

KfK 3058
Dezember 1980

Natrium-Siedeexperimente zum LOF-Störfall in einem elektrisch beheizten Siebenstab-Bündel mit SNR 300 Mk II-Geometrie

A. Kaiser
Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

KfK 3058

Natrium-Siedeexperimente zum LOF-Störfall in einem
elektrisch beheizten Siebenstab-Bündel mit SNR 300
Mk II-Geometrie

A. Kaiser

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Natrium-Siedeexperimente zum LOF-Störfall in einem elektrisch beheizten Siebenstab-Bündel mit SNR 300 Mk II-Geometrie

Zusammenfassung

Mit Versuchen in einem elektrisch beheizten Siebenstabbündel mit SNR-300-MkII-Geometrie wurde die Reihe der bisherigen Out-of-pile-Siedeexperimente zum hypothetischen Störfall Pumpenabfall (LOF) fortgesetzt. Das geplante zweite Core (MkII) des SNR unterscheidet sich vom ersten durch einen größeren Stabdurchmesser (7,6mm) und ein kleineres Verhältnis Stabmittenabstand/Durchmesser (8,8/7,6). Durch die Wahl geeigneter Versuchsparameter konnten in den Versuchen typische Abläufe von Störfällen der genannten Art bis zum Versagen der Kühlung (Dryout) studiert werden. Die Beobachtungen betrafen u.a. das Auftreten von Siedeverzug, die zeitliche und örtliche Ausbreitung des Siedegebietes, die jeweilige Zusammensetzung der Zweiphasenströmung (Strömungsform) und den Zeitpunkt und den Ort des Auftretens von Dryout.

Durch den Ausfall eines der sieben Heizer zu Beginn der Versuche und der damit verbundenen ungleichförmigen Leistungsverteilung über dem Bündelquerschnitt stellten sich in den Ebenen quer zur Strömungsrichtung Temperaturprofile ein, die denen ähneln, die sich aus einer Schiefllast ergeben. Trotz der Abstriche, die man wegen des defekten Heizers an ihrer Aussage machen muß, bestätigen die Versuchsergebnisse das Bild vom Ablauf des LOF-Störfalles, das man sich auf Grund bisheriger Versuche und Überlegungen gemacht hat. Die quantitativen Ergebnisse können zur Überprüfung von Rechenprogrammen, wie z.B. BLOW-3A, herangezogen werden.

Sodium Boiling Experiments in an Electrically Heated Seven-pin Bundle of SNR 300 Mk II Geometry Simulating Loss of Flow Accidents without Scram

Summary

The series of former out-of-pile boiling experiments simulating hypothetical loss of flow accidents without scram has been continued using an electrically heated seven-pin bundle of SNR 300 Mk II geometry. The planned Mk II core being the first reload of the SNR has been designed with a larger pin diameter (7,6mm) and a smaller pitch/diameter ratio (8,8/7,6) compared with the first one. By choosing suitable test parameters the characteristics of the development of such accidents up to the loss of cooling (dryout) could be studied. The most relevant objectives were the observation of the occurrence of incipient boiling superheat, the transient growth of the boiling region, the different kinds of flow patterns, and time and position where dryout occurred.

As one of the seven heaters failed at the beginning of the experiments the power in a cross section of the bundle became unevenly distributed. This caused temperature profiles across the flow direction which are similar to those caused by a power tilt. Despite the restrictions which have to be made because of the unheated pin the experimental results fit the understanding of this type of accident based on former experiments and analyses. The quantitative information can be checked against predictions of computer codes such as BLOW-3A.

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Ziel der Versuche
2. Teststrecke und Instrumentierung
3. Vergleich charakteristischer Daten
4. Versuchsergebnisse
 - 4.1 Allgemeine Bemerkungen
 - 4.2 Versuch 7 - 3/21
 - 4.3 Versuch 7 - 3/29
 - 4.4 Diskussion der Ergebnisse
5. Schlußbemerkungen
6. Literatur
 - Übersichtstabelle
 - Abbildungen

1. Problemstellung und Ziel der Versuche

Der hypothetische Störfall Pumpenabfall (LOF) hat in der Sicherheitsanalyse des SNR 300 eine zentrale Bedeutung [1]. Hierbei wird angenommen, daß die Stromversorgung aller Primärpumpen ausfällt und gleichzeitig alle Abschaltssysteme des Reaktors versagen. Zu diesem Problemkreis wurden in der Vergangenheit im Natrium-Siedekreislauf (NSK) des Instituts für Reaktorentwicklung Simulationsversuche zunächst in Ringkanal-Geometrie [2] und dann in Bündelgeometrie mit sieben elektrisch beheizten Stäben entsprechend der SNR-MkIa-Geometrie (Siebenstab-Bündel Nr. 2, Stabdurchmesser 6mm, Stabmittenabstand 7,9mm) [3] durchgeführt.

In solchen Out-of-pile-Experimenten können durch geeignete Wahl der Versuchsparameter typische Abläufe von Störfällen der genannten Art bis zum Versagen der Kühlung (Dryout) gut studiert werden. Bei der Beurteilung der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, in welchem Maße die Geometrie-, Anfangs- und Randbedingungen zu Beginn und während des angenommenen Kühlungsstörfalls im Versuch simuliert werden konnten.

Das geplante zweite Core (Mk II) des SNR ist bei einem Stabdurchmesser von 7,6mm und einem Stabmittenabstand von 8,8mm kompakter als das erste gebaut. Um Siedevorgänge auch in dieser Geometrie studieren und sie mit den hinreichend untersuchten Vorgängen in der ersten Core-Geometrie vergleichen zu können, wurde eine weitere Bündel-Teststrecke, Siebenstab-Bündel Nr. 3 genannt, gebaut, wobei die Längen der axialen Abschnitte der vorhergehenden Teststrecke beibehalten und die Instrumentierung verbessert wurden.

Ein weiteres Ziel der Versuche ist die Bereitstellung experimenteller Daten, die der Verifizierung von Siedecodes (z.B. BLOW-3A [4]) dienen, die wiederum Teil eines umfassenden Computerprogramms

zur rechnerischen Darstellung des gesamten Störfallablaufs sind.

2. Teststrecke und Instrumentierung

Abb. 1 zeigt den Aufbau der Bündel-Teststrecke Nr. 3 und ihre Instrumentierung. Die Teststrecke war senkrecht in den NSK eingebaut, und die Strömungsrichtung des Natriums war von unten nach oben. Die elektromagnetische Natriumpumpe (in Abb. 1 nicht eingezeichnet) befand sich im unteren Teil des Kreislaufs. Hier zweigte auch der Bypass zur Teststrecke ab. Das Natrium floß über ein Zuführungsrohr, in dem ein Drosselventil saß, in die Eintrittskammer der Teststrecke. Von dort verteilte es sich auf die von den Stäben und dem Sechskantrohr gebildeten Unterkänäle des Bündels.

Der oberhalb der beheizten Strecke angebrachte Verteilerring, der vom Bypass her über ein Verbindungsrohr mit Absperrventil versorgt werden konnte, war für die Einspeisung von kaltem Natrium in die Teststrecke nur während der stationären Versuche vorgesehen und hatte für die Pumpenabfallversuche keine Funktion (vergl. die Anmerkungen in Abschn. 4.4). Den oberen Abschluß der Teststrecke bildete ein kleiner Sammelbehälter, in den auch der Bypass mündete. Von diesem Behälter gelangte das Natrium in den Ausdehnungsbehälter des Kreislaufs, in dem über das Schutzgas Argon der Systemdruck eingestellt wurde, passierte dann einen Wärmetauscher und kam zurück zur Natriumpumpe.

Die sieben Heizstäbe hatten, wie bereits erwähnt, einen äußeren Durchmesser von 7,6mm und einen Stabmittenabstand von 8,8mm. Sie wurden durch wabenförmige Abstandshalter auf ihren radialen Positionen innerhalb des Sechskantrohrs gehalten. Die axialen Positionen der Abstandshalter sind in Abb. 1 eingezeichnet. Die Heizstäbe waren in die untere Bodenplatte der Eintrittskammer eingeschweißt. Hier befand sich auch der elektrische Anschluß. Das Bündel wies von unten nach oben folgende axialen Abschnitte auf:

1. Unbeheizter Abschnitt von 200mm Länge, mit dem die untere axiale Brutzone und die Spaltgaszone eines Brennelements zu einem Teil simuliert wurden. (Vergl. hierzu die Ausführungen in Kap. 3).
2. Beheizter Abschnitt von 600mm Länge zur Simulation des Corebereiches.
3. Unbeheizter Abschnitt von 455mm Länge zur Simulation der oberen axialen Brutzone. Hier fand auch der Rückfluß der Heizerströme über Heizerhüllrohre, Natrium, Abstandshalter und Sechskantrohr, welches geerdet war, statt.

Oberhalb der freien Enden der Stäbe setzte sich das Sechskantrohr noch 175mm fort, bis es in ein Rohr mit rundem Querschnitt übergeführt wurde.

Im Vergleich mit dem 7-Stab-Bündel Nr. 2 war die Instrumentierung des dritten Bündels verbessert worden, insbesondere wurde die Zahl der Na-Thermoelemente und der Voidmeßstellen erhöht. Eine Übersicht der Meßstellen nach Art und Position ist in Abb. 1 gegeben. Die Meßebenen, z.B. ME80, geben hierbei die Entfernung vom Beginn der beheizten Länge in Millimetern an. Im folgenden werden die verschiedenen Arten der Meßstellen beschrieben.

Temperaturen wurden durch ca. 50 Thermoelemente (manchmal kurz:TE), einmal in den Hüllrohren der Heizer (T1 ... T21), zum anderen im Kühlmittel (T26 ... T89), gemessen. Bei der Montage defekt gewordene TE und solche, die für die Versuchsergebnisse nicht relevant waren, sind in der Abb. 1 nicht eingetragen. Die Heizer-TE (0,25mm Durchmesser) waren so in die Hüllrohre der Heizer eingelötet, daß ihre Meßstellen einen Abstand von etwa 0,205mm von der äußeren Oberfläche hatten. Kühlmitteltemperaturen wurden im Eintrittsrohr, in aneinander grenzenden Unterkanälen des Bündels (zentraler Unterkanal, Randkanal) und in den Rohrabschnitten oberhalb des Bündels gemessen. Die TE der ME80 ... 980, die einen Durchmesser von 0,5mm hatten, wurden paarweise und senkrecht zur Strömungsrichtung durch die Wand des Sechskantrohres geführt. Ihre Meßspitzen befanden sich etwa in der Mitte der Unterkanäle. Die TE der ME1180 und 1500 waren analog angeordnet.

Die Kühlmittelgeschwindigkeiten am Eintritt zur Teststrecke sowie die obersten Rohrabschnitt der Teststrecke wurden durch permanentmagnetische Durchflußmesser (F1 bzw. F3) gemessen. Die in diesem Bericht angegebenen Geschwindigkeiten sind immer auf den freien Bündelquerschnitt bezogen. Ein weiterer Durchflußmesser war im Bypass montiert.

Der statische Druck wurde in den Meßebenen 400, 600 und 800 durch Statham-Meßköpfe (P1 ... P3), im Eintrittsrohr durch eine Bartonzelle (P0) gemessen. Die ersteren, die nach dem Prinzip des Dehnmeßdrahtes gebaut sind, waren auch geeignet, dynamische Druckverläufe wiederzugeben. Insbesondere wurde von ihnen der Beginn des Siedens deutlich angezeigt.

Die Anwesenheit von Natriumdampf in den Unterkanälen des Bündels konnte mit Hilfe von Voidmeßstellen (V1 ... V21) registriert werden. Diese Meßstellen bestanden im Prinzip aus einem Paar von Mantelthermoelementen (hierbei sind die Adern der Meßspitze mit dem Mantel verbunden), die in die Rohrwand eingelötet waren, wobei ein Thermoelement ein Stück weit in den Unterkanal hineinragte. Gemessen wurde der elektrische Widerstand von der Spitze des hervorragenden Thermoelementes bis zur Rohrwand. Je nachdem, ob das Thermoelement von Natrium oder von Dampf umgeben war, ergab sich ein niedriges bzw. ein hohes Meßsignal.

Für die Analyse von Siedegeräuschen waren entlang der Teststrecke einige spezielle Schallaufnehmer (Kennbuchstabe S) angebracht, auf die in diesem Bericht nicht näher eingegangen wird. Weitere Einzelheiten, die Aufbau und Instrumentierung der Teststrecke betreffen, sind in Ref. [5] enthalten.

Die Meßsignale wurden mit einer Frequenz von 200Hz pro Kanal digitalisiert und auf Magnetband gespeichert. Durch die begrenzte Anzahl der Verstärkereinheiten (maximal 78), die für die Meßdaten-Verarbeitung zur Verfügung standen, konnten während eines Versuchs nicht sämtliche Temperaturen- und Voidmeßstellen, die in Abb. 1 eingetragen sind, auf dem Magnetband registriert werden. Dies ist, neben einer gewissen Ausfallrate von Meßstellen, bei der Betrachtung der weiter unten dargestellten Meßergebnisse zu beachten.

3. Vergleich charakteristischer Daten

Für die Beurteilung der Ergebnisse der Simulationsversuche ist ein Vergleich der wichtigsten geometrischen, hydraulischen und thermischen Daten des Siebenstab-Bündels und eines Mk II-Brennelements notwendig. In Tabelle 1 wurden dazu Werte, die für ein Zentralelement des Mk II-Cores berechnet wurden [6], herangezogen.

Die Werte für die hydraulischen Durchmesser beziehen sich auf die freien Strömungsquerschnitte ohne Berücksichtigung von Abstandshaltern. Der hydraulische Durchmesser eines zentralen Unterkanals ist mit 3,64mm für Testbündel und Brennelement gleich. Die unterschiedlichen Werte bei der Betrachtung des Gesamtquerschnittes rühren von den verschiedenen großen Stabmittenabständen der äußeren Stabreihen zur Innenfläche des Sechskantrohres her. Während dieser Abstand im Falle des Mk II-Brennelements durch den Einbau von dünnen Strömungsleitblechen im Bereich der Abstandshalter bestimmt ist [6], wurde er für das Testbündel so dimensioniert, daß für stationären Betrieb das Verhältnis der Aufheizspannen von zentralem Unterkanal und Randkanal etwa genauso groß war wie bei dem 7-Stabbündel Nr. 2 [5].

Weiter ist aus der Tabelle zu ersehen, daß die kürzere beheizte Länge durch eine Erhöhung der Na-Eintrittstemperatur in die Teststrecke kompensiert wurde. Es ist zu beachten, daß der axial gleichförmig verteilten Leistung im elektrisch beheizten Bündel eine kosinusförmige Verteilung im Brennelement gegenüber steht.

Auf die Einhaltung zweier Randbedingungen, die entscheidend Einfluß auf den Ablauf des Siedevorganges nehmen, wurde besonders geachtet:

1. Ähnliche axiale Temperaturverteilung im Kühlmittel bei Siedebeginn im oberen Bereich des beheizten Abschnittes bzw. der aktiven Zone (vgl. Abb. 2): In der Abbildung wurde, da entsprechende Vorausberechnungen für das Mk II-Core fehlen, die

Temperaturverteilung im höchst belasteten Brennelement des Mk Ia-Core 0,02s nach Siedebeginn unter Annahme eines Siedeverzuges von 10 K [7] eingezeichnet. Die Temperaturverteilung hat Einfluß auf die axiale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Siedezone im weiteren Verlauf der Störung. Die Tatsache, daß im Versuch wegen der begrenzten Betriebstemperatur der Heizer das höhere Niveau der Core-Temperaturen nicht eingestellt werden konnte, hat dabei eine untergeordnete Bedeutung. Der in der Abb. 2 sichtbare, im Vergleich mit dem im Brennelement wesentlich größere negative axiale Temperaturgradient oberhalb der beheizten Zone hatte dagegen mit Sicherheit einen gewissen Einfluß auf das Vordringen der Siedefront in den oberen, unbeheizten Teststreckenabschnitt. Der relativ steile Temperaturabfall oberhalb der ME600 hat drei Hauptursachen:

Zum einen sind in diesem Bereich im Gegensatz zur axialen Brutzone überhaupt keine Wärmequellen vorhanden, zum zweiten treten bei der Teststrecke radiale Wärmeverluste auf, zum dritten geht die Wärmeaufnahme in den rein metallisch ausgeführten Brutstab-Dummies der Teststrecke sehr viel schneller vonstatten als in den Brutstäben mit UO_2 -Kern.

Durch Vorausberechnungen mit dem Rechenprogramm TIGER [8] und durch einphasige Vorversuche wurden geeignete Werte für die Eintrittstemperatur und -geschwindigkeit des Kühlmittels zu Beginn des Pumpenabfalls in den Siedeversuchen ermittelt.

2. Ähnlicher Verlauf der irreversiblen Druckverluste unterhalb des Ortes des Siedebeginns am oberen Ende der beheizten Zone bzw. des aktiven Core-Abschnitts bei Reduzierung des Kühlmittel-Massendurchsatzes:

Diese Druckverluste beeinflussen die hydrodynamische Stabilität des Siedens und damit auch den Zeitpunkt, an dem Strömungsumkehr auftritt. Die Anpassung des Druckverlustes im Versuch erfolgte über das Drosselventil im Zulaufrohr. Vorversuche ergaben, daß Ventilstellungen von 35%* (wenig gedrosselt) und

*Die Angabe der Ventilstellung in Prozent hat mit dem Öffnungsverhältnis des Strömungsquerschnitts in der Drossel nichts zu tun, sondern mit der Anzeigeskala des Potentiometers, das die axiale Stellung der Ventilspindel wiedergibt.

ca. 30% (stark gedrosselt) geeignet waren, die Druckverluste im Zentralelement bzw. in einem Außenelement im Versuch zu simulieren (siehe Abb. 3). Die in den Abbildungen eingezeichneten Kurven für das Mk II-Core wurden unter Verwendung der Widerstandsbeiwerte bei Normalbetrieb in quadratischer Abhängigkeit vom Durchsatz berechnet.

Über die Regelung der Versorgungsspannung der elektromagnetischen Pumpe des Kreislaufs war nur eine lineare zeitliche Durchsatzabnahme möglich, deren Steilheit vom Grad der Drosselung abhing. In Abb. 4 ist die relative Absenkung des Kühlmitteldurchsatzes als Funktion der Zeit nach Beginn des Störfalls für zwei charakteristische Drosselstellungen eingezeichnet. Zum Vergleich ist die Kennlinie für das Mk Ia-Core angegeben. Der Knick im Verlauf der Kennlinie des Versuchs 7-3/28 rührt von einer kleinen, selbsttätigen Veränderung der Ventilstellung her. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, daß das Ventil im Zulaufrohr kein Drosselventil im eigentlichen Sinne, d.h. mit feinfühligter Verstellung war. Die Einstellung der kleineren Öffnungsverhältnisse (Stellung 25% bedeutete geschlossenes Ventil, Stellung 40% fast offenes Ventil) war daher mit einer gewissen Unsicherheit, die z.T. auch aus dem stets vorhandenen Ventilspiel herrührt, verbunden. In einigen Versuchen wurde die Stellung des Ventils während des Pumpenabfalls von 32 auf 28% aus folgenden Gründen verändert. Zum einen sollten die im nächsten Kapitel beschriebenen Temperaturschwingungen vermieden werden, zum anderen sollte die (lineare) Pumpenabfallkurve im Versuch ein wenig mehr derjenigen im Reaktor angeglichen werden.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Allgemeine Bemerkungen

Bereits im Verlaufe der Vorversuche war einer der sechs äußeren Heizer (Heizer Nr. 2 in Abb. 1) durch einen Kurzschluß im Anschlußende des Heizers defekt geworden. Es war vergeblich versucht worden, den Defekt durch Ausbohren der Isolierschicht zwischen der Heizerhülle und dem Kupferbolzen zu beheben. So wurden die Versuche mit sechs beheizten Stäben fortgesetzt.

