

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

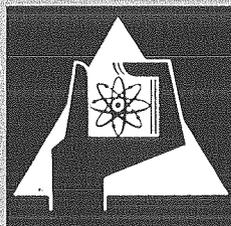
Januar 1972

KFK 1541

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Natrium-Siedeexperimente in einem Brennelementmodell

M. Cramer, B. Dorr



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1972

KFK 1541

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Natrium-Siedeexperimente in einem Brennelementmodell

M. Cramer

B. Dorr

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Bericht beschreibt die erste Serie von Natriumsiedeversuchen, die an einem Brennelementmodell in Originalgröße des SNR "Schnellen Natriumgekühlten Brutreaktors" durchgeführt wurden. Der Reaktor ist geplant von den DEBENELUX-Ländern Bundesrepublik Deutschland, Belgien, Niederland und Luxemburg. Die Natriumsiedevorgänge sowie die Bewegung der Blasen in diesem Elementmodell werden anhand von gemessenen Temperaturverläufen diskutiert.

Die Experimente werden im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen des Schnellen Natriumgekühlten Brutreaktors durchgeführt.

Das Experiment zeigt, daß die Druckbeanspruchungen auf die Elementkastenwand durch die Siede- und Kondensationsstöße so niedrig sind, daß keine Beschädigung oder unzulässige Deformation dieser Teile auftreten werden.

Abstract

The report describes the first series of sodium boiling experiments performed on a model of a full-sized fuel element of the DEBENELUX Fast Breeder Reactor planned by the Federal Republic of Germany, Belgium, the Netherlands and Luxemburg. The boiling events and the motion of bubbles in this element model are discussed by means of measured temperature curves.

The experiments are conducted within the framework of safety assessments of fast sodium cooled reactors.

The experiment showed that pressure stress exerted on the wall of the fuel element box through boiling and condensation impact is kept at such a low level that no destruction or unacceptable deformation of the parts should be anticipated.

| <u>Inhaltsverzeichnis</u> | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Beschreibung der Anlage | 2 |
| 3. Vorgänge beim Natriumsieden | 4 |
| 3.1 Blasenwachstum | 6 |
| 3.2 Pulsation | 8 |
| 3.2.1 Temperaturänderungen durch Pulsation in der Blase | 9 |
| 3.2.2 Blasenbewegung durch Druckänderungen | 12 |
| 3.2.3 Temperaturänderungen durch Pulsation außerhalb der Blase | 12 |
| 3.2.4 Kollabieren der Blase beim Pulsations- vorgang | 14 |
| 3.3 Dampfstrom in der Blase | 14 |
| 3.4 Temperatenausgleich im Element | 15 |
| 3.5 Das Erkennen von Zweitblasen | 16 |
| 4. Versuche bei konstantem Druck | 17 |
| 5. Versuche mit schneller Druckabsenkung | 20 |
| 5.1 BEVUS 3 | 21 |
| 5.2 BEVUS 4 | 23 |
| 6. Vermessen des Elementkastens auf Deformation | 24 |
| 7. Ergebnis | 26 |
| Referenzen | |

1. Einleitung

In diesem Bericht werden anhand von Siedeexperimenten in einem elektrisch beheizten Natrium-gekühlten Brennelement die Siedevorgänge sowie die dadurch möglichen Belastungen auf die Strukturmaterialien beschrieben.

Beim Einsatz von Natrium als Reaktorkühlmittel spielt dessen hohe Überhitzbarkeit im flüssigen Zustand eine wesentliche Rolle in den Reaktorsicherheitsbetrachtungen. Auslösende Ursache für ein Sieden kann ein lokales Ungleichgewicht zwischen Kühlmittelstrom und Leistungsdichte als Folge einer falschen Kühlmittelpumpeneinstellung, einer Verstopfung von Kühlkanälen in einem Brennelement sowie einer Leistungsexkursion sein. Die beim Sieden entstehenden Blasen verursachen der Überhitzung des Natriums proportionale Druckstöße, die die Kerneinbauten gefährden könnten. Um diese Einflüsse der Überhitzung zu untersuchen, werden im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen zum SNR neben theoretischen Arbeiten [1,2,3,4] auch Siedeexperimente durchgeführt.

Die an anderen Versuchsständen bisher durchgeführten Untersuchungen beschränkten sich dabei auf idealisierte Geometrien des Kühlkanals, wie z.B. Sieden im Einkanalrohr [5]. Bei den Versuchen, über deren erste Phase im folgenden berichtet wird, wurde erstmals ein aus 169 Einzelstäben bestehender Versuchseinsatz in der Originalgröße des SNR-Brennelementes eingesetzt. Diese Versuche zum "Brennelementverhalten unter Siedeverzug" (BEVUS) dienen der Ermittlung der auftretenden Siede- und Kondensationsabläufe und der damit verbundenen Druckstöße in einem derartigen Brennelementbündel bei vollständiger Kühlkanalblockade. Deshalb wurde eine intensive Instrumentierung vorgesehen, die es ermöglicht, das Zusammenspiel zwischen Druck und Temperatur bei den Siedevorgängen zu erkennen. Versuchsziel ist die Aussage, ob es bereits durch die Druckstöße zu einer Gefährdung bzw. Deformation der Kastenwände des Brennelementes kommen kann.

2. Beschreibung der Anlage

Die BEVUS-Anlage wurde an einen vorhandenen Natriumkreislauf (NABEA-Anlage [67]) angeschlossen. Dadurch konnten Einrichtungen wie Natriumbereitstellung und Reinigung, Schutzgassystem und Evakuierungssystem verwendet werden.

Abb. 1 zeigt schematisiert den Aufbau der BEVUS-Versuchsanlage. Der Versuch wird in einem Versuchsbehälter von 0,6 m Durchmesser und 8,3 m Höhe durchgeführt. Dieser Behälter ist von einem mit Stickstoff gefüllten Schutzbehälter umgeben, damit im Falle von Leckagen ein Natriumbrand vermieden wird. Da im Schutzgasraum zwischen Versuchs- und Schutzbehälter eine Reihe von temperaturempfindlichen Anlageteilen angeordnet sind, wurde dieser Raum an einen Kühlgaskreislauf angeschlossen.

Der Versuchsbehälter ist ca. 5 m hoch mit Natrium gefüllt. Über dem Natriumspiegel befindet sich ein Schutzgasraum, dessen Größe so dimensioniert ist, daß beim Ausdampfen von Natrium aus dem Heizelement kein merklicher Druckanstieg im Behälter entsteht.

Die Versuchseinrichtung erlaubt es, den Siedevorgang auf zwei Arten einzuleiten:

- durch Aufheizen unter konst. Druck bis zum Einsetzen des Siedens,
- durch schnelle Druckabsenkung nach Aufheizung auf eine vorgegebene Temperatur unter Überdruck.

Bei der zweiten Versuchsart soll nach Möglichkeit ein schneller Druckabfall im Natrium erfolgen. Das erfordert ein kleines Schutzgasvolumen. Deshalb ist während der Aufheizspanne der Schutzgasraum vom Natrium durch einen Ventilteller getrennt. Um dennoch die Druckhaltung zu gewährleisten, befindet sich das zur Druckhaltung notwendige Schutzgas in einem Ausgleichsbehälter, der unmittelbar vor der Druckentlastung durch ein pneumatisch betätigtes Ventil vom Versuchsbehälter getrennt wird. Der Ventilteller ist mit einer pneumatischen Vorrichtung verbunden, durch deren Auslösen ein Druckausgleich zwischen Natrium und Schutzgasraum stattfindet und damit die Druckabsenkung im Natrium herbeigeführt wird.

Der Versuchseinsatz ist im unteren Teil des Versuchsbehälters angeordnet. Kernstück des Versuchseinsatzes ist das Heizelement, das in seinem Aufbau und seinen Abmessungen einem Prototypreaktor-Brennelement entspricht. Das Stabbündel besteht aus 162 elektrisch beheizten Widerstandsheizstäben und 7 Meßstäben mit je 4 Thermoelementfühlern. Der Durchmesser der Heizstäbe und auch der Meßstäbe beträgt 6 mm. Entsprechend der Zoneneinteilung des Prototypreaktorkernes enthält der Heizstab von unten nach oben folgende Zonen:

Ein unbeheizter Abschnitt von 1060 mm Länge entsprechend dem Spaltgasspeicher und der Brutzone, ein beheizter Abschnitt von 950 mm als Nachbildung der Corezone und eine unbeheizte Länge von 450 mm zur Simulation der oberen Brutstoffzone.

Zur Erhaltung eines ebenen radialen Temperaturprofils im Element wurden die Heizer zu drei konzentrischen, getrennt regelbaren Zonen zusammengeschaltet. Heizstäbe und Meßstäbe sind in eine gemeinsame Grundplatte eingeschweißt. Dies ist möglich, da durch die vorgegebene simulierte Kühlkanalblockade kein Natriumdurchfluß für den Versuch erforderlich ist. Das Vorhandensein der Grundplatte ermöglicht einen relativ einfachen Anschluß der Heizstäbe. Die Orientierung der Stäbe erfolgt durch Waben-Gitterabstandshalter. Umschlossen wird das Bündel von einem Sechskantkasten aus dem Werkstoff-Nr. 4919 von 110 mm Schlüsselweite, einer Wandstärke von 2,5 mm und einer Länge von 2400 mm.

Umgeben wird das Heizelement von 6 weiteren Elementen. Sie sind lediglich Attrappen, die in Festigkeit und Geometrie einen Ausschnitt des Kernverbandes simulieren.

Die Instrumentierung untergliedert sich in eine Anlagen- und in eine Versuchsinstrumentierung. Zweck der Anlageninstrumentierung ist die Regelung und Überwachung der Betriebszustände der Anlage und die Meldung von Leckagen; Aufgabe der Versuchsinstrumentierung ist es, die Daten zu erfassen, die für eine Interpretation des Versuchsablaufes notwendig sind.

Die Versuchsinstrumentierung ist schematisch auf Abb. 2 dargestellt. Sie besteht aus Temperatur- und Druckmeßstellen. Die Temperaturen werden an 28 Stellen im Heizelement, an 6 Stellen am Heizelementkasten und 9 Stellen an der Querlanze oberhalb des Heizelementes

mit 0,5 mm Durchmesser mantelverschweißten Thermoelementen gemessen. Abb. 19 zeigt Lage und Bezeichnung der Temperaturmeßstellen im Heizelement. Infolge einer aufgetretenen Leckage in der Grundplatte sind in einem Segment vom Element Heizer ausgefallen. Dadurch verschiebt sich die Blasenbildung vom Zentrum in den beheizten Teil des Elementes (s. Abb. 19). Da die Temperaturmeßstellen über den gesamten Querschnitt des Elementes verteilt sind, fallen somit ein Teil der Meßstellen für die Betrachtung der Siedevorgänge in der Blase aus, wodurch die Interpretation erschwert wird. Der Druck wird oberhalb des Heizbündels erfaßt und einem Quarzaufnehmer zugeleitet, der wegen seiner Temperaturempfindlichkeit außerhalb des Versuchsbehälters angeordnet ist. Während der Versuchszeit von 5 min, die das Aufheizen von 600 °C auf Siedetemperatur und die Siedevorgänge einschließt, werden die Temperatur- und Druckmeßwerte mit einer Abfragefrequenz von 200 Hz von einer Datenerfassungsanlage aufgenommen. Die Meßwerte werden auf Magnetband gespeichert, mit einer Rechenanlage aufbereitet und auf einem Plotter gezeichnet.

