergaben Werte <1 % .

4) Druckmessung

a) Stabinnendrücke:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eichmanometer | 0 - 160 | bar | |
| Klassengenauigkeit | 0,1 | bar | |
| Ablesegenauigkeit | <$\pm$0,1 | bar | ≙ 0,1 % |
| Abweichung lt. Eichschein | <$\pm$0,1 | bar | |
| Druckgeber | <$\pm$0,65 | bar | ≙ $\pm$0,25 % |

b) Systemdrücke in Testanlage

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eichmanometer | 0 - 2 | bar | |
| Klassengenauigkeit | 0,1 | | ≙ $\pm$ 0,1 % |
| Ablesegenauigkeit | <0,001 | bar | |
| Druckgeber 0 - 5 bar abs. | <$\pm$0,05 | bar | ≙ $\pm$ 0,4 % |

c) Differenzdruckgeber

| | | |
|---|---|---|
| Eichmanometer | 0 - 2 bar | |
| Klassengenauigkeit | 0,1 | ≙ 0,1 % |
| Ablesegenauigkeit | 0,001 bar | |
| Differenzdruckgeber | 0 - 0,25 bar | ≙ <±0,25 % |
| Differenzdruckgeber | 0 - 0,5 bar | ≙ <±0,25 % |

Die Druckaufnehmer wurden bei Betriebstemperatur zusammen mit der Meßkette Rechner geeicht. Die Eichung erfolgte mittels des Rechenprogrammes "DEICH", wobei die Korrekturkoeffizienten errechnet und das Meßwert-Erfassungsprogramm eingesetzt werden.

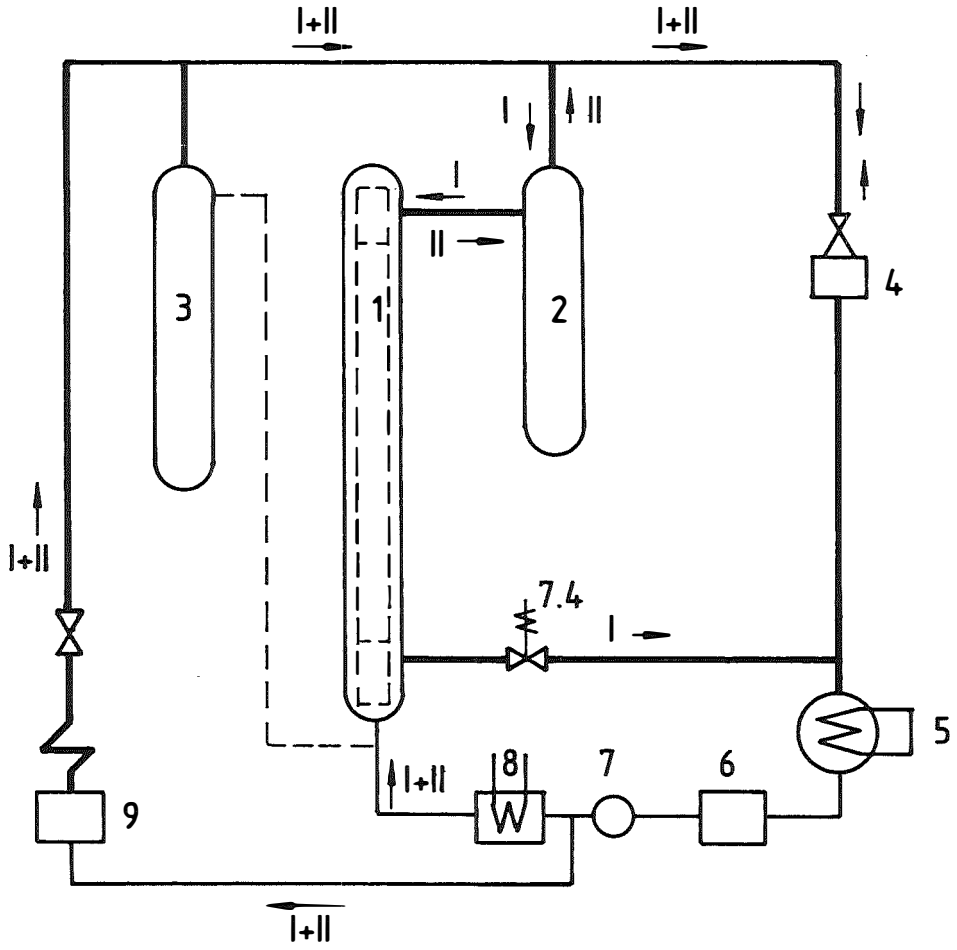
## 2.7 Versuchsablauf

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

- Überprüfung der Sicherheitsabschaltsysteme
- Rechnerabgleich (Meßwertverstärker)
- Eichung aller Druck- und Differenzdruckaufnehmer über den Rechner
- Einstellung des in der Wiederauffüllphase abwärts durch das Bündel strömenden Dampfmassenstromes und der Dampftemperatur.
- Einstellung der Flutwassermenge mit Flutwassertemperatur.
- Überprüfung aller Stäbe auf Dichtheit bei 70 bar über 10 min.
- Überprüfung aller Ventilstellungen.

Während dieser Arbeiten wurde das Bündel bei etwa 4,4 bar mit Dampf von 150 °C von oben nach unten durchströmt (Gleichgewichtszustand).

Bei diesem Betriebszustand erfolgte die Druckaufgabe auf die Stäbe mit 70 bar Helium. Das Aufheizen des Bündels erfolgte mit etwa 7,8 KW/Stab. Mit Erreichen einer Hüllrohrtemperatur von 765 °C in Bündelmitte (1950 mm) wurde die Leistung auf etwa 6,6 KW/Stab zurückgenommen und das Fluten des Bündels mit einer kalten Flutwassersteiggeschwindigkeit von etwa 3 cm/s eingeleitet. Dazu wurde Ventil 7.4 geschlossen. Der maximale Innendruck der Stäbe lag bei 88 bar, der mittlere Berstdruck bei 68 bar und die mittlere Bersttemperatur für die 25 Innenstäbe des Bündels etwa bei 800 °C. Das Bersten der Stabhüllen erfolgte frühzeitig in der Flutphase bei nahezu konstantem Hüllrohrtemperaturplateau. Das Zeitintervall des Berstens der 25 Innenstäbe betrug 23,7 Sekunden. Mit dem Wiederbenetzen des oberen beheizten Bündelendes wurde die Leistung abgeschaltet. Abb. 9 zeigt schematisch die Versuchsführung.

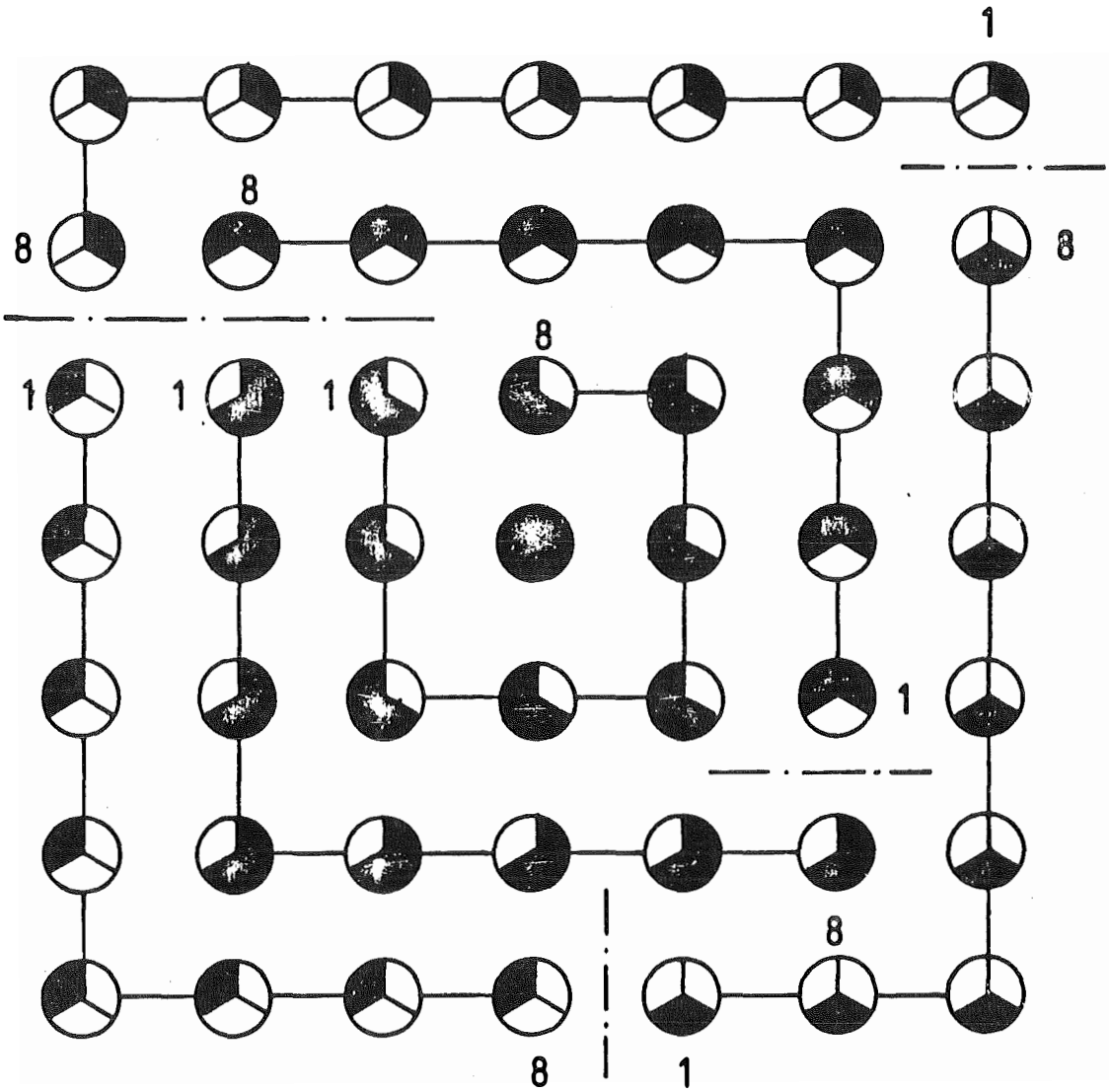



| | Bezeichnungen in Abb. 6 |
|---|---|
| 1 Teststrecke | 2 |
| 2 Wasserauswurf-sammeltank | 5 |
| 3 Containment-simulator | 4 |
| 4 Dampfumformer | 3.1 |
| 5 Kondensator | 12 |
| 6 Speisewasser-behälter | 14 |
| 7 Kühlmittelpumpe | 15 |
| 8 Wasservorwärmer | 6.2 u. 6.3 |
| 9 Dampfkessel | Anfahrkessel |

I Wiederauffüllphase
II Flutphase

Abb. 1 Versuchskreislauf für Hüllrohrverformungsexperimente Bündel - Tests

49 Stab-Bündel




Transduktor 1

- Phase 1
- Phase 2
- Phase 3

Transduktor 2

- Phase 1 + ○
- Phase 2 + ○
- Phase 3 + ●

} außerhalb Teststrecke

Zentralstab

Abb. 2 Phasenbelegung der Transduktoren

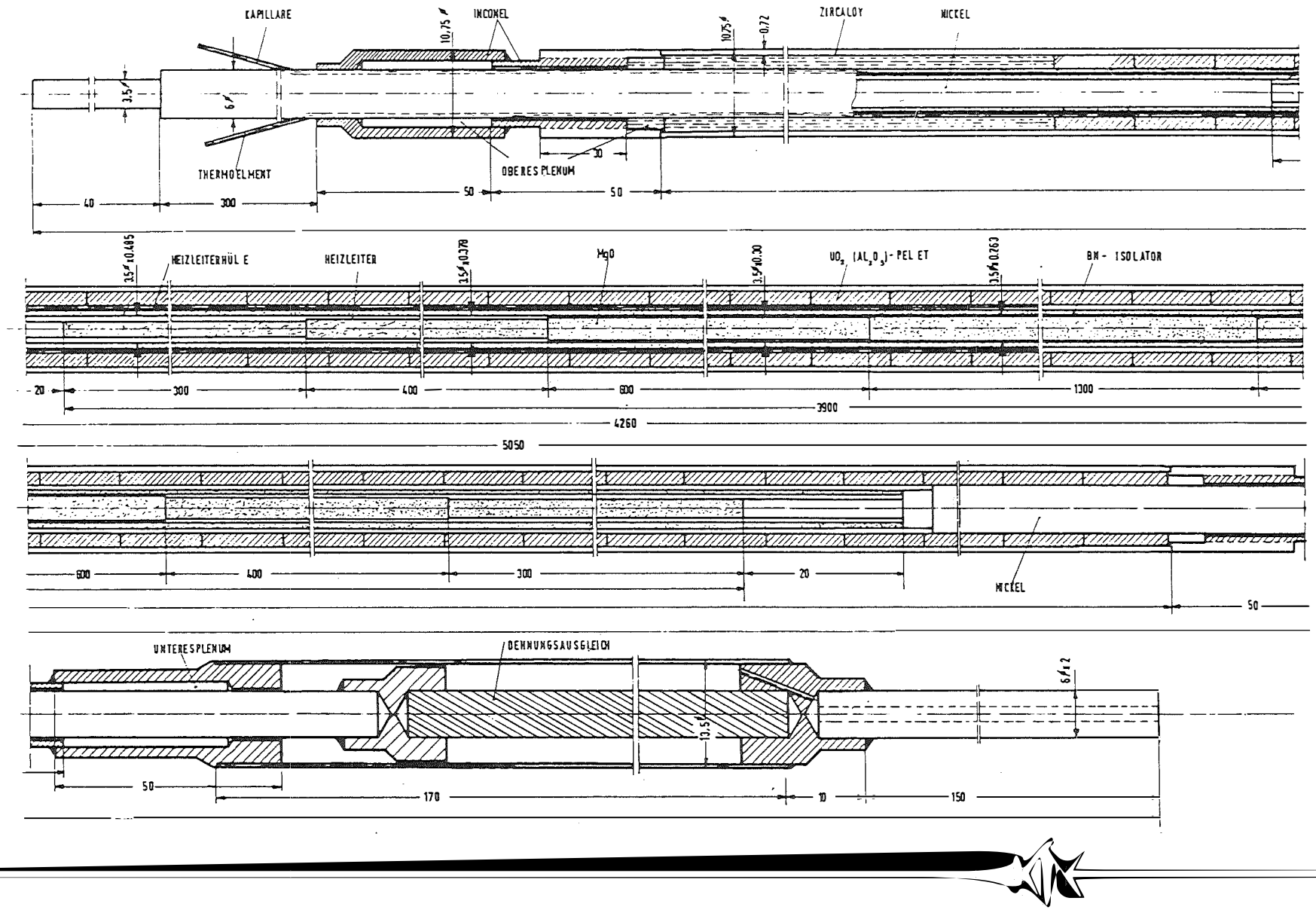



Abb. 3 REBEKA 5

Konstruktionszeichnung des Brennstabsimulators mit Stufenheizleiter

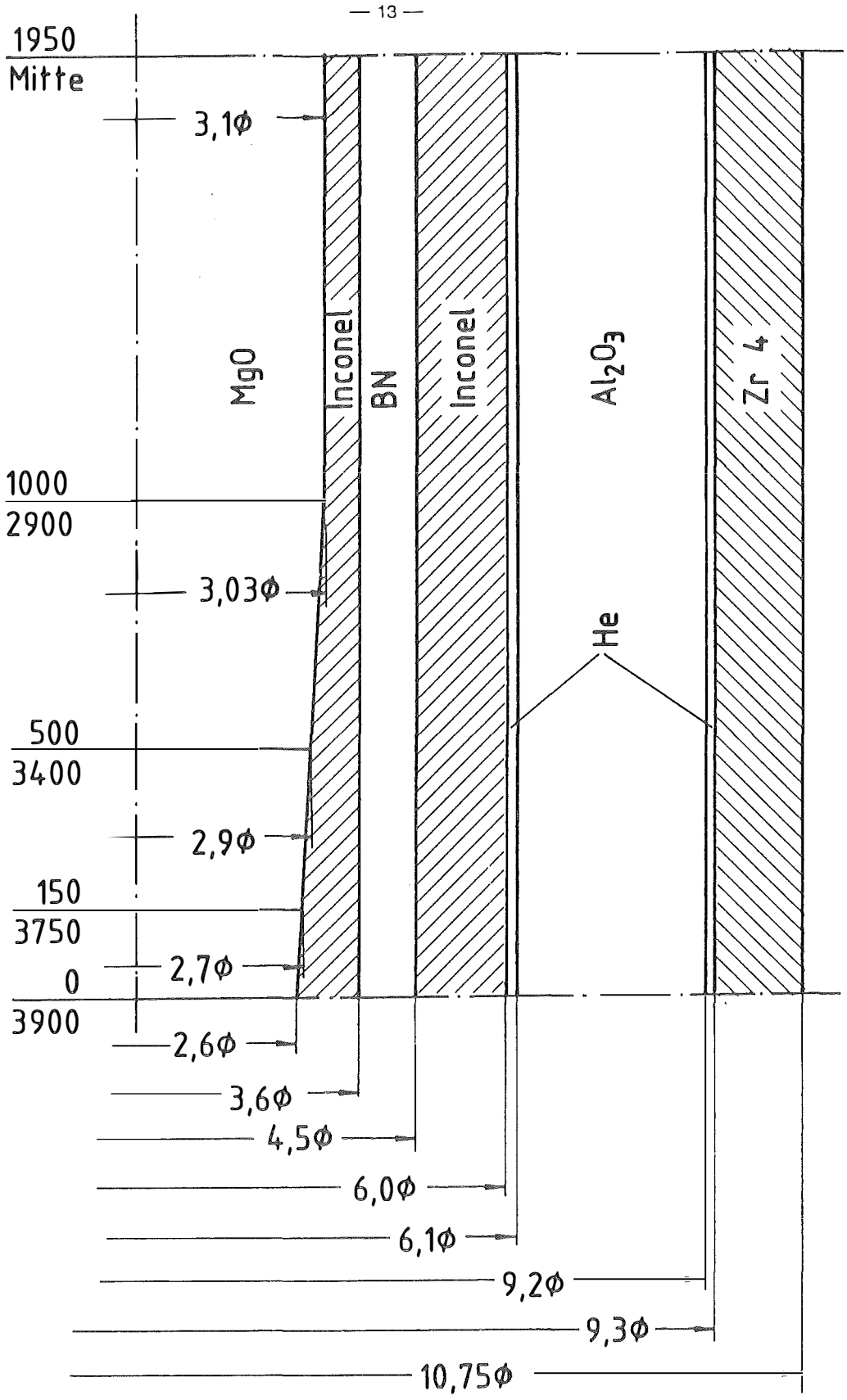



Abb. 4 Nennmaß des Brennstabsimulators

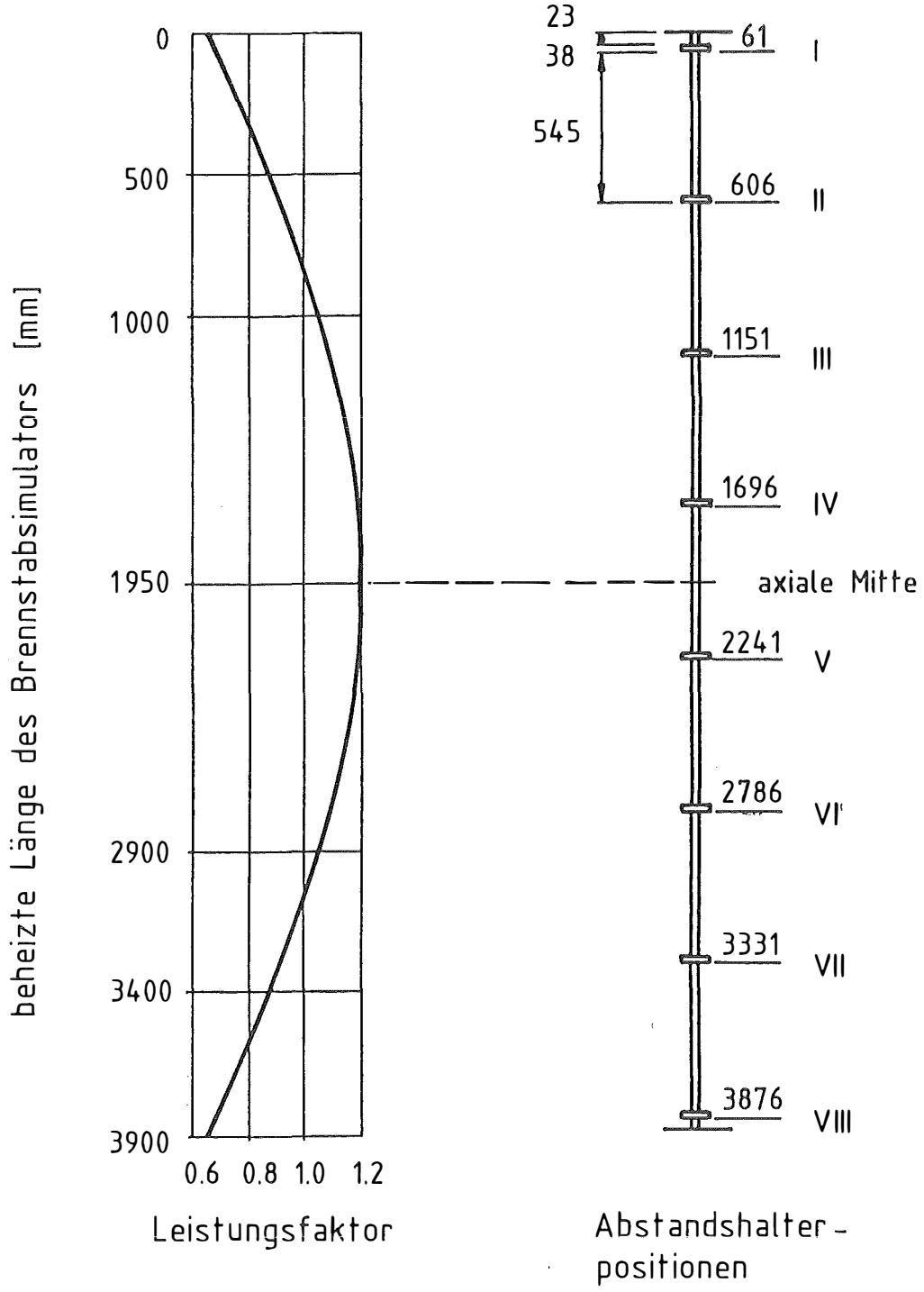



Abb. 5 Axiales Leistungsprofil des Brennstabsimulators und der Abstandshalteranordnung

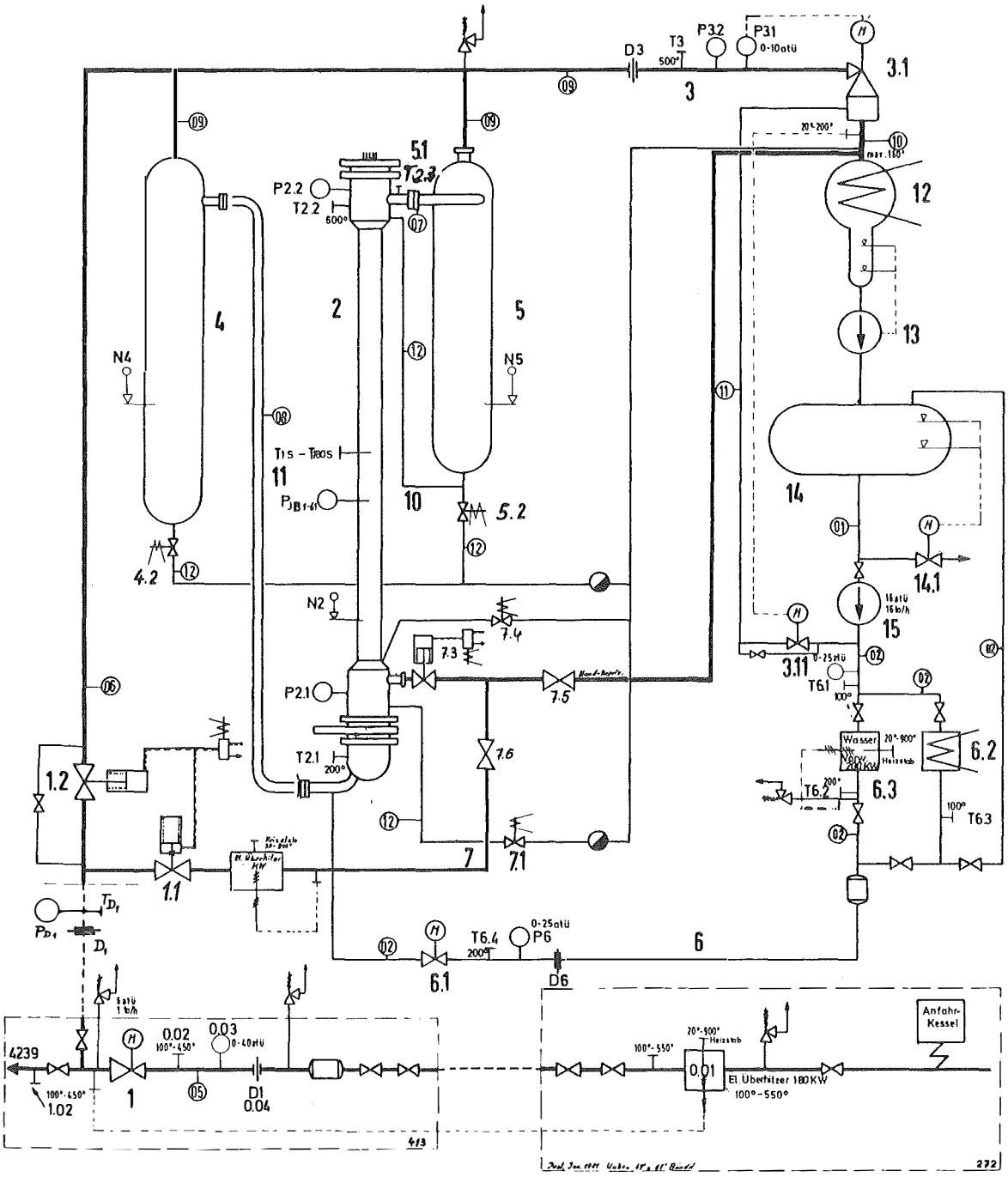
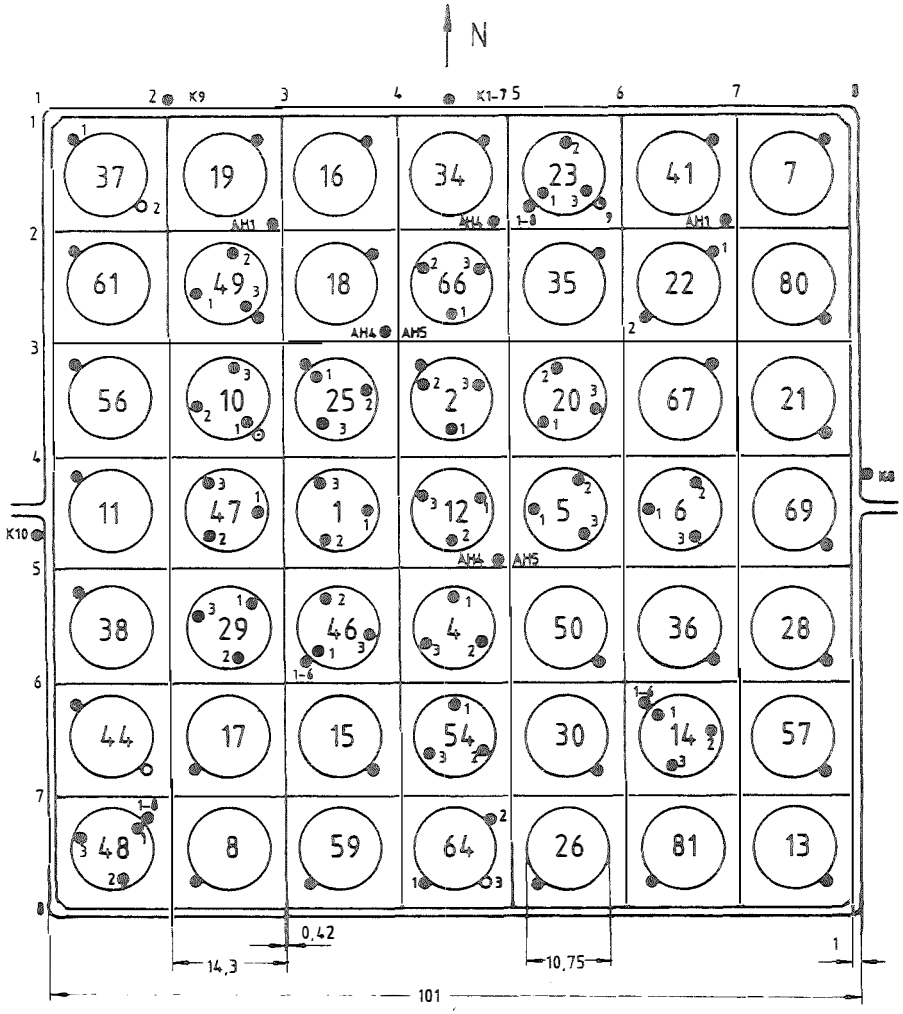



Abb. 6 Schaltbild der Teststrecke mit Temperatur-, Druck-, Niveau- und Durchflußmeßstellen




oberes beheiztes Bündelende = 0 mm
unteres beheiztes Bündelende = 3900 mm

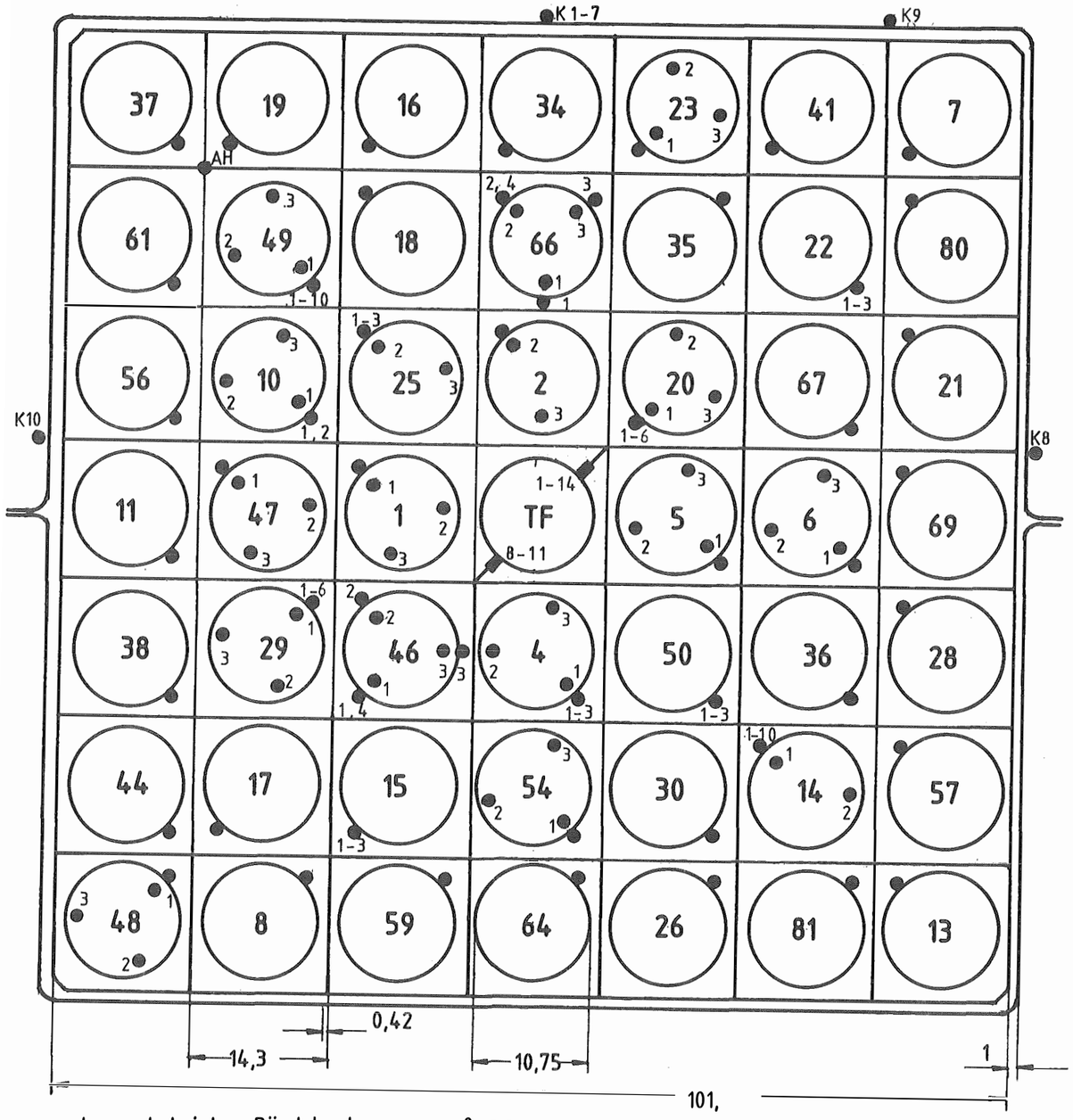
TE-Positionen werden in axialer Richtung von oben nach unten angegeben,
z.B.: TH 46/3 → Stab 46, 3 TE in Tabelle auf 1807 mm

| Position | Stab-Nr. | Ti-Posit. axial | TE-Positionen axial /mm/ | Anzahl TE |
|---|---|---|---|---|
| 1/1 | 37 | | 1950 Ispra Ø 1 - 1950(O) | 2 |
| 1/2 | 19 | | 1950 | 1 |
| 1/3 | 16 | | 1950 | 1 |
| 1/4 | 34 | | 1950 | 1 |
| 1/5 | 23 | 3x1950 | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3900 | 12 |
| 1/6 | 41 | | 1950 Ispra Ø 0,5 - 1950 | 1 |
| 1/7 | 7 | | 1950 | 1 |
| 2/1 | 61 | | 1950 | 1 |
| 2/2 | 49 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 2/3 | 18 | | 1950 | 1 |
| 2/4 | 66 | 3x1950 | | 3 |
| 2/5 | 35 | | 1950 | 1 |
| 2/6 | 22 | | 2x1950 | 2 |
| 2/7 | 80 | | 1950 | 1 |
| 3/1 | 56 | | 1950 | 1 |
| 3/2 | 10 | 3x1950 | 1950 Ispra Ø 0,5 - 1950 (⊙) | 5 |
| 3/3 | 25 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 3/4 | 2 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 3/5 | 20 | 3x1950 | | 3 |
| 3/6 | 67 | | 1950 | 1 |
| 3/7 | 21 | | 1950 | 1 |
| 4/1 | 11 | | 1950 | 1 |
| 4/2 | 47 | 3x1950 | | 3 |
| 4/3 | 1 | 3x1950 | | 3 |
| 4/4 | 12 | 3x1950 | | 3 |
| 4/5 | 5 | 3x1950 | | 3 |
| 4/6 | 6 | 3x1950 | | 3 |
| 4/7 | 69 | | 1950 | 1 |
| 5/1 | 38 | | 1950 | 1 |
| 5/2 | 29 | 3x1950 | | 3 |
| 5/3 | 46 | 3x1950 | 1677,1707,1807,1950,2057,2157 | 9 |
| 5/4 | 4 | 3x1950 | | 3 |
| 5/5 | 50 | | 1950 | 1 |
| 5/6 | 36 | | 1950 | 1 |
| 5/7 | 28 | | 1950 | 1 |
| 6/1 | 44 | | 1950 Ispra Ø 1 - 1950 | 2 |
| 6/2 | 17 | | 1950 | 1 |
| 6/3 | 15 | | 1950 | 1 |
| 6/4 | 54 | 3x1950 | | 3 |
| 6/5 | 30 | | 1950 | 1 |
| 6/6 | 14 | 3x1950 | 1677,1707,1807,1950,2057,2157 | 9 |
| 6/7 | 57 | | 1950 | 1 |
| 7/1 | 48 | 3x1950 | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3900 | 11 |
| 7/2 | 8 | | 1950 | 1 |
| 7/3 | 59 | | 1950 | 1 |
| 7/4 | 64 | | 1950 Ispra Ø 0,5 u. Ø 1 - 1950 | 3 |
| 7/5 | 26 | | 1950 | 1 |
| 7/6 | 81 | | 1950 | 1 |
| 7/7 | 13 | | 1950 | 1 |
| Kasten | | | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3x1950 | 10 |
| Fluid | Abstandshalter 1,4,5 5 mm unterhalb AH, 15 mm oberhalb AH | | | 13 |



Abb. 7 Instrumentierungsplan des Bündels (Temperaturmeßstellen)

| Position | Stab-Nr. | Ti Position axial mm | TE-Positionen axial mm | Anzahl TE |
|---|---|---|---|---|
| 1/1 | 37 | | 1850 | 1 |
| 1/2 | 19 | | 1850 | 1 |
| 1/3 | 16 | | 1850 | 1 |
| 1/4 | 34 | | 1850 | 1 |
| 1/5 | 23 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 1/6 | 41 | | 1850 | 1 |
| 1/7 | 7 | | 1850 | 1 |
| 2/1 | 61 | | 1850 | 1 |
| 2/2 | 49 | 3 x 1950 | -150, 150, 500, 1000, 1850, 1950, 2900, 3400, 3750, 3900, | 13 |
| 2/3 | 18 | | 1850 | 1 |
| 2/4 | 66 | 3 x 1950 | 3 x 1800, 1850 | 7 |
| 2/5 | 35 | | 1850 | 1 |
| 2/6 | 22 | | 1750, 1800, 1850, | 3 |
| 2/7 | 80 | | 1850 | 1 |
| 3/1 | 56 | | 1850 | 1 |
| 3/2 | 10 | 3 x 1950 | 1850, 1950 | 5 |
| 3/3 | 25 | 2 x 1950 | 1750, 1800, 1850 | 5 |
| 3/4 | 2 | 2 x 1950 | 1850 | 3 |
| 3/5 | 20 | 3 x 1950 | 1750, 1800, 1850, 1950, 2050, 2150 | 9 |
| 3/6 | 67 | | 1850 | 1 |
| 3/7 | 21 | | 1850 | 1 |
| 4/1 | 11 | | 1850 | 1 |
| 4/2 | 47 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 4/3 | 1 | 2 x 1950 | 1850 | 3 |
| 4/4 | TF | | 315, 860, 1205, 1305, 1405, 1505, 1605, 1750, 1850, 3585 | 11 |
| 4/5 | 5 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 4/6 | 6 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 4/7 | 69 | | 1850 | 1 |
| 5/1 | 38 | | 1850 | 1 |
| 5/2 | 29 | 3 x 1950 | 1750, 1800, 1850, 1950, 2050, 2150, | 9 |
| 5/3 | 46 | 3 x1 1950 | 3 x 1800, 1850 | 7 |
| 5/4 | 4 | 3 x 1950 | 1750, 1800, 1850 | 6 |
| 5/5 | 50 | | 1750, 1800, 1850 | 3 |
| 5/6 | 36 | | 1850 | 1 |
| 5/7 | 28 | | 1850 | 1 |
| 6/1 | 44 | | 1850 | 1 |
| 6/2 | 17 | | 1850 | 1 |
| 6/3 | 15 | | 1750, 1800, 1850 | 3 |
| 6/4 | 54 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 6/5 | 30 | | 1850 | 1 |
| 6/6 | 14 | 2 x 1950 | -150, 150, 500, 1000, 1850, 1950, 2900, 3400, 3750, 3900 | 12 |
| 6/7 | 57 | | 1850 | 1 |
| 7/1 | 48 | 3 x 1950 | 1850 | 4 |
| 7/2 | 8 | | 1850 | 1 |
| 7/3 | 59 | | 1850 | 1 |
| 7/4 | 64 | | 1850 | 1 |
| 7/5 | 26 | | 1850 | 1 |
| 7/6 | 81 | | 1850 | 1 |
| 7/7 | 13 | | 1850 | 1 |
| Kasten | | | 150, 500, 1000, 1950, 2900, 3400, 3750, 3 x 1950 | 10 |
| Fluid | Abstandshalter 1,4,5,8 | | 15 mm oberhalb u. 5 mm unterhalb AH | 6 |
| Dampf | | | Dampftemperatur in Röhrchen d. Verteilers | 1 |



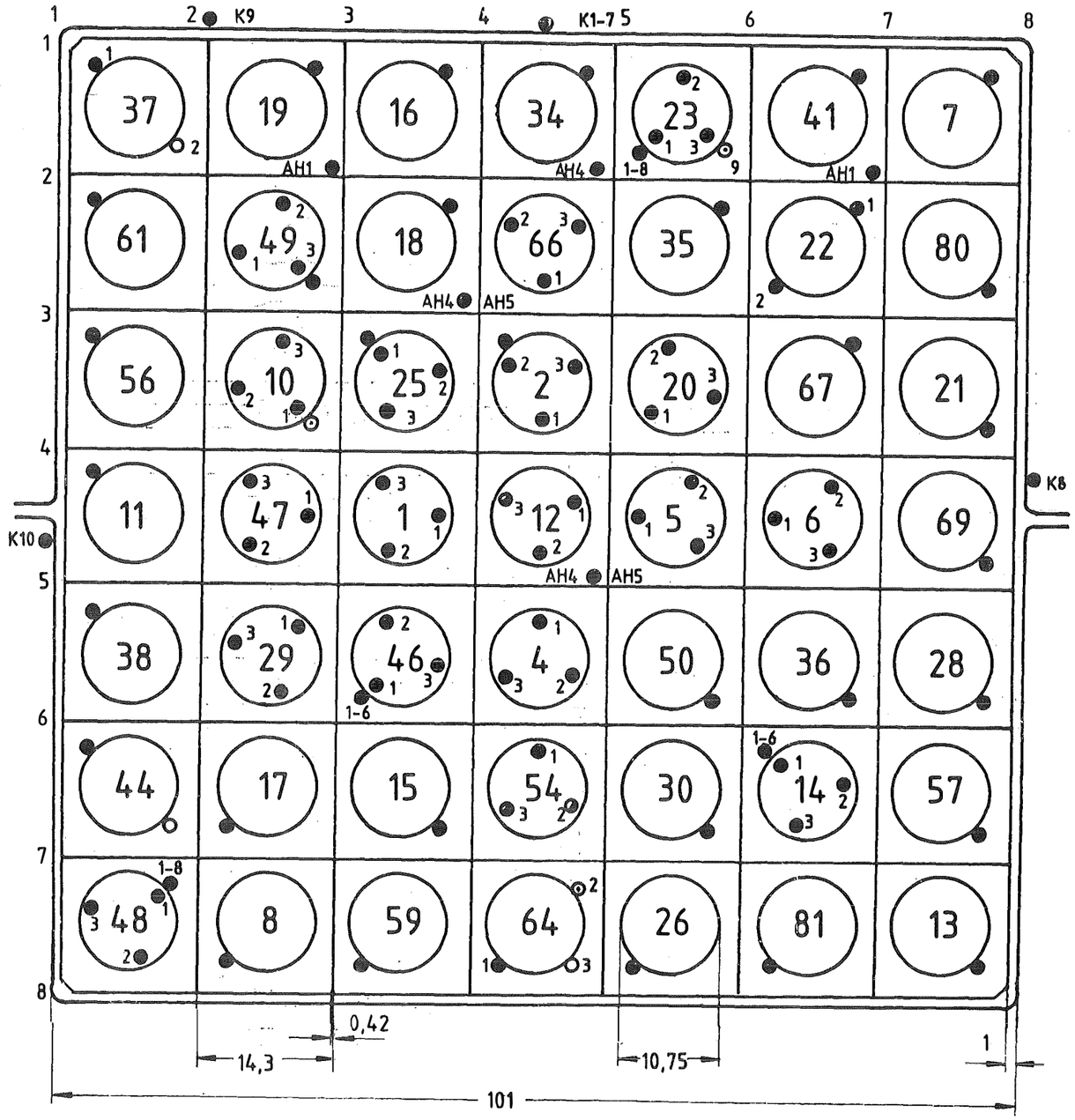

oberes beheiztes Bündelende = 0 mm
unteres beheiztes Bündelende = 3900 mm

TE-Positionen werden in axialer Richtung von oben nach unten angegeben,
z.B.: TH 25/1 → Stab 25, oberstes TE auf Position 1750 mm

Instrumentierungsplan des Bündels
(Temperaturmeßstellen)

Faltblatt von Abb. 7

| Position | Stab-Nr. | Ti-Posit. axial | TE-Positionen axial /mm/ | Anzahl TE |
|---|---|---|---|---|
| 1/1 | 37 | | 1950 Ispra Ø 1 - 1950(O) | 2 |
| 1/2 | 19 | | 1950 | 1 |
| 1/3 | 16 | | 1950 | 1 |
| 1/4 | 34 | | 1950 | 1 |
| 1/5 | 23 | 3x1950 | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3900 | 12 |
| 1/6 | 41 | | 1950 \| Ispra Ø 0,5 - 1950 | 1 |
| 1/7 | 7 | | 1950 | 1 |
| 2/1 | 61 | | 1950 | 1 |
| 2/2 | 49 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 2/3 | 18 | | 1950 | 1 |
| 2/4 | 66 | 3x1950 | | 3 |
| 2/5 | 35 | | 1950 | 1 |
| 2/6 | 22 | | 2x1950 | 2 |
| 2/7 | 80 | | 1950 | 1 |
| 3/1 | 56 | | 1950 | 1 |
| 3/2 | 10 | 3x1950 | 1950 Ispra Ø 0,5 - 1950 (⊙) | 5 |
| 3/3 | 25 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 3/4 | 2 | 3x1950 | 1950 | 4 |
| 3/5 | 20 | 3x1950 | | 3 |
| 3/6 | 67 | | 1950 | 1 |
| 3/7 | 21 | | 1950 | 1 |
| 4/1 | 11 | | 1950 | 1 |
| 4/2 | 47 | 3x1950 | | 3 |
| 4/3 | 1 | 3x1950 | | 3 |
| 4/4 | 12 | 3x1950 | | 3 |
| 4/5 | 5 | 3x1950 | | 3 |
| 4/6 | 6 | 3x1950 | | 3 |
| 4/7 | 69 | | 1950 | 1 |
| 5/1 | 38 | | 1950 | 1 |
| 5/2 | 29 | 3x1950 | | 3 |
| 5/3 | 46 | 3x1950 | 1677,1707,1807,1950,2057,2157 | 9 |
| 5/4 | 4 | 3x1950 | | 3 |
| 5/5 | 50 | | 1950 | 1 |
| 5/6 | 36 | | 1950 | 1 |
| 5/7 | 28 | | 1950 | 1 |
| 6/1 | 44 | | 1950 Ispra Ø 1 - 1950 | 2 |
| 6/2 | 17 | | 1950 | 1 |
| 6/3 | 15 | | 1950 | 1 |
| 6/4 | 54 | 3x1950 | | 3 |
| 6/5 | 30 | | 1950 | 1 |
| 6/6 | 14 | 3x1950 | 1677,1707,1807,1950,2057,2157 | 9 |
| 6/7 | 57 | | 1950 | 1 |
| 7/1 | 48 | 3x1950 | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3900 | 11 |
| 7/2 | 8 | | 1950 | 1 |
| 7/3 | 59 | | 1950 | 1 |
| 7/4 | 64 | | 1950 Ispra Ø 0,5 u. Ø 1 - 1950 | 3 |
| 7/5 | 26 | | 1950 | 1 |
| 7/6 | 81 | | 1950 | 1 |
| 7/7 | 13 | | 1950 | 1 |
| Kasten | | | 150,500,1000,1950,2900,3400,3750,3x1950 | 10 |
| Fluid | Abstandshalter 1,4,5 5 mm unterhalb AH, 15 mm oberhalb AH | | | 13 |



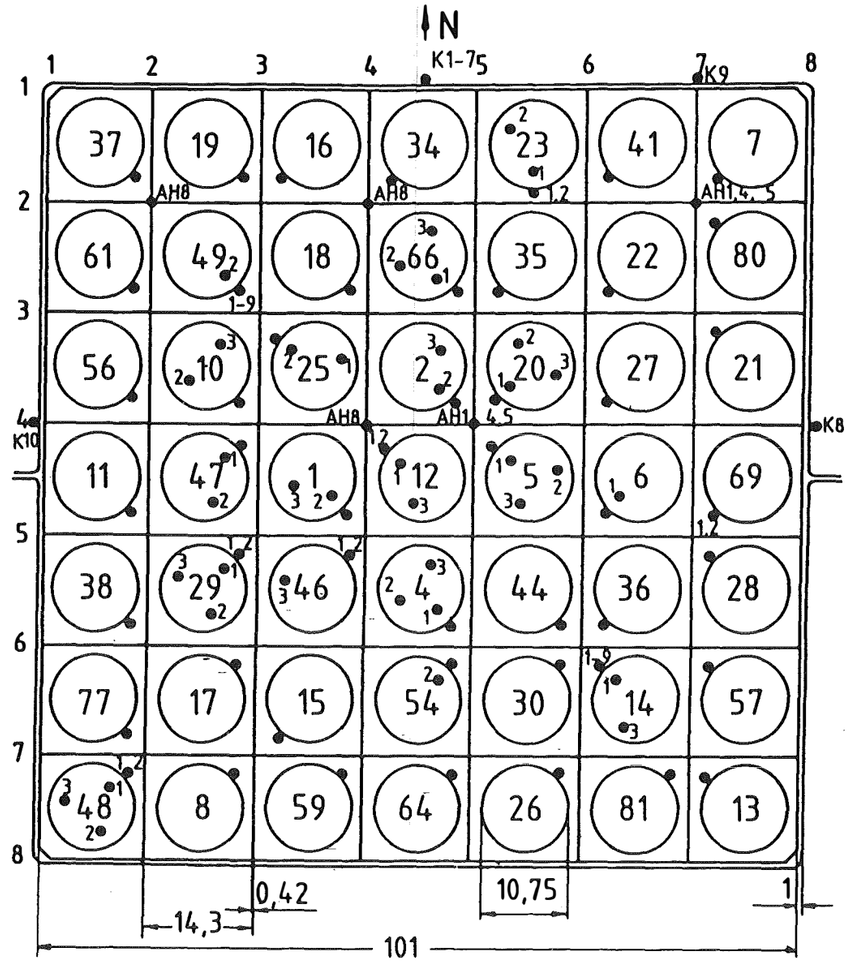

oberes beheiztes Bündelende = 0 mm
unteres beheiztes Bündelende = 3900 mm

TE-Positionen werden in axialer Richtung von oben nach unten angegeben,
z.B.: TH 46/3 → Stab 46, 3. TE in Tabelle auf 1807 mm

Instrumentierungsplan des Bündels
(Temperaturmeßstellen)

Faltblatt von Abb. 7

| Position | Stab Nr. | Ti-Position axial | TE-Position axial mm | Anzahl TE |
|---|---|---|---|---|
| 1/1 | 37 | | 2100 | 1 |
| 1/2 | 19 | | 2100 | 1 |
| 1/3 | 16 | | 2100 | 1 |
| 1/4 | 34 | | 2100 | 1 |
| 1/5 | 23 | 2x 1950 | 1850, 2100 | 4 |
| 1/6 | 41 | | 2100 | 1 |
| 1/7 | 7 | | 2100 | 1 |
| 2/1 | 61 | | 2100 | 1 |
| 2/2 | 49 | 1x 1950 | -150,150,500,1000,1850,2100,2900,3400,3900 | 10 |
| 2/3 | 18 | | 2100 | 1 |
| 2/4 | 66 | 3x 1950 | 2100 | 4 |
| 2/5 | 35 | | 2100 | 1 |
| 2/6 | 22 | | 2100 | 1 |
| 2/7 | 80 | | 2100 | 1 |
| 3/1 | 56 | | 2100 | 1 |
| 3/2 | 10 | 2x 1950 | 2100 | 3 |
| 3/3 | 25 | 2x 1950 | 2100 | 3 |
| 3/4 | 2 | 2x 1950 | 2100 | 3 |
| 3/5 | 20 | 3x 1950 | 2100 | 4 |
| 3/6 | 27 | | 2100 | 1 |
| 3/7 | 21 | | 2100 | 1 |
| 4/1 | 11 | | 2100 | 1 |
| 4/2 | 47 | 2x 1950 | 2100 | 3 |
| 4/3 | 1 | 2x 1950 | 2100 | 3 |
| 4/4 | 12 | 2x 1950 | 1850,2100 | 4 |
| 4/5 | 5 | 3x 1950 | 2100 | 4 |
| 4/6 | 6 | 1x 1950 | 2100 | 3 |
| 4/7 | 69 | | 1850,2100 | 1 |
| 5/1 | 38 | | 2100 | 1 |
| 5/2 | 29 | 3x 1950 | 1850,2100 | 5 |
| 5/3 | 46 | 1x 1950 | 1850,2100 | 3 |
| 5/4 | 4 | 2x 1950 | 1850,2100 | 4 |
| 5/5 | 44 | | 2100 | 1 |
| 5/6 | 36 | | 2100 | 1 |
| 5/7 | 28 | | 2100 | 1 |
| 6/1 | 77 | | 2100 | 1 |
| 6/2 | 17 | | 2100 | 1 |
| 6/3 | 15 | | 2100 | 1 |
| 6/4 | 54 | 1x 1950 | 2100 | 2 |
| 6/5 | 30 | | 2100 | 1 |
| 6/6 | 14 | 2x 1950 | -150,150,500,1000,1850,2100,2900,3400,3900 | 11 |
| 6/7 | 57 | | 2100 | 1 |
| 7/1 | 48 | 3x 1950 | 1850,2100 | 5 |
| 7/2 | 8 | | 2100 | 1 |
| 7/3 | 59 | | 2100 | 1 |
| 7/4 | 64 | | 2100 | 1 |
| 7/5 | 26 | | 2100 | 1 |
| 7/6 | 81 | | 2100 | 1 |
| 7/7 | 13 | | 2100 | 1 |
| Kasten | | | 150,500,1000,1950,2900, 3400,3750,3x 1950 | 10 |
| -Fluid | Abstandshalter 1, 4,5,8 5mm unterhalb/AH 1,4,5,15mm oberhalb | | | 15 |

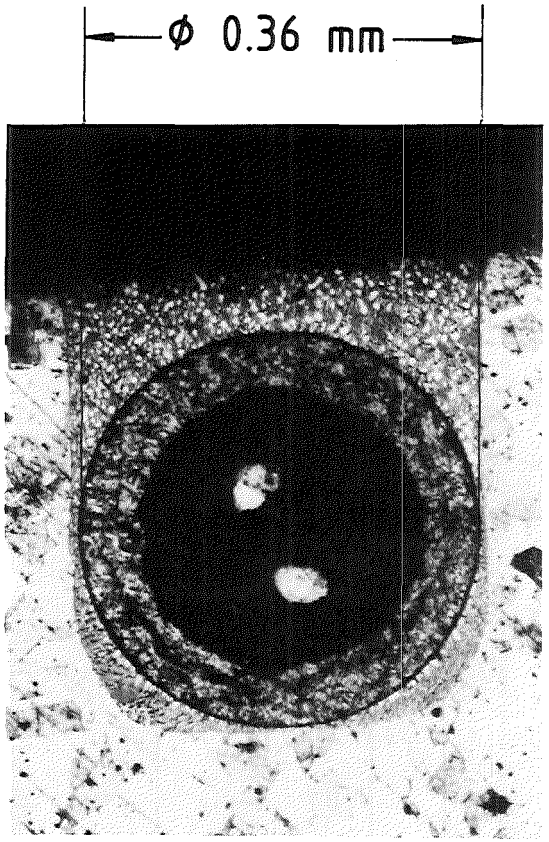



oberes beheiztes Bündelende = 0 mm
unteres beheiztes Bündelende = 3900 mm

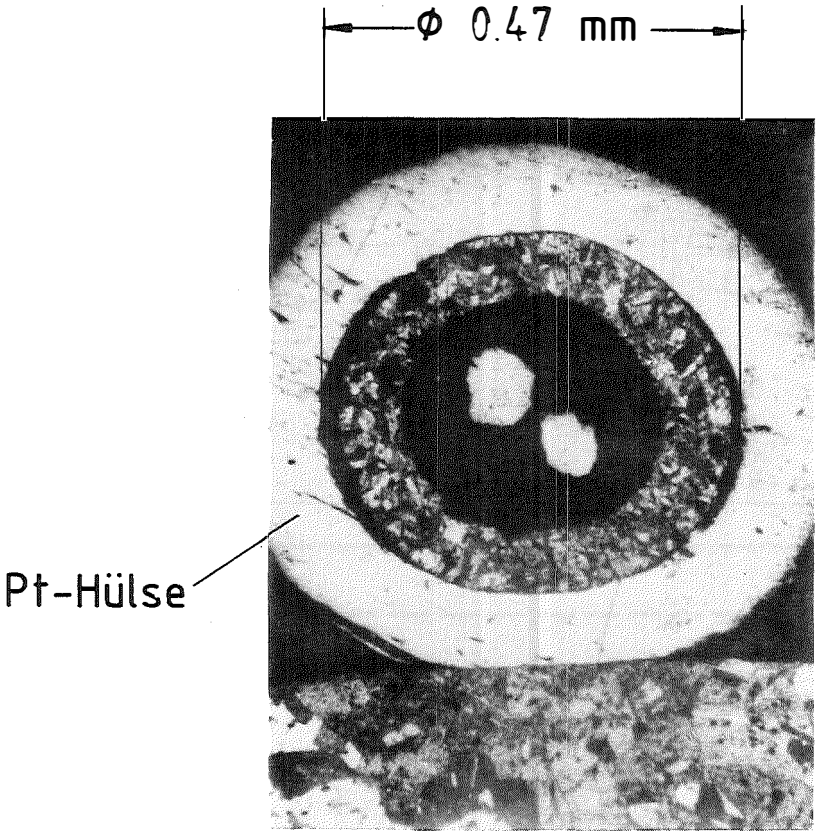
TE-Positinen werden in axialer Richtung von oben nach unten angeben, z.B. TH 14/3-Stab 14, 3. TE in Tabelle auf 500 mm.