Durch den Ausfall dieses Heizers ergaben sich für die benachbarten Heizer 7, 1 und 3 in Umfangsrichtung sehr viel größere Temperaturunterschiede und damit Stabverbiegungen als im Normalfall, in dem alle Heizer intakt sind. Sehr wahrscheinlich als Folge hiervon zeigten einzelne Signale von Heizer-Thermoelementen (z.B. T5 und T8) Temperaturoszillationen mit Amplituden von bis zu $+ 50$ K bei Frequenzen von $0,2 \dots 0,5 \text{ s}^{-1}$. Diese Temperaturoszillationen traten bevorzugt bei der Einstellung des stationären Zustandes für die Versuche mit starker Drosselung (30%) auf. Sie konnten meist erst nach mehrmaligem Neubeginn des betreffenden Versuchs durch vorsichtiges Schließen des Drosselventils unterdrückt werden. Dafür, daß die Temperaturoszillationen im Zusammenhang mit dem unbeheizten Stab gesehen werden müssen, spricht auch die Tatsache, daß bei den Versuchen im Siebenstab-Bündel Nr. 2 eine solche Erscheinung nicht beobachtet wurde.

Durch den Ausfall des Heizers 2 und die daraus resultierende ungleichförmige Beheizung des Bündelquerschnitts reduziert sich die Symmetrie der Beheizung auf eine einzige Linie, die durch die Mitten der Stäbe 2 und 5 geht. Neben die Unterscheidung der Unterkanäle in Zentral-, Rand- und Eckkanal tritt in der folgenden Auswertung noch die Aufteilung des Bündelquerschnitts in drei Bereiche (vergl. hierzu die Skizze im oberen Teil der Abb. 13):

- Bereich 1: Ein 120° -Ausschnitt um den defekten Heizer 2
- Bereich 2: Zwei symmetrische 60° -Ausschnitte
- Bereich 3: Ein 120° -Ausschnitt um den Heizer 5

Zieht man keine oder nur geringe Stabverbiegungen in Betracht, so sind im Bereich 3 die höchsten Temperaturen und auch der Siedebeginn zu erwarten.

Ein Überblick über die 6 Siedeversuche ist in der Tabelle 2 am Ende des Berichtes gegeben. Leider konnte die Versuchsreihe mit etwa 10 geplanten Versuchen nicht zu Ende geführt werden, da während der Versuche 28 und 29 das Heizerschutzsystem der Teststrecke nicht ansprach, was im letzten Versuch zum Durchschmelzen der Heizer und des Teststreckenrohres infolge Nichtabschaltens bzw. zu spätem Abschaltens der Heizleistung führte.

Im oberen Drittel der Tabelle sind die wichtigsten Parameter zu Beginn der Versuche angegeben, die durch Vorausberechnungen und Vorversuche ermittelt wurden und eine bestmögliche Simulation der Bedingungen im Reaktor bei Siedebeginn ergeben sollten. Bevor weiter unten Ablauf und Ergebnis zweier Versuche näher beschrieben werden, sollen noch einige allgemeine Angaben zur Übersichtstabelle gemacht werden.

Die Leistung der Versuche 18 ... 28 wurde so bemessen, daß die mittlere Wärmestromdichte eines Mk II-Außenelementes in der Weise übertragen wurde, daß sich eine gleich hohe, "verschmierte" Wärmestromdichte für die 7 Stäbe des Bündels ergab. Für den Versuch 29 wurde für die sechs beheizten Stäbe zunächst eine Wärmestromdichte gewählt, die derjenigen eines Zentralelementes entspricht. In weiteren Versuchen sollte die Leistung dann um ein Sechstel erhöht werden.

Als Zeit für den Siedebeginn wurde der Zeitpunkt genommen, in dem ein Meßsignal in eindeutiger Weise Sieden anzeigte. In allen Fällen war dies das Drucksignal p_2 , und es dauerte zumeist einige Zehntel Sekunden, bis sich ein merkbares Wachstum des Dampfolumens einstellte.

Die Zeitangabe für den Dryout bezieht sich auf das erste Anzeichen eines charakteristischen Temperaturanstiegs in den Anzeigen der Heizer-Thermoelemente. Dryout konnte daher auch schon etwas früher an anderen, nicht von einem Thermoelement überwachter

Stelle aufgetreten sein.

Als Siede-Gesamtzeit wurde die Zeitdifferenz zwischen dem ersten Siedepuls und dem letzten Druckpuls genommen, der das Kollabieren des letzten größeren Blasenvolumens anzeigte. Auf eine Angabe bei den Versuchen 28 und 29 wurde verzichtet, da hier, wie gesagt, die Heizleistung nicht rechtzeitig abgeschaltet wurde.

4.2 Versuch 7-3/21

In den Abb. 5 bis 13 sind das Wachstum der Siedezone und des äquivalenten Dampfvolmens, einige der wichtigsten Signale und die Entwicklung der radialen und axialen Temperaturverteilung in der Teststrecke dargestellt. Sieden begann zur Zeit $t=16,82s$ etwa auf der Höhe 560mm, zuerst wahrgenommen durch Pulse auf den Drucksignalen p_1 , p_2 und p_3 (vergl. p_2 in Abb. 8) und durch die erste Spitze auf dem Durchflußsignal v_3 (s. Abb. 6). Obwohl es zu dieser Zeit im obersten Teil der beheizten Strecke überhitztes Natrium gab, wie aus der Anzeige des TE20 (s. Abb. 11) zu ersehen ist, breitete sich die Siedezone anfangs nur langsam und unter Bildung kleiner, rasch wieder kondensierenden Einzelblasen aus (s. Abb. 5). Diese schnellen Änderungen des Dampfvolmens und insbesondere das Kollabieren der Blasen werden deutlich durch Oszillationen bzw. sehr scharfe Wechsel im Druckverlauf (siehe p_2 in Abb. 8) wiedergegeben.

Aus der Art des Verlaufs des Signals T20 (s. Abb. 11) muß geschlossen werden, daß der Ort des Siedebeginns im benachbarten zentralen Unterkanal (zwischen den Heizern 1, 4 und 5) gelegen haben muß: Der Siedeverzug des Natriums in der Umgebung des TE20 wird nur langsam durch die Pulsationen im Nachbarkanal abgebaut, die Entstehung eines zweiten Siedezentrums dadurch im Anfang unterdrückt. Erst nachdem das Siedegebiet eine gewisse Ausdehnung in radialer und azimuthaler Richtung erfahren hat, stellt sich ab etwa $t=18,6s$ ruhigeres Sieden ein (vergl. dazu die Beschreibung der Abb. 12 auf S. 13 ff).

Bevor die Beschreibung des weiteren Siedeablaufs fortgesetzt wird, sollen im folgenden einige Anmerkungen zur Entstehung und Bedeutung der Abb. 5, in der die transiente axiale Entwicklung der Siedezone dargestellt ist, gemacht werden. Die durchgezogenen Linien geben für den zentralen Unterkanal des Querschnittsbereichs 3 die unteren und oberen Grenzen des Zweiphasengebietes gegenüber dem reinen Flüssigkeitsgebiet wieder, so gut deren Verlauf aus den Anzeigen der Thermolemente und Void-Meßstellen rekonstruiert werden konnte.

Während Voidsignale stets eindeutige Informationen über den Aggregatzustand (flüssig - dampfförmig) der Umgebung der Meßstelle liefern, ist diese Information aus den Thermolement-Signalen nicht so leicht zu erhalten. Natrium- und Heizerthermolemente zeigen am Ende der Aufheizphase durch Beharren auf einem bestimmten Temperaturniveau an, daß ihre Umgebung bzw. die Heizeroberfläche Siedebedingungen erreicht haben. Von diesem Zeitpunkt an kann, bei weiterhin etwa gleichbleibendem Temperaturniveau, nicht mehr eindeutig auf den Aggregatzustand geschlossen werden, da Flüssigkeits- und Dampftemperatur beim Sieden praktisch gleich sind. Aus diesem Grunde sind die Temperaturanzeigen, insbesondere in der Kondensationsphase, mit besonderer Sorgfalt zu bewerten. Zusätzliche Erkenntnisse können hier bei gleichzeitiger Beachtung des Druckverlaufs gewonnen werden.

Erschwert wurde die Rekonstruktion des Void-Gebietes durch die ungleichförmige Wärmequellenverteilung über dem Bündelquerschnitt hinweg. Die Existenz des unbeheizten Stabes hatte zur Folge, daß während der gesamten Siedephase der Flüssigkeitsanteil des Kühlmittelstroms seinen Weg bevorzugt durch die Unterkanäle in der unmittelbaren Umgebung des genannten Stabes nahm. Von diesen waren es wiederum die Wandkanäle zu beiden Seiten dieses Stabes, aus denen das flüssige Natrium zuletzt durch Na-Dampf verdrängt wurde. Dies wird durch die Reihenfolge demonstriert, in der in einem bestimmten Querschnitt Thermolemente Siedetemperatur erreichen oder Voidsignale den Übergang von der flüssigen in die Dampf-Phase des Kühlmittels anzeigen. In der ME480 sind dies die Heizerthermolemente TE12/TE11/TE10 (s. Abb. 11) und die Voidsignale V9/V8 (s. Abb. 7),

in der ME570 die Thermolemente T18/T17/T42/T43/T16 (s. Abb. 9) und die Voidsignale V12/V13 (s. Abb. 7).

Aus dem Verlauf der Voidsignale läßt sich gut ein Überblick über die zeitliche Abfolge und die räumliche Ausdehnung verschiedener Arten der Zweiphasenströmung während des Siedens gewinnen. In Abb. 5 sind Gebiete eingezeichnet, die überwiegend von den folgenden Strömungsformen gekennzeichnet waren:

1. Aufeinander folgende Einzelblasen zu Beginn des Versuchs, wie schon oben erwähnt.
2. Ab etwa $t=18,3s$ entstand eine mehr oder weniger homogene Mischung aus vielen kleinen Einzelblasen mit einem hohen Flüssigkeitsanteil. Dieses Strömungsbild wurde im weiteren Verlauf mehr in den Grenzbereichen zur oberen und unteren Phasengrenze angetroffen, während
3. ab etwa $t=19,6s$ sich im mittleren axialen Bereich eine ringförmige Zweiphasenströmung mit höherem Dampfgehalt über den gesamten Bündelquerschnitt hinweg ausbreitete. Dies wurde einmal durch gleichbleibend hohe Voidsignale, zum anderen durch das TE16 (Erreichen der Siedetemperatur auch auf der Oberfläche des unbeheizten Stabes) angezeigt. In diesem Gebiet und in diesem Zeitabschnitt kam es dann, mit kurzen zeitlichen Verschiebungen, zum Auftreten von Dryout (dazu mehr weiter unten).
4. Bald nach der Abschaltung der Leistung wurde von der unteren Phasengrenze her der Durchgang von größeren durch Flüssigkeitspfropfen von einander getrennten Einzelblasen verzeichnet. Das Passieren eines solchen Flüssigkeitsvolumens wurde auch sichtbar gemacht durch die abrupte Abkühlung überhitzter Heizstaboberflächen bis auf Sättigungstemperatur (siehe z.B. T20 in Abb. 11 bei $t=22,15s$).

Die Differenzen der Ordinaten der feingestrichelten Linien in Abb. 5 stellen das bereits erwähnte äquivalente Dampfvolumen dar, das durch zeitliche Integration und Differenzbildung der Kühlmittelintritts- und -austrittsgeschwindigkeiten berechnet wurde. Die Ordinatendifferenz ist somit ein Maß für die jeweilige axiale Länge, die der Dampf bei vollständiger Ausfüllung des Bündelquerschnitts (Dampfvolumenteil $\alpha=1$) einnehmen würde. Die axialen Koordinaten der beiden eingezeichneten Linien sind daher willkürlich, wurden jedoch so gewählt, daß sie innerhalb der äußeren Begrenzung des Zweiphasengebiets lagen.

Die ersten Dryout-Signale kamen von den TE5 und 8 zu den Zeiten $t=20,15$ bzw. $20,18$ s (der Dryout bei TE5 war nur von sehr kurzer Dauer). Bereits etwa eine halbe Sekunde vorher war das Durchflußsignal v_1 überproportional stark nach unten hin abgebogen. Ursache hierfür war der mit steigendem Dampfgehalt rasch zunehmende Druckverlust in der Zweiphasenzone. Das Ausmaß der anschließenden Strömungsumkehr war jedoch wegen der starken Drosselung gering. Dryout breitete sich anschließend innerhalb eines Zeitraums von $0,25$ s im oberen Drittel des beheizten Abschnitts aus und erfaßte da den Großteil der beheizten Staboberflächen. Keine Anzeichen von Dryout zeigten die TE10 und 14 (ME480 bzw. 530).

Das Auftreten von Dryout, mit dem eine Verminderung der Dampfproduktion verbunden ist, wurde auch sichtbar durch den Verlauf des Drucksignals p_1 (ME 400mm, nicht abgebildet): Mit dem Beginn der ruhigeren Siedephase, etwa ab $t=18,6$ s, war ein kontinuierlicher Anstieg des Druckes p_1 bis zu einem Maximum zur Zeit $t=20,15$ s zu verzeichnen. Ab diesem Zeitpunkt fiel der Druck leicht und ab $t=20,5$ s, dem Zeitpunkt der Leistungsabschaltung, in stärkerem Maße ab.

Zur weiteren Illustration der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Temperaturen und des Siedegebietes dienen die Abbildungen 12 und 13. In der Abb. 12 wurden für zwei Meßebenen ^{x)}

x) Bei der Darstellung in Abb. 12 (und auch in Abb. 20) ist zu beachten, daß die Meßstellen (Temperatur und Void) der rechten Hälfte der Meßebene symmetrisch auf die linke Hälfte übertragen wurden.

(ME 430 und ME 570) und vier verschiedene Zeitpunkte die Temperaturen zweier benachbarter Unterkanäle und dreier Heizerröhre angegeben. Außerdem wurde für zwei andere Unterkanäle entsprechend der Anzeige der Void-Meßstellen die anteilmäßige Zusammensetzung der Phasen (Flüssigkeit - Dampf) des Kühlmittels symbolisch dargestellt. Die Zeitpunkte sind (vergleiche dazu Abb.5)

- (1) der Beginn des Siedens ($t=16,82s$),
- (2) der Beginn der Phase, in der sich eine weitgehende Trennung der oberen von der unteren Flüssigkeitssäule durch die Siedezone vollzog ($t=18,5s$),
- (3) der Beginn der Dryout-Phase ($t=20,15s$) und
- (4) die Zeit $t=25,12s$ gegen Ende der Kondensationsphase, wo die in den Stäben nach Leistungsabschaltung noch vorhandene Überschußwärme nur noch zur Bildung weniger kleiner Blasen ausreichte.

Die Temperaturen, die Siedeniveau erreicht hatten, sind in Abb. 12 durch Unterstreichen gekennzeichnet. Aus der Darstellung ist gut zu erkennen, daß die Siedetemperaturen in einer bestimmten Meßebene mit der Zeit bis zum Dryout anstiegen und daß sie für einen konstanten Zeitpunkt mit abnehmender axialen Höhe infolge des wachsenden Zweiphasendruckverlustes oberhalb des betrachteten Niveaus zunehmen. Für die Temperaturdifferenz zwischen dem Ort eines Thermoelementes in der Heizerröhre und der Hüllenoberfläche ergibt sich bei einer konstanten Wärmestromdichte an der Oberfläche von 116 W/cm^2 rein rechnerisch ein Betrag von $9,7\text{K}$. Dieser Wert kann u.a. durch geringe Änderungen in der radialen Position des Thermoelementes in der Hülle oder durch Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung des Hochtemperatur-Lotes, in das die Meßspitze des Thermoelementes eingebettet ist, nach oben und nach unten hin schwanken. Die Temperaturangaben (z.B. T42 und T43 in ME570 zur Zeit $t=20,15s$) lassen aber auch die Grenzen und Toleranzen erkennen, mit denen trotz sorgfältiger Kalibrierung beim Vergleich von Temperaturanzeigen von solch hohem Niveau gerechnet werden muß. (Neben den Signalverstärkern wurden die Thermoelemente isotherm bei Temperaturen

von 400 und 600°C kalibriert).

Für dieselben Zeitpunkte wie in Abb. 12 wurden in Abb. 13 die axialen Temperaturverläufe entlang der Teststrecke aufgezeichnet. Besonders in dieser Darstellung ist aus dem fächerförmig auseinandergehenden axialen Temperaturprofil bei Siedebeginn der Einfluß des unbeheizten Stabes zu erkennen. Auf der anderen Seite ist zu erkennen, wie langsam der Ausgleich der unterschiedlichen Temperaturen zwischen den Unterkanälen im oberen unbeheizten Abschnitt des Bündels vor sich ging. Mit diesem Versuchsergebnis bietet sich eine gute Gelegenheit, mit Hilfe eines Rechenprogrammes Massen- und Wärmetransportkoeffizienten für Bündelgeometrien zu überprüfen.

4.3 Versuch 7-3/29

Dieser Versuch ist der einzige der Reihe, der mit höherer Leistung durchgeführt wurde. Daher wird sein Verlauf im zweiten Beispiel an Hand der Abb. 14 bis 21 in ähnlicher Weise wie oben der Versuch 7-3/21, jedoch nicht so ausführlich, beschrieben. Wie bereits erwähnt, endete der Versuch auf nicht vorhergesehene Weise. Weiterhin ist anzumerken, daß die Drosselung des Kühlmittelstroms im Zulaufrohr zur Teststrecke gering war.

Sieden begann zum Zeitpunkt $t=20,35s$ ohne erkennbaren Siedeverzug, wahrscheinlich am oberen Ende der beheizten Strecke. Trotz der höheren Leistung ist anfänglich ein sehr viel langsames Wachstum des Siedegebietes gegenüber dem im Versuch 7-3/21 festzustellen (vergl. Abb. 14 mit Abb. 5). Es ist zu vermuten, daß sich infolge Stabverbiegung am Ende der beheizten Strecke ein enger Unterkanal mit anormal hohen Temperaturen gebildet hatte. Im weiteren Verlauf des Versuchs ist es während der schnelleren axialen Ausbreitung der Siedezone dann doch noch zu Siedeverzügen gekommen, wie aus den Verläufen der TE5 und 8 in Abb. 19 zu ersehen ist.

Die Drucksignale zeigten auch in diesem Versuch in der Anfangsphase des Siedens z.T. starke, hochfrequente Pulsationen, deren Amplituden merkbar zurück gingen, sobald die Siedefront die axiale Höhe der Druckaufnehmer passiert hatte. Etwa bis zur Zeit $t=23,3s$ herrschte im gesamten Siedegebiet eine Zweiphasenströmung mit vielen kleinen Einzelblasen vor (vergl. Abb. 14). Von da ab bildete sich, ausgehend von den zentralen Unterkanälen des Querschnitts im mittleren Abschnitt des Zweiphasengebietes bevorzugt eine ringförmige Strömung mit hohem Dampfgehalt aus.

In Abb. 20 sind für vier Zeitpunkte die radiale Temperaturverteilung und die Phasenzusammensetzung des Kühlmittels in einzelnen Unterkanälen in zwei Meßebenen dargestellt. Die Zeitpunkte betreffen den Siedebeginn ($t=20,35s$), die Zeit kurz vor dem ersten Dryout-Anzeichen ($t=23,5s$), zu der die Sättigungstemperaturen ihr Maximum hatten, sowie zwei Zeitpunkte dazwischen ($t=21,7s$ und $t=22,6s$).

In der Entwicklung der Natrium-Temperaturen T40 und T41 in ME 530 und T42 und T43 in ME 570 sowie der symbolisch dargestellten Phasenzusammensetzung ist zum einen der Fortschritt im radialen Temperatúrausgleich zwischen zwei aneinander grenzenden Zentral- und Wandkanälen zu beobachten, zum andern ist auch der Einfluß des unbeheizten Stabes zu erkennen, aus dessen nächster Umgebung der Flüssigkeitsanteil des vorbeiströmenden Kühlmittels erst relativ spät verdrängt wird. Die Darstellung macht deutlich, daß zur Zeit $t=23,5s$ der obere Bereich des beheizten Abschnitts fast im gesamten Querschnitt leergesiedet war.

Wie auch in anderen Versuchen zu beobachten war, fällt auf, daß das Heizerwand-Thermoelement TE18 (s. Abb. 19) für den angrenzenden Eckkanal eine vergleichsweise langsame Temperatur-Anstiegsgeschwindigkeit signalisierte, der somit spät Siedetemperatur erreichte. Der Abstand der äußeren Stabreihe zur Sechskantrohr-Wand war recht gering, verglichen mit dem im Brennelement weniger als die Hälfte (0,7mm zu 1,6mm). Vorausberechnungen mit einem dreidimensionalen Rechenprogramm [47], allerdings mit einer 13% höheren Leistung als im Versuch 29, ergaben für den stationären Betrieb ($v_0=4m/s$) am Ende der Beheizung ein Temperaturgefälle zwischen Eckkanal und zentralem Unterkanal von ca. 55 K. Während der anschließenden Durchsatztransiente mit etwa derselben linearen Verzögerung wie im Versuch ($0,4m/s^2$) kehrte sich dieses Gefälle um, und bei Siedebeginn, 7,3s später, lag die Temperatur des Eckkanals um 65 K niedriger als die des Zentralkanals. Der Tendenz nach läßt sich somit der Verlauf der Temperatur T18 als programmgemäß bezeichnen. Leider befanden sich in den angrenzenden Rand- und zentralen Unterkanälen auf ME 570 keine Temperaturmeßstellen. Somit läßt sich hier kein direkter Vergleich anstellen.

