4238 Untersuchungen zum Brennstabverhalten in der Niederdruckphase eines hypotetischen Kühlmittelverluststörfalles und zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zirkaloy-Hüllrohren und einsetzender Kernnotkühlung (REBEKA - Programm+))

(K. Wiehr, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J. Neitzel, P. Schäffner, He. Schmidt, IRB)

1. Zielsetzung des Vorhabens ist die Erarbeitung experimenteller Informationen über den Aufblähvorgang von Zirkaloyhüllen während der Niederdruckphase eines Kühlmittelverluststörfalles. Einzelstab- und Bündelexperimente liefern Meßwerte zur Überprüfung und Weiterentwicklung von Rechenprogrammansätzen des Codesystems SSYST zur Beschreibung des Brennstabverhaltens.

   Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte auf der Durchführung folgender Arbeiten:

   - Versuche an verkürzten Brennstabsimulatoren
     . unter simulierten Temperaturtransienten für Normal- bis Heißstäbe
     . bei Variation der isothermen Starttemperatur zur Verdeutlichung des Einflusses der azimutalen Temperaturdifferenz auf die Berstumfangsdehnung

   - Vorversuche zum Bündelexperiment mit Fluten
     . zur Bestimmung der Aufheizraten
     . zur Isothermie der Teststrecke
     . zur Festlegung der Flutwassersteiggeschwindigkeit
     . zur Bestimmung des Flutzeitbeginns bei 760°C Hüllentemperatur

   - Erstes Bündelexperiment mit 25 Brennstabsimulatoren voller Länge und axialem Leistungsprofil sowie Fluten.

   - Versuchsauswertung

+) REBEKA = reaktortypisches Bündel-Experiment Karlsruhe
bzw. reactor typical bundle experiment Karlsruhe

1. Untersuchungen mit verkürzten Brennstabsimulatoren

1.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit einem verkürzten Brennstabsimulator von 325 mm Länge durchgeführt. Sie orientierten sich an Temperaturtransienten, wie sie für einen Kühlmittelverluststörfall mit 2F-Bruch im kalten Strang errechnet wurden, und zwar für den Bereich zwischen Normal- und Heißstab. Die erwarteten Temperaturverläufe wurden über eine Leistungssteuerung simuliert.

Den schematischen Aufbau des Prüfstandes zeigt Abb. 4238-1. Die Abb. 4238-2 zeigt einen Versuchsverlauf für eine isotherme Starttemperatur von 300°C. Geplottet sind 4 azimutale Hüllrohrtemperaturen, der Innendruck und der dazugehörige Spannungs- und Stromverlauf.

Die Mehrzahl der Versuche hatte eine isotherme Starttemperatur von 600°C. Typisch für diese Versuchsserie ist das Aufheizen des Brennstabsimulators auf etwa 620°C, das Abstellen der Leistung und das Abwarten, bis bei etwa 600°C ein Ausgleich azimutaler Temperaturunterschiede auf der Hülle stattgefunden hat. Das Dampfführungsrohr selbst ist nicht beheizt. Die abwärtsgerichtete Dampfströmung hat eine Eintrittstemperatur von 150°C und eine Geschwindigkeit von 0,6 m/s. Von diesem Zustand aus wird der Stab mit einem Innendruck von 70 bar beaufschlagt und mit etwa 10 K/s aufgeheizt. Mit Erreichen einer bestimmten Temperatur, z. B. 760°C, wird die Leistung auf einen niedrigeren Wert heruntergeschaltet. Dampfkühlung und Strahlungsverluste an das kältere Dampfrohr entsprechen etwa der Wärmesenke in der Flutphase. Die anstehende reduzierte Leistung, die Größe der Wärmesenke und das sich daraus einstellende Temperaturplateau entsprechen etwa jeweils den Verhältnissen des zu simulierenden Brennstabes.

1.2 Ergebnisse

Die Temperaturverläufe in Abb. 4238-2 zeigen, daß bei völligem Ausgleich aller Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohr bei etwa 300°C sich unter den angegebenen Leistungs-Kühlungs-Bedingungen wieder azimutale Temperaturdifferenzen ausbilden können. Selbst bei einer isothermen Starttemperatur von 600°C ist dies noch der Fall.

Ausgangsexzentrizitäten in der Lage der Pelletsäule zur Zirkaloyhülle, d. h. unterschiedlich große Spalte auf dem Umfang zwischen Pellets und Zirkaloyhülle, führen bei Aufheizung des Hüllrohres von innen und äußerer Wärmesenke zur Ausbildung von azimutalen Temperaturunterschieden auf der Hülle. Mit beginnender plastischer Verformung wird dadurch eine Verbiegung des Hüllrohres verursacht. Da die wärmere Seite des Hüllrohres an der Pelletsäule weiterhin anliegt, die gegenüberliegende kältere Seite jedoch deutlich abhebt, führt dies zu einer Vergrößerung der azimutalen Temperaturunterschiede auf der Hülle. Je größer die sich ausbildende Temperaturdifferenz bis zum Berstzeitpunkt werden kann, umso kleiner wird die entstehende Berstumfangsdehnung, da die Wandstärkenabnahme dann auf den heißen Teil des Hüllrohrumfangs lokal begrenzt bleibt.

Abb. 4238-3 ist eine vereinfachte stilisierte Darstellung der Versuche. Die Temperaturplateaus von 670 und 700°C liegen bereits oberhalb derjenigen, wie sie für Normalstäbe erwartet werden. Selbst nach 10 Minuten Haltezeit sind diese Hüllrohre nicht geborsten. - Mit zunehmender Höhe der Temperaturplateaus werden die Zeiten auf diesen Niveaus immer kürzer und wie Abb. 4238-4 zeigt, nehmen die Berstumfangsdehnungen zu. Die abwärts gerichtete Dampfströmung verschiebt das Dehnungsmaximum und die Berststellen aus der Stabmitte gegen das untere Stabende bzw. den tiefer sitzenden Abstandshalter.

Umfangsdehnungen größer als 33 %, was ein gegenseitiges Berühren benachbarter, aufblähender Stäbe bedeuten würde, sind auf eine relativ kurze Länge um die Berststelle begrenzt. Große axial ausgedehnte Hüllrohrverformungen wurden in keinem Fall beobachtet.

Abb. 4238-5 zeigt die Zusammenhänge zwischen der Versuchszeit, während der sich Temperaturunterschiede auf dem Umfang ausbilden können, der azimutalen Temperaturdifferenz und der Berstumfangsdehnung. Die Versuchsführung der drei dargestellten Experimente war derart angelegt, daß sich unterschiedlich große azimutale Temperaturunterschiede ausbilden können. Versuch 60 startet ab 300°C isotherm in die Rampe und ab 760°C stehen erzeugte Wärme und äußere Kühlung im Gleichgewicht. 92 Sekunden stehen bis zum Bersten zur Verfügung, um azimutale Temperaturunterschiede ausbilden zu können. - Bei Versuch 61 ist diese Zeit deutlich kürzer, nur 57 s, da der Rampenstart bei 600°C isotherm erfolgt und das Bersten in einem Temperaturplateau von 785° geschieht. -

Versuch 63 ist ein reiner Rampenversuch, bei dem jedoch das Dampfführungsrohr mit der gleichen Temperaturrampe beaufschlagt wird. Durch diese Prozeßführung wird die Möglichkeit, daß sich auf der Zirkaloyhülle azimutale Temperaturunterschiede ausbilden können, weitgehend unterbunden. - Derartige adiabate Randbedingungen treten in keiner Phase eines Kühlmittelverluststörfalles auf, sie stellen jedoch für das Verständnis des Verformungsverhaltens der Zirkaloyhüllrohre eine aufschlußreiche Versuchsführung dar.

Die bei diesen Versuchsführungen entstandenen azimutalen Temperaturdifferenzen zum Berstzeitpunkt betragen 64, 18 und 3 K. Dazu gehören Berstumfangsdehnungen von 39, 67 und 83 %. Dies bedeutet: Große azimutale Temperaturdifferenzen geben kleine Berstumfangsdehungen, kleine azimutale Temperaturdifferenzen große Umfangsdehnungen.

Abb. 4238-6 zeigt Schnittbilder der Hüllrohre aus diesen drei Versuchen, im oberen Teil an der Berststelle, darunter einen Schnitt 10 mm oberhalb der Berstebene. Das Hüllrohr mit den großen Temperaturunterschieden auf dem Umfang (Versuch 60) zeigt im Bereich der Berstmantellinie die größte Hüllrohrwandstärkenabnahme. Hier herrschten der enge Spalt, die höhere Temperatur und demzufolge auch die größte Verformung. Die gegenüberliegende, kältere Seite zeigt praktisch noch die Ausgangswandstärke. Die Umfangsdehnung entsteht also überwiegend durch eine örtlich auf einen Teil des Gesamtumfangs begrenzte Wandstärkenverschwächung. Das Hüllrohr aus Versuch 61, das während des Versuchs die geringeren azimutalen Temperaturdifferenzen aufweist, zeigt bereits eine gleichmäßigere Abnahme der Hüllrohrwandstärke über den Umfang und birst bei einer Umfangsdehnung von 67 %. Im Fall des Versuchs 63 mit einer ganz geringen azimutalen Temperaturdifferenz findet die Wandstärkenabnahme noch gleichmäßiger auf dem ganzen Umfang statt, und bis zum Bersten werden hier 83 % Umfangsdehnung erreicht.

Eine gleichmäßige Wandstärkenverschwächung auf dem Umfang liegt auch bei direkt beheizten Hüllrohrexperimenten vor. Die Versuchsführung des direkten Beheizens verhindert die Ausbildung azimutaler Temperaturdifferenzen und führt daher zwangsläufig zu den bekannten großen Berstumfangsdehnungen.

In Abb. 4238-7 sind nun sämtliche Hüllrohrberstexperimente eingetragen, bei denen die azimutale Temperaturverteilung gemessen wurde. Aufgetragen ist

die Berstumfangsdehnung über der azimutalen Temperaturdifferenz. Die Tendenz ist deutlich zu erkennen: Kleine Temperaturdifferenzen auf dem Umfang geben große Berstumfangsdehungen, große Temperaturdifferenzen kleine Umfangsdehnungen. Die aufgezeigten Zusammenhänge führen zu folgenden Schlüssen:

- Der Deformationsmechanismus und die maximal entstehenden Berstumfangsdehnungen der Zirkaloyhülle werden maßgeblich von der Größe der auftretenden azimutalen Temperaturverteilung beeinflußt.

- Experimente, bei denen durch die Versuchsführung eine Ausbildung von azimutalen Temperaturdifferenzen verhindert wird (z. B. durch Direktbeheizung) führen zu unrealistisch großen Umfangsdehnungen der Zirkaloyhülle.

2. Erster Out-of-pile-Bündelversuch

Der Bündelversuch, durchgeführt unter Versuchsrandbedingungen, die die Verhältnisse von mittelbelasteten Brennstäben in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles eines Druckwasserreaktors simulieren, sollte zeigen, ob möglicherweise Effekte auftreten, die von Einzelstabexperimenten nicht bekannt sind.

2.1 Versuchsaufbau

Abb. 4238-8 zeigt die Anordnung von 25 Brennstabsimulatoren im Bündel. Sämtliche Brennstabsimulatoren haben Original-DWR-Abmessungen, wobei das axiale Leistungsprofil durch 7 Leistungsstufen simuliert wird. Das in den Stäben eingeschlossene Helium ist auf einen mittleren radialen Spalt von 50 µm, sowie das untere und obere Plenum in Originalvolumina verteilt. Die Brennstabsimulatoren werden in einem dünnwandigen, längs zugeschweißten Kasten aus Inconel durch Original-Abstandshalter geführt. Dieser Kasten sitzt im Druckrohr der Teststrecke. Zwischen Elementkasten und Druckrohr befindet sich als Zwischenisolation gesättigter Wasserdampf.

Die äußere Stabreihe im Bündel unterscheidet sich von den inneren 9 Stäben im wesentlichen nur dadurch, daß sie Hüllen aus Inconel besitzt, die sich

während des Versuchs nicht verformen. Diese Stäbe dienen der Simulation der thermischen Umgebung.

Etwa 130 Meßstellen werden registriert, wovon 120 Meßstellen über eine schnelle Datenerfassung aufgezeichnet werden. Davon entfallen auf die reine Bündelinstrumentierung 83 Temperatur- und 9 Druckmeßstellen.

2.2 Versuchsführung

Abb. 4238-9 zeigt im unteren Teil des Bildes schematisch die Versuchsführung. Der obere Kurvenzug zeigt den typischen Verlauf einer Hüllentemperatur. Ausgehend von einem isothermen Zustand in der ganzen Teststrecke von 175°C, wird die Teststrecke bei leichter Dampfströmung durch Hochheizen der Brennstabsimulatoren auf etwa 520° C gebracht. Die elektrische Leistung wird wieder abgeschaltet und der Innendruck von 70 bar aufgegeben. Zwanzig Sekunden später wird das Druckaufgabesystem abgeschlossen. Nach etwa 1 Minute wird die elektrische Leistung auf die Brennstabsimulatoren wieder zugeschaltet und bleibt bis zum Versuchsende stehen. Die Wiederaufheizphase beginnt, und mit Einspeisung des Notkühlwassers wird die Flutphase eingeleitet.

Temperatur- und Druckverläufe stellen sich nun bei anstehender Leistung durch die Einwirkung des Flutens und das Verformen der Zirkaloyhüllen völlig selbständig ein. Die Verformung der Zirkaloyhüllen endet mit dem Bersten, spätestens jedoch mit dem Quenchen der Hüllrohre.