# Instrumentierungsplan des Bündels (Temperaturmeßstellen)

Faltblatt von Abb.7




Thermoelement in Heizstabhülle eingebettet (TI)




Thermoelement mit Platinhülse auf Zircaloy-Hülle aufgepunktet (TH)

Abb. 8 Thermoelementanbringung

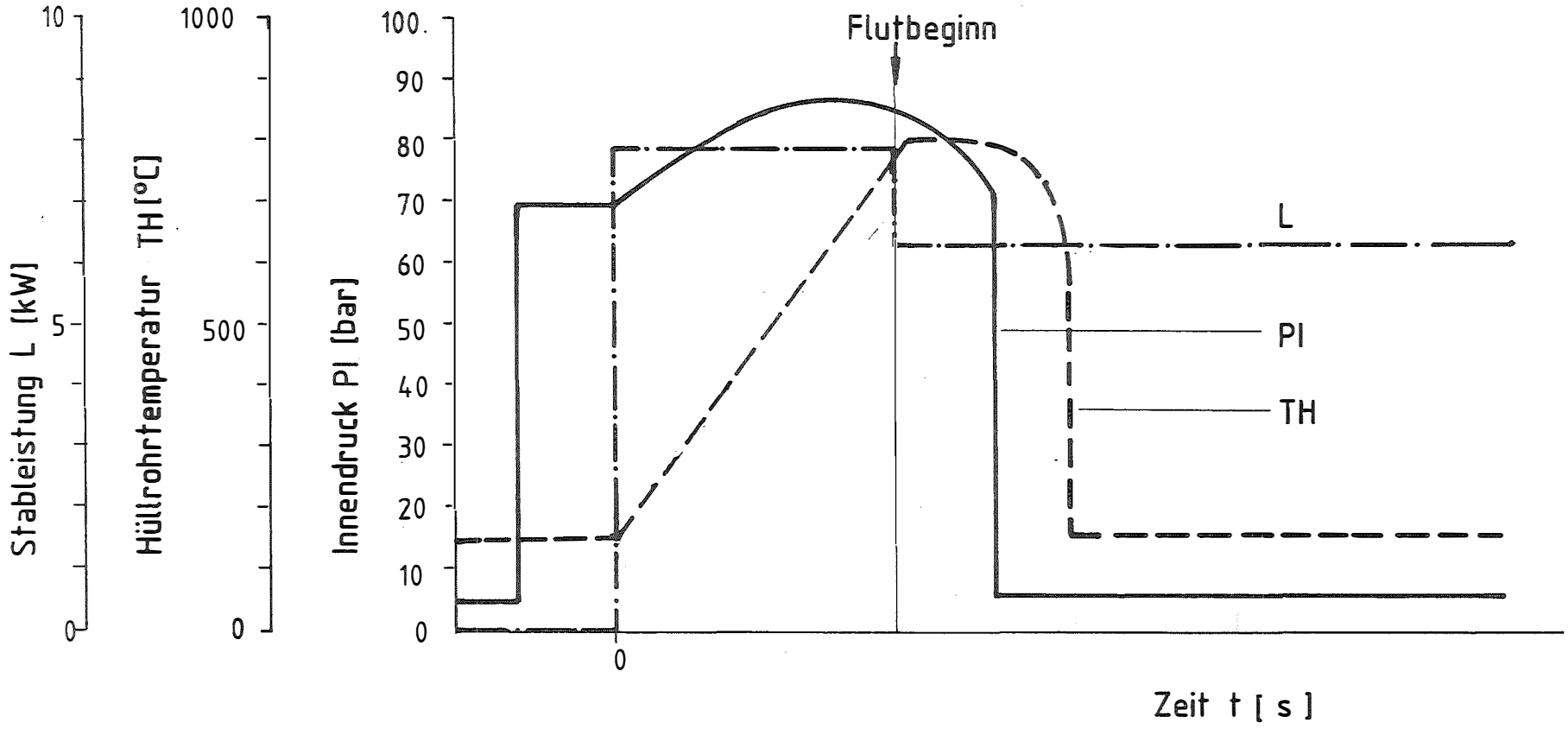



Abb. 9 REBEKA 5
Schematische Darstellung der Versuchsführung

# 3. Versuchsdaten:

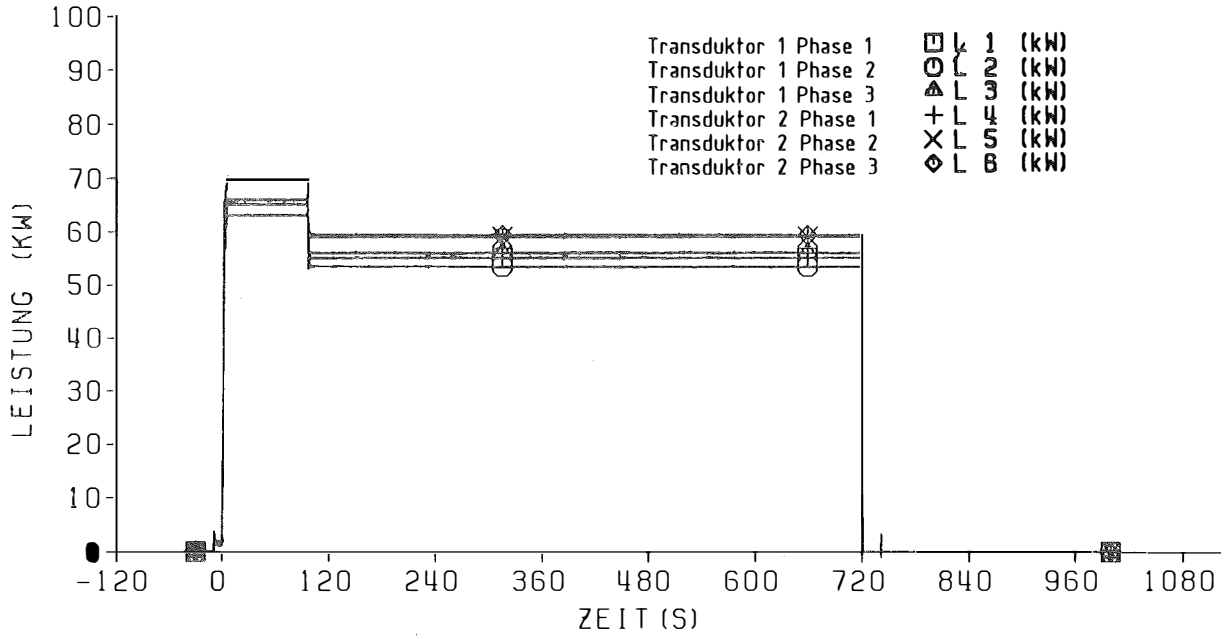
## 3.1 Systemdaten der Versuchsanlage

### 3.1.1 Elektrische Phasenleistungen des Bündels (Abb. 10)

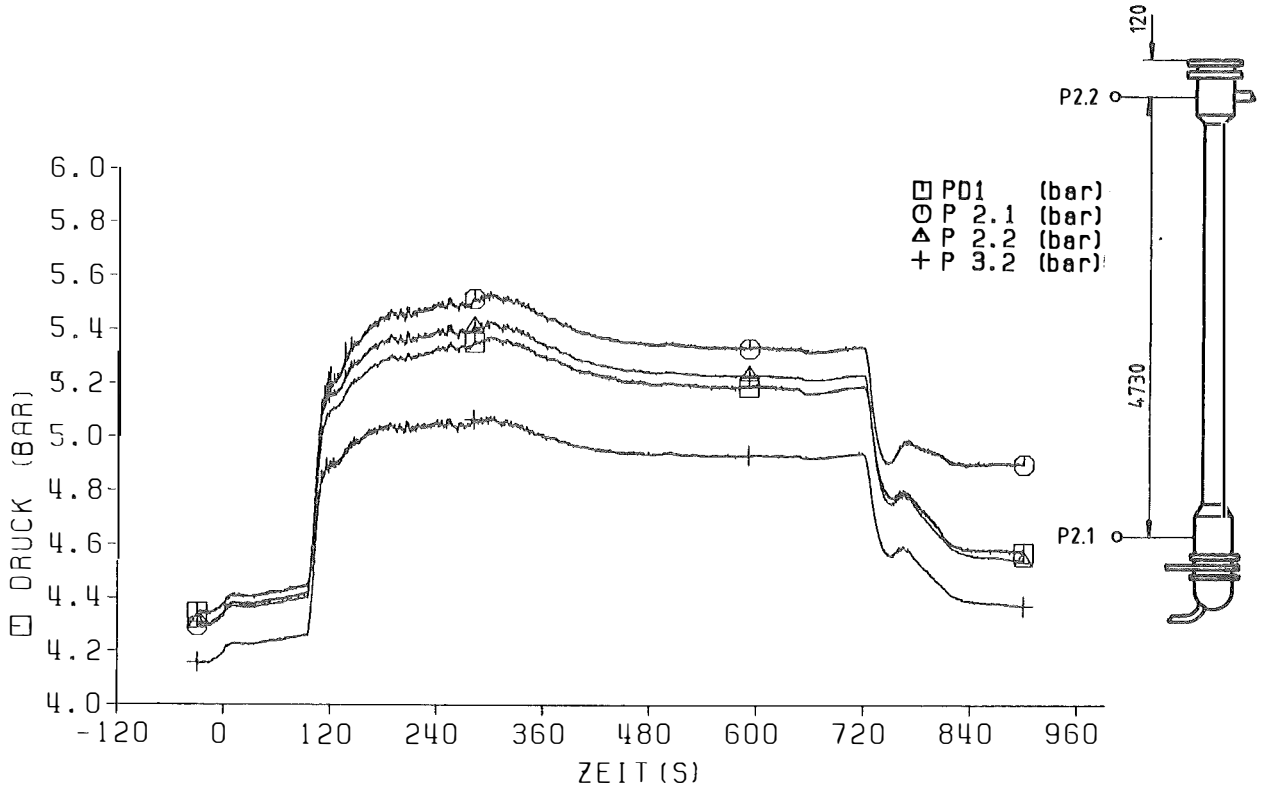
### 3.1.2 Drücke und Temperaturen in der Versuchsanlage (Abbn. 11 und 12)

### 3.1.3 Massendurchsätze in der Versuchsanlage (Abb. 13)

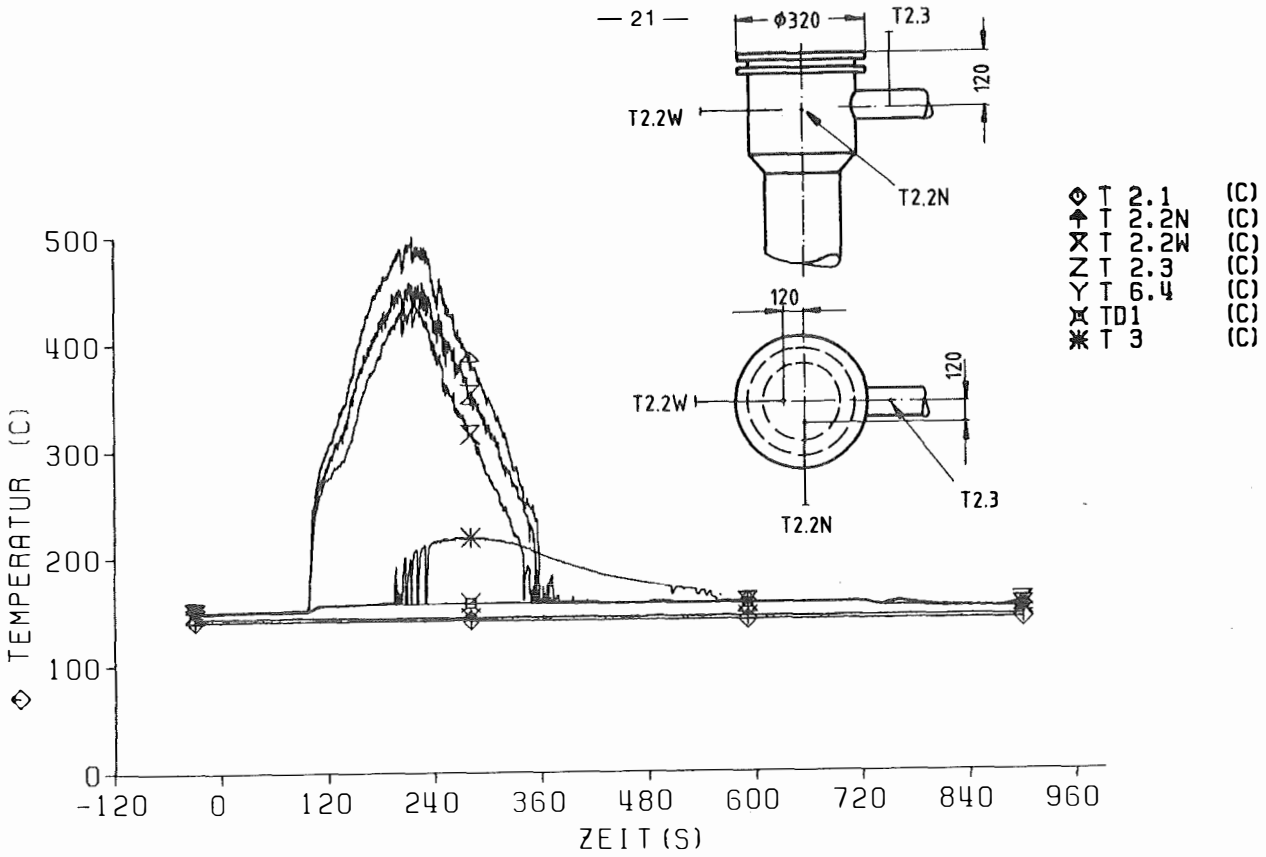
### 3.1.4 Wasserstände in Teststrecke und Behälter 5 (Abb. 14)



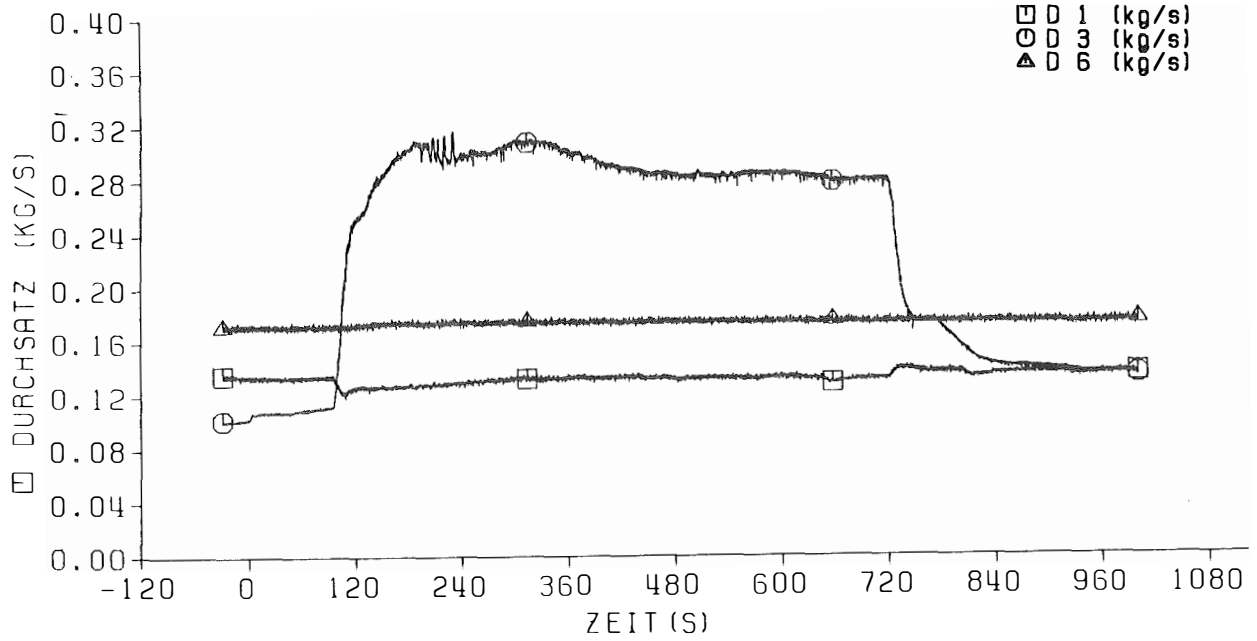

REBEKA 5
Abb: 10 Elektrische Leistungen für Stäbeheizung



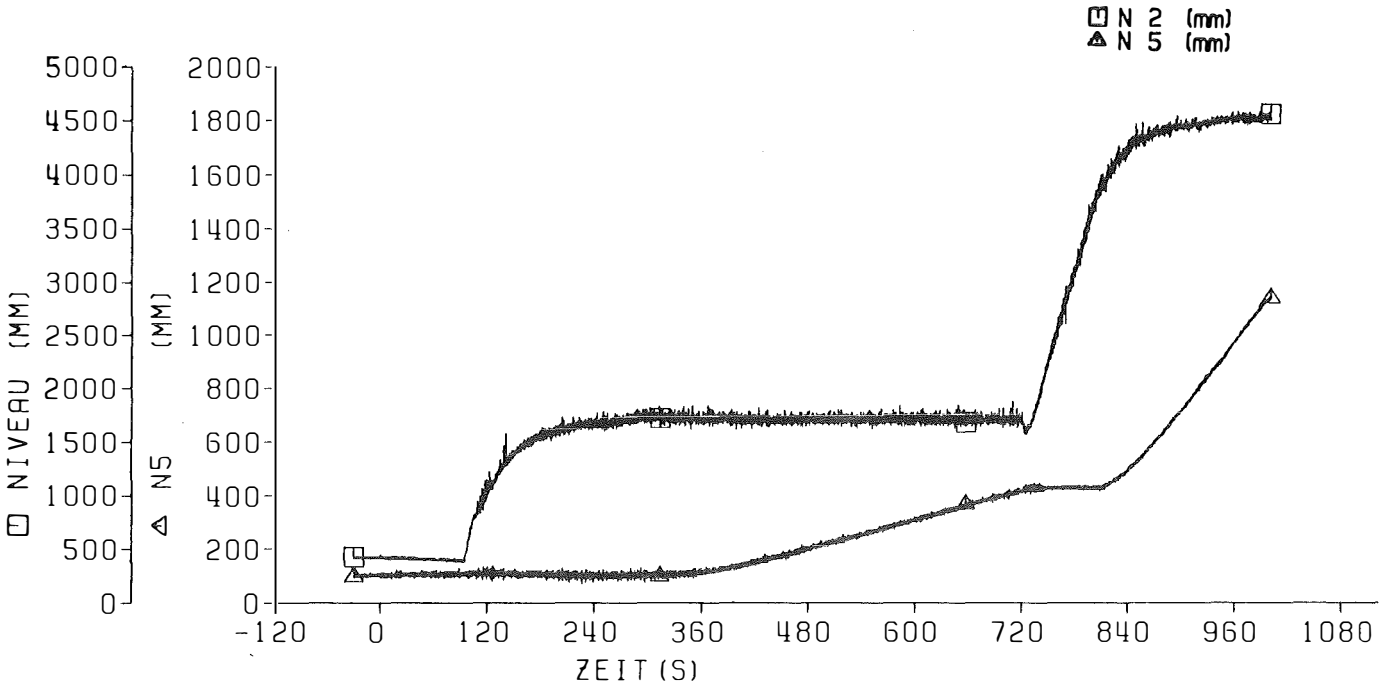

REBEKA 5
Abb: 11 Drücke in der Versuchsanlage




REBEKA 5
Abb: 12 · Temperaturen in der Versuchsanlage




REBEKA 5
Abb: 13 · Massendurchsätze in der Versuchsanlage




REBEKA 5
Abb: 14 Wasserstand Teststrecke und Behälter 5

## 3.2 Überblick über Versuchsablauf

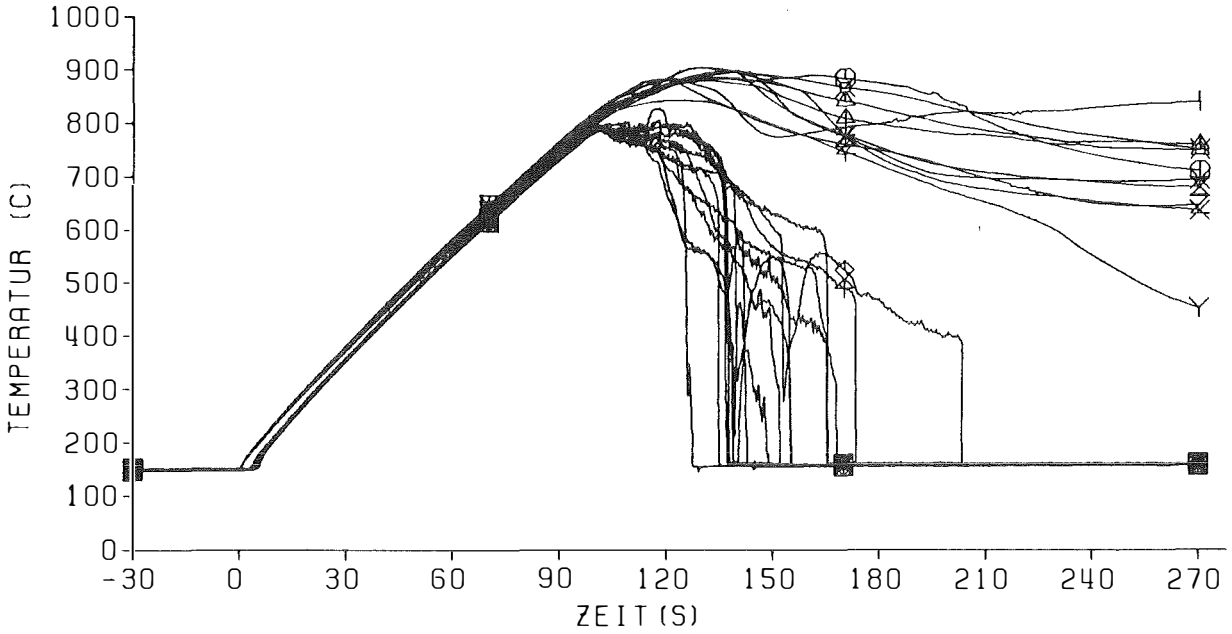
### 3.2.1 Temperaturverlauf der 25 Innenstäbe (Abb. 15)

### 3.2.2 Druckverlauf der 25 Innenstäbe (Abb. 16)

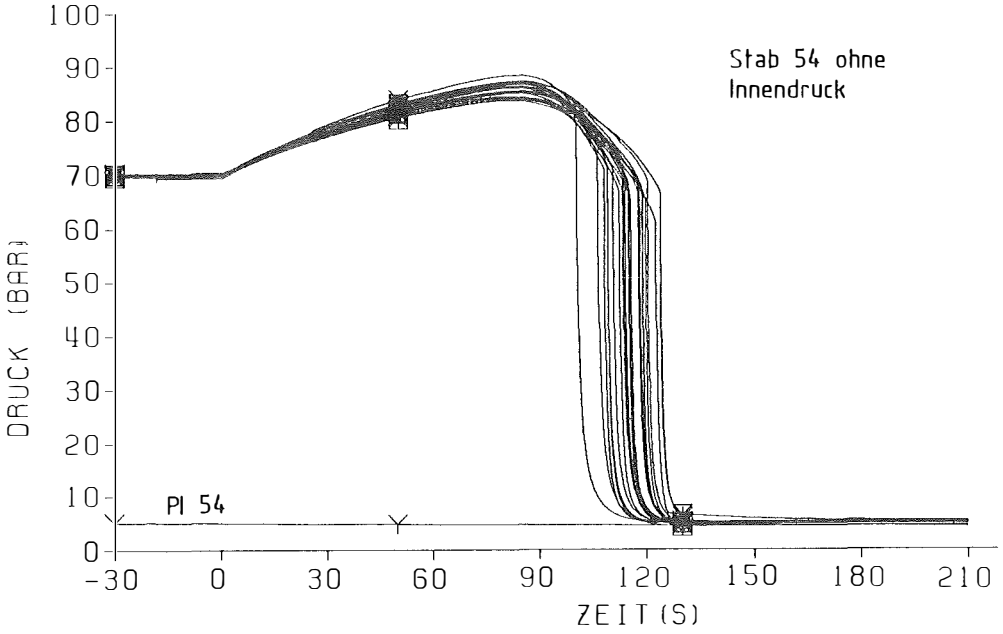
Da die äußere Reihe der Brennstabsimulatorhüllen durch den Einfluß der kälteren Kastenwand unter azimutalen Temperaturunterschieden verformte, werden für die Beurteilung des Versuchsablaufs nur die Drücke und Temperaturen der 25 inneren Stäbe dargestellt. Da nicht alle Hüllen mit Außenthermoelementen versehen waren, werden zur Darstellung der Temperatur-Zeit-Verläufe des Bündels ersatzweise die Heizstabhüllentemperaturverläufe dargestellt (oberer Kurvenzug in der Aufheizrampe).

Stab 54 wurde nur mit etwa 5 bar beaufschlagt, da die untere Sprengschweißverbindung zwischen dem Inconelrohr des unteren Stabplenums und der Hülle eine Undichtigkeit aufwies und austretendes Helium die Kühlverhältnisse während der Flutphase in nicht überschaubarer Weise beeinflußt hätte. Bei 5 bar Druckaufgabe war die Undichtigkeit ohne Einfluß auf das Zweiphasengemisch.

Temperaturmessung an Brennstabhüllrohr
und Heizleiter in axialer Mitte



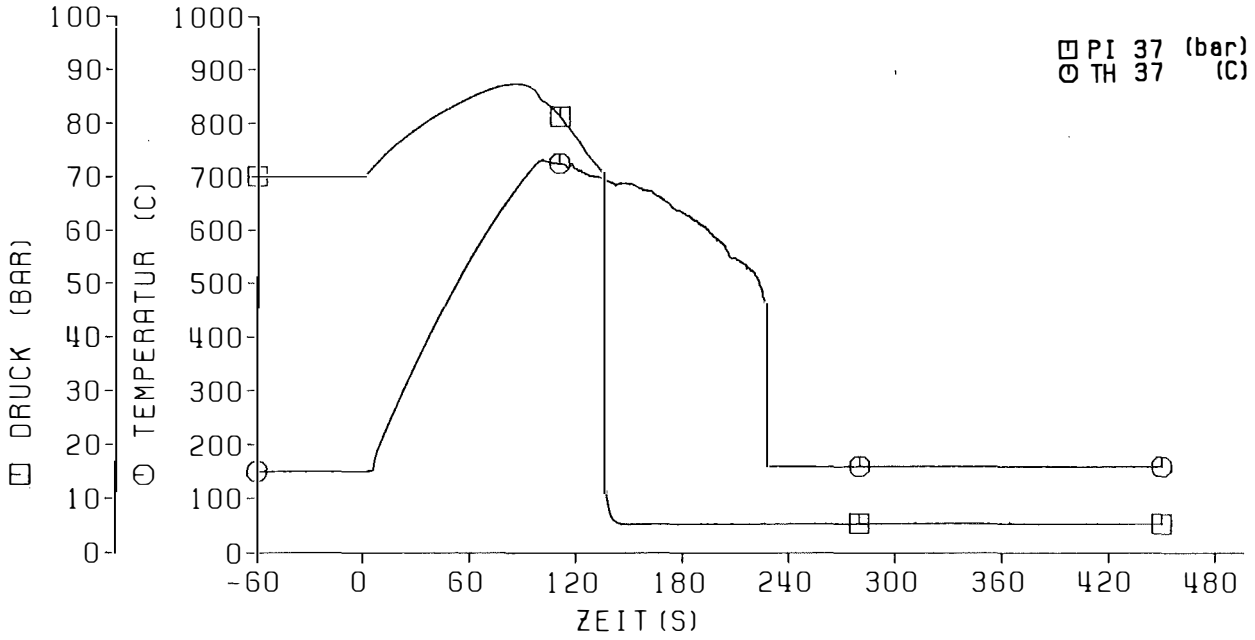

REBEKA 5
Abb: 15 Temperaturverläufe der 25 Innenstäbe



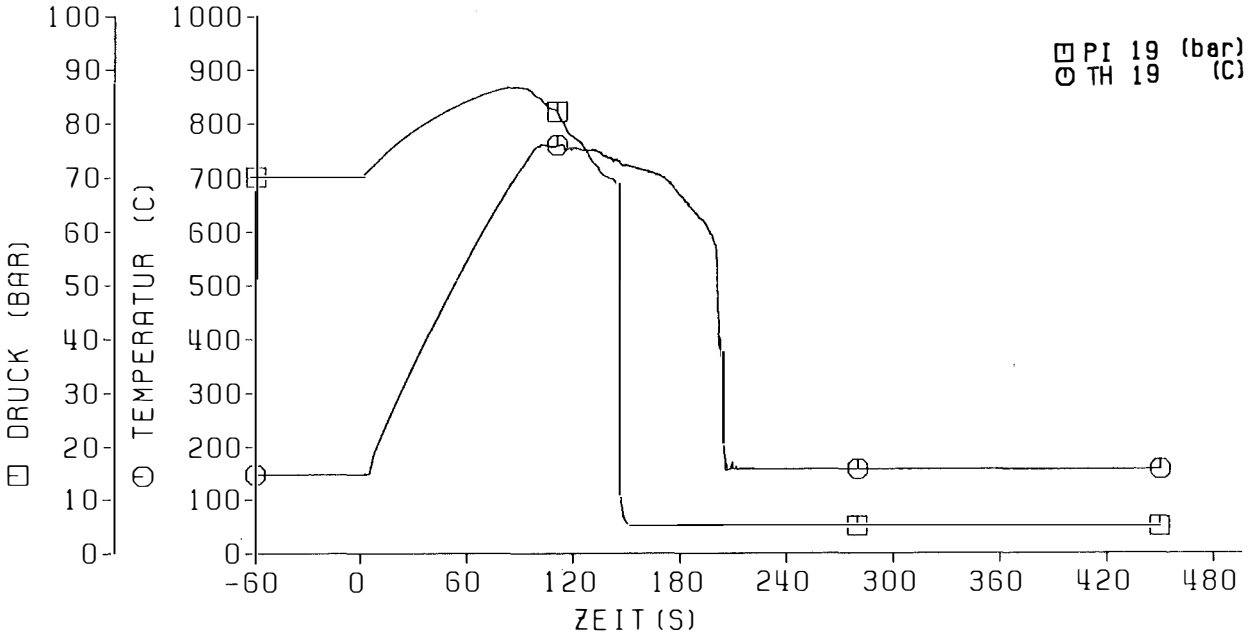

REBEKA 5
Abb: 16 Druckverläufe der 25 Innenstäbe

## 3.3 Temperatur- und Druckgeschichte aller 49 Einzelstäbe (Abbn. 17 - 65)

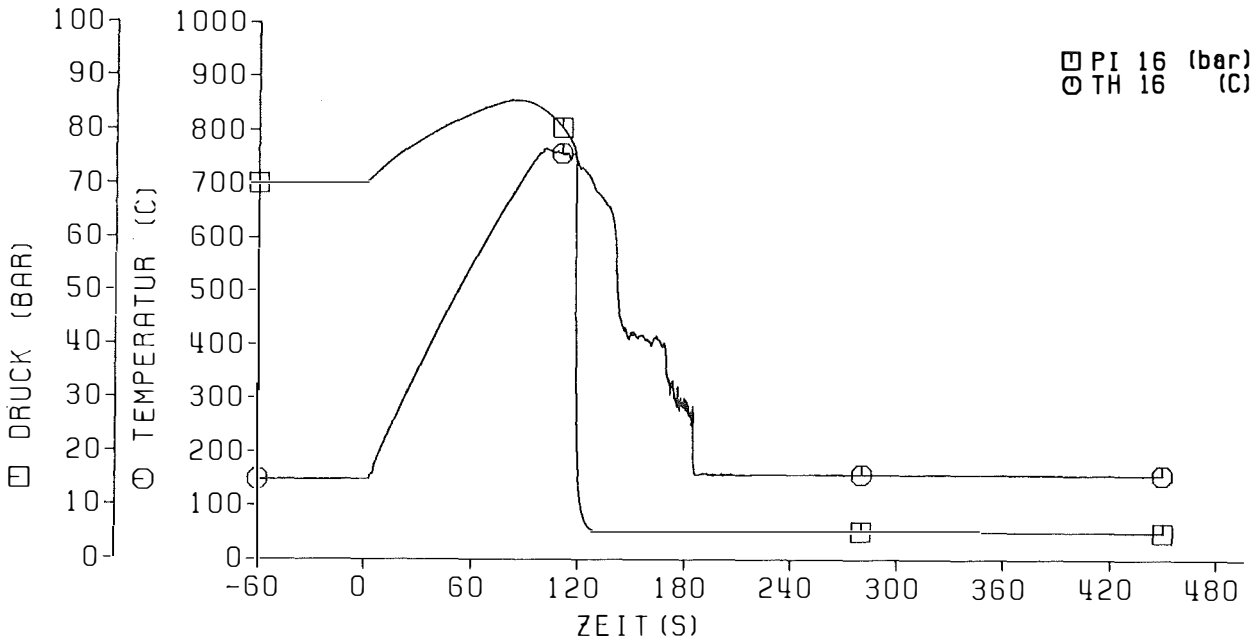
Die Temperaturmeßstellen befinden sich in axialer Mittelebene des Bündels. Falls keine Außenthermoelemente auf der Zircaloy-4-Hülle vorhanden waren, sind die Temperaturverläufe der Heizstäbe graphisch dargestellt.