Mit den Temperaturen T14, T40 und T41 ließe sich ein solcher Vergleich anstellen, wenn nicht die Temperatur T14, mit einer niederfrequentigen Schwankung (ca. 0,2 Hz) von ± 30 K schon von Beginn des Versuches an behaftet gewesen wäre. Diese Temperaturoszillation setzte sich auch in der transienten Phase fort und wirkte sich hier in einer Deformation des charakteristischen Temperaturanstiegs aus

(vergl. Abb. 19), hatte aber während des gesamten Versuchsverlaufs eine kaum wahrnehmbare Auswirkung (max. $\pm 1,5$ K) auf den Temperaturverlauf im benachbarten Randkanal (T41). Man kann daraus schließen, daß der Heizstab Nr. 5 in diesem Bereich eine langsame Biegeschwingung ausführte, deren Weg etwa in der Verbindung Stabmitte-TE14 lag. Infolge des geringen Wandabstandes des Heizers wirkte sich schon eine kleine Änderung dieses Abstandes relativ stark auf die Wärmeübergangsbedingungen im Eckkanal aus.

Das erste Zeichen von Dryout wurde zur Zeit $t=23,60$ s von den Thermoelementen T18 und 20 registriert, $0,13$ s nach der ersten Strömungsumkehr. Die Perioden dieser ersten und der nächstfolgenden fünf Umkehrungen von v_1 (es waren insgesamt 14 an der Zahl) sind auf der Zeitachse des Diagramms der Abb. 14 markiert. Das wiederholte Auftreten von Strömungsumkehr ist auf die sehr schwache Drosselung der Strömung am Eintritt in die Teststrecke zurückzuführen.

Innerhalb einer Zeitspanne von $0,23$ s breitete sich der Dryout bis zur Meßebeine 80 nach unten hin aus. Die Mehrzahl der Heizertemperaturen stieg auf Werte von weit über 1200°C , was stellenweise ein Schmelzen der Heizer (s.a. Abb. 23 bis 26) damit Rückwirkung auf die Heizerleistung zur Folge hatte. Im oberen Teil der Abb. 14 ist der ungefähre Verlauf der Leistung in dieser Versuchsphase skizziert. Erst bei $t=27$ s wurde die Leistung von Hand abgeschaltet, nachdem das Versagen des Heizerschutzsystems erkannt worden war.

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Bewertung der Ergebnisse der durchgeführten Versuche untereinander und auch der Vergleich mit den Versuchen in anderer Querschnittsgeometrie werden durch folgende Umstände erschwert, die zum Teil bereits erwähnt wurden, hier jedoch noch einmal in Stichworten zusammengefaßt werden:

1. Der Ausfall eines Heizers, der eine ungleichförmige Beheizung des Bündelquerschnittes zur Folge hatte und mit großer Wahrscheinlichkeit die an Hand der Temperatursignale beobachteten Biegeschwingungen der Heizer verursachte.
2. Das unbeabsichtigte und im Grunde unerwünschte, selbsttätige Ausfließen von Natrium in einigen Versuchen aus dem Verteilerring am oberen Ende des beheizten Abschnitts in die Teststrecke (mehr dazu s.u.).
3. Der Abbruch der Versuchsserie als Folge der Zerstörung der Teststrecke durch das Schmelzen der Heizer und der daraus resultierende Mangel an weiteren Versuchen bei höherer Leistung.

Zu obigem Punkt 2 muß noch folgendes ausgeführt werden: Die Beobachtung, daß in einigen der Versuche das Thermoelement TE74 an der Oberfläche eines der sechs Zulauf Röhrchen unterhalb des Verteilerringes (s. Abb. 1) wenige Sekunden nach Siedebeginn einen steilen Anstieg der lokalen Temperatur von etwa 620°C auf mehr als 820°C anzeigte, gibt Anlaß zu der Annahme, daß eine gewisse Menge Natrium zwischen dem nach oben hin abgesperrten Verteilerring und der Teststrecke ausgetauscht wurde und damit den Kondensationsvorgang im oberen, unbeheizten Teil des Bündels beeinflusste. Die weiteren Untersuchungen ergaben, daß die genannte Temperaturerhöhung etwa zu der Zeit einsetzte, als die obere Phasengrenze der Siedezone die Höhe $H=620\text{mm}$ passierte, das ist die Höhe, auf der die Zulauf Röhrchen in das Sechskantrohr mündeten (Eine Möglichkeit zur Abhilfe dieser unerwünschten Störung in den geplanten weiteren Versuchen wäre das Einfrieren des Natriums im Verteilerring während der Versuche gewesen). Wie groß die Natriummenge in den einzelnen Fällen gewesen ist und welchen Einfluß sie im weiteren Verlauf des Versuchs auf die axiale Ausdehnung der Siedezone nach oben hin genommen hat, kann nur durch eine detaillierte Nachrechnung mit einem geeigneten Rechenprogramm geklärt werden.

Eine wichtige Frage bei der Bewertung der Ergebnisse ist die der Reproduzierbarkeit. Zwei der Versuche, und zwar Nr. 19 und 21, sind mit nahezu denselben Anfangsbedingungen durchgeführt worden; auch die

Veränderung der Drosselung während der Transiente stimmt überein. Vergleicht man die charakteristischen Werte für Siedebeginn und die weitere Siedephase (siehe Übersichtstabelle), so findet man gute Übereinstimmung in den Eintrittsgeschwindigkeiten bei Siedebeginn und in der Zeitdifferenz von Siedebeginn und dem ersten Anzeichen von Dryout. Weniger gut ist die Übereinstimmung in der Zeitdifferenz von Siedebeginn und Strömungsumkehr (siehe auch weiter unten). Betrachtet man die Verläufe der verschiedenen Temperaturanzeigen über der Zeit, so stellt man weitgehend übereinstimmendes Verhalten in den verschiedenen Versuchsphasen fest. Lediglich die maximale axiale Ausdehnung der Siedezone ist im Versuch 19 etwas geringer.

Siedeverzug bei Siedebeginn konnte im Versuch 19 an Hand der Temperatursignale nicht festgestellt werden. Jedoch baute sich in dem dem TE20 benachbarten zentralen Unterkanal in der Zeitspanne von 0,5s nach Siedebeginn ein Siedeverzug von ca. 24 K auf, der in gleicher Weise wie im Versuch 21 abgebaut wurde (vergl. Kap. 4.2).

Nachrechnungen mit einem umfangreichen Rechenprogramm sind auch erforderlich, wenn charakteristische Unterschiede im Ablauf zweier Versuche mit unterschiedlicher Stabgeometrie, aber vergleichbarer spezifischer Stableistung und Vordrosselung, festgestellt werden sollen. Als Beispiel werden der weiter oben beschriebene Versuch 7-3/21 und der Versuch 7-2/13 (s. Abb. 22), durchgeführt mit dem 7-Stabbündel Nr. 2 (s. [3], Wärmestromdichte $q=98\text{W/cm}^2$), genommen.

Beim Vergleich der Darstellungen in den Abbildungen 5 und 6 einerseits und der Abb. 22 andererseits findet man bereits Ähnlichkeiten in der äußeren Form der Siedegebiete und im Ablauf des Siedens: Einzelblasen zu Beginn, dann stetiges Wachstum des Siedegebietes bis zum Zeitpunkt der Leistungsabschaltung, davor einmalige Strömungsumkehr und am Ende des Versuchs eine relativ ruhige Kondensationsphase mit einer Folge von großen Einzelblasen (Pfropfenströmung).

Unterschiede gibt es vor allem in den Kühlmittelgeschwindigkeiten, bei denen Sieden eintrat (1,42m/s im Versuch 7-3/21 bzw. 0,76m/s im Versuch 7-2/13), was durch die unterschiedlichen Verhältnisse von Heizeroberfläche zu Volumeneinheit des Kühlkanals (für die zentralen Unterkanäle: 11 bzw. 7,3 cm²/cm³), aber auch durch den kälteren "Bypaß" entlang dem unbeheizten Stab erklärt werden kann, und bei den Zeitdifferenzen zwischen Siedebeginn und erstem Anzeichen von Dryout ($\Delta t=3,33s$ bzw. 2,62s). Diese längere Siedezeit bis zum Dryout läßt sich dadurch erklären, daß durch die ungleichmäßige Beheizung des Bündelquerschnitts das Siedegebiet zu Beginn des Siedens relativ klein war, sich hauptsächlich auf den Querschnittsbereich 3 beschränkte und somit recht langsam wuchs.

Bei den Versuchen mit dem Siebenstab-Bündel Nr. 2 ergab sich stets die zeitliche Reihenfolge Strömungsumkehr - Dryout, wobei die Zeitabstände zwischen 0,05s und 0,85s, in der Mehrzahl zwischen 0,2s und 0,3s lagen [3]. Wie man aus der Übersichtstabelle ablesen kann, ist eine solche Reihenfolge bei den Versuchen mit dem Bündel Nr. 3 nicht immer feststellbar, und die Zeitabstände zwischen erstmaliger Strömungsumkehr und Dryout sind wesentlich kürzer. Das bedeutet, daß in einzelnen Fällen die kritischen Kühlungsbedingungen, d.h. keine Nachspeisung des Natriumfilms auf der Heizeroberfläche, bereits gegeben waren, als der Kühlmitteldurchsatz insgesamt noch positiv war. Dies deutet auf eine sehr ungleichmäßige Verteilung des Flüssigkeitsanteils über dem Bündelquerschnitt hin und ist mit Sicherheit auf die Existenz des unbeheizten Stabes zurückzuführen.

In diesem Zusammenhang sind auch die in der Übersichtstabelle aufgeführten Werte für die äquivalente Filmdicke zu sehen. Diese ist die fiktive Dicke eines Natriumfilms, der in der Zeit zwischen Siedebeginn und Dryout auf der Heizeroberfläche verdampfen würde. Die Werte für das Bündel Nr. 3 liegen um 20 - 30% über denen, die für das Bündel Nr. 2 (bei vergleichbarer Wärmestromdichte) berechnet wurden. Aus Gründen, die schon weiter oben angegeben wurden, sind die Zeitdifferenzen zwischen dem Moment, in dem die obere und die untere Siedefront sich deutlich zu separieren beginnen (z.B. $t=18,5s$ im Versuch 7-3/21, s. Abb. 5), und dem Zeitpunkt, in dem Dryout auftritt, wahrscheinlich eher für einen Vergleich der Kühlbarkeit der verschiedenartigen Bündelgeometrien geeignet. Genauere Aussagen lassen sich jedoch ohne detaillierte Berechnungen schwerlich machen.

5. Schlußbemerkungen

Der vorliegende Bericht über die Siedeveruche, die zum LOF-Störfall im mit hoher Leistungsdichte vorgesehenen zweiten Core des SNR 300 in einer entsprechend dimensionierten Siebenstab-Bündelteststrecke durchgeführt wurden, gibt neben einer Dokumentation der wichtigsten Parameter der Versuche eine Beschreibung des Ablaufs der Versuche an Hand zweier Beispiele. Trotz der Abstriche, die man wegen des ausgefallenen Heizers an ihrem Wert machen muß, bestätigen die Versuchsergebnisse das Bild vom Ablauf eines derartigen Störfalles, das man sich auf Grund bisheriger Versuche und Überlegungen vom Beginn der Störung bis zum Kühlungsversagen (permanenter Dryout) gemacht hat. Quantitative Vergleiche mit den Ergebnissen aus früheren Versuchen sowie eine Übertragung der Ergebnisse auf Reaktorverhältnisse können nur mit Hilfe eines zwei- bis dreidimensionalen Rechenprogramms angestellt bzw. vorgenommen werden.

Die Auswertung der Aufzeichnungen der Schallaufnehmer ist bis dato noch nicht durchgeführt worden, kann jedoch im Rahmen der o.g. weiteren Untersuchung erfolgen.

Durch den Umstand, daß im letzten Versuch der Reihe die Leistung nicht wie üblich kurz nach dem Erreichen permanenter Austrocknung der Staboberflächen abgeschaltet wurde, bietet sich eine gute Gelegenheit, die auf den Dryout folgende Phase dieses Störfalles unter den gegebenen Versuchsverhältnissen zu studieren. Nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand ist der bei den in Ref. [9] untersuchten Kühlmitteldurchsatzstörfällen erwartete Störfallverlauf in dieser Phase durch weitgehendes Leersieden der aktiven Corezone mit parallel dazu fortschreitendem Schmelzen des Brennstoffs und der Hüllrohre gekennzeichnet. Im Versuch läßt sich diese Phase an Hand der Temperatur- und Voidsignale verfolgen. Der Zustand und das Aussehen der Heizstäbe und des Sechskantrohrs nach dem letzten Versuch geben dazu Aufschluß über Bewegungen von geschmolzenem Material.

Die in den Abbildungen 23 bis 26 wiedergegebenen fotografischen und Röntgen-Aufnahmen von den oberen zwei Dritteln des beheizten Abschnittes der Bündel-Teststrecke vermitteln einen Eindruck vom Ausmaß der Zerstörung. Eine Inspektion der Teststrecke in dem in Abb. 23 dargestellten Zustand und die Auswertung der Röntgenbilder lassen folgende qualitativen Aussagen zu:

- Sehr starke Zerstörungen der Heizler, insbesondere der Heizler 5 und 6, sind zwischen den axialen Höhen 320 ... 430 mm und 480 ... 540 mm zu erkennen. Der Heizler 5 ist in zwei Teilabschnitten von 25 und 50 mm Länge völlig desintegriert, d.h. abgeschmolzen. Das Teststreckenrohr ist an einigen Stellen durchgeschmolzen (s. Abb. 23).
- Keine inneren oder äußeren Schäden an den Heizlern sind entlang der Abschnitte 0 ... 220 mm und 570 ... 600mm festzustellen.
- Geschmolzener Stahl hat sich in verschieden großen Mengen in körniger Form, als Überzug oder als Blockade auf den Stäben bzw. in den Unterkanälen im Abschnitt 220 ... 570 mm abgelagert. Eine fast völlig dichte Stahlblockade von etwa 25 mm Länge hat sich oberhalb des Abstandshalters (H = 450 mm) gebildet.
- Unterhalb der oben erwähnten Stahlblockade sind starke Stabverbiegungen, in deren Maximum sich eine weitere, kleinere lokale Stahlblockade gebildet hat, und Scherbrüche an Heizlern (siehe z.B. Heizler 7 in Abb. 25 bei H = 290 mm) aufgetreten.

Weitere detaillierte Untersuchungen sollen in einer weiteren Arbeit vorgenommen werden.

6. Literatur

- [⁻1₋] Fröhlich, R.; Roysl, P.; Schmuck, P.; Düsing, R.;
Senglaub, M.:
Analyse schwerer hypothetischer Störfälle für den SNR-300
Mark 1A Reaktorkern.
KfK 2310, (Juni 76)
- [⁻2₋] Kaiser, A.; Pepler, W.:
Sodium Boiling Experiments in an Annular Test Section under
Flow Rundown Conditions.
KfK 2389, (März 1977)
- [⁻3₋] Aberle, J.; Brook, A.J.; Pepler, W.; Rohrbacher, H.;
Schleisiek, K.:
Sodium Boiling Experiments in a 7-Pin Bundle under Flow
Rundown Conditions.
KfK 2378, (November 1976)
- [⁻4₋] Bottoni, M.; Struwe, D.:
Unveröffentlichte Ergebnisse
- [⁻5₋] Mattes, K.; Ochs, G.:
Unveröffentlichte Ergebnisse
- [⁻6₋] Hess, B.; Pay, A.:
Unveröffentlichte Ergebnisse
- [⁻7₋] Roysl, P.:
Persönliche Mitteilung
- [⁻8₋] Hoang, Y.S.:
TIGER V, Programmbeschreibung 234 (1970), unveröffentlicht

[9] Royl, P.; Cramer, M.; Düsing, R.; Essig, C.; Fröhlich, R.;
Schmuck, P.; Struwe, D.; Zimmerer, W.:
Untersuchungen zu Kühlmitteldurchsatzstörfällen im ab-
gebrannten Mark 1A-Kern des Kernkraftwerks Kalkar.
KfK 2845 (Dezember 1979)

7-Stabbündel Mk II-
Brennelement

Stabzahl	--	7	127
Stabdurchmesser	mm	7,6	7,6
Stabmittenabstand	mm	8,8	8,8
Abstand zwischen Randstab und Kastenwand	mm	0,7	1,6
Hydraul. Durchmesser:			
Zentraler Unterkanal	mm	3,64	3,64
Randkanal	mm	3,26	4,79
Eckkanal	mm	1,79	3,95
Gesamtquerschnitt	mm	3,04	3,89
Länge der beheizten bzw. aktiven Zone	mm	600	950
Axiale Leistungsverteilung		gleichmäßig	kosinusförmig
Mittl. Stablängenleistung	W/cm	ca. 360	364 (206)*
Wärmekapazität eines Stabes	Ws/cm·K	1,90	1,60
Höhe der Na-Säule oberhalb des Bündelendes **	mm	465	ca. 460
Bündellänge oberhalb der beheizten bzw. akt. Zone	mm	455	ca. 480
Bündellänge unterhalb der beheizten bzw. akt. Zone	mm	200	ca. 1060
Natrium-Eintrittstemperatur	°C	ca. 560	377

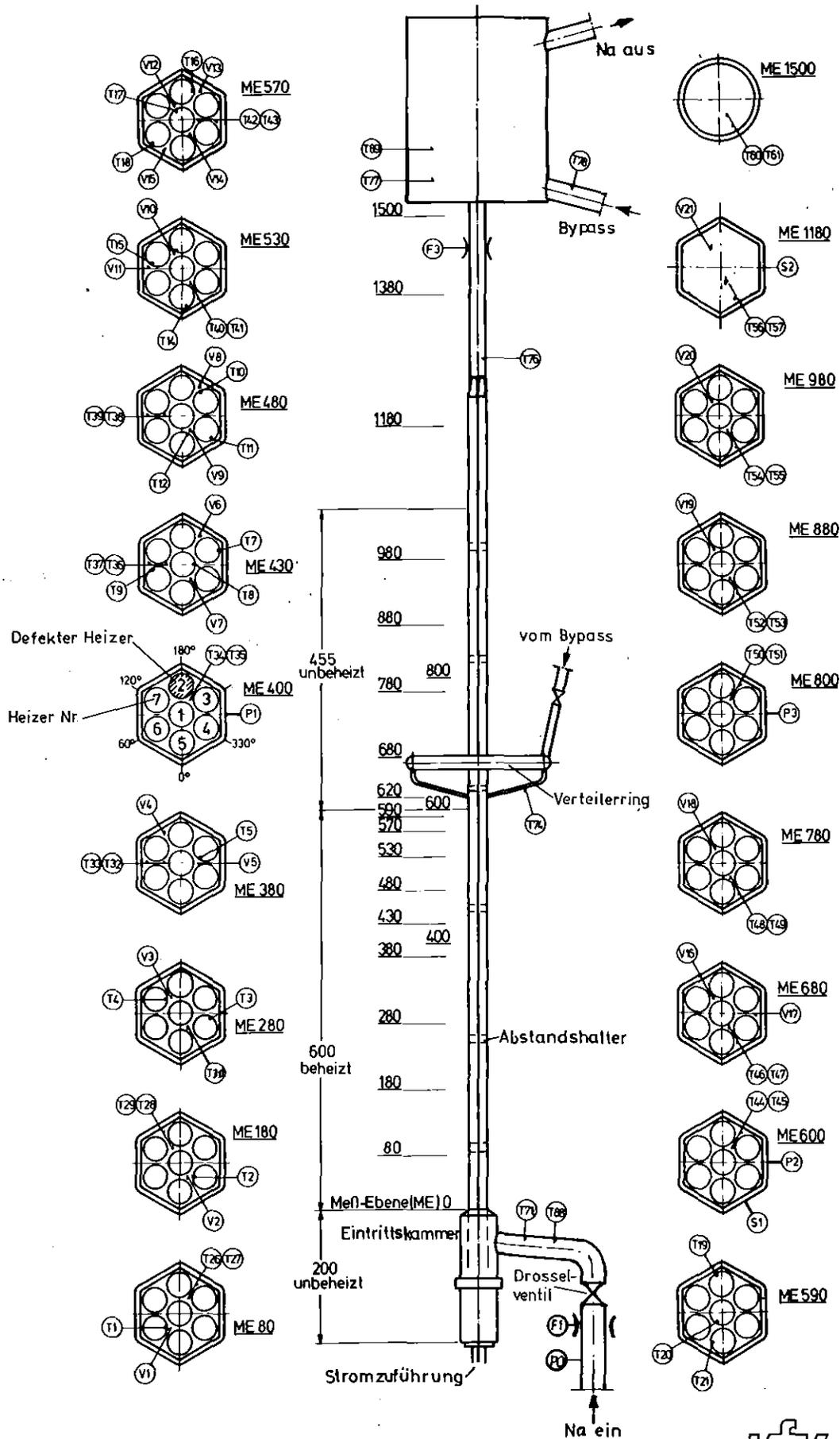
*) Wert für Außenelement in ()