Bei der Betrachtung der Diagramme ist eine 50 Hz Überlagerung der Temperaturverläufe zu sehen. Diese Schwingung wird durch den Sternmittelpunktstrom, der aus der unterschiedlichen Stromversorgung der einzelnen Heizerzonen resultiert, verursacht. In manchen Diagrammen ist die Schwingung durch Mittelwertbildung eliminiert worden. Ferner unterliegt der Druckverlauf einer Drift, die durch das Aufladen des Ladungsverstärkers entstand. Durch diese zeitliche Änderung des Druckverlaufes ist die Druckskala lediglich ein Maßstabswert, nur am Ort der Skala entspricht der Druck dem Absolutwert.

3. Vorgänge beim Natriumsieden

Es werden der Gesamt Ablauf, sowie einzelne Phasen des Siedevorganges beschrieben und zum Teil an Hand von graphischen Darstellungen der Meßwerte erläutert.

Beim Aufheizen von Natrium kann ohne Eintreten des Siedevorganges die Siedetemperatur erheblich überschritten werden. In diesem Fall liegt überhitztes Natrium in flüssiger Form vor. Die Temperaturdifferenz zwischen der dem Systemdruck proportionalen Sättigungstemperatur und erreichter Überhitzungstemperatur, bei der das Natrium anfängt zu sieden, wird als Siedeverzug bezeichnet.

Theoretisch berechnen sich für Natrium sehr große Siedeverzüge, unter Zugrundelegung folgender 3 Eigenschaften:

- die außerordentlich guten Benetzungseigenschaften
- die chemische Aggressivität von Natrium
- die mit der Temperatur steigende Löslichkeit von Gasen.

Die für das Sieden notwendigen gasförmigen Keime werden dadurch vom Natrium gelöst, bzw. chemisch gebunden. Die Wahrscheinlichkeit zur Blasenbildung wird sehr gering. Damit ist auch der errechnete hohe Siedeverzug bis zu 400 °C bei einem Druck von 1,3 ata [2] zu erklären.

Experimentell konnten diese hohen Siedeverzüge nicht nachgewiesen werden. Der Unterschied zwischen experimentell gefundenen Siedeverzügen und den theoretisch errechneten liegt wahrscheinlich darin begründet, daß auch flüssigkeitsgefüllte Höhlungen ähnlich wie gasgefüllte Poren als Siedekeime wirken [1]. In dem BEVUS-Versuchseinsatz waren genügend Höhlungen durch die konstruktive Gestaltung des Brennelementes wie z.B. Abstandshalter gegeben.

Da der Siedeverzug und die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich auf die Siedeform einwirken, ist bei Natrium das Einzelblasensieden gegenüber dem Zweiphasengemisch bei Wasser die typische Siedeform.

Höhe des Siedeverzuges sowie die im Natrium und in den Heizstäben gespeicherte Wärmekapazität oberhalb der Sättigungstemperatur des bezogenen Systemdruckes bestimmen den Siedeablauf; wie Geschwindigkeit des Blasenwachstums und Blasengröße im Brennelement. Als bezogener Systemdruck wird der Druck am Natriumspiegel plus der stat. Höhe bezogen auf den Ort des Geschehens bezeichnet.

Das Gebiet des möglichen Siedebeginnes ist im Brennelement durch das ausgeprägte Temperaturprofil begrenzt. Dieses Temperaturprofil entsteht durch die radiale Wärmeleitung und durch die Konvektion im Element. Überlagert wird dieses Temperaturprofil durch Wärmesenken an ausgefallenen Heizern und an Thermoelementkaskaden, die an Stelle von Heizern angeordnet sind. Bedingt durch die Wärmesenke an den Kaskaden werden an den Thermoelementen kaum Blasenbildungen zu erwarten sein

und zum anderen wird bei Siedebeginn im Element eine zu niedrige Temperatur angezeigt.

Bildet sich eine Blase, so hat sie den Sättigungsdruck der Temperatur am Ort ihrer Entstehung. Liegt an diesem Ort ein Siedeverzug vor, so besteht eine ihm proportionale Druckdifferenz zwischen Sättigungsdruck und dem bezogenen Systemdruck. Entsprechend dem Druckgefälle, das sich zwischen Blasenentstehungsort und Natriumspiegel ausbildet, wird die Natriumsäule über der entstehenden Blase beschleunigt, was Blasenwachstum bedeutet. In diesen Experimenten dehnte sich die Blase nach oben aus, da durch die im Elementfuß simulierte vollständige Kühlkanalblockade kein Druckgefälle nach unten möglich war. Die Blausenausdehnung sowie der Gleichgewichtszustand zwischen Blaseninnendruck und Temperatur des Blasenrandes bewirken eine Druck- und Temperaturabnahme durch Verdampfen der sich bewegenden Blasenrandzone. Diese Druckabnahme wird bei großen Blasen durch das Erreichen kälterer Natriumgebiete unterstützt. Sinkt der Sättigungsdruck der oberen Blasenrandzone unter den bezogenen Systemdruck, wird die Blasenbewegung abgebremst und zur Bewegungsumkehr gezwungen. Die dabei auftretenden axialen Druckdifferenzen in der Blase bewirken eine radiale Blasenbewegungen als auch einen Dampfstrom in der Blase. Dieser Dampfstrom setzt sich aus dem abdampfenden Natrium des auf den Heizstäben haftenden Natriumfilmes und dem verdampfenden Natrium des Blasenrandes zusammen. Die mit dem Einfall der Natriumsäule verbundene freiwerdende Kondensationswärme führt zu einer Temperatur- und Druckerhöhung der Blasenrandzone. Steigt der Blasendruck über den bezogenen Systemdruck, wird die einfallende Natriumsäule verzögert und erneut ausgetrieben. Diese Blasenbewegung wird als Pulsation bezeichnet. Wird zu wenig Kondensationswärme beim Einfall der Natriumsäule an die Blasenrandzone abgegeben, so kann diese Bewegung nicht mehr abgebremst werden, die Blase kollabiert.

3.1 Blasenwachstum

Blasenwachstum wird sowohl von den eingebauten Thermoelementen als auch vom Druckfühler erfaßt. Obwohl die Entstehung von Blasen an Thermoelementen unwahrscheinlich ist, kann Blasenwachstum mittels der Thermoelemente registriert werden. Bedingt durch den Temperaturgradienten im Element führen bereits

kleine Natriumverschiebungen zu erfaßbaren Temperaturänderungen an den Meßstellen. So können entsprechend der Meßgenauigkeit je nach Temperaturgradienten (bis $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) Natriumverschiebungen durch Blasen ab ca. 1 mm Durchmesser abgelesen werden.

Durch die im Versuch simulierte, vollständige Kühlmittelblockade tritt beim Blasenwachstum eine radiale, sowie eine axiale nach oben gerichtete Natriumverschiebung auf. Temperaturverschiebungen als Folge dieser Bewegungen ermöglichen es, die Höhenlage des Blasenentstehungsortes zu bestimmen. Eine radiale Ortsbestimmung ist nur möglich, wenn der Blasenrand eine Temperaturmeßstelle erreicht. Bis zu diesem Zeitpunkt steigt die Temperaturanzeige entsprechend dem Temperaturprofil des von der Blase verdrängten Natriums an und registriert dann innerhalb der Blase Siedetemperatur. Meßstellen, die vorher eine Überhitzung aufwiesen, fallen auf der Siedetemperatur entsprechend dem Entzug von Verdampfungswärme ab. Solange sich die Meßstellen in der Blase befinden, registrieren sie, den Druckänderungen der Blase folgend, die jeweilige Siedetemperatur.

Abb. 3 zeigt Temperaturänderungen durch Natriumverschiebungen bei Einzelblasenbildung als Überlagerung der Pulsation, das Durchlaufen des Temperaturprofils einer Meßstelle bis auf Siedetemperatur, und die Siedetemperatur entsprechend den Druckänderungen in der Blase. Meßstelle 22 befindet sich in der Blase, während Meßstelle 23 im Bewegungsbereich der Blase liegt. In Abb. 11 sind die Temperaturverläufe der Meßstellen 10 und 14 dargestellt, die von einer Überhitzung auf der Siedetemperatur, die der Druckabnahme in der Blase entspricht, abfallen.

Im Gegensatz zu den Thermoelementen kann der Druckmeßfühler nur Blasenbildungen registrieren, deren Entstehungsort mindestens $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ Siedeverzug aufwies. In diesem Fall hat die Blase einen meßbaren erhöhten Druck zum bezogenen Systemdruck. Die Druckdifferenz führt zu einer Beschleunigung der über der Blase befindlichen Natriumsäule und kann dadurch vom Druckmeßfühler registriert werden.

Wie die Beschleunigung, wird auch die Verzögerung der Blase, die als negative Druckanzeige erfaßt wird, erkannt. Abb. 4 zeigt die gemessenen Druckverläufe von drei Versuchen beim Entstehen und Kollabieren einer Blase. Das erste Druckmaximum ist der Sättigungsdruck der Überhitzungs-

temperatur am Ort der Blasenentstehung. Die Druckdifferenz zwischen diesem Sättigungsdruck und dem bezogenen Systemdruck ist der Beschleunigung der über der Blase befindlichen Natriumsäule proportional und bestimmt die Geschwindigkeit des Blasenwachstums. Die Druckabnahme von diesem Maximum wird von erneuten Blasenbildungen unterbrochen. Die negative Druckdifferenz verzögert das Wachsen der Blase und zwingt die ausgetriebene Natriumsäule zur Umkehr. Die Blasenbewegung endet mit dem völligen Zusammenfall, was als Kollabierungsstoß am Druckverlauf zu erkennen ist. Da der Druckverlauf identisch mit der Beschleunigung der Natriumsäule ist, kann durch Integration ein der Geschwindigkeit proportionaler Verlauf der Blasenoberkante ermittelt werden. Dieser Verlauf ermöglicht es, den Zeitpunkt der größten Blasenausdehnung zu bestimmen, bevor die Natriumsäule durch die vorhandene negative Beschleunigung zum Einfall gezwungen wird. Gelingt es zu diesem Zeitpunkt die Blasengröße über die Temperaturmeßstellen zu ermitteln, so kann auf den echten Geschwindigkeitsverlauf der Blasenbewegung geschlossen werden.

Die Berechnung von Geschwindigkeit und Ausdehnung der Blase wurden an einem Beispiel gewählt, bei dem die Blasenbewegung weder von zusätzlichen Blasenentstehungen überlagert ist, noch von einem Kollabierungsstoß beendet wird. Druck, proportionaler Verlauf von der Geschwindigkeit und vom Weg der Blase sind in Abb. 5 dargestellt.

3.2 Pulsation

Die Pulsation ist das rhythmische Ausdehnen und Zusammenziehen der Blase als Folge von Druckänderungen in der Blasenrandzone. Eine Druckdifferenz zwischen oberer Blasenrandzone und bezogenem Systemdruck bewirkt eine axiale nach oben gerichtete Bewegung der Blase, Druckdifferenzen über die Höhe der Blase führen zu radialen Bewegungen, sofern die Blase nicht den gesamten Elementquerschnitt einnimmt.