Die für das Experiment gewählten Versuchsdaten sind im oberen Teil der Abbildung angegeben.

2.3 Ergebnisse

- Es konnte nachgewiesen werden, daß eine Stabreihe von Brennstabsimulatoren ohne verformungsfähige Hüllen in einem Bündel ausreichend ist, um den inneren Brennstabsimulatoren vorzutäuschen, sie befänden sich in einem großen Bündelverband - auch in der Flutphase.

- Abb. 4238-10 zeigt das Verhalten des Zentralstabes, der von der isothermen Starttemperatur aus durch eine höhere Leistung etwas rascher aufgeheizt wurde, um zum Flutbeginn eine um etwa 30 K höhere Hüllentemperatur aufzuweisen. Dadurch sollte er sich bereits in der Wiederaufheizphase verformen und kurz nach Flutbeginn als erster Stab im Bündel bersten. Die Hülle verformte sich wie vorgesehen bereits in der Temperaturrampe, und auch stärker als die der Nachbarstäbe, gekennzeichnet durch einen frühen Innendruckabfall bereits in der Rampe, jedoch platzte sie nicht als erste. Zum Flutbeginn hatte diese Hülle wegen des großen Spaltes nämlich keinen guten Wärmekontakt zu ihrer Wärmequelle mehr, und diese führte beim Einsetzen des Flutens wegen der relativ geringen Wärmekapazität der Zirkaloyhülle zu einem Temperatureinbruch von 187 K. Die Hüllrohrtemperatur stieg zwar noch einmal an, konnte jedoch an dieser Stelle keine Temperaturen mehr erreichen, die noch zu größeren Verformungen hätten führen können. Das Wiederbenetzen der Hülle erfolgte schließlich 240 Sekunden nach Flutbeginn - ohne Bersten. Der weitere Druckverlauf ist das Ergebnis des sich abkühlenden Gases und der sich verformenden Zirkaloyhülle.

- Abb. 4238-11 zeigt das Verhalten von zwei dem Zentralstab benachbarten Stäben. Aufgetragen sind die Innentemperatur TI 22/1 und die in gleicher Höhe außen liegende Temperaturmeßstelle TH 22, die gleiche Meßstellenpaarung des zweiten Stabes mit TI 29/1 und TH 29, sowie der Innendruckverlauf des Stabes 22. Da die Hüllen zum Zeitpunkt des Flutbeginns weniger abgehoben hatten, betrug der Temperaturabfall auch nur 90 K. Die Hüllentemperaturen erreichten nach kurzer Zeit fast wieder ihren Maximalwert, um dann jedoch unterschiedlich stark abzufallen. Dies ist auf unterschiedlich starke Verformungen der Hüllen zurückzuführen.

  Das Hüllrohr des Stabes 29 verformte sich stärker, der Spalt zwischen Wärmequelle und Hülle war größer und der Wärmetransport zur Hülle geringer, was bei gleichen Kühlbedingungen für beide Hüllen einerseits zu einer stärkeren Abkühlung der Hülle 29 führte und andererseits zu einem stärkeren Ansteigen der Heizstabtemperaturen im Innern dieses Brennstabsimulators. Die Hülle dieses Stabes 29 quencht früher - 176 Sekunden nach Flutbeginn - ohne zu bersten. Die maximale Umfangsdehnung betrug 32 %. Die Temperaturdifferenz zwischen Zirkaloyhülle und Heizstabhülle stieg bis zum Quenchzeitpunkt auf 275°C an.

Stab 22 quenchte 197 Sekunden nach Flutbeginn. Er erreichte eine maximale Umfangsdehnung von nur 11 % sowie eine Temperaturdifferenz zwischen Zirkaloy- und Heizstabhülle von nur 157°C.

- Abb. 4238-12 zeigt den Druck- und Temperaturverlauf eines geborstenen Stabes. 105 Sekunden nach Flutbeginn barst die Hülle. Auffallend am Temperaturverlauf ist das frühzeitige Wiederbenetzen der Hülle kurz nach dem Bersten.

- Abb. 4238-13 zeigt den Mittelteil der höchst belasteten Zone im Bündel. Es gibt keine Stelle im Bündel, an der man nicht aus irgendeiner Richtung frei zwischen den Stäben hindurchsehen könnte. Um die Abstandshalter liegen Zonen geringster Umfangsdehnung, überwiegend verursacht durch die lokale Kühlwirkung. Das Verformungsbild zwischen den Abstandshaltern zeigt eine Verschiebung der maximalen Umfangsdehnungen in Strömungsrichtung zum nächsthöheren Abstandshalter hin. Die beiden Berststellen sind deutlich zu erkennen.

- Abb. 4238-14 zeigt die geborstene Hülle 67 in Seitenansicht und Draufsicht. Das äußere Erscheinungsbild ist aus Einzelstabexperimenten mit verkürzten Brennstabsimulatoren und mit Brennstabsimulatoren voller Länge bekannt und läßt auf große azimutale Temperaturunterschiede an der Berststelle schließen, was wiederum die geringen Berstumfangsdehnungen erklärt. Das gleiche gilt für die geborstene Hülle des zweiten Stabes 76.

- Abb. 4238-15 zeigt die Auftragung der Umfangsdehnung aller 9 Zirkaloyhüllen über der ganzen Stablänge von 3,9 m. Unten im Bild ist die axiale Leistungsverteilung im Stab angegeben. Die maximal aufgetretenen Umfangsdehnungen an den einzelnen Stäben liegen zwischen 8 und 32 %. Die dehnungsverhindernde Wirkung der Abstandshalter ist deutlich zu erkennen.

- Nur zwei Zirkaloyhüllen kamen zum Bersten und erreichten Berstumfangsdehnungen von 24,2 % bzw. 30,6 %. Keine axial lang ausgedehnten Verformungen großer Umfangsdehnung waren aufgetreten.

- Die in der Wiederauffüll- und Flutphase entstandenen Verformungen in diesem Experiment sind so gering, daß sich Stäbe aufgrund von Umfangsdehnungen

nicht einmal hätten berühren können. Nur an einer Stelle trat Berührung zweier Stäbe durch eine Stabverbiegung auf.

- Die unter den eingestellten Versuchsbedingungen erzeugten Hüllrohrdeformationen führten zu keinerlei Beeinträchtigung der Kühlbarkeit.

3. Literatur

/1/ F. Erbacher, H. J. Neitzel, M. Reimann, K. Wiehr, "Ballooning in Zirkaloy Fuel Rod Claddings in a Loss-of-Coolant Accident", ANS-Topical-Meeting on "Thermal Reactor Safety", July 31 - August 7, 1977, Sun Valley, Idaho, USA.

/2/ K. Wiehr, H. Schmidt, "Out-of-pile Versuche zum Aufblähvorgang von Zirkaloyhüllen - Ergebnisse aus Vorversuchen mit verkürzten Brennstabsimulatoren", KFK-2345 (Oktober 1977).

/3/ K. Wiehr, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J. Neitzel, P. Schäffner, H. Schmidt, "Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles", Jahreskolloquium 1977 des Projekts Nukleare Sicherheit, KFK-2570.

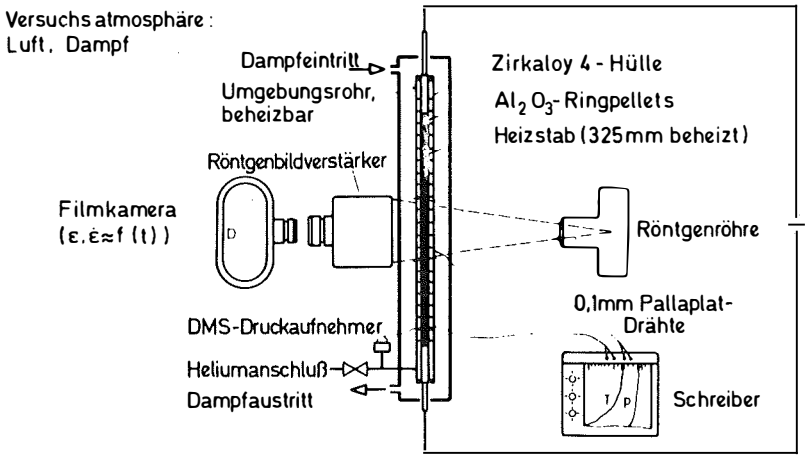


Abb. 4238-1 Prüfstand für Einzelstabversuche an verkürzten Brennstabsimulatoren

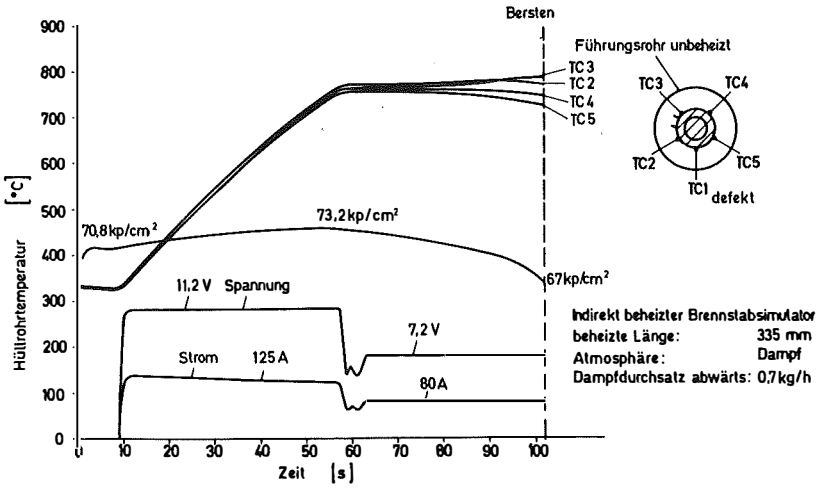


Abb. 4238-2 Berstversuch Nr. 60 unter simulierten Temperaturtransienten

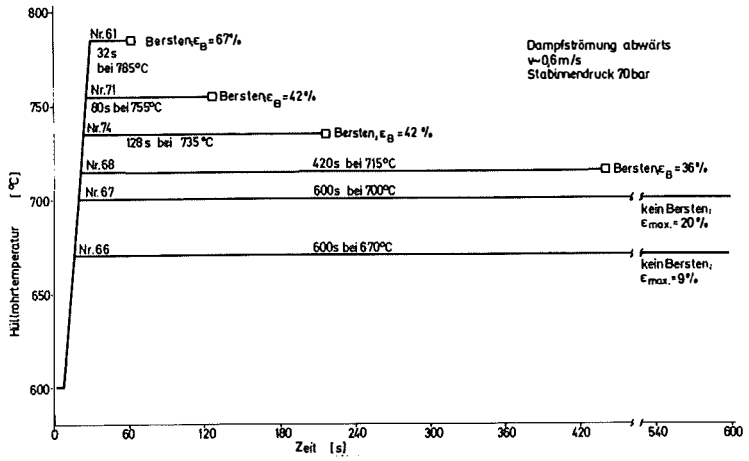


Abb. 4238-3 Verformungsversuche unter simulierten Temperaturtransienten - vereinfachte Darstellung -

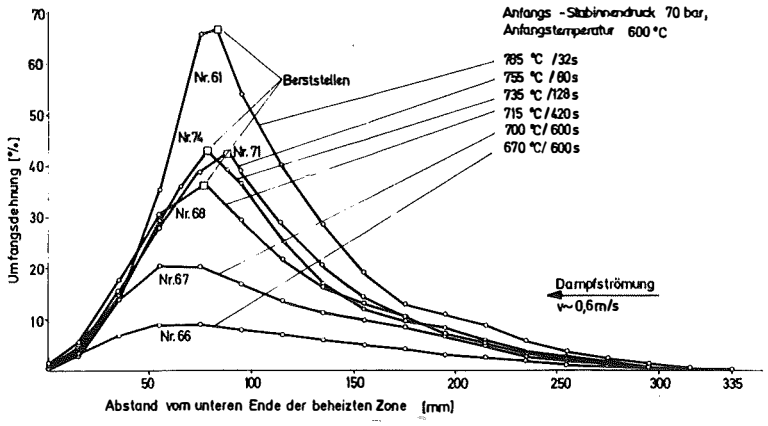


Abb. 4238-4 Umfangsdehnung über der Stablänge unter simulierten Temperaturtransienten