**) Angegeben ist die Höhe bis zur abrupten Erweiterung des Strömungsquerschnittes bei ME1520 bzw. an der Oberkante des Brennelements

Tab. 1: Vergleich zwischen Testbündel und Mk II-BE

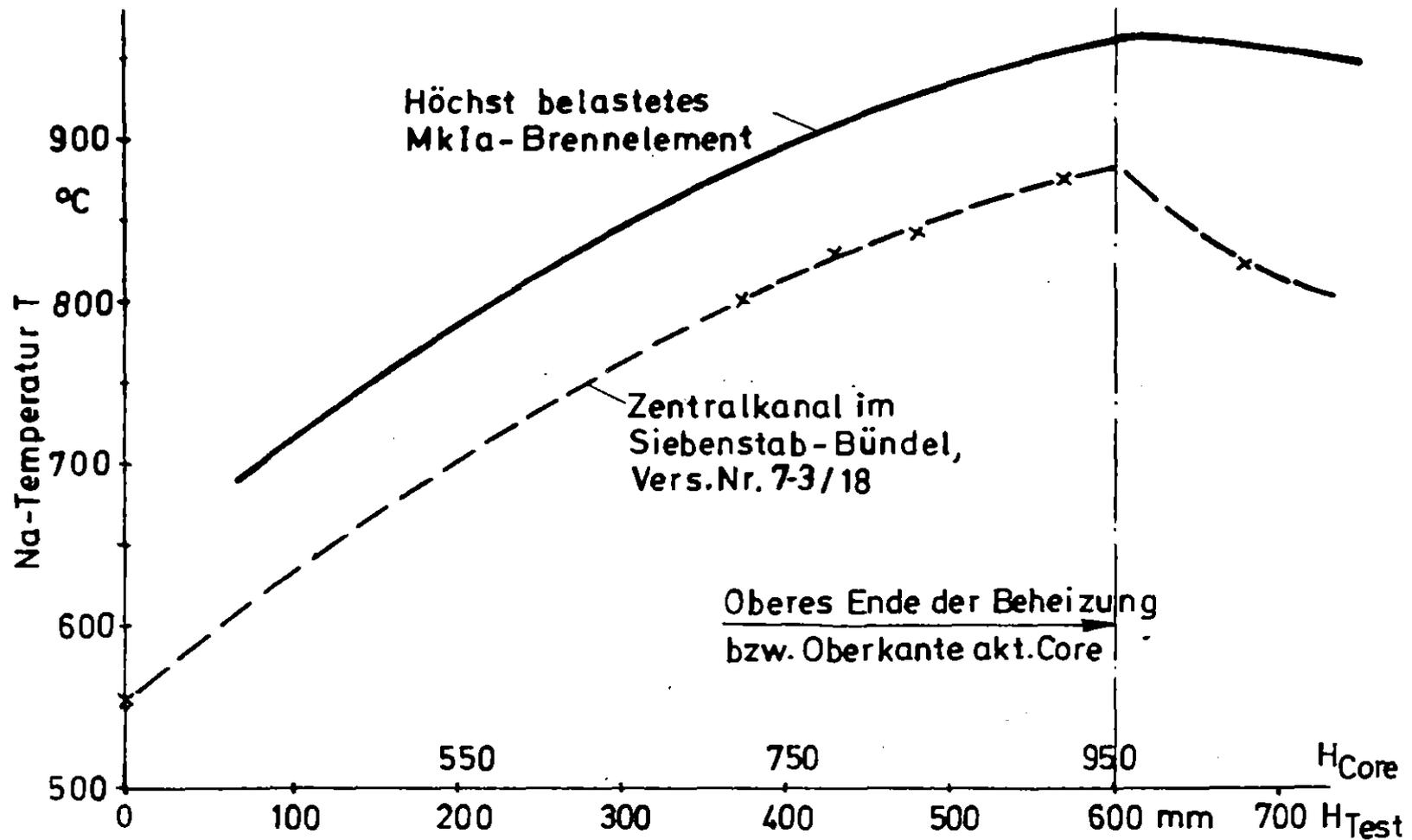
Versuch Nr. 7-3/...			18	19	20	21	28	29
Stationäre Werte	Wärmestromdichte, bezogen auf 6 Stäbe	W/cm ²	115,8	116,1	116,0	115,9	115,2	150,3
	7 Stäbe	W/cm ²	99,2	99,5	99,5	99,3	98,7	128,8
	Druck am Austritt der Teststrecke (ME1500)	bar	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
	Druck am Eintritt zur Teststrecke (ME 0)	bar	2,04	1,97	1,62	2,02	1,99	2,90
	Na-Eintrittsgeschwindigkeit	m/s	3,84	3,69	2,65	3,81	3,77	5,56
	Drosselventil-Stellung	%	35	32+28	30	32+28	30	35
	Eintrittstemperatur	°C	558,5	558,5	558,0	558,5	557,5	559,5
Austrittstemperatur	°C	688	697	747	691	689	677	
Transiente und Siedebeginn	Beginn der Transiente $t=t_t$	s	10,20	11,50	11,15	9,80	10,15	12,35
	Siedebeginn $t=t_{SB}$	s	16,60	18,12	16,83	16,82	18,65	20,35
	Differenz $t_{SB}-t_t$	s	6,40	6,62	5,68	7,02	8,60	8,00
	Eintrittsdruck bei $t=t_{SB}$	bar	1,34	1,33	1,32	1,33	1,29	1,47
	Druck am Ende der beheizten Strecke bei $t=t_{SB}$	bar	1,21	1,22	1,21	1,22	1,18	1,25
	Gesamtdruck-Differenz (ME 0 ... 1500) bei $t=t_{SB}$	bar	0,27	0,26	0,25	0,26	0,22	0,40
	Na-Eintrittsgeschwindigkeit bei $t=t_{SB}$	m/s	1,50	1,45	1,35	1,42	1,32	2,18
	Siedeverzug bei Siedebeginn	K	0	0	0	15	7	0
Siedephase	Zeit bis zur Strömungsumkehr (t_u-t_{SB})	s	2,95	3,53	3,42	3,31	3,05	3,12
	Zeit bis zum Dryout ($t_{DO}-t_{SB}$)	s	2,98	3,33	3,27	3,33	3,10	3,25
	Äquivalente Filmdicke ($s=q \cdot \Delta t_{DO} / \rho \cdot r$)	mm	1,21	1,35	1,33	1,35	1,25	1,71
	Zeit bis zur Leistungsabschaltung ($t_{Paus}-t_{SB}$)	s	3,55	3,63	3,54	3,66	4...10	5...7
	Siede-Gesamtzeit	s	9,70	8,93	7,45	8,93	--	--

Tabelle 2: Übersichtstabelle



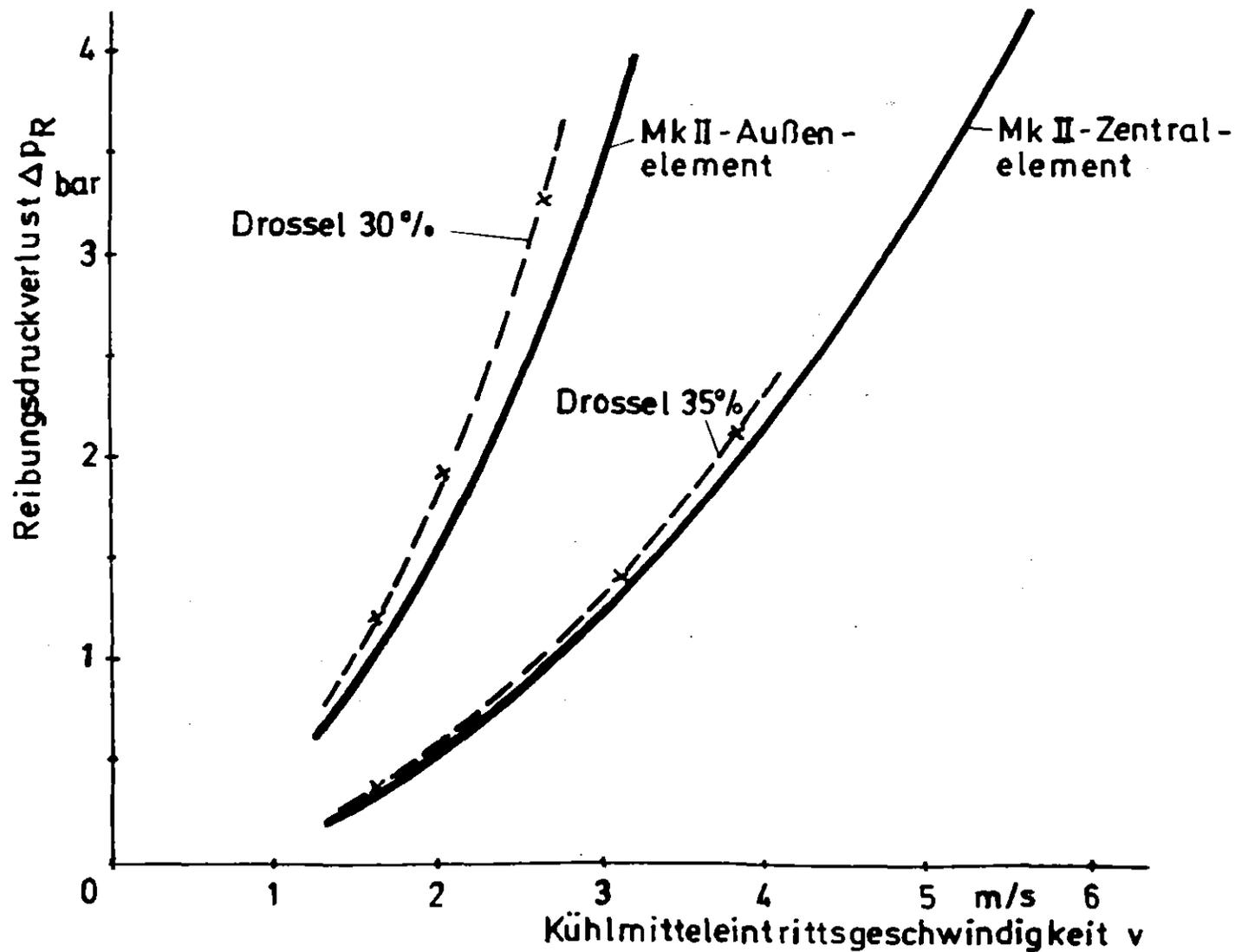
KFK

NSK 7-Stab-Bündel 3
 Abb.1 Instrumentierungsübersicht



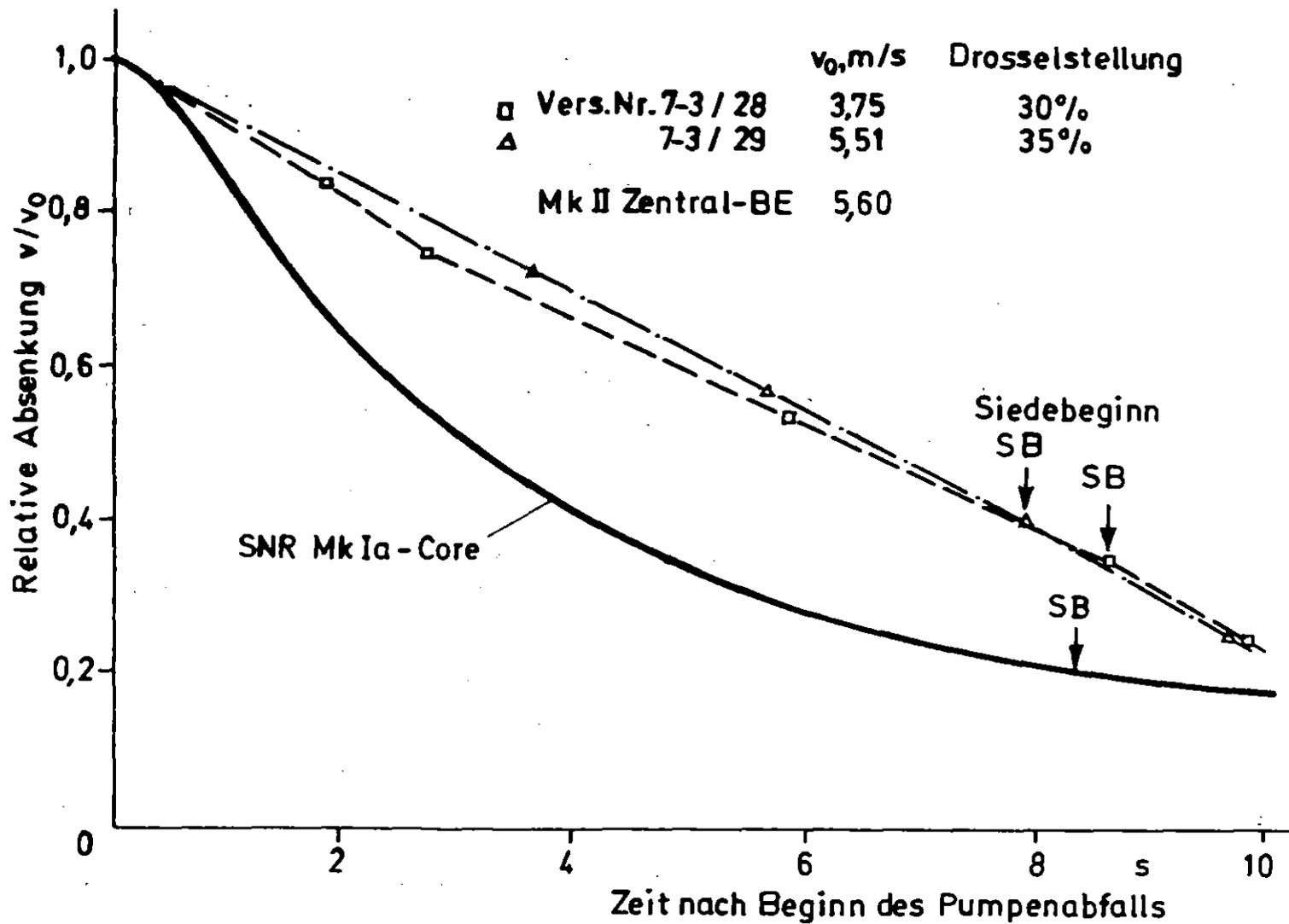
KfK

Abb.2 Axiale Temperaturverteilung bei Siedebeginn



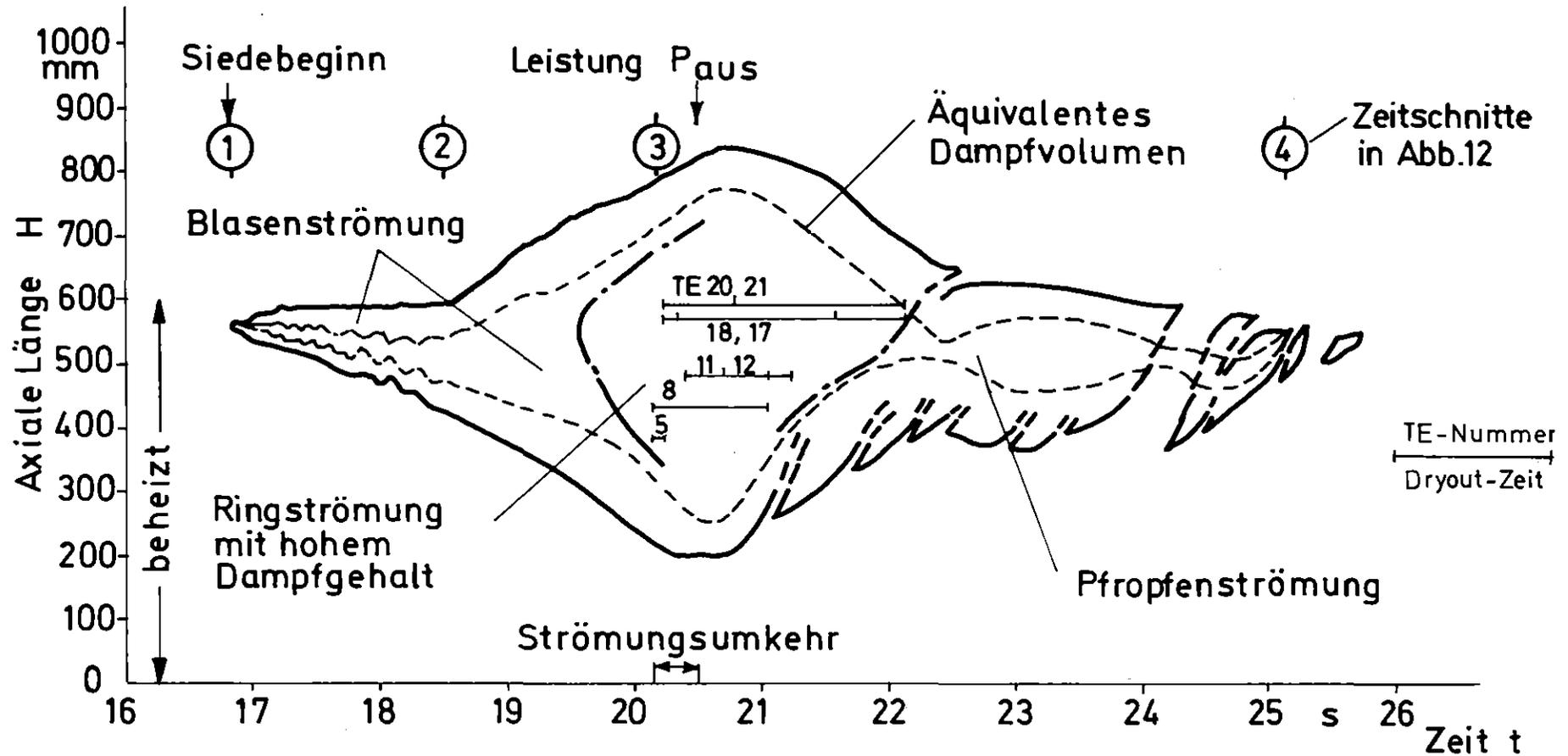
KfK

Abb.3 Irreversible Druckverluste unterhalb der Core-Oberkante bzw. des Endes der Beheizung



KfK

Abb.4 Verlauf der Kühlmiteleintrittsgeschwindigkeit nach Beginn des Pumpenabfalls