Der rhythmische Bewegungsablauf wird im folgenden als Frequenz bezeichnet. Bei den vorliegenden Versuchen traten Frequenzen zwischen 0,5 und 2 Hz auf, solange sich die Blase noch innerhalb des Brennelementbündels befand. War das Brennelement hingegen nach oben ausgedampft, so daß die Blase aus dem Elementbündel austrat betrug die Frequenz ca. 10 Hz.

Bei der Pulsation wurden große örtliche Temperaturänderungen gemessen, deren Amplituden durch den ständig stattfindenden Wärmeausgleich mit jeder Pulsation kleiner wurden.

Abb. 6 zeigt die Pulsation an einer im Element befindlichen Blase. Die maximale Temperaturänderung von Meßstelle 12 beträgt 120°C bei einer Frequenz von 1,2 Hz. Die Pulsation einer aus dem Elementbündel hinausgewachsenen Blase ist auf der Abb. 15 von der Meßstelle 30 dargestellt. Hierbei beträgt die maximale Temperaturänderung 130°C bei einer Frequenz von ca. 10 Hz.

Die axiale Ausdehnung der Blase auf Grund eines höheren Druckes der Blasenoberkante zum bezogenen Systemdruck ist verbunden mit einer Druckabnahme der oberen Blasenrandzone. Die Ursache dieser Druckabnahme ist einmal der Entzug der Verdampfungswärme und zum anderen der axial abfallende Temperaturgradient im Element, so daß die Blasenoberkante beim Ausdehnen kälter werdende Natriumgebiete durchläuft. Durch den Druckabbau am oberen Blasenrand entsteht innerhalb der Blase ein Druckprofil, das zur Bildung eines Dampfstromes führt. Dieser Dampfstrom bewirkt durch den Transport von Verdampfungswärme einen nach unten fortschreitenden Druckabbau. Gleichzeitig mit dem Druckabbau am oberen Blasenrand wechselt die Druckdifferenz zum bezogenen Pooldruck von einem positiven zu einem negativen Wert. Der Unterdruck an der Blasenoberkante bewirkt, daß die Blasenausdehnung abgebremst und die ausgetriebene Natriumsäule zum Einfall gezwungen wird. Da sich bei der axialen Ausdehnung ein Druckprofil über die Höhe der Blase ausbildet, die Blase aber ein Druckgleichgewicht über ihre Oberfläche anstrebt, versucht sie, die Druckdifferenzen durch radiale Bewegungen auszugleichen. Dabei wird das Natrium entsprechend der Druckdifferenz über die Blasenhöhe beschleunigt.

3.2.1 Temperaturänderungen durch Pulsation in der Blase

Die aus der Blasenbewegung resultierenden Temperaturänderungen an den Thermoelementen sowie die registrierte Druckkurve zeigt Abb. 7.

Die Temperaturmeßstellen sind wie folgt angeordnet:

| | | |
|-----------|----|---------------------------------------|
| Meßstelle | 4 | im Natriumbereich oberhalb der Blase |
| " | 9 | im axialen Bewegungsbereich der Blase |
| " | 14 | im oberen Bereich der Blase |

Meßstelle 22 im unteren Bereich der Blase und
" 21 im radialen Bewegungsbereich der Blase

Der Druckfühler ist oberhalb der Blase angeordnet und registriert den Druck des oberen Blasenrandes.

Im zusammengezogenen Zustand der Blase, dieser Zeitpunkt ist in Abb. 7 durch eine Hilfslinie gekennzeichnet, hat der Druck seinen größten Wert, die Meßstellen 4 und 9 ihr Minimum. Die geringen Abweichungen zwischen beiden Meßstellen resultieren aus ihren unterschiedl. Entfernungen zur Blase. Während die Meßstelle 9 vorwiegend die axialen Bewegungen der Blase registriert, zeichnet die weiter von der Blase entfernt liegende Meßstelle 4 Natriumverschiebungen auf, die sich aus axialer und radialer Blasenbewegung zusammensetzen. Meßstelle 21 deutet zu diesem Zeitpunkt durch minimale Temperaturschwankungen auf diese radialen Bewegungen hin. Da Meßstelle 14 unmittelbar unter der Blasenoberkante liegt, müßte sie die Sättigungstemperatur zum Druck aufweisen, d.h. die Maxima von Druck und Temperatur müßten übereinstimmen. Die angezeigte Temperatur dieser Meßstelle ist jedoch niedriger als die Sättigungstemperatur, da das kondensierte Natrium die Meßstelle vom Dampf separiert. Mit dem starken Einsetzen der Dampfströmung beim Ausdehnen der Blase, wie es in Abb. 9 dargestellt ist, wird dieser Temperaturgradient abgebaut. Dadurch steigt die Temperatur auf die Sättigungstemperatur des hier herrschenden Druckes. Die Meßstelle täuscht ein zeitlich verschobenes Maximum vor. Der Verlauf der Meßstelle 9 steigt mit dem Ausdehnen entsprechend dem Temperaturgradienten des Natriums, bis die Blase die Meßstelle erreicht. Der weitere Verlauf entspricht dem der Meßstelle 14. Meßstelle 4 registriert die Blasenausdehnung über die Temperaturänderung des vorbeiströmenden Natriums mit seinem axialen Temperaturprofil.

Da sich der Druckabbau zeitlich verzögert innerhalb der Blase von oben nach unten fortpflanzt und demgemäß der Entzug der Verdampfungswärme bei Meßstelle 22 erst später erfolgt, registriert diese Meßstelle zunächst einen Temperaturanstieg entsprechend der Heizleistung. Auch hier stellt sich ein Temperaturgradient zwischen Dampf und Meßstelle ein. Erreicht der Druckabbau in der Blase die Meßstelle 22, baut sich durch den hier anwachsenden Dampfstrom der Temperaturgradient ab. Die Temperatur steigt zunächst auf die Sättigungstemperatur des Druckes an und nimmt dann entsprechend dem Druckabfall ab.

Zum Zeitpunkt des Ausdehnungsbeginnes besteht ein Gleichgewichtszustand an der Blasenoberfläche, der durch das Ausdehnen der Blase gestört wird, d.h. es entstehen Druckunterschiede über die Höhe der Blase. Der Gleichgewichtszustand wird durch den nahezu konstanten Temperaturverlauf der Meßstelle 21 charakterisiert. Bei Druckunterschieden über die Blasen- höhe liegt, wenn sich die Blase ausdehnt, im unteren Bereich der höhe- re Druck vor, der zu einem radialen Ausdehnen dieses Blasenbereiches und somit zu einem Temperaturanstieg der Meßstelle 21 führt. Erreicht die Blase diese Meßstelle, entspricht ihr Temperaturverlauf dem von Meßstelle 22, die ständig im unteren Blasenbereich liegt.

Die größte Ausdehnung der Blase wird von der außerhalb der Blase lie- genden Meßstelle 4 mit einem Maximum, von der Druckanzeige mit einem Minimum registriert. Die Temperaturminima der Meßstellen 14 und 22 entstehen erst, wenn die über den Dampfstrom abgeführte Wärme im Gleich- gewicht mit der über die Heizer sowie über die Kondensation beim Einfall zugeführten Wärme steht. Solange die Meßstellen 9 und 21 sich in der Blase befinden, entsprechen ihre Temperaturverläufe denen der Meßst. 14 und 22, beim Austritt aus der Blase zeigen sie den Temperaturabfall des vorbeiströmenden Natriums an. Während des Natriumeinfalles steigen Druck und Temperaturwerte innerhalb der Blase durch die freiwerdende Konden- sationswärme wieder an. Erhöht sich dabei der Druck an der oberen Bla- senzone über den Druck des unteren Blasenbereiches, so wird die Blase im unteren Bereich zusammengedrückt. Dabei gelangt die Meßstelle 21 aus der Blase in das umliegende Natrium und registriert einen Temperaturab- fall gemäß der Temperatur des vorbeiströmenden Natriums. Dieses Zusam- mendrücken wird dadurch abgebremst, daß sich aus der freiwerdenden Kon- densationswärme als Folge der radialen Bewegung und der über den Dampf- strom zugeleiteten Wärme ein Druck aufbaut, der eine Umkehr der Blasen- bewegung bewirkt. Mit der erneuten Ausdehnung stellt sich ein Druck- gleichgewicht an der Blasenoberfläche ein. Dieses Gleichgewicht ist er- reicht, wenn die radiale Bewegung der Blase abgeklungen ist. Meßstelle 21 registriert diesen Gleichgewichtszustand durch einen nahezu konstan- ten Temperaturverlauf, d.h. die Druckänderungen sind in der gesamten Blase gleichmäßig. Nimmt die Blase den gesamten Elementquerschnitt ein, entfällt zwangsläufig die radiale Bewegung der Blase.

3.2.2 Blasenbewegung durch Druckänderungen

Bei der Betrachtung des Sättigungsdruckes der gemessenen Temperatur innerhalb der Blase und des gemessenen Druckes des oberen Blasenbereiches kann die in Kap. 3.2.1 beschriebene Bewegung der Blase als Folge von Druckdifferenzen bestätigt werden (Abb. 9). Der Verlauf der gemessenen Druckkurve zum konstanten Systemdruck stellt den auf die Natriumsäule wirkenden Druck und somit die Beschleunigung dar. Mit der daraus resultierenden axialen Bewegung, die dem Blasenwachstum entspricht, ändert sich die Temperatur der oberen Blasenzone und somit auch der Druck.

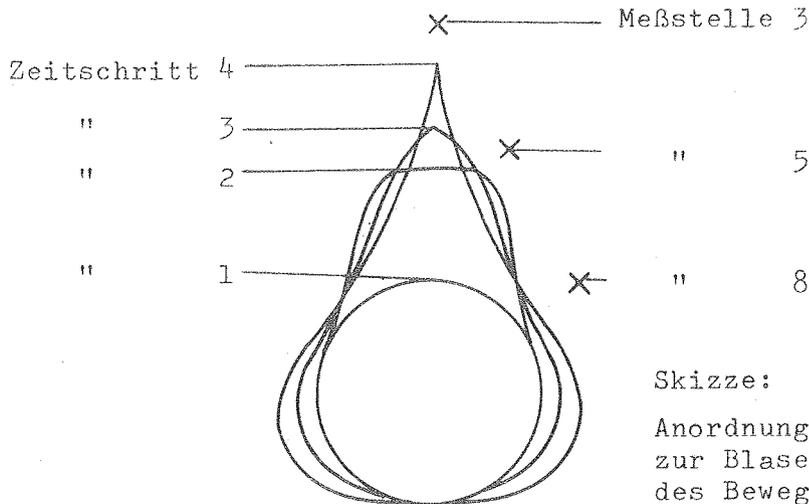
Das Verhalten der gemessenen Druckkurve zur Sättigungsdruckkurve einer im unteren Blasenbereich liegenden Temperaturmeßstelle läßt auf die radiale Blasenbewegung schließen. Liegt die Sättigungsdruckkurve oberhalb der gemessenen Druckkurve, dehnt sich infolge des höheren Druckes die Blase im unteren Bereich aus, verläuft die Sättigungsdruckkurve unterhalb der gemessenen, wird die Blase im unteren Bereich zusammengedrückt. Die Schnittpunkte beider Kurven sind zugleich die Bewegungsumkehrpunkte der Blase.