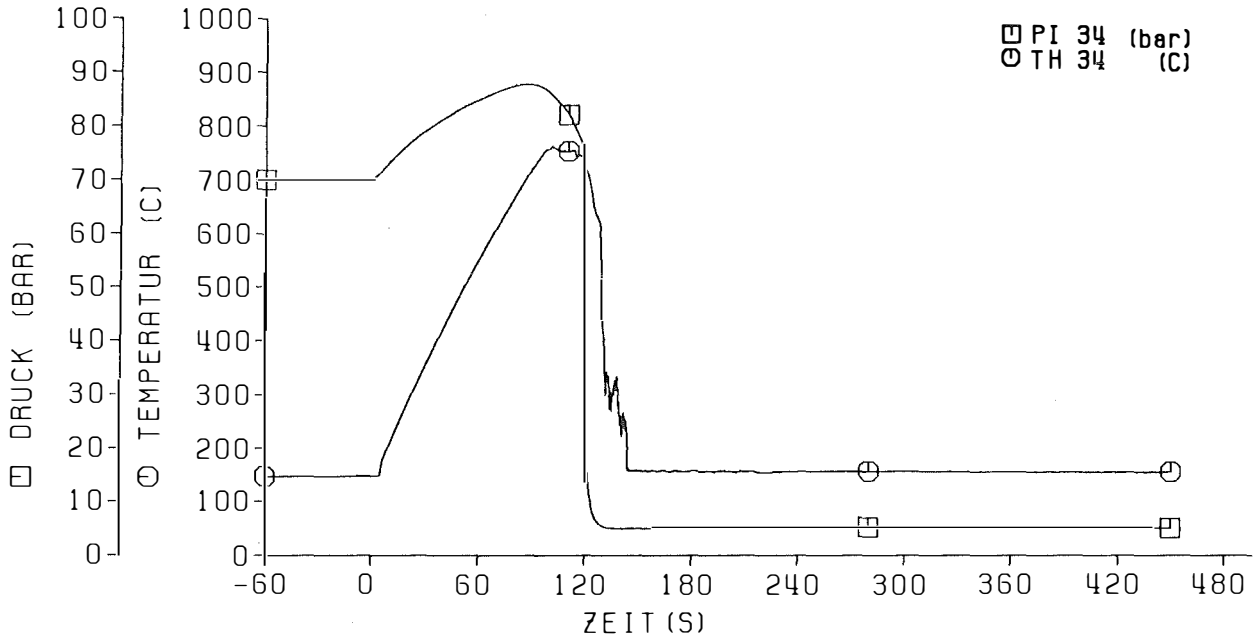

REBEKA 5
Abb: 17 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 37



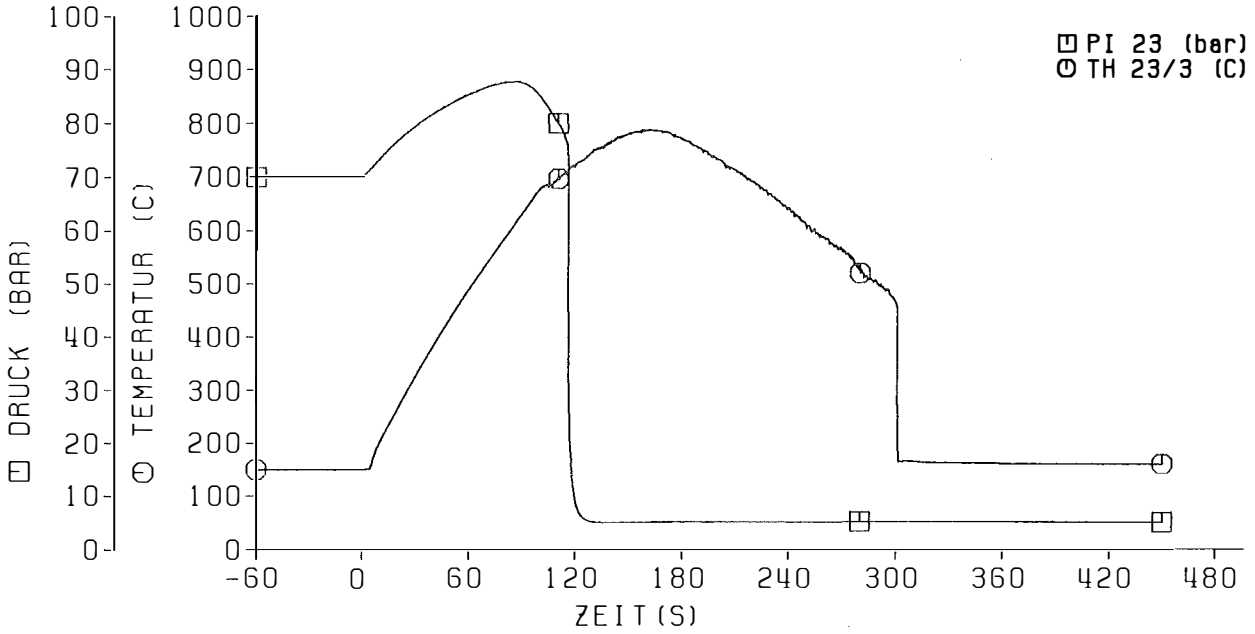

REBEKA 5
Abb: 18 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 19



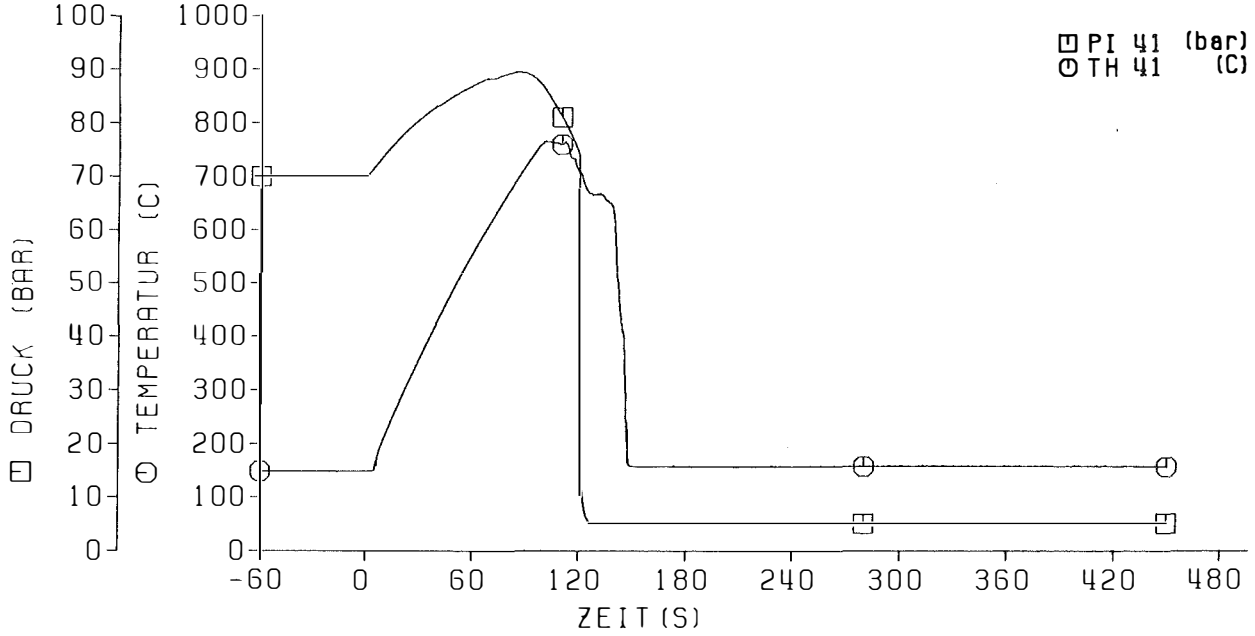

REBEKA 5
Abb: 19 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 16



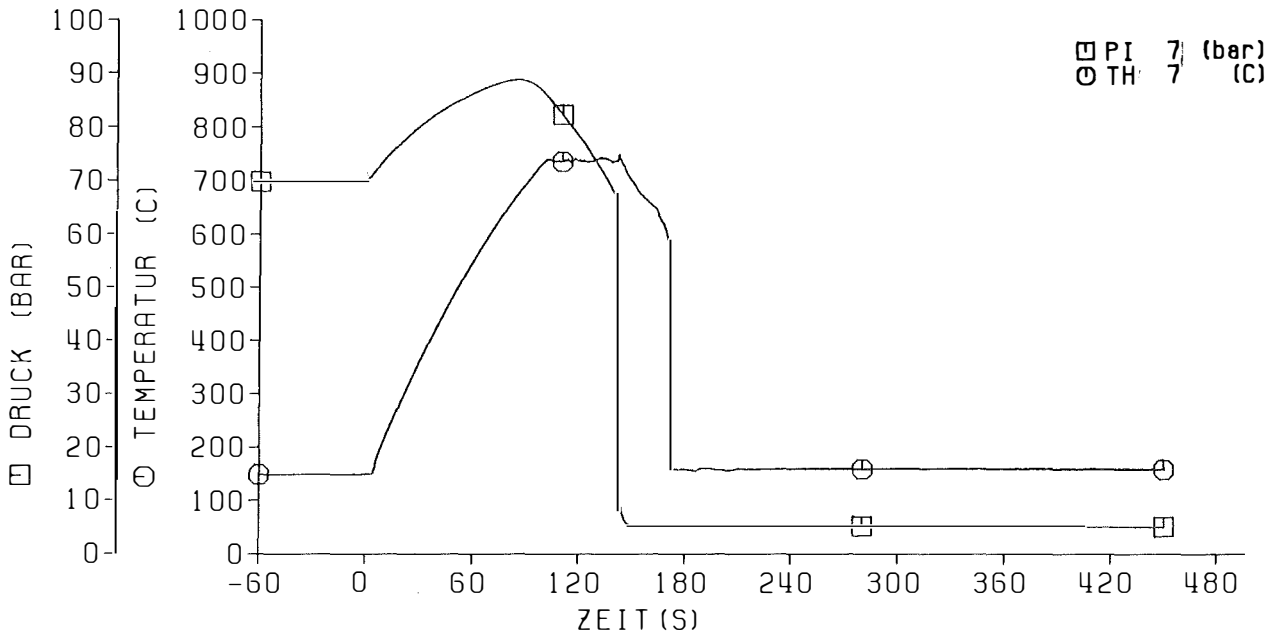

REBEKA 5
Abb: 20 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 34



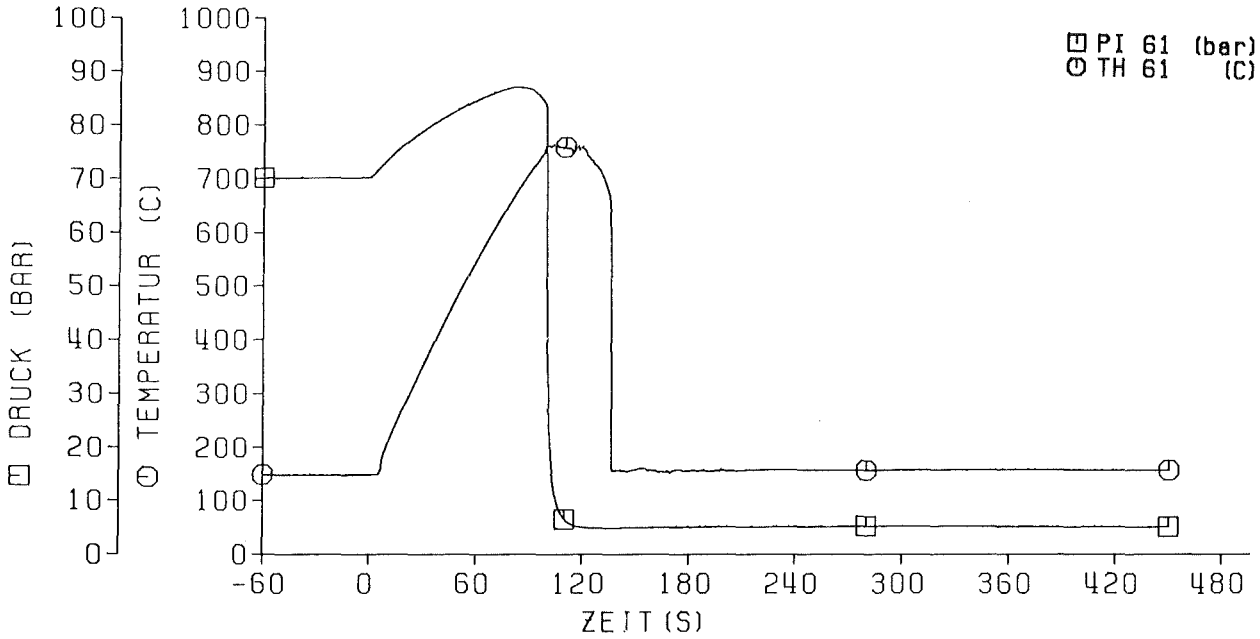

REBEKA 5
Abb: 21 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 23



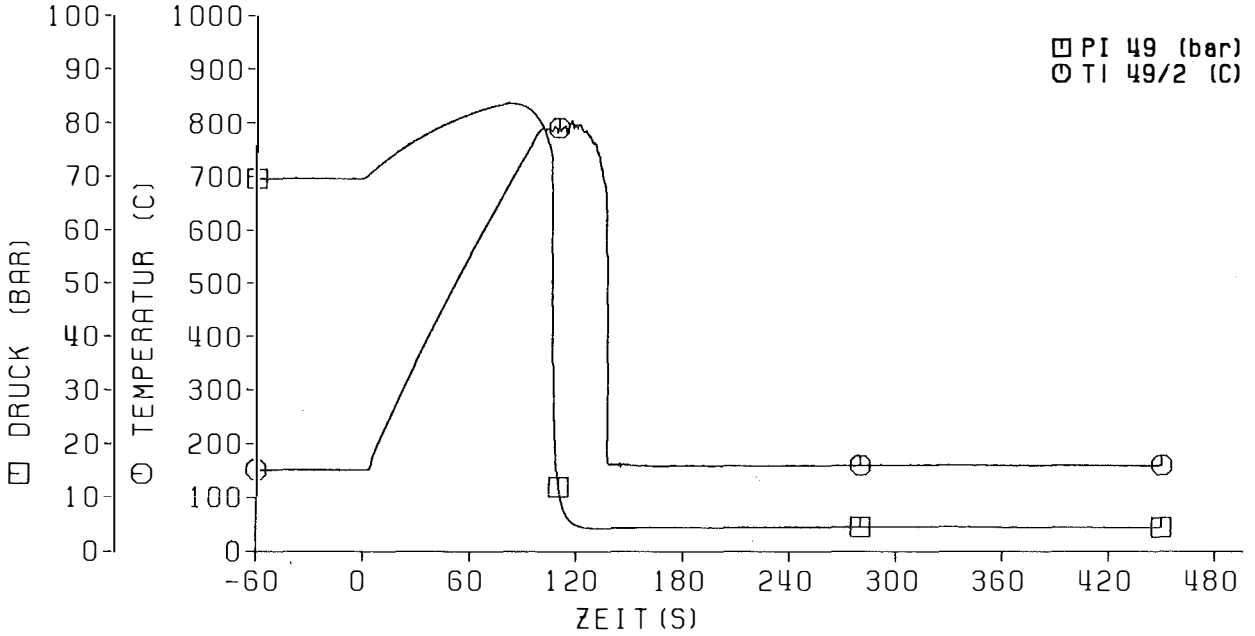

REBEKA 5
Abb: 22 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 41



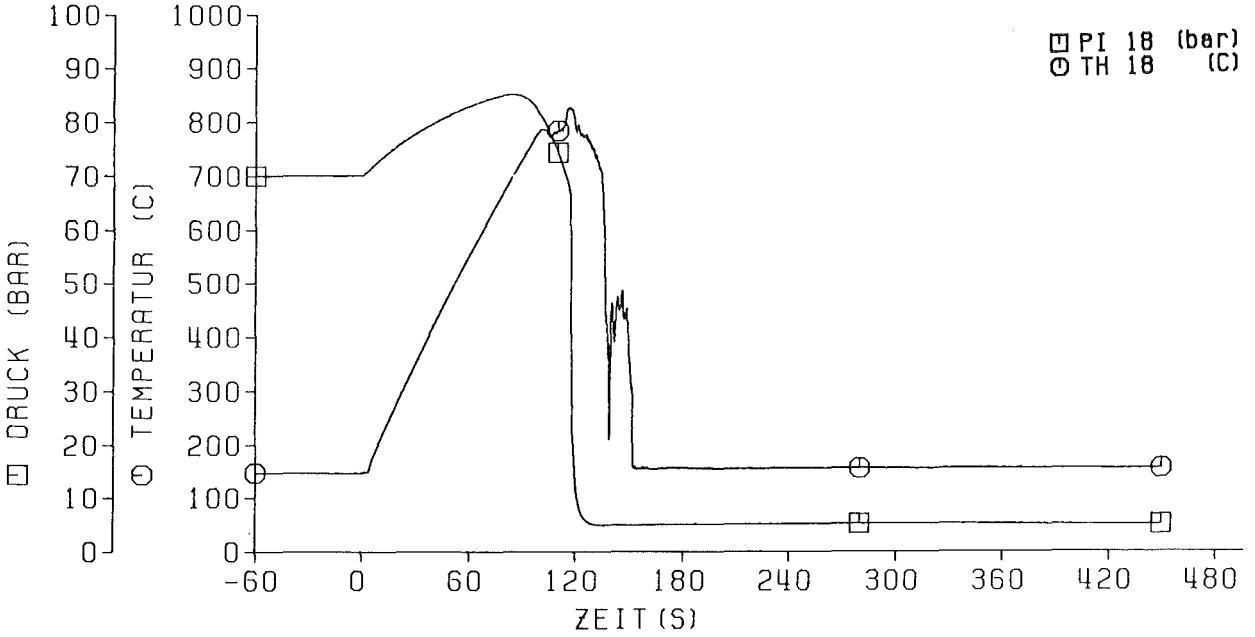

REBEKA 5
Abb: 23 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 7



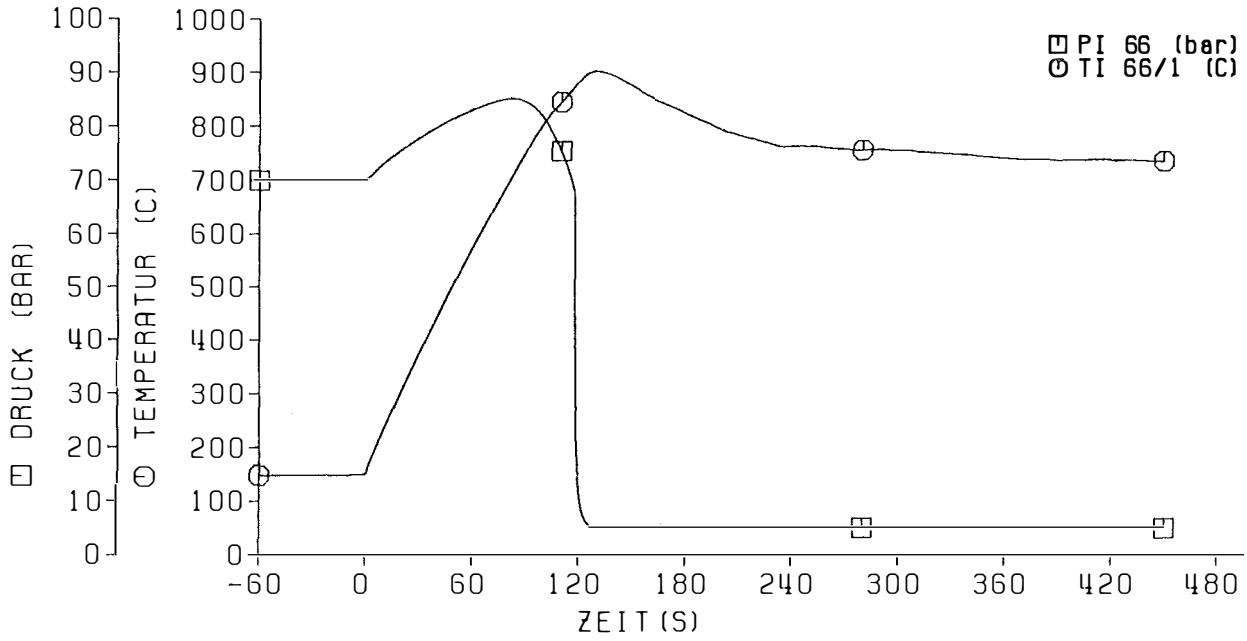

REBEKA 5
Abb: 24 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 61



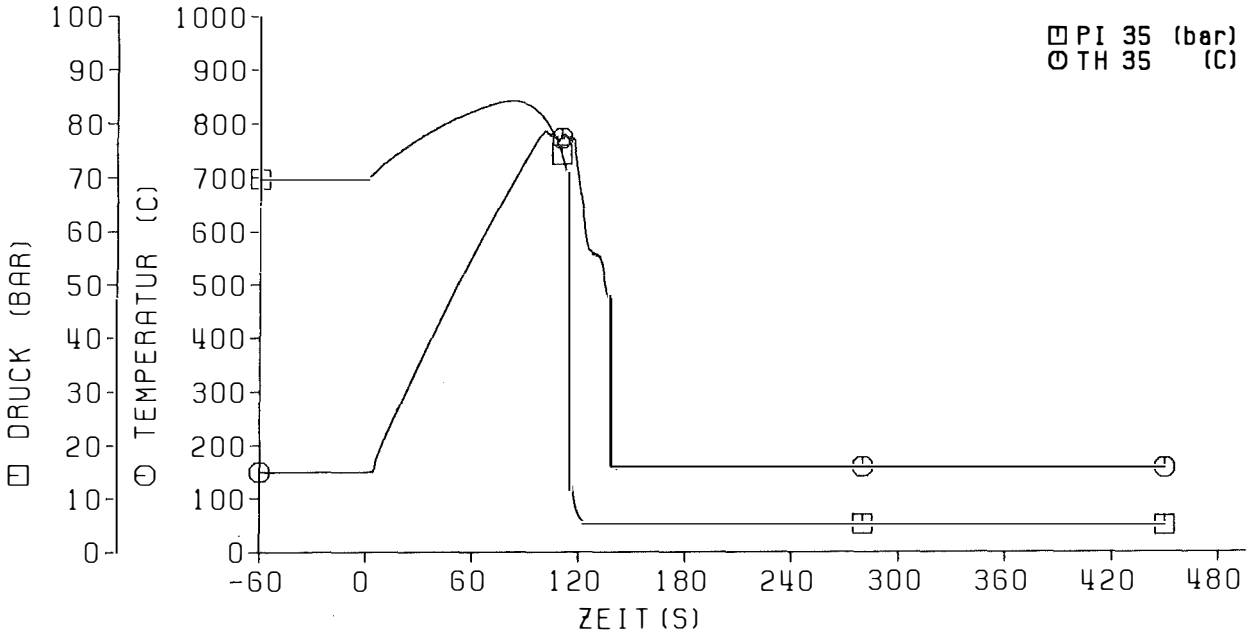

REBEKA 5
Abb: 25 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 49



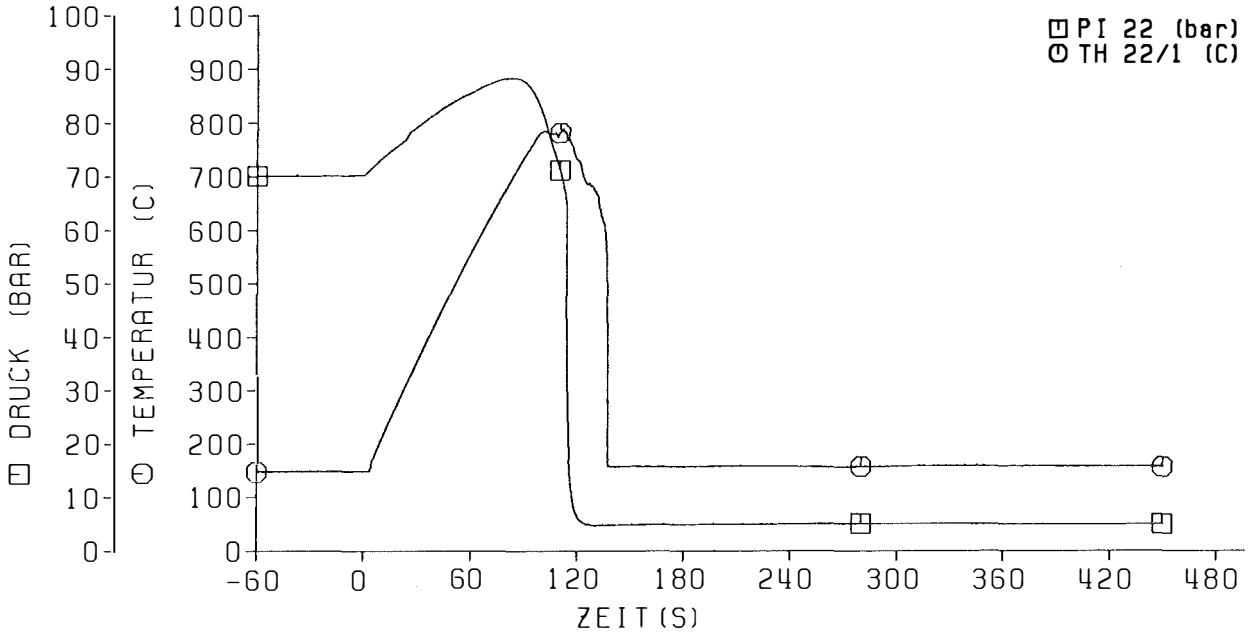

REBEKA 5
Abb: 26 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 18



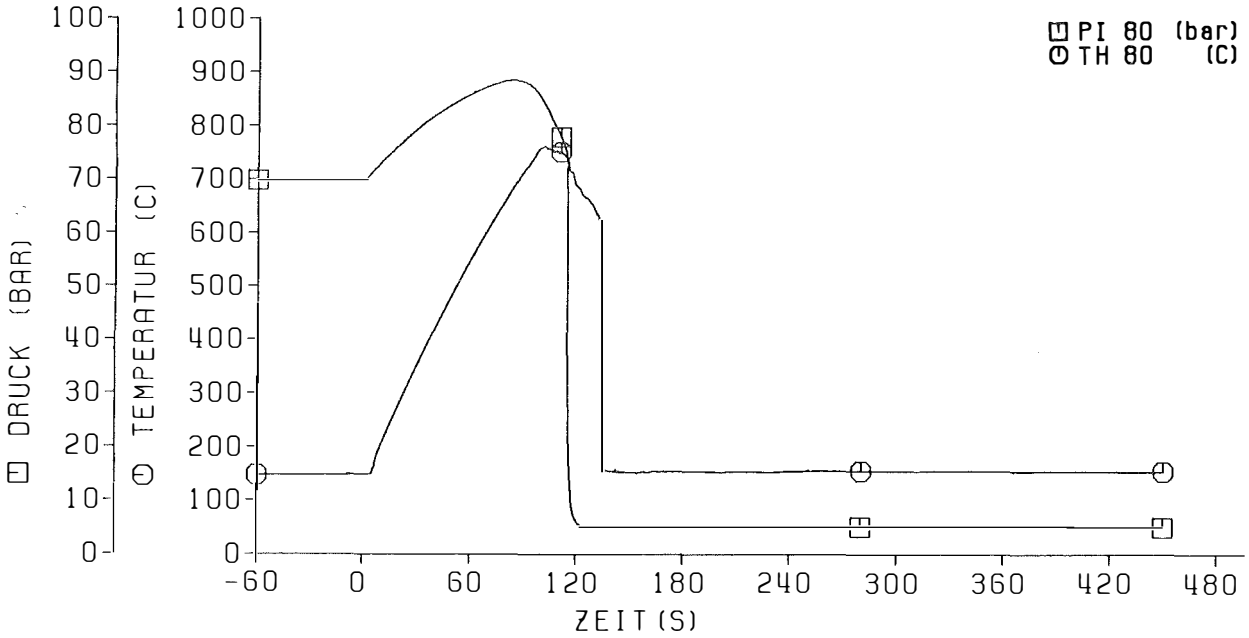

REBEKA 5
Abb: 27. Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 66



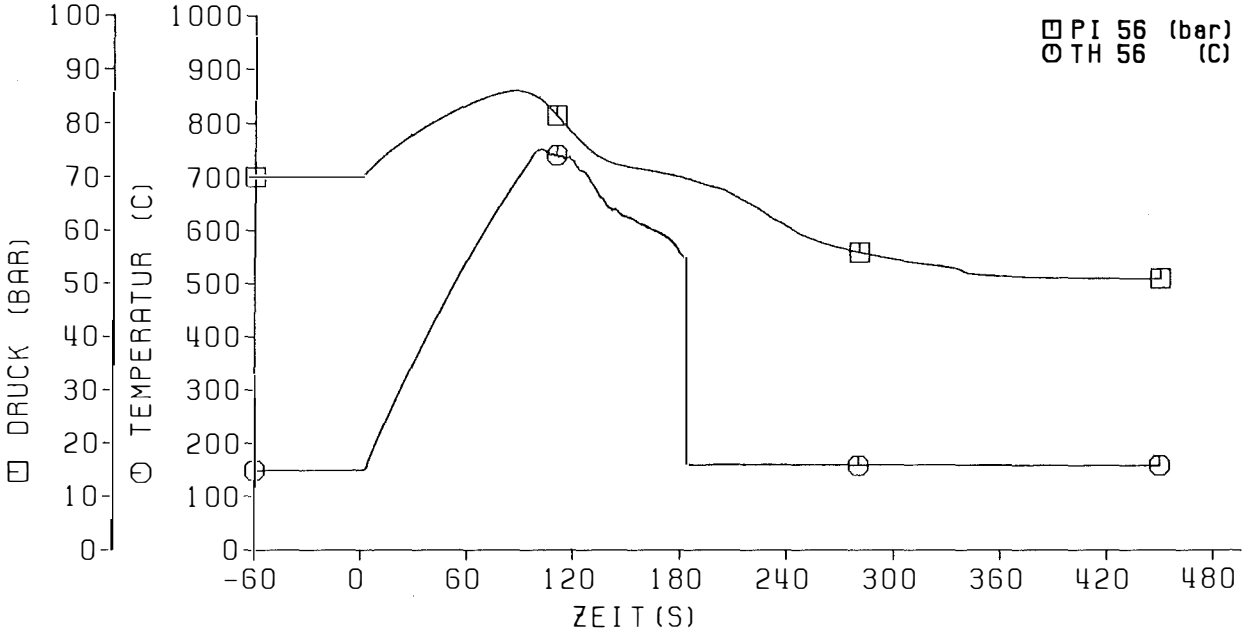

REBEKA 5
Abb: 28. Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 35



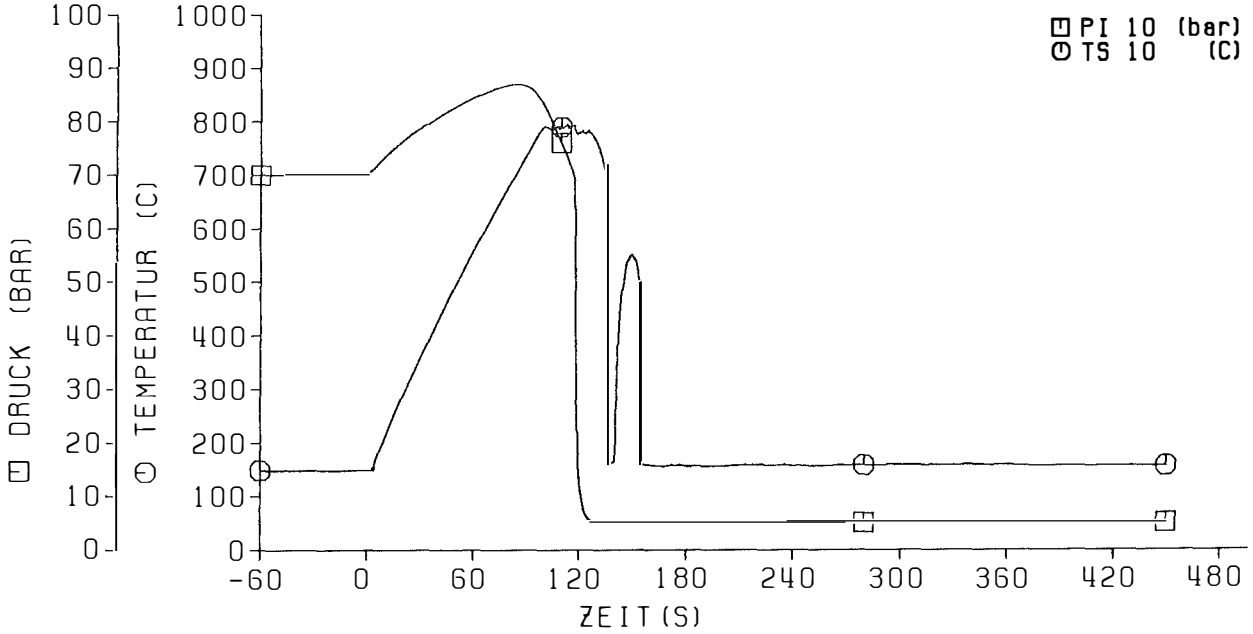

REBEKA 5
Abb: 29 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 22



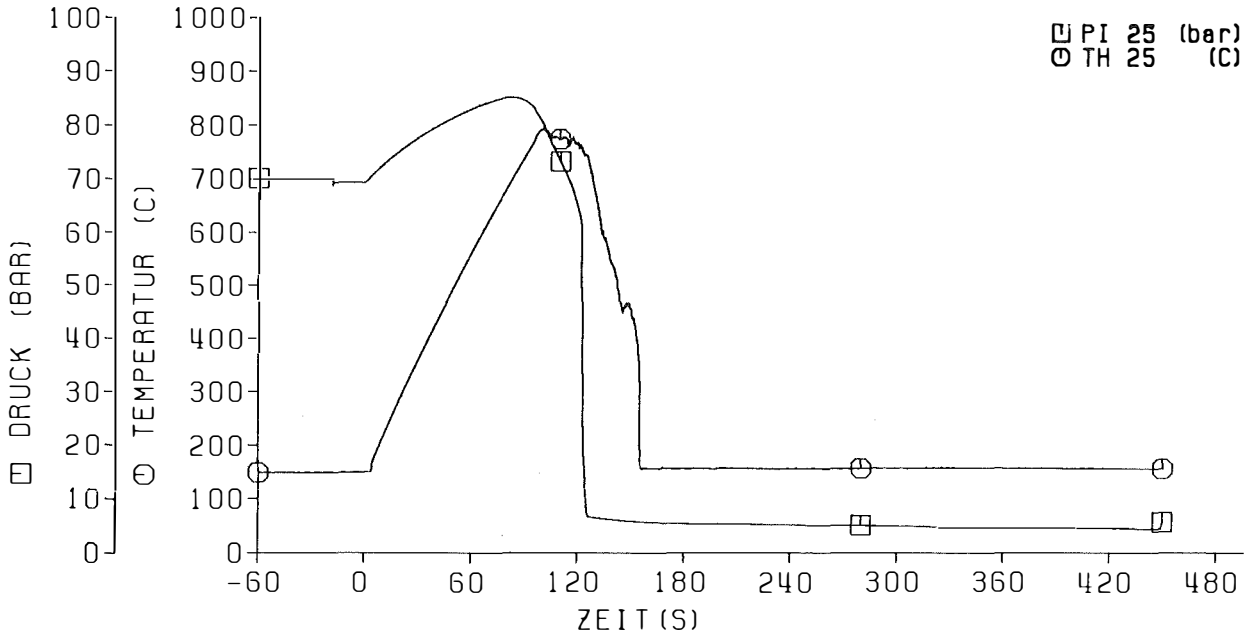

REBEKA 5
Abb: 30 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 80



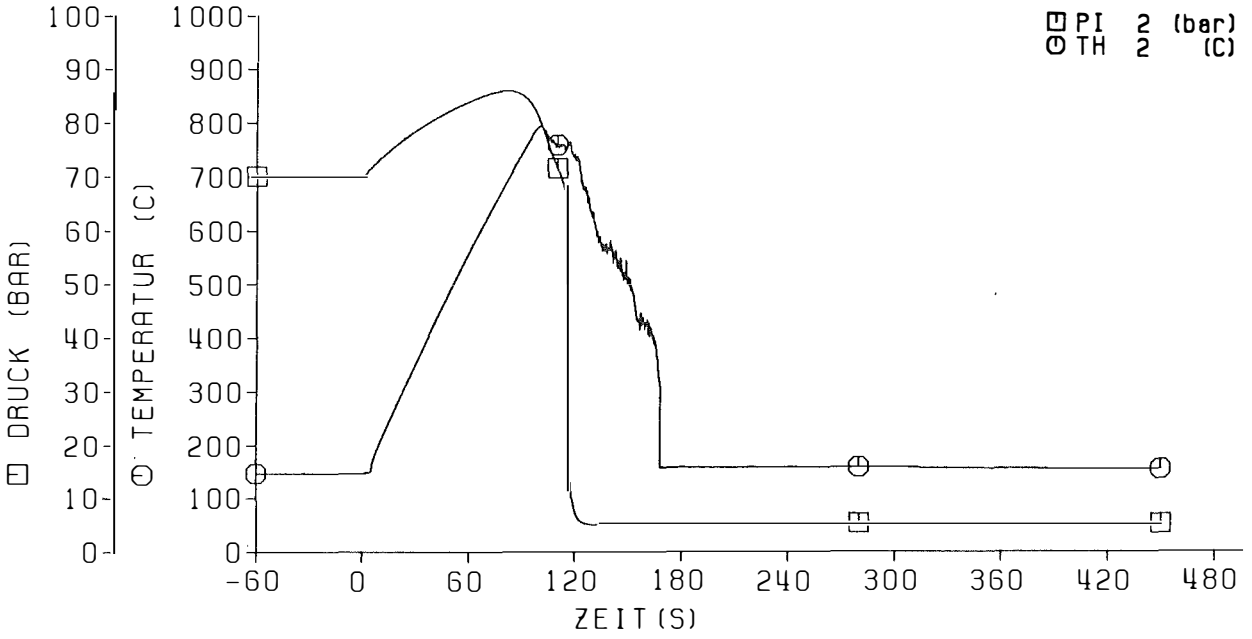

REBEKA 5
Abb: 31 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 56



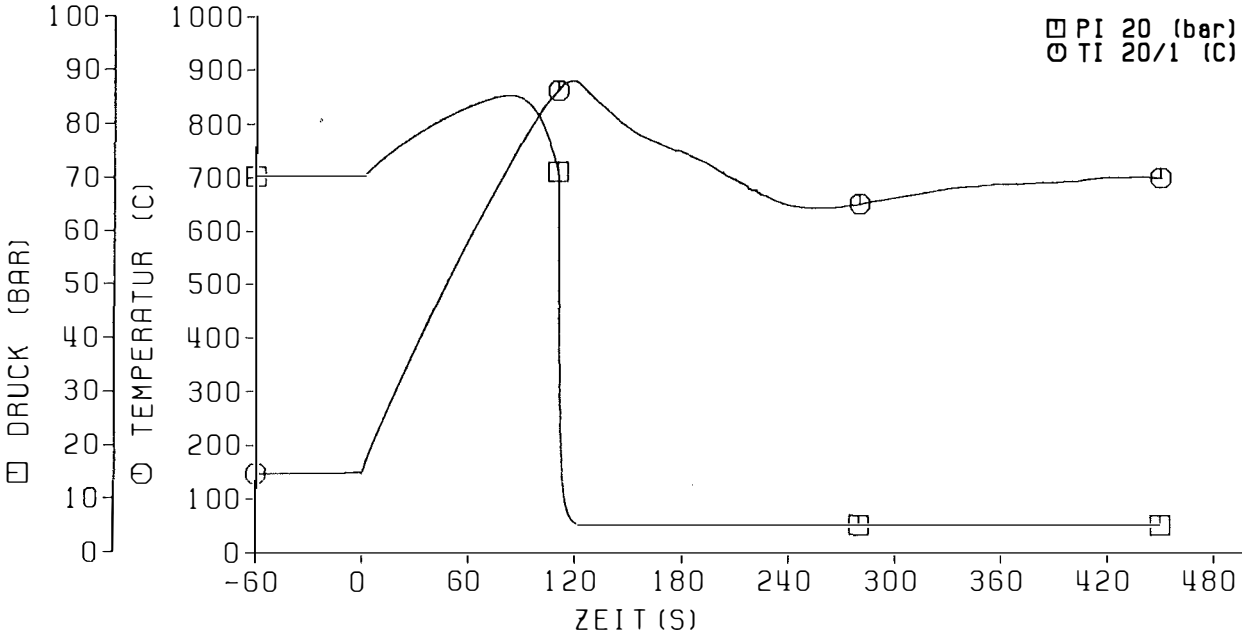

REBEKA 5
Abb: 32 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 10



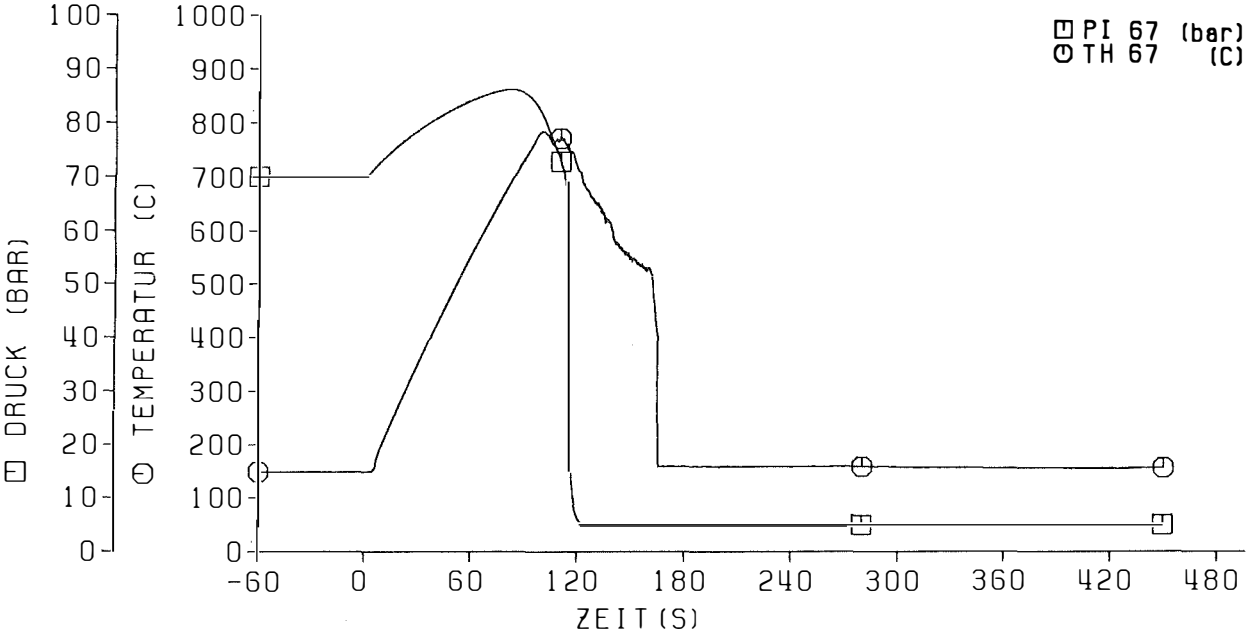

REBEKA 5
Abb: 33 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 25



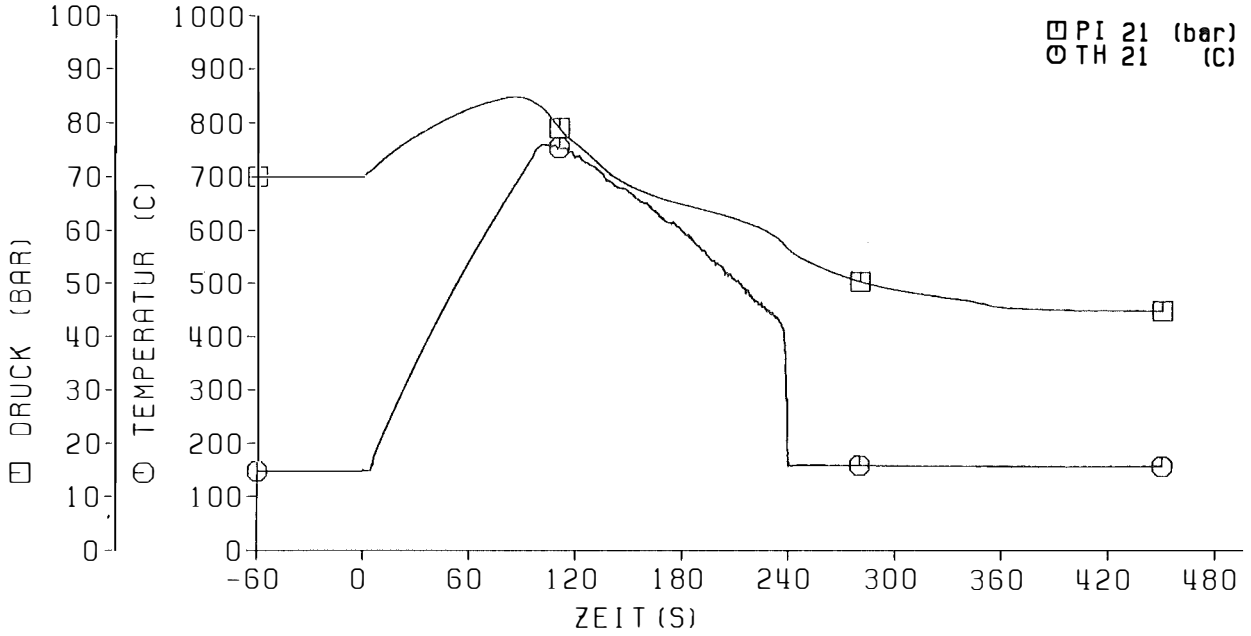

REBEKA 5
Abb: 34 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 2



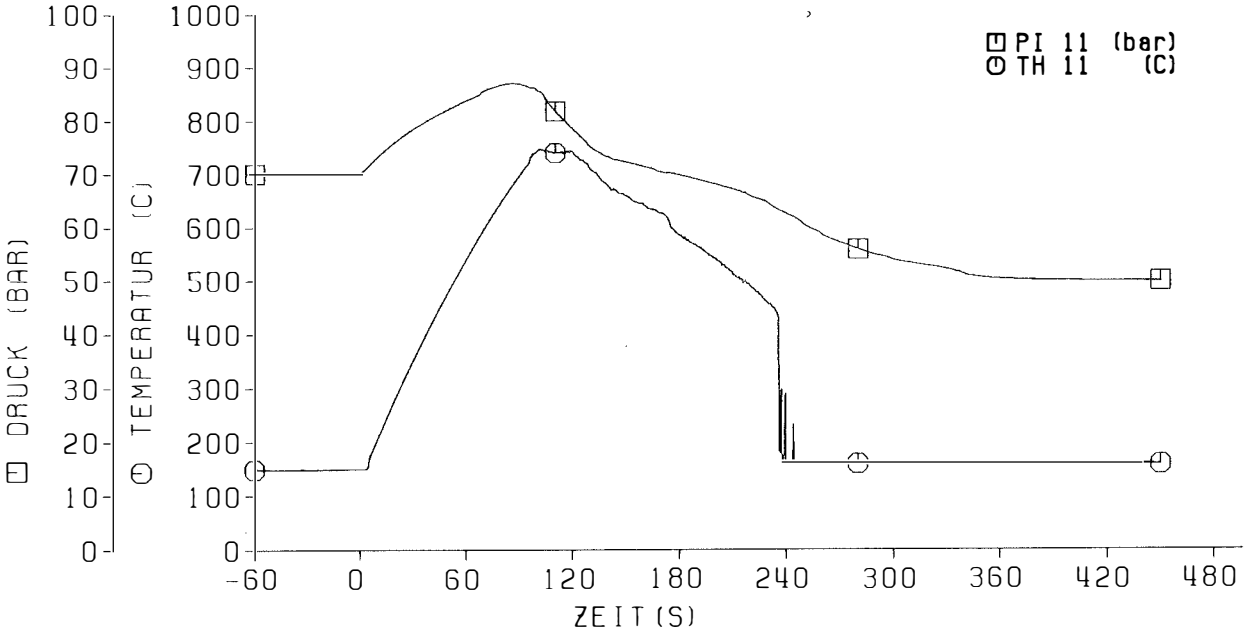

REBEKA 5
Abb: 35 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 20



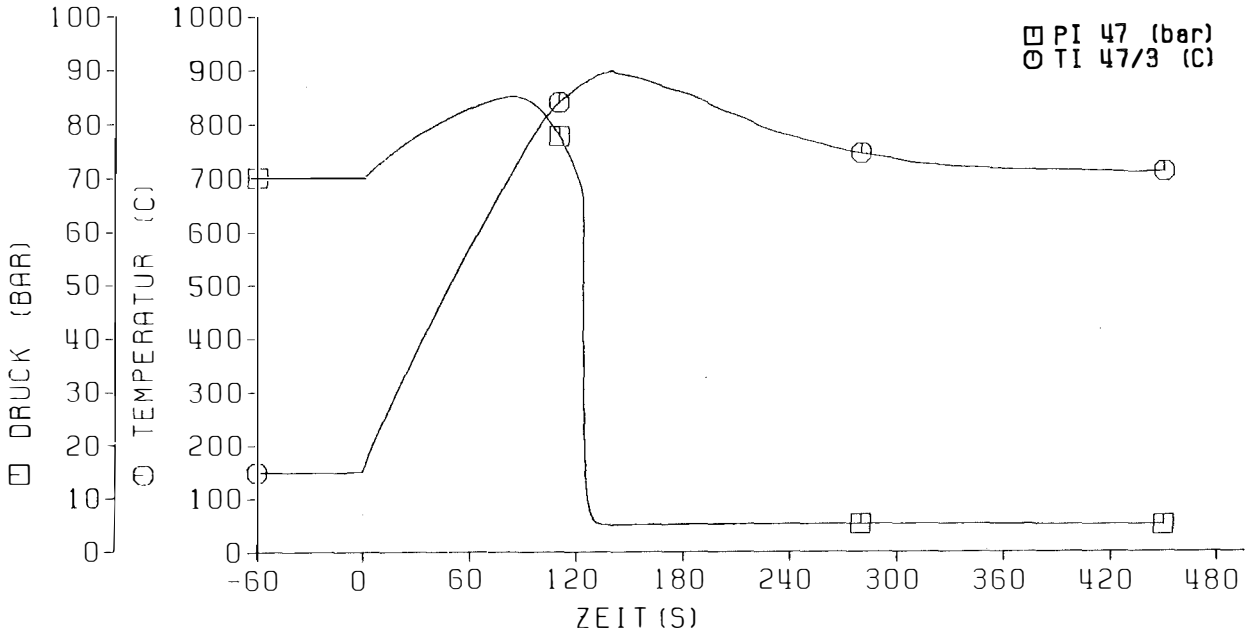

REBEKA 5
Abb: 36 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 67




REBEKA 5
Abb: 37 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 21

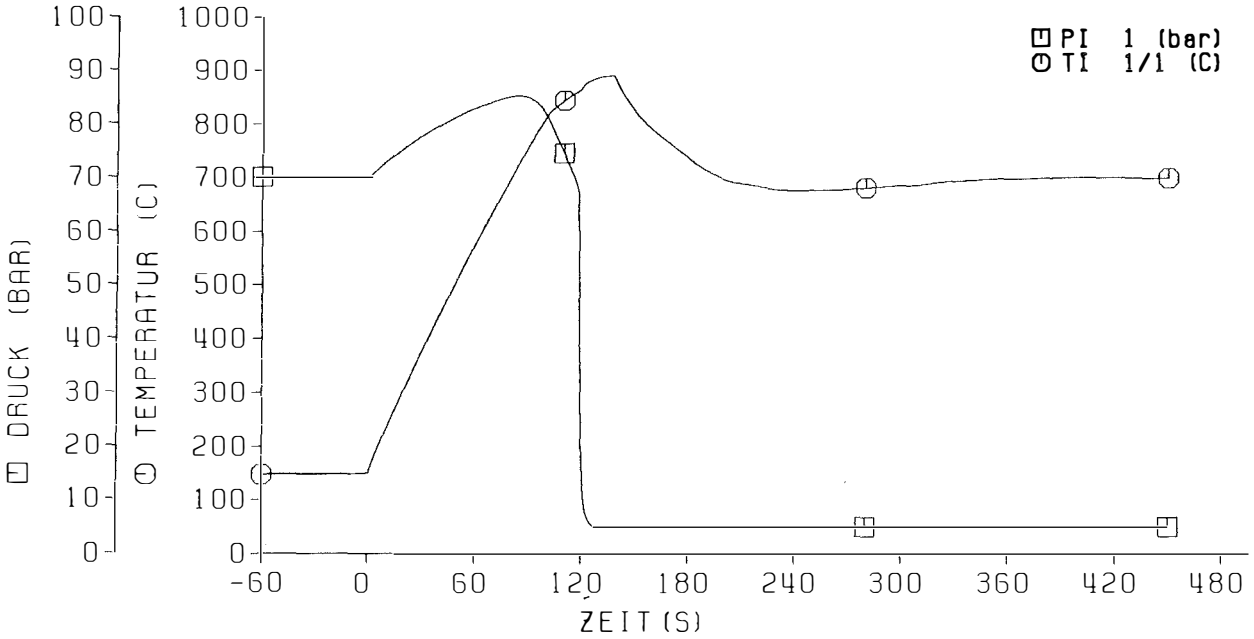



REBEKA 5
Abb: 38 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 11



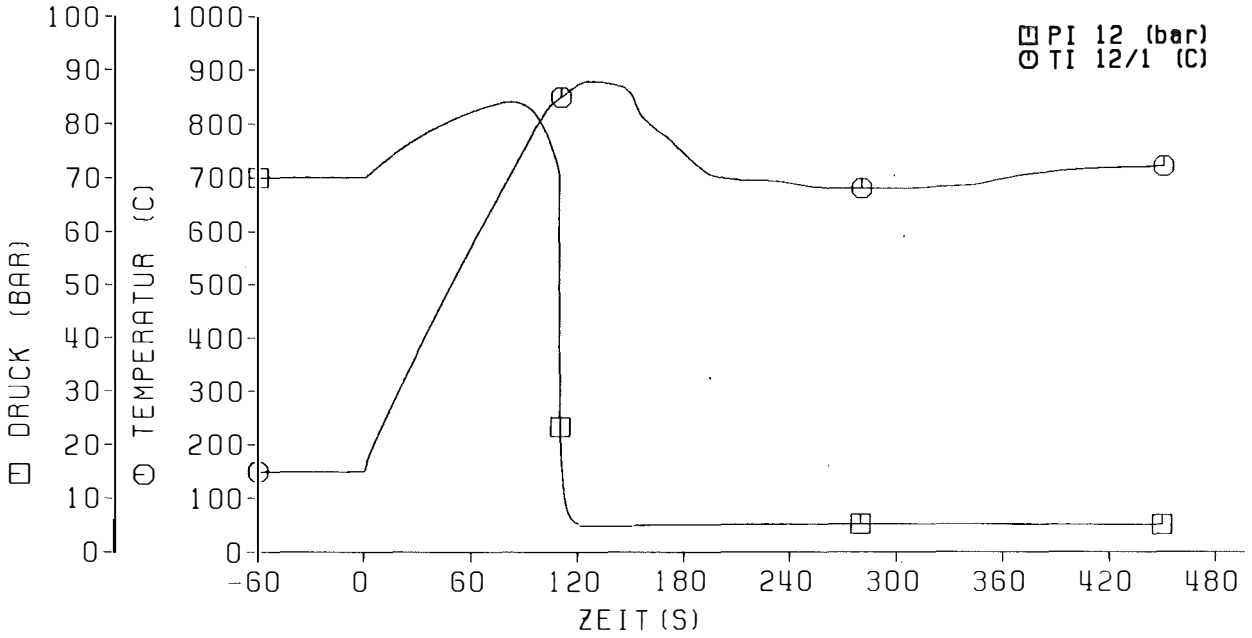

IRB

REBEKA 5
Abb: 39 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 47

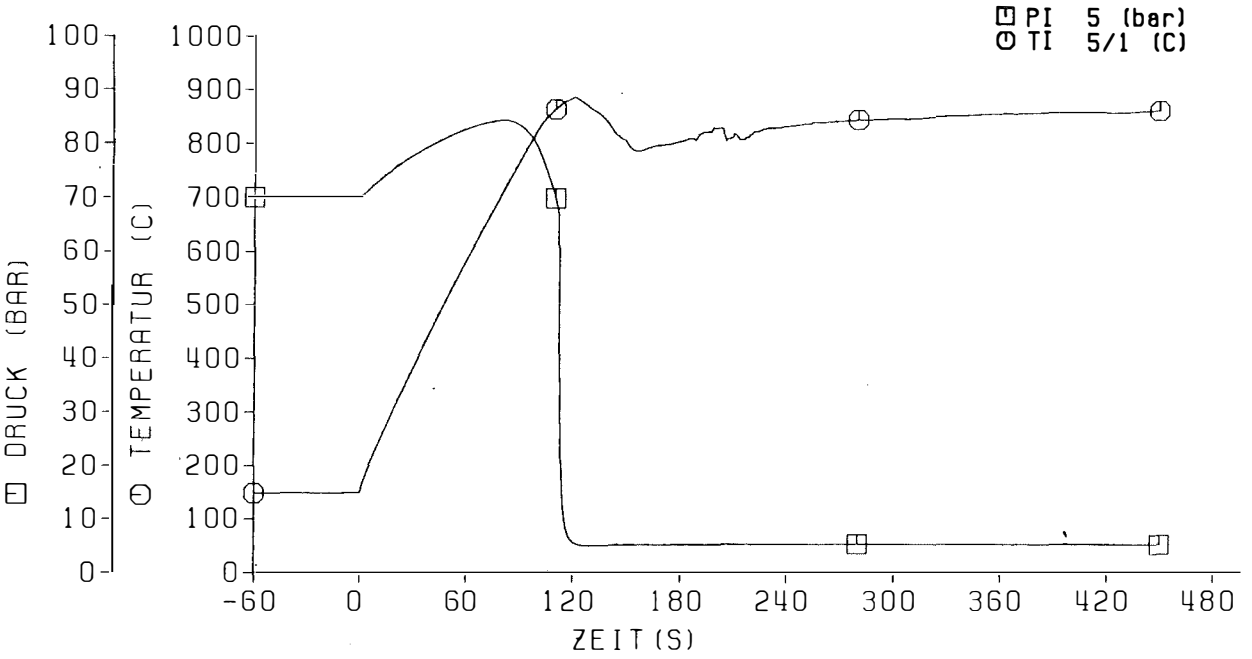



IRB

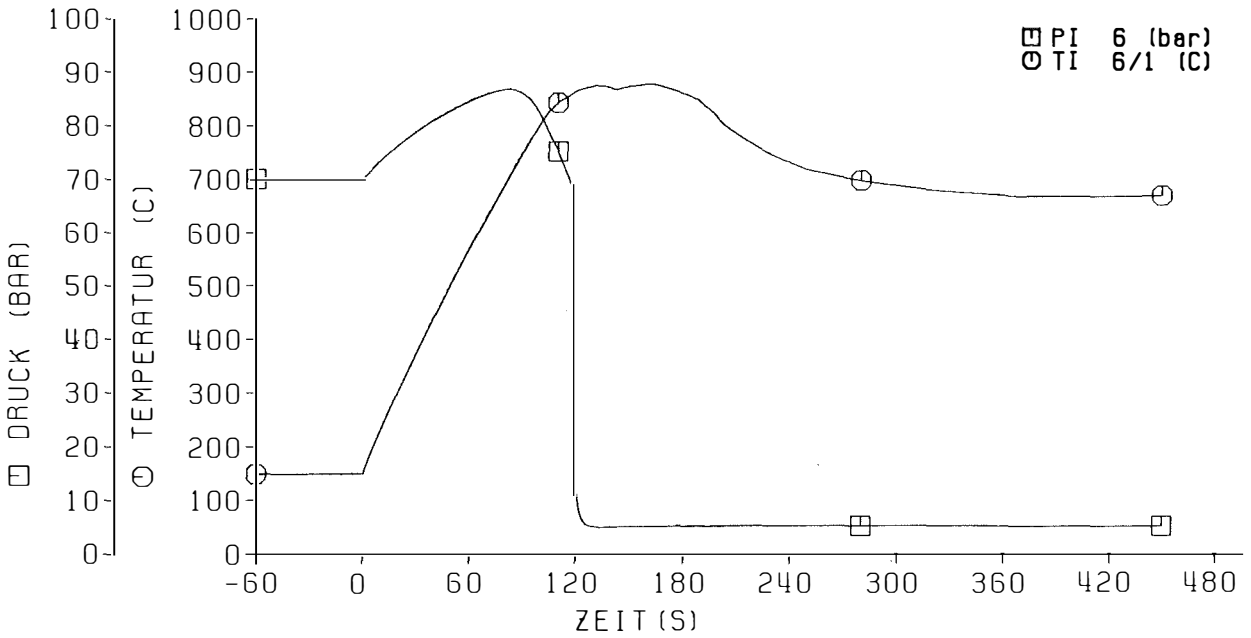
REBEKA 5
Abb: 40 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 1