KfK

Abb. 5 Axiale Entwicklung der Siedezone im Versuch 7-3/21

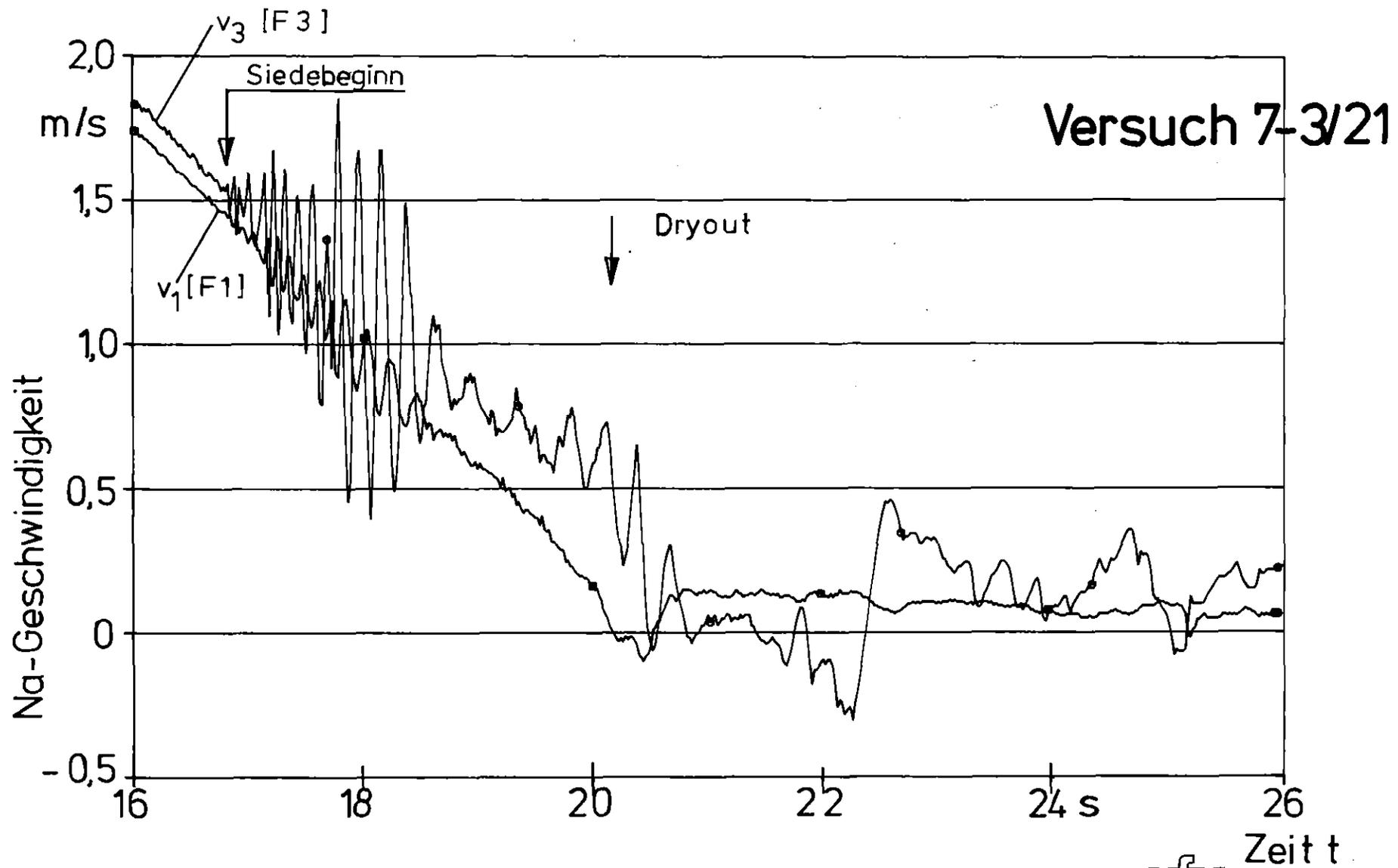


Abb.6 Natriumgeschwindigkeiten v_1 und v_3 im Bündel vor bzw. hinter dem beheizten Abschnitt

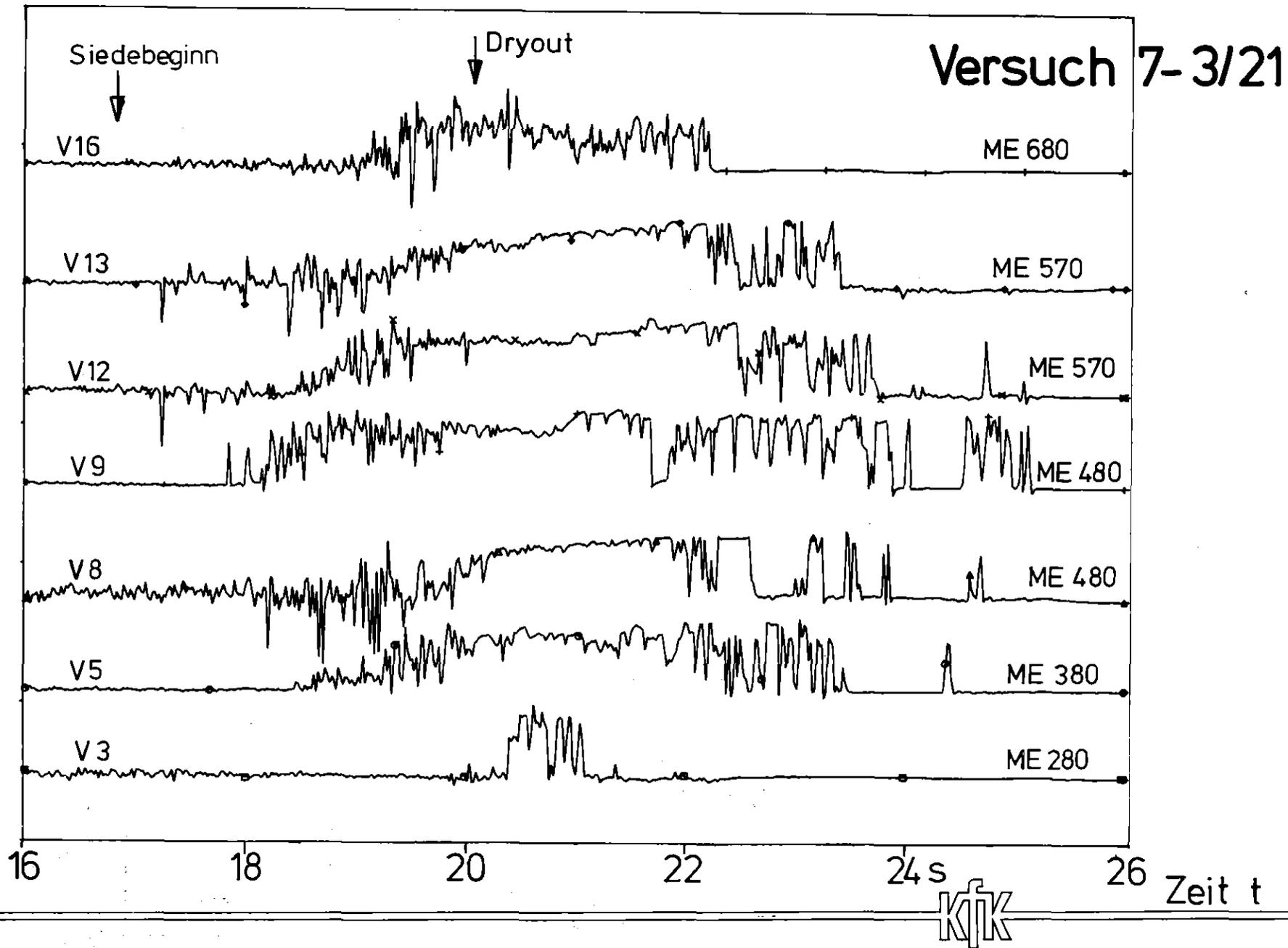
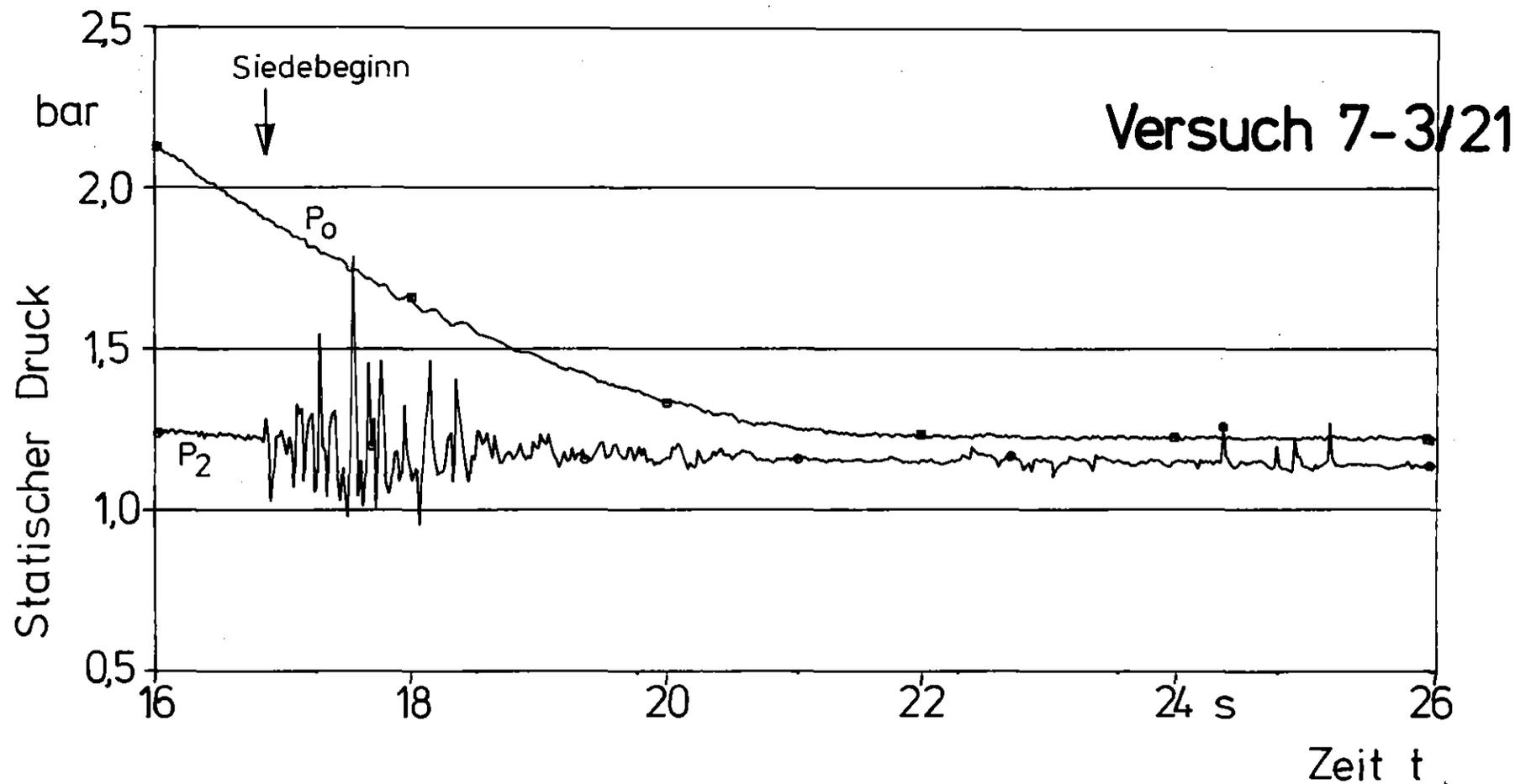


Abb.7

Void-Signale



KJK

Abb. 8 Statischer Druck p_0 und p_2 vor der Drossel bzw. am oberen Ende der Beheizung