Die bisher beschriebenen Bewegungsabläufe bei der Pulsation sind charakteristisch für das Vorhandensein von nur einer Blase im Element. Entstehen neben dieser einen großen Blase zusätzlich Einzelblasen, so werden durch ihre Bewegungen die Temperatur- und Druckverläufe beeinflusst.

3.2.3 Temperaturänderungen durch Pulsation außerhalb der Blase

Bisher wurden die Einflüsse der Pulsation mit ihrer axialen und radialen Bewegung auf Temperaturmeßstellen innerhalb der Blase und zwei Meßstellen außerhalb der Blase beschrieben, und zwar für BEVUS 10. Wie sich der Bewegungsablauf auf Meßstellen oberhalb der Blase auswirkt, zeigt besonders deutlich BEVUS 5. Es ist zu beobachten, daß je nach Lage der Meßstelle zur Blase die axiale und radiale Blasenbewegung Natriumverschiebungen verursachen, die zu unterschiedlichen Temperaturverläufen an den Meßstellen führen. Dabei erzeugen radiale Blasenbewegungen durch die Elementkastenwand zusätzlich axiale Natriumverschiebungen. So prägen sich bei manchen Meßstellen die unterschiedlichen Temperaturverläufe durch eine Zeitverschiebung der Temperaturkurven aus,

während andere Temperaturverläufe Anteile von axialen und radialen Natriumverschiebungen enthalten. In Abb. 8 sind 3 Temperaturverläufe von Meßstellen dargestellt, die oberhalb der zusammengezogenen Blase angeordnet sind.



Meßstelle 3 liegt über der Blase, ihr Temperaturverlauf entspricht dem axialen Bewegungsablauf der Blase.

In Höhe der Blasenoberkante der zusammengezogenen Blase befindet sich seitlich davon die Meßstelle 8, deren Temperaturverlauf der radialen Blasenbewegung an dieser Stelle entspricht. Die Blase dehnt sich in Höhe dieser Meßstelle radial aus, wenn der Druck infolge Kondensation hier größer geworden ist als im unteren Blasenbereich. Diese Ausdehnung wird von der Meßstelle 8 als Temperaturanstieg noch während des axialen Zusammenziehen der Blase registriert.

Meßstelle 5 liegt auf halber Höhe und am Rande des axialen Blasenausdehnungsbereiches. Diese Meßstelle registriert anfänglich den Temperaturanstieg bei axialer Ausdehnung der Blase. Die mit der Ausdehnung verbundene Druckabnahme führt zu einem radialen Einfall, der als anschließender Temperaturabfall zu sehen ist. Mit dem axialen Einfall dehnt sich die Blase wieder radial aus, das zu einem erneuten Temperaturanstieg führt. Sobald sich der obere Blasenbereich auf der Höhe der Meßstelle befindet, ist für den Temperaturabfall nur noch das axiale Zusammenziehen der Blase wie bei Meßstelle 3 maßgebend.

3.2.4 Kollabieren der Blase beim Pulsationsvorgang

Die durchgeführten Versuche zeigen ferner zwei unterschiedliche Übergänge von der Kondensationsphase zur Ausdampfphase. Bleibt die Blase beim Einfall erhalten, so bildet sich ein stetiger Anstieg zum Druckmaximum aus; kollabiert die Blase, so entsteht eine deutlich erkennbare Druckspitze (Abb. 12).

Dieser Unterschied wird auch von den Temperaturmeßstellen registriert. Hier verursacht das bei der Kondensation einfallende Natrium, bedingt durch den Temperaturgradienten im Natrium, zunächst einen Temperaturabfall. Verbleibt eine Blase, so wird die einfallende Natriumsäule stetig abgebremst und wieder nach oben beschleunigt. Dieser Vorgang bildet sich an den Temperaturmeßstellen als kontinuierlicher Übergang von Temperaturabfall zum Temperaturanstieg ab. Beim Kollabieren einer Blase erfolgt das Abbremsen der Natriumsäule demgegenüber abrupt mit einem sofortigen anschließenden Austriebsbeginn. Die entsprechenden Meßstellen zeigen bei diesem Vorgang einen schlagartigen Übergang vom Temperaturabfall zum Temperaturanstieg.

3.3 Dampfstrom in der Blase

Der Dampfstrom ist der Transport von dampfförmigem Natrium infolge eines Druckprofils innerhalb der Blase. Entsprechend dem Druckprofil stellt sich eine Geschwindigkeit des Dampfstromes ein, deren Strömungsverluste durch die Heizstäbe gleich dem Druckgradienten sind.

Eine Blase im Ruhezustand hat eine konstante Blasenrandtemperatur und einen konstanten Dampfdruck und somit keine Dampfströmung. Liegt der Dampfdruck auf einem höheren Druckniveau als der bezogene Systemdruck, dehnt sich die Blase infolge der Blockade einseitig nach oben aus. Dabei wird der sich bewegenden Blasenrandzone Verdampfungswärme entzogen, was Temperaturabnahme bedeutet. Da der jeweilige Druck im Bereich der Blasenrandzone im Gleichgewicht zu der Temperatur steht, bildet sich über die Höhe der Blase ein Druckprofil aus. Der damit verbundene Dampfstrom baut die entstandenen Temperaturdifferenzen durch das Aussieden der heißeren Blasenrandzone und durch die Kondensation in den kälteren Bereichen ab.

Überlagert wird der Dampfstrom durch das Verdampfen des auf den Heizstäben befindlichen Natriums. Dadurch erklärt sich auch, daß sich der Druckabbau, bedingt durch die Blasenbildung, nur langsam nach unten hin fortpflanzt. Das bewirkt aber auch gleichzeitig eine Phasenverschiebung der Dampfgeschwindigkeit zwischen mehreren axial angeordneten Meßstellen. Die auf die axiale Ausdehnung folgende radiale Blasenbewegung im unteren Bereich führt zu einer Temperaturabnahme dieser Zone. Während vor dieser Blasenbewegung der Dampfstrom von unten nach oben gerichtet war, kann durch diese Bewegung eine Dampfstromumkehr eintreten.

Bei Größenänderungen der Blase, wie sie bei der Pulsation vorliegt, unterliegt die Dampfgeschwindigkeit analogen Änderungen wie die Temperaturen. Dies wird auf Abb. 9 durch den Temperaturverlauf der Meßstelle 3, die im Natrium oberhalb der Blase liegt und durch die Dampfgeschwindigkeit zwischen den beiden Meßstellen 14 und 17 dargestellt. Die Verschiebung beider Kurven zueinander ist durch die Lage der Meßstellen bedingt. Der unstetige Verlauf zwischen den Maxima der Dampfgeschwindigkeitskurve könnte durch radiale Bewegungen des Blasenrandes verursacht worden sein.

Ferner zeigt diese Abbildung die gemessene Druckkurve sowie den Sättigungsdruck der Temperaturen an den Meßstellen 14 und 17, aus denen die Dampfgeschwindigkeit errechnet wurde. Eine Unsicherheit in der Berechnung stellt der Reibungsbeiwert dar, der allerdings auf den Kurvenverlauf keinen Einfluß hat.

3.4 Temperaturausgleich im Element

Bedingt durch den Ausfall einiger Heizer sowie der Wärmeleitung radial nach außen entstand beim Aufheizen im Element ein großer Temperaturgradient. Dieser Gradient wird mit der ersten Blasenbildung durch folgende Vorgänge weitgehend abgebaut:

Das die Blase umgebende heißere Natrium wird mit dem Ausdehnen der Blase in kältere Gebiete gedrückt, wodurch diese aufgeheizt werden.

Durch das schnelle Wachsen der Blase tritt eine Verwirbelung zwischen kaltem und heißem Natrium ein.

Der Wärmetransport innerhalb der Blase mittels der Dampfströmung von der siedenden zur kondensierenden Blasenrandzone bewirkt einen Temperatúrausgleich.

Mit dem Einfall der Natriumsäule setzt eine Verwirbelung des kalten und heißen Natriums ein.

Dieser Temperatúrausgleich bewirkt, daß bei weiterer Wärmezufuhr die folgenden entstehenden Blasen größer werden.

Abb. 10 zeigt das Temperaturspektrum vor einer Blasenbildung und nach dem Kollabieren dieser Blase.

3.5 Das Erkennen von Zweitblasen

Neben der zuerst entstandenen Blase können durch Sinken des Dampfdruckes einer bereits vorhandenen Blase im Element weitere Blasen entstehen. Folgende Beispiele zeigen 3 Möglichkeiten Zweitblasen zu erkennen, und zwar über den Druckverlauf, Temperaturverlauf und Verhalten des Temperaturfeldes.

Druckverlauf: Bei der Bildung einer Blase hat sie den Sättigungsdruck der Temperatur ihres Entstehungsortes. Die Druckdifferenz zwischen dem Sättigungsdruck und dem bezogenen Systemdruck, die dem Siedeverzug entspricht, bewirkt eine Ausdehnung der Blase, die wiederum mit einer Druckabnahme verbunden ist. Durch die Druckabnahme sinkt der Systemdruck im Element so tief, daß der Sättigungsdruck der Temperaturen an anderen heißen Stellen im Natrium unterschritten wird. Dies führt zu einer neuen Blasenbildung wiederum mit Siedeverzug, nun aber bezogen auf den Sättigungsdruck der vorangebildeten Blase. Abb. 11 zeigt nach der ersten Blasenentstehung (1. Druckspitze) eine Reihe von Blasenbildungen, wobei immer eine erst entstanden ist, wenn der Dampfdruck der vorher gebildeten Blase soweit abgesunken ist, daß für die nachfolgende ein Siedeverzug vorlag. Parallel zu diesen Druckspitzen weisen die Temperaturanstiege, die identisch mit Natriumverschiebungen sind, auf Blasenbildungen hin.

Temperaturverlauf: Beim Vorhandensein von großen Temperaturgradienten im Element, kann das Wachsen von Zweitblasen besonders gut an den Temperaturverläufen erkannt werden. Ein Beispiel dafür ist die im Natrium

liegende Meßstelle 12 auf Abb. 12, deren Temperaturverlauf von Natriumverschiebungen in Form von Spitzen überlagert wird. Diese Blasenbildungen sind hauptsächlich dann zu beobachten, wenn der Druck im Natrium mit dem Ausdehnen der pulsierenden Blase abnimmt. Auf der Druckkurve führen diese Blasenbildungen zu keiner Anzeige, da ihr Siedeverzug so niedrig ist, daß die mit der Bildung verbundene Druckerhöhung vom Meßsystem nicht erfaßt wird.

Auf Abb. 3 sind über den Temperaturverlauf Zweitblasen zu erkennen, die eine solche Größe erreicht haben, daß ihr Innendruck den Bewegungsablauf der pulsierenden Blase beeinflusst.

Verhalten des Temperaturfeldes: Entsteht unter einer Blase eine weitere, so kann das Vorhandensein dieser beiden Blasen an Hand der Temperaturverläufe erkannt werden, da die Meßstellen in einer Blase nur auf deren Bewegung ansprechen. So z.B. erfassen die Meßstellen der oberen Blase den Natriumeinfall, den die Meßstellen der unteren Blase nicht registrieren. In Abb. 17 ist ein solcher Vorgang an Hand des Versuches BEVUS 4 dargestellt und wird in Kap. 5 beschrieben.