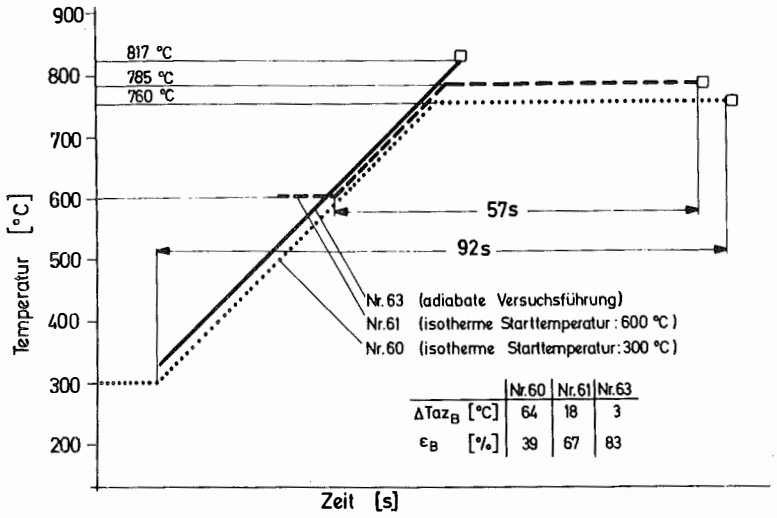


Abb. 4238-5 Versuchsführung, schematisch

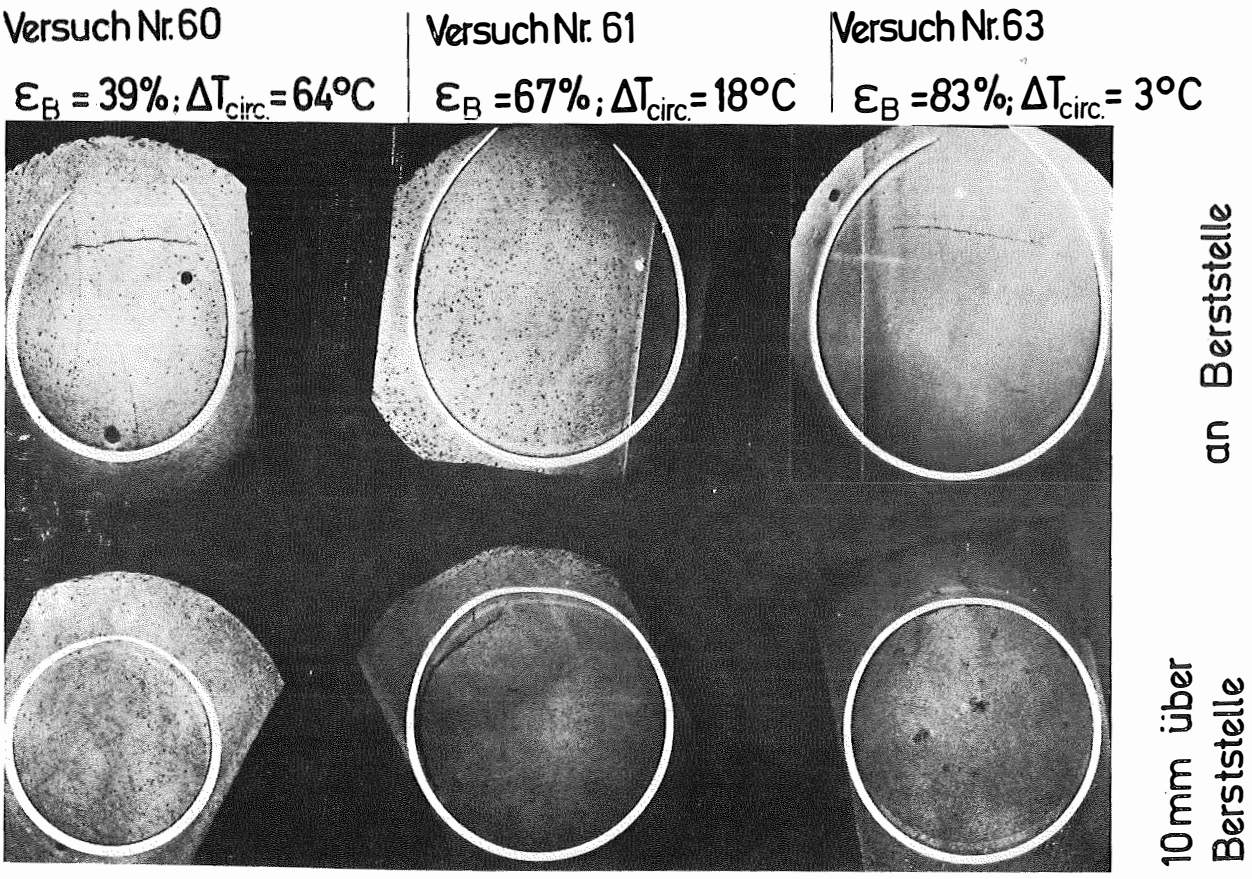


Abb. 4238-6 Schliffbilder geborstener Zirkaloyhüllen, Einfluß der azimutalen Temperaturdifferenz

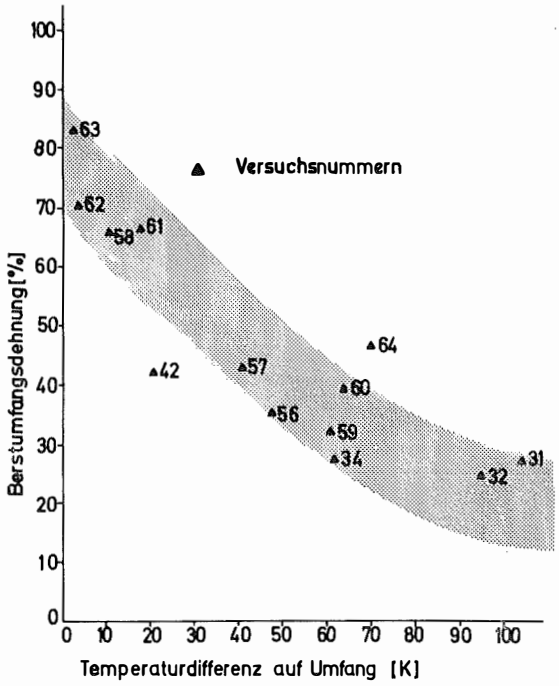
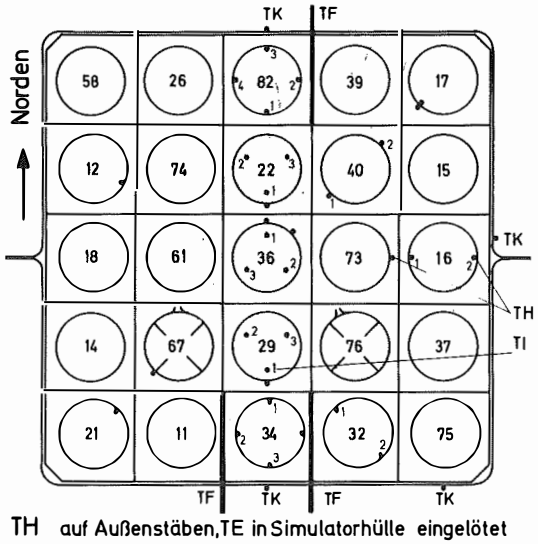


Abb. 4238-7 Berstumfangsdehnung über Temperaturdifferenz auf Umfang



TH auf Außenstäben, TE in Simulatorhülle eingelötet

TH auf Innenstäben, TE auf Zirkaloyhülle angepunktet

TI auf Innenstäben, TE in Heizstabhülle eingelötet

TK Kastenthermoelemte

TF Fluidthermoelemente

Abb. 4238-8 Bündelquerschnitt und Thermoelementanordnung

- Isotherme Starttemperatur	520 °C
- Stabinnendruck	70 bar
- Nachwärmeleistung	20 W/cm
- Wärmeübergangszahl in Wiederauffüllphase	≈ 30 W/m²K
- Hüllrohrtemperatur bei Flutbeginn	760 - 790 °C
- Flutrate, kalt	~ 3 cm/s
- Flutwassertemperatur	130 °C
- Systemdruck	4 bar