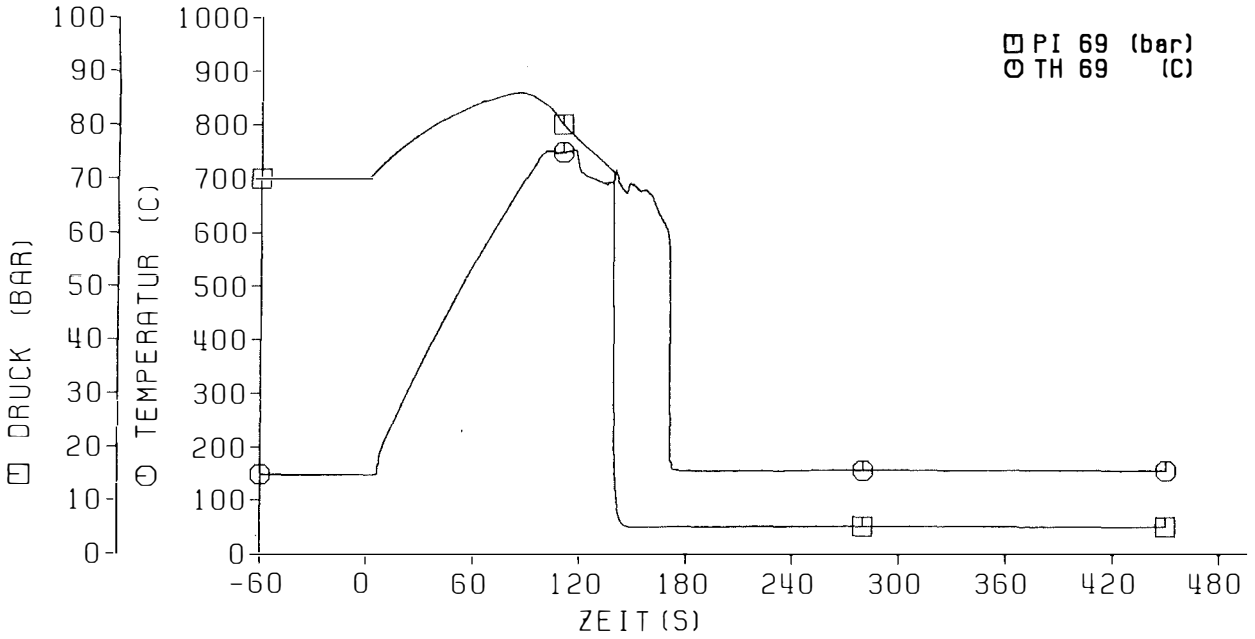

REBEKA 5
Abb: 41 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 12



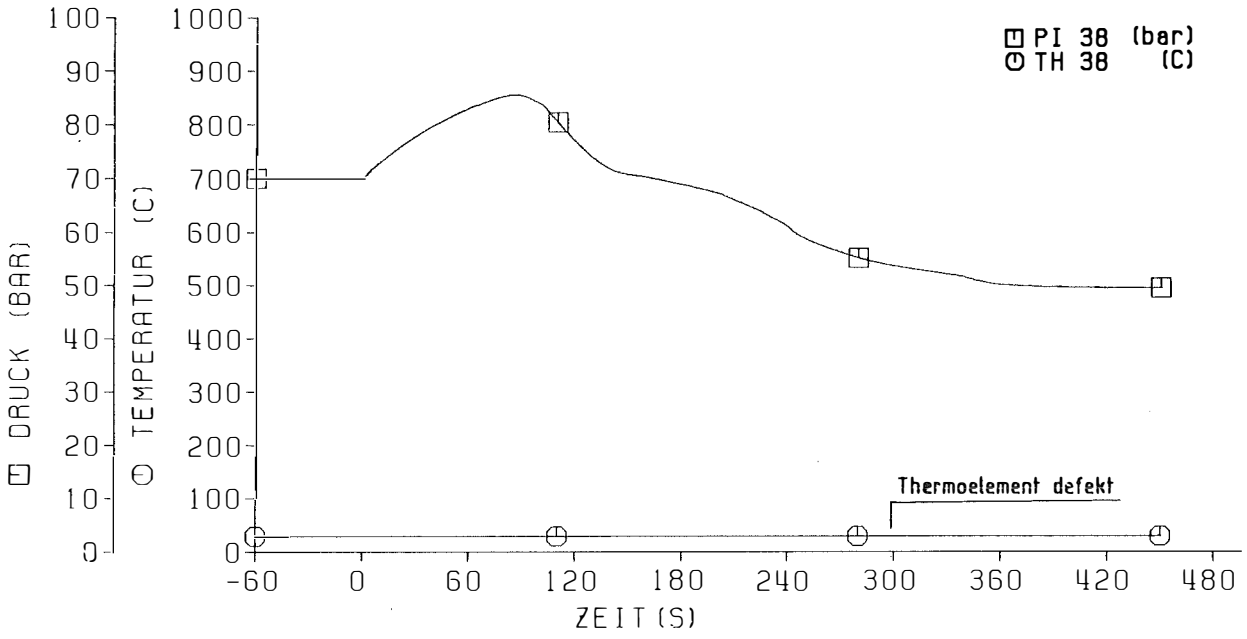

REBEKA 5
Abb: 42 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 5



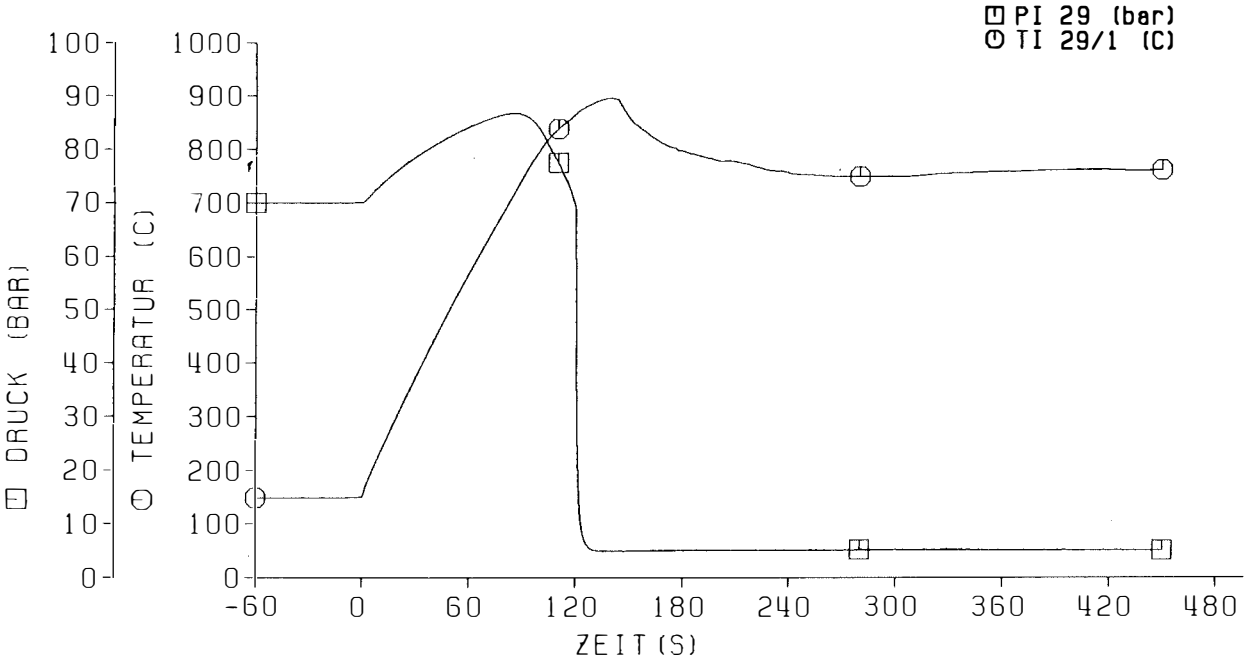

REBEKA 5
Abb: 43 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 6



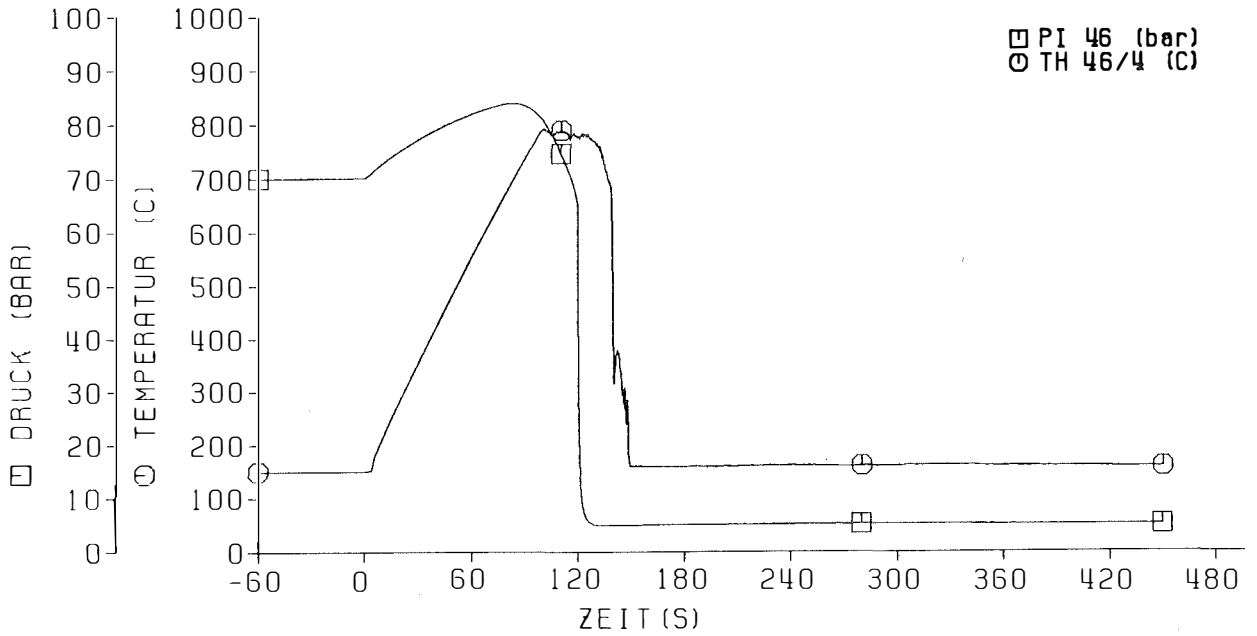

REBEKA 5
Abb: 44 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 69



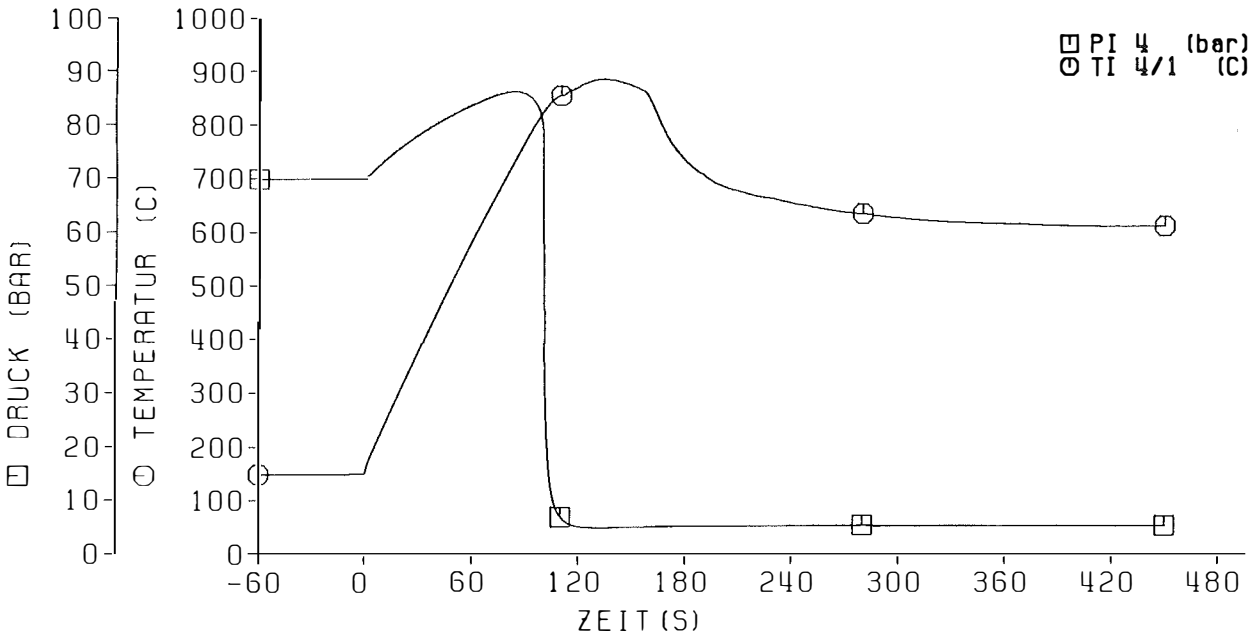

REBEKA 5
Abb: 45 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 38



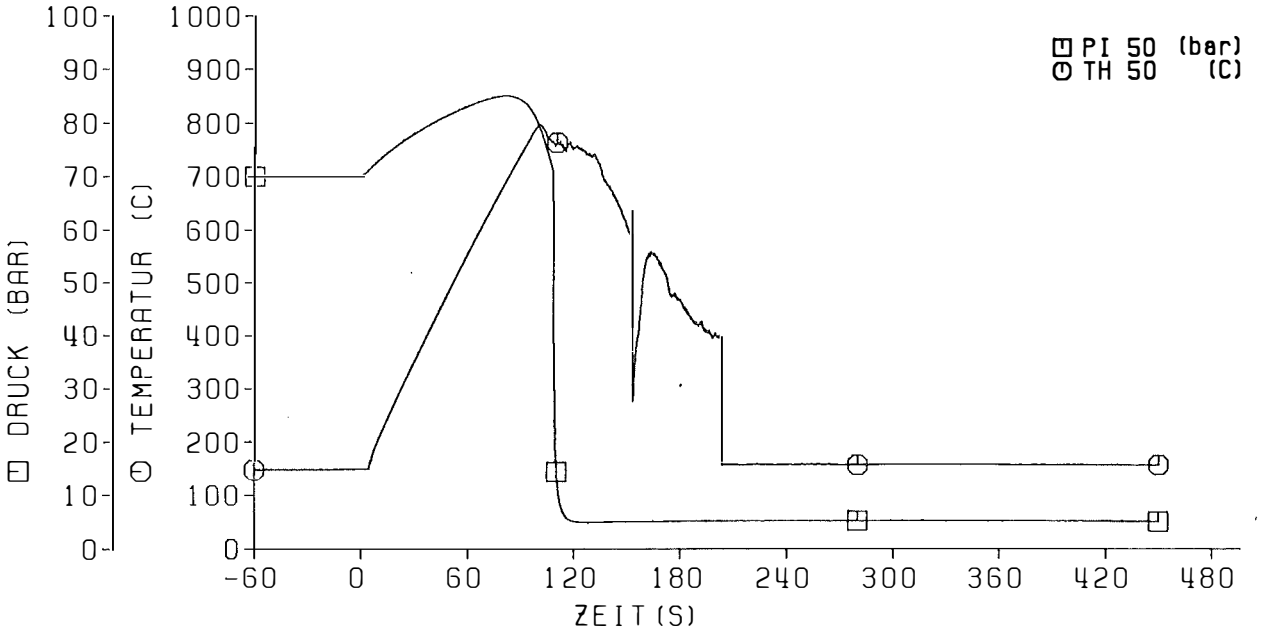

REBEKA 5
Abb: 46 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 29



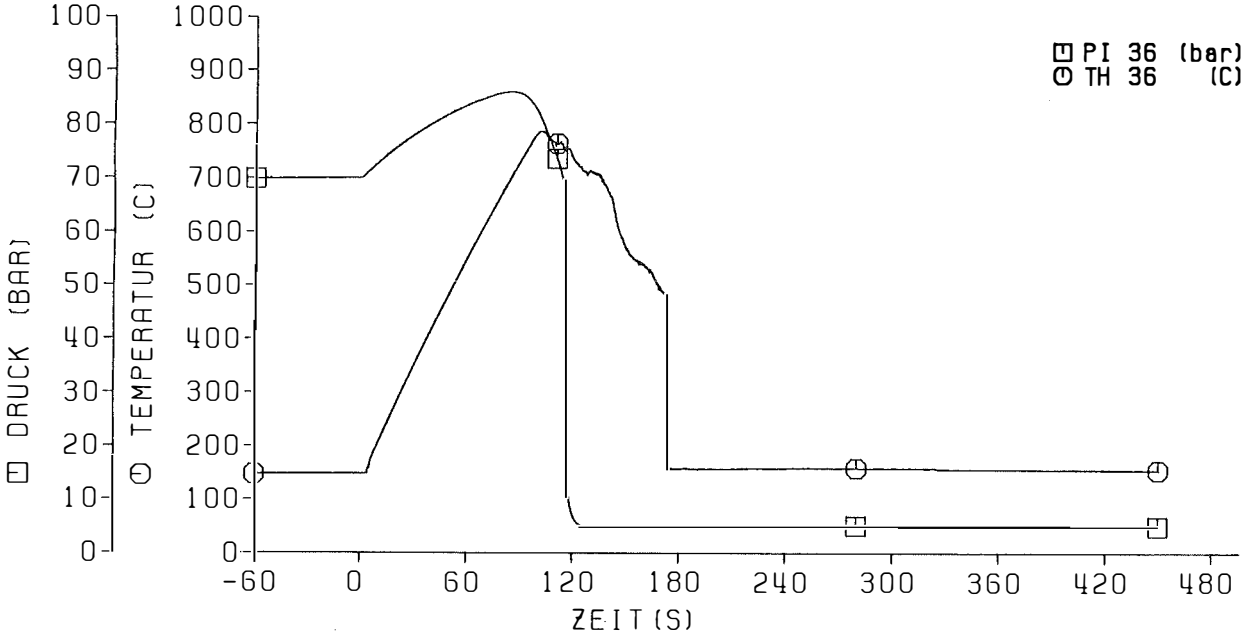

REBEKA 5
Abb: 47 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 46



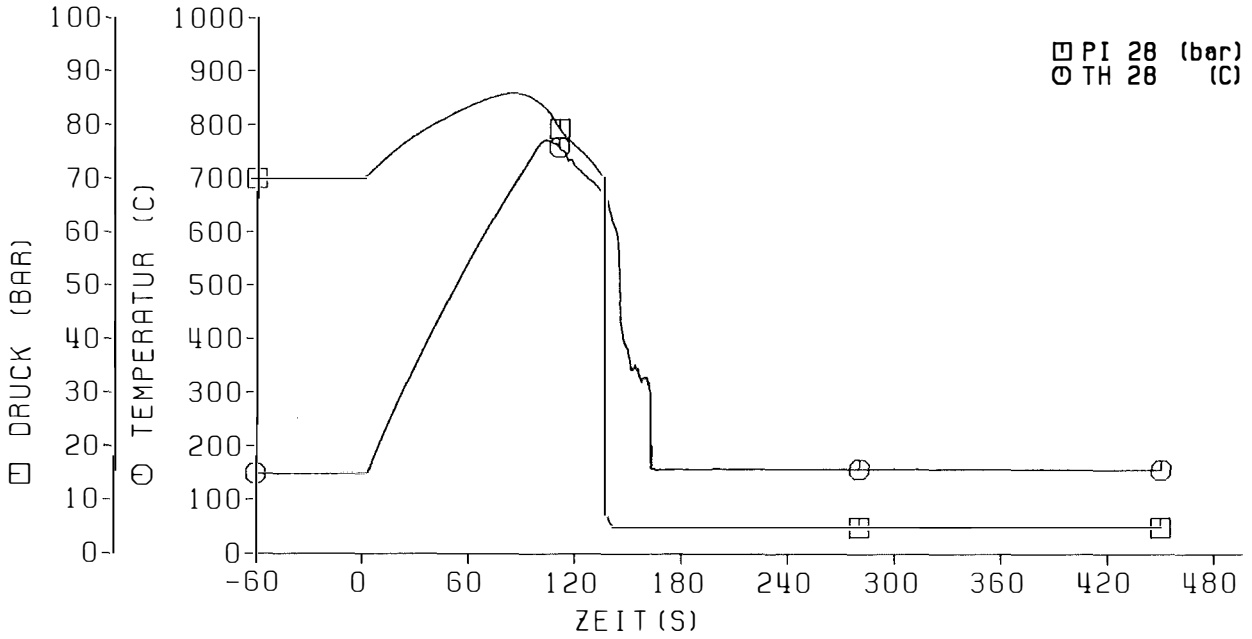

REBEKA 5
Abb: 48 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 4



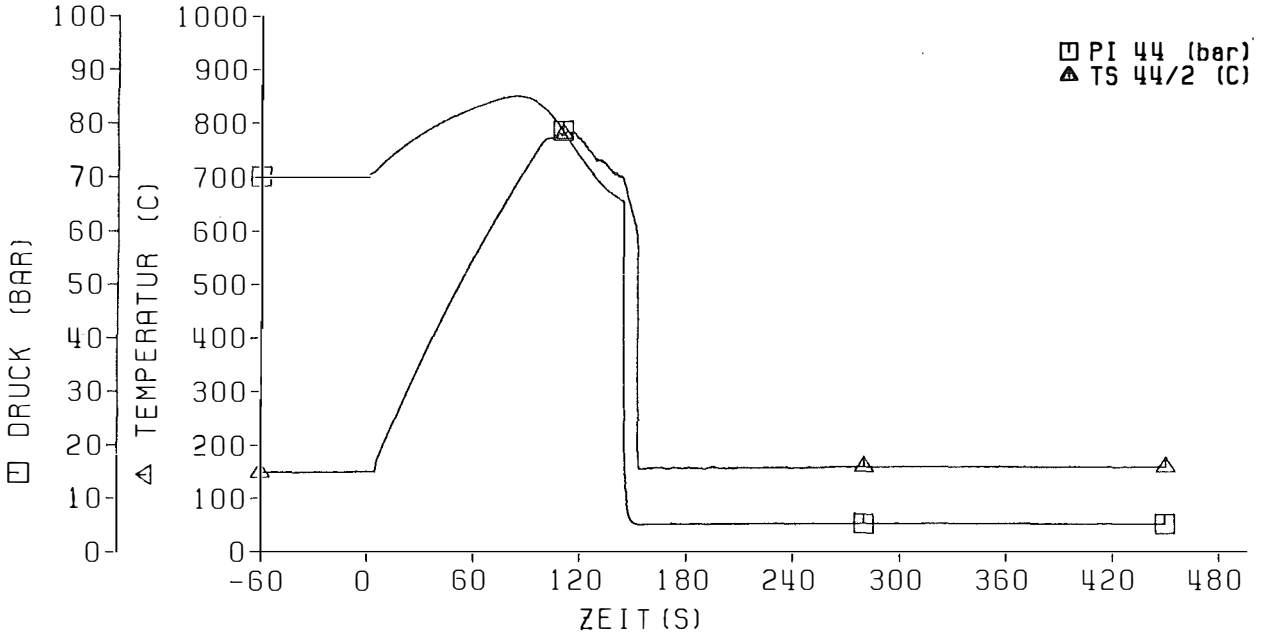

REBEKA 5
Abb: 49 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 50



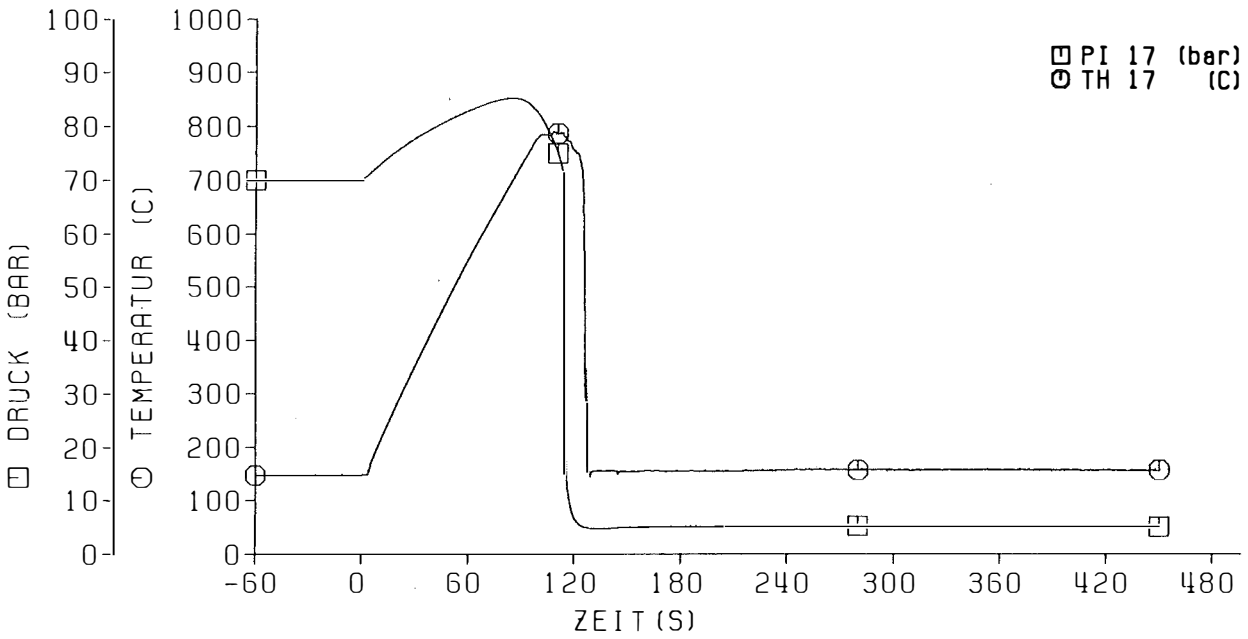

REBEKA 5
Abb: 50 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 36



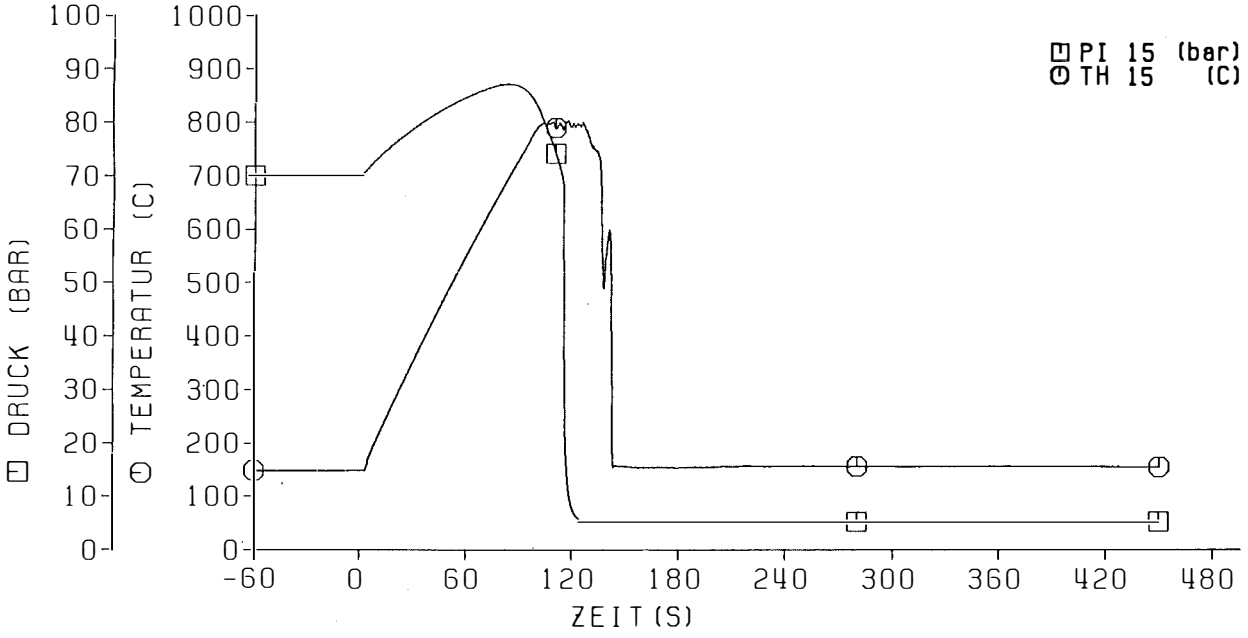

REBEKA 5
Abb: 51 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 28



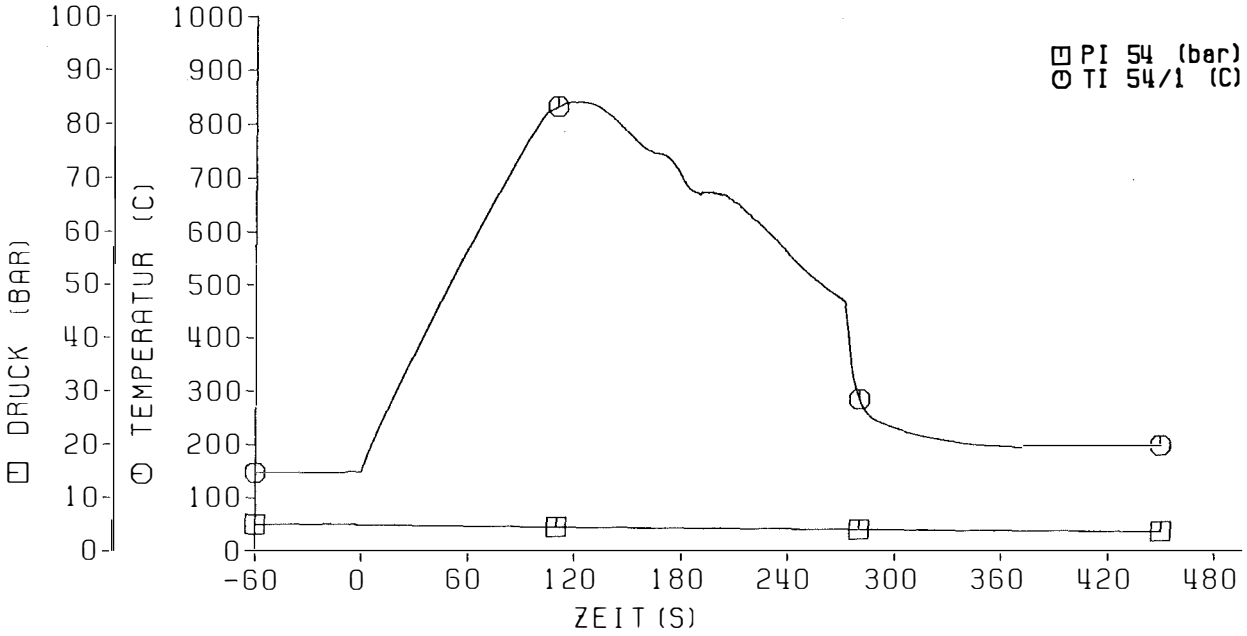

REBEKA 5
Abb: 52 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 44



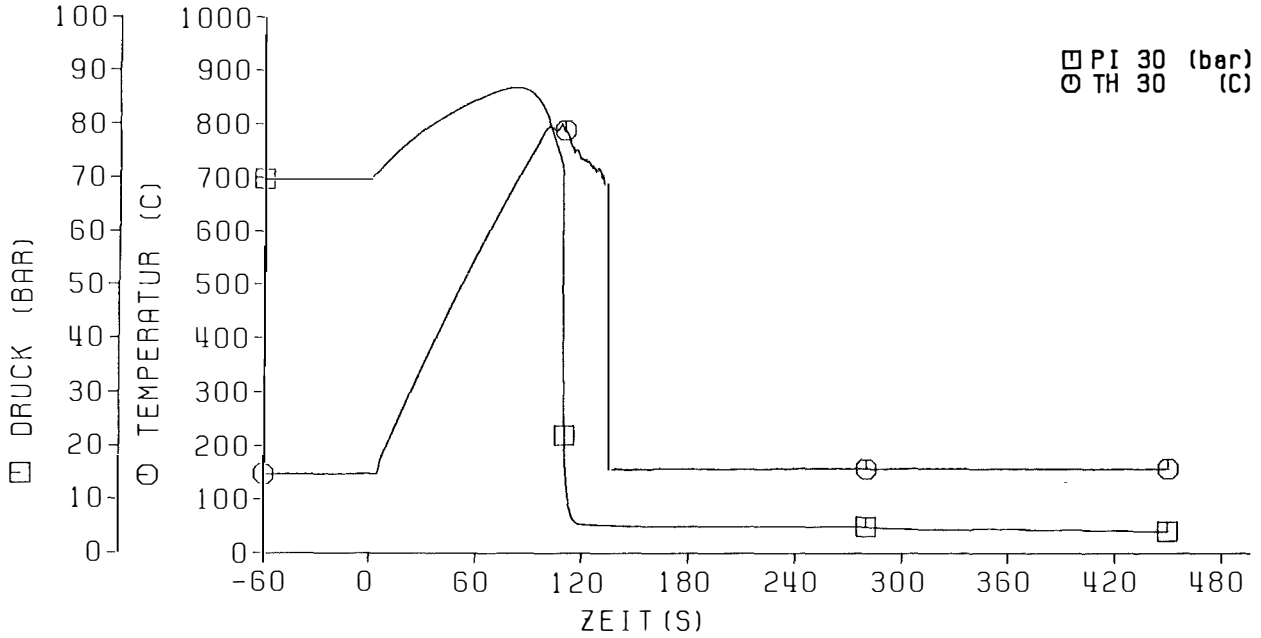

REBEKA 5
Abb: 53 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 17



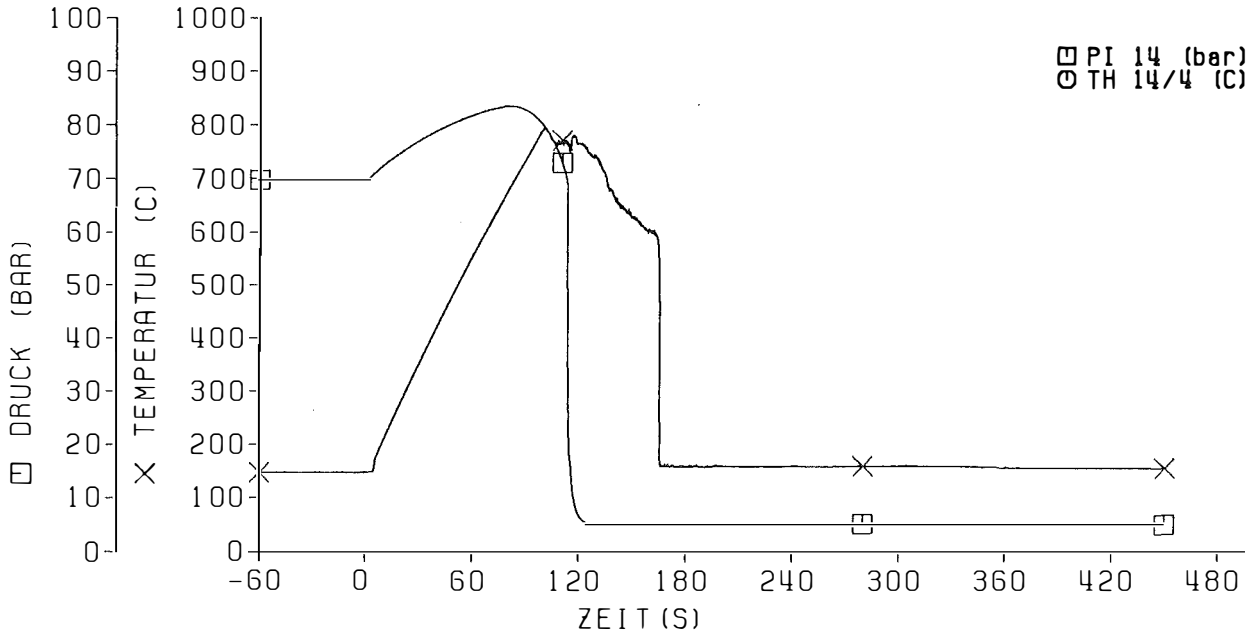

REBEKA 5
Abb: 54 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 15



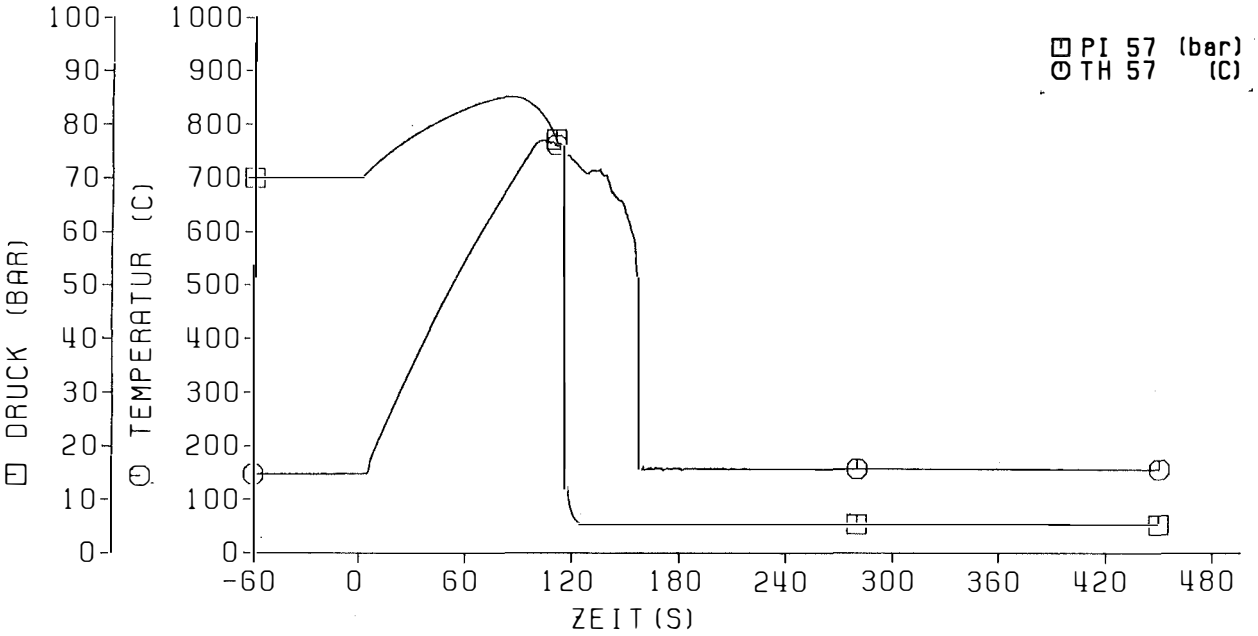

REBEKA 5
Abb: 55 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 54



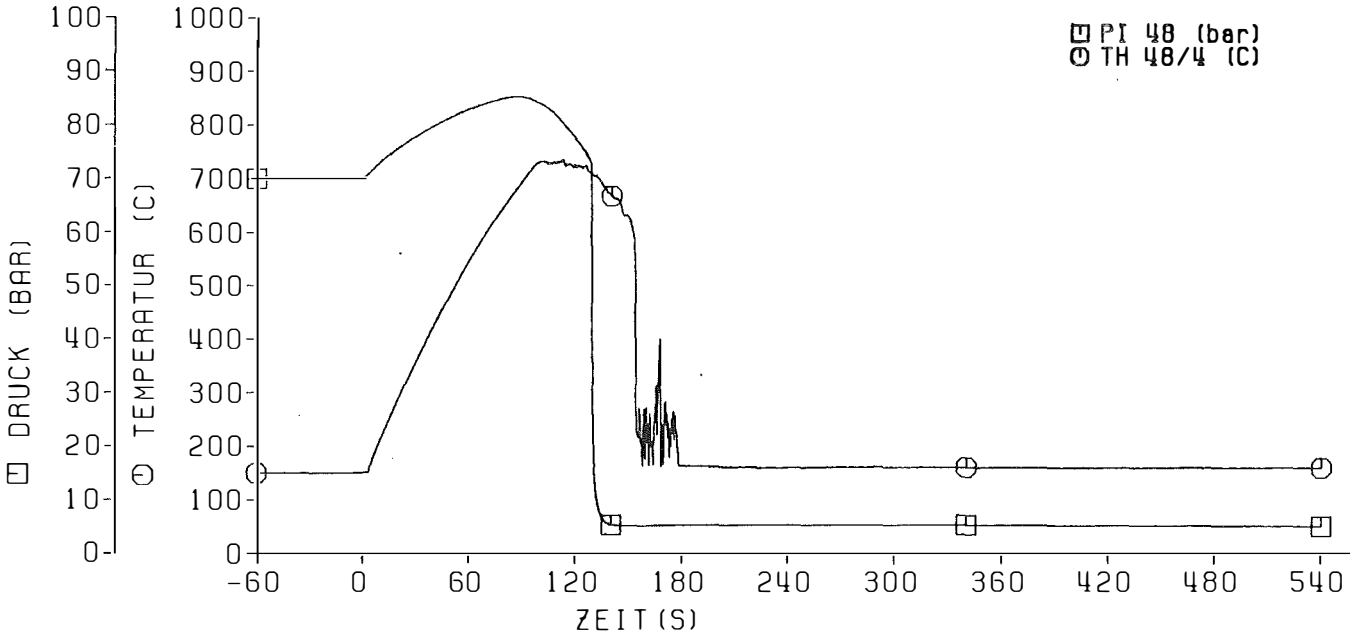

REBEKA 5
Abb: 56 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 30



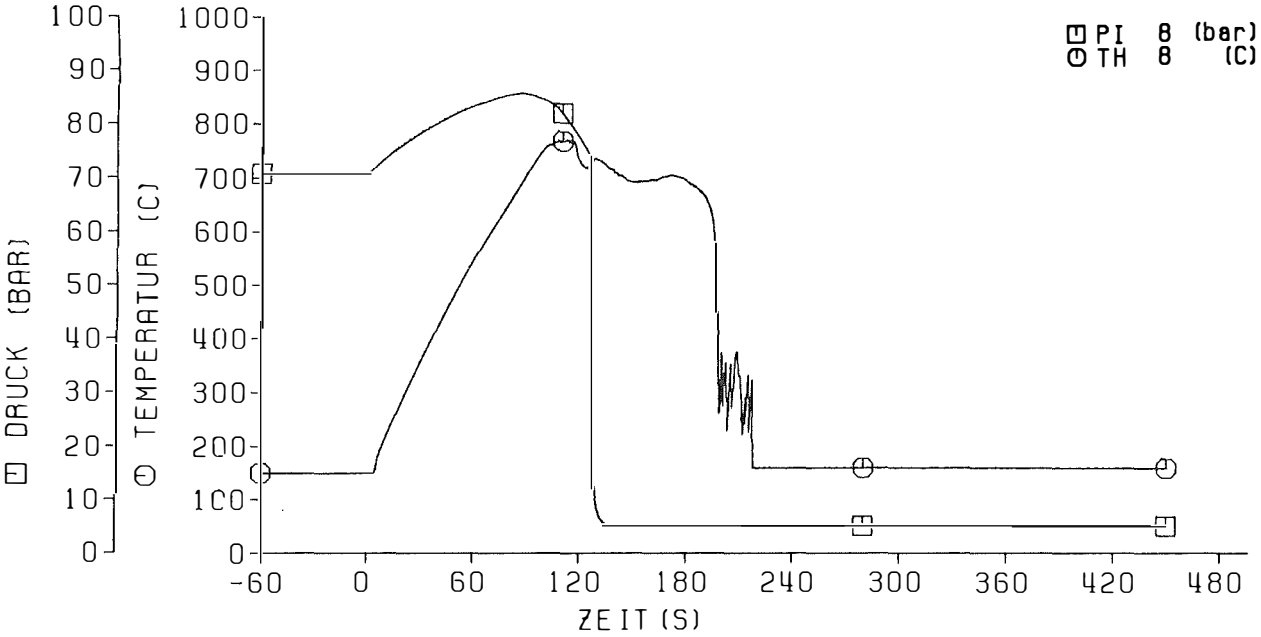

REBEKA 5
Abb: 57 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 14



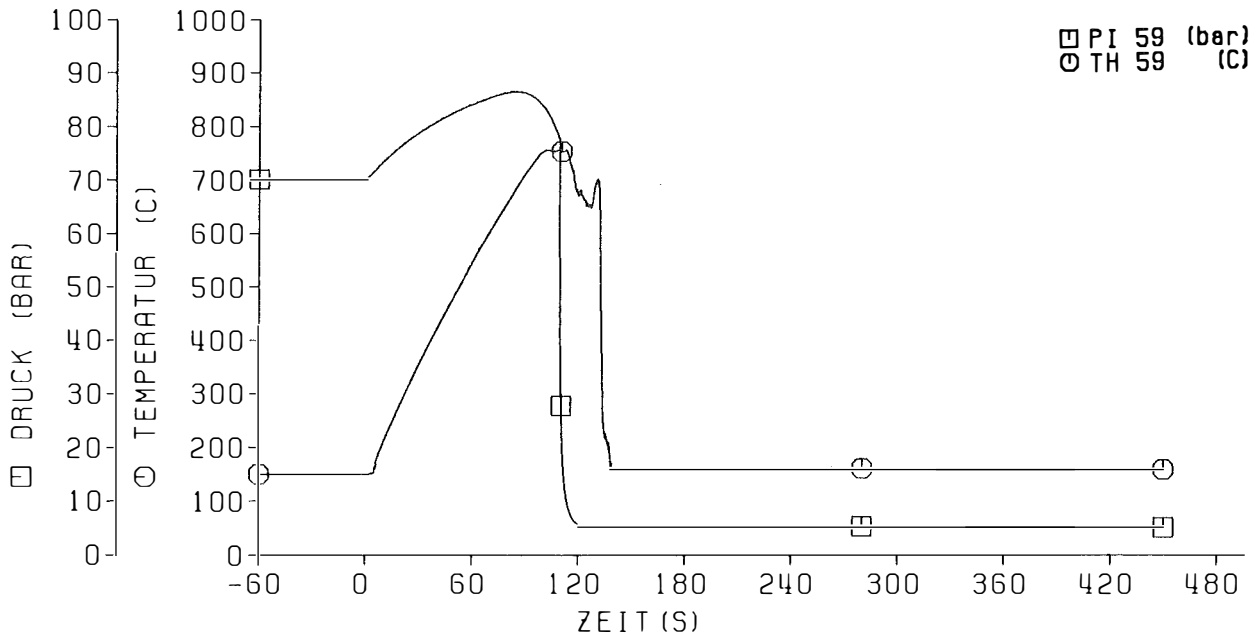

REBEKA 5
Abb: 58 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 57



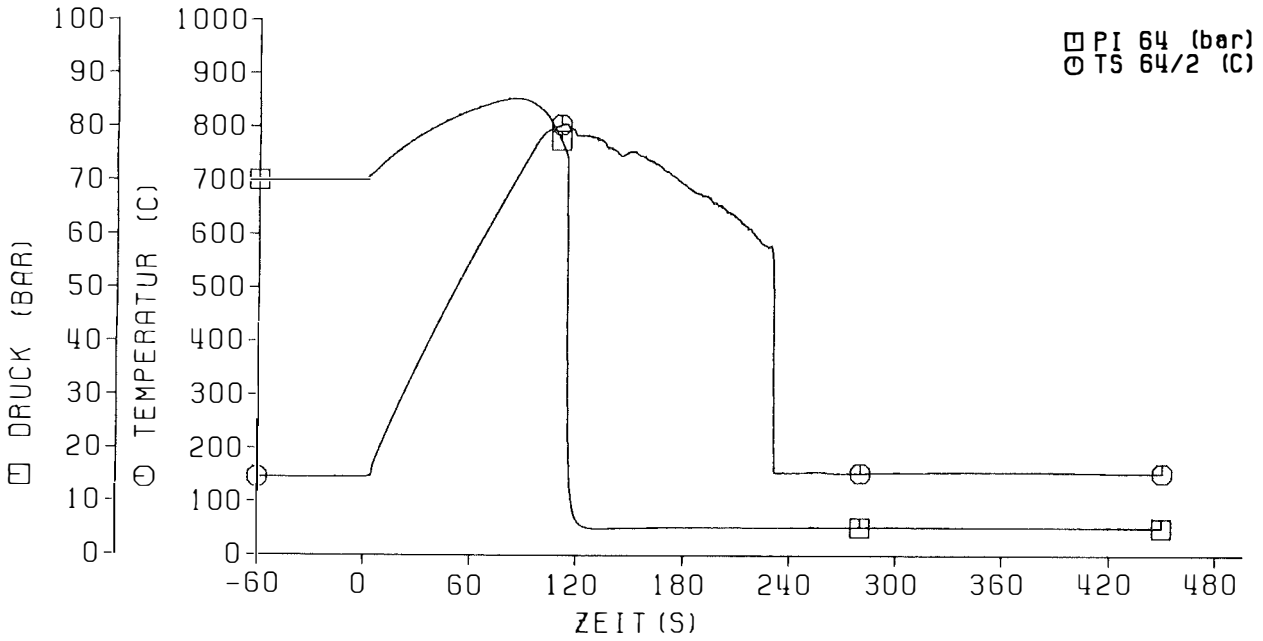

REBEKA 5
Abb: 59 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 48



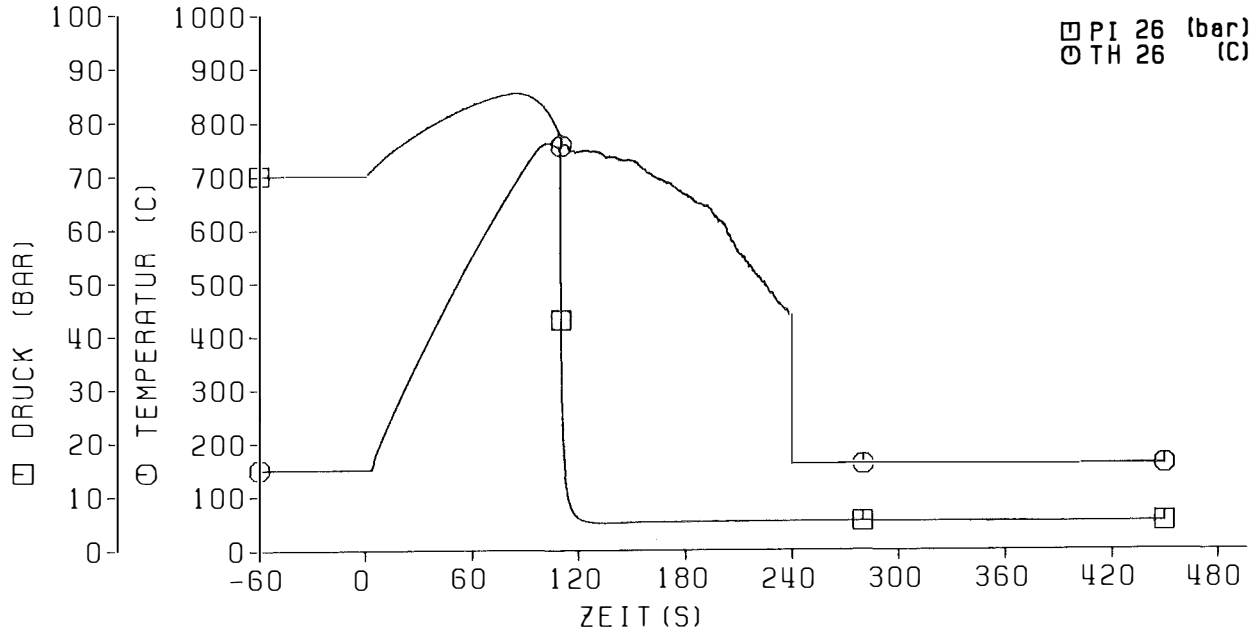

REBEKA 5
Abb: 60 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 8



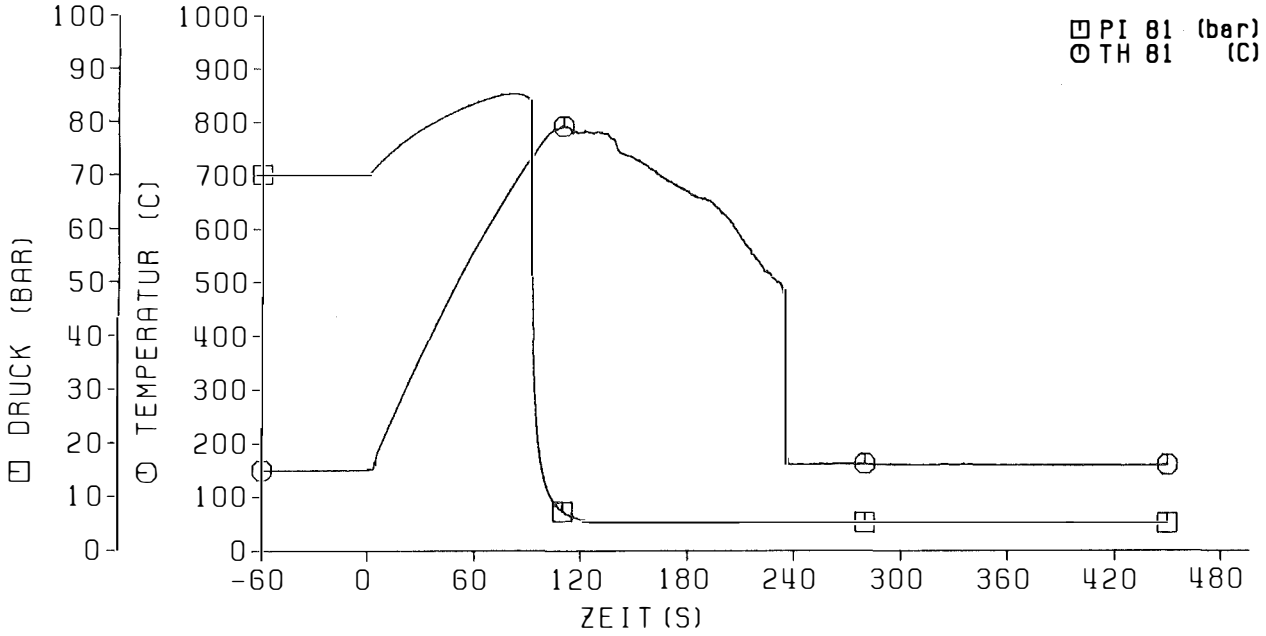

REBEKA 5
Abb: 61 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 59



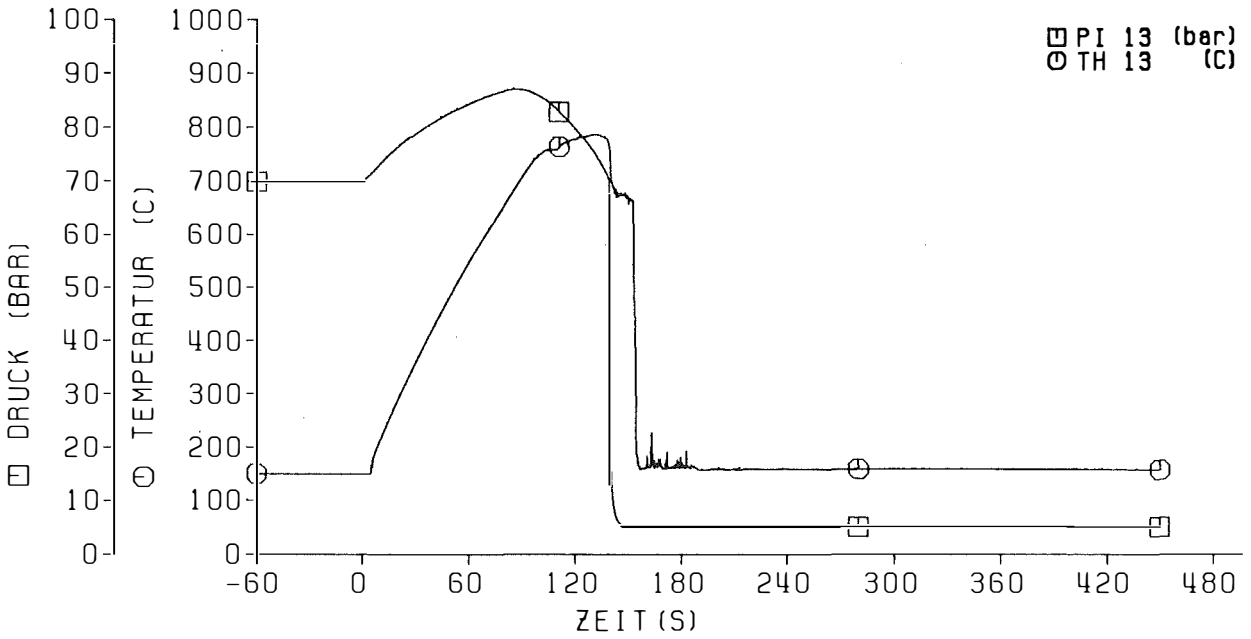

REBEKA 5
Abb: 62 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 64




REBEKA 5
Abb: 63 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 26



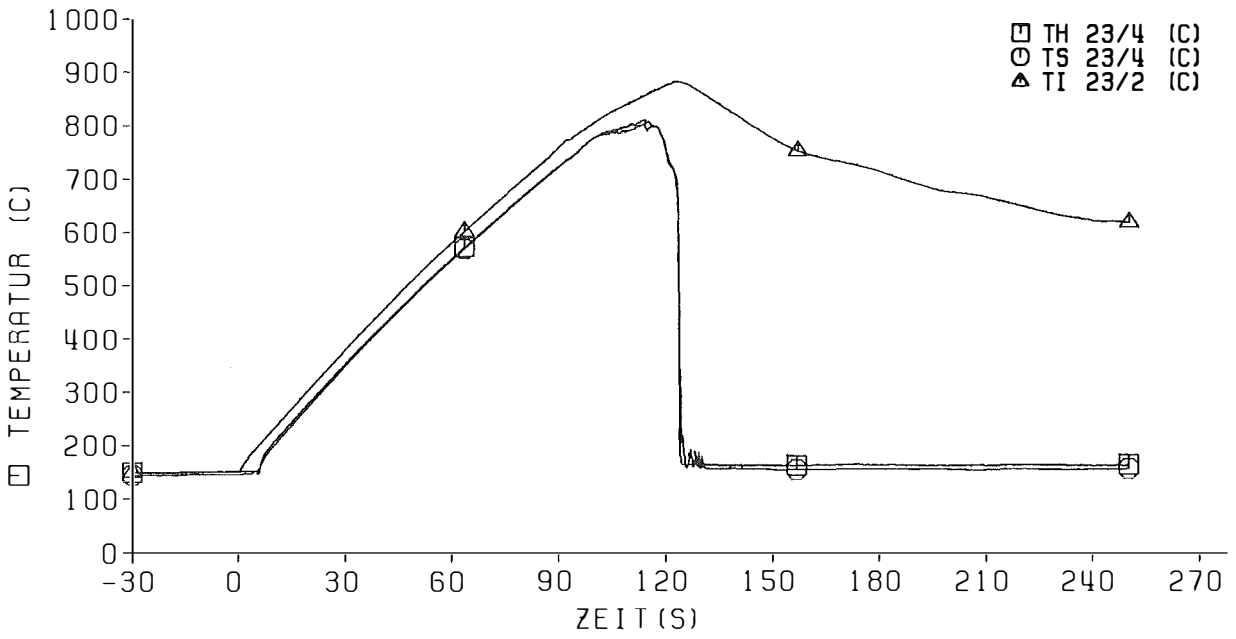

REBEKA 5
Abb: 64 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 81



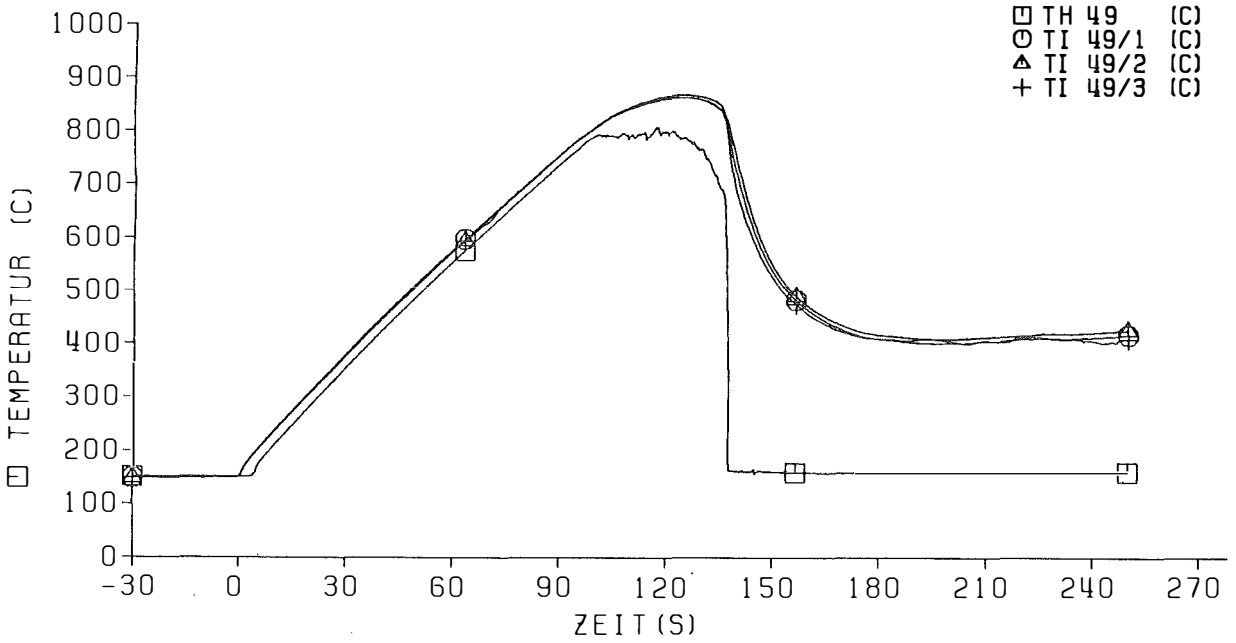

REBEKA 5
Abb: 65 Druck-und Temperaturverlauf von Stab: 13

3.4 Alle Hüllrohr- und Heizstabhüllentemperaturverläufe in axialer Mittelebene, ausgenommen sind Einzeltemperaturmeßstellen, die bereits unter 3.3 dargestellt worden sind: (Abbn. 66 - 85)

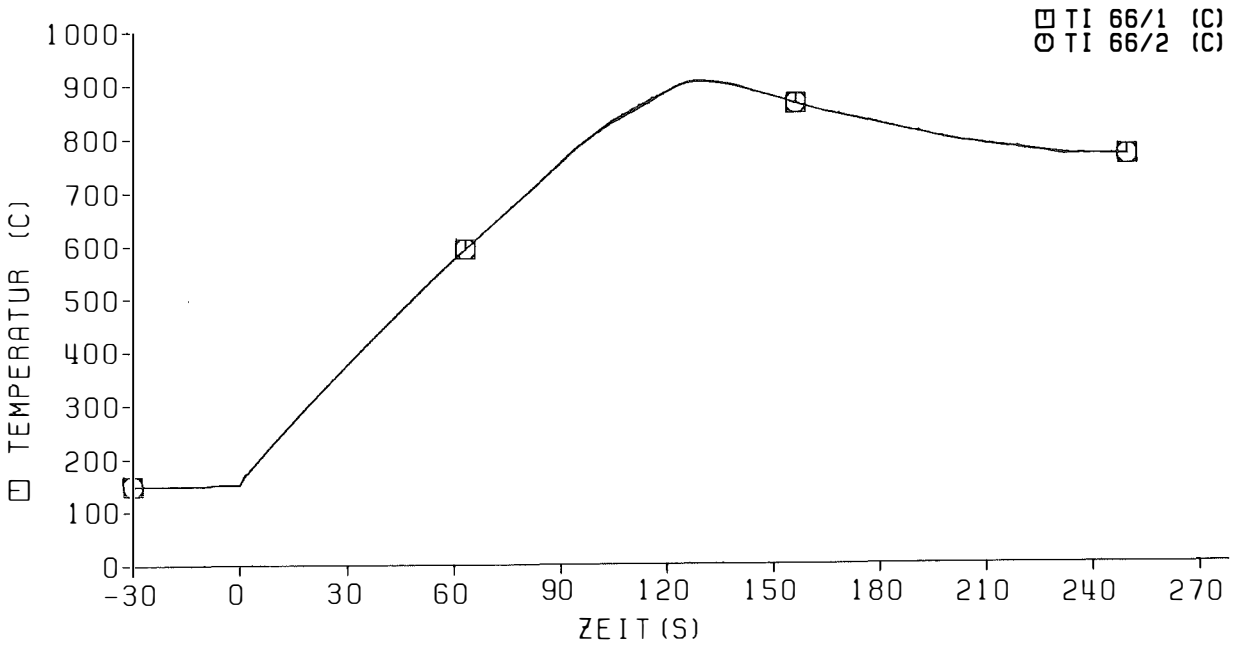
(ohne Stab 38, da Thermoelement defekt).



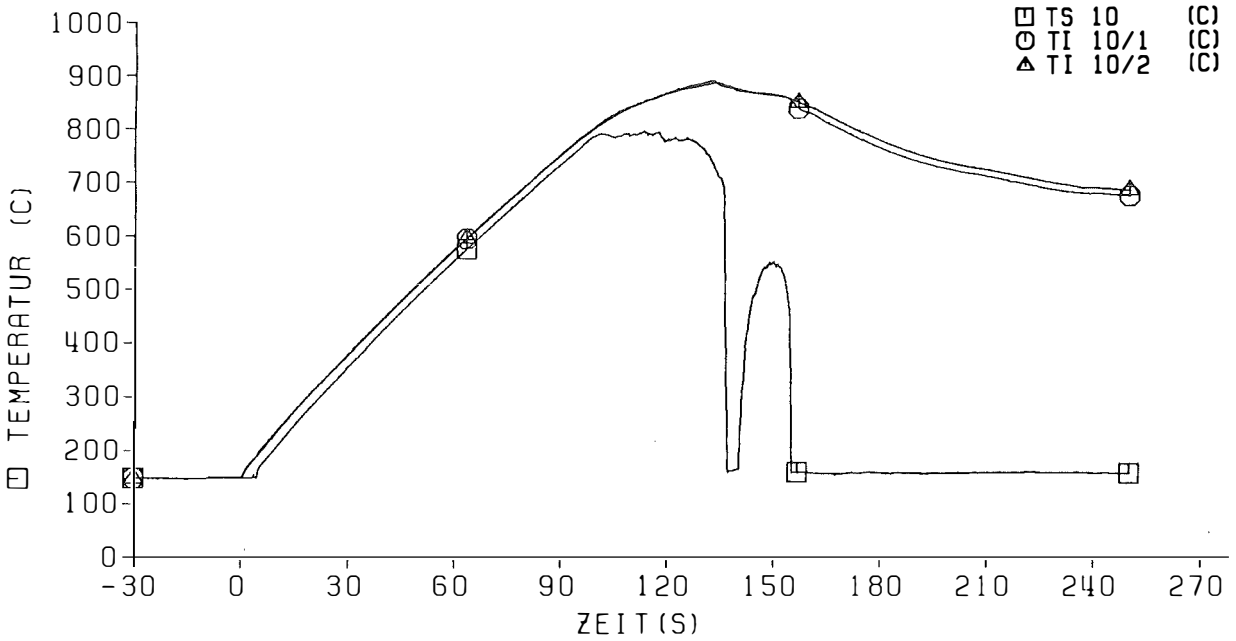

REBEKA 5
Abb: 66 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 23



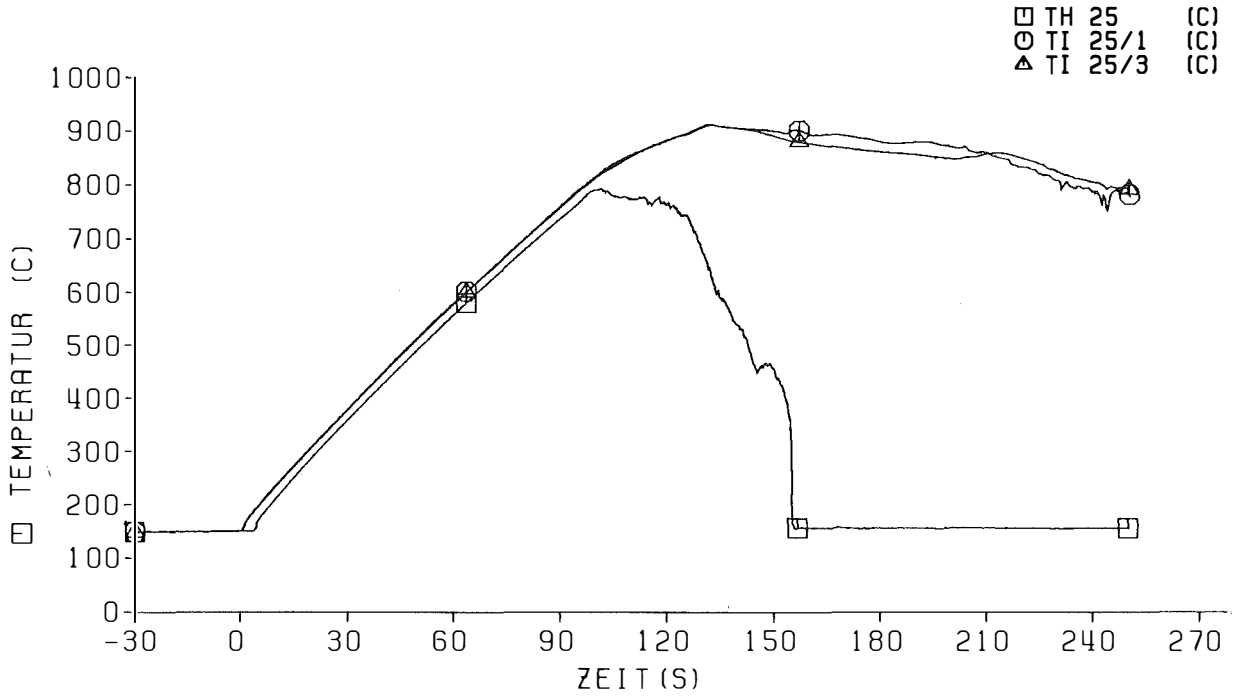

REBEKA 5
Abb: 67 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 49



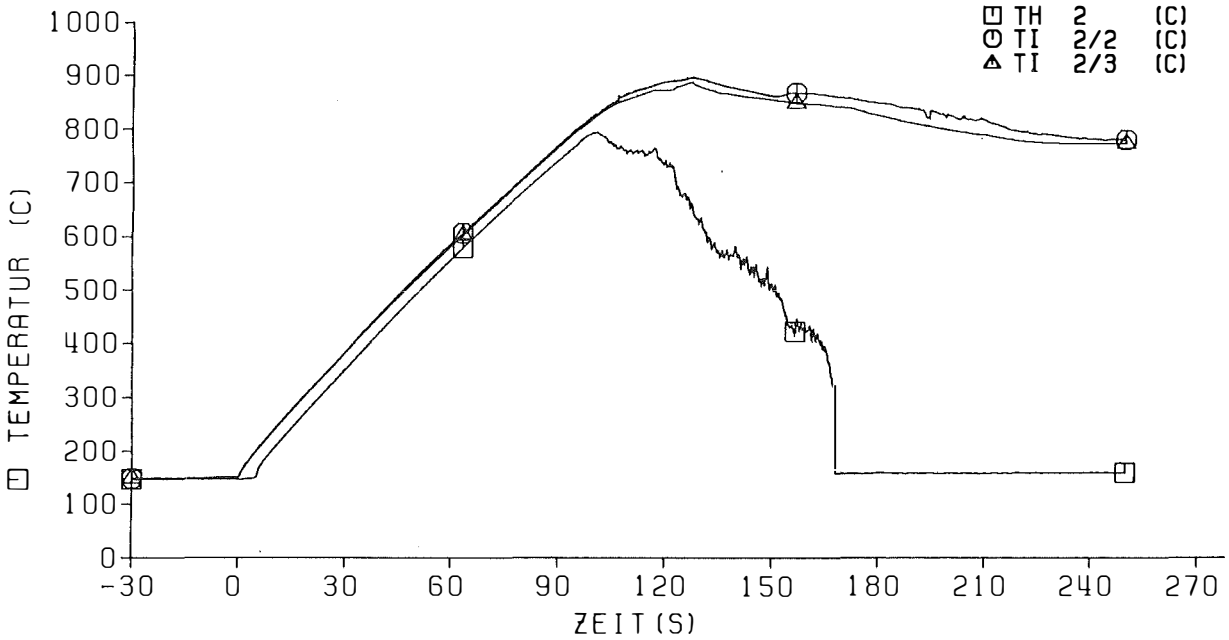

REBEKA 5
Abb: 68 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 66



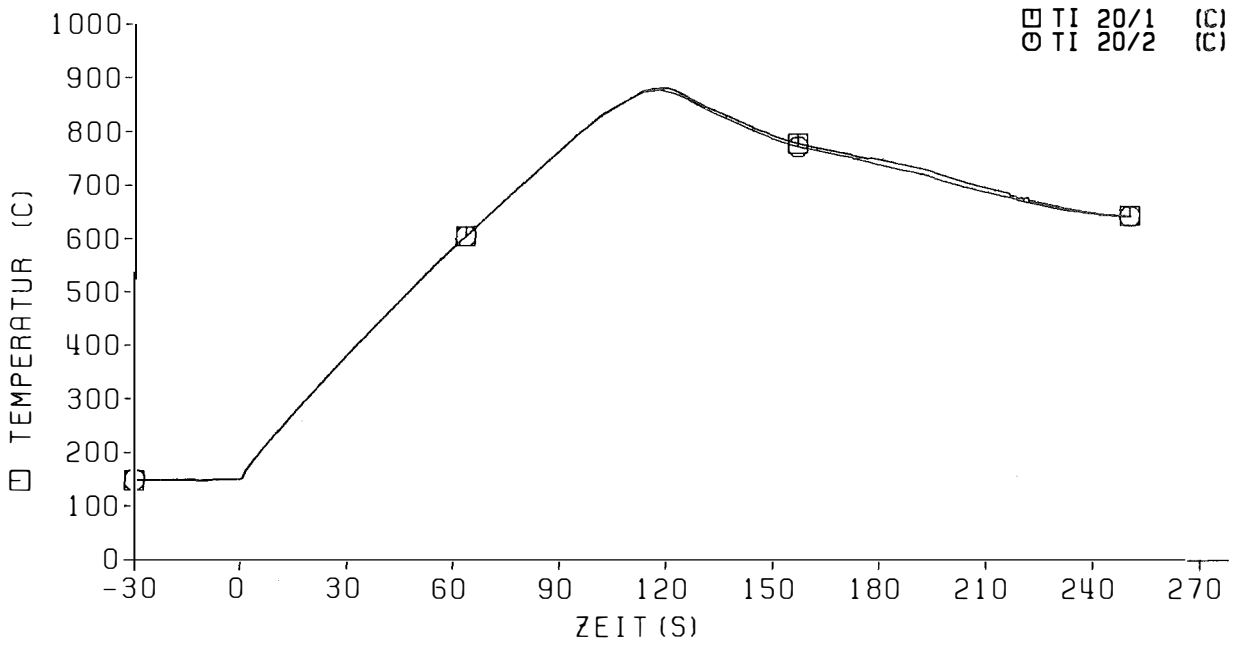

REBEKA 5
Abb: 69 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 10




REBEKA 5
Abb: 70 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 25

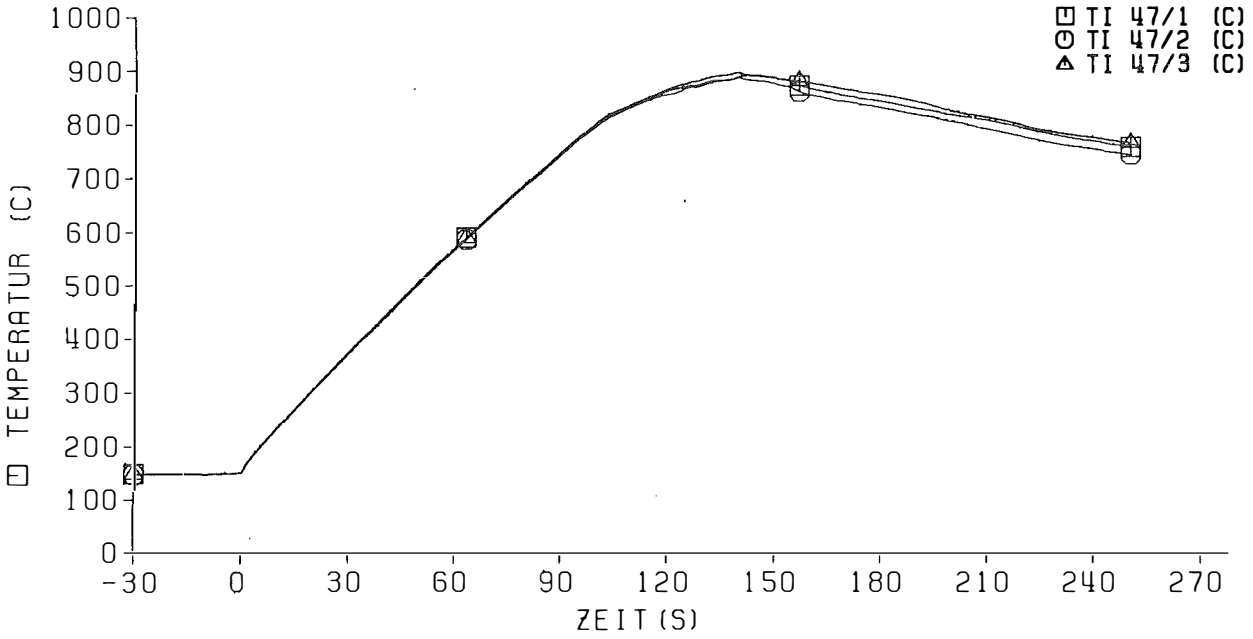



REBEKA 5
Abb: 71 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 2

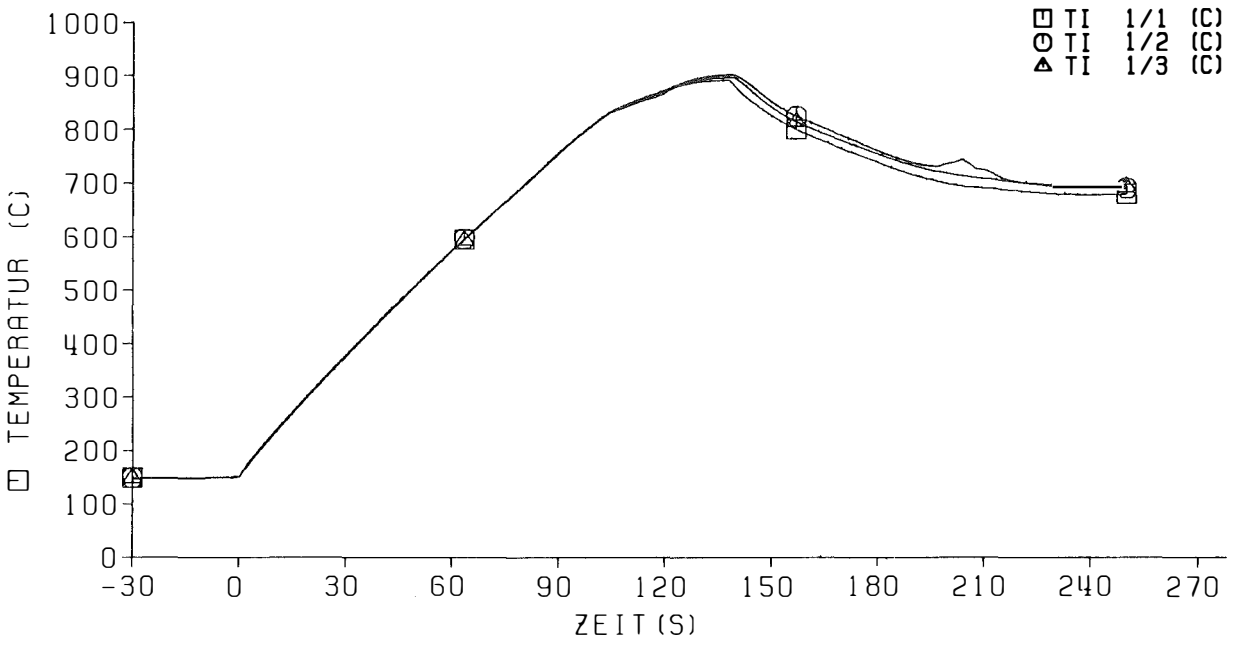



RB

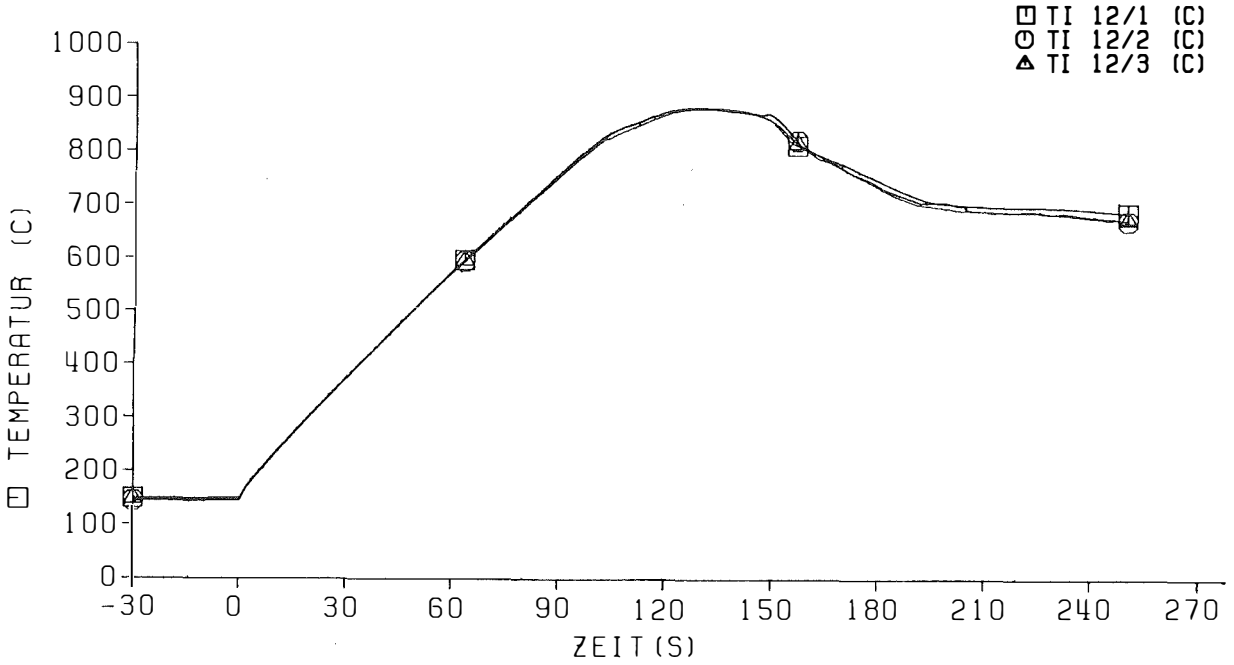
REBEKA 5
Abb: 72 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 20