4. Versuche bei konstantem Druck

Bei 6 Versuchen wurde der Siedeprozess durch Aufheizen des unter konstantem Druck von 1,3 ata im Heizelement befindlichen Natriums eingeleitet. Die dabei dem Element zugeführte Heizleistung betrug max. 360 kW. Diese Leistung wurde 10 sec nach Einsetzen des Siedens abgeschaltet. Die gesamte zugeführte elektrische Wärmemenge sowie deren Aufteilung in drei ringförmige Zonen des Elementes wurden bei den einzelnen Versuchen variiert. Auf die Höhe des Siedeverzuges haben diese Änderungen keinen Einfluß, jedoch wird dadurch der Entstehungsort der Blase sowie deren größte Ausdehnung bestimmt.

Der Siedebeginn, gekennzeichnet durch die Höhe des Siedeverzuges, erfolgte bei 3 Versuchen ohne nennenswerte Überhitzung und bei 3 weiteren Versuchen mit einem Siedeverzug von jeweils 70, 34 bzw. 25 °C.

Bei den Versuchen mit geringem Siedeverzug dehnt sich die entstehende Blase durch die niedrige Druckdifferenz zwischen Blase und bezogenen Systemdruck nur wenig aus. Durch weitere Wärmezufuhr wird die Blase mit jeder Pulsationsausdehnung größer. Damit verbunden ist eine Zunahme der Pulsationszeit. Beim Erkennen der Blase an Hand der verursachten

Temperaturverschiebung beträgt diese Pulsationszeit 200 msec und erhöht sich dann auf 900 msec.

Bei den Versuchen mit höheren Siedeverzugswerten entsteht durch die höhere Druckdifferenz sofort eine größere Blase, deren Druck gegenüber dem bezogenen Systemdruck durch das schnelle Ausdehnen derart absinkt, daß die einfallende Natriumsäule zum Kollabieren der Blase führt. Durch weitere Leistungszufuhr über die Heizstäbe erreicht das Natrium erneut Siedetemperatur und beginnt ohne nennenswerten Siedeverzug zu siedeln. Da das Temperaturprofil im Element durch die erste Blasenbewegung ausgeglichen wurde, entsteht jetzt auch bei geringem Siedeverzug eine große Blase.

Der maximale Siedeverzug von 70°C wurde bei dem auf den Abb. 11 und 12 dargestellten Versuch erreicht. Dieser Siedeverzugswert wird von keiner Meßstelle registriert, da sich am Ort der Blasenentstehung kein Thermoelement befand. Dieser Wert kann aber übereinstimmend sowohl aus der Druckanzeige (Druckanstieg um 1 at) als auch durch Extrapolation des Temperaturverlaufes der Meßstelle 10, die in der Nähe des Blasenentstehungsortes lag, bestimmt werden. Direkt ablesbar auf Abb. 11 ist ein Siedeverzug von 50°C . Ferner ist zu sehen, wie die Meßstellen 8, 12 u. 15, die erst unterhalb der Siedetemperatur liegen, durch wiederholte Blasenbildungen Siedetemperatur erreichen. Auch bei diesen Blasenbildungen befinden sich die Meßstellen nur in der Nähe des Blasenentstehungsortes. Begleitet sind diese Blasenbildungen von erneuten Siedestößen, die den Druckverlauf der großen Blase unterbrechen. Des weiteren ist zu erkennen, daß durch das Ausdehnen der Blase der Druck soweit absinkt, daß die Blase einfällt und kollabiert. Durch das Kollabieren entsteht eine scharfe Druckspitze mit einem Maximalwert von 0,9 at. Der Zeitraum zwischen Siedebeginn und Kollabieren betrug 460 msec, bei den beiden anderen Versuchen 280 bzw. 370 msec. Ebenfalls wird der Einfall der Natriumsäule, der zum Kollabieren der Blase führt, von den Meßstellen 15, 10, 8 und 12 als Temperaturabfall, der mit dem Kollabieren spontan abbricht, registriert.

Das Auftreten von einerseits mehreren Siedestößen und andererseits nur einem Kollabierungsstoß läßt darauf schließen, daß sich alle entstandenen Einzelblasen vor dem Kollabieren zu einer einzigen Blase zusammengeschlossen haben.

Die durch den Siede- und Kondensationsvorgang verursachte Natriumvermischung verminderte das Temperaturniveau im Brennelement unter die Siedetemperatur. Durch weitere Leistungszufuhr über die Heizstäbe erreicht das Natrium erneut Siedetemperatur und beginnt ohne nennenswerten Siedeverzug zu siedeln.

Abb. 12 zeigt zu Beginn den Siedeverzug, der 20-fach zeitlich gedehnt in Abb. 11 dargestellt wurde. Die nach dem Kollabierungsstoß ablaufenden Vorgänge sind typische reproduzierbare Siedeabläufe, die in Abschnitt 3 erläutert wurden. So ist auf Abb. 12 deutlich die Pulsation der Blase erkennbar, die sowohl von den Temperaturmeßstellen als auch vom Druckfühler angezeigt wird. Der Temperaturverlauf der in der Blase liegenden Meßstelle 14 entspricht dem registrierten Blaseninnendruck, beiden entgegengesetzt verlaufen die Temperaturen der außerhalb der Blase liegenden Meßstellen. Bei größtem Druck ist die Blase am kleinsten. Zu diesem Zeitpunkt tritt entweder ein Kollabierungsstoß beim Zerfall der Blase auf oder die Blase bleibt erhalten. Nimmt der Druck mit dem Ausdehnen der Blase ab, können deutlich an Meßstelle 12 Einzelblasenbildungen beobachtet werden. Ferner kann an den Temperaturverläufen die jeweilige Blasenausdehnung während der Pulsation erkannt werden. Steigt beim Ausdehnen der Blase die Temperatur einer Meßstelle auf Siedetemperatur, so hat der Blasenrand diese Meßstelle erreicht. Auf der Abb. 12 ist dieses Verhalten an den Meßstellen 10 und 5, und später an 12 zu beobachten.

Die dadurch erkennbare Vergrößerung der Blase ist mit einer Zunahme der Pulsationszeit von 770 msec auf 1020 msec verbunden. Temperaturmeßstellen wie z.B. 14, die sich innerhalb der Blase befinden, weisen durch ihren kontinuierlichen Temperaturverlauf darauf hin, daß die Blase sich nicht löst und aufsteigt, sondern am Ort ihrer Entstehung pulsiert.

Die Entstehung einer Blase ist nicht an den Ort der höchsten Temperatur gebunden. So zeigt die Druckkurve des BEVUS 10 auf Abb. 13, daß vor dem Entstehen der Blase mit großem Siedeverzug bereits 2 Blasen mit niedrigem Siedeverzug entstanden. Der Siedeverzug, ermittelt aus den Werten der Druckkurve, beträgt bei der 1. entstanden Blase 4° , der der 3. gebildeten Blase 31°C . Parallel zu der Druckkurve ist das Siedeln an den

Temperaturverläufen zu erkennen. Die Meßstelle 6, die Überhitzungstemperatur zeigt, fällt nach der Blasenbildung auf der Siedetemperatur ab, die Temperaturverläufe der anderen Meßstellen zeigen als Folgeerscheinung der Blasenbildungen einen Temperaturanstieg, so ist bei Meßstelle 22 die erste Blasenbildung zu erkennen, Meßstelle 9 registriert die erste, zweite und dritte Blasenbildung mit verschiedenen Temperaturgradienten, Meßstelle 10 zeigt, nachdem sie in die Blase gelangt ist, den abfallenden Verlauf der Siedetemperatur.

5. Versuche mit schneller Druckabsenkung

Bei diesen Versuchen wurde das Natrium im Element unter Überdruck von 3,7 ata auf 1010 °C aufgeheizt. Durch eine anschließende schnelle Druckabsenkung wurde der Siedevorgang eingeleitet und dabei ein Siedeverzug von 175 °C simuliert. Gleichzeitig erhöht sich mit dem Siedeverzug die im Element gespeicherte Wärmemenge, die kurzzeitig eine größere Stabileistung als die vorhandene simuliert. Da es sich bei diesem Versuchstyp um einen Demonstrationsversuch handelte, wurden Siedeverzugs- werte (bis zu 175 °C) gewählt, die in dieser Höhe nicht im Reaktor erwartet werden. Sie dienen dazu, den spezifischen Einfluß des Siedeverzuges auf den gesamten Siedevorgang und den damit verbundenen Belastungen auf das Strukturmaterial besonders deutlich auszuprägen.

Wie bereits in Kap. 2 erwähnt, erfolgt die Entspannung des Natriums durch das Öffnen eines Ventiltellers, der zwischen dem unter Druck befindlichen Natrium und dem entspannten Schutzgasraum angeordnet ist.

Abb. 14 zeigt anhand eines Versuchsbeispiels und einer Berechnung den Druckverlauf über die Zeit während der Expansion. Dabei wurde das Natrium bei einem Schutzgasdruck von 0,4 ata innerhalb von 17 msec nach Öffnungsbeginn des Ventiltellers von 3,7 ata auf 1 ata entspannt. Alle 3 abgebildeten Druckkurven entsprechen einem anderen Höhengniveau im Behälter. Der berechnete Verlauf entspricht der Druckabnahme direkt unter dem Ventilteller, die gemessenen Verläufe wurden 1 bzw. 2 m unterhalb des Ventiltellers aufgenommen. Der obere Druckfühler ist im Pool angeordnet, während der untere Druckfühler in den Elementkopf ragt. Die geometrische Änderung zwischen den oberen und unteren Druckfühler verursacht eine Störung, die sich als Schwingung dem Druckverlauf des unteren Druckmeßfühlers aufprägt. Aus dem Versatz beider gemessenen Druck-

kurven, wobei die Schwingung eliminiert wurde, errechnet sich die Geschwindigkeit der Druckentlastungswelle als Schallgeschwindigkeit. Durch diese schnelle Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist der Ort des Siedebeginns nur von der Temperatur abhängig. Dies bestätigt auch der Siedebeginn, der im heißesten Natriumgebiet im oberen Bereich der beheizten Zone lag.

Der eckige Verlauf der gemessenen Druckverläufe resultiert aus der alle 5 msec erfolgten Druckaufnahme. Der mit der Expansion verbundene Siedebeginn ist an der nach oben abknickenden Druckkurve zu sehen, die als weiterer Verlauf in Abb. 15 dargestellt ist.

Nach Auslösen der Druckentlastung wurde die Heizleistung innerhalb von 10 sec von 10 W/cm^2 auf 1 W/cm^2 heruntergeregelt, um nicht die Heizstäbe durch zu hohe Temperatur zu gefährden. Diese Temperaturen können auftreten, wenn sich die Heizstäbe in der Blase befinden und dadurch nicht mehr genügend Wärmemenge abgeben können.