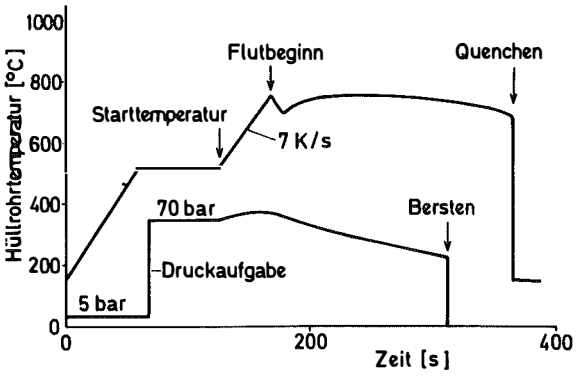


Abb. 4238-9 Versuchsdaten und Versuchsführung für Bündelversuch

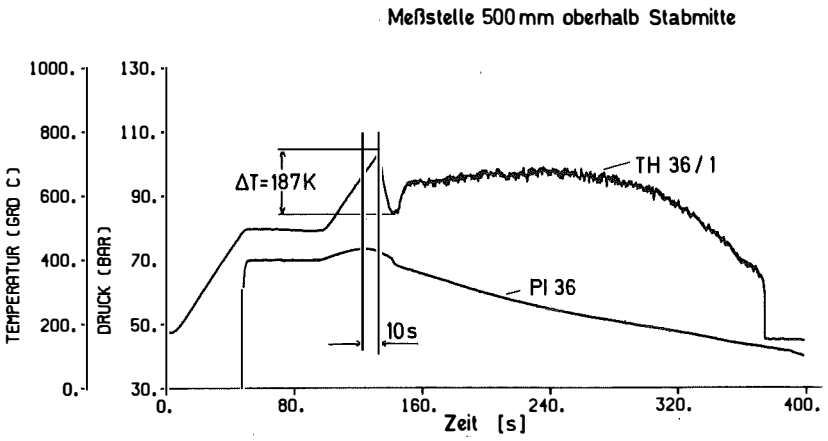


Abb. 4238-10 Hüllentemperatur und Innendruck des Zentralstabes

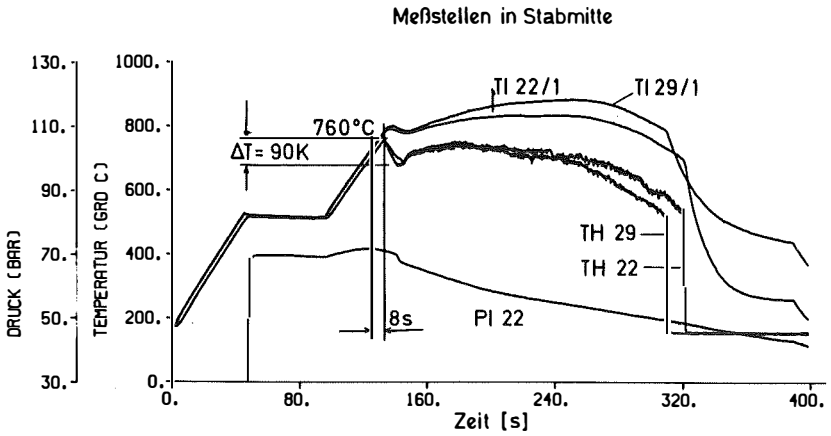


Abb. 4238-11 Temperaturen und Innendruck der Stäbe 22 und 29

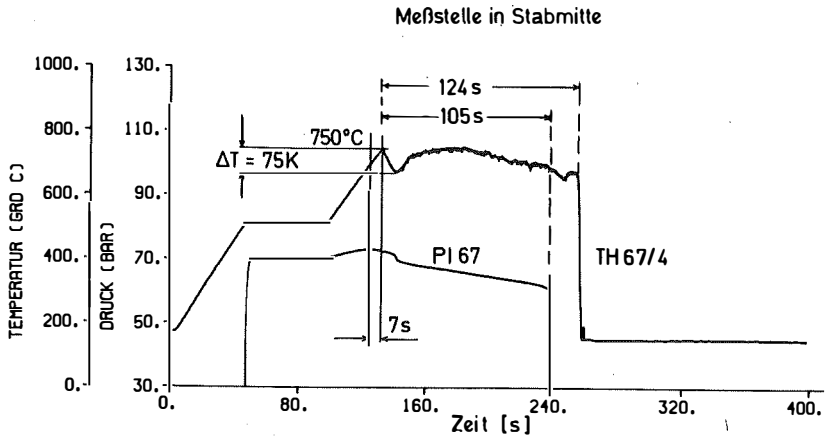


Abb. 4238-12 Hüllentemperatur und Innendruck des geborstenen Stabes 67

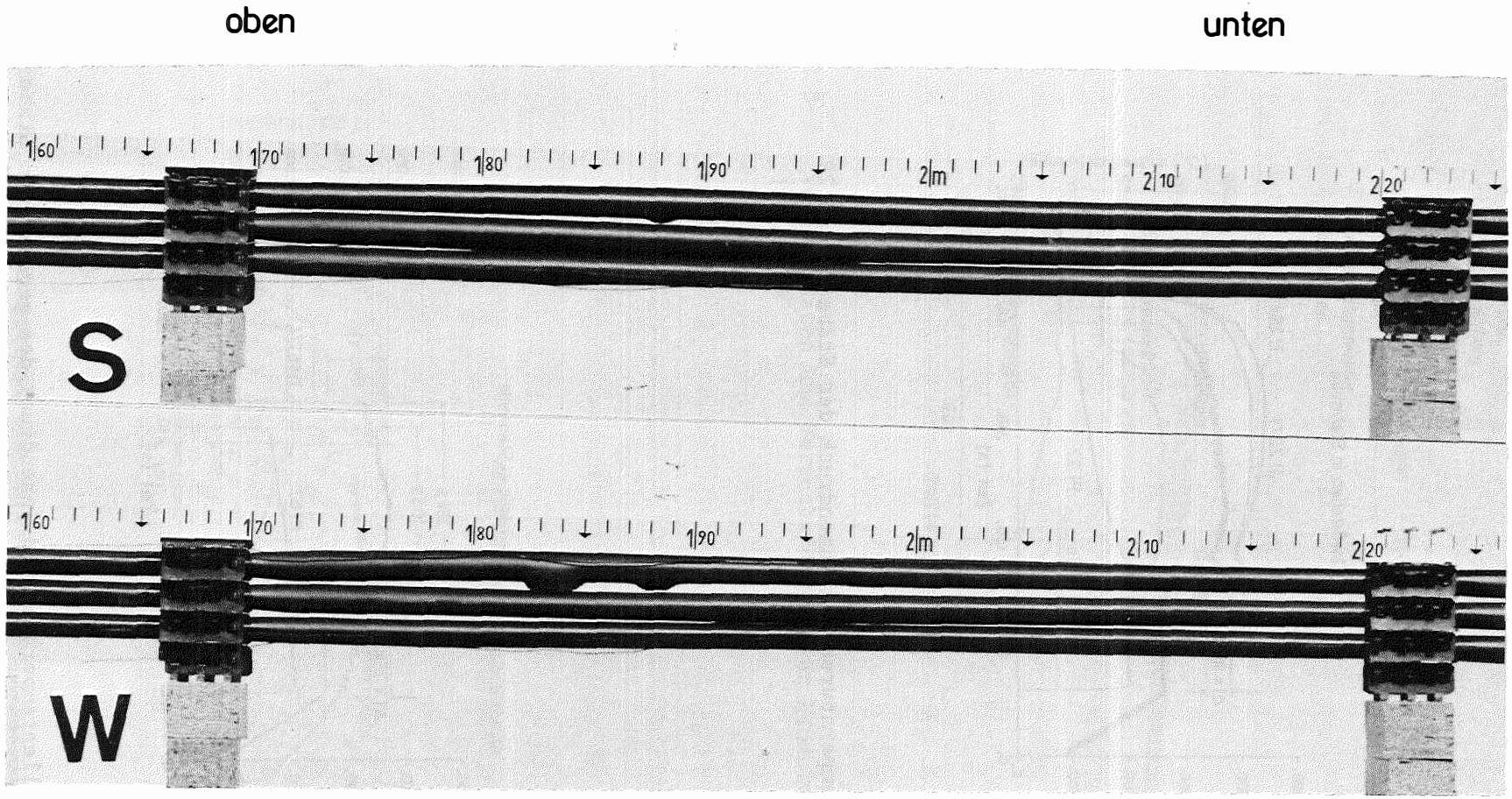
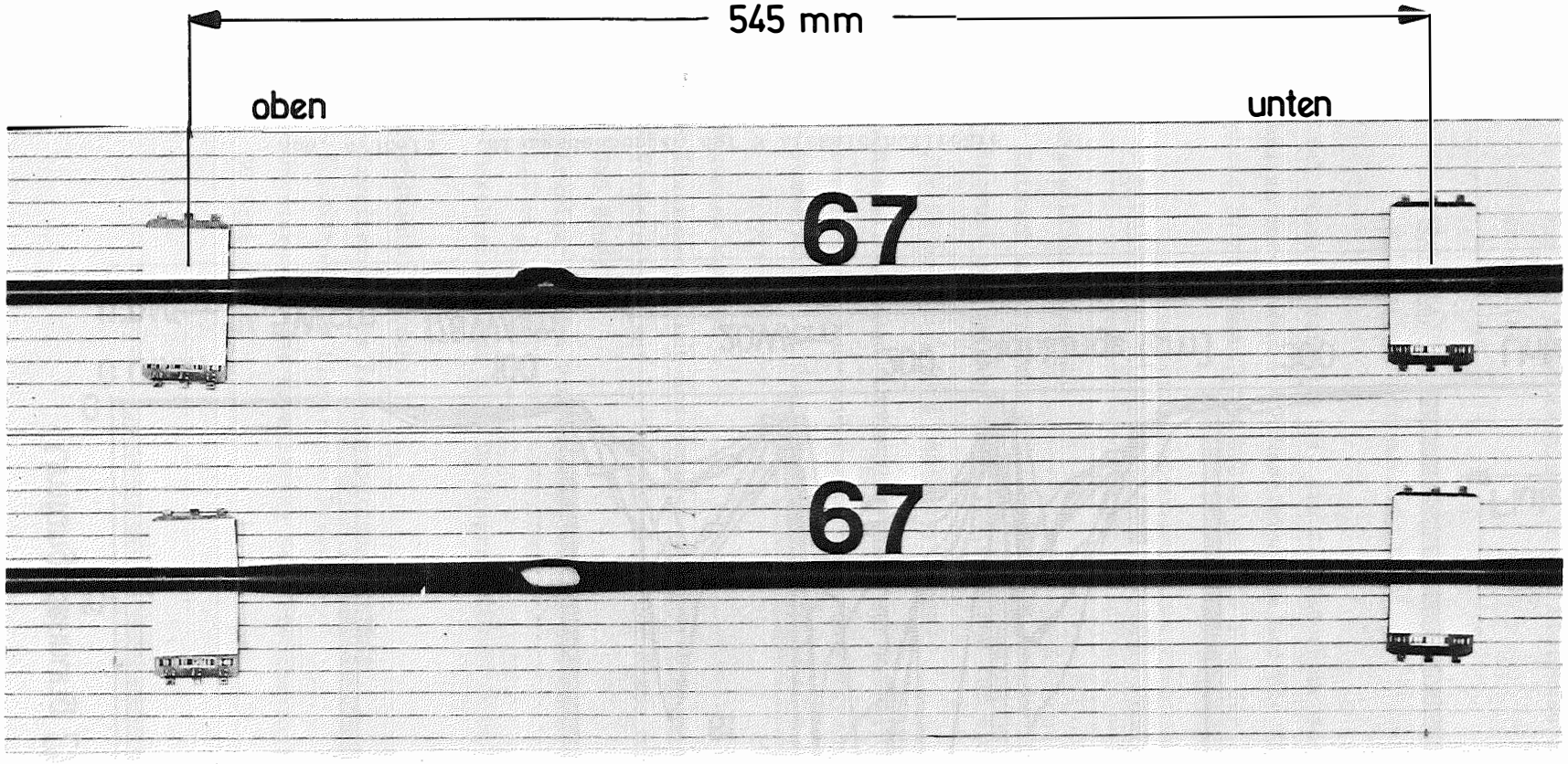


Abb. 4238-13 Mittelteil der höchstbelasteten Zone, Umgebungsstäbe entfernt



Bersttemperatur: ~ 810 °C , Berstumfangsdehnung : 31 %
Berstdruck : ~ 60 bar

Abb. 4238-14 Ansicht der geborstenen Hülle 67

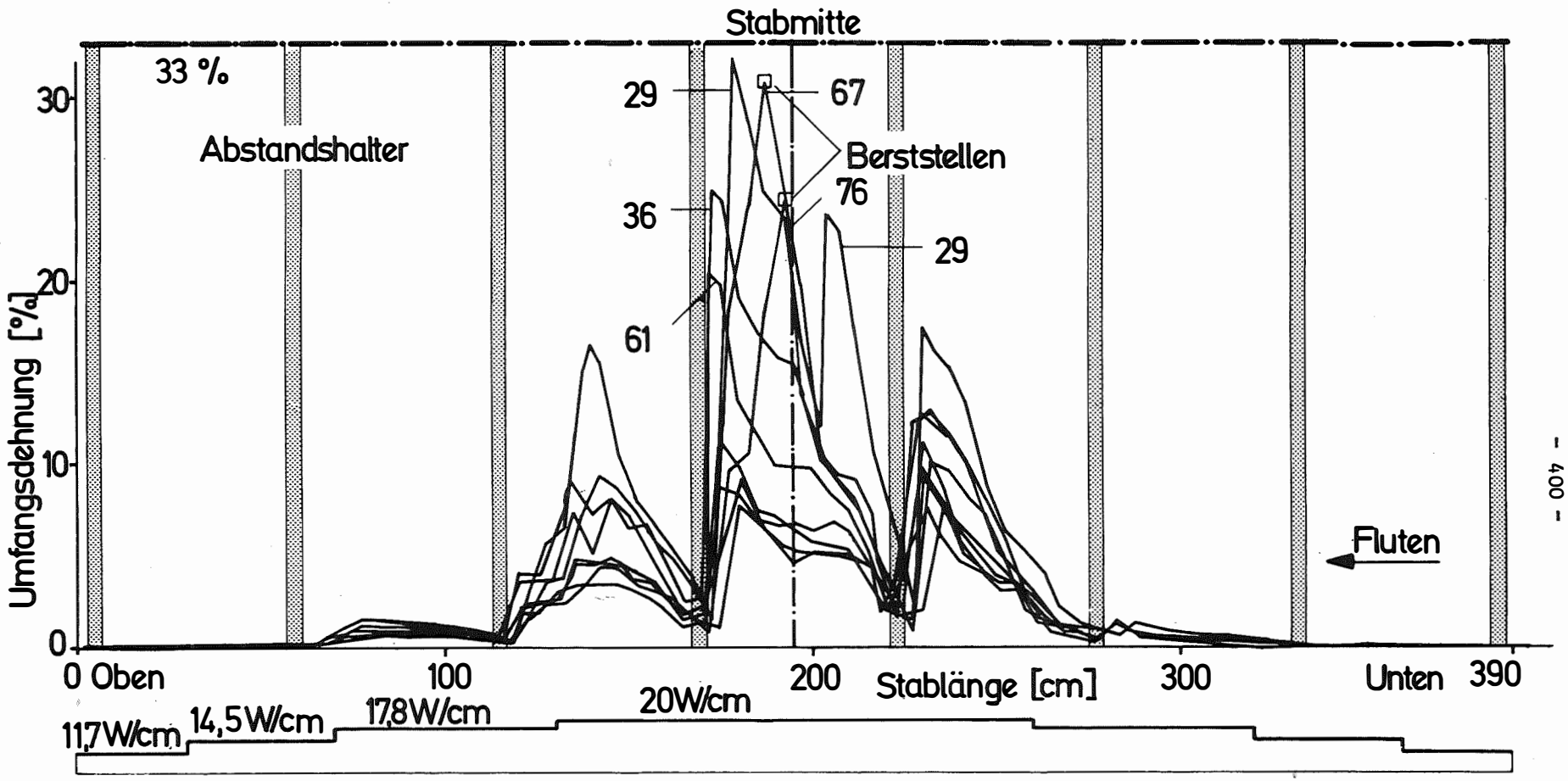


Abb. 4238-15 Umfangsdehnungen der 9 Zirkaloyhüllrohre

06.01.09 Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles

06.01.09/01A
PNS 4238

Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zircaloy-Hüllen und einsetzender Kernnotkühlung (REBEKA-Programm)

(K. Wiehr, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J.Neitzel, P. Schäffner, He. Schmidt, IRB)

Zielsetzung des Vorhabens ist die Erarbeitung experimenteller Informationen über den Aufblähvorgang von Zirkaloyhüllen während der Niederdruckphase eines Kühlmittelverluststörfalles. Einzelstab- und Bündelexperimente liefern Meßwerte zur Überprüfung und Weiterentwicklung von Rechenprogrammansätzen des Codesystems SSYST zur Beschreibung des Brennstabverhaltens.

Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte auf der Durchführung folgender Arbeiten:

- Versuche an verkürzten Brennstabsimulatoren in Dampfatmosphäre
  . unter adiabaten Versuchsrandbedingungen als Grundlage für Anwendung auf Stoffgesetze für plastische Verformung von Zirkaloyhüllrohren,
  . zur Quantifizierung des Einflusses der Aufheizrate auf die Verformung.
- Nachrechnungen erster Experimente mit NORA (KfK) und KWU-Ansatz.
- Auswertung des ersten Bündelexperiments.
- Erstellung einer Versuchsmatrix für Bündelversuche.
- Durchführung des 2. Bündelexperiments mit verzögert einsetzendem Flutbeginn.

1. Untersuchungen mit verkürzten Brennstabsimulatoren

1.1 Versuchsführung

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Verformungs- und Berstexperimente an verkürzten Brennstabsimulatoren sind ein Teil einer Versuchsserie, die das Ziel hat, eine experimentelle Datenbasis für die Überprüfung und Verbesserung von Stoffgesetzen für die plastische Verformung von Zirkaloyhüllen zu schaffen.

Die Versuche werden daher unter vereinfachten und definierten thermohydraulischen Randbedingungen, nämlich in stagnierendem Dampf in adiabater Umgebung durchgeführt, wobei die Aufheizrate zwischen 1 und 30 K/s und der Innendruck zwischen 20 und 100 bar als Parameter variiert werden. Die adiabate Versuchsführung ermöglicht, azimutale Temperaturdifferenzen niedrig zu halten und somit weitgehendst rotationssymmetrische Hüllrohrverformungen zu erzielen.

Versuchstechnisch wird dies erreicht, indem das Dampfführungsrohr, welches direkt beheizt wird, mit der gleichen Temperaturrampe aufgeheizt wird, wie das von innen indirekt beheizte Zirkaloyhüllrohr.

Die bisher vorliegenden Versuche dieser Art wurden mit einem Anfangsinnendruck von 70 bar durchgeführt, wobei die Aufheizrate 1,5,10 und 30 K/s betrug.

1.2 Experimentelle Ergebnisse

Die bisher erzielten vorläufigen Ergebnisse für einen Anfangsinnendruck von 70 bar lassen sich als gemittelte Werte wie folgt angeben:

Aufheizrate |K/s|	Bersttemperatur |°C|	Berstdruck |bar|	Berstdehnung |%|
1	820	60	95
5	860	64	61
10	880	64	55
30	882	65	32

Die Tabelle zeigt, daß mit größer werdender Aufheizrate die Bersttemperatur steigt, die erreichte maximale Berstdehnung jedoch abnimmt. Diese Abhängigkeit der Bersttemperatur und der -dehnung von der Aufheizrate bei adiabater Versuchsführung macht die Bedeutung der Temperatur-Zeit-Geschichte auf das plastische Verhalten des Zirkaloys deutlich. Die Größe dieses Einflusses zeigt, daß ein zu erstellendes Kriechgesetz den zeitlichen Temperaturverlauf berücksichtigen muß.