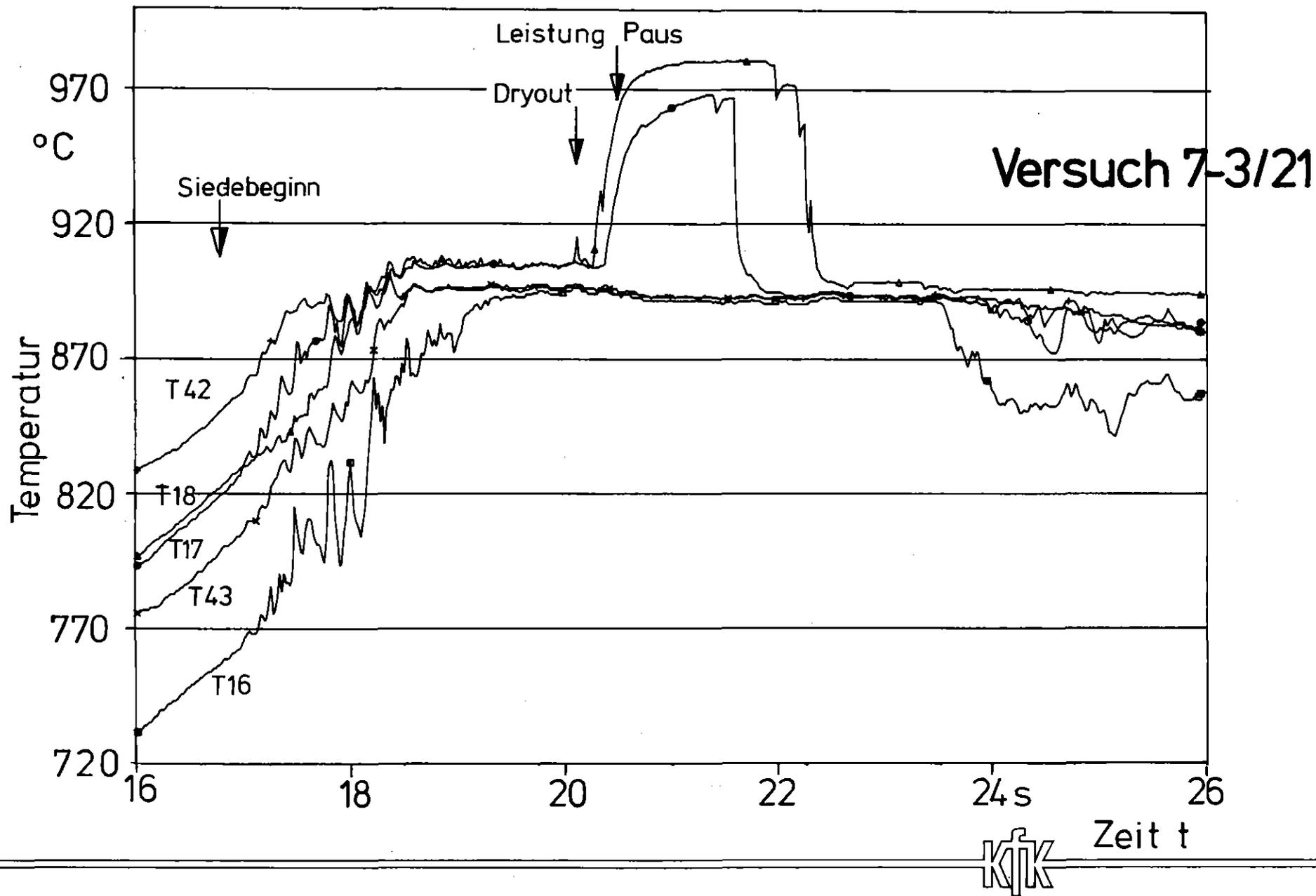


Abb.9 Temperaturanzeigen der TE in ME 570

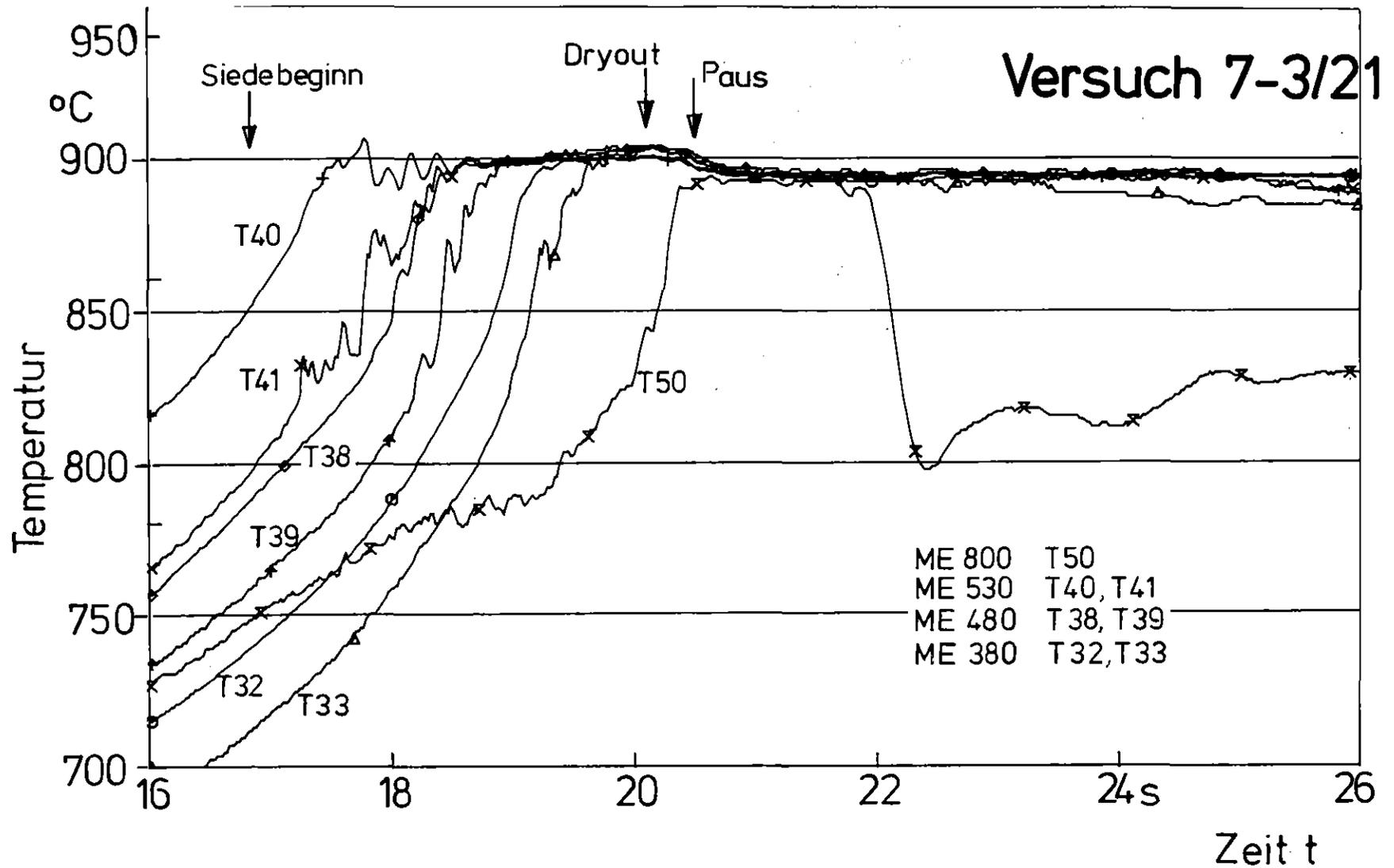


Abb.10 Signale von Thermoelementen im Kühlmittel

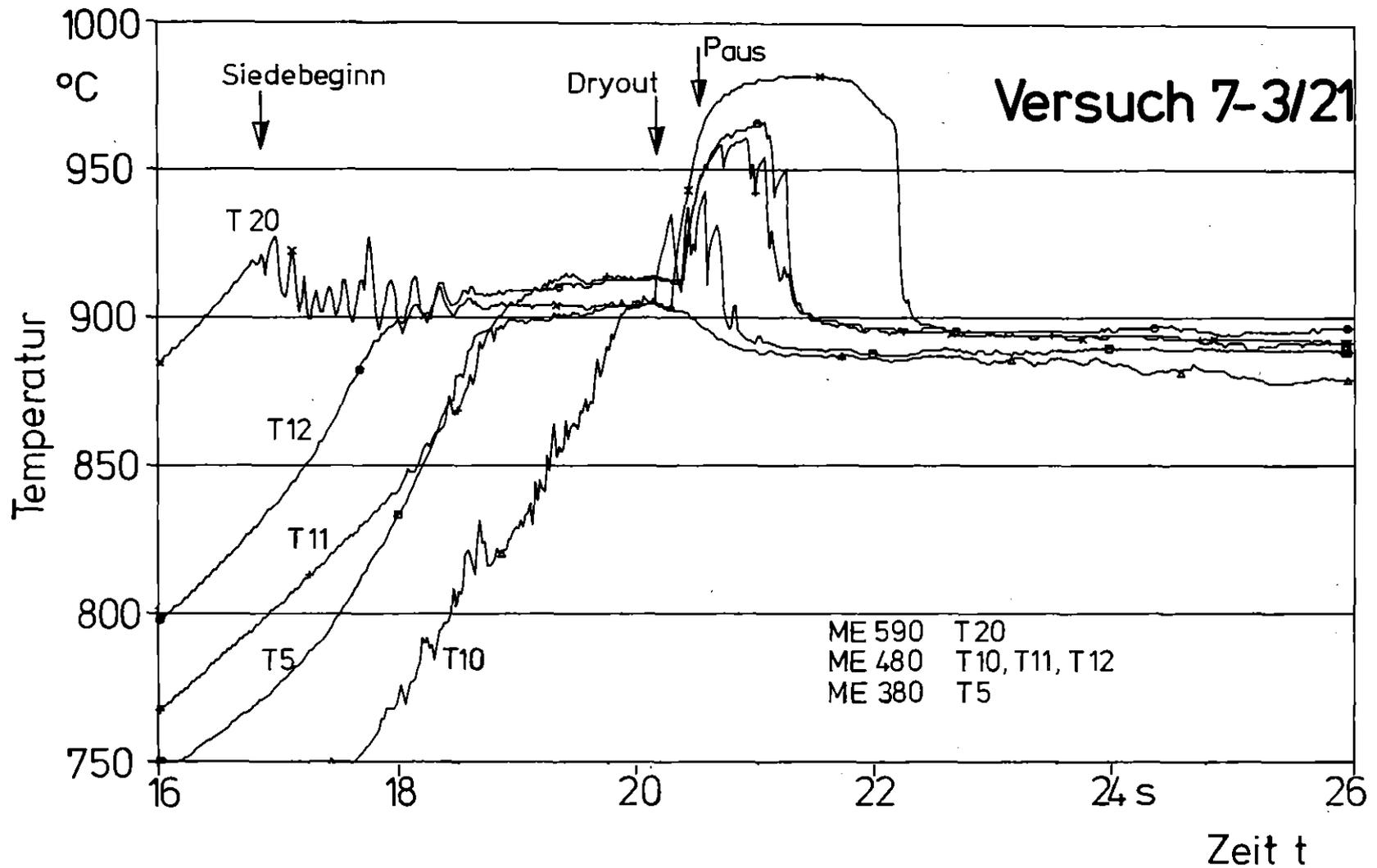
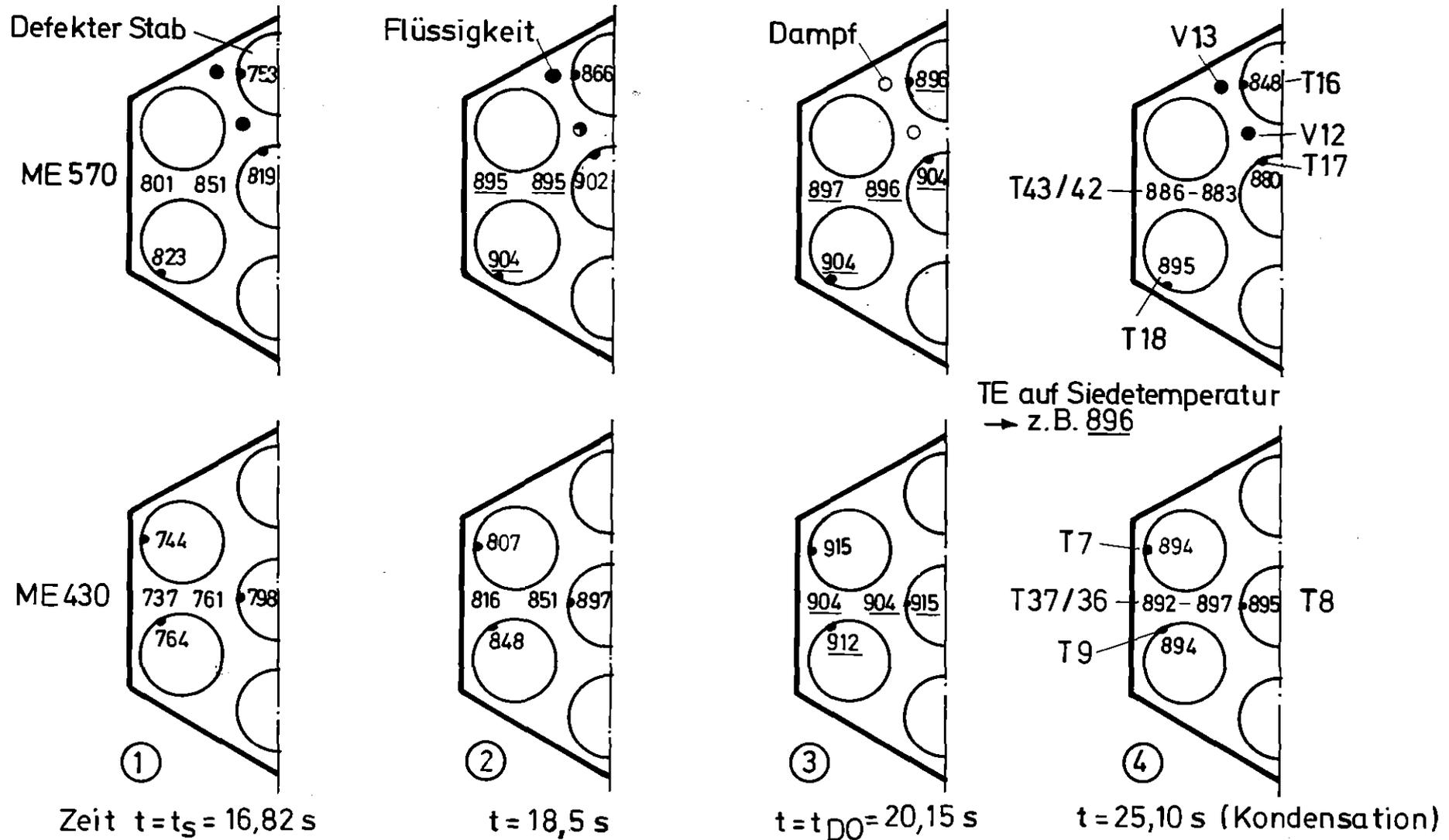
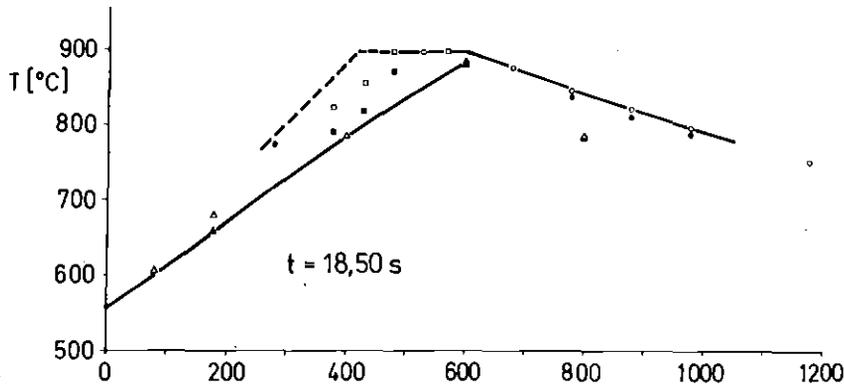
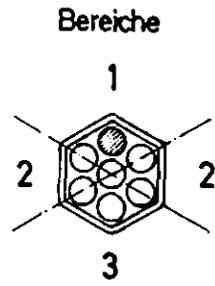
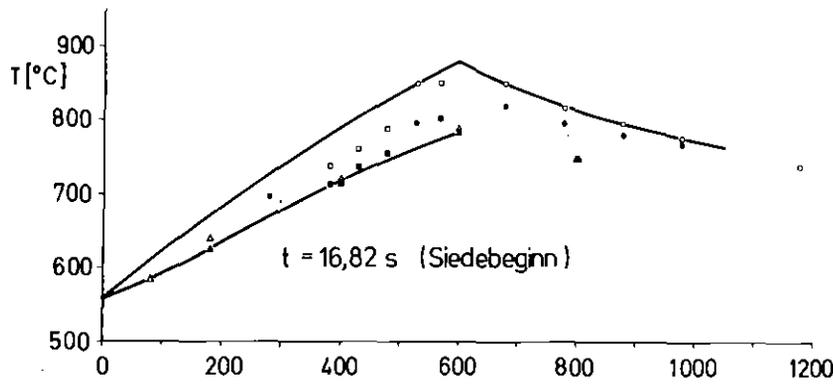


Abb.11 Temperatur-Signale von Thermoelementen in der Heizerwand



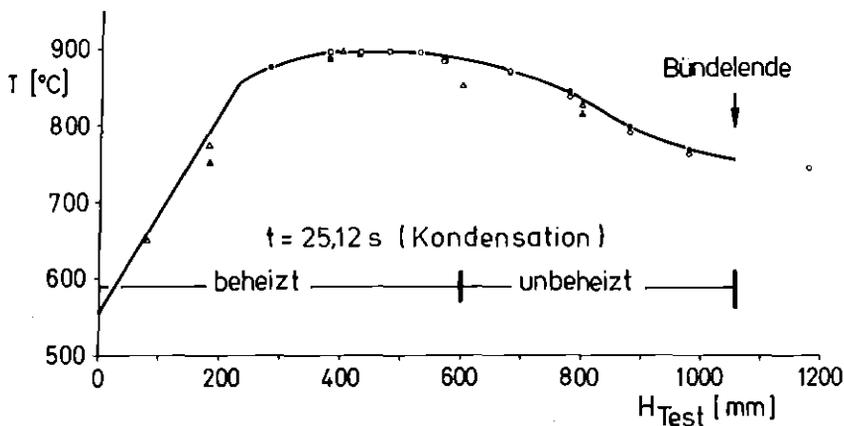
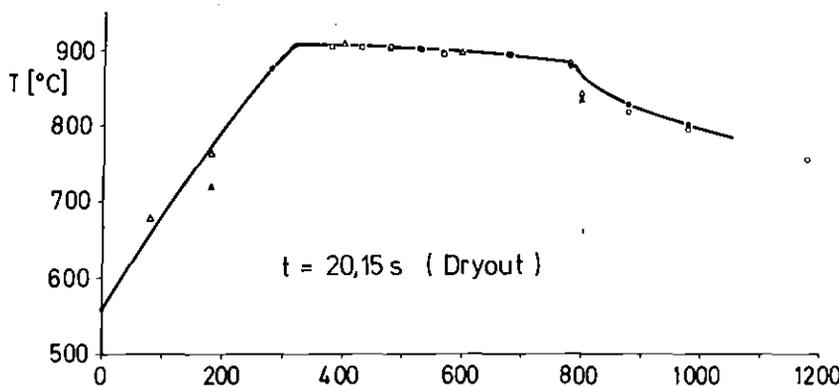
kfk

Abb.12 Entwicklung der radialen Temperaturverteilung und des Voids im Versuch 7-3/21



Bereich	Na-Temperatur	
	ZK	WK
1	△	▲
2	□	■
3	○	●

ZK = Zentralkanal
WK = Wandkanal



KfK

Abb.13: Axiale Temperaturentwicklung im Versuch 7-3/21

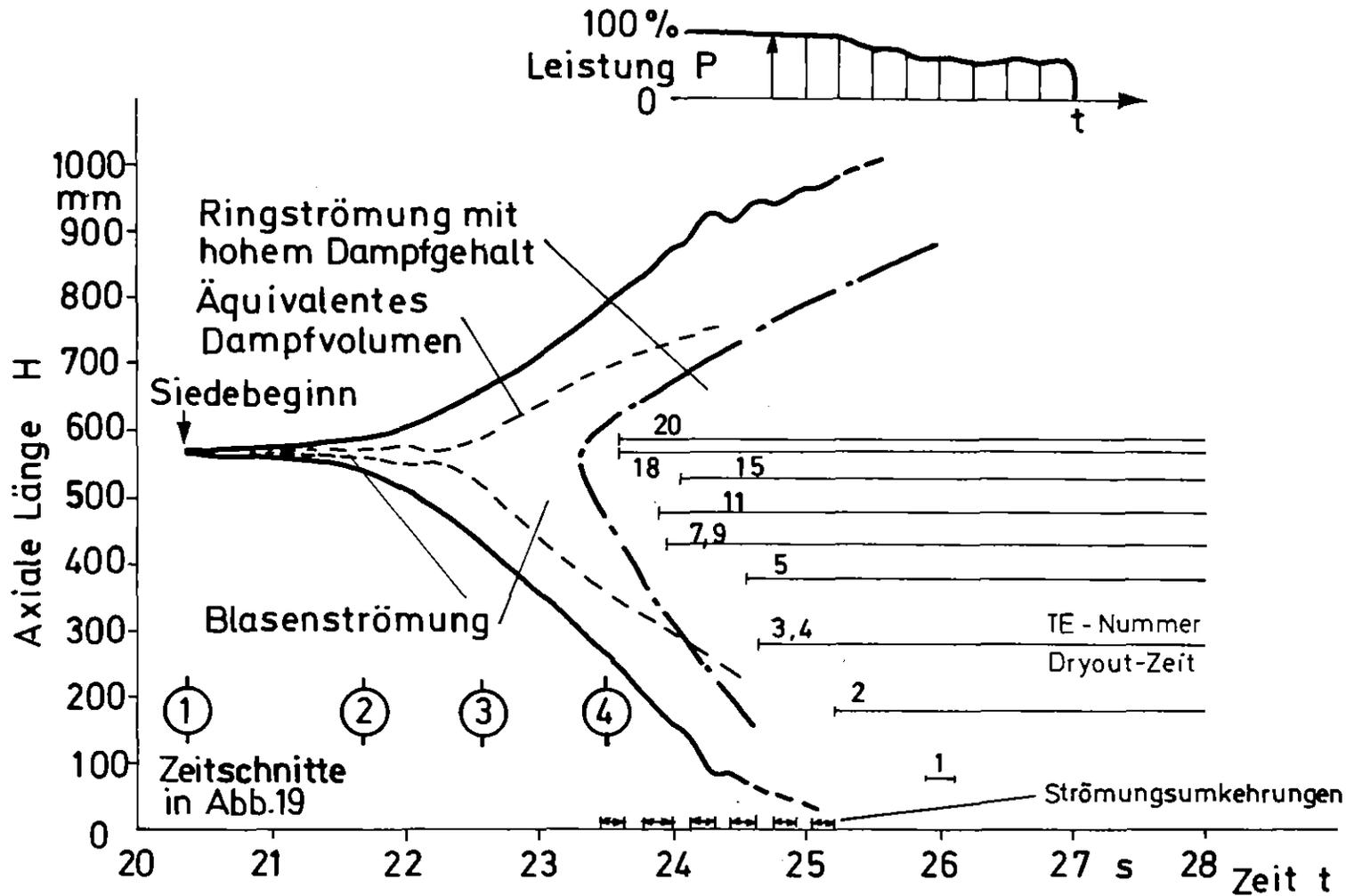


Abb.14 Axiale Entwicklung der Siedezone im Versuch 7-3/29

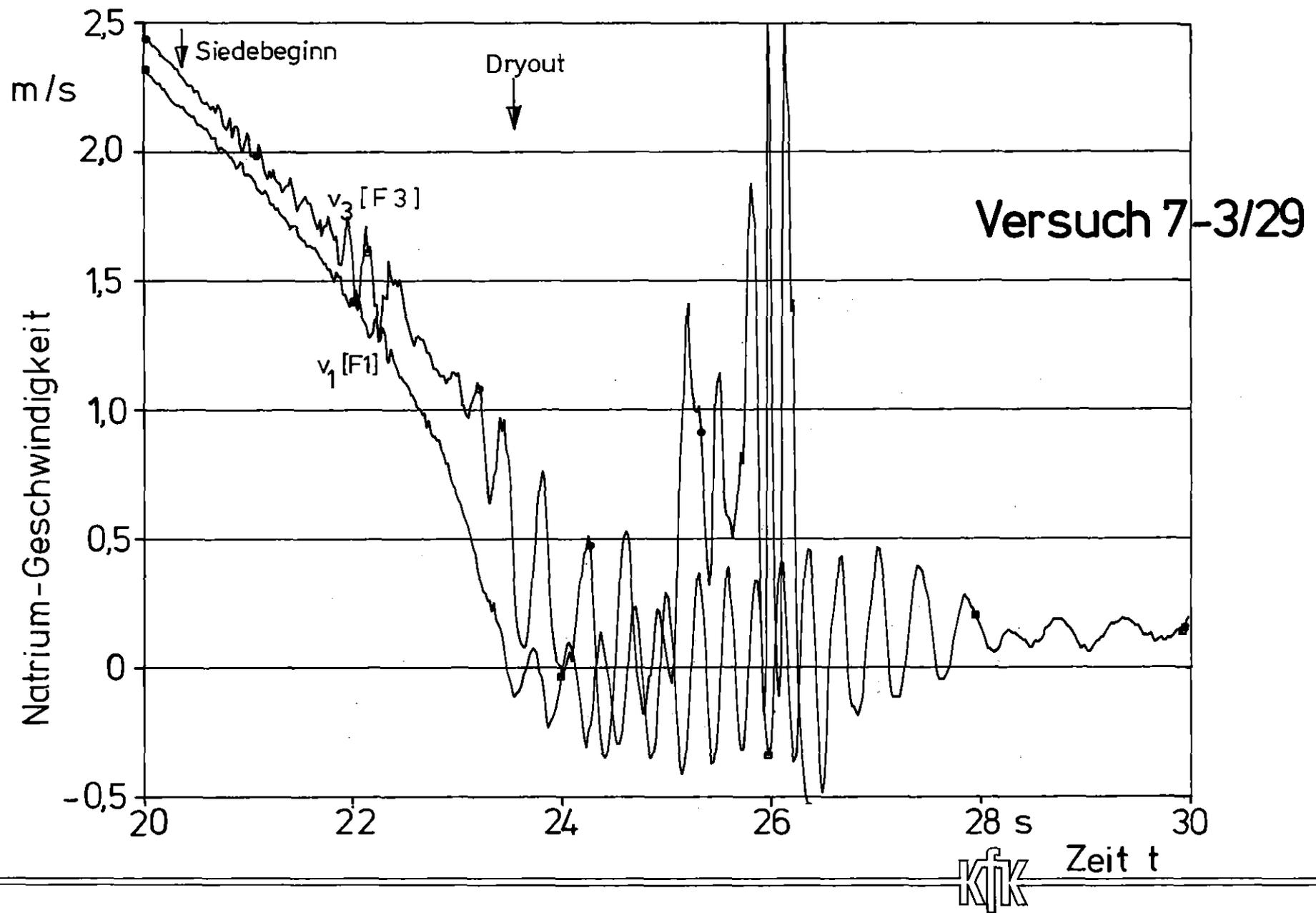


Abb.15 Natriumgeschwindigkeiten v_1 und v_3 im Bündel vor bzw. hinter dem beheizten Abschnitt