Den Einfluß, den das Temperaturprofil im Element auf die Blasengröße hat, zeigen die BEVUS-Versuche 3 und 4. Für die beiden Versuche wurde die gleiche Aufheizgeschwindigkeit von 600 auf $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ gewählt. Während bei dem Versuch 3 erst nach einer Verweilzeit von 1,5 min auf der hohen Temperatur, wurde bei dem Versuch 4 sofort nach Erreichen dieser Temperatur expandiert. Mit der Verweilzeit auf hoher Temperatur bei BEVUS 3 konnte sich das Temperaturprofil in radialer sowie axialer Richtung im Element ausgleichen. Dadurch war es möglich, daß sich die entstandene Blase bei gleicher Anfangsbeschleunigung der Natriumsäule wie bei BEVUS 4 bis in den Elementkopf ausdehnte. Die Blase nahm bei ihrer größten Ausdehnung den gesamten freien Querschnitt des Elementes ein und war ca. 840 mm hoch. Bei BEVUS 4 kann dagegen beobachtet werden, daß die Blase nur 400 mm in den kalten unbeheizten Natriumbereich hineinragt und dabei den gesamten freien Querschnitt ausfüllt.

5.1 BEVUS 3

Anhand der gemessenen Druck- und Temperaturverläufe von BEVUS 3, die in den Abb. 15 und 16 dargestellt sind, wird der Siedevorgang beschrieben. Die simulierte hohe Überhitzungstemperatur bewirkt über die hohe Druckdifferenz zwischen Blasen- und Systemdruck ein schnelles Wachsen der Blase. Bereits 43 msec nach der Druckentlastung nimmt die Blase ca.

die Hälfte der freien Querschnittsfläche des Elementes ein und reicht von der Meßstelle 14 bis Meßstelle 1, das einer Blasenhöhe von 535 mm entspricht. Ab diesem Zeitpunkt zeigt die Meßstelle 1 einen Temperaturabfall auf der Siedelinie, analog denen der Meßstellen 10 und 14. Die Temperaturdifferenzen zwischen den genannten Siedelinien entspricht dem Druckabfall in der Blase. Nach 120 msec erreicht die Oberkante der Blase Meßstelle 30. Das entspricht einer weiteren Ausdehnung von 442 mm nach oben. Erreicht die am Rande des Elementes angeordnete Meßstelle 2 Siedetemperatur, füllt die Blase den gesamten freien Querschnitt des Elementes aus. Durch die in der Blase herrschende intensive Dampfströmung und die damit verbundene freiwerdende Kondensationswärme kann sich die Blase im kalten Natriumbereich des Elementkopfes halten. Einmal die kalte Natriumumgebung um die Blase und andererseits die über die Dampfströmung zugeführte Wärmemenge hat eine Pulsation der Blase zur Folge. Diese Pulsation wird durch die Temperaturmeßstelle 30 der Querlanze registriert und hat eine Frequenz von ca. 10 Hz. Ist die angebotene Wärmemenge nicht mehr der abgeführten Wärmemenge äquivalent, beginnt der Natriumeinfall. Dieser Einfall erfolgt nicht kontinuierlich, sondern wird von erneuten Ausstößen unterbrochen, die einen Frequenzbereich von 0,5 bis 1 Hz aufweisen.

Die Pulsation ist je nach Stadium des Natriumeinfalles erst an Meßstelle 30, anschließend an den Meßstellen 2 und 1 auf Abb. 16 zu erkennen. Mit dem ersten Einfall der Natriumsäule wird in der Blase bei der Kondensation Wärme frei, die die Temperatur und somit den Innendruck der Blase derart erhöht, daß die Blase erneut austreibt. Diese Temperaturerhöhung von 6 °C in der Blase während des Einfalles ist auf der Abb. 16 an den Meßstellen 8, 10 und 14 zu sehen. Etwa 25 sec nach Kondensationsbeginn ist das Element wieder vollständig mit Natrium gefüllt, wobei auf Abb. 16 nicht der gesamte Zeitraum des Einfalles dargestellt ist.

Der während des Versuches vom Druckfühler registrierte Druckverlauf stellt unmittelbar nach Beginn der Druckentlastung den Abfall des bezogenen Systemdruckes am Meßort dar. Sobald sich der Druckaufbau der ersten entstehenden Blase an dem Druckmeßkopf auswirkt, wird der abfallende Druckverlauf durch einen erneuten Anstieg unterbrochen. Die Maximalwerte der Druckspitzen auf Abb. 15 entsprechen dem jeweiligen Sättigungsdruck, der am Ort der Blasenentstehung vorliegenden Natriumtemperatur. Die den Druckspitzen im weiteren Verlauf folgenden "kleineren"

Druckänderungen geben den Verlauf des Innendruckes der Blase wieder, da der Druckfühler während dieser Zeit von der Blase umschlossen ist. Die während des Einfalles gemessene Druckspitze von 0,5 at auf Abb. 16 könnte durch das Kollabieren einer kleinen Blase im Druckmeßrohr verursacht worden sein, da sich der Fühler vorher in der Blase befand.

Da das Druckmeßsystem wegen der auftretenden verhältnismäßig starken Drift nach etwa 8 sec abgeschaltet wurde, kann über den Druckverlauf bei der Blasenauflösung nichts ausgesagt werden.

5.2 BEVUS 4

Versuch 4 unterscheidet sich von Versuch 3 durch 2 Merkmale:

die Bildung einer kleineren Blase gegenüber Versuch 3, bedingt durch die bereits erwähnte geringere Wärmemenge im Element

das Vorhandensein einer Zweitblase, die bereits nach 170 msec kollabiert.

Beide Merkmale sind an den Temperatur- und Druckverläufen auf Abb. 17 zu sehen.

Ca. 15 msec nach Expansionsbeginn setzt der Siedevorgang im Element ein. Der Siedebereich umfaßt den gesamten Elementquerschnitt an der Oberkante der beheizten Zone. Nach 60 msec zeigt der Druckmeßfühler einen Druck von 0,5 ata an. Dieser Druck der Blasenoberkante weist darauf hin, daß die Blase in Temperaturbereiche von 800 °C vorgedrungen ist. An der Meßstelle 1, 400 mm oberhalb der beheizten Zone, ist am Anstieg der Temperatur auf diese Siedetemperatur erkennbar, daß die Meßstelle von der Blase eingeschlossen wird. In diesem gesamten Siedebereich liegen zwei separate Blasen vor, die eine oberhalb, die andere in der beheizten Zone. In der oberen Blase liegt ein ausgeprägtes Druckprofil vor, das eine sehr intensive Dampfströmung zur Folge hat. Da die Blase im kalten und nicht beheizten Natriumgebiet liegt, kann der Dampfstrom nicht aufrechterhalten werden. Der Natriumeinfall mit dem anschließenden Kollabieren der oberen Blase kann an den Temperaturverläufen und der Druckmeßanzeige festgestellt werden.

Die Druckkurve zeigt ab 60 msec den typischen Druckverlauf vor einem Kollabieren einer Blase, d.h. der Druck am oberen Blasenrand sinkt unter den bezogenen Systemdruck von 0,8 ata, das den Einfall der Blase zur Folge hat. Gleichzeitig mit dem Einfall der Natriumsäule erkennt man den Temperaturabfall an der oberen Meßstelle 1, die vorher von der Blase eingeschlossen war. Nacheinander ist dieser Abfall auch an den Meßstellen 3, 4 und 5 zu beobachten. Aus dem zeitlichen Verlauf dieses Natriumeinfalles läßt sich dessen Geschwindigkeit berechnen, die ca. 5 m/sec beträgt. Verbunden mit diesem Einfall ist aber auch ein Temperaturanstieg der Meßstellen 3, 4 und 5 in der Blase. 170 msec nach Expansionsbeginn kollabiert die obere Blase. Die Meßstelle 5 zeigt nun Natriumtemperatur, was als Abfall von der Siedetemperatur zu erkennen ist. Bis zum Kollabieren der oberen Blase hatte der Natriumeinfall keine Einwirkung auf die untere Blase. Die einfallende Natriumsäule kommt mit dem Kollabierungsschlag nicht zum Stillstand, da die in der Heizzone verbliebene Blase beim Aufschlag zusammengedrückt wird. Durch den weiteren Einfall gelangt die Meßstelle 8 aus der Blase in Natrium, das zu einem Temperaturabfall führt. Gleichzeitig mit dem Einfall entsteht in der Blase eine intensivere Kondensation, die zu einer Temperaturerhöhung des oberen Blasenbereiches an den Meßstellen 9 und 10 führt. Das hat wiederum eine Abnahme des Dampfstromes zur Folge, wodurch im unteren Blasenbereich weniger Verdampfungswärme verbraucht wird und die Temperatur der Meßstelle 14 annähernd konstant bleibt. Bei dem folgenden erneuten Austrieb dehnt sich die Blase 20 cm nach oben bis Meßstelle 4 aus. Der weitere Siedeablauf entspricht dem von Versuch 3. Beide Versuche zeigen während des Natriumeinfalles eine Pulsation im Elementbündel. Nach 13 sec ist bei BEVUS 4 der Einfall beendet.

6. Vermessen des Elementkastens auf Deformation

Als Versuchsziel sollte festgestellt werden, ob der Elementkasten durch die beim Siedevorgang auftretenden Siede- und Kollabierungsdruckstöße deformiert wird. Um eine Aussage zu erhalten, wurde der Kasten vor und nach den Versuchen vermessen.

Als Meßvorrichtung dient eine plane senkrecht stehende Meßschiene mit einem horizontalen Tisch, auf dem drehbar gelagert und alle 60 ° arretierbar, ein Flansch befestigt ist. Auf diesem Flansch wird aufrecht

stehend der Elementkasten geschraubt, ohne einer Zwangslage durch eine weitere Einspannung zu unterliegen. Der Abstand zwischen Meßfläche und Kastenwand wird mit einer Meßuhr für jede Kastenfläche an 66 Punkten gemessen. Die Punkte sind so verteilt, daß auf der Kastenfläche ein Raster von 25 x 100 mm entsteht:

Durch das einseitige Aufschweißen von zwei Instrumentierungskästen auf den Elementkasten war der Kasten vor dem Einbau bereits verbogen, d.h. die Achse zeigte zwischen den Kastenenden einen Versatz von 4 mm. Der Kasten wurde spannungsfrei in den Versuchsbehälter eingebaut, und zwar unten am Flansch befestigt und oben am Kopf spielfrei geführt. Durch einseitigen Ausfall von Heizern entstanden während der Versuche max. Temperaturunterschiede von 140 °C zwischen gegenüberliegenden Seiten. Dieser Temperaturunterschied bewirkte eine einseitige Ausdehnung des Elementkastens, die, bedingt durch die Einspannung, zu einer plast. Verformung führte. Dadurch, daß der Elementkasten nach jedem Versuch eine längere Zeit gleichmäßig auf 600 °C gehalten wurde, blieb nur noch ein remanenter Anteil der plast. Verformung, die bei einer Kastenwandtemperatur während des Versuchs von ca. 750 °C aufgetreten war, übrig. Die meßbare Verformung setzt sich also zusammen aus dem remanenten plast. Anteil und der elast. Verformung bei 600 °C.