1.3 Nachrechnung mit NORA und KWU-Beziehung

Um die an verschiedenen Stellen entwickelten Beziehungen für das Kriechen der Zirkaloy-Hüllrohre mit Hilfe der durchgeführten Messungen von zeitlichen Dehnungsverläufen verifizieren zu können, wurden aus den gemessenen Temperatur- und Druckverläufen die zeitlichen Dehnungsverläufe mit Hilfe der Kriechmodelle berechnet und mit den gemessenen Dehnungsverläufen verglichen.

Da die Experimente, die zur Verifikation der Kriechbeziehungen durchgeführt werden, infolge der adiabaten Versuchsführung nahezu rotationssymmetrische Hüllrohrverformungen liefern, konnte für die zeitabhängige Berechnung der Verformung ein eindimensionales rotationssymmetrisches Modell zugrunde gelegt werden.

Zwei Kriechmodelle stehen zur Verfügung:

-Eine von KWU angegebene Kriechformel, welche das NORTON'sche Kriechgesetz durch einen Fließkorrekturfaktor erweitert, der eine Grenzspannung enthält/1,2,3/. Die Werte für Grenzspannung, Aktivierungsenergie, Spannungsexponent und Strukturkonstante und deren etwaige Abhängigkeit von Temperatur, Aufheizrate und Phasenbereich wurden bei KWU aus Endumfangsdehnungen von Aufblähversuchen an Zirkaloy-Hüllrohren in Luft ermittelt

-ein ebenfalls auf dem MORTON-Gesetz beruhendes Kriechmodell der KfK, NORA /4/. Hierfür wurde die Temperaturabhängigkeit der NORTON-Parameter durch Experimente mit zeitabhängiger Dehnungsmessung ermittelt.

Drei erste Nachrechnungen von nahezu adiabat durchgeführten Experimenten mit einer Aufheizrate von etwa 7 K/s zeigten bei Benutzung von NORA (KfK) und der von KWU angegebenen Kriechbeziehungen eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen zeitlichen Dehnungsverläufen (s. Abb. 06.01.09/01A-1 bis 3).

Die Messung des Dehnungsverlaufs erfolgte durch Auswertung des gefilmten Aufblähvorganges. Da der Film einen größeren axialen Ausschnitt zeigt, konnte der Dehnungsverlauf sowohl an der Berststelle als auch an der Stelle der gemessenen Temperatur ermittelt werden.

Für den Vergleich mit den Nachrechnungen wurde der Dehnungsverlauf an der axialen Stelle der gemessenen Temperatur gewählt, das war in allen Fällen nicht direkt die Berststelle. Aus einer Serie von Experimenten wurden diejenigen ausgewählt, die eine möglichst geringe azimutale Temperaturverteilung aufwiesen, so daß eine rotationssymmetrische Nachrechnung gerechtfertigt war.

2. Erstes Bündelexperiment (REBEKA 1)

Über den Versuchsaufbau, die Versuchsführung und einige unter den eingestellten Versuchsrandbedingungen erzielten Ergebnisse von REBEKA 1 wurde bereits berichtet.

Es wurden Brennstabsimulatoren mit 3,9 m beheizter Länge und stufenförmigem, axialem Leistungsprofil in einem 25er Stabbündel unter angenähert repräsentativen thermohydraulischen Flutbedingungen eingesetzt. Der Versuch wurde mit Stableistungen mittel belasteter Brennstäbe mit einer maximalen spez. Stableistung von 20 W/cm, sowie einer kalten Flutrate von 3 cm/s durchgeführt. Hierdurch stellte sich in der Flutphase ein Temperaturplateau maximaler Hüllrohrtemperatur bei etwa 800°C ein.

Bei REBEKA 1 zeigten sich u.a. folgende Effekte:

- ein starker Einfluß des sich ändernden Spaltes zwischen Pelletsäule und Zirkaloyhülle auf den Hüllrohrtemperaturverlauf während der ganzen Flutphase.

- Bei stärkerem Abheben der Hülle tritt früheres, bei schwächerem Abheben späteres Wiederbenetzen ein.

- Geborstene Hüllrohre benetzen früher als ungeborstene.

- Die Abstandshalter unterbinden infolge erhöhter lokaler Kühlwirkung größere Umfangsdehnungen im Bereich der Abstandshalter.

Bei Betrachtung der Verformungen der Zirkaloyhüllrohre jeweils zwischen zwei Abstandshaltern fielen zwei Dinge auf: (s. Abb. 06.01.09/01A- 4 und 5)

- eine Verschiebung des Maximums der Umfangsdehnungen zwischen den Abstandshaltern in Strömungsrichtung zum nächst höheren Abstandshalter hin, sowie

- relativ niedrige Umfangsdehnungen und eine unsymmetrische Deformationsform der geborstenen Hüllrohre.

Für die Verschiebung des Maximums der Umfangsdehnungen der Zirkaloyhüllrohre jeweils zwischen zwei Abstandshaltern ist ein axiales Temperaturprofil in der Hülle verantwortlich, welches trotz konstanter spezifischer Leistung über diese axiale Länge entsteht. Meßtechnisch konnte dies durch zwei im Abstand von 400 mm in der Hülle angebrachte Thermoelemente nachgewiesen werden. In Abb. 06.01.09/01A-6 sind die beiden axialen Thermoelemente in ihrer Position zu den Abstandshaltern angegeben. Im Diagramm aufgetragen sind die Temperaturverläufe dieser beiden Thermoelemente über der Zeit. Bis zum Beginn der Flutphase (0 bis etwa 130 sec) herrscht eine abwärtsgerichtete Dampfströmung im Bündel vor. Demzufolge zeigt die Meßstelle T1 in dieser Phase die höhere Temperatur, da sich der Dampf in Strömungsrichtung aufheizt. Mit dem Einsetzen des Flutens ab etwa 130 sec ändert sich die Strömungsrichtung des Fluids,und ein Zweiphasengemisch durchströmt das Bündel von unten nach oben. Es ist zu erkennen, daß sich die Temperaturverläufe von T1 und T2 schneiden, T2 den höheren Wert annimmt und sich bis zum Benetzen der Hüllenpositionen eine stetig größer werdende Temperaturdifferenz zwischen T2 und T1 ausbildet.

Die Ursache für dieses axiale Hüllrohrtemperaturprofil jeweils zwischen zwei Abstandshaltern ist in einem thermodynamischen Ungleichgewicht in der Flutphase zu suchen. Trotz Anwesenheit von Wasser bildet sich zwischen den Abstandshaltern in Strömungsrichtung eine beträchtliche Dampfüberhitzung aus. Die turbulenzerhöhende Wirkung der Abstandshalter, möglicherweise auch die Existenz eines höheren Wasseranteils unmittelbar oberhalb jedes Abstandshalters führt zu einer Erniedrigung des Dampfüberhitzungsgrades hinter jedem Abstandshalter. Bis zum nächsten Abstandshalter hin in Strömungsrichtung vergrößert sich der Überhitzungsgrad wieder.

Es konnte meßtechnisch nachgewiesen werden, daß am oberen Ende der Teststrecke während der Flutphase trotz erheblicher Mengen ausgeworfenen Flutwassers eine Überhitzung des Dampfes im Zweiphasengemisch vorgelegen hat

(s. Abb. 06.01.09/01A-7). Die untere Kurve der Abbildung zeigt den Anstieg des Höhenstands des Wasserspiegels im Abscheidebehälter während der Flutphase. In diesem Abscheide- bzw. Sammelbehälter wird der Anteil des Flutwassers, das beim Durchströmen des Bündels nicht verdampft vom Dampf getrennt, aufgefangen und gemessen. Die obere Kurve zeigt den zeitlichen Verlauf der Dampftemperatur am oberen Austritt aus dem Bündel. Etwa 30 s nach Flutbeginn zeigt das Thermoelement einen deutlichen Anstieg der Dampfaustrittstemperatur; nach etwa 140 s erreicht die gemessene Temperatur ihren Maximalwert in der Flutphase von etwa 280°C, d.h. eine Dampfüberhitzung von etwa 130 K. Eine genaue Messung des Dampfüberhitzungsgrades im mittleren höchstbelasteten Stabbereich zwischen den Abstandshaltern konnte bisher aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden.

Findet die plastische Verformung der Zirkaloyhüllen im wesentlichen während der Flutphase, d.h. bei Anwesenheit eines Zweiphasengemisches statt, so stellt sich bei niedrigen Flutwassergeschwindigkeiten eine beträchtliche Dampfüberhitzung in Strömungsrichtung jeweils zwischen zwei Abstandshaltern ein, die zur Ausbildung eines axialen Temperaturprofils auf der Zirkaloyhülle und damit zu der beobachteten axialen Verschiebung des Dehnungsmaximums der Zirkaloyhüllen führt.

Die recht niedrigen Umfangsdehnungen sowie die unsymmetrische Deformationsform der geborstenen Hüllrohre waren die Folge von sich überwiegend während der Flutphase azimutal ausbildenden Temperaturunterschieden auf den Hüllrohren.

Abb. 06.01.09/01A-8 zeigt eine Front- und Seitenansicht des Mittelabschnitts des geborstenen Hüllrohres des Stabes 67 aus REBEKA 1. Diese unsymmetrische Deformationsform mit der Berststelle auf der geraden Mantellinie ist auch aus Einzelstabversuchen an verkürzten Brennstabsimulatoren bekannt und tritt immer dann auf, wenn die plastische Verformung mit dem Auftreten azimutaler Temperaturen auf dem Umfang der Zirkaloyhülle verbunden ist.

Abb. 06.01.09/01A-9 zeigt zwei Querschnittsbilder durch das verformte Bündel. Die Schnittebenen sind so gewählt, daß in jedem Querschnitt jeweils ein geborstenes Rohr liegt. An der unterschiedlichen Wandstärke auf dem Umfang ist deutlich zu erkennen, daß die plastische Verformung der Hüllrohr-

wand bei Vorhandensein von Temperaturunterschieden auf dem Umfang stattgefunden hat. Dies erklärt die relativ niedrigen Berstumfangsdehnungen der beiden im ersten Bündelversuch geborstenen Zirkaloyhüllrohre.

Die Enddehnungen der nicht geborstenen Hüllrohre, speziell der drei in den Abbildungen oben liegenden Zirkaloyhüllen sind noch niedriger.
In der rechten Abbildung sind die Positionen von drei Fluidthermoelementen eingetragen, die sich auf gleicher axialer Höhe, und zwar in Bündelmitte befinden. Die Thermoelemente TF3 und TF6 zeigen gleiche Temperaturverläufe, das Thermoelement TF7 in der Wiederaufheizphase jedoch einen etwa tieferen Verlauf, so daß unmittelbar vor Flutbeginn eine Temperaturdifferenz von 23 K vorliegt. Dies deutet darauf hin, daß in dem Bereich in dem TF7 positioniert war, ein insgesamt niedrigeres Temperaturniveau während der plastischen Verformung der Zirkaloyhüllen vorgeherrscht hat.

Aus an Brennstabsimulatoren an verschiedenen axialen Positionen gemessenen Hüllrohrtemperaturen wurden unter Annahme einer konstanten Fluidtemperatur (Sattdampftemperatur) Wärmeübergangsverläufe errechnet (Abb. 06.01.09/01A-10). Vergleicht man diese Verläufe mit Wärmeübergangsverläufen aus ähnlichen Experimenten, wie FLECHT und PNS 4239 (FEBA), so kann für den Zeitraum ab etwa 20 sec nach Flutbeginn bis zum Wiederbenetzen gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgestellt werden. Abweichend ist jedoch ein relativ hoher Anstieg und Wiederabfall der Wärmeübergangszahl unmittelbar nach Flutbeginn. Dieser Wärmeübergangspeak, hervorgerufen durch eine höhere Dampfentwicklung unmittelbar nach Flutbeginn scheint typisch zu sein für Flutexperimente, die Brennstabsimulatoren mit einem Spalt zwischen innerem Heizstab und der Simulatorhülle verwenden, jedoch nur dann, wenn die Hüllrohrtemperatur am unteren Ende des Bündels nicht viel höher als die Leidenfrosttemperatur ist. Dieser Effekt soll durch theoretische Untersuchungen und weitere Bündelexperimente überprüft werden.

Das zweite Bündelexperiment mit Brennstabsimulatoren voller Länge wurde mit verzögert einsetzendem Flutbeginn durchgeführt. Die plastische Verformung der Zirkaloyhüllen fand bei abwärtsgerichteter Dampfströmung statt. Praktisch zeitgleich mit dem Einsetzen des Flutens barsten die Zirkaloyhüllen aller 9 Brennstabsimulatoren. Die Berstumfangsdehnungen waren erwartungsgemäß wesentlich größer als beim ersten Bündelversuch. Mit der Auswertung der rechnergespeicherten Daten wurde begonnen.