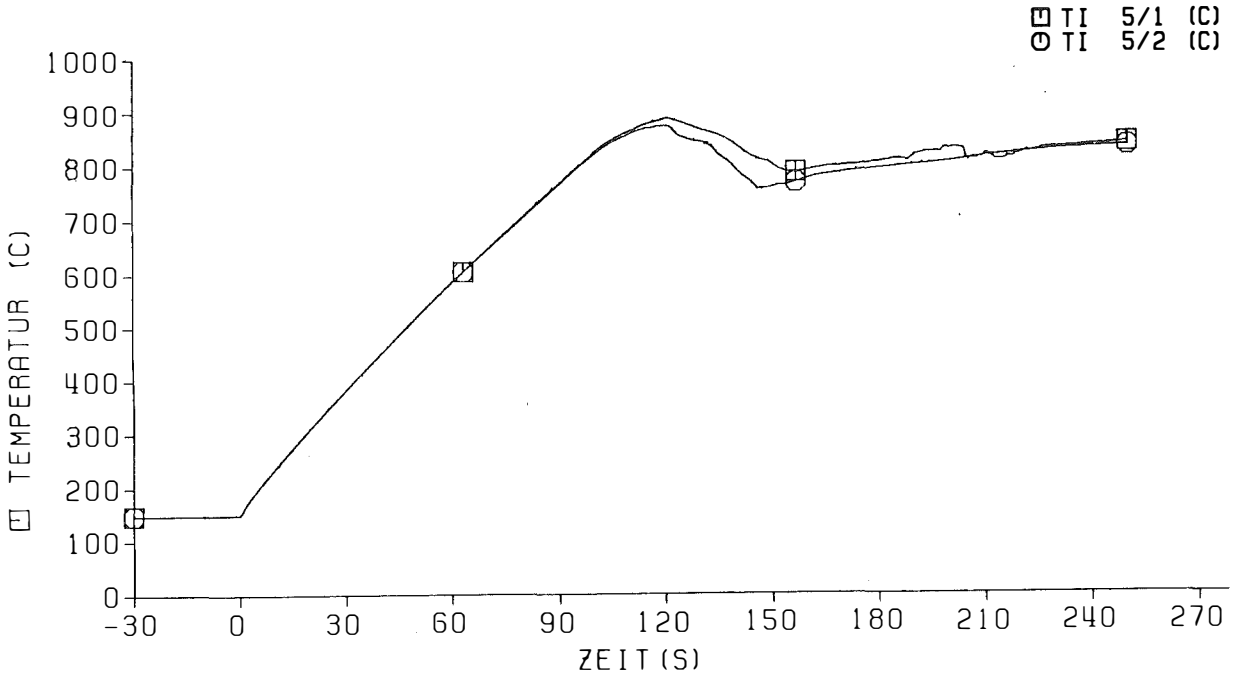

REBEKA 5
Abb: 73 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 47



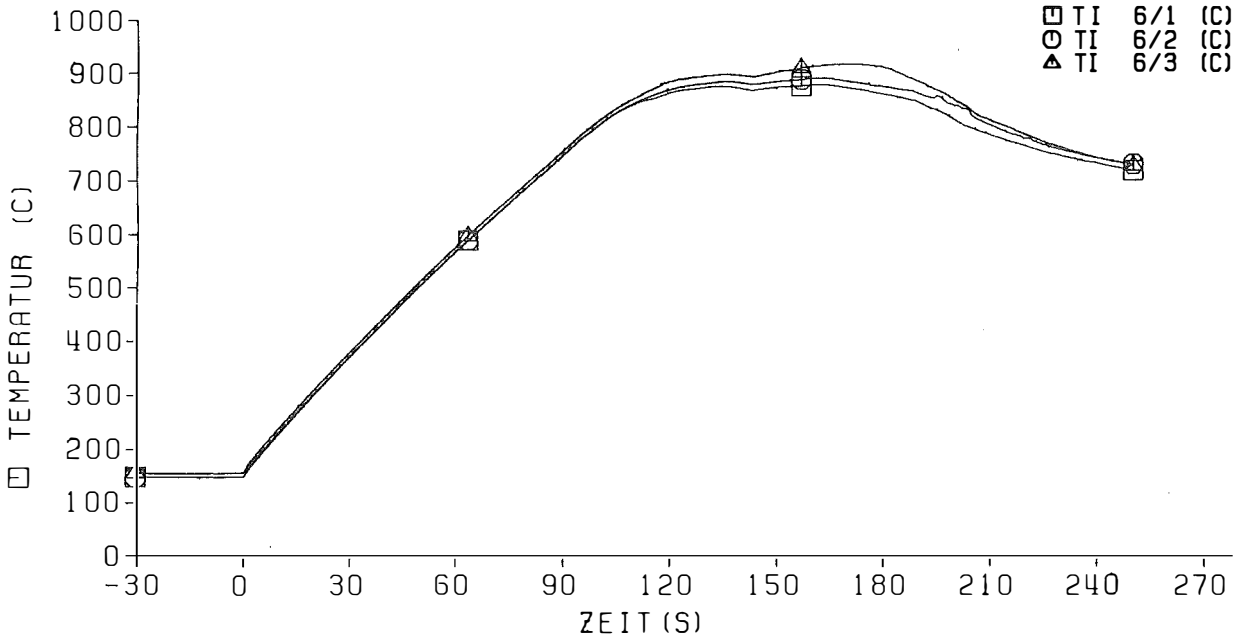

REBEKA 5
Abb: 74 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 1



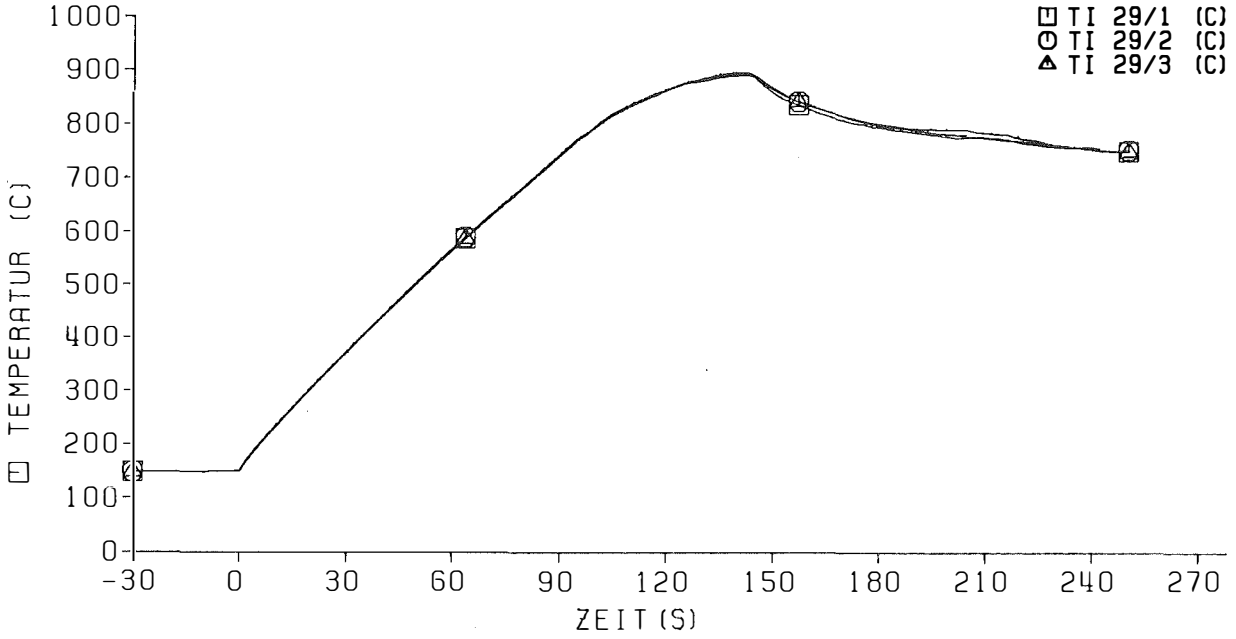

REBEKA 5
Abb: 75 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 12



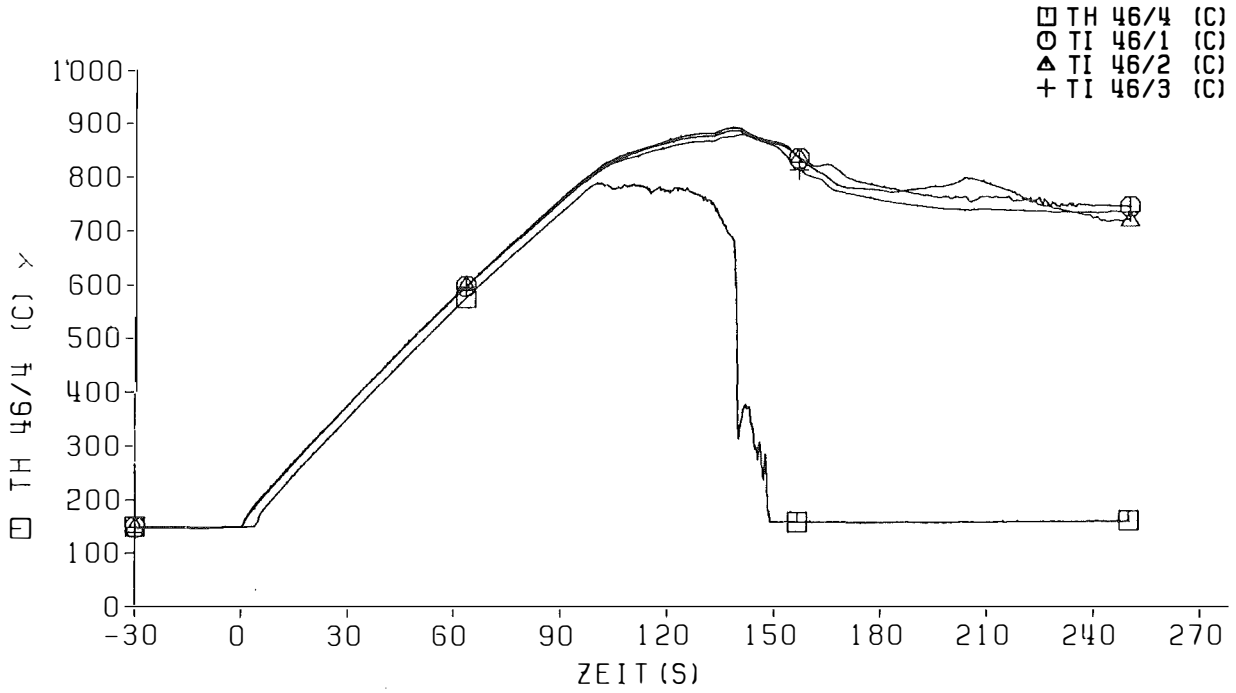

REBEKA 5
Abb: 76 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 5



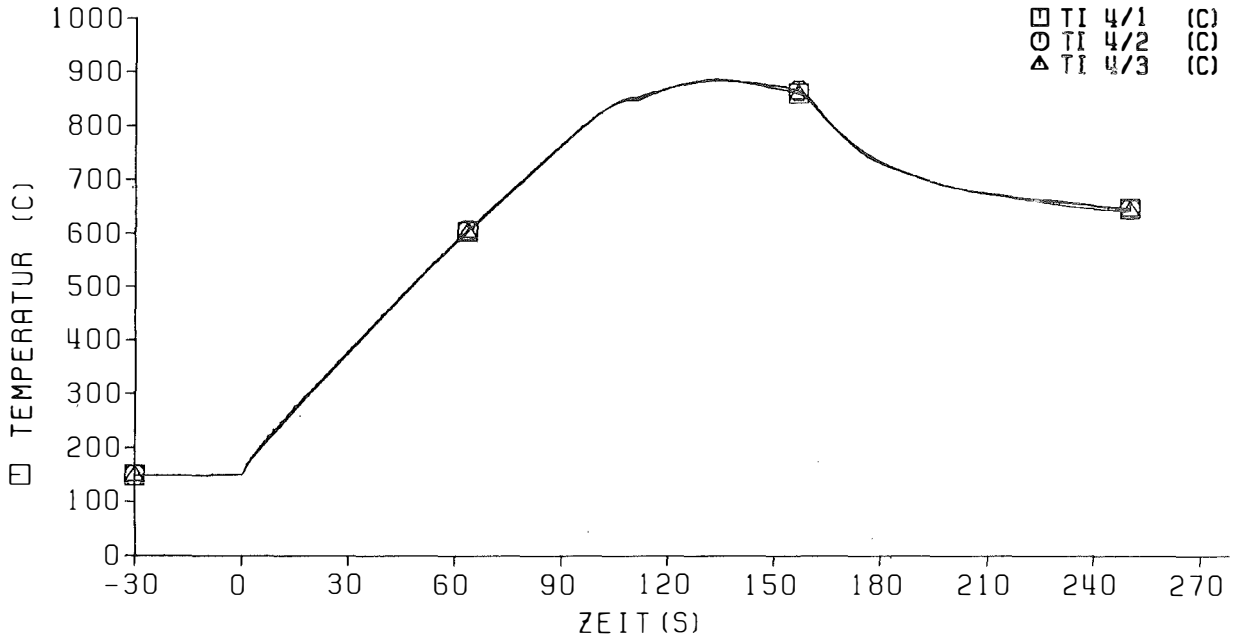

REBEKA 5
Abb: 77 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 6



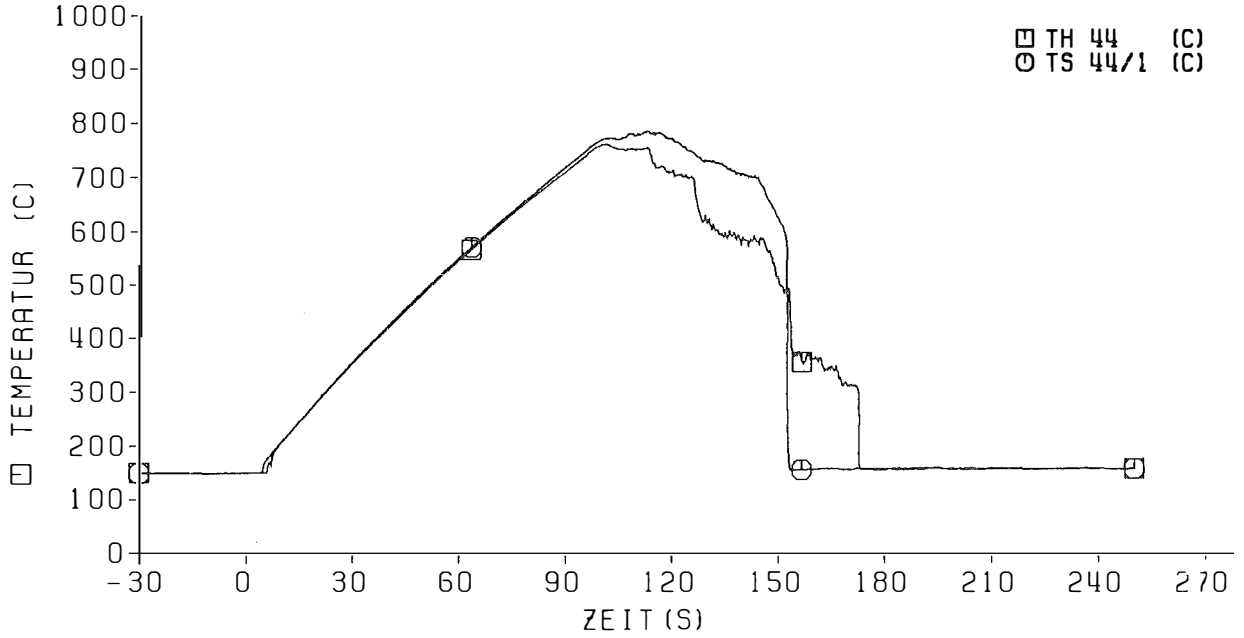

REBEKA 5
Abb: 78 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 29



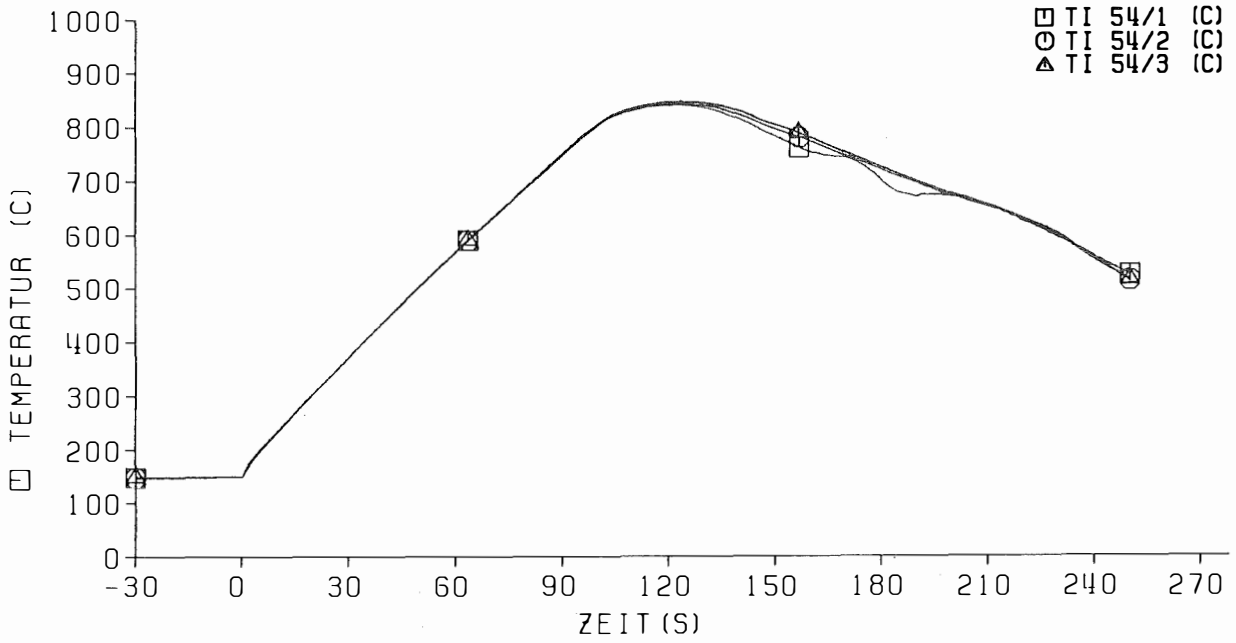

REBEKA 5
Abb: 79 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 46



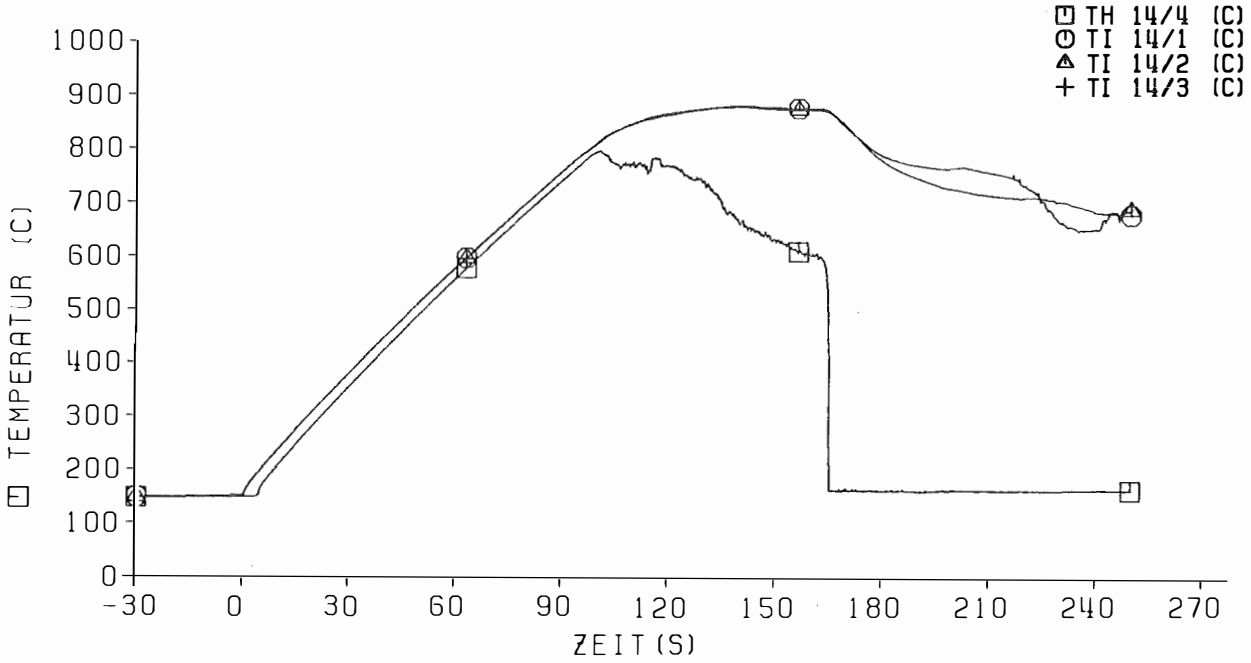

REBEKA 5
Abb: 80 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 4



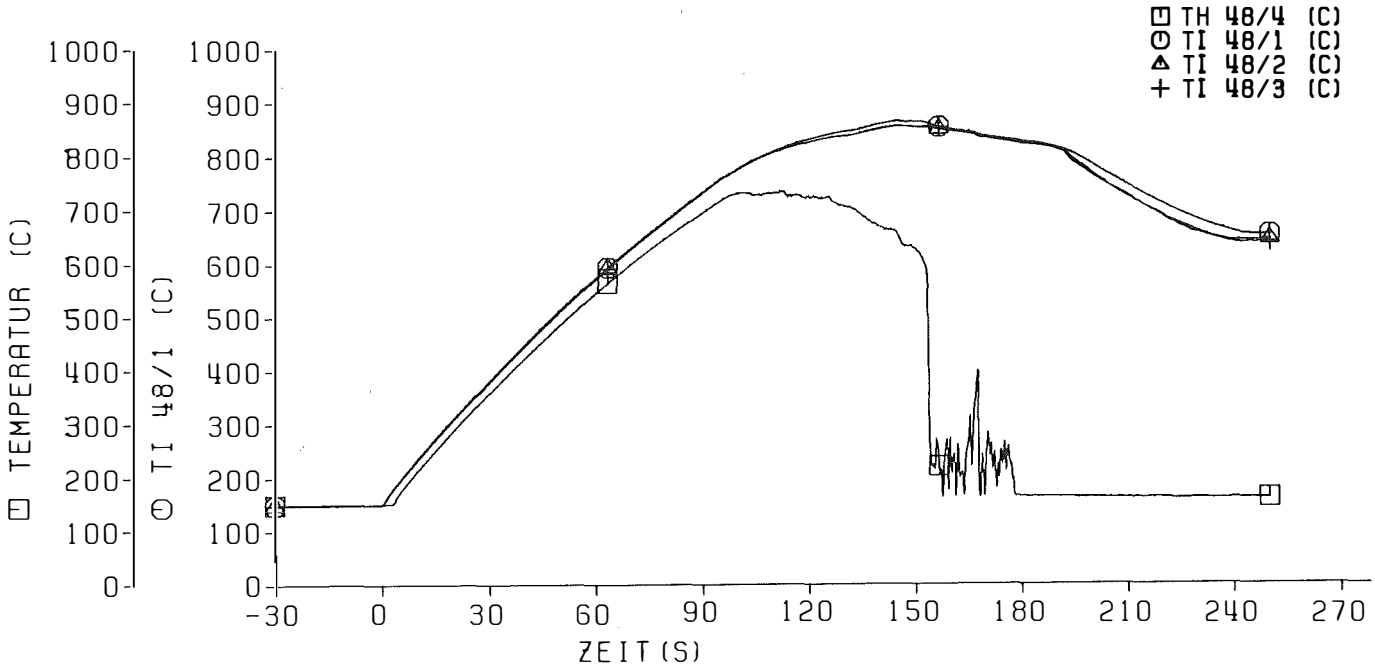

REBEKA 5
Abb: 81 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 44



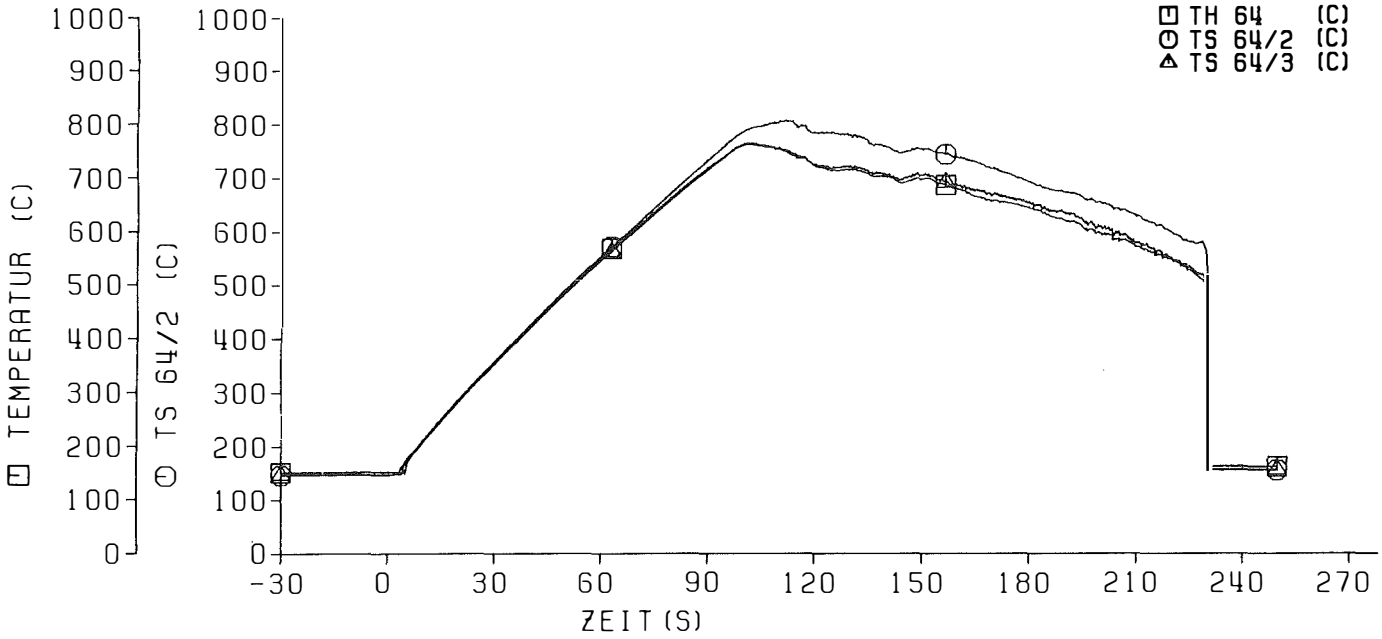

REBEKA 5
Abb: 82 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 54




REBEKA 5
Abb: 83 Temperaturverlaufin axialer Mittelebene von Stab: 14




REBEKA 5
Abb: 84 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 48




REBEKA 5
Abb: 85 Temperaturverlauf in axialer Mittelebene von Stab: 64

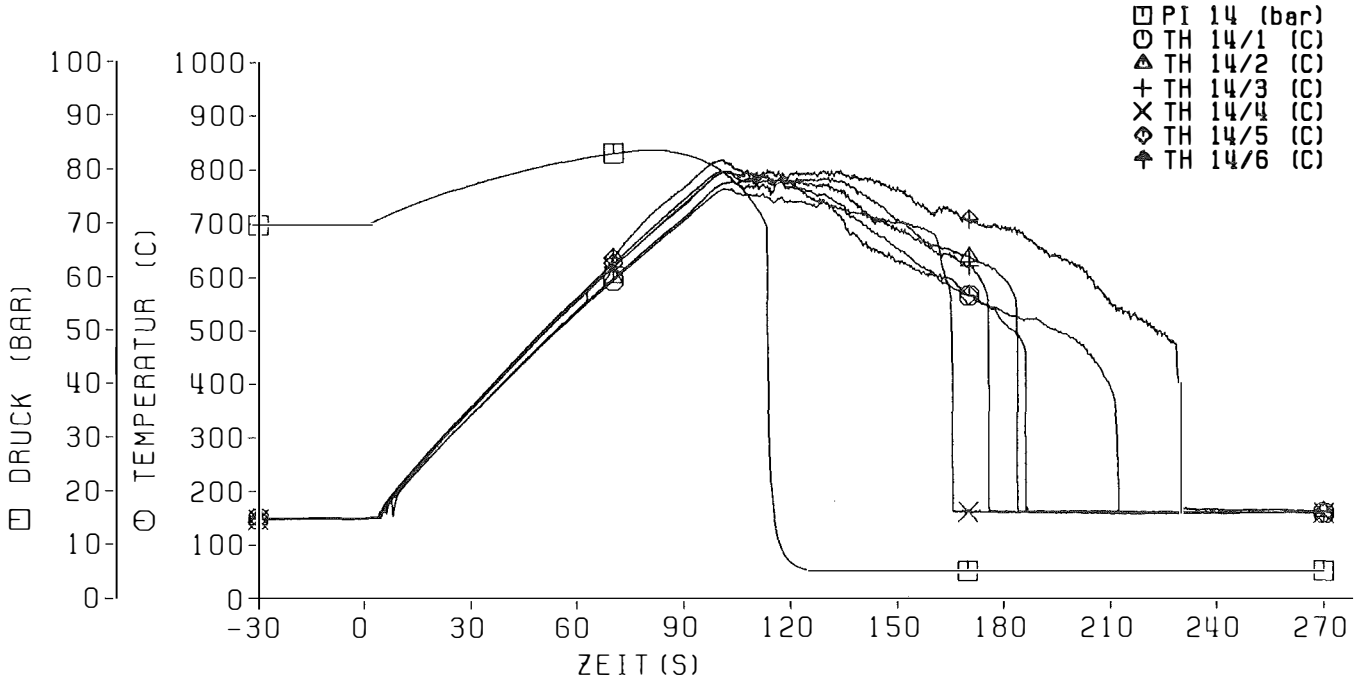
## 3.5 Axiale Hüllrohrtemperaturverläufe mit Druckverlauf des dargestellten Stabes

### 3.5.1 Axiale Temperaturen im Bereich zwischen den mittleren Abstandshaltern 4 und 5

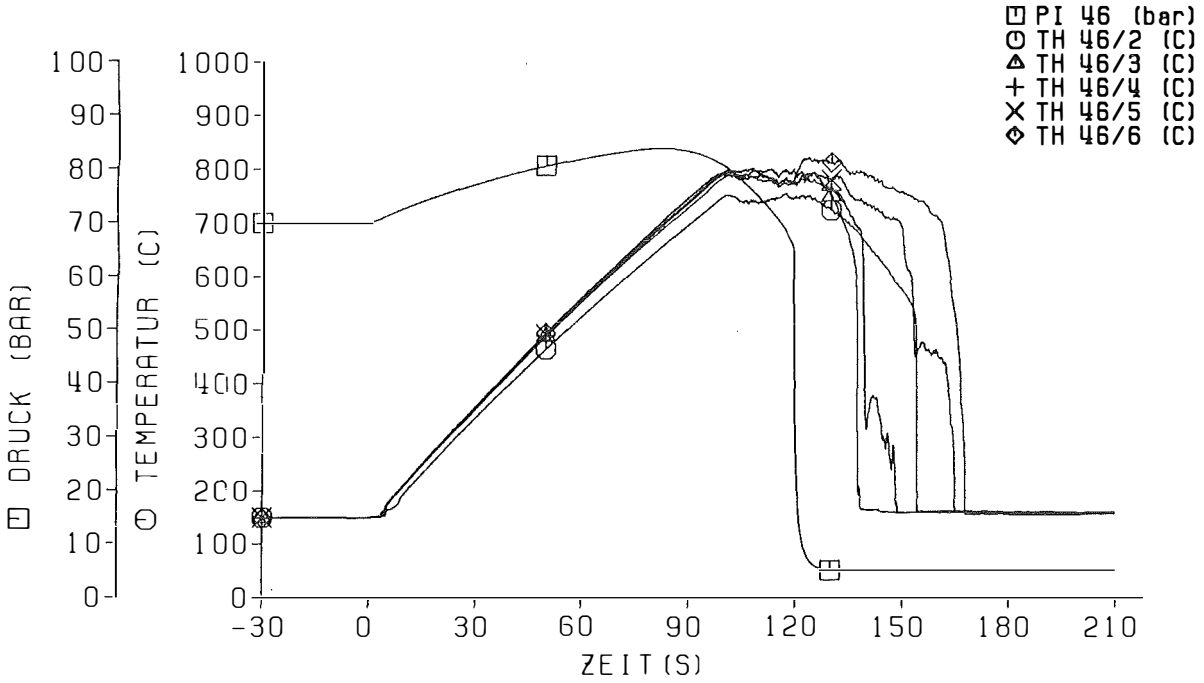
- Stab Nr. 14 (Abb. 86)
- Stab Nr. 46 (Abb. 87)

### 3.5.2 Axiale Temperaturen über die volle Stablänge

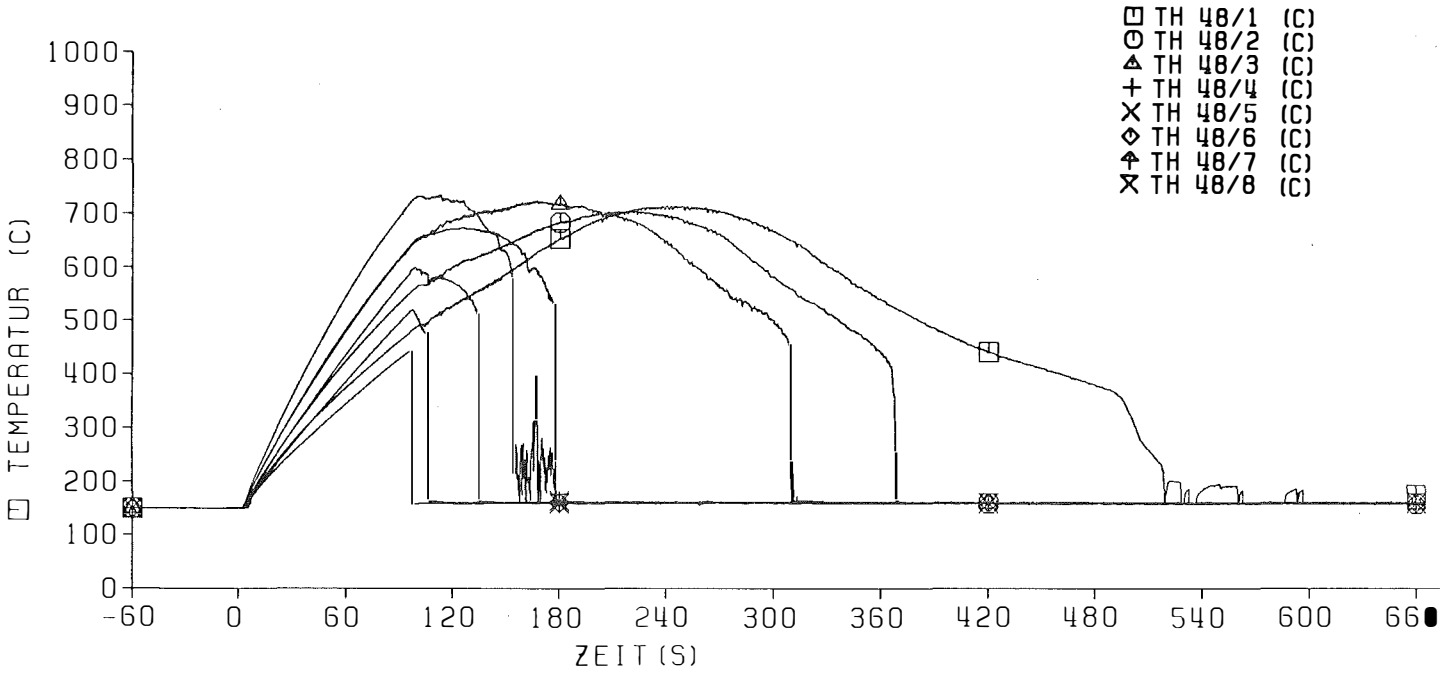
- Stab Nr. 48 (Abb. 88)
- Stab Nr. 23 (Abb. 89)



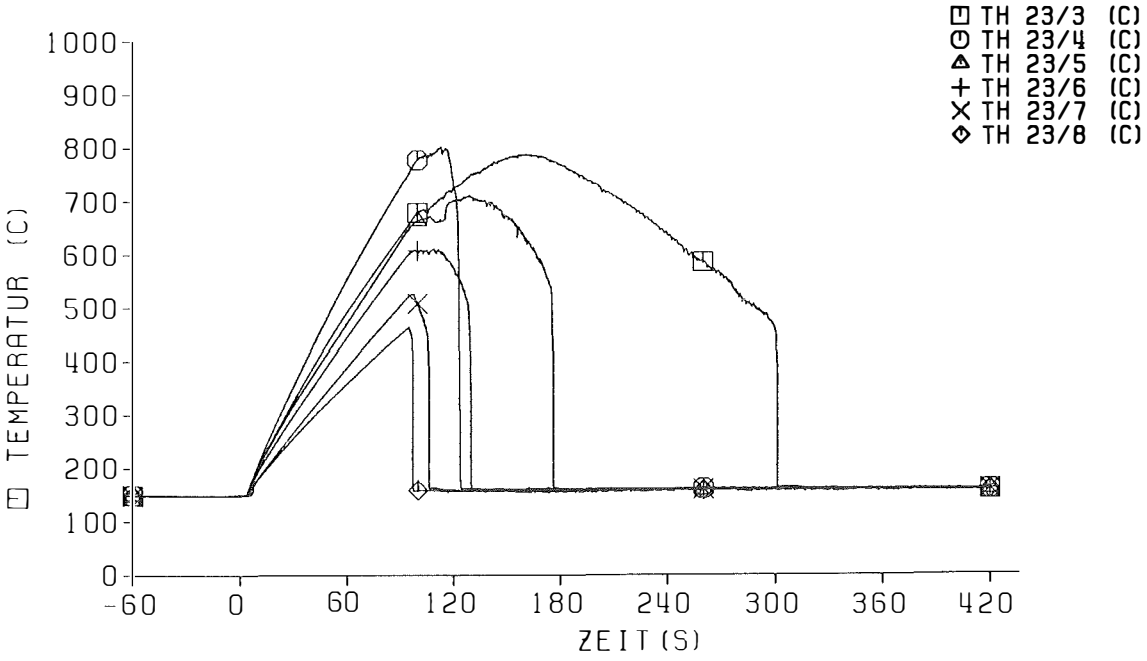

REBEKA 5
Abb: 86 Druck- und Temperaturverlauf zwischen den mittleren Abstandshaltern von Stab 14




REBEKA 5
Abb: 87 Druck- und Temperaturverlauf zwischen den mittleren Abstandshaltern von Stab 46




REBEKA 5
Abb: 88 Axialer Temperaturverlauf Stab:48



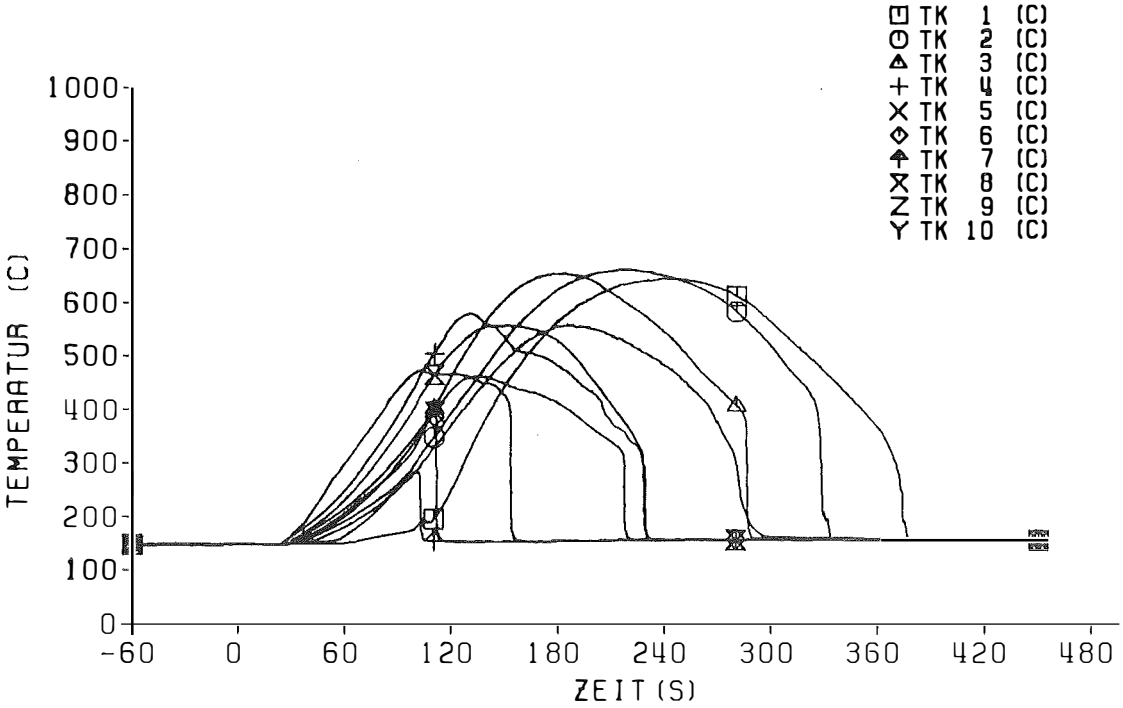

REBEKA 5
Abb: 89 Axialer Temperaturverlauf von Stab 23

3.6 Temperaturprofil am Bündelkasten (Abb. 90)

und

3.7 Fluidtemperaturen am Abstandshalter (AH)

- am AH 1 (Abb. 91)
- am AH 4 (Abb. 92)
- am AH 5 (Abb. 93)




REBEKA 5
Abb: 90 Temperaturprofil Bündel-Kasten

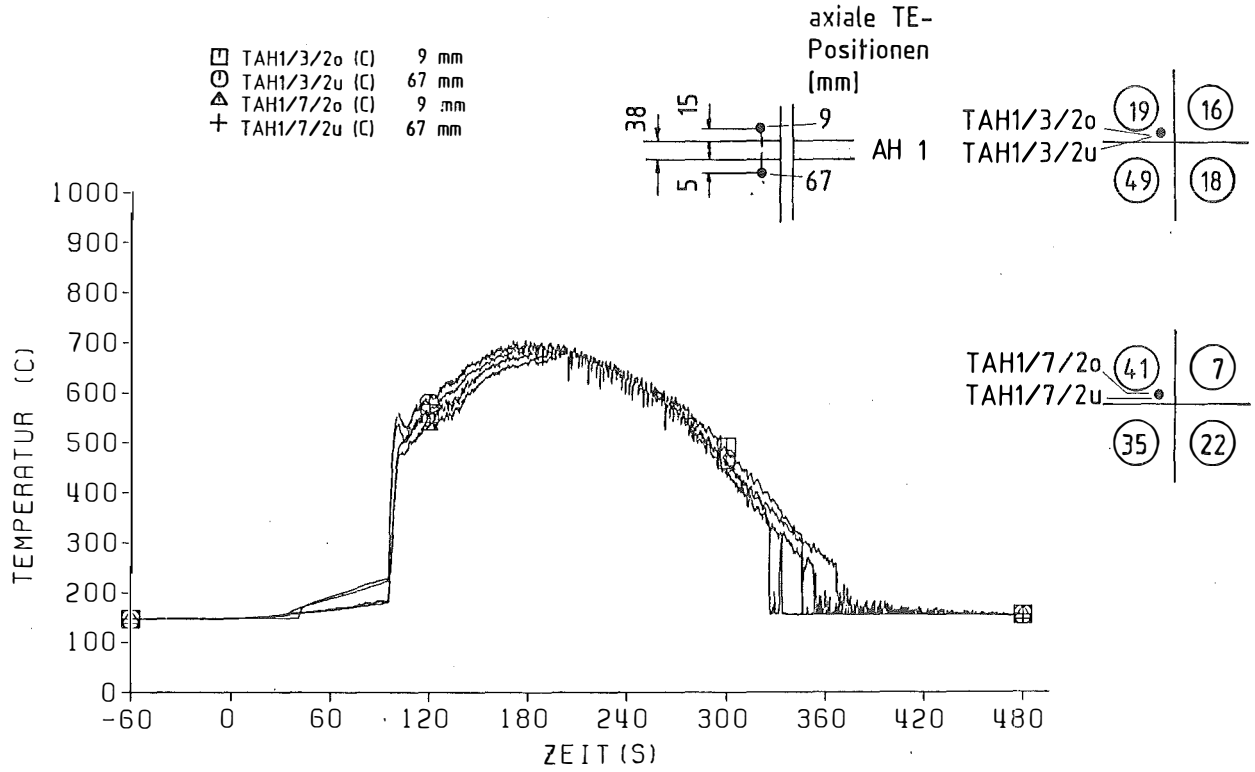



Abb. 91 REBEKA 5
Fluidtemperaturen am oberen Abstandshalter I

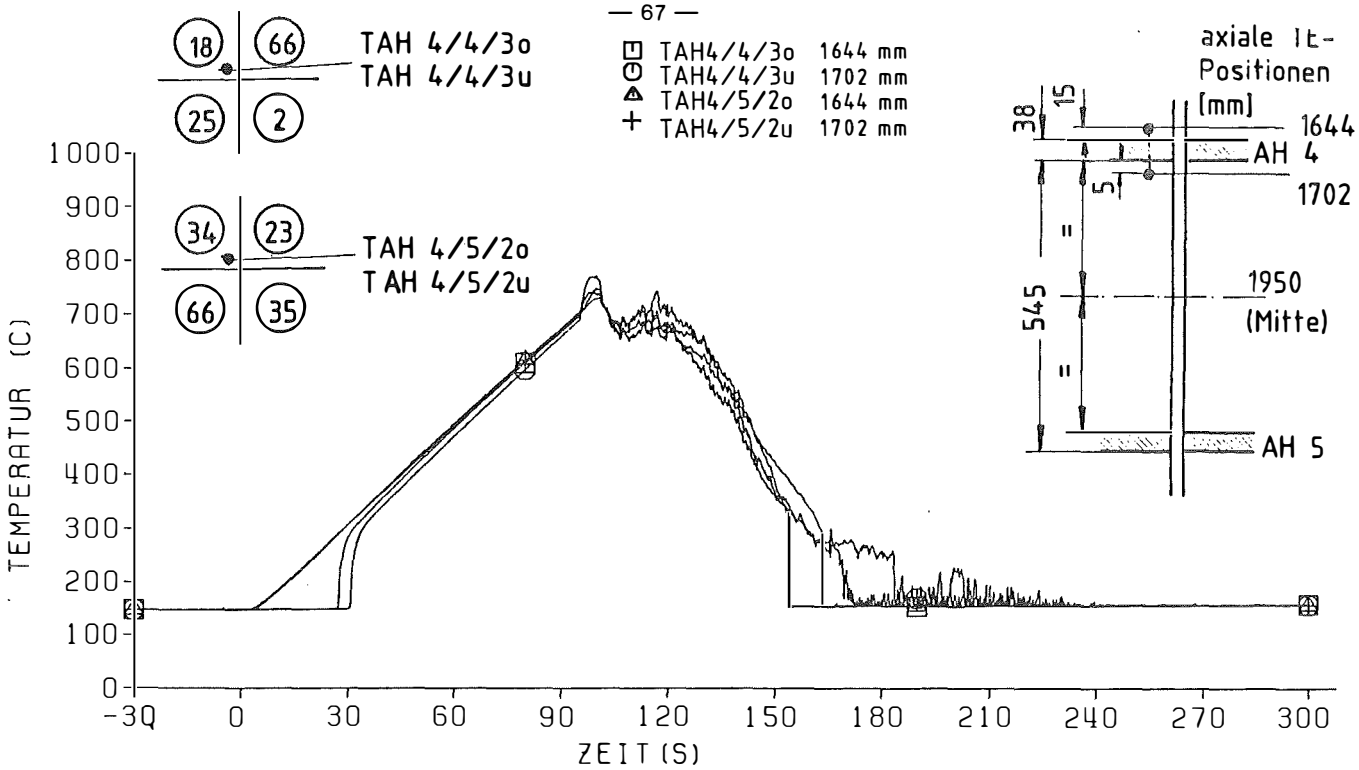



Abb. 92 REBEKA 5
Fluidtemperaturen am Abstandshalter IV

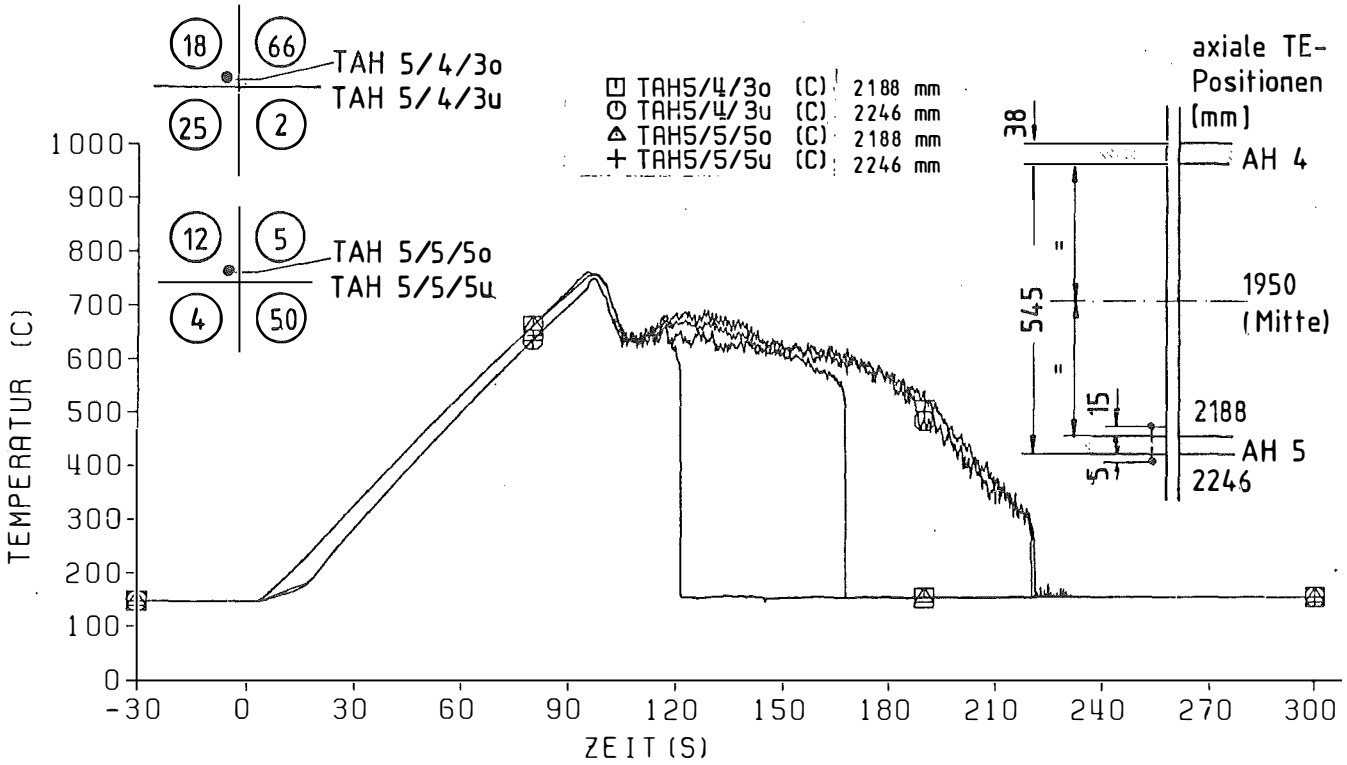



Abb. 93 REBEKA 5
Fluidtemperaturen am Abstandshalter V

## 3.8 Umfangsdehnungen der Zircaloy-4-Hüllrohre aller 49 Brennstabsimulatoren und daraus resultierende Kühlkanalversperrung

Nach Entfernen des Bündelkastens werden die Brennstabsimultoren bezüglich ihrer Position im Abstandshaltergitter, bzw. im Bündelverband markiert und die Abstandshalterbleche demontiert.

Die Umfangsdehnung der einzelnen Stäbe wird durch Messung des Durchmessers oder des Umfanges bestimmt. An axialen Stellen, an denen der Querschnitt der gedehnten Hüllrohre kreisförmig ist, wird der Mittelwert von zwei um 90 $^{o}$ versetzten Durchmessern herangezogen. An den Stellen, an denen das Hüllrohr gequetscht oder geborsten ist, wird der Umfang mittels eines Meßstreifens ausgemessen.

An den Öffnungen der Berststellen zählt dabei der Umfang von Berstlippe zu Berstlippe unter Aussparung der Öffnung.

Aus den Umfangsdehnungen der einzelnen Hüllen wird nach H.J. Neitzel /2/ die Kühlkanalversperrung im Stabbündel berechnet.

| | | |
|---|---|---|
| 3.8.1 | Berstdehnungen und Berstlagen | (Abb. 94) |
| 3.8.2 | Umfangsdehnungsprofile | |
| | - aller Hüllrohre einzeln | (Abbn. 95-143) |
| | - aller 49 Hüllrohre zusammen | (Abb. 144) |
| | - der Hüllrohre der 25 Innenstäbe | (Abb. 145) |
| | - der Hüllrohre der 9 innersten Stäbe | (Abb. 146) |

### 3.8.3 Kühlkanalversperrungen

Die Kühlkanalversperrungsprofile durch 49, 25, bzw. 9 Zircaloy-4-Hüllen werden dargestellt (Abbn. 147 - 149).

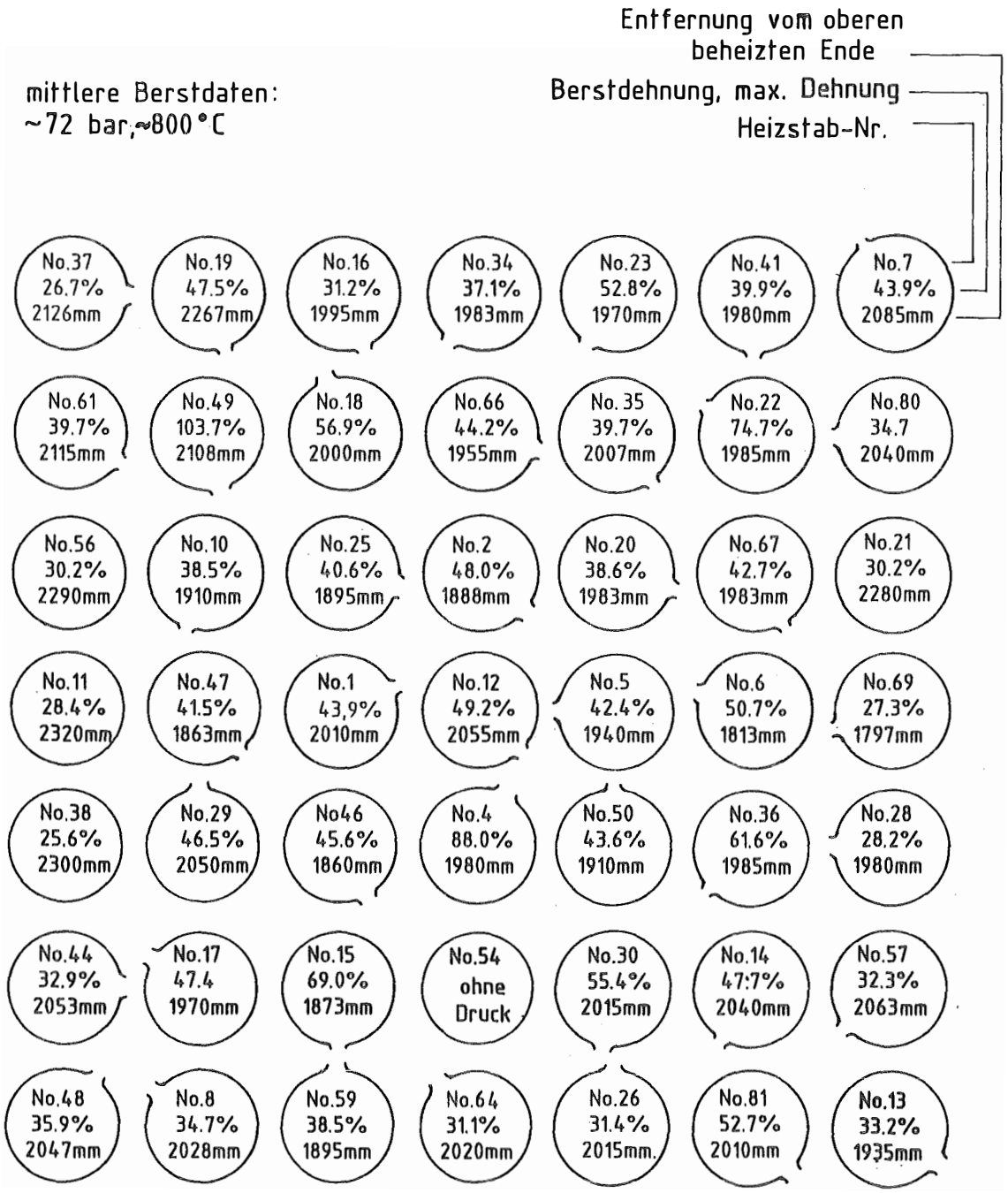
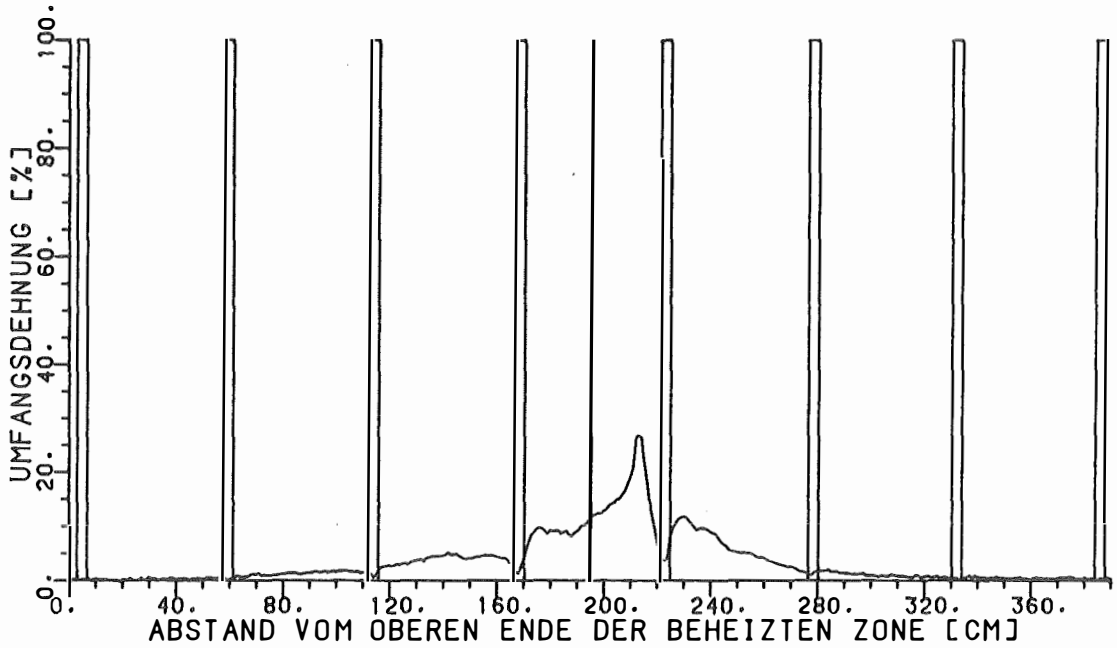
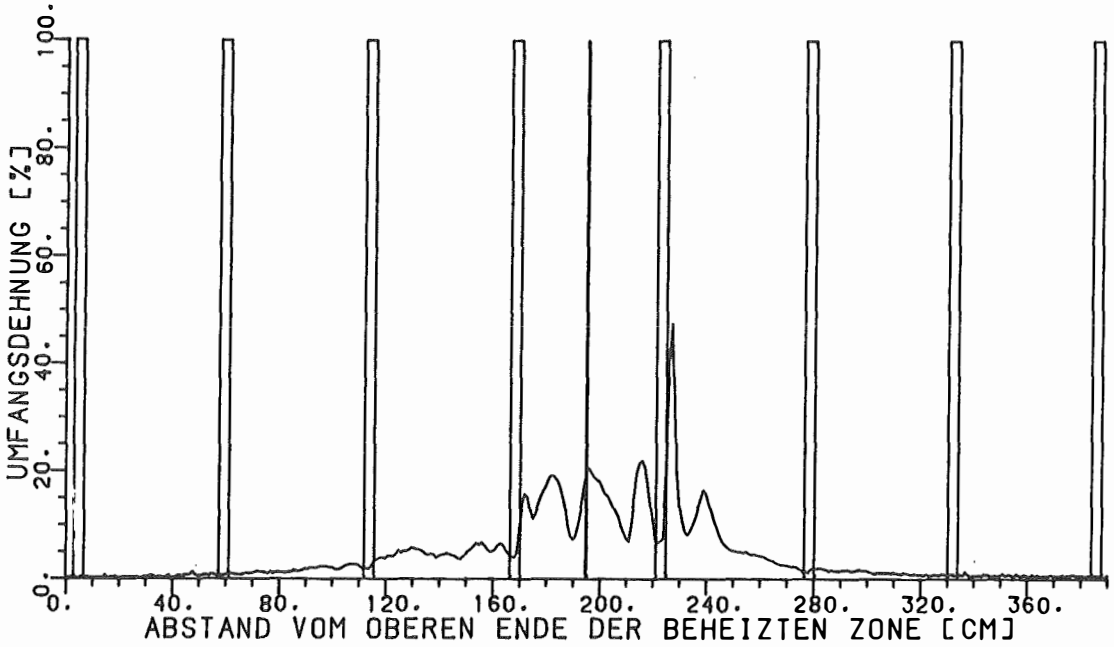