Abb. 18 zeigt die gemessene Verformung, die aus den Differenzwerten zwischen den Messungen vor und nach den Versuchen resultieren. Die dargestellten Verformungswerte haben, bedingt durch die Genauigkeit von Meßuhr und Meßvorrichtung sowie den Umrechnungen einen Fehler von $\pm 0,04$ mm. Als Folge der thermischen Belastung wurde der Elementkasten über die Kante zwischen den Flächen E und F verzogen (Bezeichnung der Kastenflächen, s. Abb. 19). Dadurch wurde der Querschnitt zwischen den Seiten B-E sowie C-F verengt, dagegen zwischen den Seiten A-D erweitert. Auf der Abb. 18 wurde die auf der Mittellinie jeder Seite gemessene Verformung dargestellt. Die am Kopf des Elementes gemessene Abweichung von 15 mm wurde anhand einer Überschlagsrechnung bestätigt.

Obwohl sämtliche Siederversuche mit demselben Element durchgeführt wurden, konnte eine überlagerte Verformung, wie lokales Ausbeulen der Kastenwände durch Siede- und Kollabierungsstöße nicht festgestellt werden.

7. Ergebnis

Als Ergebnis dieser ersten Versuchsserie kann zusammenfassend gesagt werden:

Bei den Siedevorgängen in einem verstopften Brennelementbündel treten keine Siede- und Kondensationsstöße auf, die die Kernstruktur gefährden.

Es wurden Siedeverzüge bis zu 70°C gemessen. Der maximale Siededruckstoß betrug 1 at.

Die Entstehung einer Blase unter Siedeverzug ist nicht an den Ort der höchsten Temperatur gebunden.

Die Entstehung weiterer Blasen im Element neben der erstentstandenen Blase konnte sowohl bei minimalen Siedeverzügen - wie sie bei der Pulsation vorliegen - als auch bei großen Siedeverzügen bis zu 70°C und den Versuchen mit simulierten Siedeverzügen von 175°C beobachtet werden.

Die Größe des Druckstoßes beim Kollabieren einer Blase ist abhängig von der Geschwindigkeit der einfallenden Natriumsäule zum Zeitpunkt des Kollabierens. Diese wiederum wird bestimmt von der Druckdifferenz zwischen Blasenoberkante und bezogenem Systemdruck. Der maximale Kollabierungsstoß betrug $1,4$ at.

Innerhalb einer Blase treten Druckdifferenzen auf, die eine Dampfströmung vom heißen siedenden zum kälteren kondensierenden Bereich auslösen.

Die Pulsation der Blase betrug im Elementbündel ca. 1 Hz, verbunden mit einer örtlichen Temperaturänderung bis zu 120°C . Außerhalb des Elementbündels pulsierte die Blase mit ca. 10 Hz und verursachte Temperaturänderungen von 135°C . Die Pulsationsvorgänge sind reproduzierbar.

Mit der axialen Bewegung der Blase treten radiale Bewegungen als Folge des Druckausgleiches über die Blase auf, solange die Blase nicht den gesamten Elementquerschnitt einnimmt.

Ein Aufsteigen von Blasen wurde nicht beobachtet, d.h. die Blase blieb in der beheizten Zone, lediglich der obere Teil der Blase pulsierte in den kalten Bereich.

Aus den Erfahrungen der 1. Versuchsserie wurden Hinweise auf eine verbesserte Instrumentierung des 2. Versuchseinsatzes gewonnen.

Der Ausfall mehrerer Heizer im Element hat die Siedevorgänge nicht wesentlich beeinträchtigt. Deshalb werden im 2. Versuchseinsatz 3 Heizer gegen Thermoelementkaskaden ausgetauscht. Die Zahl der Thermoelemente im Heizelement erhöht sich dadurch von 28 auf 40.

Die mit der Blasenbewegung verbundenen Temperatur- und Druckänderungen sind schneller als 5 msec. Um diese Änderungen zu erfassen, wird die Abfragefrequenz der Meßdaten von den Thermoelementen von 200/sec auf 500/sec erhöht, die des Druckes auf 1500/sec.

Zur besseren Erfassung der Blasenbewegung ist die Druckmessung in Elementmitte und am Elementfuß erforderlich. Daher werden dort 2 Druckmeßfühler montiert. Diese Druckmeßstellen sollen ferner Auskunft geben über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle durch das Element bei den Druckentlastungsversuchen sowie über Druckwellen, die bei Siede- und Kondensationsstößen auftreten.

Zur Erfassung der Druckbelastungen auf die Elementkastenwand bei den Siede- und Kollabierungsstößen werden 3 gekapselte Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen der Fa. Microdot auf den Elementkasten gepunktet.

Als eine zusätzliche Instrumentierung wird ein induktiver Durchflußmesser eingebaut, wie er beim SNR zum Einsatz kommen wird. Der Durchflußmesser soll einmal bei diesen Versuchen getestet werden und zum anderen zusätzliche Information über die Natriumgeschwindigkeit beim Wachstum und bei der Pulsation der Blase liefern.

Um die Siedevorgänge mit einem zweiten unabhängigen Meßsystem nachzuweisen, wurde ein Blasendetektor eingebaut.

Durch den Umbau des Ventiltellers an der Druckentlastungsvorrichtung wird die Geschwindigkeit des Druckabfalles bei den Versuchen mit simuliertem Siedeverzug vergrößert. Der Druckabfall von 3,7 ata

auf 1 ata soll in 6 msec erfolgen, statt bisher in 17 msec.

Durch die erweiterte Instrumentierung wird erhofft, die Siedevorgänge im 2. Versuchselement noch detaillierter zu erfassen.

Referenzen

- [1] SCHULTHEISS, G.F.:
Experimentelle Untersuchung des Siedeverzuges von Natrium
an künstlichen Oberflächenrauigkeiten, KFK 1332, Dezember 1970
- [2] SCHLECHTENDAHL, E.G.:
Sieden des Kühlmittels in natriumgekühlten schnellen Reaktoren,
KFK 1020, EUR 4302 d, Juni 1969
- [3] GAST, K.:
Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern Schneller Natrium-
gekühlter Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicher-
heit, KFK 1380, 1971
- [4] PEPPLER, W., SCHLECHTENDAHL, E.G., SCHULTHEISS, G.F.:
Investigation on dynamic boiling in sodium cooled fast reactors,
Nuclear Engineering and Design 14, 1970, pp. 23-42
- [5] PEPPLER, W.:
Experimentelle Untersuchungen der Siedevorgänge mit Natrium
in engen Kanälen und deren Anwendung auf schnelle Reaktoren,
KFK 1413, Juni 1971
- [6] HUBER, F., MÜLLER, R.A.:
The Karlsruhe Sodium Tank Test Facility, KFK 1203, Juli 1970