Literatur

/1/ B. Brzoska, G. Cheliotis, A. Kunick, G. Senski;
A New High Temperature Deformation Model für Zircaloy Clad Ballooning under Hypothetical LOCA Conditions; SMIRT, San Francisco, Aug. 1977

/2/ B. Brzoska, G. Cheliotis, A. Kunick, G. Senski;
Ein neues Modell zur Beschreibung des Dehnungsverhaltens von Zircaloy-Hüllrohren während hypothetischer Kühlmittelverlust-störfälle, Reaktortagung Mannheim, 1977, S. 197 - 200

/3/ Persönliche Mitteilung, März 1978

/4/ Raff, S.;
Entwicklung eines Zry-Deformationsmodells (DEMOD), 1977 (unveröffentlicht)

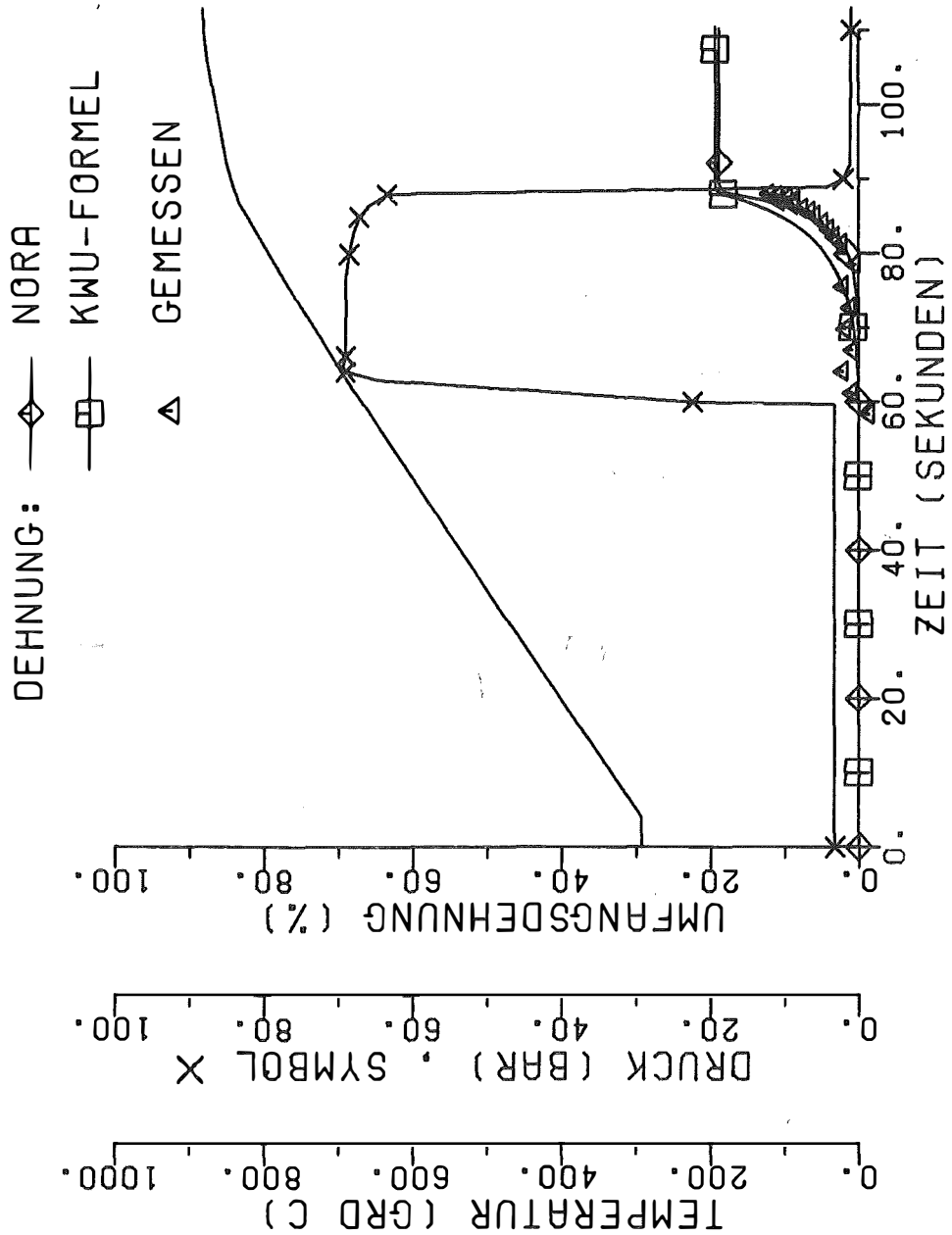


Abb. 06.01.09/01A-1: Dehnungsrechnung zu Versuch 62