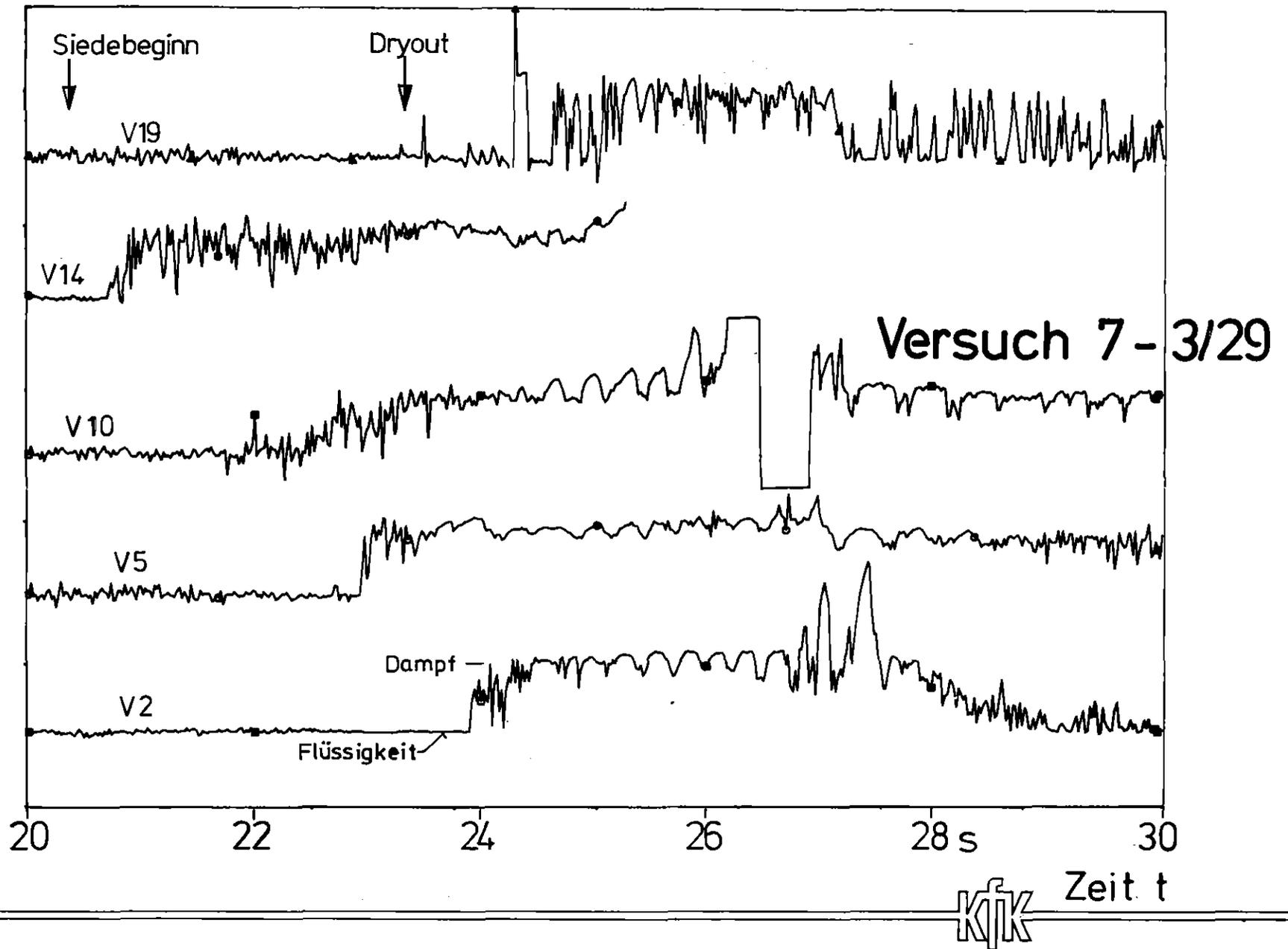


Abb.16 Void - Signale

Versuch 7-3/29

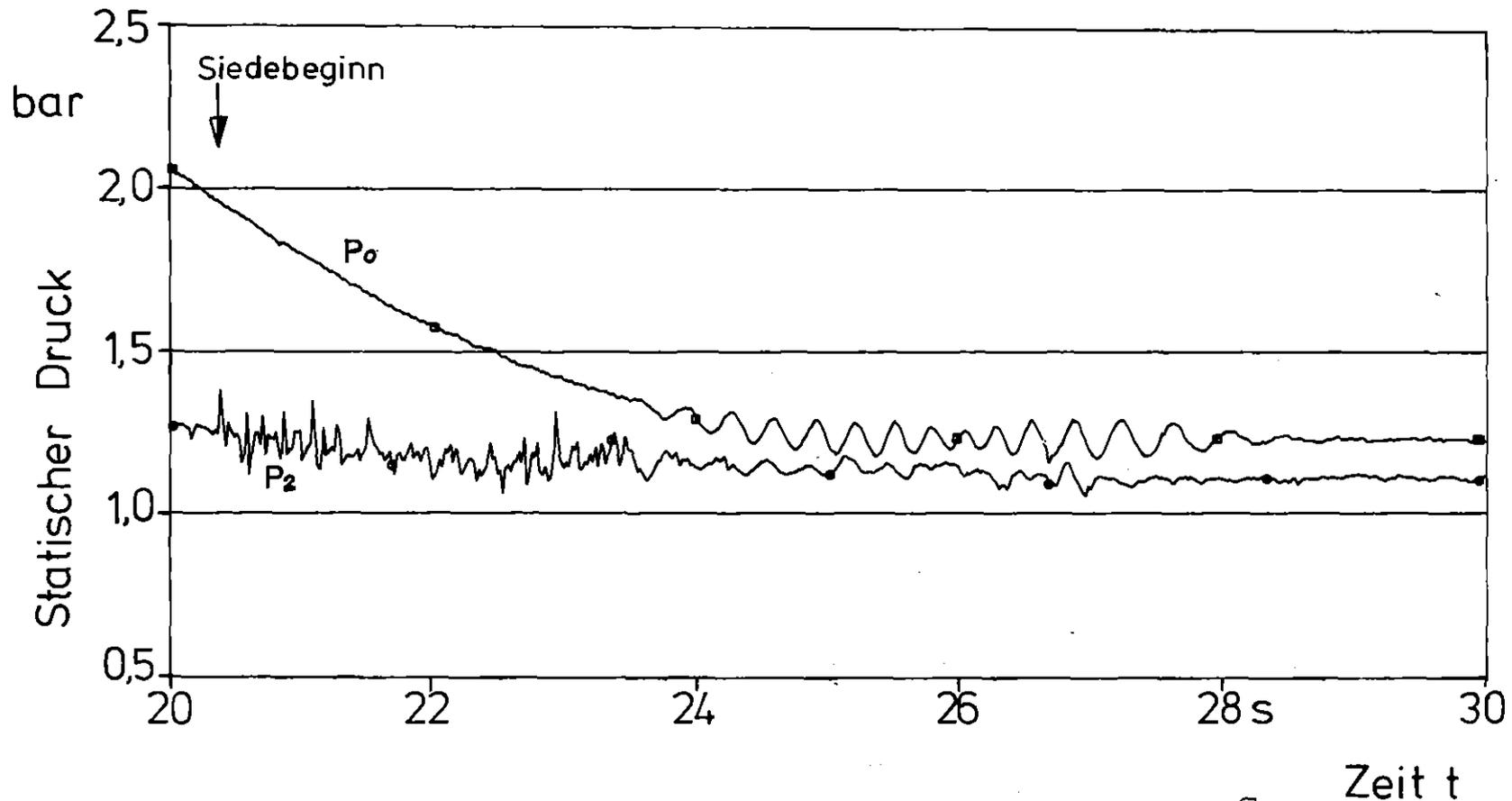
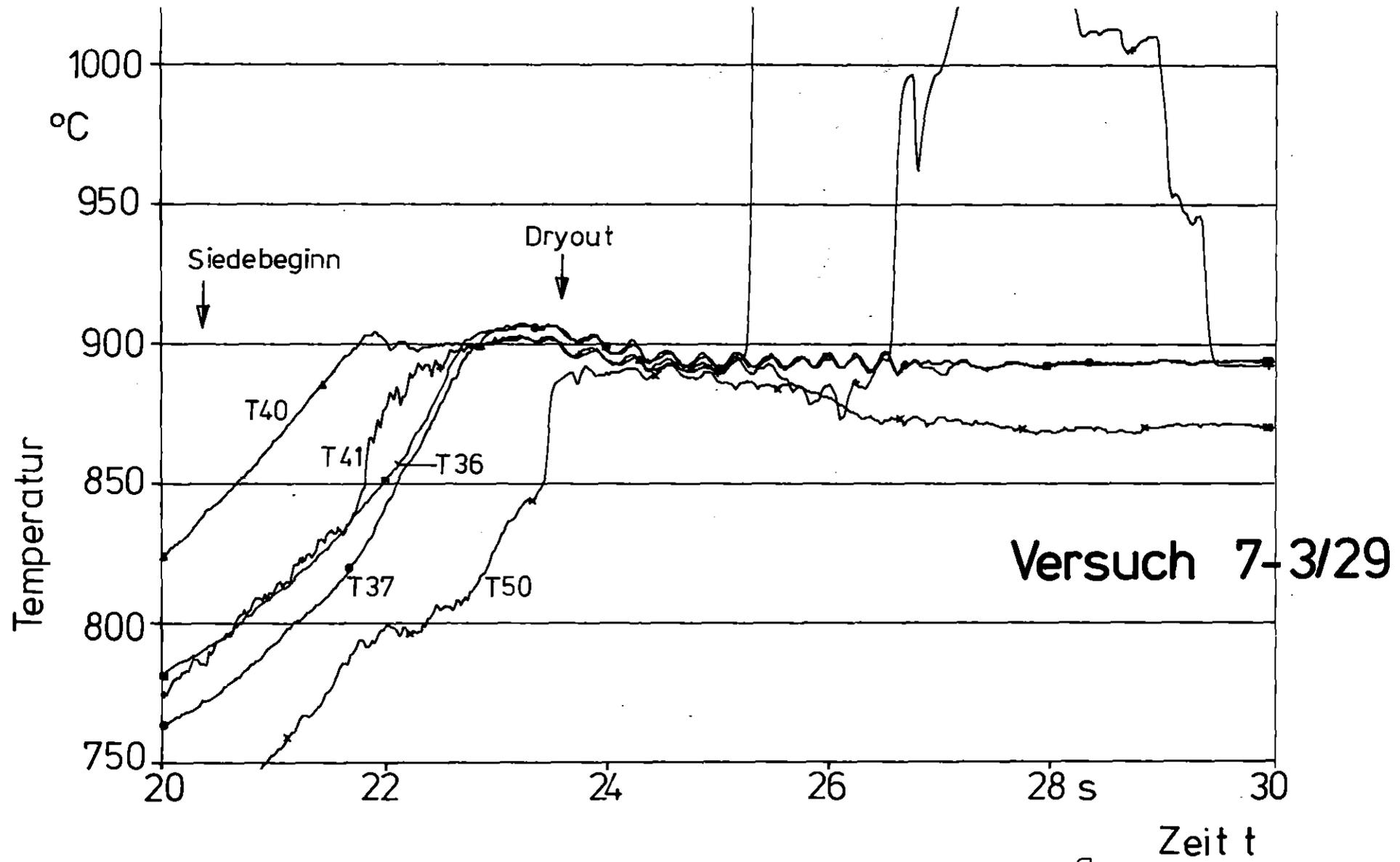


Abb.17 Statische Drücke p_0 und p_2 im Eintrittsbereich bzw. am oberen Ende der Beheizung



Versuch 7-3/29



Abb.18 Temperatur-Signale von Na-Thermoelementen

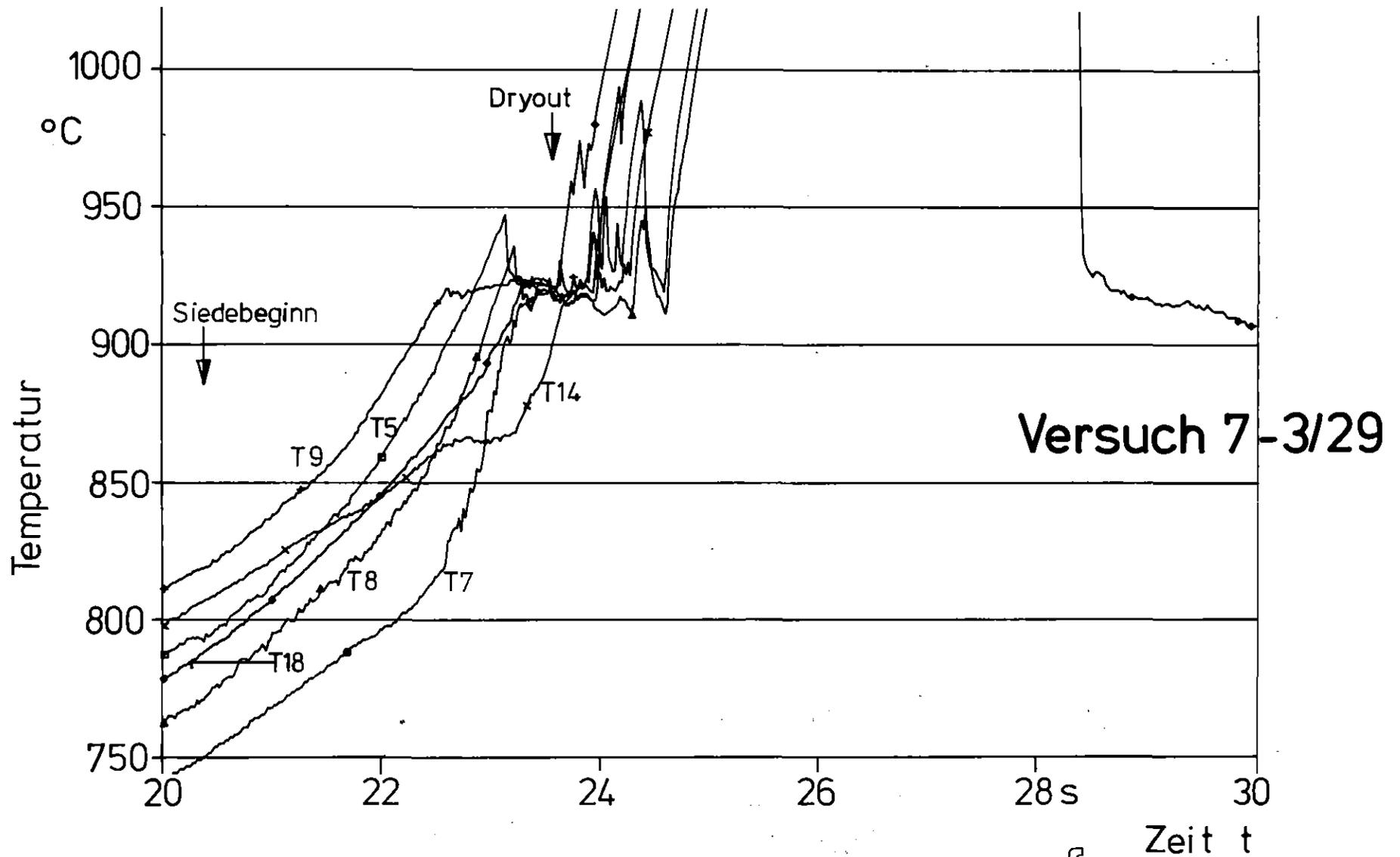


Abb.19 Temperatur-Signale von Thermoelementen in der Heizerwand

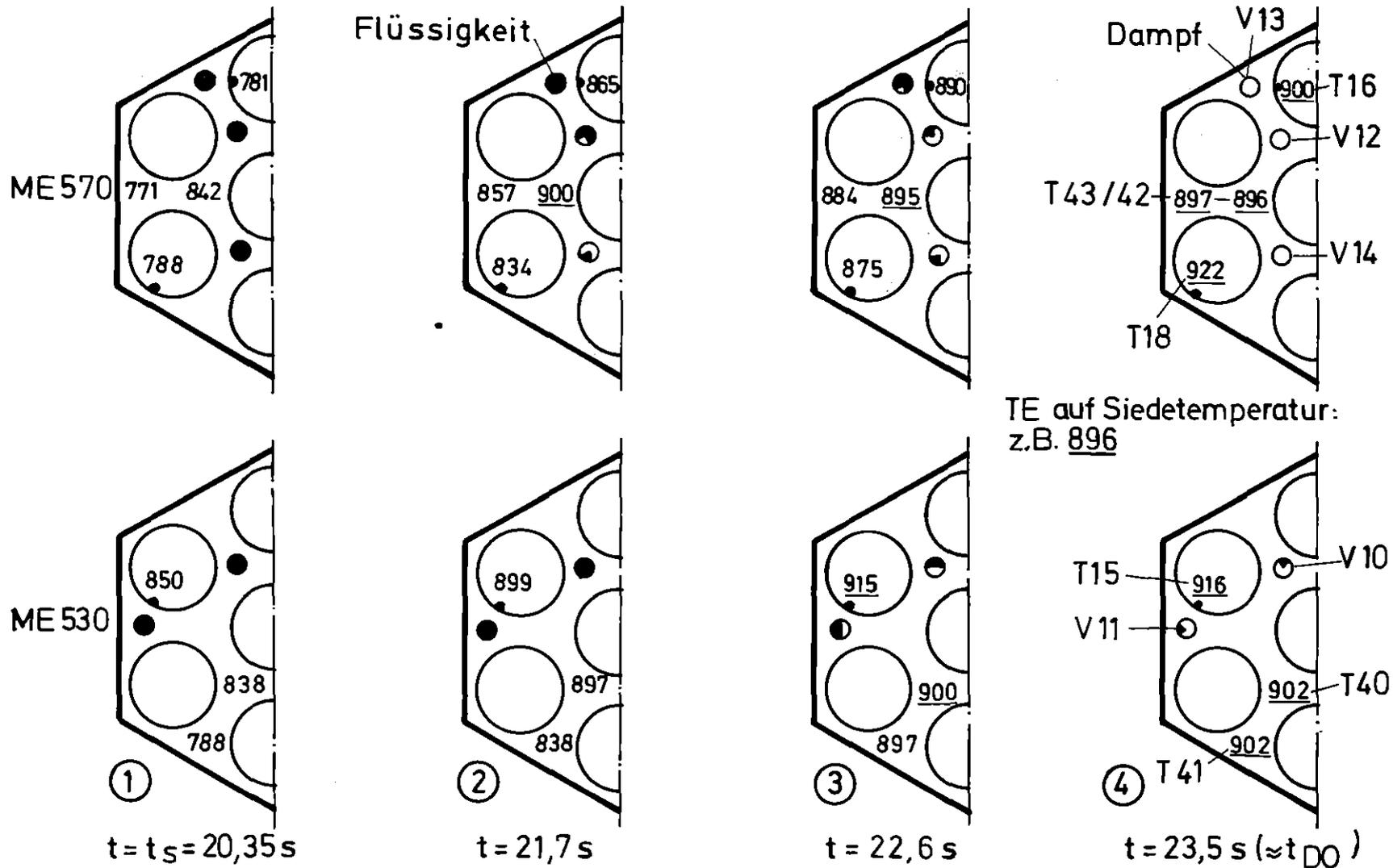
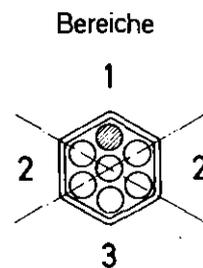
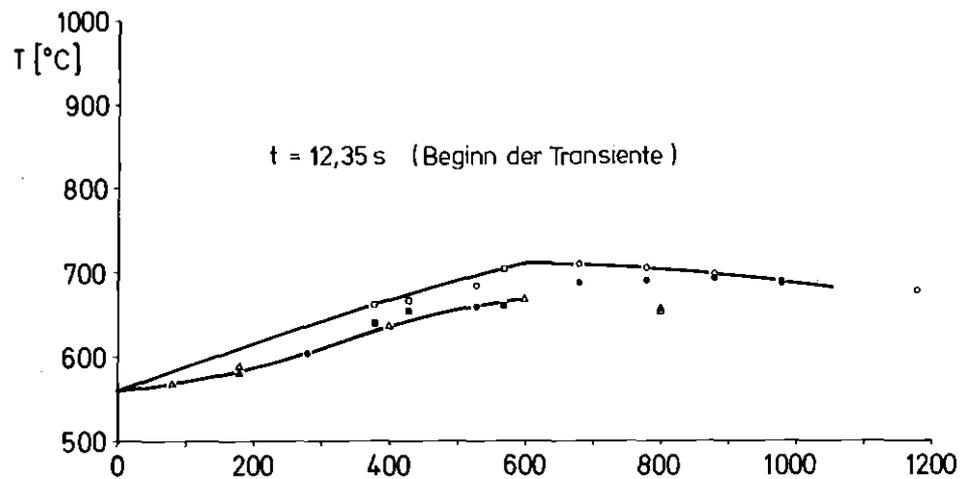


Abb.20 Entwicklung der radialen Temperaturverteilung
(Zahlen in °C) und des Voids im Versuch 7-3/29