Abb. 94 REBEKA 5

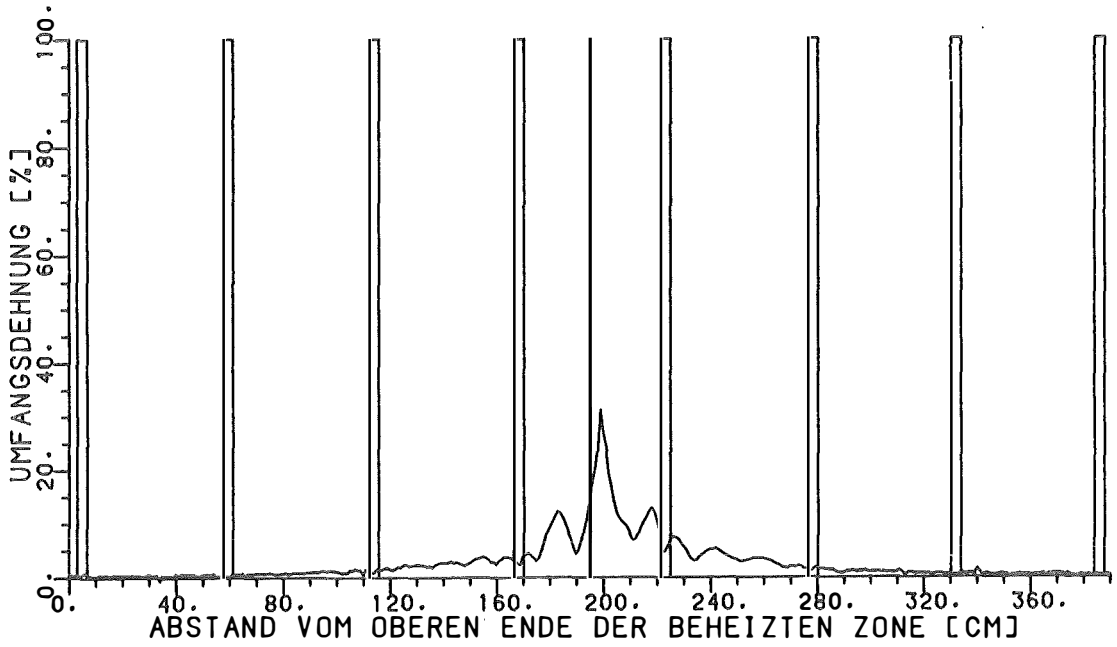
Berstdehnungen und Berstlagen



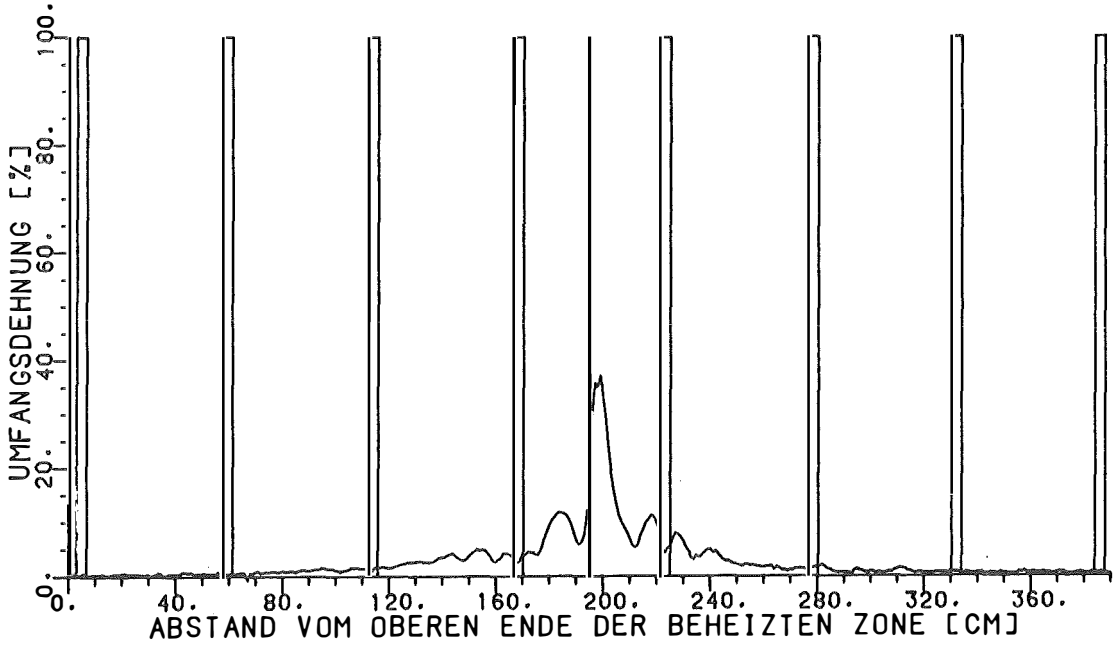

REBEKA 5
Abb: 95 Dehnungsprofil von Stab: 37



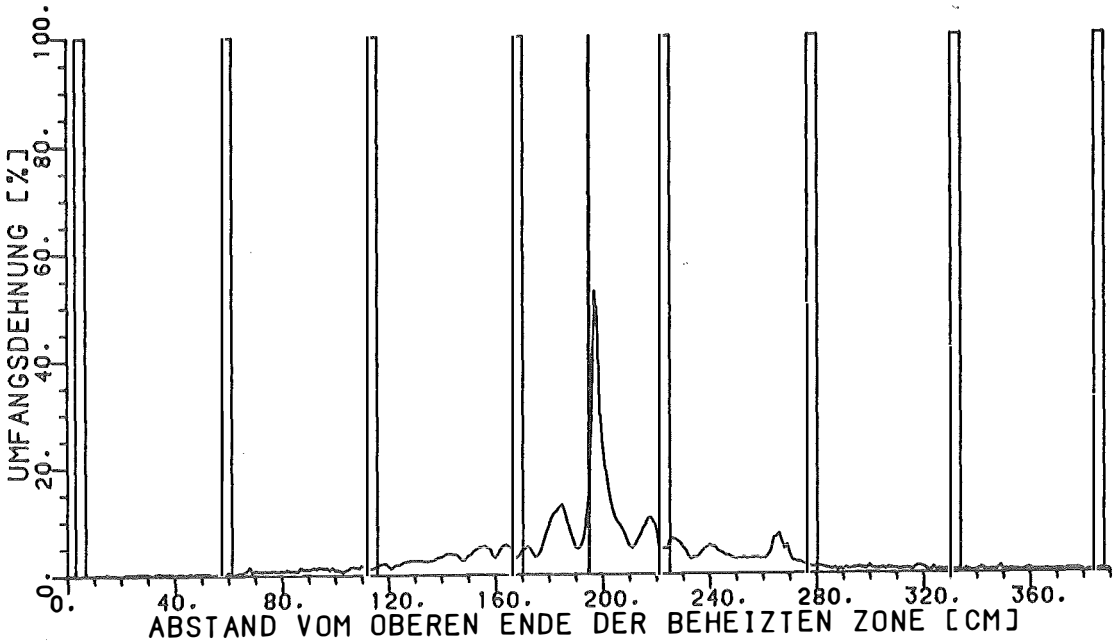

REBEKA 5
Abb: 96 Dehnungsprofil von Stab: 19



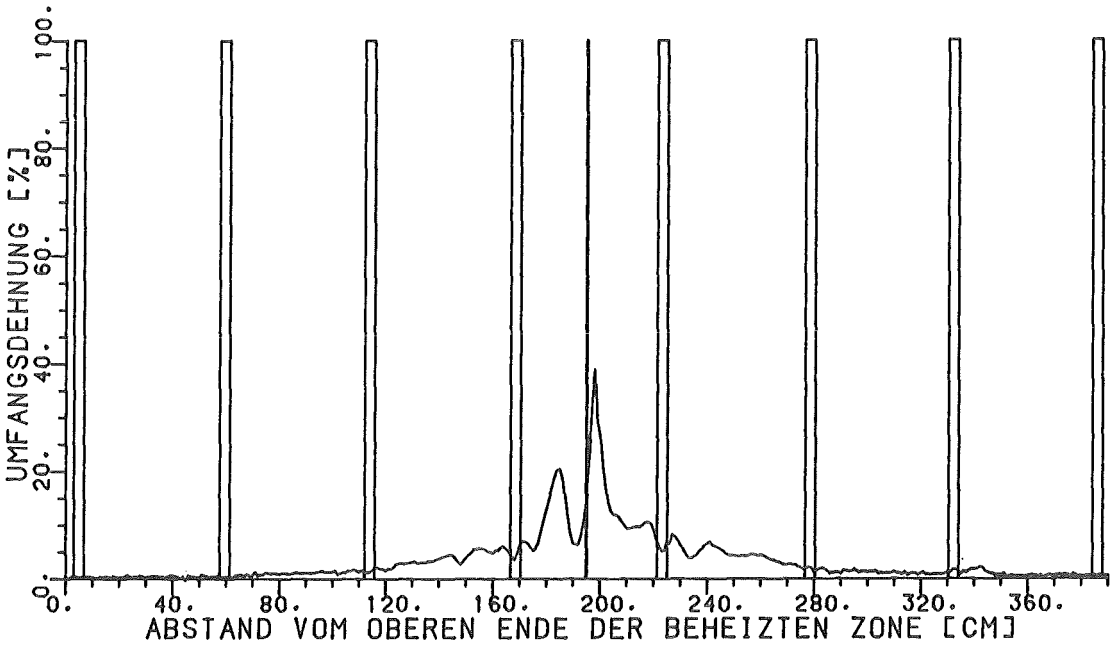

REBEKA 5
Abb: 97 Dehnungsprofil von Stab: 16



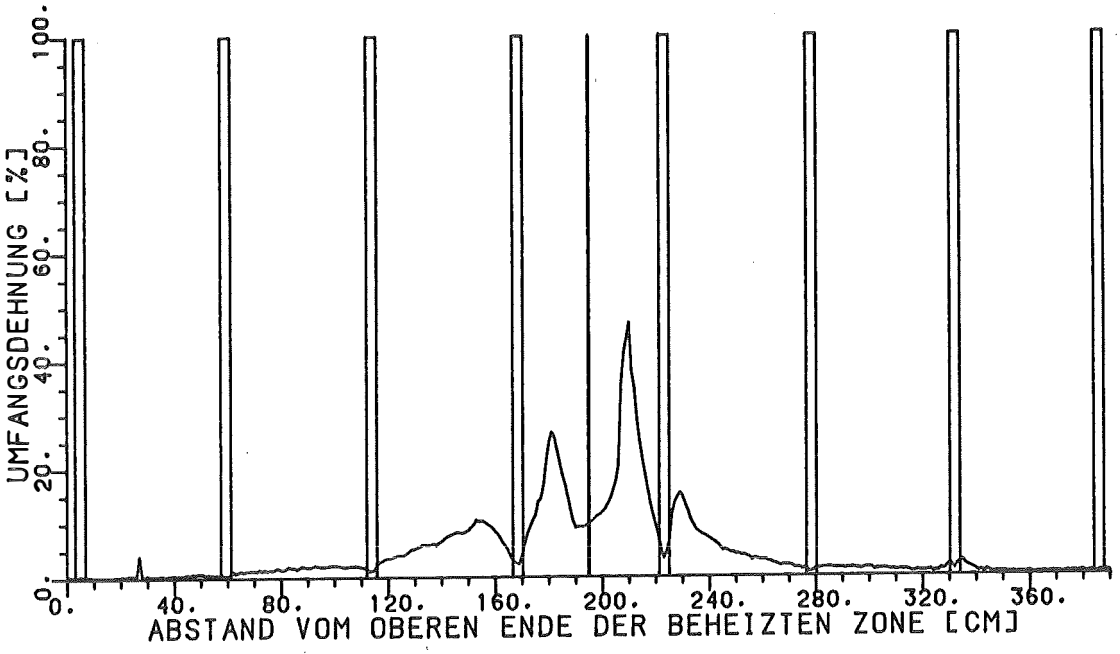

REBEKA 5
Abb: 98 Dehnungsprofil von Stab: 34



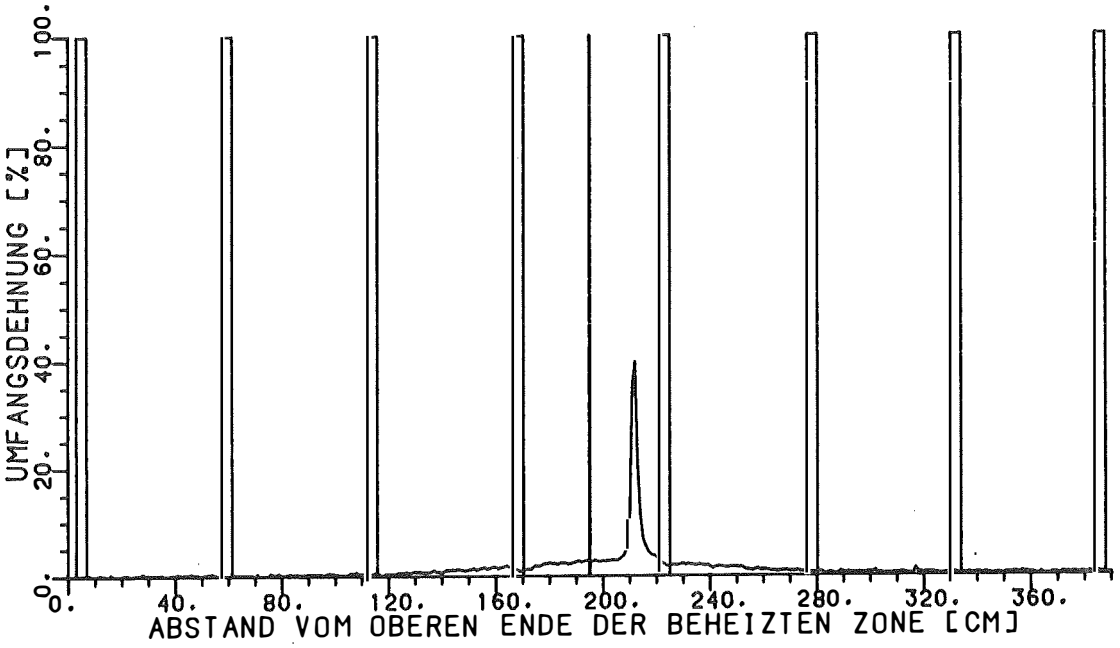

REBEKA 5
Abb: 99 Dehnungsprofil von Stab: 23



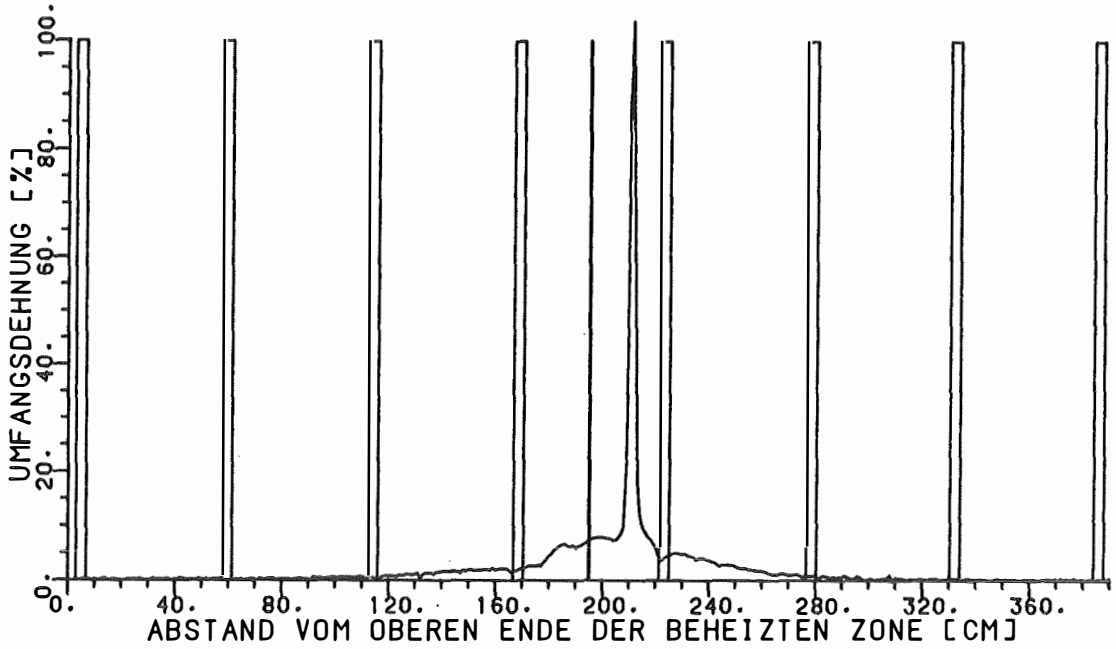

REBEKA 5
Abb: 100 Dehnungsprofil von Stab: 41



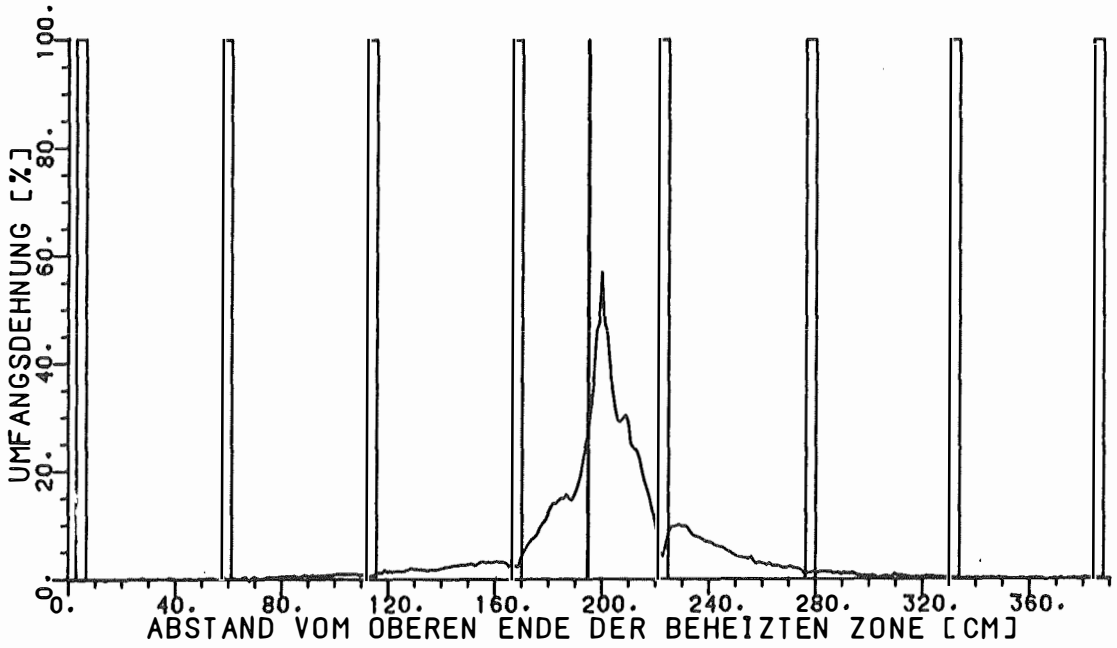

REBEKA 5
Abb: 101 Dehnungsprofil von Stab: 7



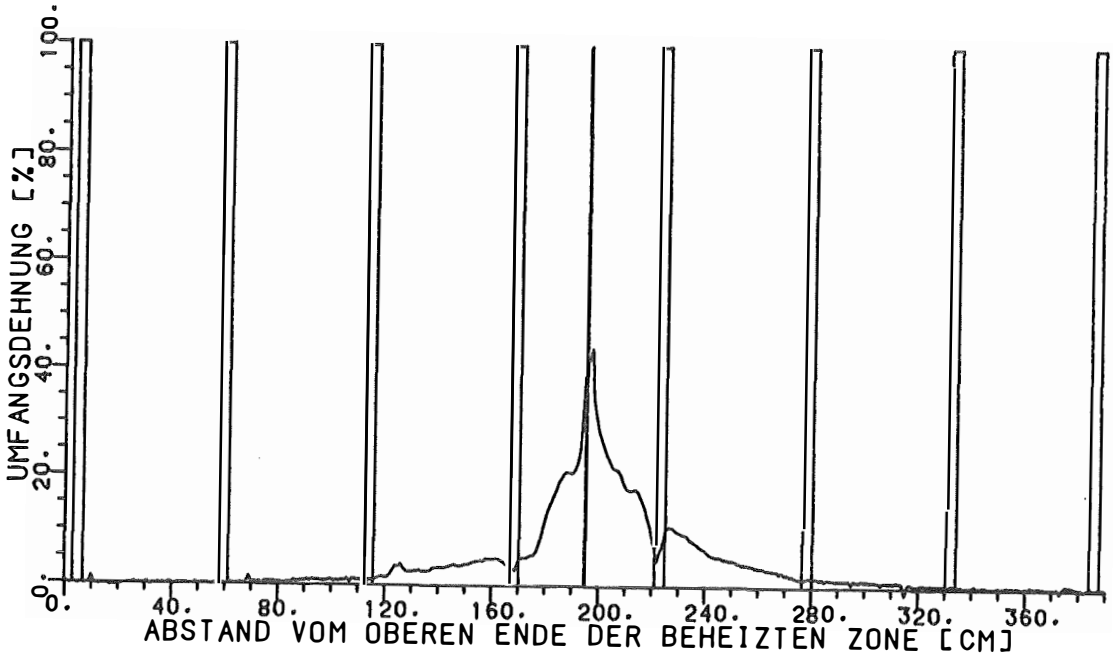

REBEKA 5
Abb: 102 Dehnungsprofil von Stab: 61



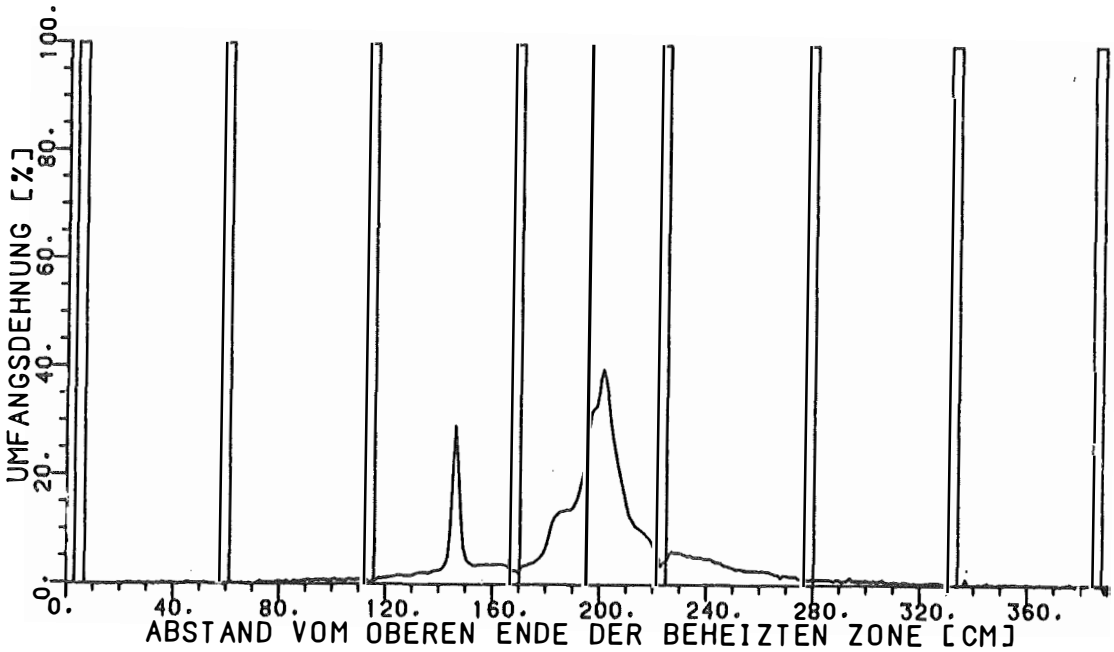

REBEKA 5
Abb: 103 Dehnungsprofil von Stab: 49



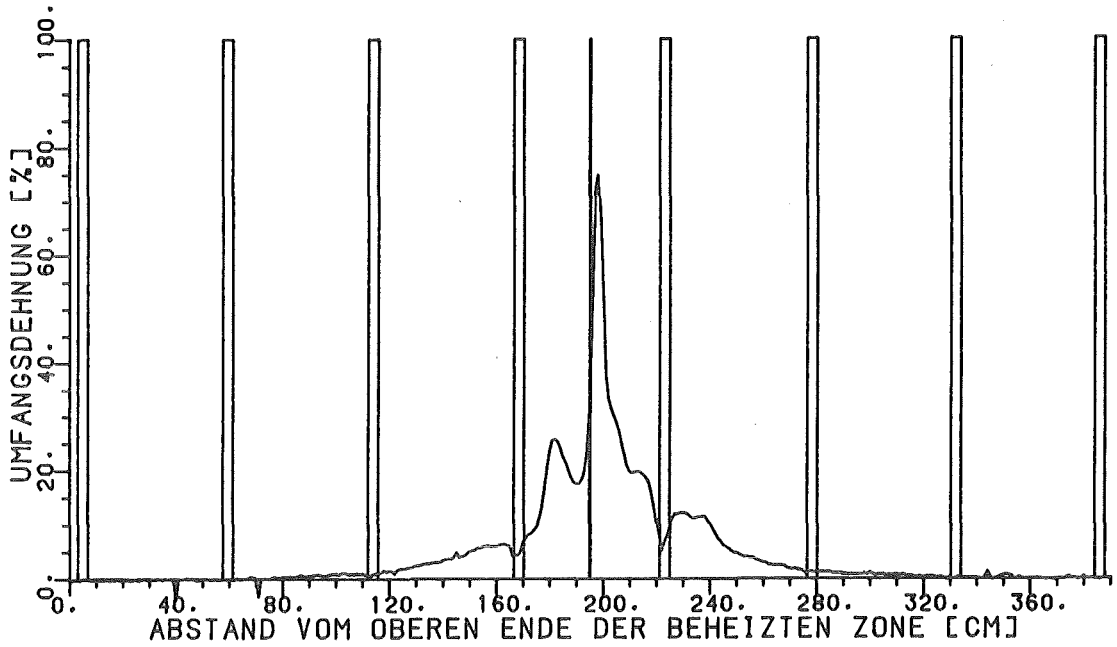

REBEKA 5
Abb: 104 Dehnungsprofil von Stab: 18



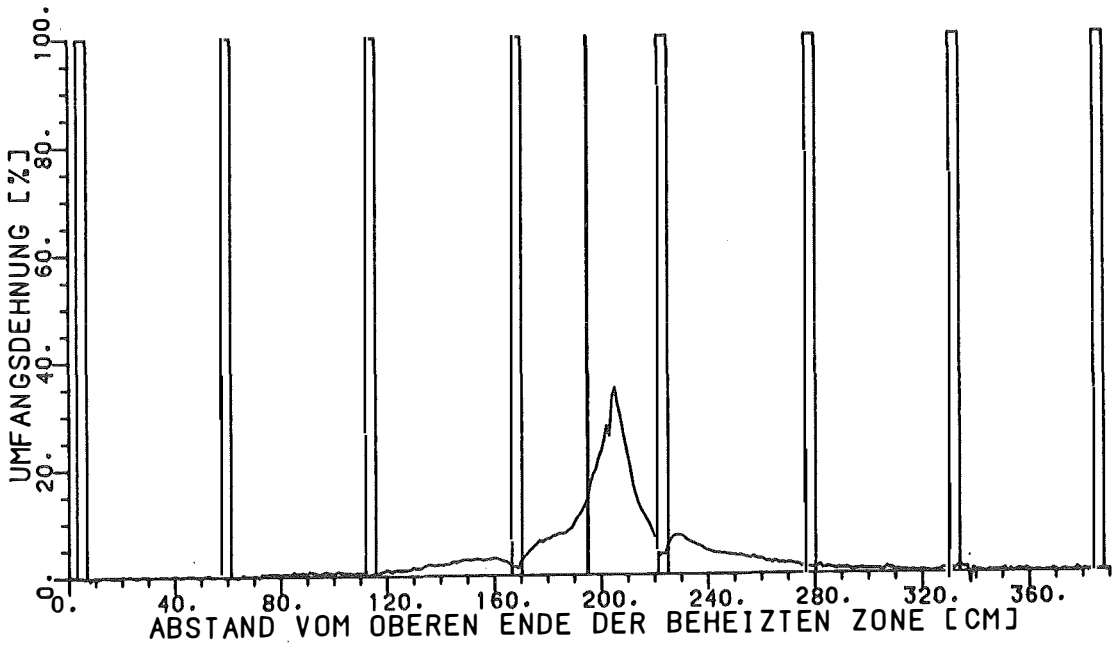

REBEKA 5
Abb: 105 Dehnungsprofil von Stab: 66



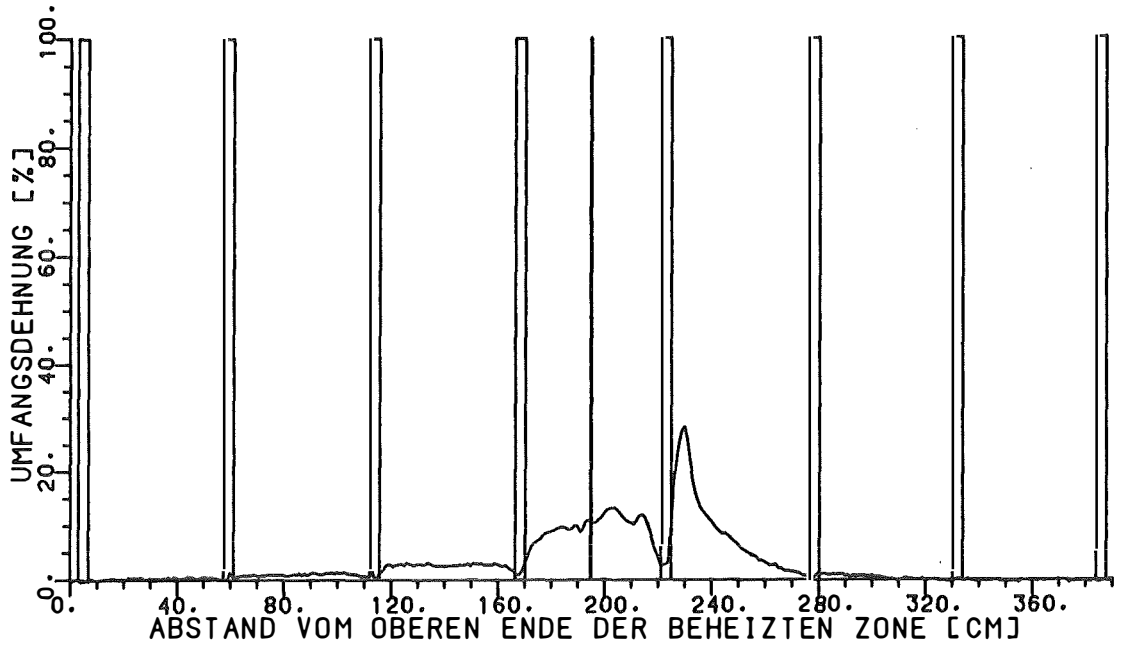

REBEKA 5
Abb: 106 Dehnungsprofil von Stab: 35



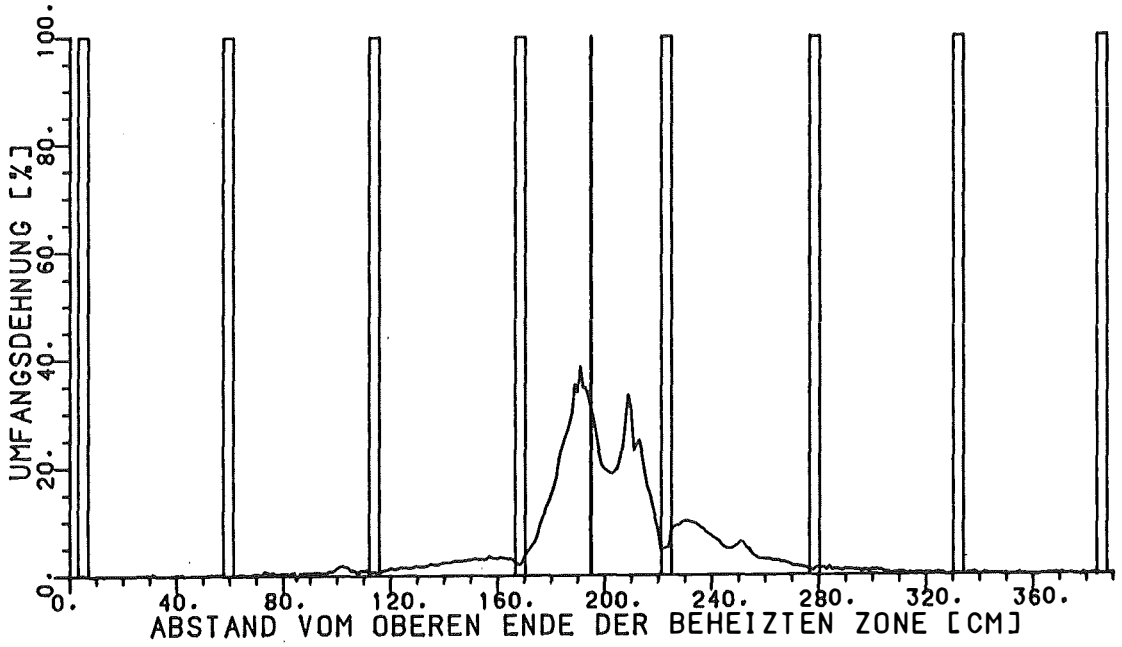

REBEKA 5
Abb: 107 Dehnungsprofil von Stab: 22



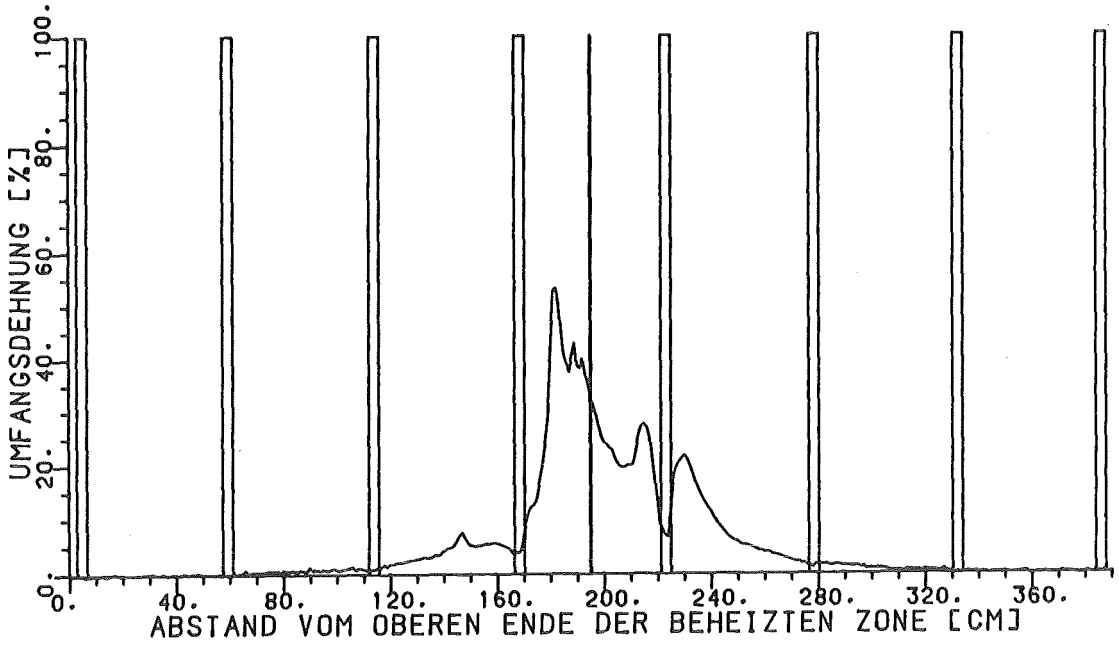

REBEKA 5
Abb: 108 Dehnungsprofil von Stab: 80



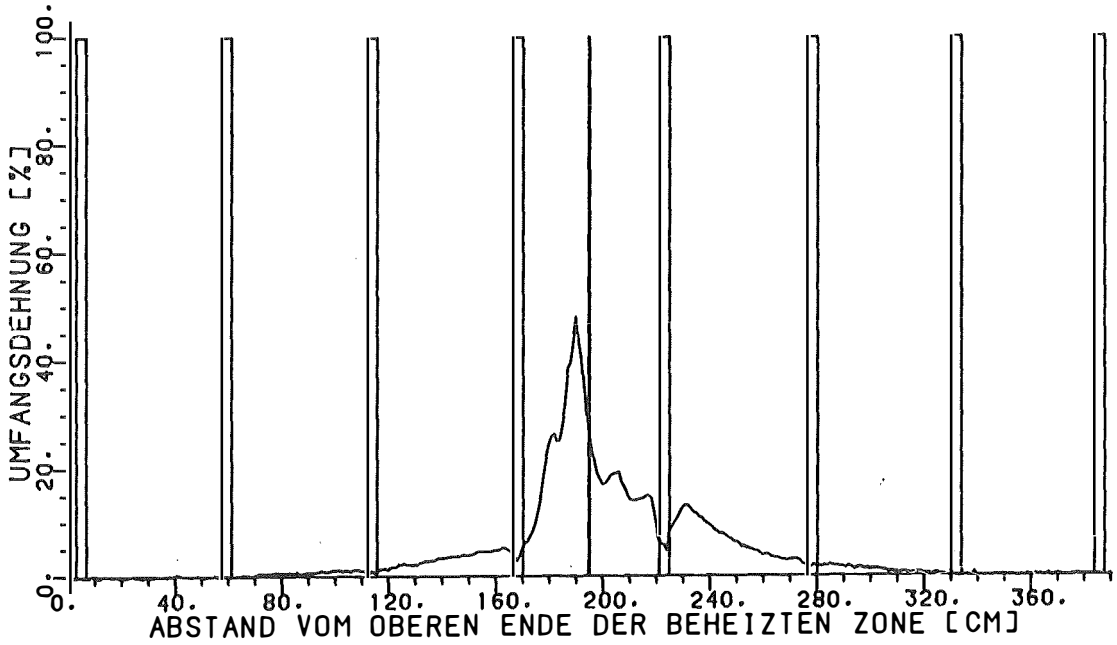

REBEKA 5
Abb: 109 Dehnungsprofil von Stab: 56



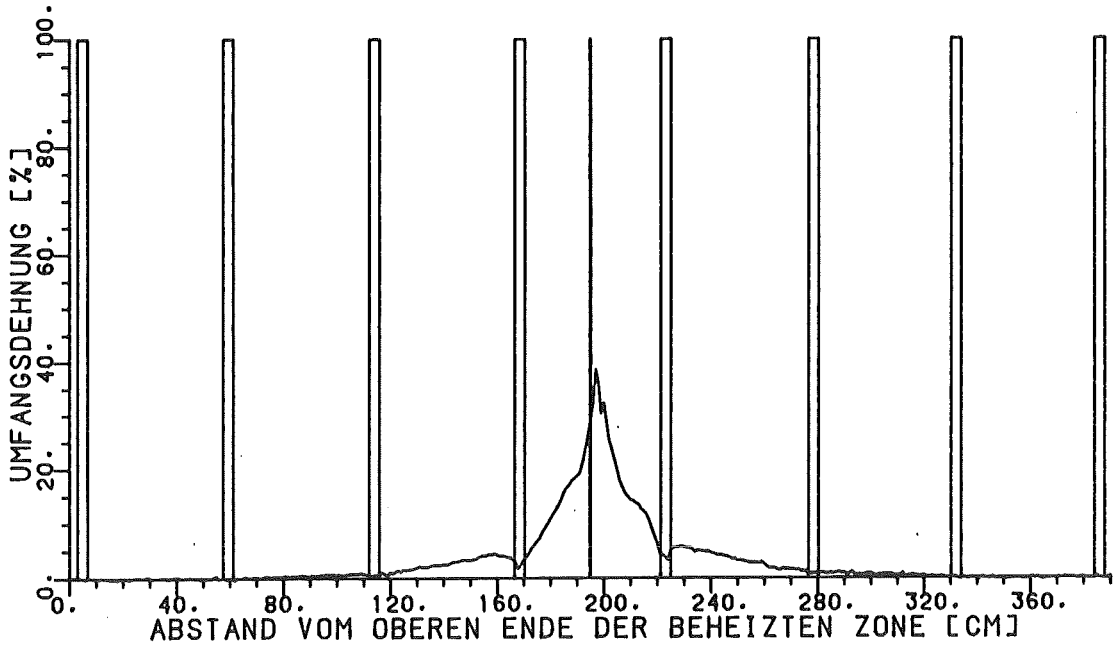

REBEKA 5
Abb: 110 Dehnungsprofil von Stab: 10



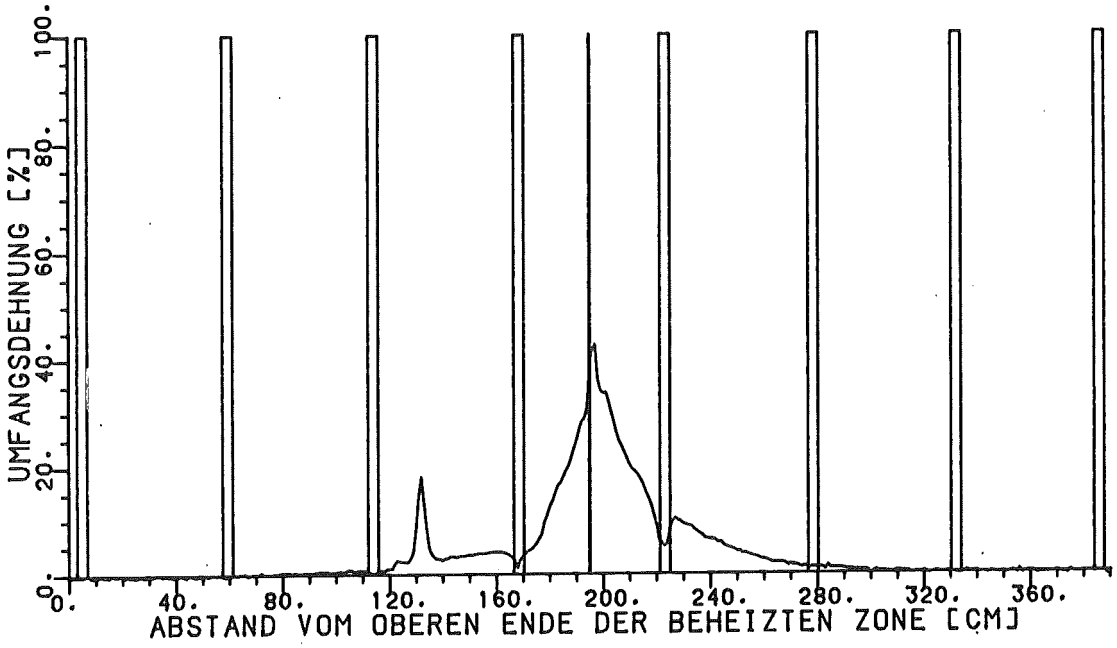

REBEKA 5
Abb: 111 Dehnungsprofil von Stab: 25



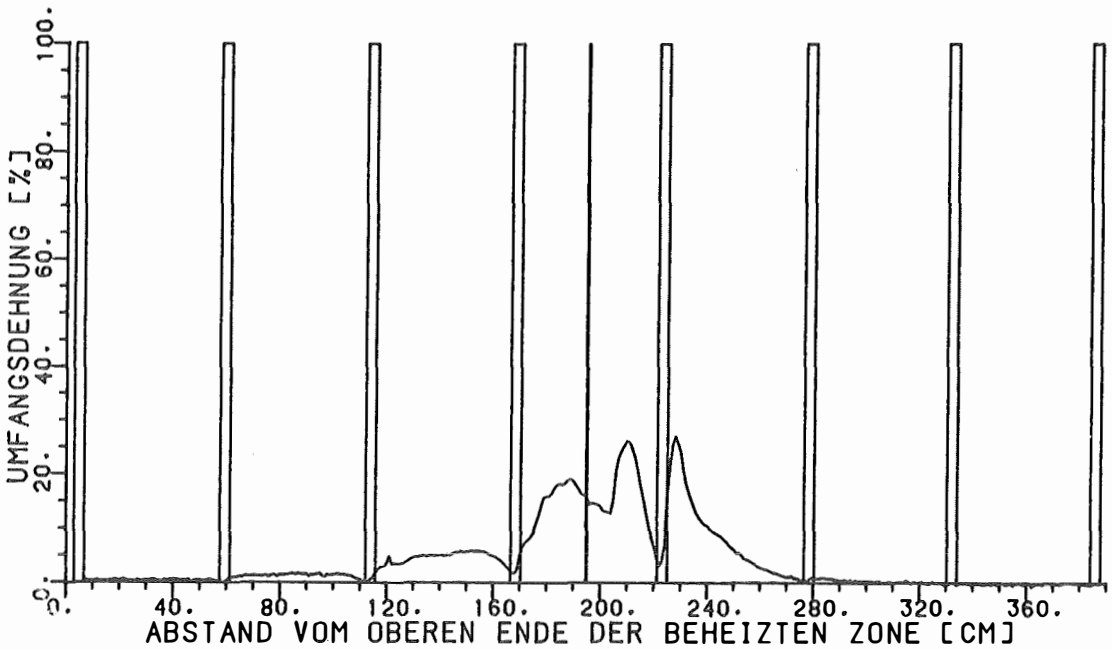

REBEKA 5
Abb: 112 Dehnungsprofil von Stab: 2



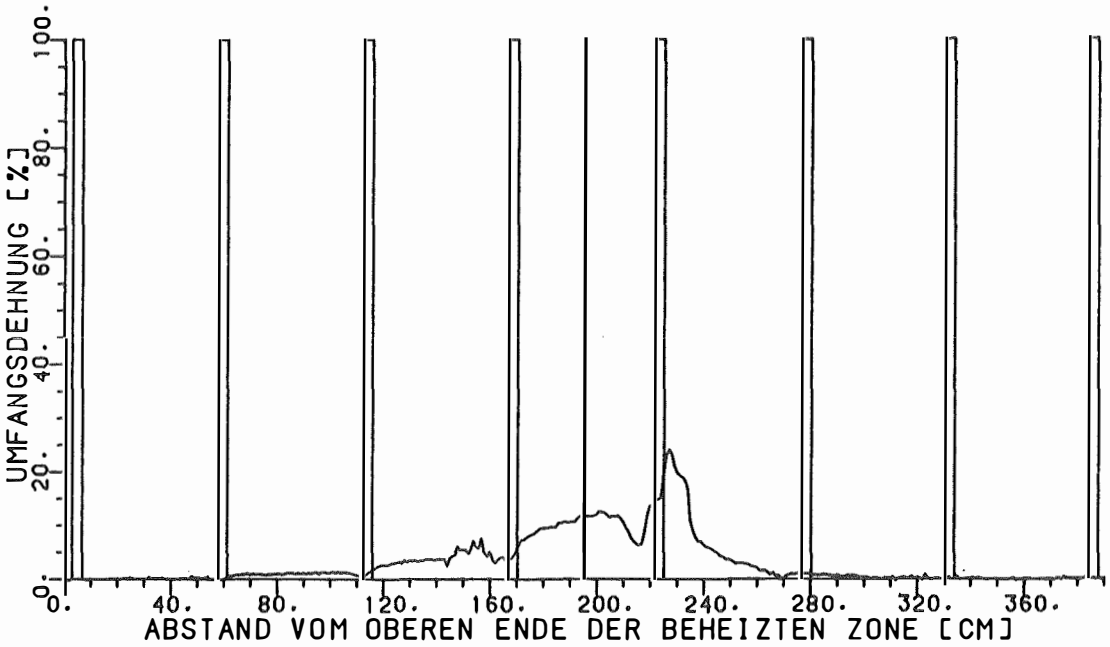

REBEKA 5
Abb: 113 Dehnungsprofil von Stab: 20



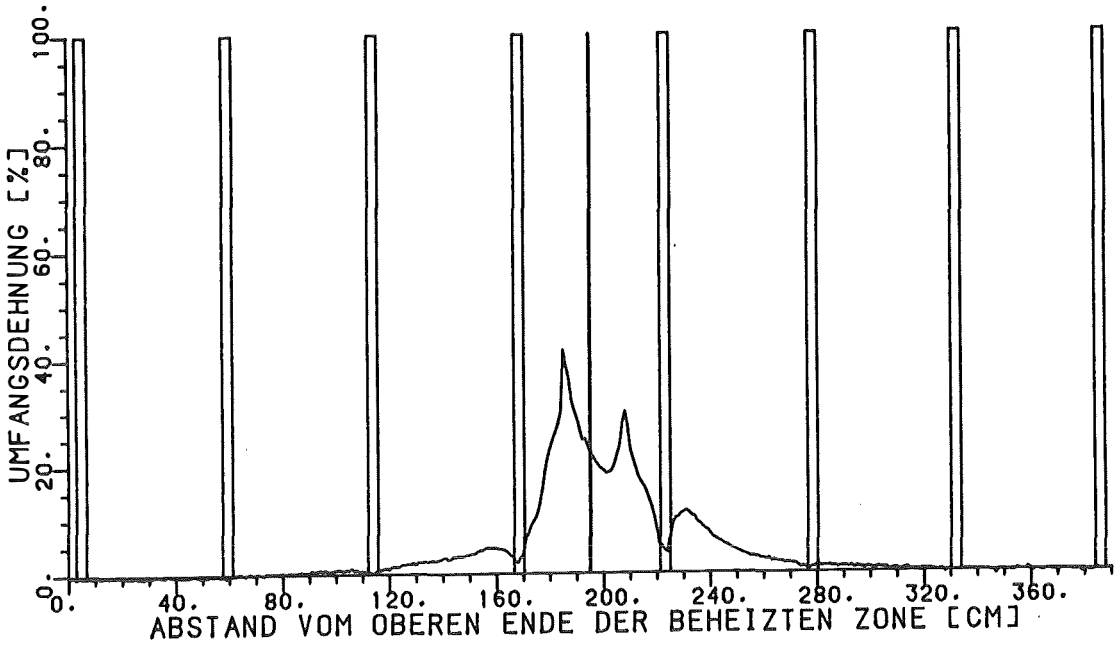

REBEKA 5
Abb: 114 Dehnungsprofil von Stab: 67



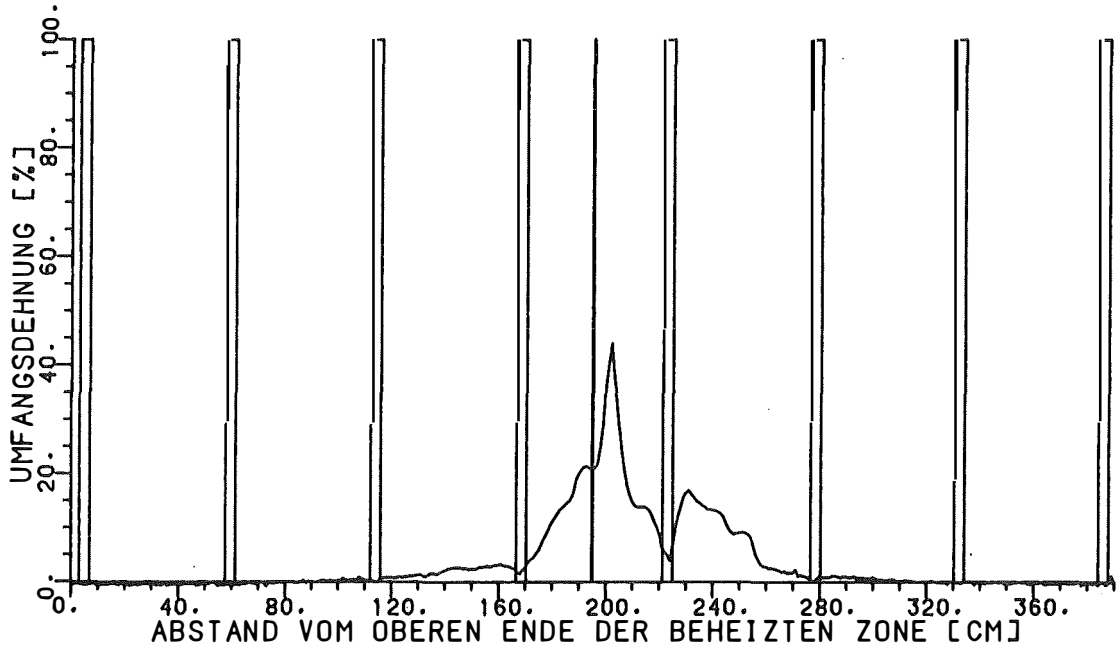

REBEKA 5
Abb: 115 Dehnungsprofil von Stab: 21



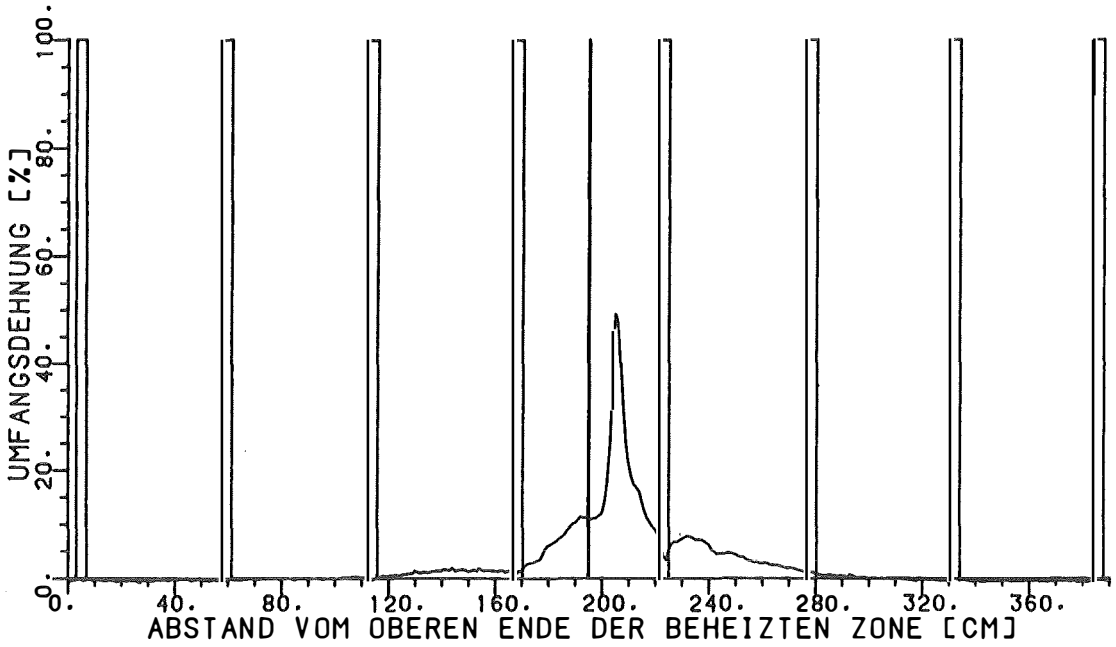

REBEKA 5
Abb: 116 Dehnungsprofil von Stab: 11



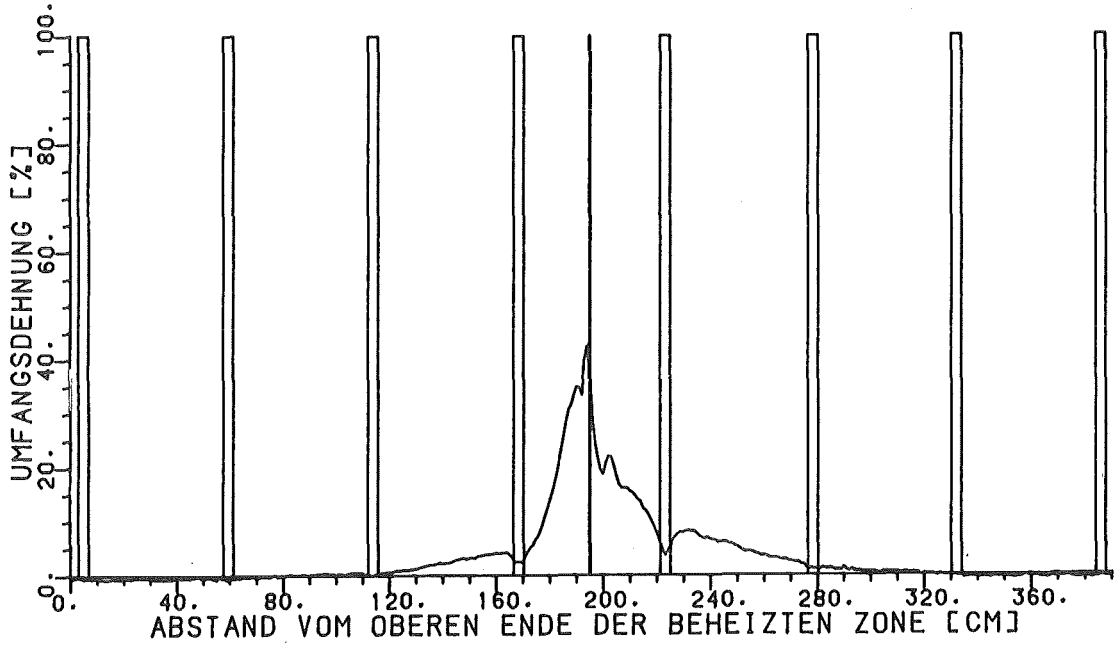

REBEKA 5
Abb: 117 Dehnungsprofil von Stab: 47



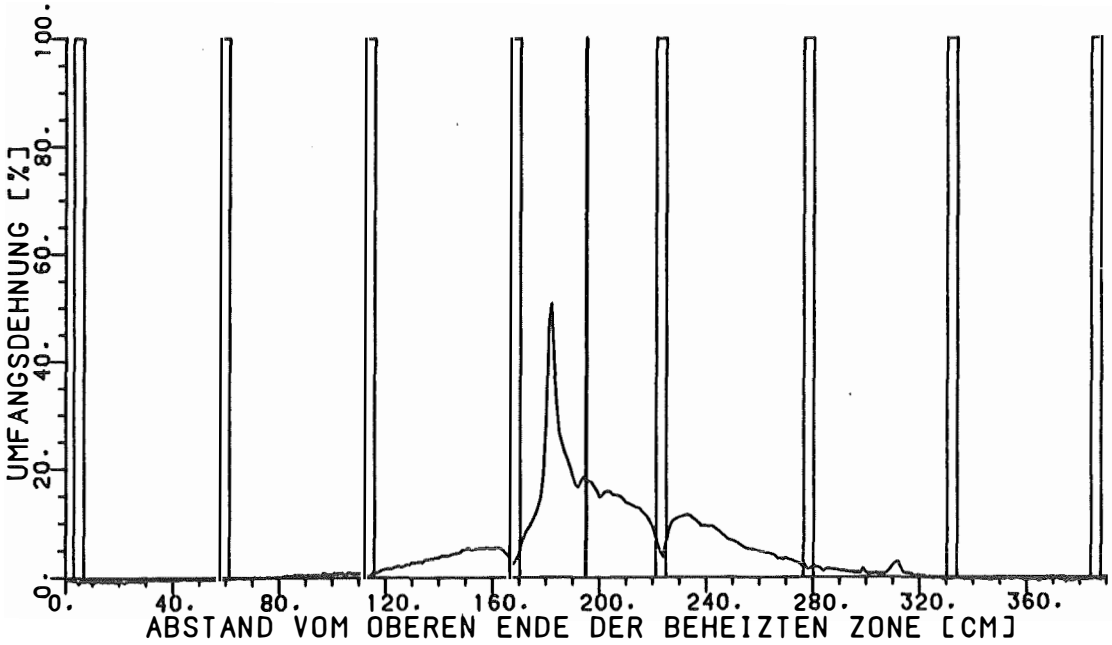

REBEKA 5
Abb: 118 Dehnungsprofil von Stab: 1



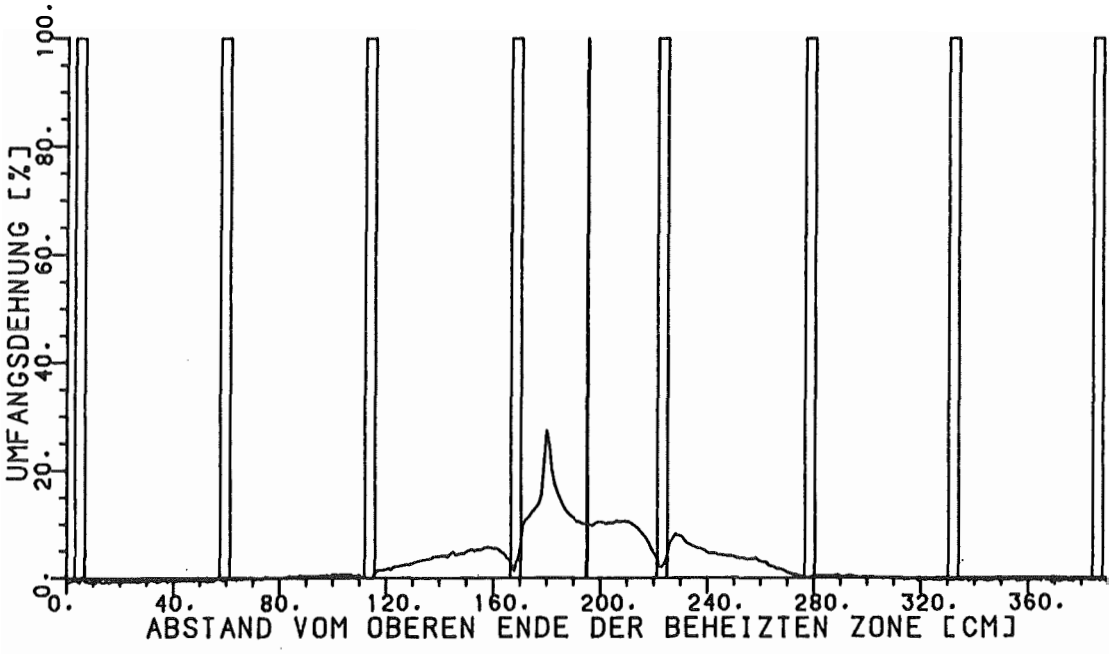

REBEKA 5
Abb: 119 Dehnungsprofil von Stab: 12



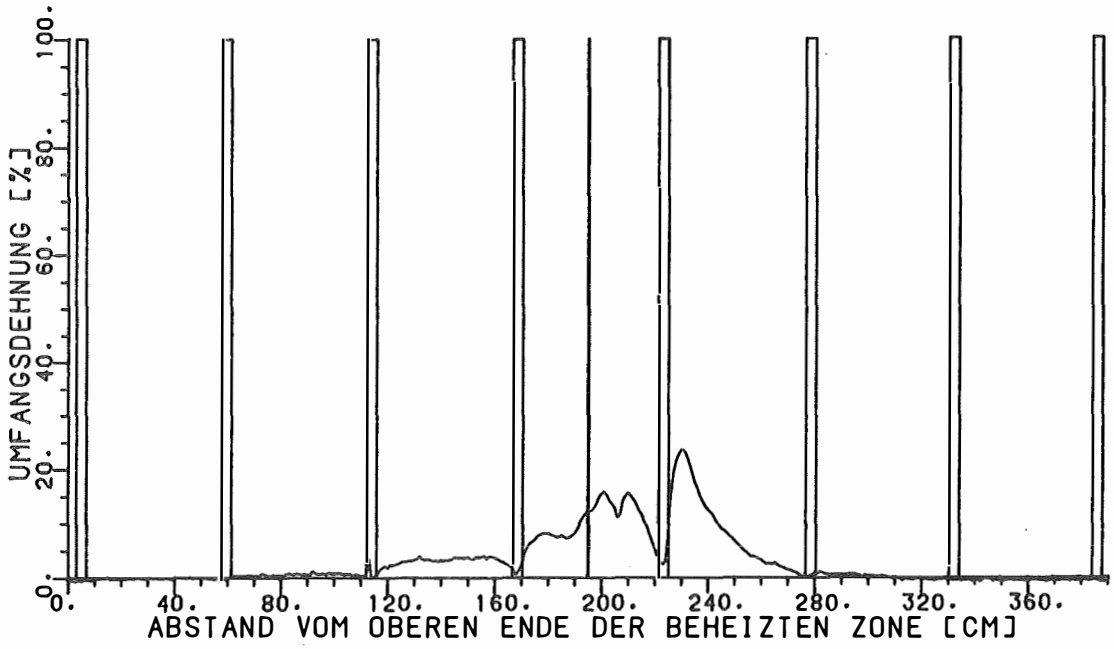

REBEKA 5
Abb: 120 Dehnungsprofil von Stab: 5



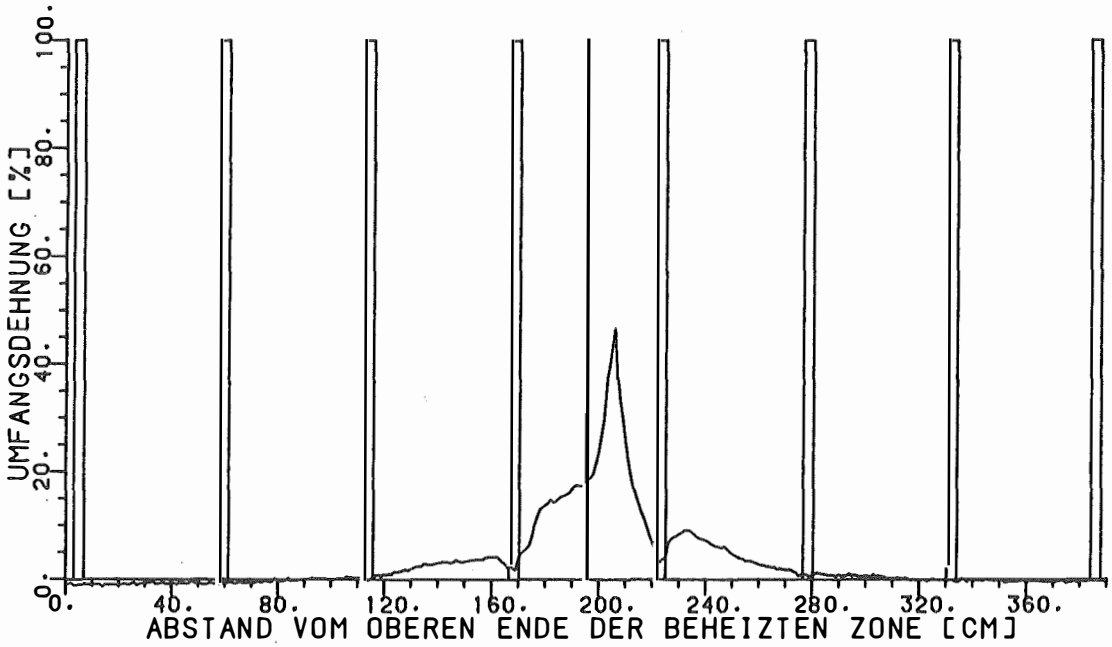

REBEKA 5
Abb: 121 Dehnungsprofil von Stab: 6



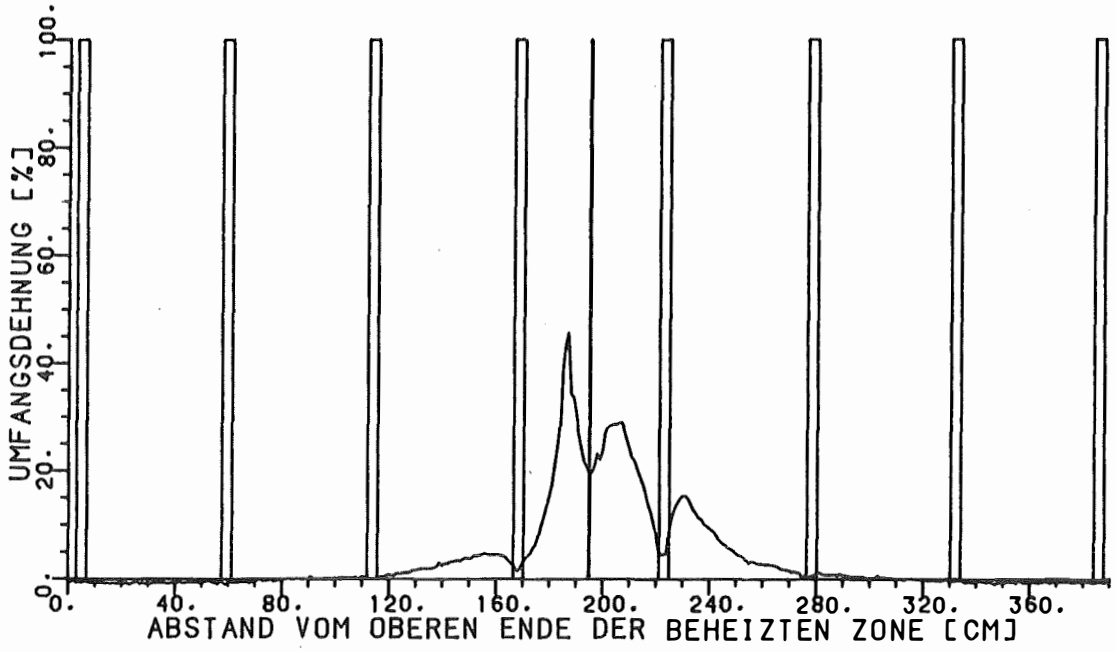

REBEKA 5
Abb: 122 Dehnungsprofil von Stab: 69



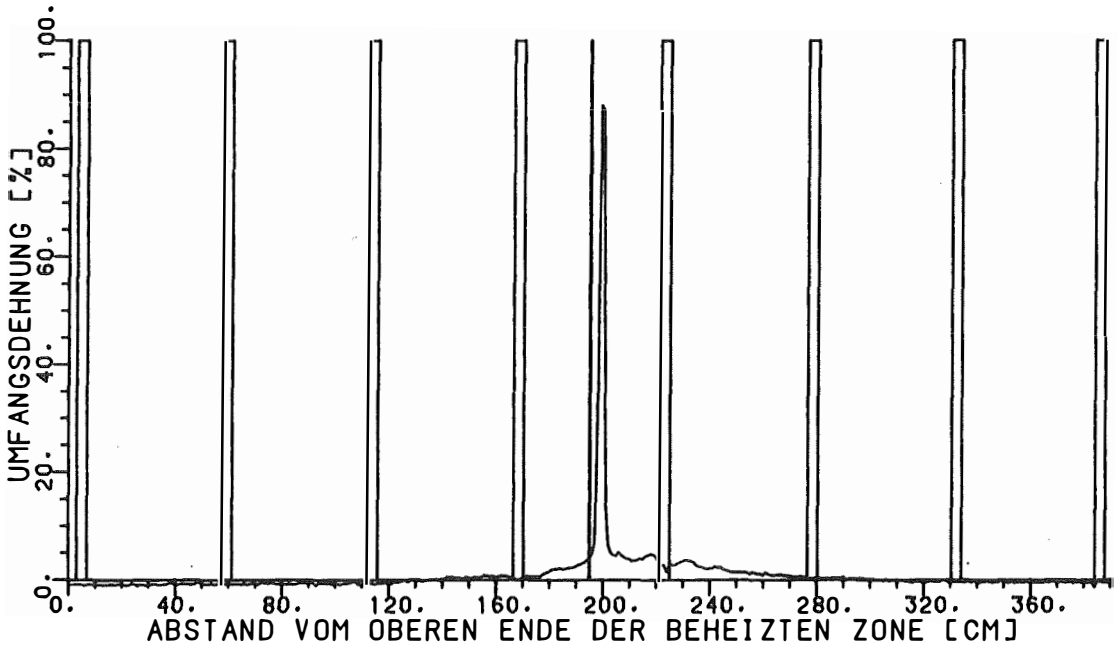

REBEKA 5
Abb: 123 Dehnungsprofil von Stab: 38



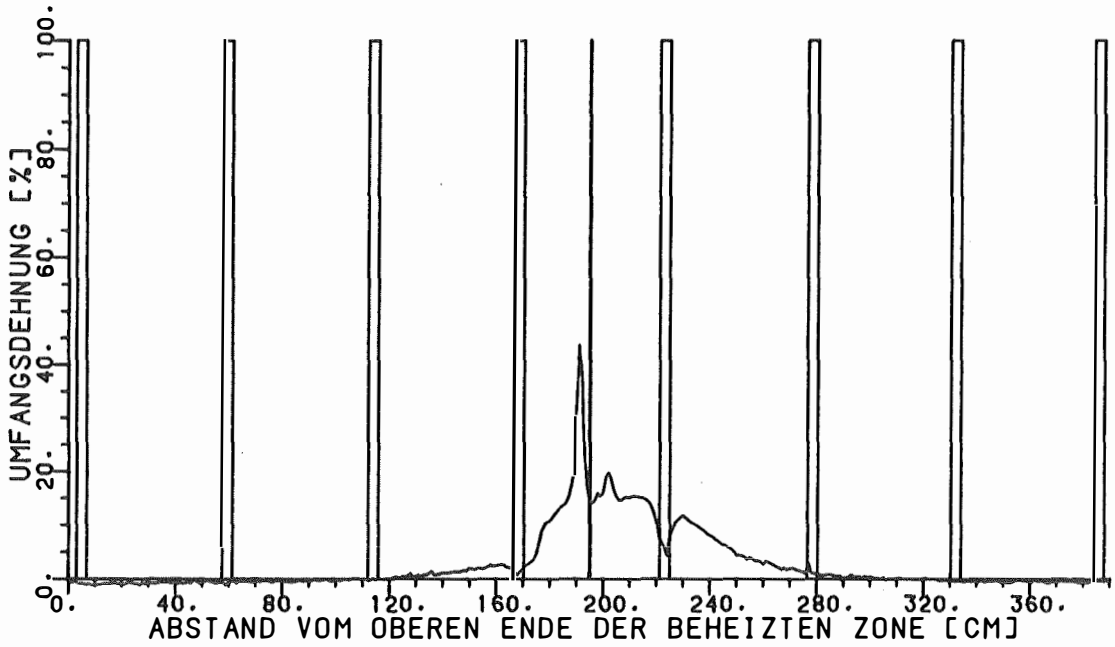

REBEKA 5
Abb: 124 Dehnungsprofil von Stab: 29



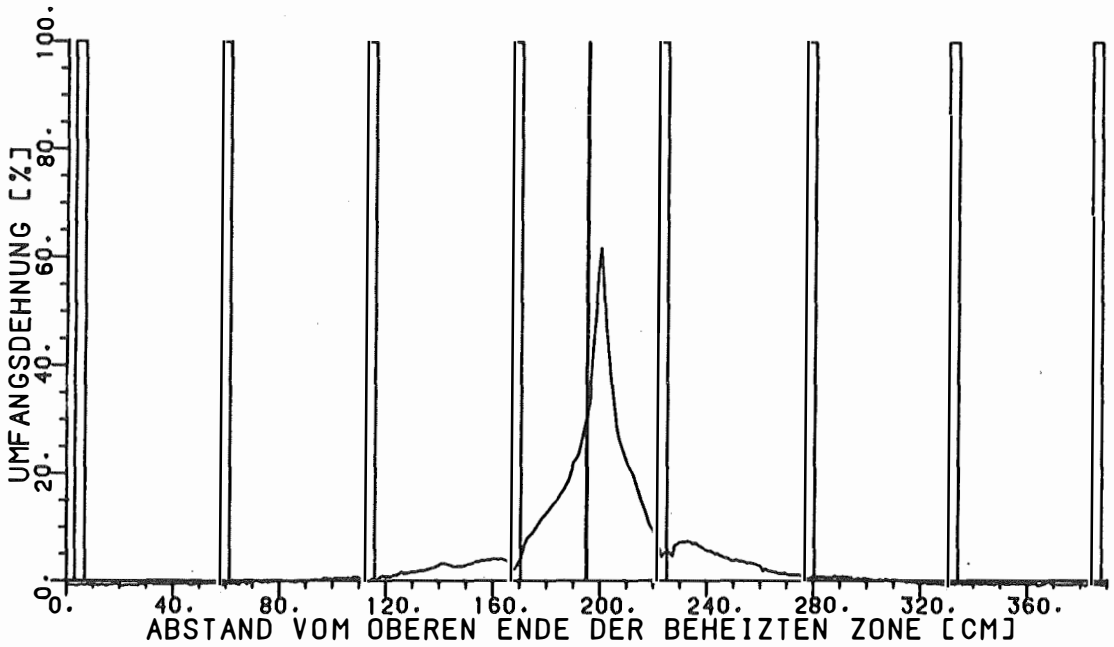

REBEKA 5
Abb: 125 Dehnungsprofil von Stab: 46



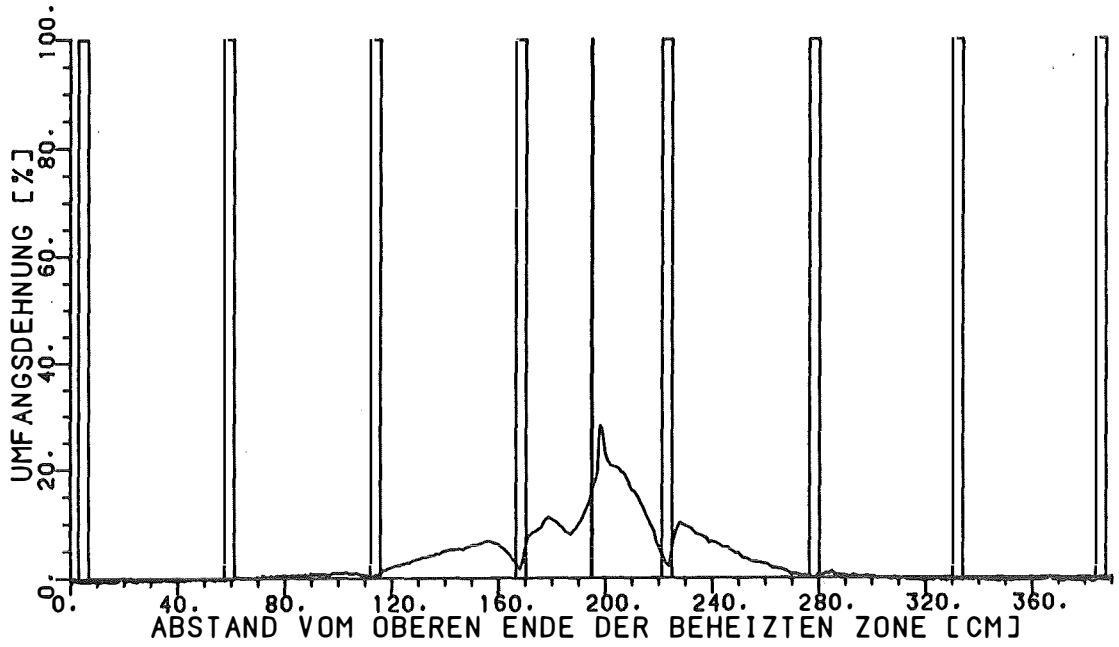

REBEKA 5
Abb: 126 Dehnungsprofil von Stab: 4



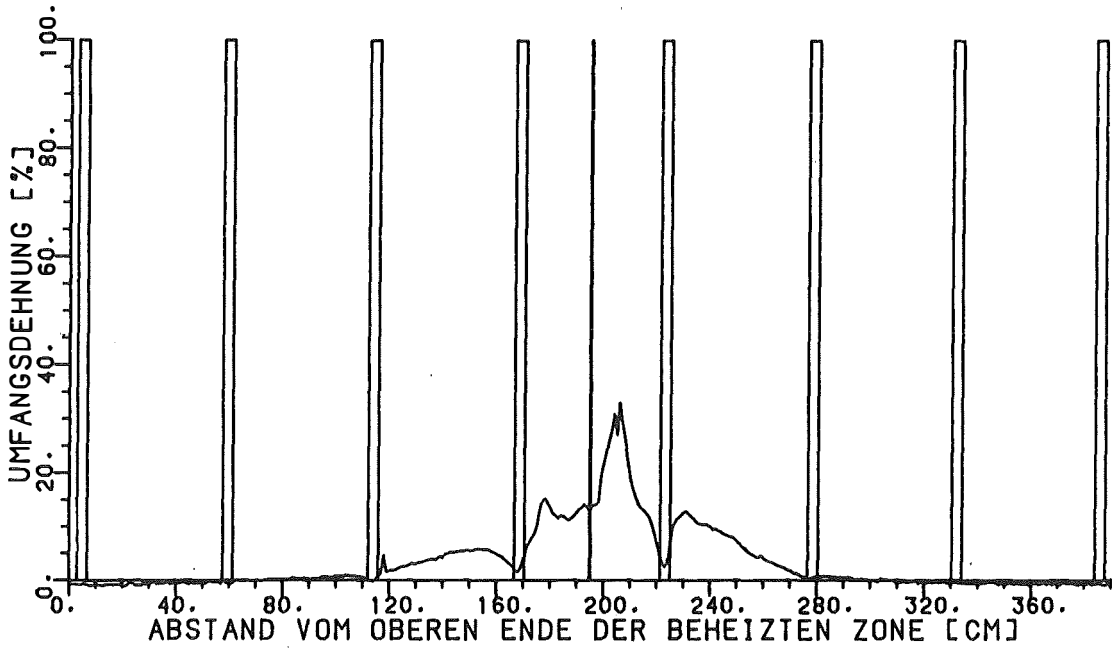

REBEKA 5
Abb: 127 Dehnungsprofil von Stab: 50



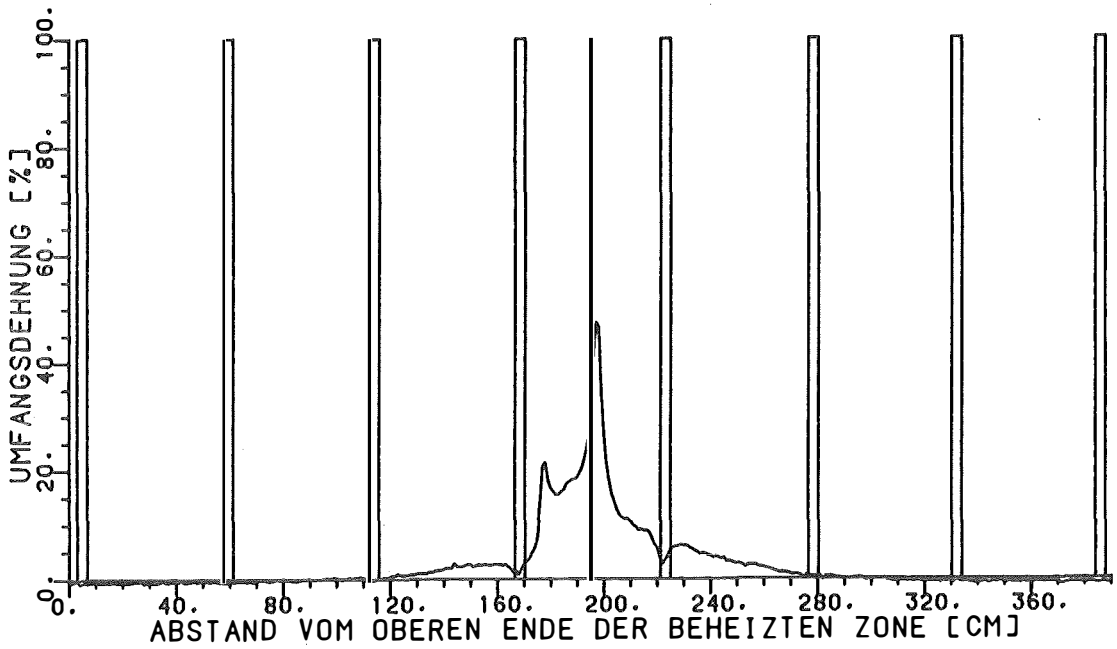

REBEKA 5
Abb: 128 Dehnungsprofil von Stab: 36



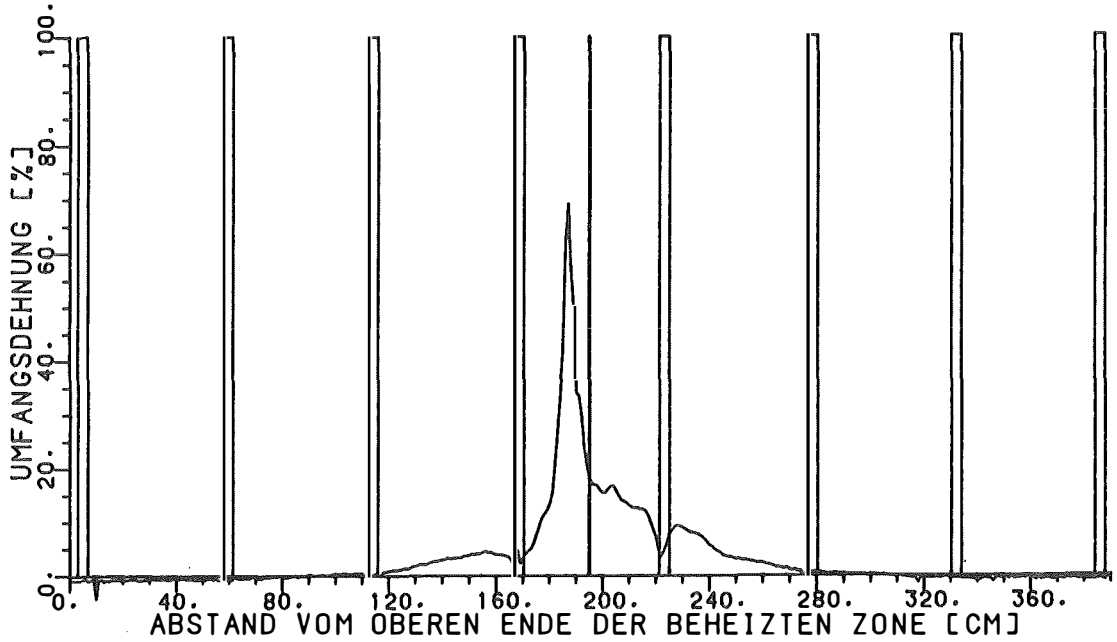

REBEKA 5
Abb: 129 Dehnungsprofil von Stab: 28



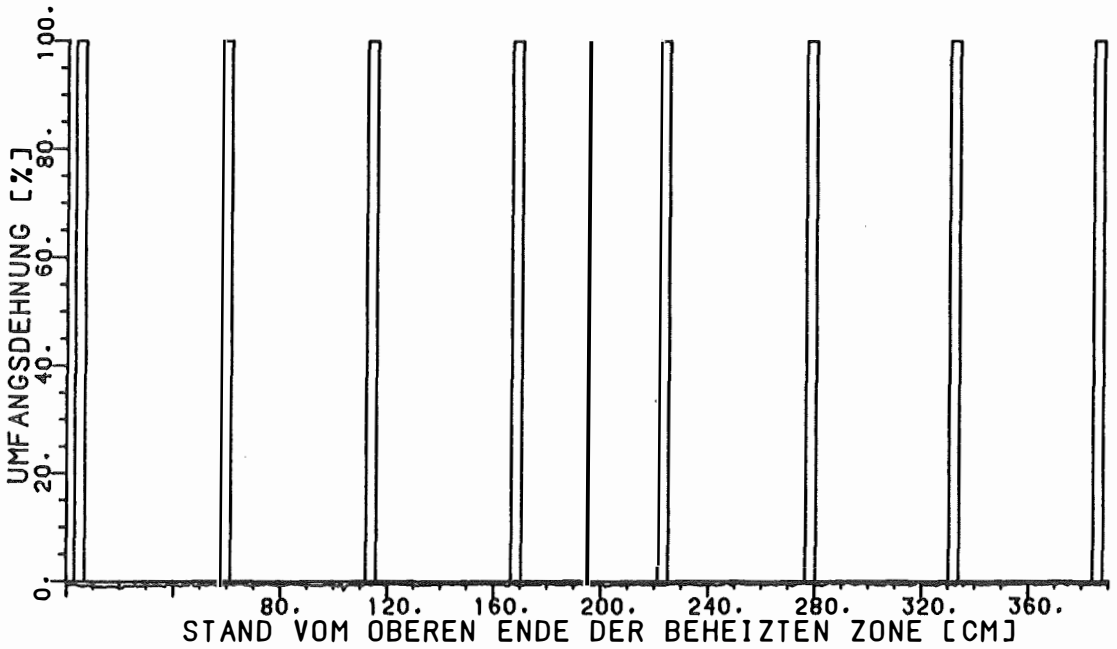

REBEKA 5
Abb: 130 Dehnungsprofil von Stab: 44



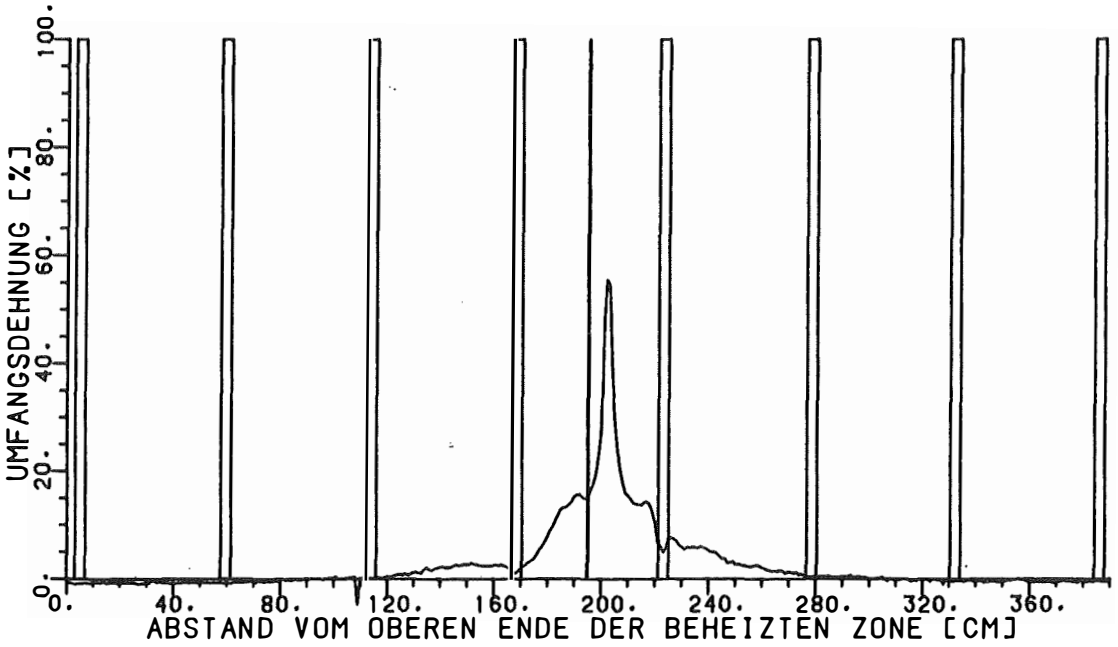

REBEKA 5
Abb: 131 Dehnungsprofil von Stab: 17



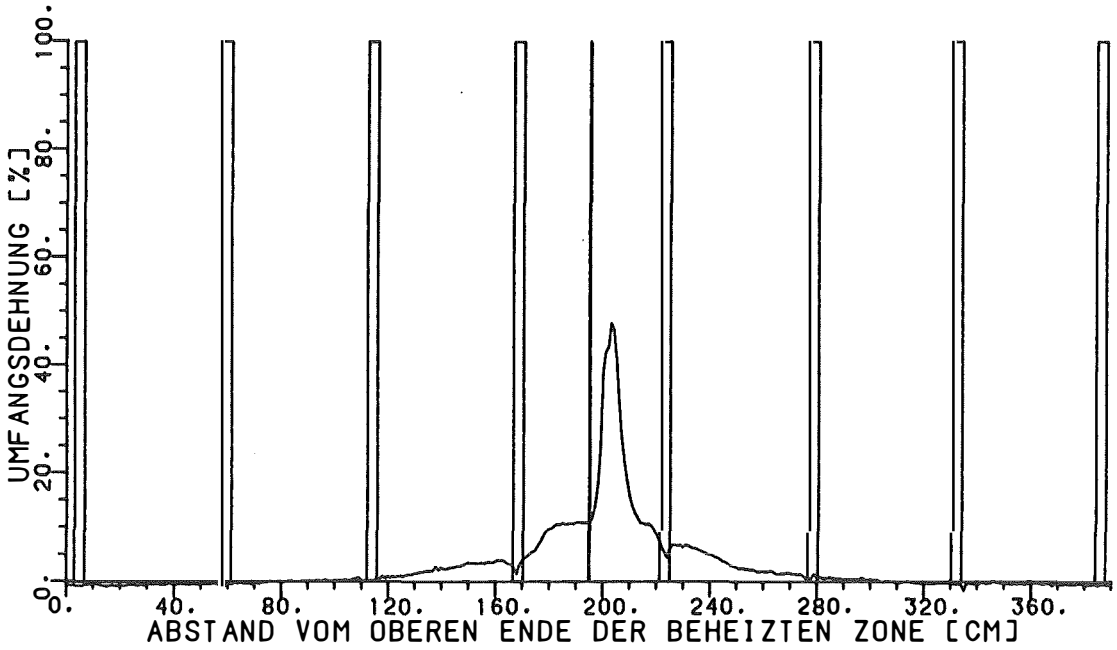

REBEKA 5
Abb: 132 Dehnungsprofil von Stab: 15



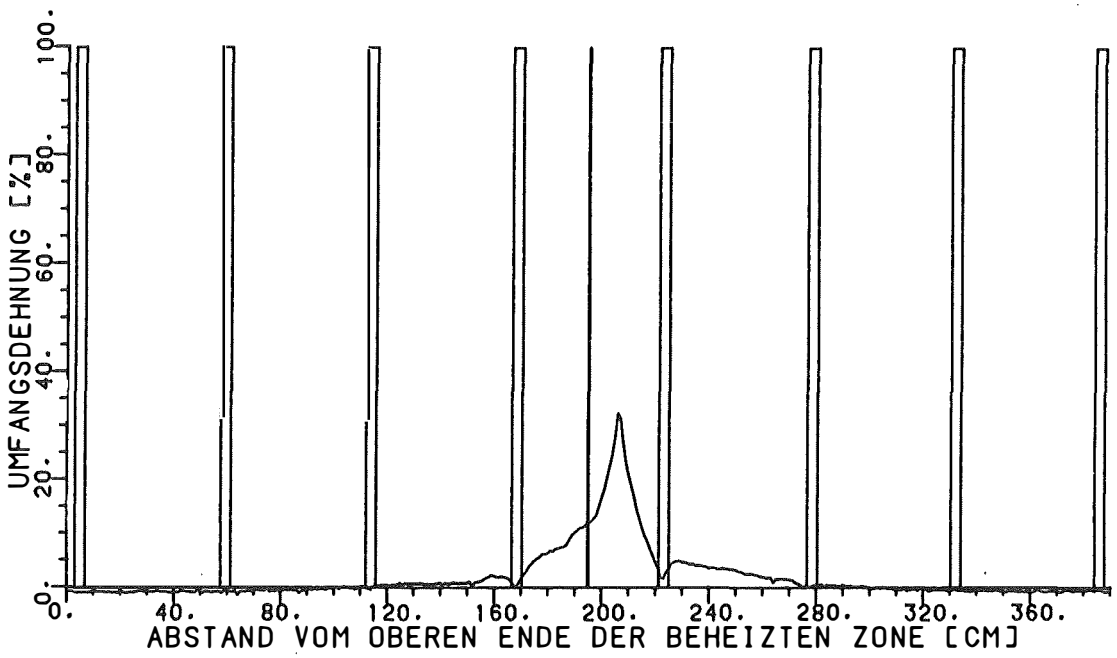

REBEKA 5
Abb: 133 Dehnungsprofil von Stab: 54



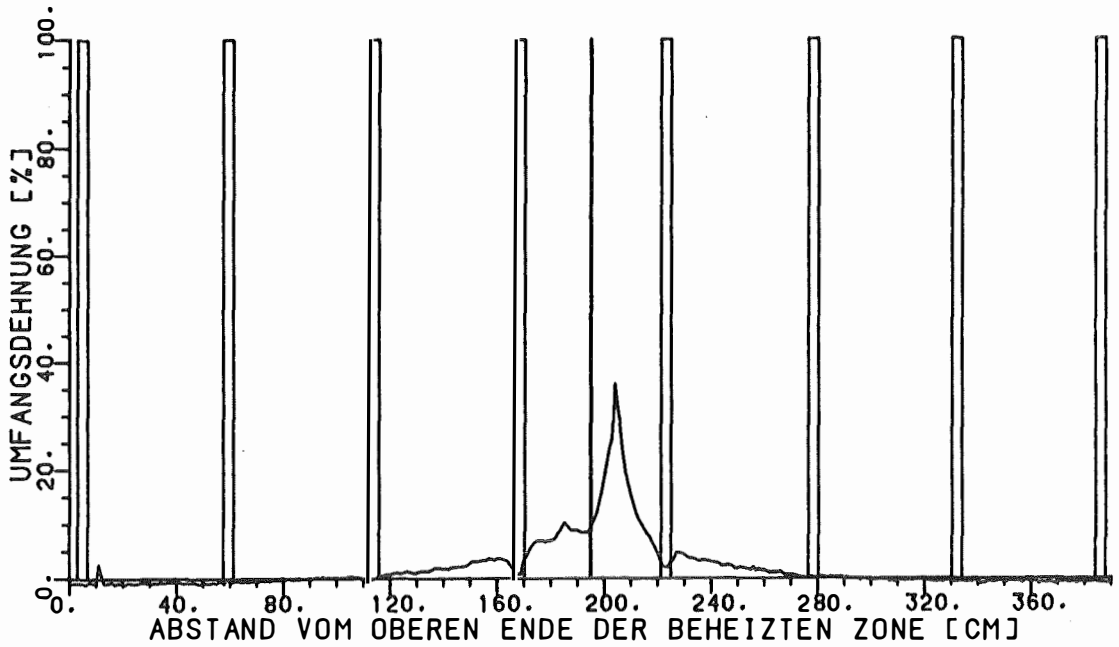

REBEKA 5
Abb: 134 Dehnungsprofil von Stab: 30



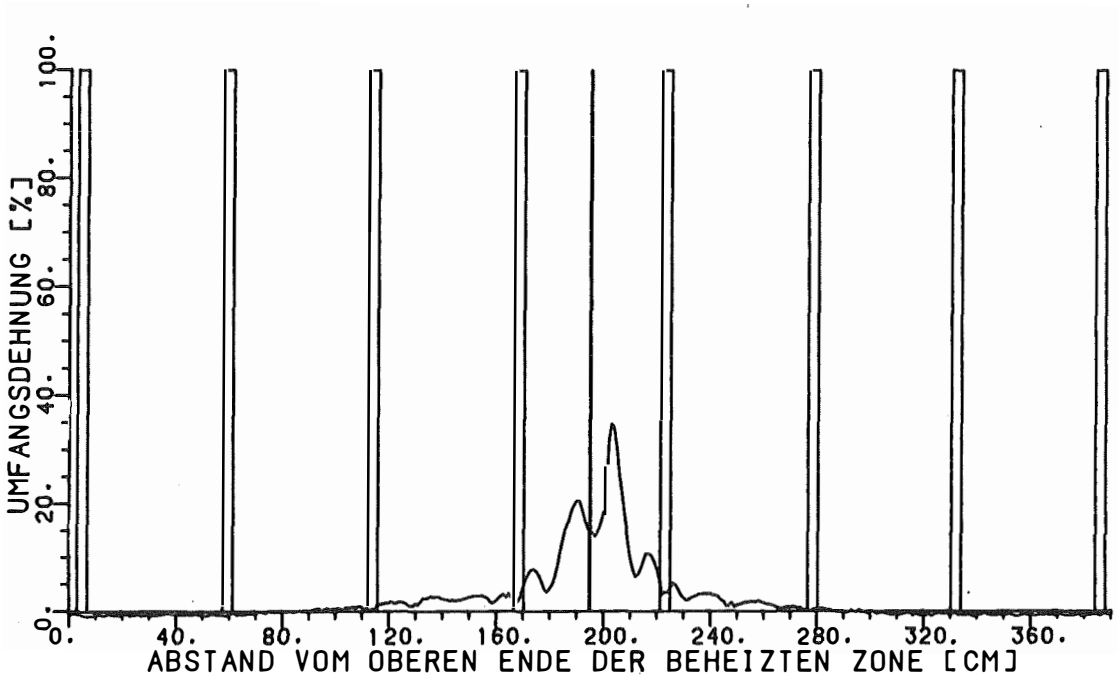

REBEKA 5
Abb: 135 Dehnungsprofil von Stab: 14



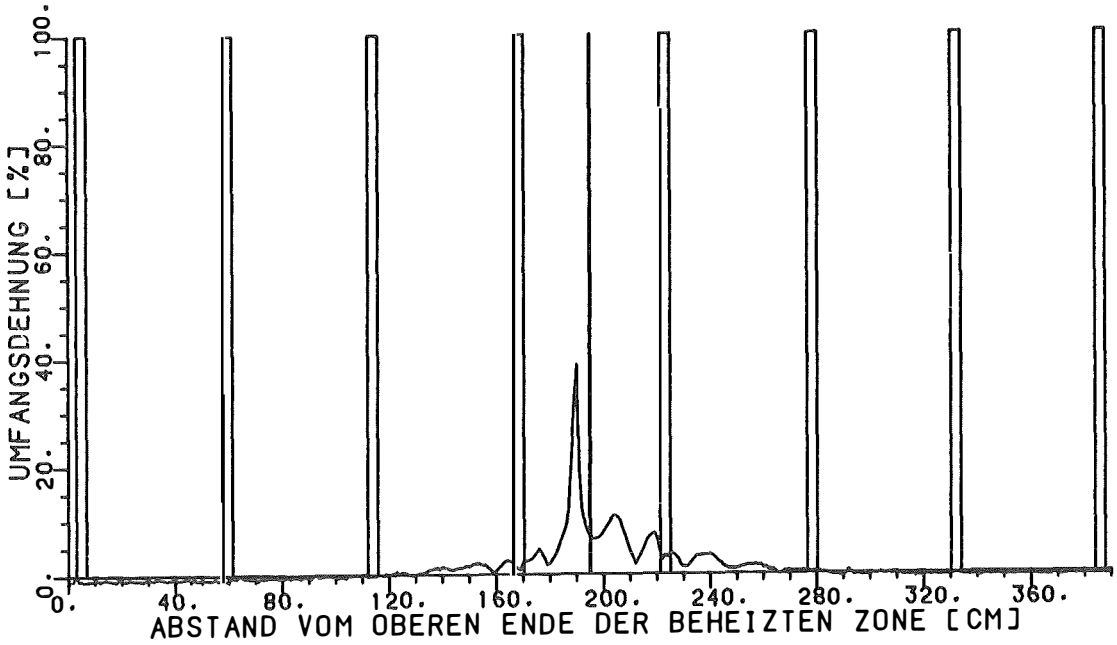

REBEKA 5
Abb: 136 Dehnungsprofil von Stab: 57



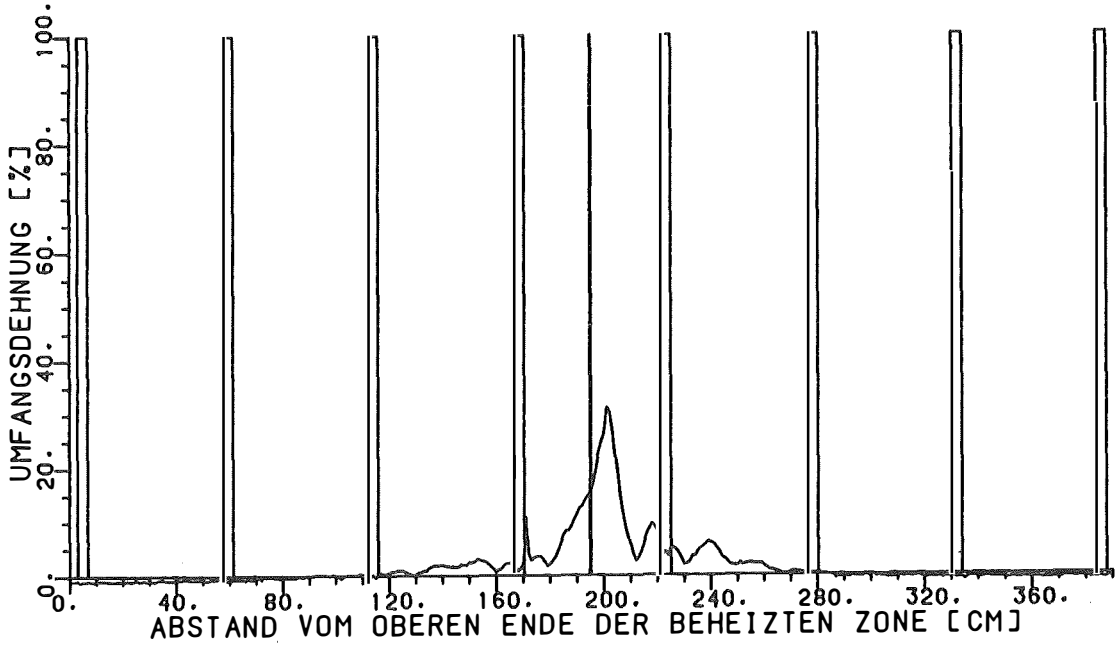

REBEKA 5
Abb: 137 Dehnungsprofil von Stab: 48



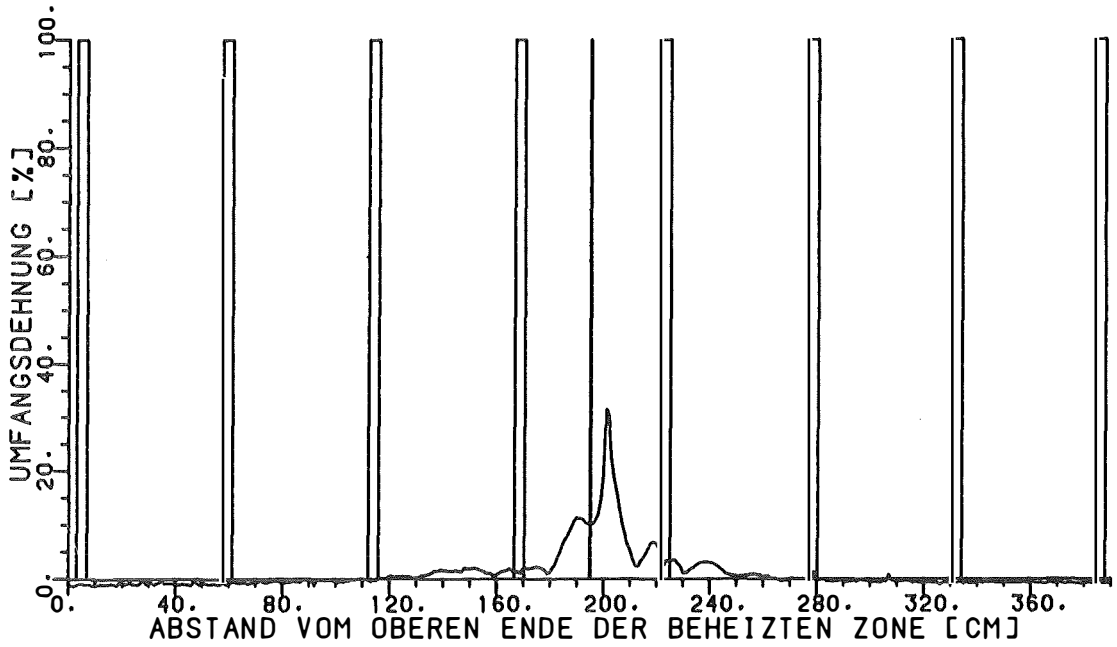

REBEKA 5
Abb: 138 Dehnungsprofil von Stab: 8



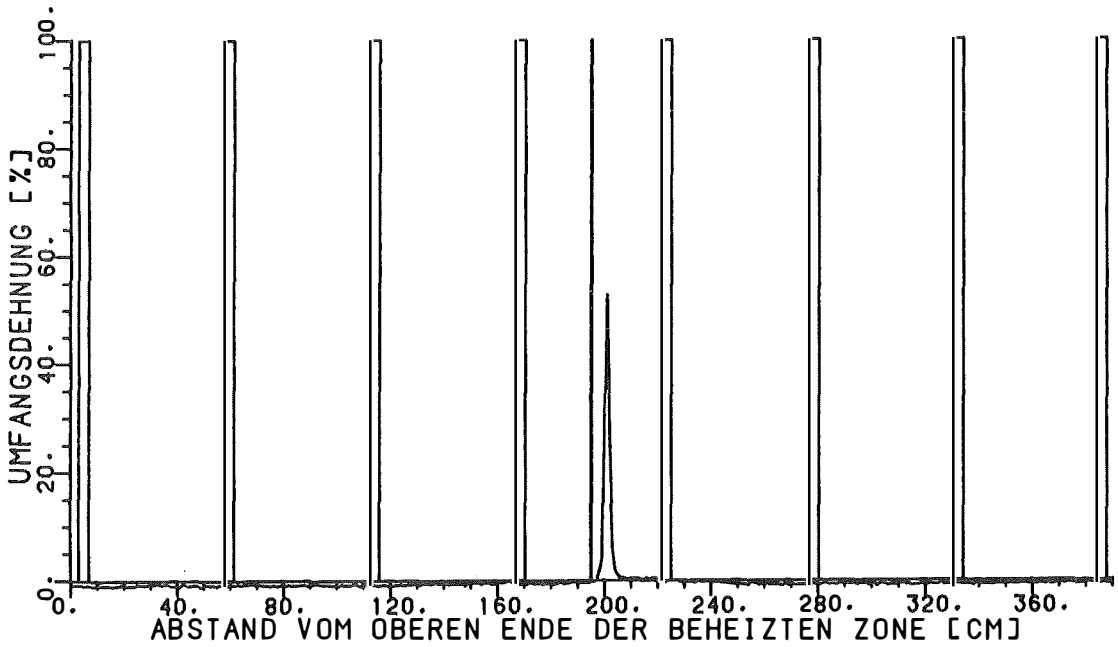

REBEKA 5
Abb: 139 Dehnungsprofil von Stab: 59



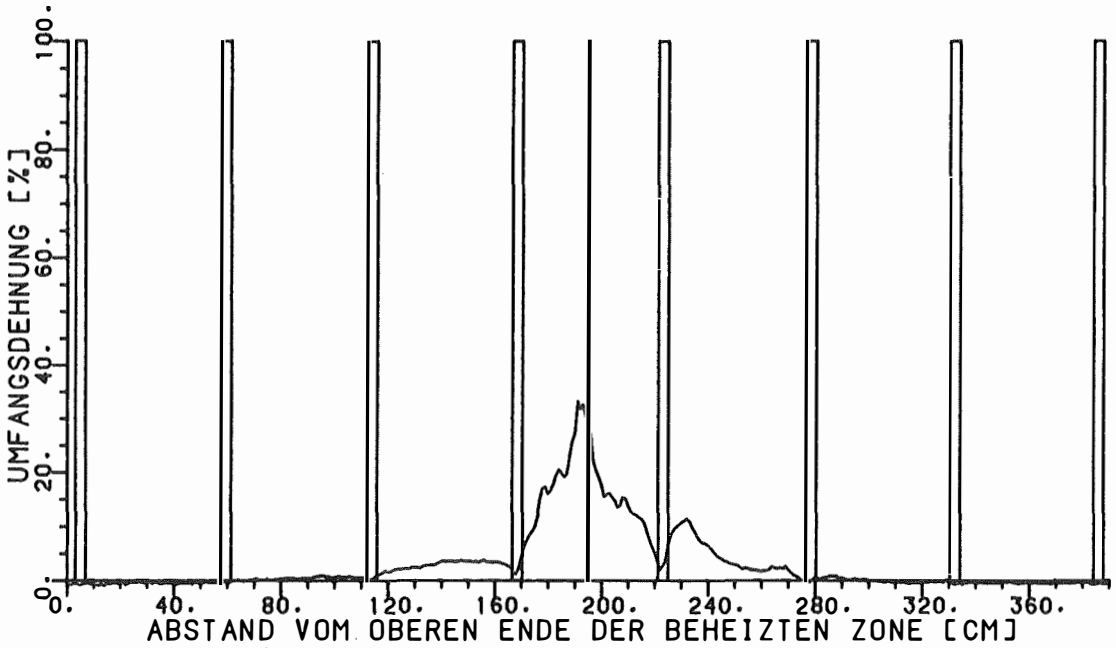

REBEKA 5
Abb: 140 Dehnungsprofil von Stab: 64



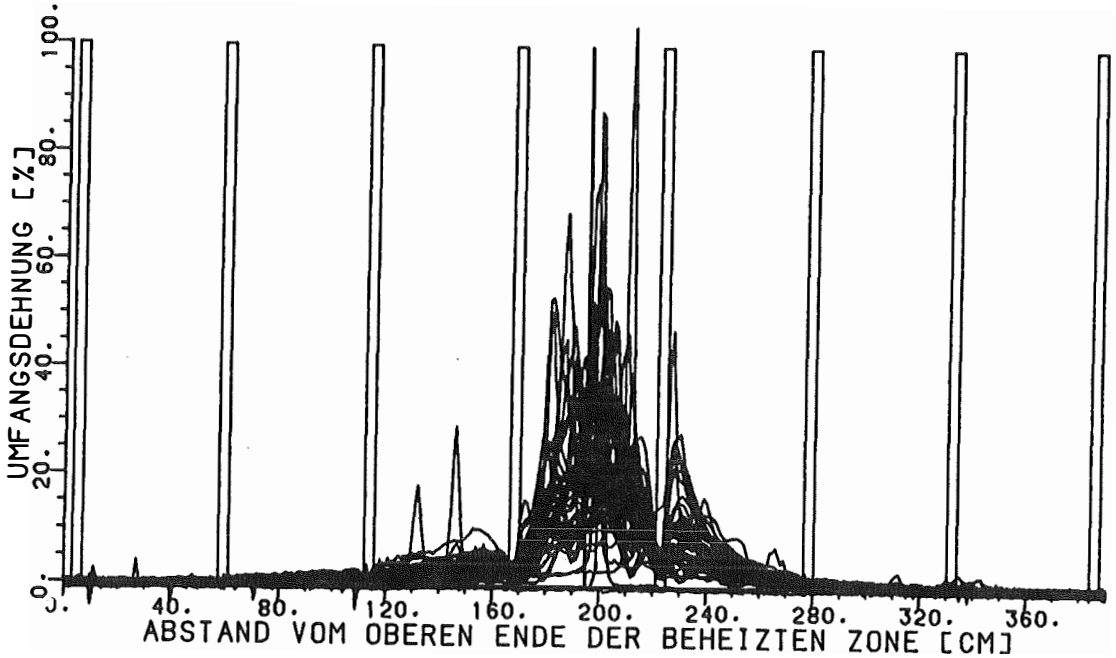

REBEKA 5
Abb: 141 Dehnungsprofil von Stab: 26



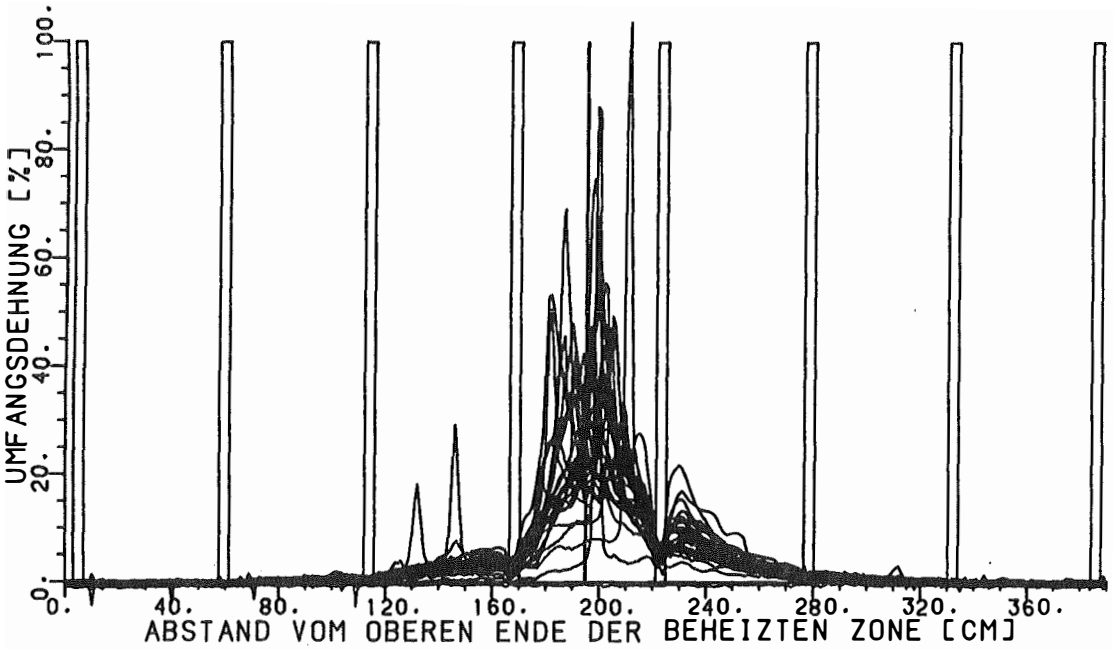

REBEKA 5
Abb: 142 Dehnungsprofil von Stab: 81



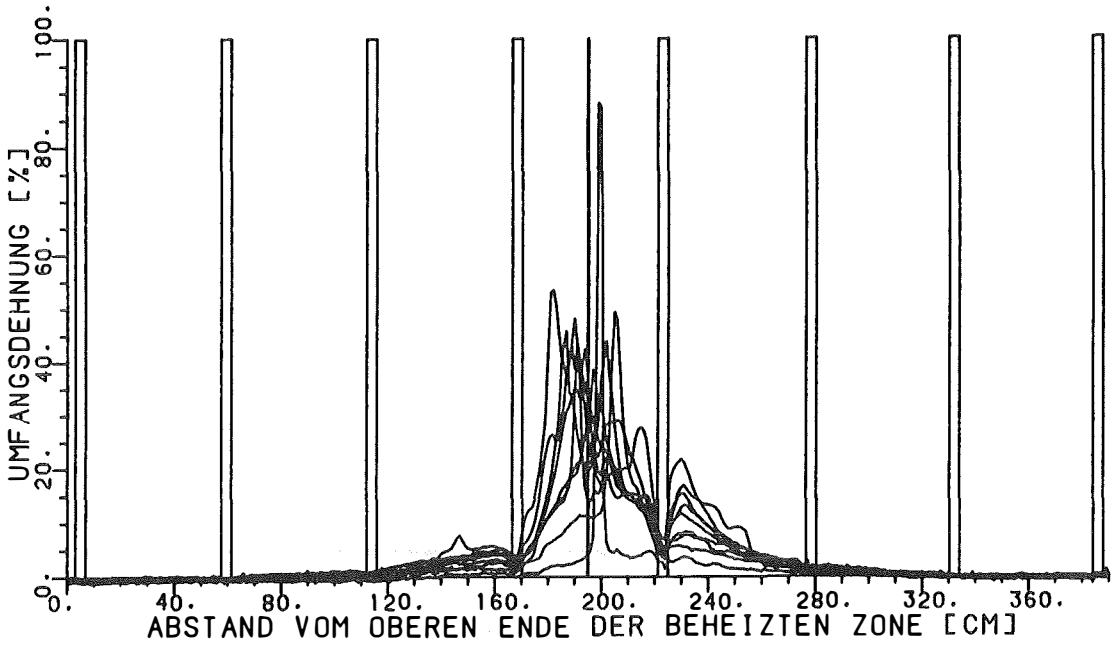

REBEKA 5
Abb: 143 Dehnungsprofil von Stab: 13



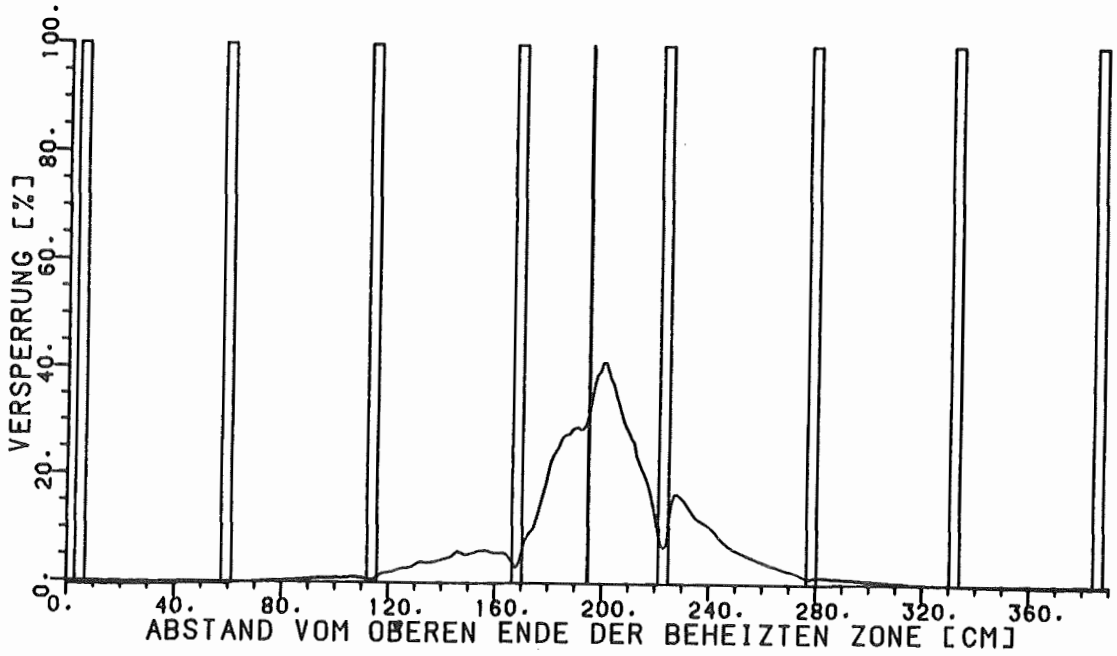

REBEKA 5
Abb: 144 Dehnungsprofile der 49 Stäbe



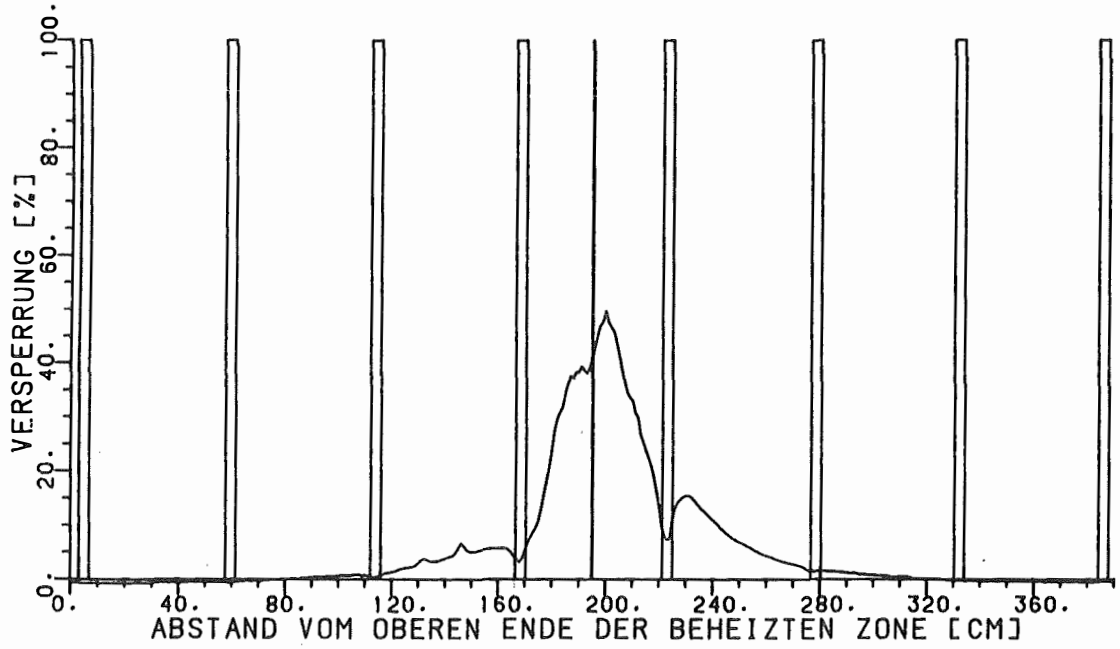

REBEKA 5
Abb: 145 Dehnungsprofile der 25 Innenstäbe



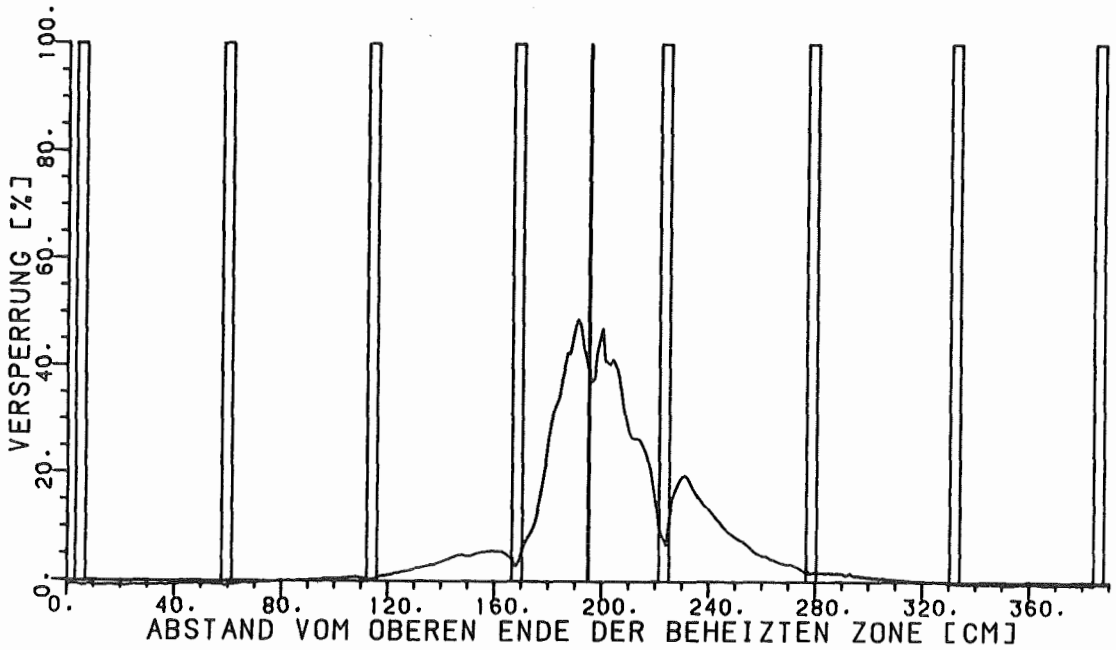

REBEKA 5
Abb: 146 Dehnungsprofile der 9 Innenstäbe




REBEKA 5
Abb: 147 Kühlkanalversperrung durch 49 Stäbe




REBEKA 5
Abb: 148 Kühlkanalversperrung durch 25 Innenstäbe




REBEKA 5
Abb: 149 Kühlkanalversperrung durch 9 Innenstäbe

4. Zusammenstellung wichtiger Meßstellen (Tab. 1)
   Tabellarische Zusammenfassung der Versuchsergebnisse ( Tab.2)

5. Kanal-Liste und Datenzuordnung

6. Faltblatt der Abb. 7

Tabelle 1: Zusammenstellung wichtiger Meßstellen

| Bauteil | Nr. | Meßgröße u. Meßort | Meßstellenbezeichnung | Meßwertgeber | Meßbereich | Medium | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teststrecke | 2 | Druck im oberen Plenum | P2.2 | DMS-p-Aufnehmer | 0-10 bar | Dampf/Wasser | |
| | | Temp. im oberen Plenum | (2x)T2.2 | NiCr/Ni-TE | 0-1000 °C | Dampf/Wasser | |
| | | Temp. in Dampfaustrittsleitung 07 | T2.3 | NiCr/Ni-TE | 0-1000 °C | Dampf/Wasser | |