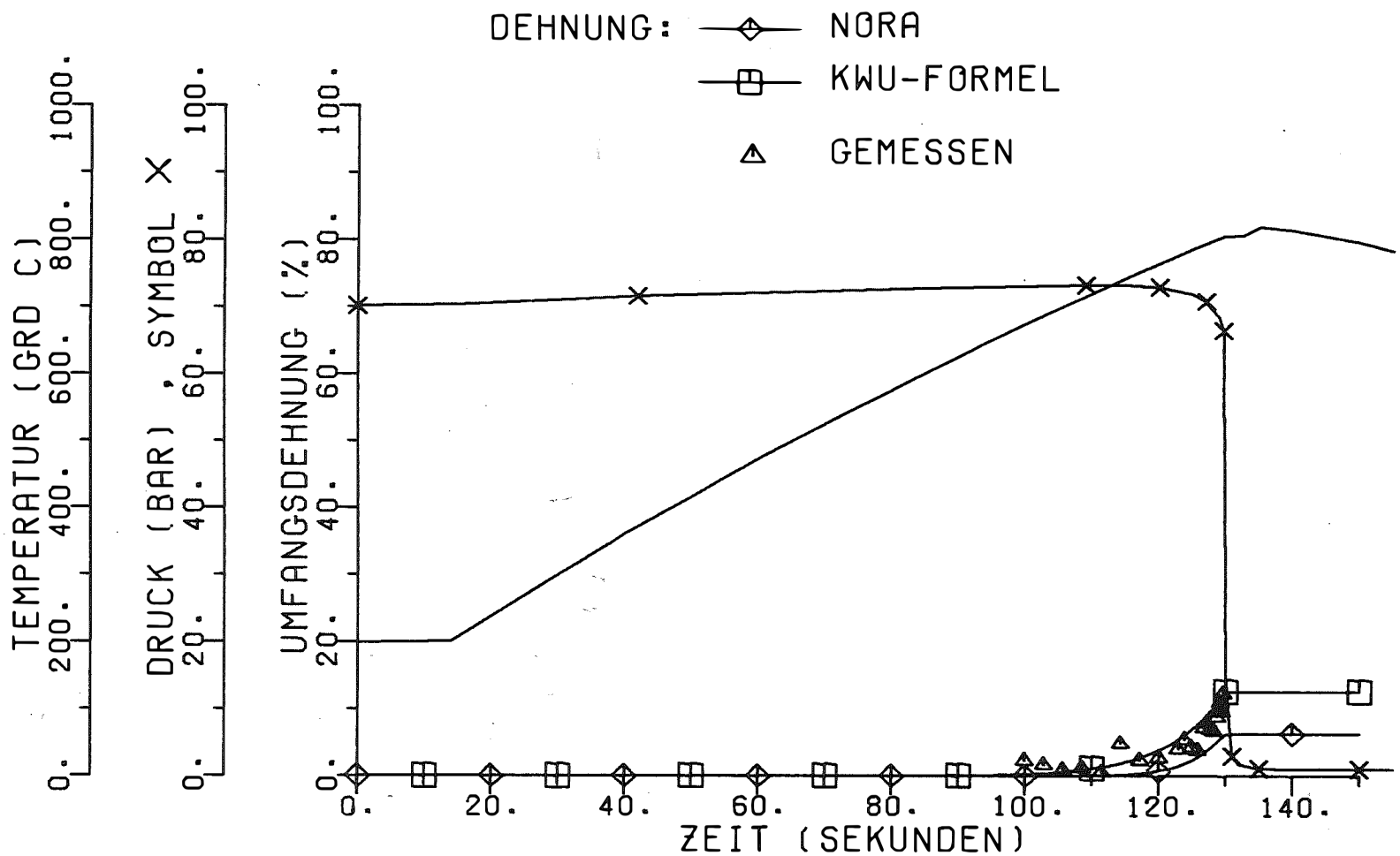


Abb. 06.01.09/01A-2: Dehnungsrechnung zu Versuch 63

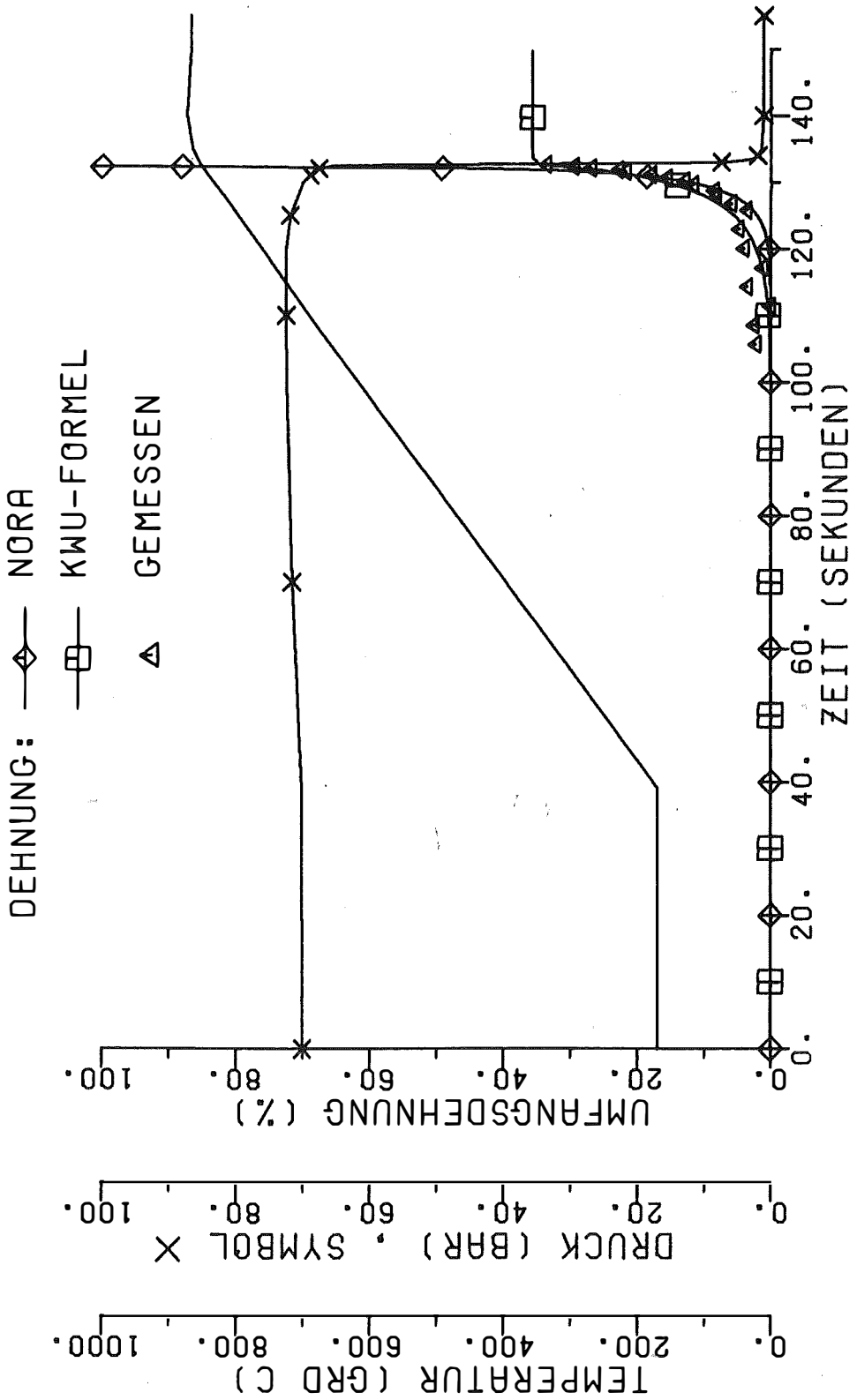


Abb. 06.01.09/01A-3: Dehnungsrechnung zu Versuch 69

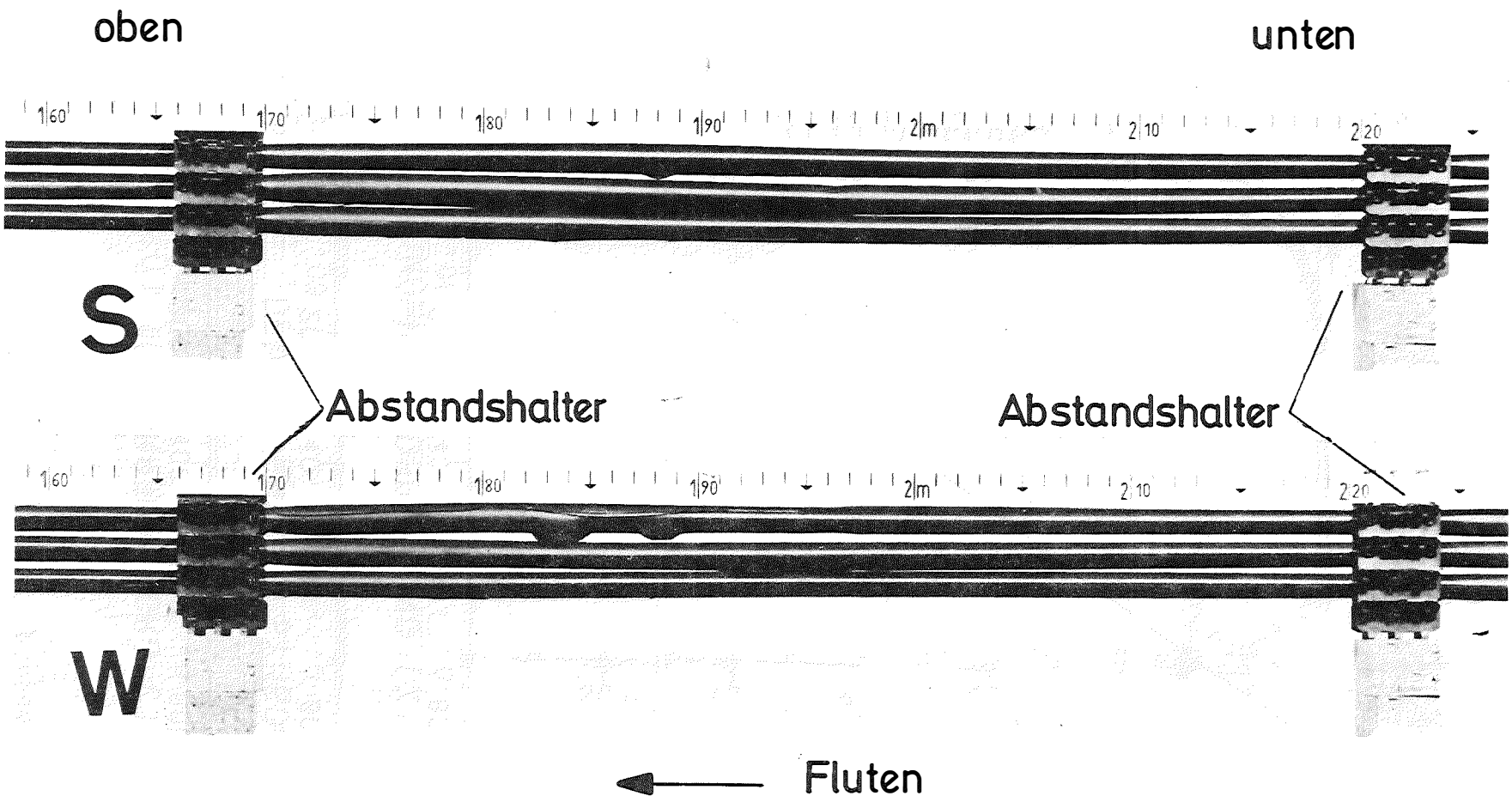


Abb. 06.01.09/01A-4: REBEKA 1; axiales Deformationsprofil im mittleren Abstandshalterbereich

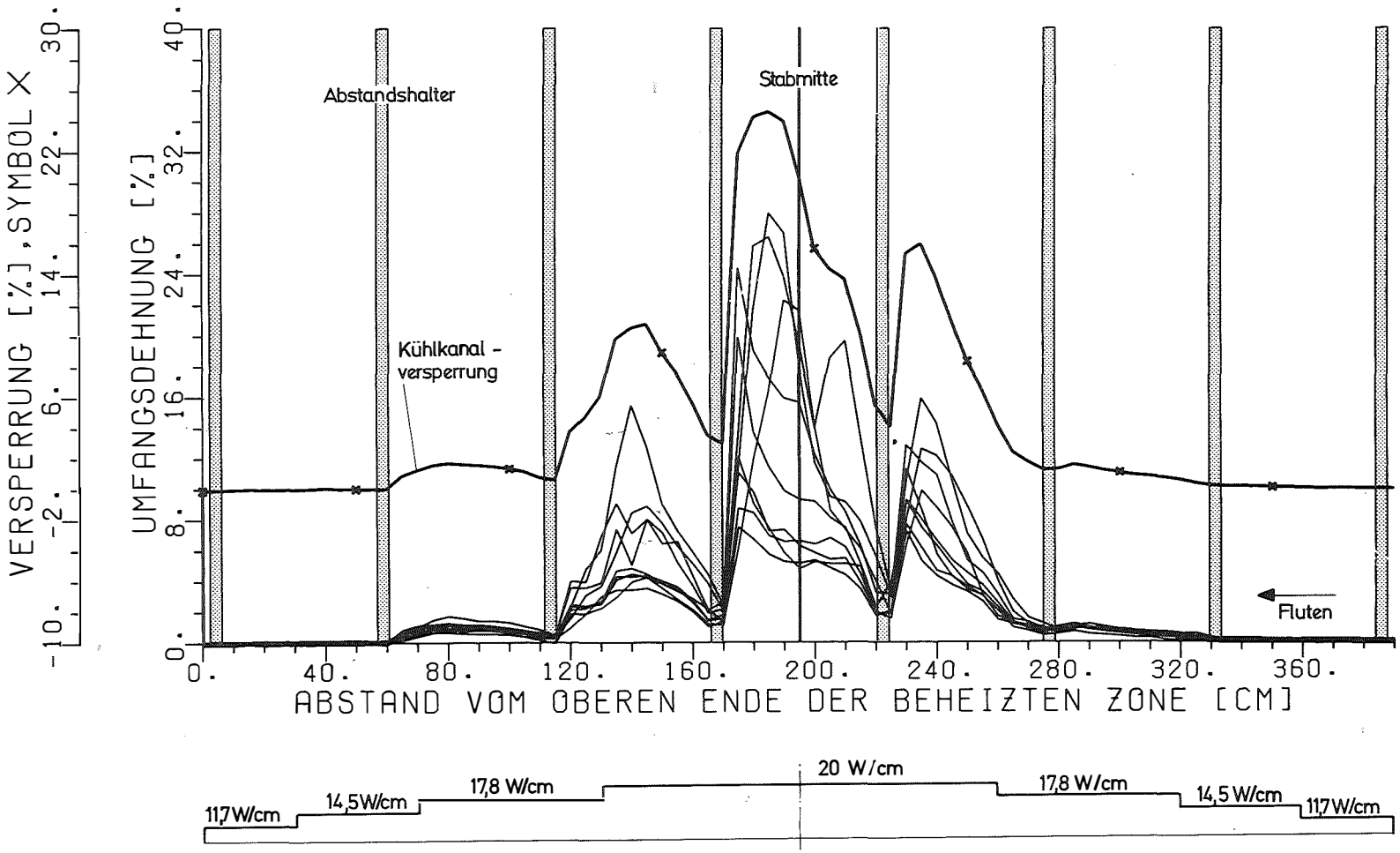


Abb. 06.01.09/01A-5: REBEKA 1; Umfangsdehnung der Zirkaloyhüllrohre und Kühlkanalversperrung

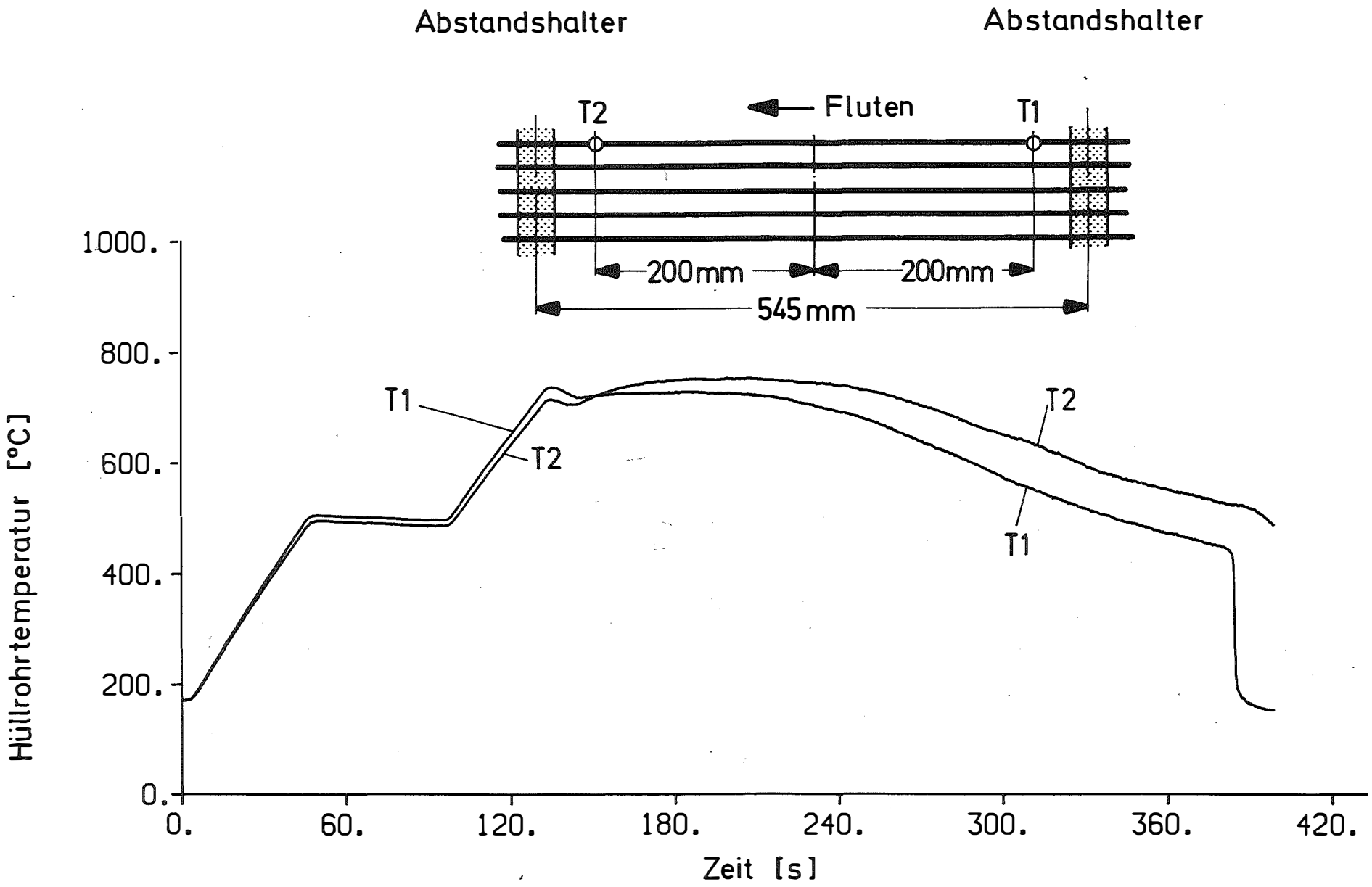


Abb. 06.01.09/01A-6: REBEKA 1; Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen im mittleren Abstandshalterbereich des Stabes 16