Bereich	Na-Temperatur	
	ZK	WK
1	△	▲
2	□	■
3	○	●

ZK = Zentralkanal
WK = Wandkanal

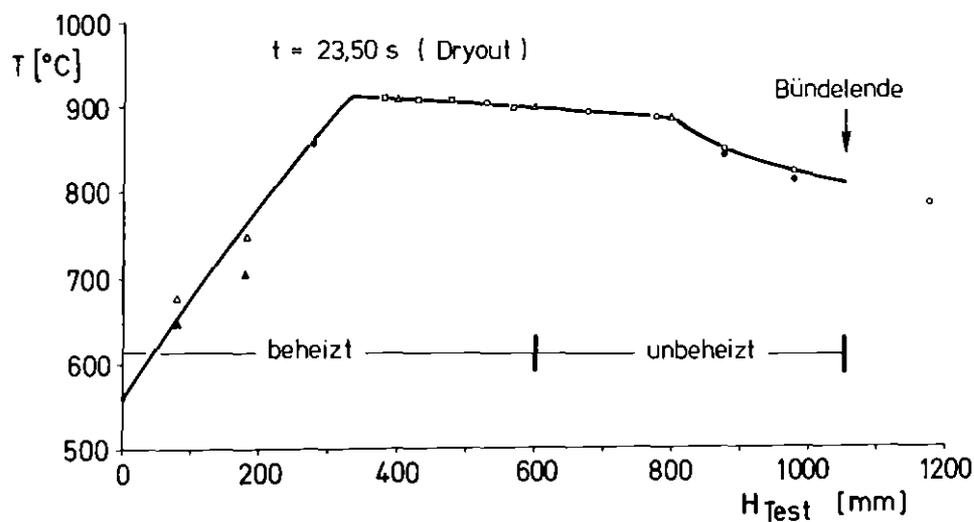
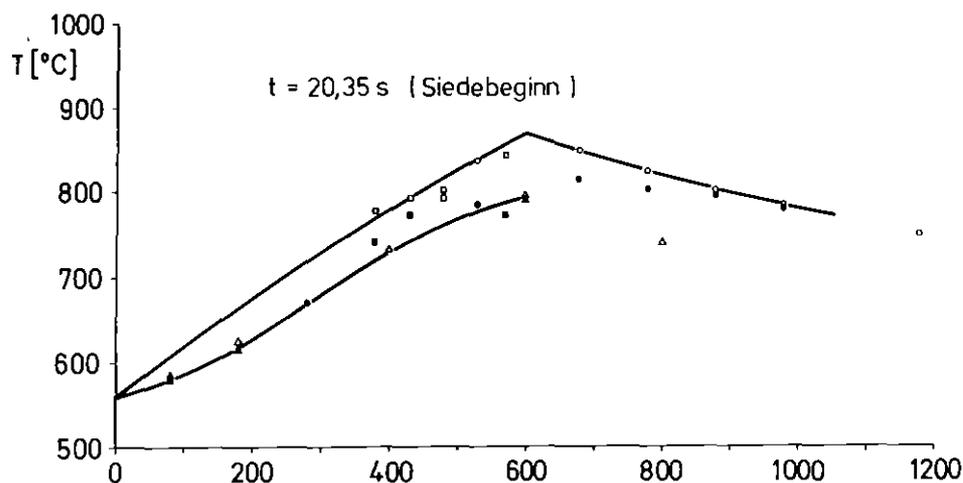


Abb. 21 : Axiale Temperaturentwicklung im Versuch 7-3/29

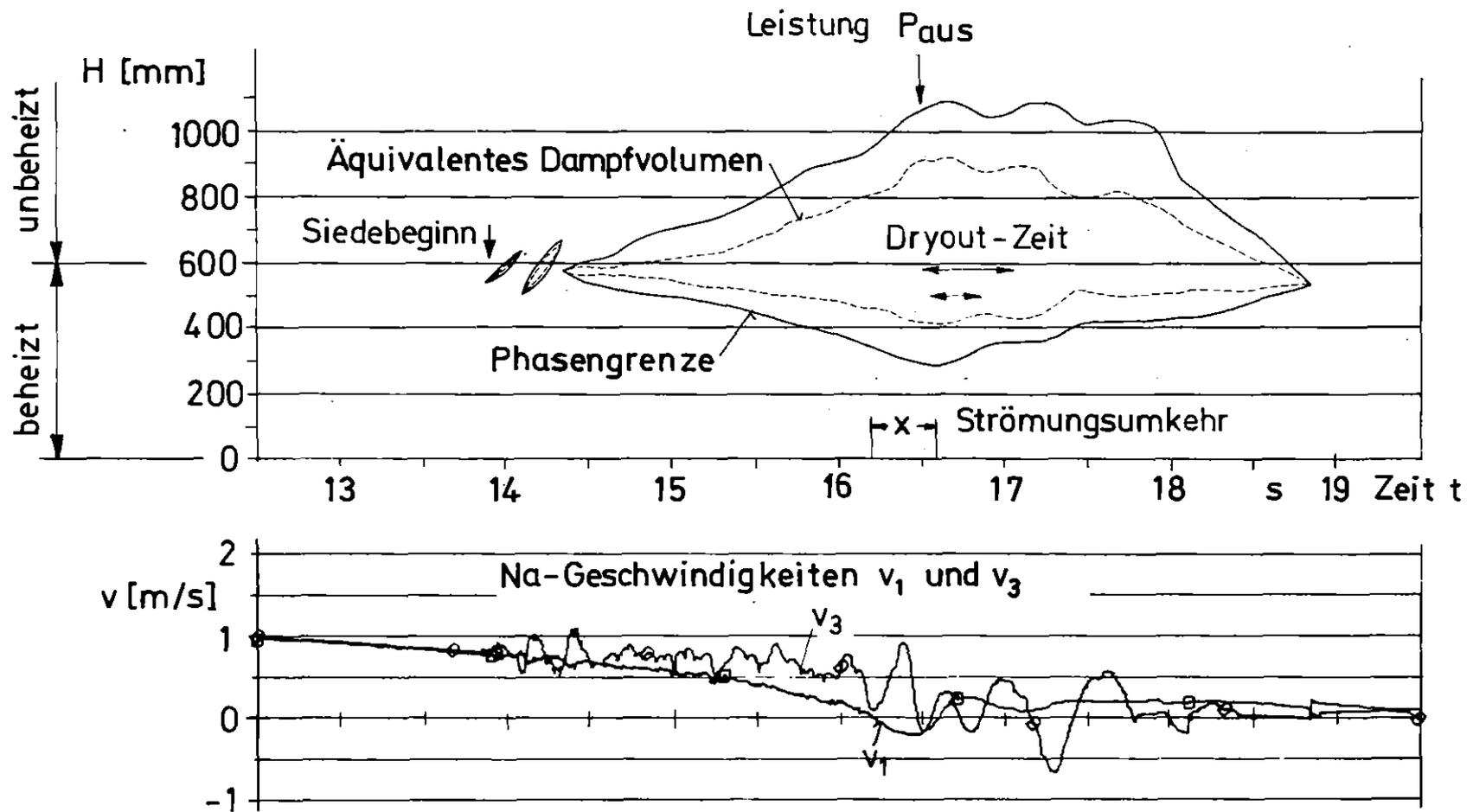
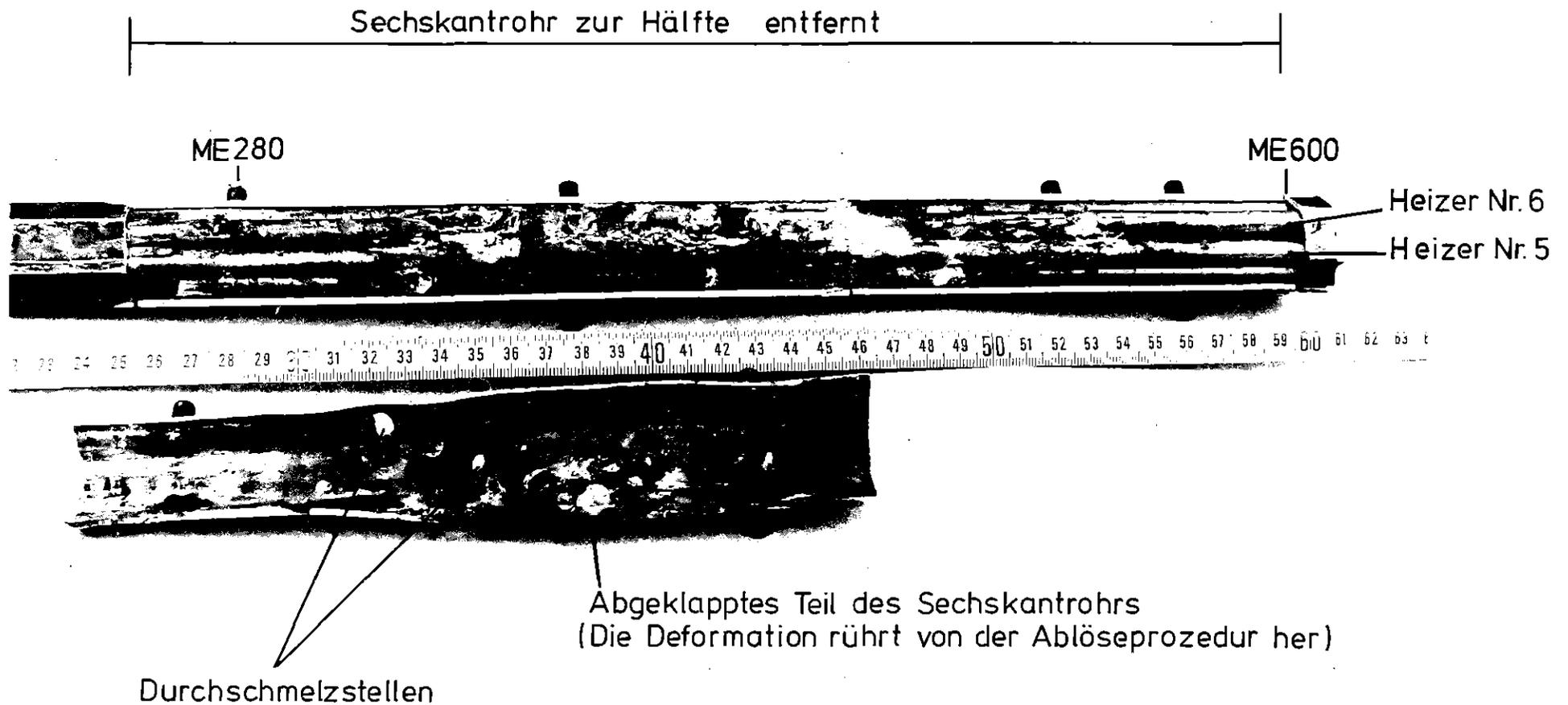
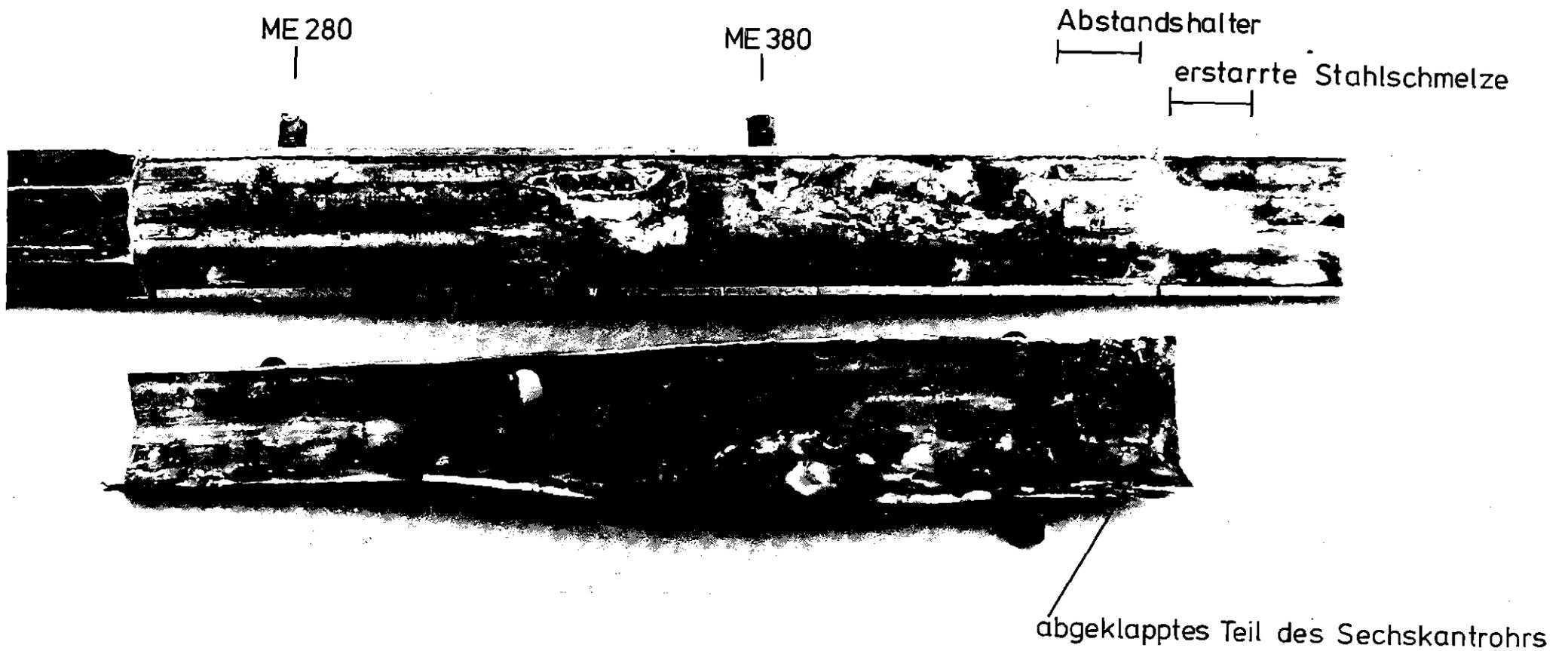


Abb. 22 Siedeverlauf und Kühlmittelgeschwindigkeiten im Versuch 7-2/13 [3]



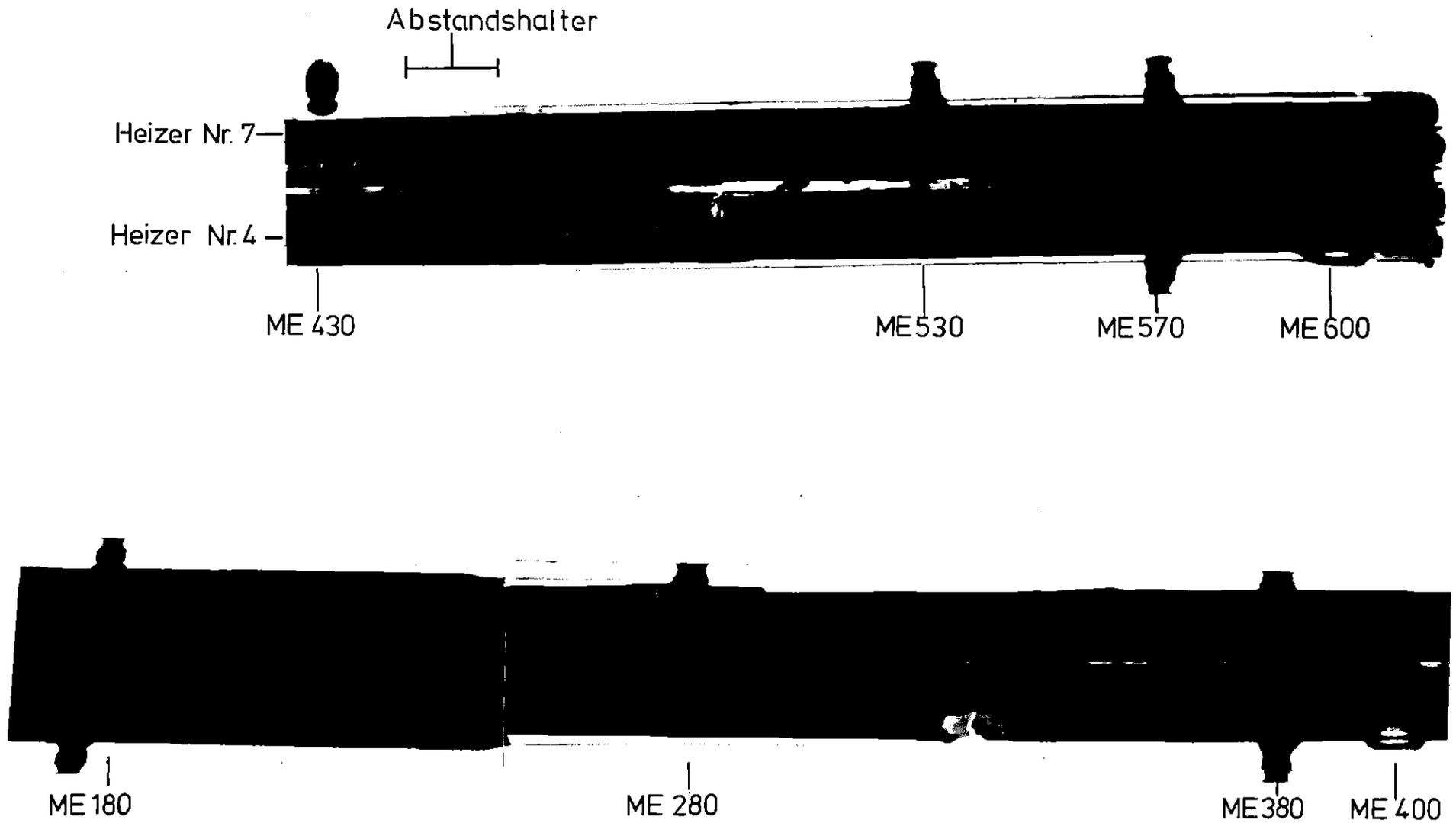
KfK

Abb. 23 Bild der zerstörten Teststrecke



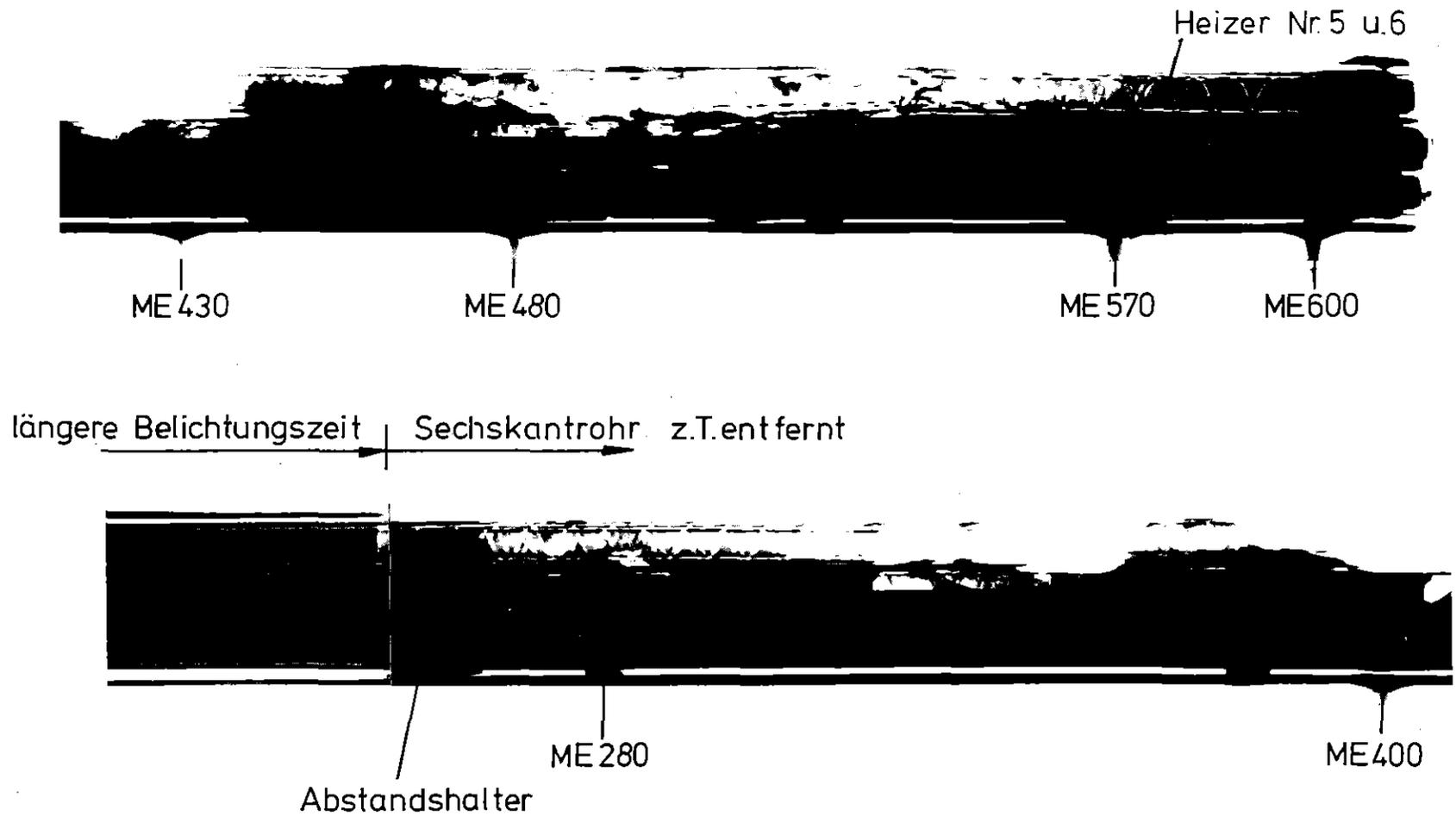
KJK

Abb.24 Teilansicht der zerstörten Teststrecke



KJK

Abb.25 Röntgenbild der zerstörten Teststrecke. Durchstrahlungsrichtung wie Blickrichtung in Abb. 23



KIK

Abb.26 Röntgenbild der Teststrecke. Durchstrahlungsrichtung:
Mitten der Heizer Nr. 4-1-7