| | | Druck im unteren Plenum | P2.1 | DMS-p-Aufnehmer | 0-10 bar | Dampf/Wasser | |
| | | Temp. im unteren Plenum | T2.1 | NiCr/Ni-TE | 0-1000 °C | Dampf/Wasser | Kollabierter Wasserstand (incl.Strömungsdruckverlust) |
| | | Differenzdruck über Teststrecke | N2 | DMS-Δp-Aufnehmer | 0-5 mWs | Dampf/Wasser | |
| Bündel (BSS) | | Hüllrohrtemperaturen | THn | NiCr/Ni-TE ø 0.5 mm | 0-1000 °C | | |
| | | Druck im Stabinnern | PJn | DMS-p-Aufnehmer | 0-130 bar | Helium | |
| | | Temp. Heizstabhülle | TIn | NiCr/Ni-Te ø 0.36 mm | 0-1000 °C | Wasser/Dampf | |
| | | Fluidtemp. a. Abstandshalter | TAHn | NiCr/Ni-TE ø 0.5 mm | 0-1000 °C | Wasser/Dampf | |
| | | Temp. BE-Kasten | TKn | NiCr/Ni-TE ø 0.5 mm | 0-1000 °C | Wasser/Dampf | |
| Behälter (Wasserauswurf-Sammelbehälter) | 5 | Differenzdruck | N5 | DMS-Δp-Aufnehmer | 0-2.5 mWs | Wasser | Wasserstand |
| Rohrleitung | 02 | Druck Flutwasser | P6 | DMS-p-Aufnehmer | 0-25 bar | Wasser | |
| | | Temp. Flutwasser | T6.4 | NiCr/Ni-TE | 0-1000 °C | Wasser | Flutwassermenge |
| | | Differenzdruck an Blende Flutwasser | D6 | DMS-Δp-Aufnehmer | 0-2,5 mWS | Wasser | |
| Rohrleitung | 06 | Druck Dampfeintritt | PD1 | DMS-p-Aufnehmer | 0-10 bar | Dampf | |
| | | Temp. Dampfeintritt | T3 | NICr/Ni-TE | 0-1000 °C | Dampf | Dampfmenge Eintritt Versuchsanlage |
| | | Differenzdruck an Blende Dampfeintritt | D1 | DMS-Δp-Aufnehmer | 0-5 mWS | Dampf | |
| Rohrleitung | 09 | Druck Dampfaustritt | P3.2 | DMS-p-Aufnehmer | 0-10 bar | Dampf | |
| | | Temp. Dampfaustritt | T3 | NiCr/Ni-TE | 0-1000 °C | Dampf | Dampfmenge Austritt Versuchsanlage |
| | | Differenzdruck an Blende Dampfaustritt | D3 | DMS-Δp-Aufnehmer | 0-2,5 mWS | Dampf | |

REBEKA 5 vom 03.06.82

Tabelle 2: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

| Stab Nr. | Berst-zeit [s] | Hüllrohr-temperatur axiale Mitte [°C] | Berst-druck [bar] | Dehnung in axialer Mitte [%] | Berst-dehnung [%] | Berststelle axial [mm] | Berst-winkel [o] * | Berst-folge | Wiederbe-netzungszeit [s] | Wiederbe-netzungs-folge | Be-merkung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 37 | 135 | 700 | 70 | 11.63 | 26.7 | 2126 | 250° | 22 | 228 | 25 | |
| 19 | 146 | 710 | 67.5 | 19.75 | 47.5 | 2267 | 160° | 27 | 207 | 24 | |
| 16 | 121 | 755 | 74 | 14.53 | 31.2 | 1995 | 160° | 16 | 189 | 21 | |
| 34 | 121 | 715 | 76 | 16.57 | 37.1 | 1983 | 215° | 16 | 147 | 10 | |
| 23 | 117 | 800 | 76 | 15.35 | 52.8 | 1970 | 210° | 12 | 128 | 3 | |
| 41 | 122 | 737 | 73 | 15.41 | 39.9 | 1980 | 180° | 17 | 147 | 5 | |
| 7 | 143 | 730 | 67 | 9.67 | 43.9 | 2085 | 330° | 26 | 177 | 19 | |
| 61 | 100 | 755 | 83 | 2.86 | 19.7 | 2115 | 120° | 2 | 135 | 6 | |
| 49 | 102 | 785 | 73 | 7.4 | 103.7 | 2108 | 165° | 3 | 141 | 9 | |
| 18 | 120 | 820 | 66.5 | 27.14 | 56.3 | 2000 | 345° | 15 | 150 | 11 | |
| 66 | 120 | x880 | 67.5 | 41.54 | 44.2 | 1955 | 110° | 15 | x138 | 8 | |
| 35 | 111 | 780 | 68 | 25.28 | 39.7 | 2007 | 145° | 7 | 135 | 6 | |
| 22 | 114 | 755 | 66 | 33.16 | 74.7 | 1985 | 300° | 9 | 136 | 7 | |
| 80 | 111 | 735 | 74 | 14.37 | 34.7 | 2040 | 270° | 7 | 136 | 7 | |
| 56 | - | - | - | 10.64 | 30.2 | 2290 | - | - | 183 | 20 | + |
| 10 | 118 | 785 | 68 | 31 | 38.5 | 1910 | 195° | 13 | §138 | 8 | |
| 25 | 123 | 760 | 61 | 33 | 40.6 | 1895 | 105° | 18 | 156 | 14 | |
| 2 | 114 | 765 | 67 | 26.3 | 48 | 1888 | 130° | 9 | 168 | 17 | |
| 20 | 110 | x860 | 70.5 | 28.9 | 38.6 | 1983 | 105° | 6 | x117 | 1 | |
| 67 | 115 | 755 | 69 | 39.2 | 42.7 | 1983 | 150° | 10 | 165 | 16 | |
| 21 | - | - | - | 15.75 | 30.2 | 2280 | - | - | 140 | 28 | + |
| 11 | - | - | - | 11.53 | 28.4 | 2320 | - | - | 249 | 29 | + |
| 47 | 125 | x860 | 66.5 | 22.32 | 41.5 | 1863 | 140° | 19 | x141 | 9 | |
| 1 | 117 | x865 | 67 | 21 | 43.9 | 2010 | 70° | 14 | x138 | 8 | |
| 12 | 109 | x842 | 70 | 11.12 | 49.2 | 2055 | 135° | 5 | x135 | 6 | |
| 5 | 113 | x863 | 67 | 38 | 42.4 | 1950 | 270° | 8 | x119 | 2 | |
| 6 | 120 | x850 | 67 | 17.6 | 50.7 | 1813 | 285° | 15 | x171 | 18 | |
| 69 | 140 | 690 | 71 | 10.1 | 27.3 | 1797 | 255° | 25 | 171 | 18 | |
| 38 | - | - | - | 12.2 | 25.6 | 2300 | - | - | - | - | TE defekt |
| 29 | 121 | x870 | 68 | 17.58 | 46.5 | 2050 | 0° | 16 | x138 | 8 | |
| 46 | 121 | 785 | 64.5 | 19.41 | 45.6 | 1860 | 150° | 16 | 147 | 10 | |
| 4 | 100 | x830 | 80 | 3.89 | 88 | 1980 | 30° | 2 | x135 | 6 | |
| 50 | 108 | 760 | 70 | 14.41 | 43.6 | 1910 | 0° | 4 | 104 | 23 | |
| 36 | 116 | 750 | 66 | 30.87 | 61.6 | 1985 | 225° | 11 | 177 | 19 | |
| 28 | 136 | 675 | 70 | 15.79 | 28.2 | 1980 | 270° | 23 | 162 | 15 | |
| 44 | 146 | §690 | 64.5 | 12.9 | 32.9 | 2053 | 90° | 27 | &152 | 12 | |
| 17 | 115 | 770 | 68 | 30.74 | 47.4 | 1970 | 300° | 10 | 125 | 4 | |
| 15 | 113 | 780 | 70 | 18.22 | 69 | 1873 | 180° | 8 | 141 | 9 | |
| 54 | - | - | - | -0.33 | - | - | - | - | 273 | 30 | ohne PI |
| 30 | 108 | 800 | 72 | 15.06 | 55.4 | 2015 | 190° | 4 | 135 | 6 | |
| 14 | 113 | 770 | 68 | 11.9 | 47.7 | 2040 | 210° | 8 | 186 | 16 | |
| 57 | 115 | 750 | 73.5 | 12.03 | 32.3 | 2063 | 230° | 10 | 159 | 15 | |
| 48 | 129 | 705 | 73.5 | 9.5 | 35.9 | 2047 | 35° | 21 | 156 | 14 | |
| 8 | 126 | 725 | 73 | 15.02 | 34.7 | 2028 | 305° | 20 | 198 | 22 | |
| 59 | 108 | 750 | 77.5 | 6.7 | 38.5 | 1895 | 0° | 4 | 138 | 8 | |
| 64 | 114 | 735 | 73 | 15.51 | 31.1 | 2020 | 320° | 9 | 232 | 26 | |
| 26 | 109 | 740 | 76 | 10.39 | 31.4 | 2015 | 0° | 5 | 240 | 28 | |
| 81 | 91 | 740 | 83 | -0.207 | 52.7 | 2010 | 135° | 1 | 234 | 27 | |
| 13 | 839 | 755 | 70 | 28.8 | 33.2 | 1935 | 125° | 24 | 153 | 13 | |

Anmerkung: x) Temperatur des Innenthermoelementes
§) Ispra Thermoelement
Alle Zeitangaben beziehen sich auf Beginn der Wiederaufheizphase
+) nicht geborsten

* Winkel wird im Uhrzeigersinn gemessen, Norden ist Bezugslinie.