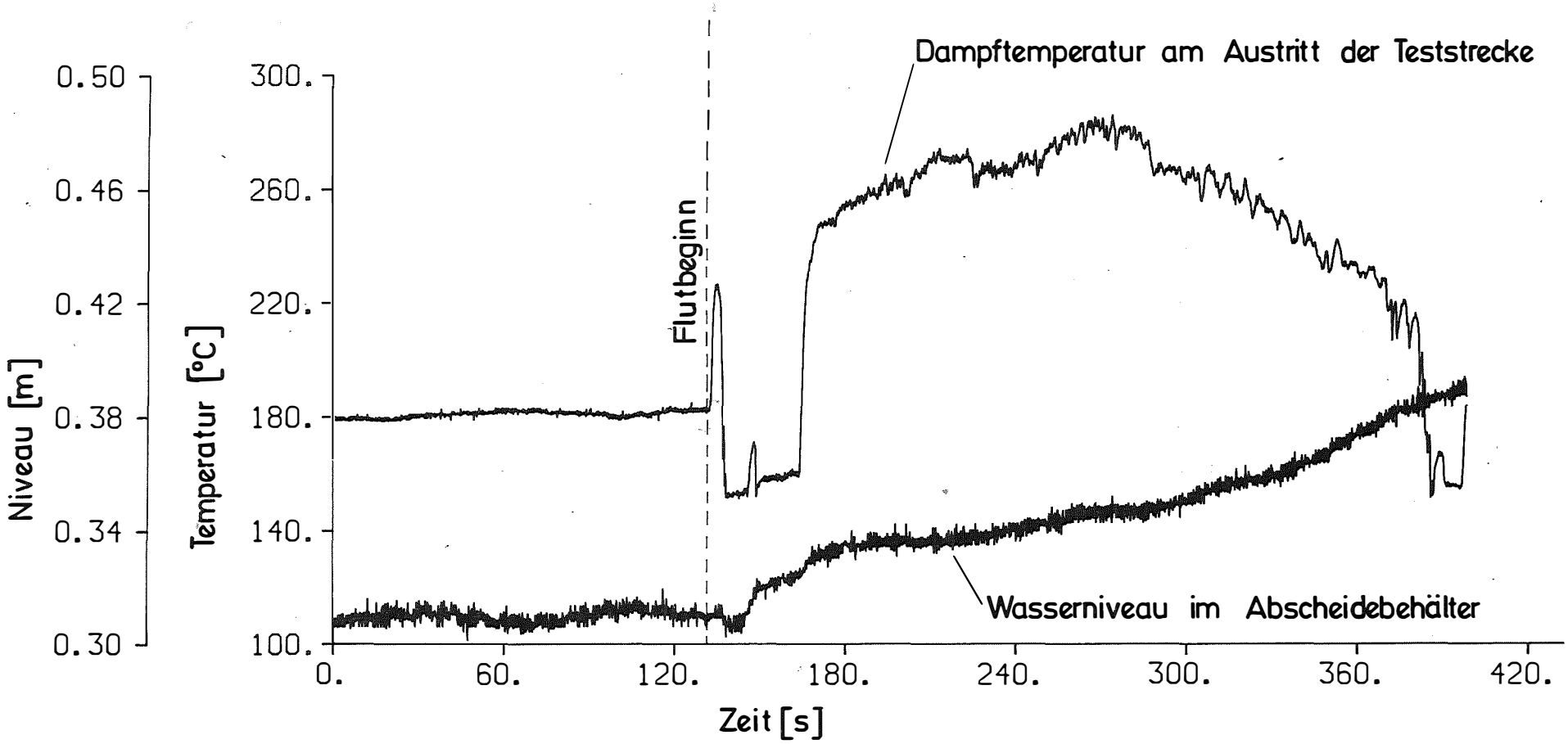
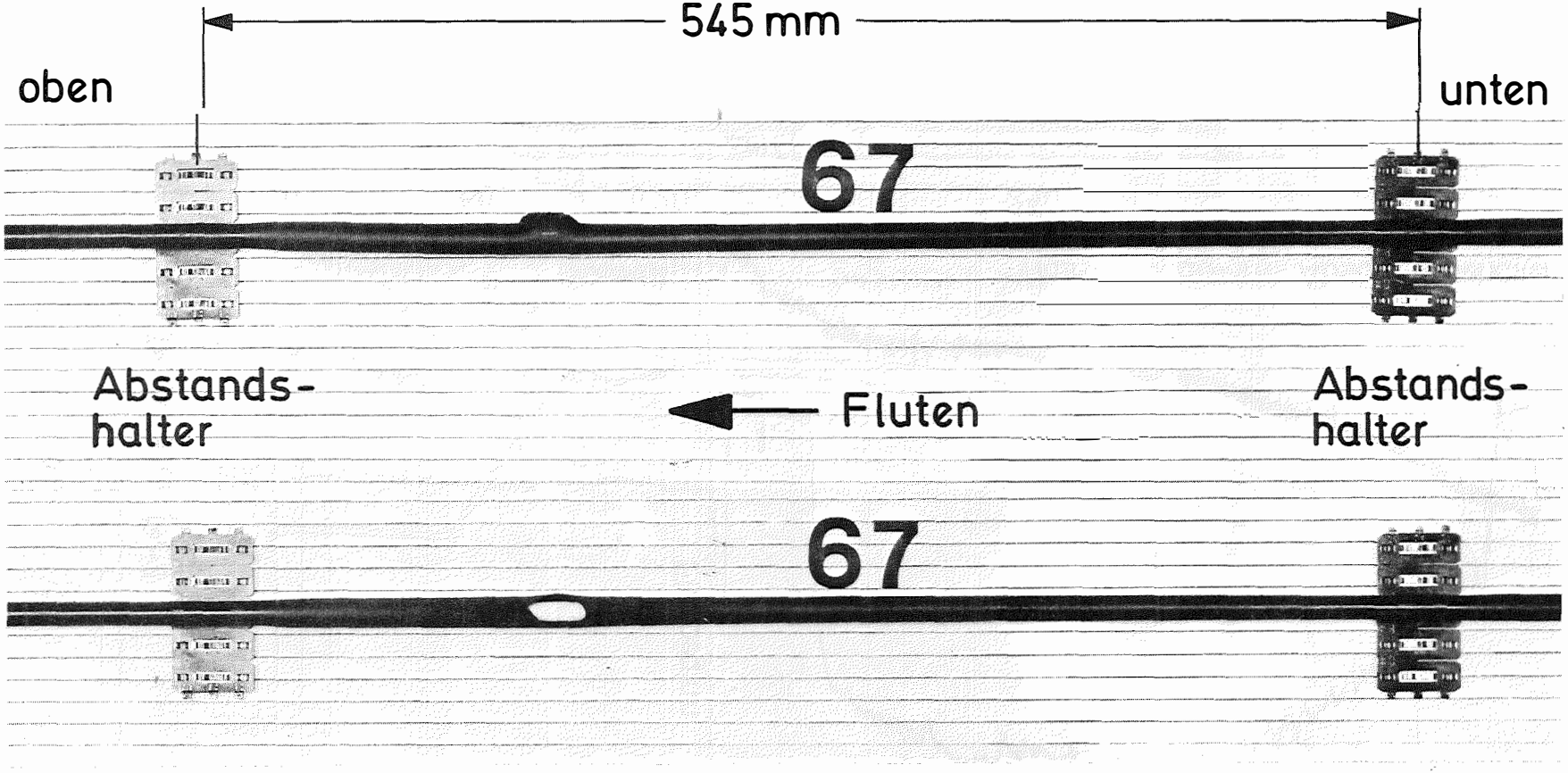


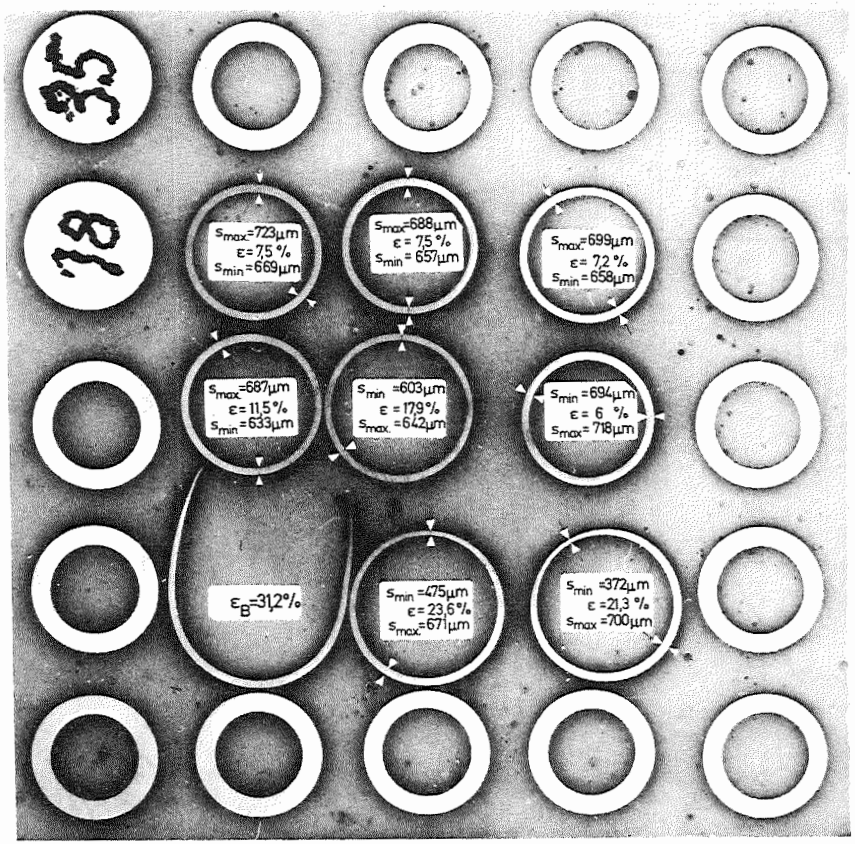
Abb. 06.01.09/01A-7: REBEKA 1; Dampfüberhitzung am Austritt der Teststrecke und Wassermitriss



Bersttemperatur: ~ 810 °C, Berstumfangsdehnung: 31%

Berstdruck: ~ 60 bar

Abb. 06.01.09/01A-8: REBEKA 1; Front- und Seitenansicht des geborstenen Hüllrohres 67 im mittleren Abstandshalterbereich



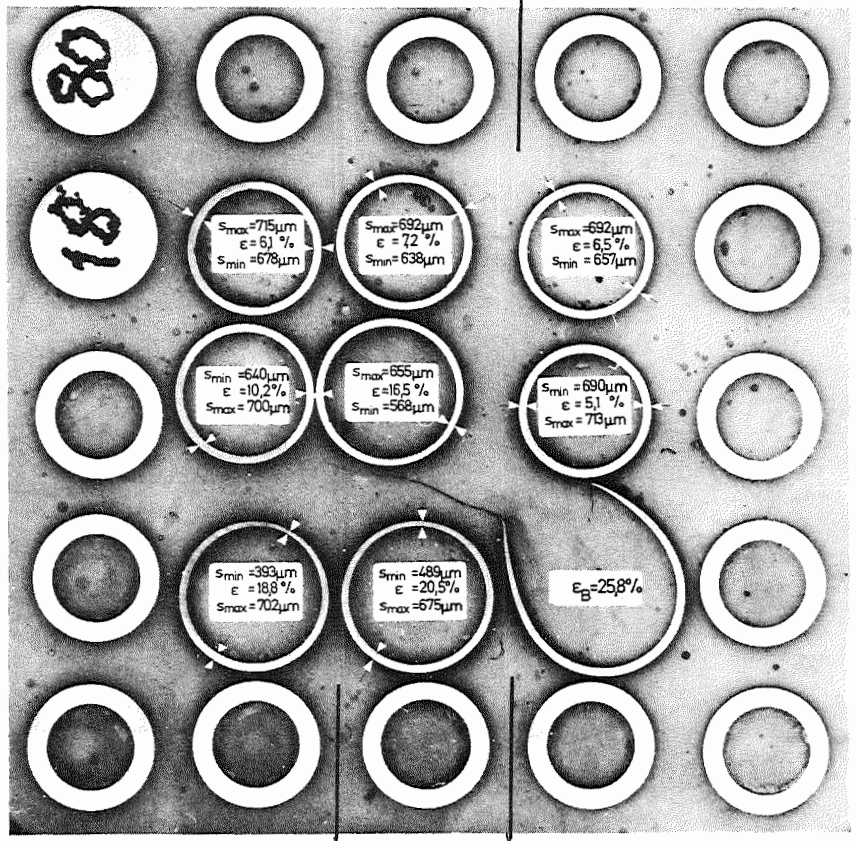


Abb. 06.01.09/01A-9: REBEKA 1; Querschnitte durch verformtes Stabbündel (1835 mm und 1880 mm von oben)

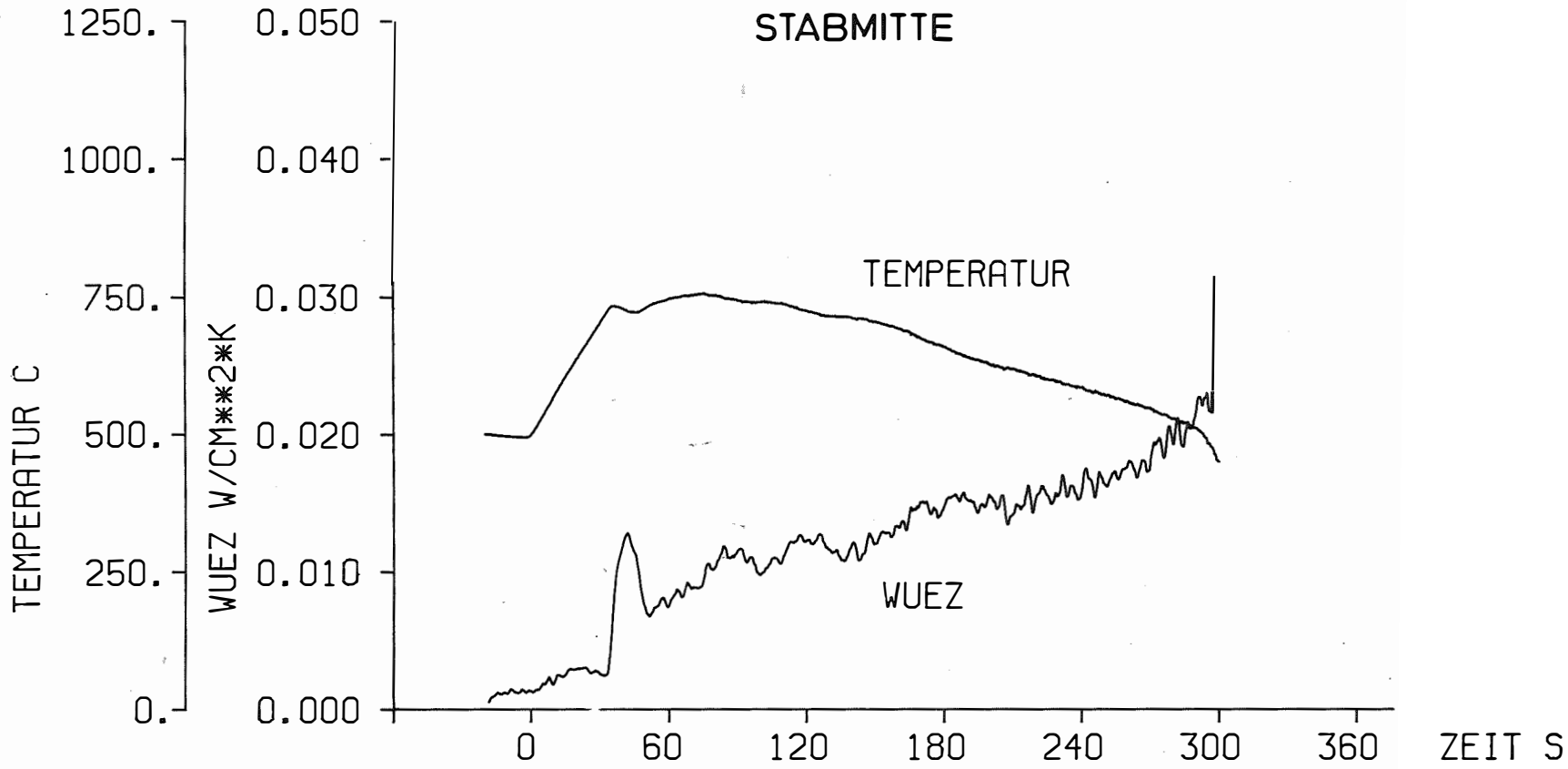


Abb. 06.01.09/01A-10: REBEKA 1; Wärmeübergangszahl Hülle-Fluid am Stab 17