REBEKA-5

Die Daten wurden digital mit einer Frequenz von 10 Zyklen pro Sekunde von einer PDP 11/03 erfaßt. Für die Umrechnung von Rohmeßwerten in physikalische Einheiten, den Datentransfer und die graphische Darstellung sind Programme geschrieben worden.

Kanalliste und Datenzuordnung für REBEKA-5

| Kanal No | Datenzuordnung Meßstellenangaben | Bezeichnung | Einheit | Meßwinkel | Abb. Bem. |
|---|---|---|---|---|---|
| 24 | Vergleichstemperatur Kupferplatte | TV/3 | °C | | 1) |
| 25 | Temperatur unteres Teststrecken-plenum | T2.1 | °C | | |
| 26 | Temperatur oberes Teststrecken-plenum Nord | T2.2N | °C | 0° | |
| 27 | Temperatur oberes Teststrecken-plenum West | T2.2W | °C | 270° | |
| 28 | Dampfaustrittstemp.(Versuchsanl.) | T3.2 | °C | | |
| 29 | Temp. Flutwasser | T6.4 | °C | | |
| 30 | Hüllrohrtemp. Stab 37 bei 1950 mm | TH 37 | °C | 315° | |
| 31 | " " 19 " 1950 mm | TH 19 | °C | 45° | |
| 32 | " " 16 " 1950 mm | TH 16 | °C | 45° | |
| 33 | " " 34 " 1950 mm | TH 34 | °C | 45° | |
| 34 | Temperatur Heizstabhülle Stab 23 bei 1950 mm | Ti 23/1 | °C | 225° | |
| 35 | " " " 23 " 1950 mm | Ti 23/2 | °C | 345° | |
| 36 | Hüllrohrtemp. " 23 " 150 mm | TH 23/1 | °C | 225° | |
| 37 | " " 23 " 500 mm | TH 23/2 | °C | 225° | |
| 38 | " " 23 " 1000 mm | TH 23/3 | °C | 225° | |
| 39 | " " 23 " 1950 mm | TH 23/4 | °C | 225° | |
| 40 | " " 23 " 2900 mm | TH 23/5 | °C | 225° | |
| 41 | " " 23 " 3400 mm | TH 23/6 | °C | 225° | |
| 42 | " " 23 " 3750 mm | TH 23/7 | °C | 225° | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 43 | Hüllrohrtemp. Stab 23 bei 3900 mm | TH 23/8 | °C | 225° | |
| 44 | " " 41 " 1950 mm | TH 41 | °C | 45° | |
| 45 | " " 7 " 1950 mm | TH 7 | °C | 45° | |
| 46 | " " 61 " 1950 mm | TH 61 | °C | 315° | |
| 47 | " " 80 " 1950 mm | TH 80 | °C | 135° | |
| 48 | " " 56 " 1950 mm | TH 56 | °C | 315° | |
| 49 | " " 21 " 1950 mm | TH 21 | °C | 135° | |
| 50 | " " 11 " 1950 mm | TH 11 | °C | 315° | |
| 51 | " " 69 " 1950 mm | TH 69 | °C | 135° | |
| 52 | " " 38 " 1950 mm | TH 38 | °C | 315° | |
| 53 | " " 28 " 1950 mm | TH 28 | °C | 135° | |
| 54 | " " 44 " 1950 mm | TH 44 | °C | 315° | |
| 55 | " " 57 " 1950 mm | TH 57 | °C | 135° | |
| 56 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 48 bei 1950 mm | Ti 48/1 | °C | 45° | |
| 57 | " " " 48 " 1950 mm | Ti 48/2 | °C | 165° | |
| 58 | " " " 48 " 1950 mm | Ti 48/3 | °C | 285° | |
| 59 | Hüllrohrtemp. Stab 48 bei 150 mm | TH 48/1 | °C | 45° | |
| 60 | " " 48 " 500 mm | TH 48/2 | °C | 45° | |
| 61 | " " 48 " 1000 mm | TH 48/3 | °C | 45° | |
| 62 | " " 48 " 1950 mm | TH 48/4 | °C | 45° | |
| 63 | " " 48 " 2900 mm | TH 48/5 | °C | 45° | |
| 64 | " " 48 " 3400 mm | TH 48/6 | °C | 45° | |
| 65 | " " 48 " 3750 mm | TH 48/7 | °C | 45° | |
| 66 | " " 48 " 3900 mm | TH 48/8 | °C | 45° | |
| 67 | " " 8 " 1950 mm | TH 8 | °C | 225° | |
| 68 | " " 59 " 1950 mm | TH 59 | °C | 225° | |
| 69 | " " 64 " 1950 mm | TH 64 | °C | 225° | |
| 70 | " " 26 " 1950 mm | TH 26 | °C | 225° | |
| 71 | " " 81 " 1950 mm | TH 81 | °C | 225° | |
| 72 | " " 13 " 1950 mm | TH 13 | °C | 135° | |
| 73 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 49 bei 1950 mm | Ti 49/3 | °C | 15° | |
| 74 | " " " 49 " 1950 mm | Ti 49/1 | °C | 135° | |
| 75 | " " " 49 " 1950 mm | Ti 49/2 | °C | 255° | |
| 76 | Hüllrohrtemp. Stab 49 bei 1950 mm | TH 49 | °C | 135° | |
| 77 | " " 18 " 1950 mm | TH 18 | °C | 45° | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 78 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 66 " 1950 mm | Ti 66/1 | °C | 180° | |
| 79 | " " " 66 " 1950 mm | Ti 66/2 | °C | 300° | |
| 80 | " " " 66 " 1950 mm | Ti 66/3 | °C | 60° | |
| 81 | Hüllrohrtemp. Stab 35 bei 1950 mm | TH 35 | °C | 45° | |
| 82 | " " 22 " 1950 mm | TH 22/1 | °C | 45° | |
| 83 | " " 22 " 1950 mm | TH 22/2 | °C | 225° | |
| 84 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 10 bei 1950 mm | Ti 10/1 | °C | 135° | |
| 85 | " " " 10 " 1950 mm | Ti 10/2 | °C | 255° | |
| 86 | " " " 10 " 1950 mm | Ti 10/3 | °C | 15° | |
| 87 | " " " 25 " 1950 mm | Ti 25/1 | °C | 315° | |
| 88 | " " " 25 " 1950 mm | Ti 25/2 | °C | 75° | |
| 89 | " " " 25 " 1950 mm | Ti 25/3 | °C | 195° | |
| 90 | Hüllrohrtemp. Stab 25 bei 1950 mm | TH 25 | °C | 315° | |
| 91 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 2 bei 1950 mm | Ti 2/1 | °C | 180° | |
| 92 | " 2 " 2 " 1950 mm | Ti 2/2 | °C | 300° | |
| 93 | " " 2 " 1950 mm | Ti 2/3 | °C | 60° | |
| 94 | Hüllrohrtemp. Stab 2 bei 1950 mm | TH 2 | °C | 315° | |
| 95 | Temp. Heistabhülle | | | | |
| | Stab 29 bei 1950 mm | Ti 29/1 | °C | 45° | |
| 96 | " " " 29 " 1950 mm | Ti 29/2 | °C | 165° | |
| 97 | " " " 29 " 1950 mm | Ti 29/3 | °C | 285° | |
| 98 | Hüllrohrtemp. Stab 67 bei 1950 mm | TH 67 | °C | 45° | |
| 99 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 47 bei 1950 mm | Ti 47/1 | °C | 90° | |
| 100 | " " " 47 " 1950 mm | Ti 47/2 | °C | 210° | |
| 101 | " " " 47 " 1950 mm | Ti 47/3 | °C | 330° | |
| 102 | " " " 1 " 1950 mm | Ti 1/1 | °C | 90° | |
| 103 | " " " 1 " 1950 mm | Ti 1/2 | °C | 210° | |
| 104 | " " " 1 " 1950 mm | Ti 1/3 | °C | 330° | |
| 105 | " " " 12 " 1950 mm | Ti 12/1 | °C | 60° | |
| 106 | " " " 12 " 1950 mm | Ti 12/2 | °C | 180° | |
| 107 | " " " 12 " 1950 mm | Ti 12/3 | °C | 300° | |
| 108 | " " " 5 " 1950 mm | Ti 5/1 | °C | 270° | |
| 109 | " " " 5 " 1950 mm | Ti 5/2 | °C | 30° | |
| 110 | " " " 5 " 1950 mm | Ti 5/3 | °C | 150° | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 111 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 6 bei 1950 mm | Ti 6/1 | °C | 270° | |
| 112 | " " " 6 " 1950 mm | Ti 6/2 | °C | 30° | |
| 113 | " " " 6 " 1950 mm | Ti 6/3 | °C | 150° | |
| 114 | " " " 20 " 1950 mm | Ti 20/1 | °C | 225° | |
| 115 | " " " 20 " 1950 mm | Ti 20/2 | °C | 345° | |
| 116 | " " " 20 " 1950 mm | Ti 20/3 | °C | 105° | |
| 117 | " " " 46 " 1950 mm | Ti 46/1 | °C | 225° | |
| 118 | " " " 46 " 1950 mm | Ti 46/2 | °C | 345° | |
| 119 | " " " 46 " 1950 mm | Ti 46/3 | °C | 105° | |
| 120 | Hüllrohrtemp. Stab 46 bei 1677 mm | TH 46/1 | °C | 225° | |
| 121 | " " 46 " 1707 mm | TH 46/2 | °C | 225° | |
| 122 | " " 46 " 1807 mm | TH 46/3 | °C | 225° | |
| 123 | " " 46 " 1950 mm | TH 46/4 | °C | 225° | |
| 124 | " " 46 " 2057 mm | TH 46/5 | °C | 225° | |
| 125 | " " 46 " 2157 mm | TH 46/6 | °C | 225° | |
| 126 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 4 bei 1950 mm | Ti 4/1 | °C | 0° | |
| 127 | " " " 4 " 1950 mm | Ti 4/2 | °C | 120° | |
| 128 | " " " 4 " 1950 mm | Ti 4/3 | °C | 240° | |
| 129 | Hüllrohrtemp. Stab 36 bei 1950 mm | TH 36 | °C | 135° | |
| 130 | " " 17 " 1950 mm | TH 17 | °C | 225° | |
| 131 | " " 15 " 1950 mm | TH 15 | °C | 135° | |
| 132 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 54 bei 1950 mm | Ti 54/1 | °C | 0° | |
| 133 | " " " 54 " 1950 mm | Ti 54/2 | °C | 120° | |
| 134 | " " " 54 " 1950 mm | Ti 54/2 | °C | 240° | |
| 135 | Hüllrohrtemp. Stab 50 " 1950 mm | TH 50 | °C | 135° | |
| 136 | " " 30 " 1950 mm | TH 30 | °C | 135° | |
| 137 | Temp. Heizstabhülle | | | | |
| | Stab 14 " 1950 mm | Ti 14/1 | °C | 315° | |
| 138 | " " " 14 " 1950 mm | Ti 14/2 | °C | 75° | |
| 139 | " " " 14 " 1950 mm | Ti 14/3 | °C | 195° | |
| 140 | Hüllrohrtemp. Stab 14 " 1677 mm | TH 14/1 | °C | 315° | |
| 141 | " " 14 " 1707 mm | TH 14/2 | °C | 315° | |
| 142 | " " 14 " 1807 mm | TH 14/3 | °C | 315° | |
| 143 | " " 14 " 1950 mm | TH 14/4 | °C | 315° | |
| 144 | " " 14 " 2057 mm | TH 14/5 | °C | 315° | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 145 | Hüllrohrtemp. Stab 14 bei 2157 mm | TH 14/6 | °C | 315° | |
| 146 | BE-Kastenwandtemp. bei 150 mm | TK 1 | °C | | |
| 147 | " " 500 mm | TK 2 | °C | | |
| 148 | " " 1000 mm | TK 3 | °C | | |
| 149 | " " 1950 mm | TK 4 | °C | | |
| 150 | " " 2900 mm | TK 5 | °C | | |
| 151 | " " 3400 mm | TK 6 | °C | | |
| 152 | " " 3750 mm | TK 7 | °C | | |
| 153 | " " 1950 mm | TK 8 | °C | | |
| 154 | " " 1950 mm | TK 9 | °C | | |
| 155 | " " 1950 mm | TK 10 | °C | | |
| 156 | Fluid-TE Abstandshalter | | | | |
| | IV bei 1644 mm | TAH4/4/3o | °C | | |
| 157 | " " IV " 1702 mm | TAH4/4/3u | °C | | |
| 158 | " " IV " 1644 mm | TAH4/5/5o | °C | | |
| 159 | " " IV " 1644 mm | TAH4/5/2o | °C | | |
| 160 | " " IV " 1702 mm | TAH4/5/2u | °C | | |
| 161 | " " V " 2188 mm | TAH5/4/3o | °C | | |
| 162 | " " V " 2246 mm | TAH5/4/3u | °C | | |
| 163 | " " V " 2188 mm | TAH5/5/5o | °C | | |
| 164 | " " V " 2246 mm | TAH5/5/5u | °C | | |
| 165 | " " I " 9 mm | TAH1/3/2o | °C | | |
| 166 | " " I " 67 mm | TAH1/3/2u | °C | | |
| 167 | " " I " 9 mm | TAH1/7/2o | °C | | |
| 168 | " " I " 67 mm | TAH1/7/2u | °C | | |
| 169 | Hüllrohrtemp. (ISPRA-TE) | | | | |
| | Stab 23 bei 1950 mm | TS 23/9 | °C | 135° | 0,5 mmØ |
| 170 | " " 10 " 1950 mm | TS 10 | °C | 135° | 0,5 mmØ |
| 171 | " " 64 " 1950 mm | TS 64/2 | °C | 45° | 0,5 mmØ |
| 172 | " " 37 " 1950 mm | TS 37/2 | °C | 135° | 1,0 mmØ |
| 173 | " " 44 " 1950 mm | TS 44/2 | °C | 135° | 1,0 mmØ |
| 174 | " " 64 " 1950 mm | TS 64/3 | °C | 135° | 1,0 mmØ |
| Kanäle 175-209 | nicht belegt | | | | |
| 210 | Stabinnendruck v. Stab 37 | PJ 37 | bar | | 2) |
| 211 | nicht belegt | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 212 | Stabinnendruck v. Stab 19 | PJ 19 | bar | | |
| 213 | " " " 16 | PJ 16 | bar | | |
| 214 | " " " 34 | PJ 34 | bar | | |
| 215 | " " " 23 | PJ 23 | bar | | |
| 216 | " " " 41 | PJ 41 | bar | | |
| 217 | " " " 7 | PJ 7 | bar | | |
| 218 | " " " 61 | PJ 61 | bar | | |
| 219 | " " " 49 | PJ 49 | bar | | |
| 220 | " " " 18 | PJ 18 | bar | | |
| 221 | " " " 66 | PJ 66 | bar | | |
| 222 | " " " 35 | PJ 35 | bar | | |
| 223 | " " " 22 | PJ 22 | bar | | |
| 224 | " " " 80 | PJ 80 | bar | | |
| 225 | " " " 56 | PJ 56 | bar | | |
| 226 | " " " 10 | PJ 10 | bar | | |
| 227 | " " " 25 | PJ 25 | bar | | |
| 228 | " " " 2 | PJ 2 | bar | | |
| 229 | " " " 20 | PJ 20 | bar | | |
| 230 | " " " 67 | PJ 67 | bar | | |
| 231 | " " " 21 | PJ 21 | bar | | |
| 232 | " " " 11 | PJ 11 | bar | | |
| 233 | " " " 47 | PJ 47 | bar | | |
| 234 | " " " 1 | PJ 1 | bar | | |
| 235 | " " " 12 | PJ 12 | bar | | |
| 236 | " " " 5 | PJ 5 | bar | | |
| 237 | " " " 6 | PJ 6 | bar | | |
| 238 | Dampftemperatur an Meßblende 1 | TD 1 | bar | | |
| 239 | " " " 3 | T 3 | bar | | |
| 240 | Stabinnendruck von Stab 69 | PJ 69 | bar | | |
| 241 | " " " 38 | PJ 38 | bar | | |
| 242 | " " " 29 | PJ 29 | bar | | |
| 243 | " " " 46 | PJ 46 | bar | | |
| 244 | " " " 4 | PJ 4 | bar | | |
| 245 | " " " 50 | PJ 50 | bar | | |
| 246 | " " " 36 | PJ 36 | bar | | |
| 247 | " " " 28 | PJ 28 | bar | | |
| 248 | " " " 44 | PJ 44 | bar | | |
| 249 | " " " 17 | PJ 17 | bar | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 250 | Stabinnendruck von Stab 15 | PJ 15 | bar | | |
| 251 | " " " 54 | PJ 54 | bar | | |
| 252 | " " " 30 | PJ 30 | bar | | |
| 253 | " " " 14 | PJ 14 | bar | | |
| 254 | " " " 57 | PJ 57 | bar | | |
| 255 | " " " 48 | PJ 48 | bar | | |
| 256 | " " " 8 | PJ 8 | bar | | |
| 257 | " " " 59 | PJ 59 | bar | | |
| 258 | " " " 64 | PJ 64 | bar | | |
| 259 | " " " 26 | PJ 26 | bar | | |
| 260 | " " " 81 | PJ 81 | bar | | |
| 261 | " " " 13 | PJ 13 | bar | | |
| 262 | Dampfdruck an Meßblende 1 | PD 1 | bar | | |
| 263 | Druck im unteren Plenum d. Teststr. | P 2.1 | bar | | |
| 264 | " " oberen " " " | P 2.2 | bar | | |
| 265 | Dampfdruck an Meßblende 3 | P 3.2 | bar | | |
| 266 | Druck Flutwasser | P 6 | bar | | |
| 267 | Differenzdruck an Meßblende 1 | D 1 | kg/s | | |
| 268 | " " " 3 | D 3 | kg/s | | |
| 269 | " " " 6 | D 6 | g/s | | |
| 270 | " Teststrecke | N 2 | m Ws | | |
| 271 | " Containmentsimulatur | N 4 | m Ws | | |
| 272 | " Wasserauswurfbehälter | N 5 | m Ws | | |
| 273 | El.Phasenleistg.Transduktor 1,Phase 1 | L 1 | kW | | |
| 274 | " " " 1," 2 | L 2 | kW | | |
| 275 | " " " 1," 3 | L 3 | kW | | |
| 276 | " " " 2," 1 | L 4 | kw | | |
| 277 | " " " 2," 2 | L 5 | kW | | |
| 278 | " " " 2," 3 | L 6 | kW | | |

1. Vergleichstemperatur (TV/3): 3,
   da 3 Meßfühler auf Cu-Platte in Reihe geschaltet.

2. He-Gas zur Simulation des Spalt-
   gasinnendruckes von frischen Brenn-
   stäben

## Literaturangaben

/1/ Projekt Nukleare Sicherheit. Jahresbericht 1982, KfK 3350, Juli 1983/S 4200 - 94 - 162. Untersuchung zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zircaloy-Hüllen und einsetzender Kernnotkühlung (REBEKA-Programm). (K. Wiehr, A. Emling, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J. Neitzel, P. Schäffner, He. Schmidt, E. Vogel; IRB)

/2/ s. Anhang

/3/ Zugriff zu den Versuchsdaten

Benutzer, die an den REBEKA5 Versuchsdaten Interesse haben, sofern Ihnen ein DATEX-P-Anschluß oder eine Wahlleitung zu dem PHDR-Rechner DATA GENERAL zur Verfügung steht, können diese mittels nachfolgendem Aufruf lesen und kopieren.

```
USERNAME:IRB229
PASSWORT:*)
)SEARCH
)SEE REBEKA5
```

*) Das Passwort wird bei Anfrage dem Benutzer bekannt gegeben.

# Primärbericht

/2/ Ermittlung der Kühlkanalversperrung im Stabbündel bei Experimenten zum Kühlmittelverlustörfall eines Druckwasserreaktors

H. J. Neitzel

0 6 • 0 1 • 0 9 P 0 5 A April 1982

PNS-Nr. 663/82

Institut für Reaktorbauelemente - IRB

IRB-Nr. 402/82

**Bitte beachten Sie:** dieser Primärbericht enthält Informationen von vorläufigem Charakter und ist in erster Linie zur aktuellen internen Unterrichtung zwischen den Instituten und den externen Zusammenarbeitspartnern des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestimmt. Eine Weitergabe des Berichts oder seines Inhalts durch Dritte bedarf der Zustimmung der Abt. Patente und Lizenzen des KfK.

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH

## Zusammenfassung

Bei Bündelexperimenten zum Kühlmittelverluststörfall eines Druckwasserreaktors wird der Versperrungsgrad der plastisch aufgeblähten Brennstabhüllen als Maß für die Behinderung der Strömung des Kühlmediums ermittelt. Zu diesem Zweck wird eine Beziehung hergeleitet, die den Versperrungsgrad in Abhängigkeit der gemessenen Umfangsdehnungen der Hüllrohre angibt.

Die Anwendung auf Bündel mit geborstenen und ungleichmäßig gedehnten Rohren wird diskutiert.


## Einleitung:

Für die Kühlbarkeit eines Druckwasserreaktors nach einem hypothetischen Kühlmittelverluststörfall ist der Druckverlust des Kühlmediums im deformierten Stabbündel maßgebend. Dabei ist das Stabbündel insofern deformiert, als sich die Hüllrohre der Stäbe infolge von Temperaturerhöhungen und des inneren Überdruckes der gasgefüllten Stäbe plastisch aufgebläht haben und zum Teil geborsten sind.
Als Maß für die Erhöhung des Druckverlustes wird der sogenannte Versperrungsgrad angesehen. Dabei ist der Versperrungsgrad so definiert, daß er Null ist, wenn alle Hüllrohre unverformt sind und daß er eins (bzw. 100%) ist, wenn kein freier Querschnitt mehr für das Kühlmedium übrig bleibt.

Bei Bündelexperimenten zum Kühlmittelverluststörfall können die Umfangsdehnungen der Hüllrohre nach Ablauf des Experimentes axial vermessen werden.

Unter idealisierenden Annahmen läßt sich eine Beziehung ermitteln, mit der für jeden Einzelstab aus der gemessenen Umfangsdehnung der Versperrungsgrad berechnet werden kann. Der Versperrungsgrad in einem axialen Bündelquerschnitt ist das arithmetische Mittel der Versperrungsgrade der Einzelstäbe im gleichen Querschnitt.

Herleitung der Versperrungs-Beziehung:

Zur Herleitung der Berechnungsformel für den Versperrungsgrad V eines Stabbündels betrachtet man zunächst einen Unterkanal des Stabbündels. Bezugszustand ist dabei die Stabbündelgeometrie mit ungedehnten Stabhüllen mit dem Versperrungsgrad V = O (Abb. 1).

Jedem Stab ist im Bündelquerschnitt eine quadratische Fläche mit der Seitenlänge p eines Teilungsabstandes zugeordnet. Die Differenz zwischen der quadratischen Fläche und dem Stabquerschnitt ist der dem Stab zugeordnete freie Kühlkanalquerschnitt.

Dehnt sich nun die Stabhülle unter der Wirkung erhöhter Temperatur und des inneren Überdruckes, so nimmt der freie Kühlkanalquerschnitt ab. Hierzu ist experimentell festgestellt worden, daß der Querschnitt der gedehnten Hülle kreisförmig bleibt, solange keine Berührung mit dem benachbarten Stab entsteht.

Unter der Voraussetzung, daß alle Stäbe in Bündelquerschnitt gleichmäßig dehnen, findet die gegenseitige Berührung der Hüllen an der fiktiven Unterkanalgrenze statt. Gleichmäßige Dehnungen der Hüllrohre im Bündelquerschnitt werden sich in der Realität kaum ergeben. Diese idealisierende Annahme wird jedoch der analytischen Beziehung für den Versperrungsgrad zugrunde gelegt.

Beginnend mit einer punktförmigen Berührung kontaktieren die Rohre an der fiktiven Unterkanalgrenze mit weiter wachsender Dehnung auf einer immer länger werdenden geraden Linie, bis der Hüllrohrumfang schließlich völlig quadratisch ist. Der freie Kühlkanalquerschnitt ist dabei zu Null geworden und der Versperrungsgrad hat definitionsgemäß den Wert V = 1 (100%) erreicht.

Zur Herleitung der Versperrungs-Beziehung wird die geometrische Einteilung der Abb. 2 und 3 benutzt. Ein Unterkanal ergibt sich nämlich auch direkt aus dem Teilungsquadrat und jeweils einem Viertel der vier an den Ecken des Teilungsquadrates sitzenden Stäbe. Im folgenden sei der Ausgangszustand mit dem Index O, der Zustand der punktförmigen Berührung mit dem Index P und der Zustand der vollständigen quadratischen Berührung mit dem Index T bezeichnet.

Ein beliebiger Zustand vor der Berührung, dargestellt in Abb. 2, sei mit dem Index 1, ein beliebiger Zustand nach der punktförmigen Berührung, dargestellt in Abb. 3, mit dem Index 2 gekennzeichnet.

Ist A der freie Kühlkanalquerschnitt eines Unterkanals bei einer beliebigen Dehnung $\varepsilon$ des Hüllrohrumfanges U, so ist der Versperrungsgrad V definiert durch die Beziehung

$$V = (A_o - A)/A_o = 1 - A/A_o \qquad (1)$$

und die Umfangsdehnung $\varepsilon$ des Hüllrohres durch die Beziehung

$$U = U_o\ (1 + \varepsilon) \qquad (2)$$

Im ungedehnten Ausgangszustand ist der freie Kühlkanalquerschnitt festgelegt durch die Teilung p und den Durchmesser $D_o$ der Stäbe (Abb. 1).

$$A_o = p^2 - \frac{\pi}{4}\ D_o^{\ 2} \qquad (3)$$

Der Umfang der Stäbe im Ausgangszustand ist

$$U_o = \pi \cdot D_o \qquad (4).$$

Somit gilt nach (2) für den Umfang U bei einer beliebigen Dehnung $\varepsilon$

$$U = \pi \cdot D_o\ (1+\varepsilon) \qquad (5)$$

Bei einem beliebigen Dehnungszustand des Hüllrohres vor der punktförmigen Berührung (Index 1) ergibt sich nach Abb. 2 ein freier Kühlkanalquerschnitt $A_1$ zu

$$A_1 = p^2 - \frac{\pi}{4} D^2 \qquad (6)$$

und ein Rohrumfang $U_1$ zu

$$U_1 = \pi \cdot D\ , \qquad (7),$$

wobei D der Durchmesser des gedehnten Hüllrohres ist.

Bei einem beliebigen Dehnungszustand des Hüllrohres nach der Berührung (Index 2) ergibt sich nach Abb. 3 ein freier Kühlkanalquerschnitt $A_2$ zu

$$A_2 = 4 \cdot (R^2 - \frac{\pi}{4} R^2) \qquad (8)$$

und ein Rohrumfang $U_2$ zu

$$U_2 = 8 \cdot (p/2 - R + \pi/4 \cdot R) \qquad (9)$$

wobei R der Krümmungsradius der abgerundeten Teile des Hüllrohrumfanges ist.

Durch Elimination von D ergibt sich aus den Gleichungen (6) und (7) eine Beziehung zwischen freiem Querschnitt $A_1$ und Umfang $U_1$ zu

$$A_1 = p^2 - \frac{U_1^2}{4\pi} \qquad (10)$$

Durch Elimination von R erhält man aus den Gleichungen (8) und (9)

$$A_2 = (p - U_2/4)^2 / (1 - \pi/4) \qquad (11)$$

Mit Hilfe der Beziehung (5) zwischen dem Umfang U und der Dehnung $\varepsilon$, die für beide Zustände 1 und 2 gültig ist, ergeben sich nach den Gleichungen (1) und (3) die Beziehungen

$$V_1 = \frac{(1+\varepsilon)^2 - 1}{\frac{4}{\pi} \left(\frac{p}{D_o}\right)^2 - 1} \qquad (12)$$

für eine beliebige Dehnung $\varepsilon$ vor der punktförmigen Berührung und

$$V_2 = 1 - \frac{\left[\frac{4}{\pi} \frac{p}{D_o} - (1 + \varepsilon)\right]^2}{(\frac{4}{\pi} - 1) \cdot \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{p}{D_o}\right)^2 - 1\right]} \qquad (13)$$

für eine beliebige Dehnung $\varepsilon$ nach der punktförmigen Berührung bis zu einem Versperrungsgrad $V_2 = 1$. Da bei gleichmäßiger Dehnung al-

ler Stäbe der Versperrungsgrad höchstens V = 1 werden kann, wird für weiter wachsende Dehnungen der Versperrungsgrad als V = const. = 1 angenommen.

Die punktförmige Berührung liegt dann vor, wenn der Durchmesser D des Hüllrohres gleich ist der Teilung p des Stabbündels.
Dann ist der Umfang $U_p$ des Hüllrohres

$$U_p = \pi \cdot p \qquad (14)$$

Nach Gleichung (5) ergibt sich somit eine Berührungsdehnung

$$\varepsilon_p = p/D_o - 1 \qquad (15)$$

Es zeigt sich, daß bei dieser Dehnung die Funktionen (12) und (13) sowie ihre ersten Ableitungen ohne Sprung ineinander übergehen.
Das bedeutet, daß der Verlauf des Versperrungsgrades über der Dehnung an der Stelle der punktförmigen Berührung glatt von einem Bereich in den anderen übergeht.
Die Versperrung hat bei der punktförmigen Berührung den Wert

$$V_p = \frac{(p/D_o)^2 - 1}{4/\pi \cdot (p/D_o)^2 - 1} \qquad (16)$$

Nach Gleichung (13) ist die maximale Versperrung $V_T = 1$ erreicht für

$$\varepsilon_T = 4/\pi \cdot (p/D_o) - 1 \qquad (17)$$

<u>Verlauf des Versperrungsgrades über der Dehnung</u>

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:
Die Umfangsdehnung bei der punktförmigen Berührung ist $\varepsilon_p = p/D_o - 1$ und der dazugehörige Versperrungsgrad

$$V_p = \frac{(p/D_o)^2 - 1}{4/\pi \cdot (p/D_o)^2 - 1}$$

Die Umfangsdehnung bei totaler Berührung ist $\varepsilon_T = 4/\pi \cdot (p/D_o) - 1$ und der dazugehörige Versperrungsgrad $V_T = 1$.
Der Verlauf des Versperrungsgrades über der Dehnung ist

$$V = \frac{(1+\varepsilon)^2 - 1}{4/\pi \cdot (p/D_o)^2 - 1} \qquad \text{für } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_P$$

und

$$V = 1 - \frac{\left[4/\pi \cdot (p/Do) - (1+\varepsilon)\right]^2}{(4/\pi - 1) \cdot \left[4/\pi \cdot (p/D_o)^2 - 1\right]} \qquad \text{für } \varepsilon_P \leq \varepsilon \leq \varepsilon_T$$

Für $\varepsilon \geq \varepsilon_T$ ist $V = \text{const.} = 1$.
Der so quantifizierte Verlauf ist in Abb. 4 für das Verhältnis $p/D_o = 1.33$ dargestellt. Dabei ergeben sich folgende Werte:

$\varepsilon_P$ = 33 %
$V_P$ = 61 %
$\varepsilon_T$ = 69,4 %
$V_T$ = 100 %

Versperrungsgrad im Stabbündel

In einem Bündelquerschnitt einer beliebigen axialen Höhe haben die einzelnen Stäbe im allgemeinen verschiedene Dehnungen.
Der Versperrungsgrad des gesamten Bündels wird durch Mittelung der Versperrungsgrade der einzelnen Stäbe ermittelt. Dies entspricht einer Aufsummierung der einzelnen freien Kühlkanalquerschnitte und anschließendem Bezug auf den gesamten freien Kühlkanalquerschnitt im Ausgangszustand. Dies ist richtig, da der Versperrungsgrad linear vom freien Kühlkanalquerschnitt abhängt und solange der freie Kühlkanalquerschnitt im Ausgangszustand für alle Stäbe der gleiche ist.
Werden im Bündelexperiment auch Regelstäbe simuliert, die einen größeren Durchmesser haben als die blähfähigen Hüllrohre im Ausgangszustand, so wird der Versperrungsgrad des Bündels wie folgt

berechnet. Der Versperrungsgrad $V_B$ des Bündels mit N Stäben einschließlich der Regelstäbe ist

$$V_B = \left( \sum_{i=1}^{N} A_{oi} - \sum_{i=1}^{N} A_i \right) \Big/ \sum_{i=1}^{N} A_{oi} \qquad (18)$$

wobei $A_i$ der freie Kühlkanalquerschnitt des i-ten Stabes ist und der Index O den Ausgangszustand kennzeichnet.
Setzt sich nun die Gesamtzahl N der Stäbe zusammen aus der Anzahl $N_R$ der Regelstäbe und der Anzahl $N_Z$ der blähfägigen Stäbe mit Zircaloy-Hüllen, so ergibt sich nach Gleichung (18)

$$V_B = \frac{(N_R \cdot A_R + N_Z \cdot A_{Zo}) - (N_R \cdot A_R + \sum_{i=1}^{N_Z} A_{Zi})}{N_R \cdot A_R + N_Z \cdot A_{Zo}} \qquad (19)$$

Daraus ergibt sich durch Erweiterung mit $(N_Z \cdot A_{Zo})$

$$V_B = \frac{N_Z \cdot A_{Zo}}{N_R \cdot A_R + N_Z \cdot A_{Zo}} \cdot \frac{N_Z \cdot A_{Zo} - \sum_{i=1}^{N_Z} A_{Zi}}{N_Z \cdot A_{Zo}} \qquad (20)$$

Hierbei kann man den ersten Teil als Korrekturfaktor für die Regelstäbe auffassen.

Der zweite Teil ist das arithmetische Mittel der Versperrungsgrade der blähfähigen Stäbe mit Zircaloy-Hüllen.

Somit gilt für den Versperrungsgrad des Bündels

$$V_B = F_R \cdot \frac{1}{N_Z} \cdot \sum_{i=1}^{N_Z} V_{Zi} \qquad (21)$$

wobei

$$F_R = \frac{1}{1 + \frac{N_R}{N_Z} \cdot \frac{A_R}{A_{Zo}}} \qquad (22)$$

Die freien Kühlkanalquerschnitte $A_R$ und $A_{Zo}$ im Ausgangszustand kann man noch durch die Teilung p und die Durchmesser $D_R$ des Regelstabes und $D_o$ des blähfähigen Stabes ausdrücken, so daß sich der Korrekturfaktor $F_R$ zu

$$F_R = \frac{1}{1 + \frac{N_R}{N_Z} \cdot \frac{\frac{4}{\pi}\left(\frac{p}{D_o}\right)^2 - \left(\frac{D_R}{D_o}\right)^2}{\frac{4}{\pi}\left(\frac{p}{D_o}\right)^2 - 1}} \qquad (23)$$

ergibt.
Bezüglich der Anwendung der Gleichung (21) muß betont werden, daß in die Mittelwertbildung nur die blähfähigen Stäbe und nicht die Regelstäbe einbezogen werden dürfen.

Die Beziehungen (21) und (23) sind allgemein anwendbar und zwar für Bündel mit und ohne Regelstäbe.

Messung der Dehnung

Die Umfangsdehnung der einzelnen Stäbe von Bündelexperimenten wird durch Messung des Durchmessers oder des Umfanges bestimmt. An axialen Stellen, an denen der Querschnitt der gedehnten Hüllrohre kreisförmig ist, wird der Mittelwert von zwei um 90° versetzten Durchmessern herangezogen. An den Stellen, an denen das Hüllrohr gequetscht oder geborsten ist, wird der Umfang mittels eines Meßstreifens ausgemessen.

An den Öffnungen der Berststellen zählt dabei der Umfang von Berstlippe zu Berstlippe unter Aussparung der Öffnung.
Die Dehnung $\varepsilon$ ergibt sich dann zu

$$\varepsilon = D/D_o - 1 \qquad (24) \quad \text{bzw.}$$

$$\varepsilon = U/(\pi \cdot D_o) - 1 \qquad (25)$$

wobei D der ausgemessene gemittelte Durchmesser und U der ausgemessene Umfang sind. $D_o$ ist der unverformte Ausgangsdurchmesser.

Diskussion:

Da den theoretischen Formeln zur Berechnung der Versperrungsgrade der einzelnen Unterkanäle eine gleichmäßige Dehnung aller Stäbe in einem Bündelquerschnitt zugrunde liegt, gelten die Formeln für unsymmetrisch gequetschte oder geborstene Hüllrohre sowie für Hüllrohre, die Regelstäben benachbart sind, nur eingeschränkt.
Dazu werden zwei Extremfälle betrachtet, die zwar kaum vorkommen werden, jedoch zur Beurteilung statistisch auftretender Fälle dienlich sind.
Der eine Extremfall ist der, daß ein Einzelrohr auch für hohe Dehnungen ($\varepsilon > 33\%$) kreisförmig bleiben kann.
Dann gilt Gleichung (12) auch über $\varepsilon_p$ (33%) hinaus, so daß sich die Kurve H der Abb. 5 ergibt. Die Kurve H ist die oberste Begrenzung des Versperrungsgrades des Einzelstabes. Dieser Fall ist nur dann denkbar, wenn die Nachbarstäbe weniger oder gar nicht dehnen. Bei sehr hohen erreichten kreisförmigen Dehnungen müßte zusätzlich noch eine Ausweichbewegung der Nachbarstäbe stattgefunden haben.

Der andere Extremfall, die unterste Grenze des Versperrungsgrades, ist der Fall, daß das einzelne Hüllrohr durch die Nachbarstäbe in der Weise bei der Dehnung behindert wird, daß es seine Querschnittsfläche gegenüber dem Ausgangsquerschnitt nicht (bzw. kaum) vergrößern kann.
Dazu dürfte die dehnende Hüllrohrwand ausgehend von der ursprünglichen Kreisform lediglich dünne lappenartige Formen bilden. Realistisch ist dieser Fall wohl kaum, aber es ist gewiß die unterste Grenze des Versperrungsgrades. Der Versperrungsgrad würde dann für alle Dehnungen Null (oder nahezu Null) bleiben.

Statistisch kann nun ein Einzelstab des Bündels abhängig von seiner Dehnung jeden beliebigen Versperrungsgrad zwischen der untersten Grenze V = O und der oberen Grenze H annehmen, allerdings mit verschiedener Wahrscheinlichkeit. Die wahrscheinlichste Abhängigkeit des Versperrungsgrades des Einzelrohres von seiner Umfangsdehnung ist eigentlich nur durch Ausmessen der Stäbe vieler Bün-

delexperimente bezüglich Dehnung und Querschnittsfläche sowie statistischer Auswertung zu ermitteln. Vermutungen gehen allerdings dahin, daß die Fälle, die in Richtung zur oberen Begrenzung H tendieren, häufiger vorkommen könnten als jene, die zur untersten Begrenzung hin tendieren.
Eine quantitative Angabe ist jedoch bislang nicht möglich, so daß weiterhin die oben hergeleiteten Beziehungen für den Versperrungsgrad in Abhängigkeit von der Dehnung verwendet werden.

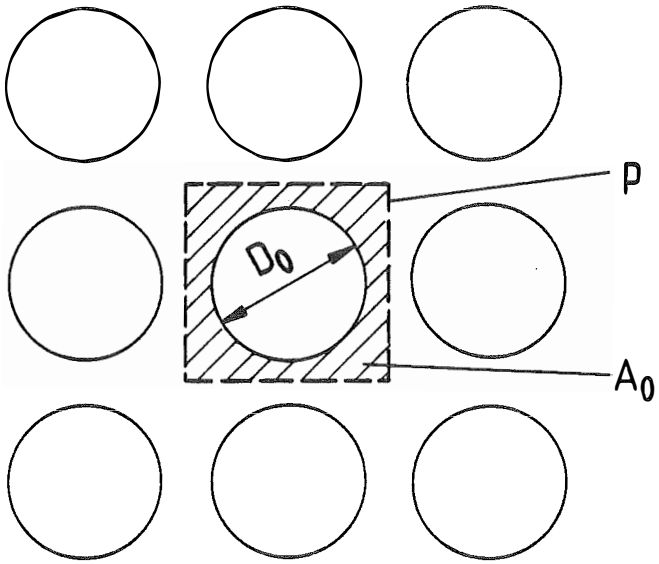



Abb. 1 Unverformte Bündelgeometrie

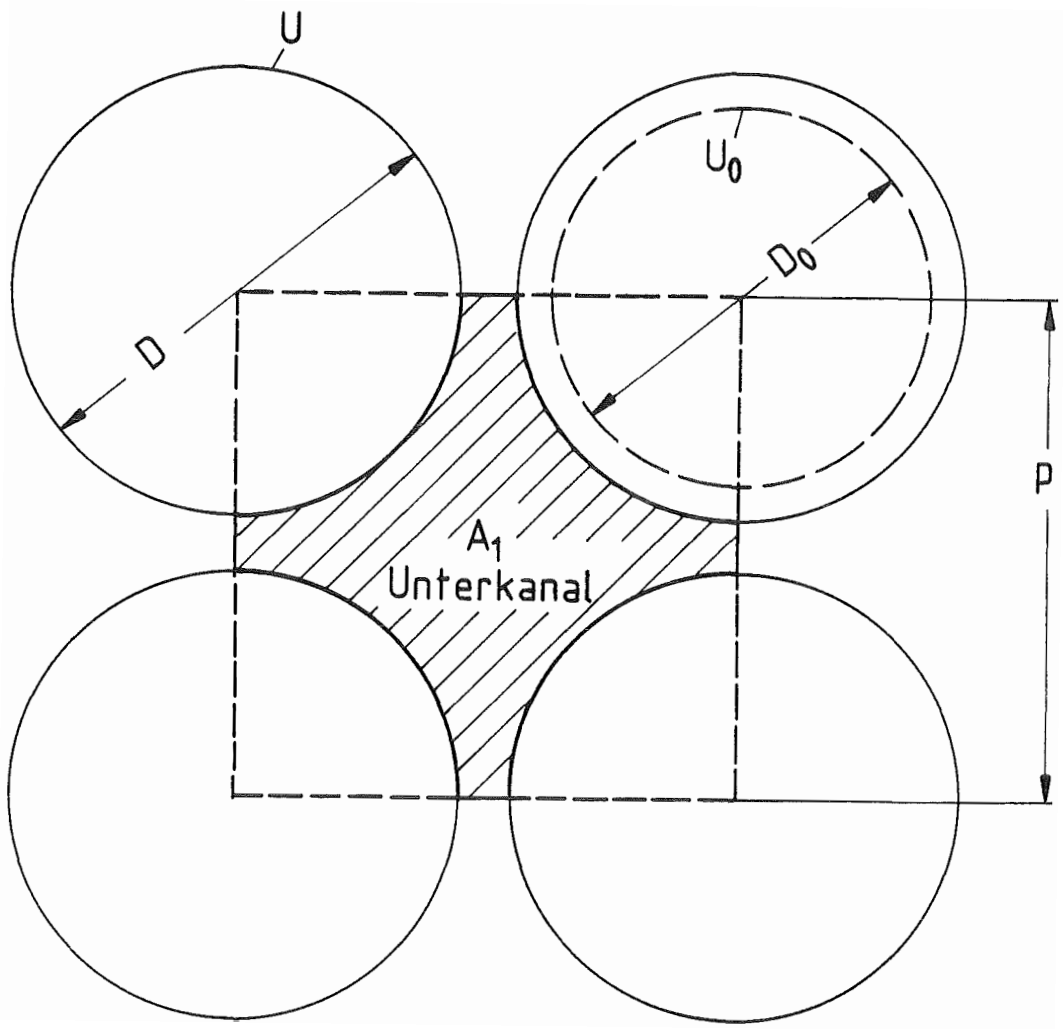



Abb. 2 Unterkanal vor Stabberührung

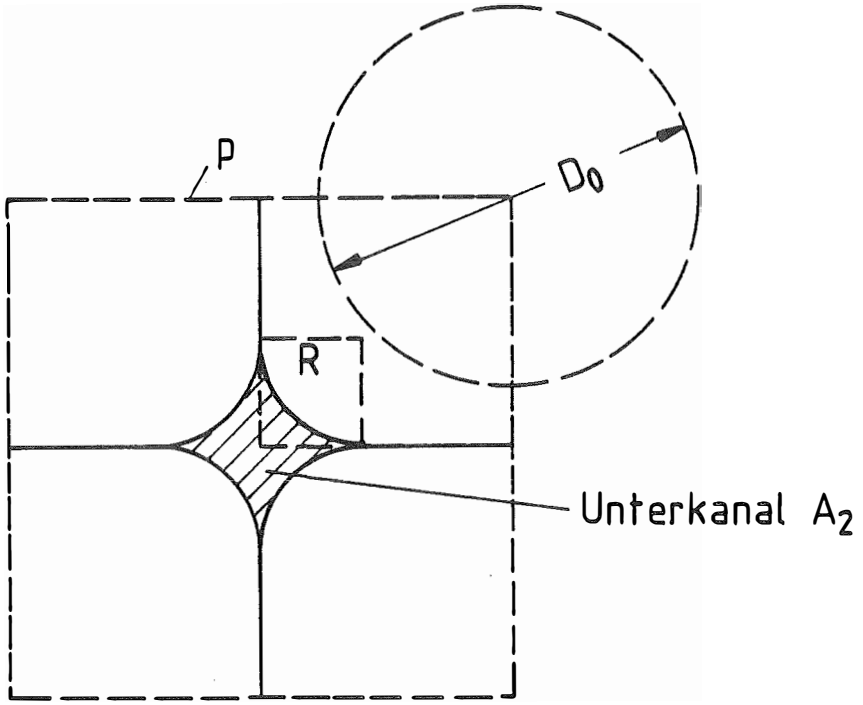



Abb. 3 Unterkanal nach Stabberührung

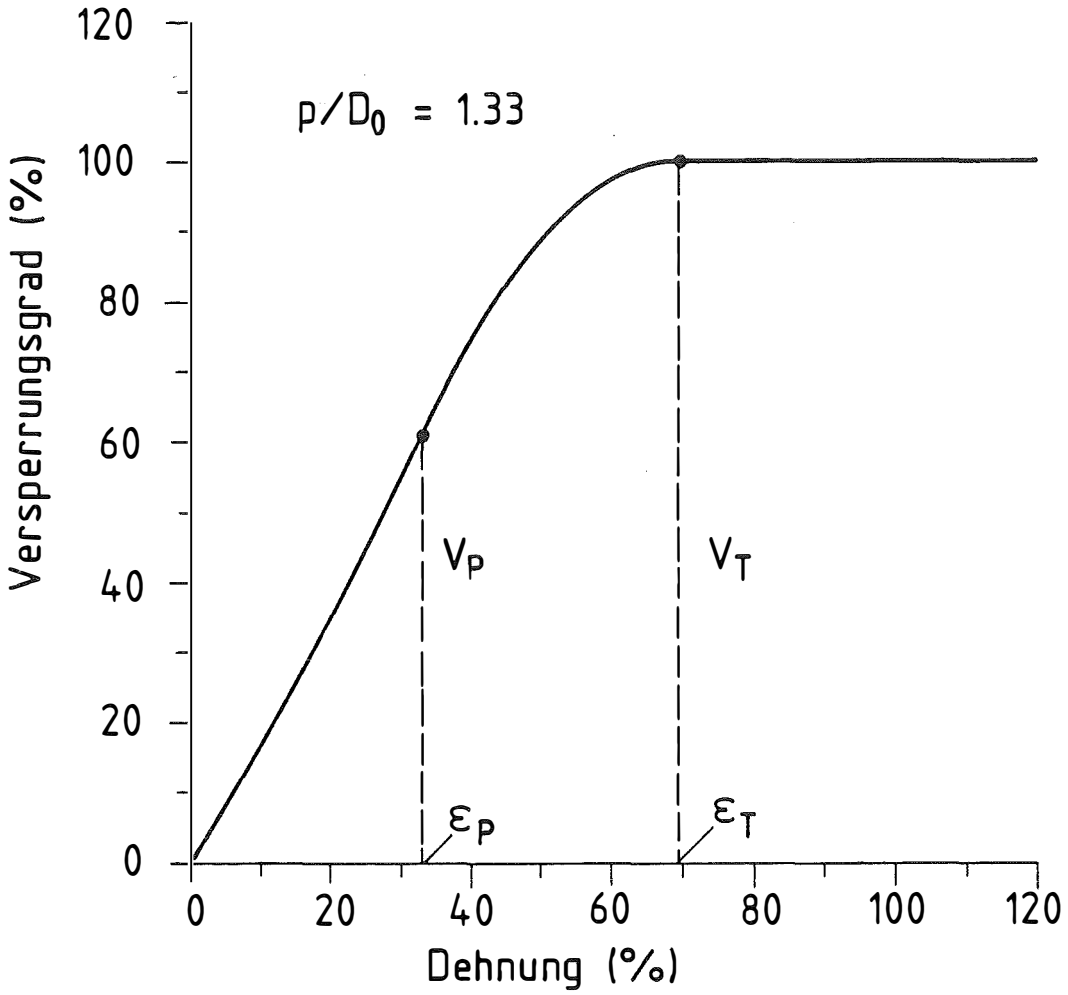



Abb. 4 Versperrungsgrad in Abhängigkeit der Dehnung für den Einzelstab bei gleichmäßiger Dehnung aller Stäbe im Bündel

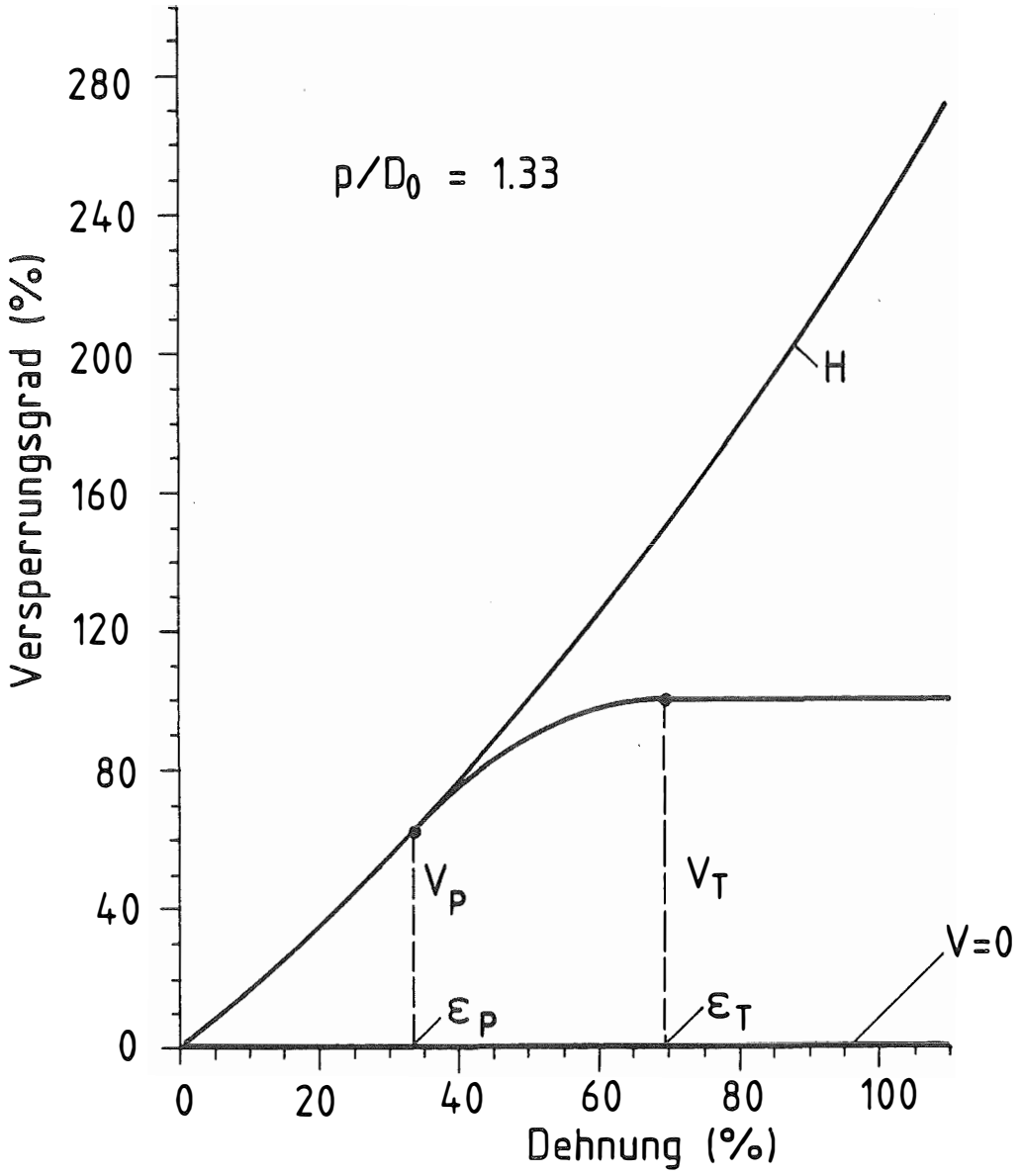



Abb. 5 Theoretischer Versperrungsgrad mit oberer und unterer Begrenzung statistisch auftretender Versperrunsgrade