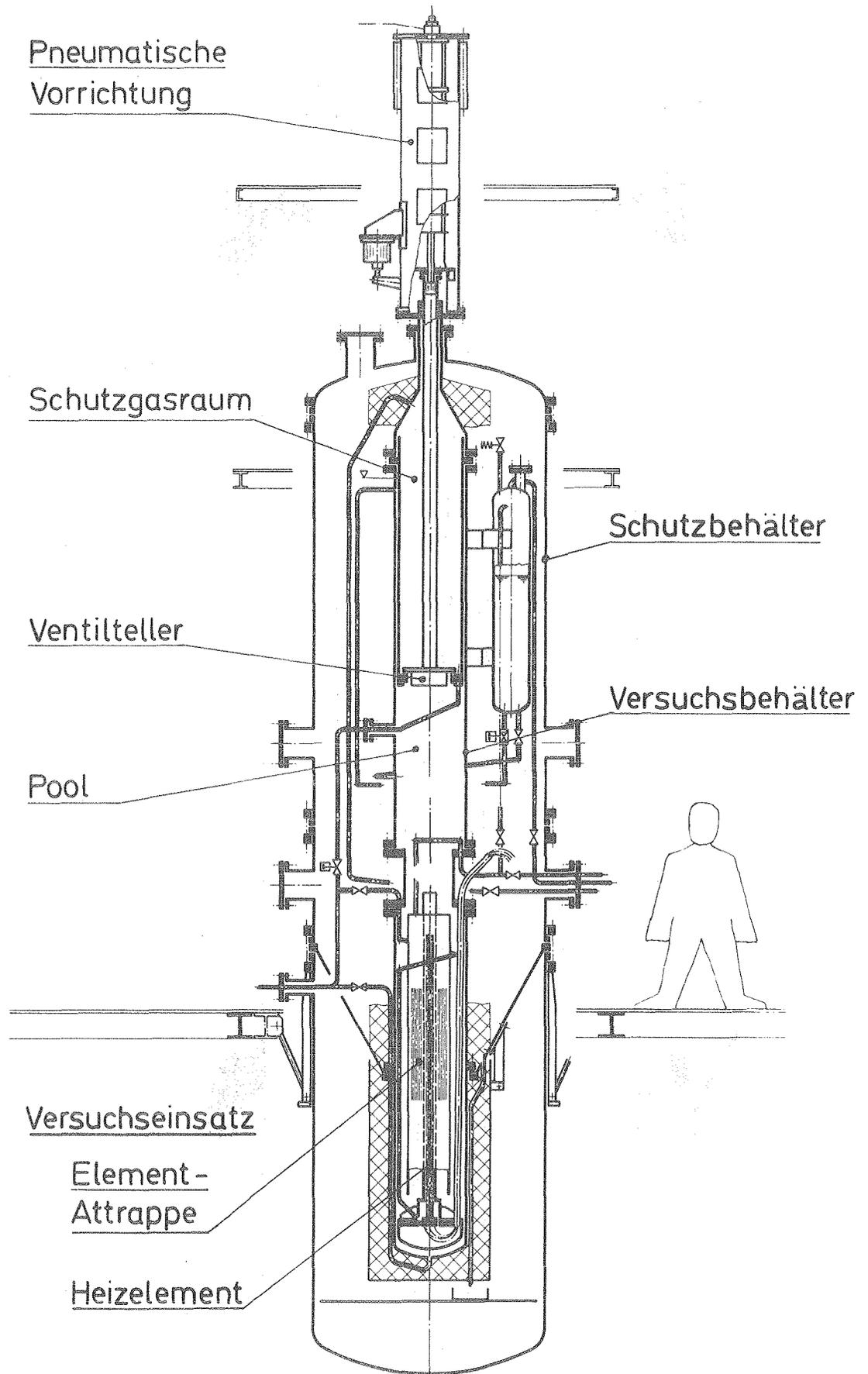
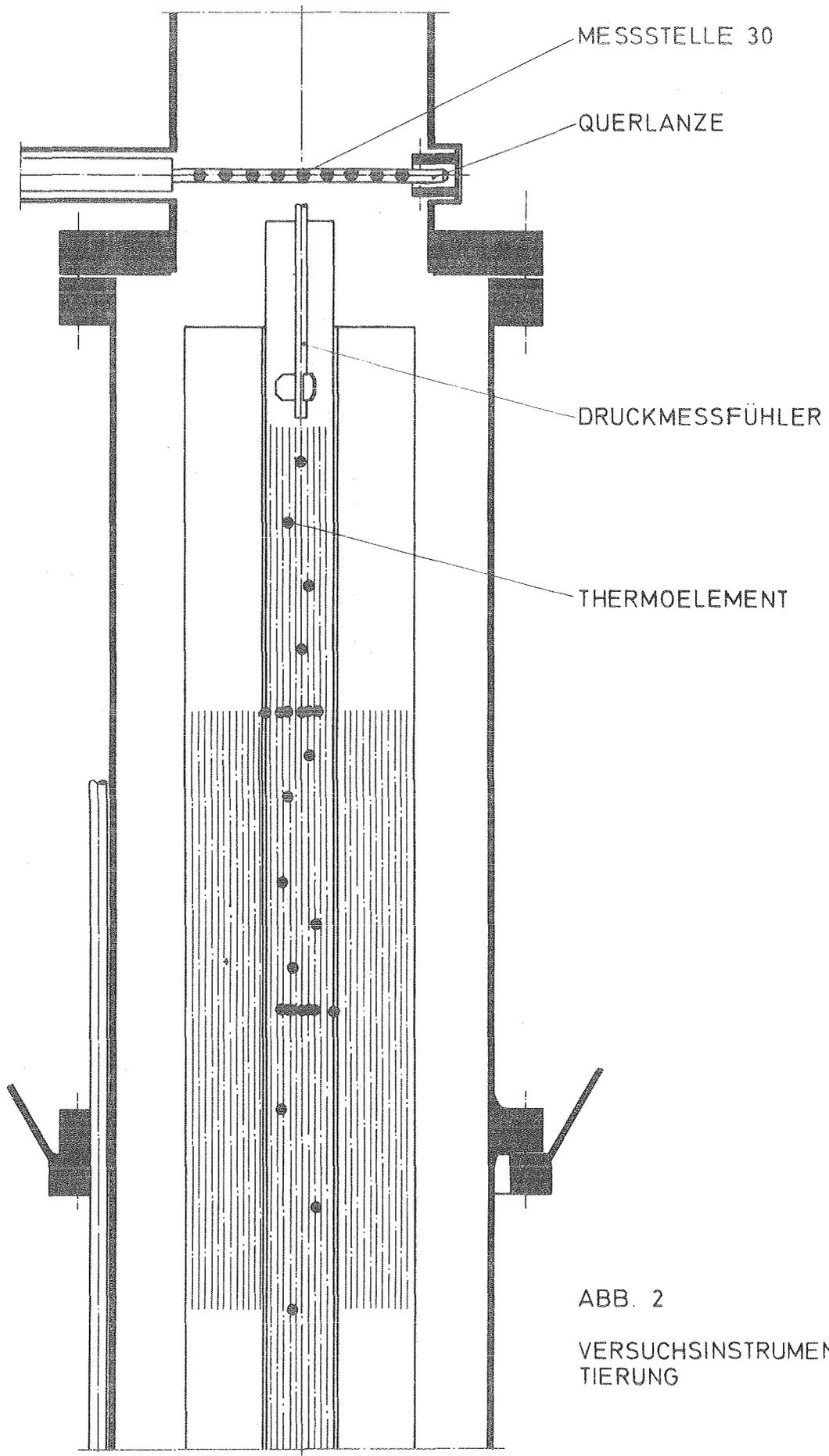
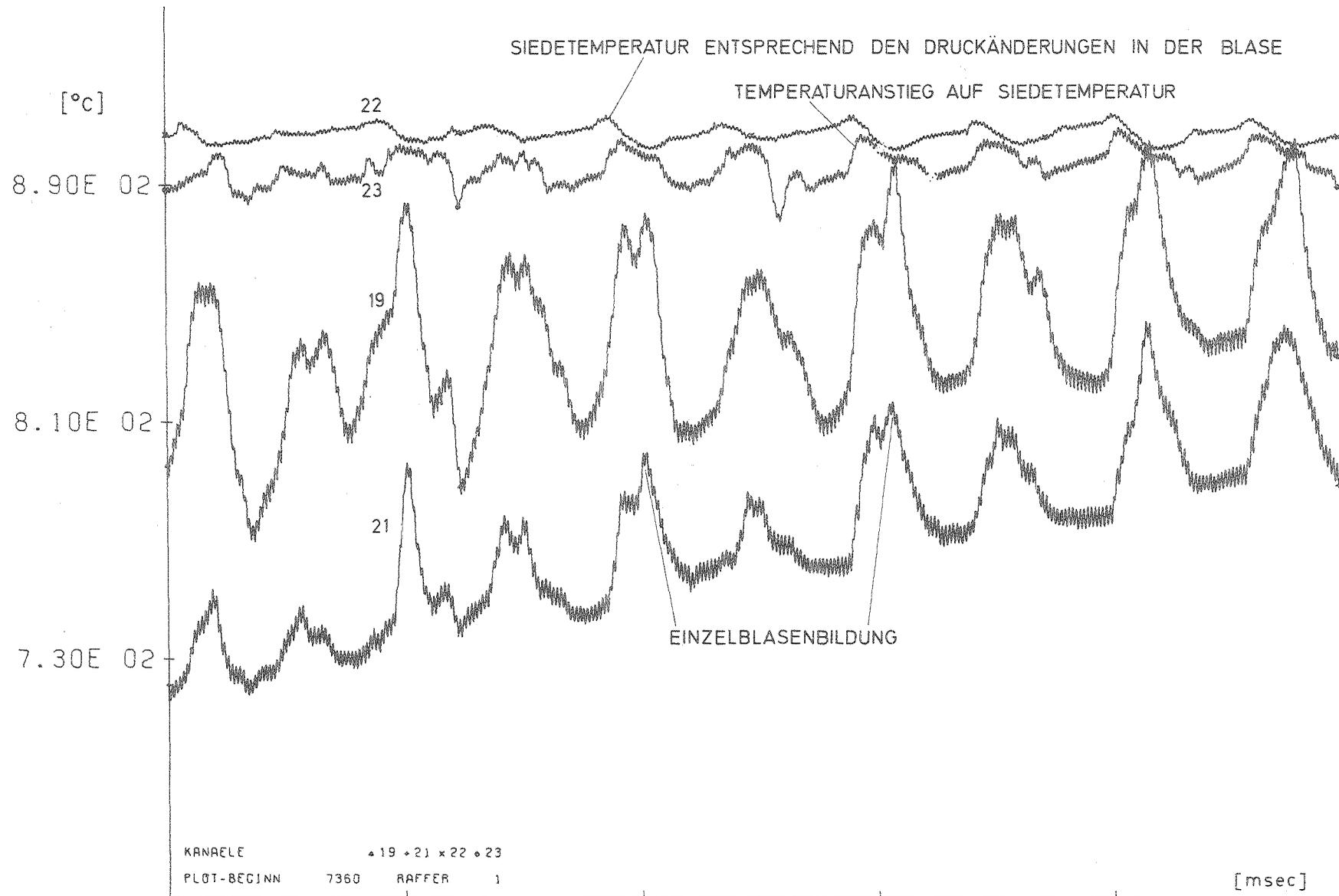


Abb. 1 Schematische Darstellung der Versuchsanlage





KANALE * 19 * 21 * 22 * 23
 PLOT-BEGINN 7360 RAFFER 1

ABB.00003 1.25E 03 2.50E 03 3.75E 03 5.00E 03 [msec]
 BEVUS 5 TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT

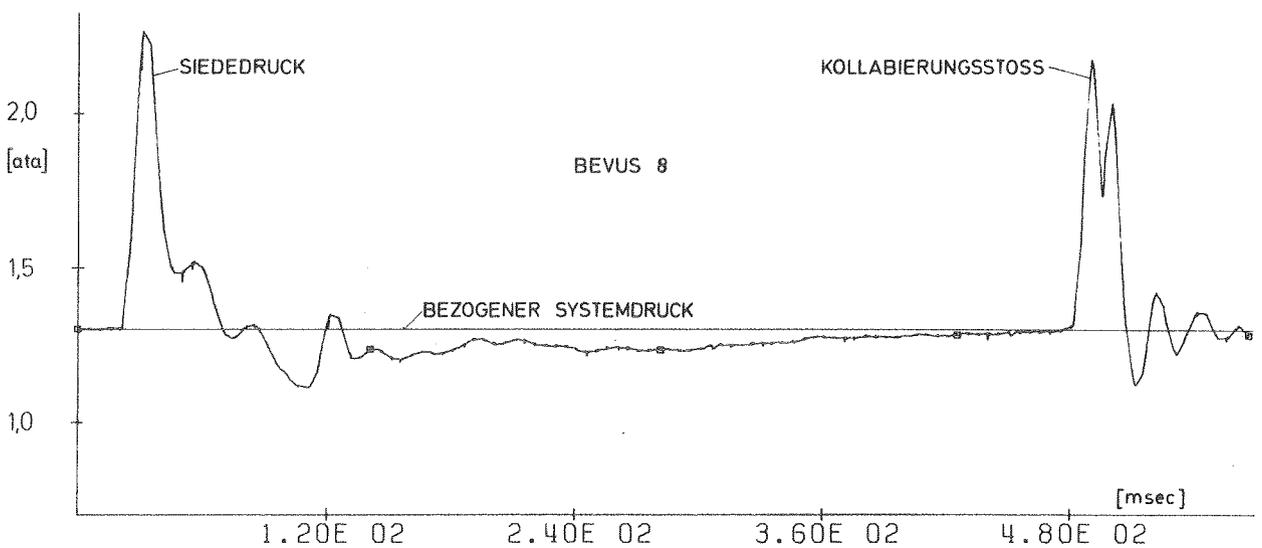
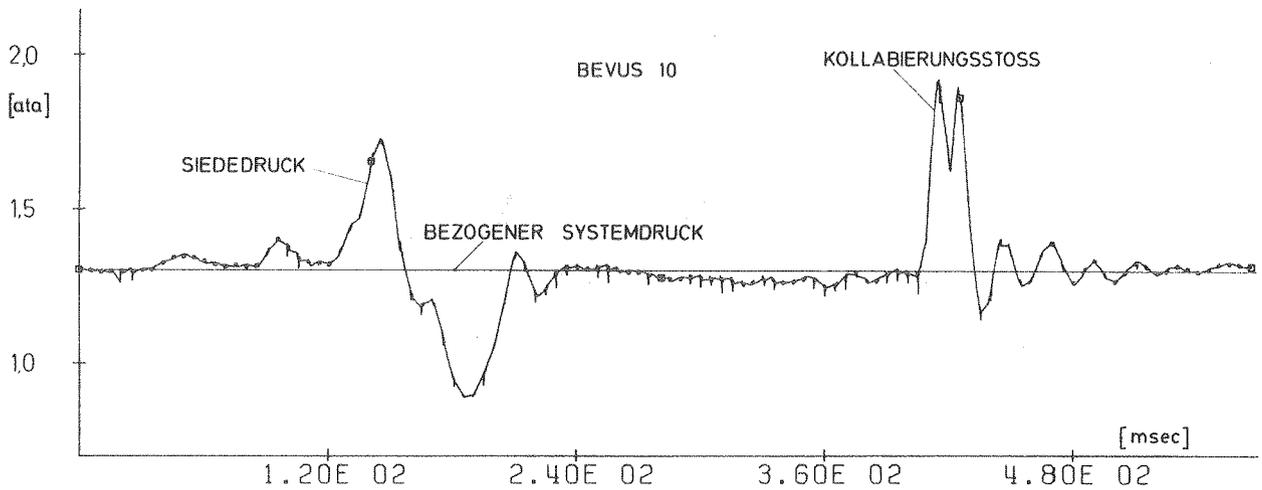
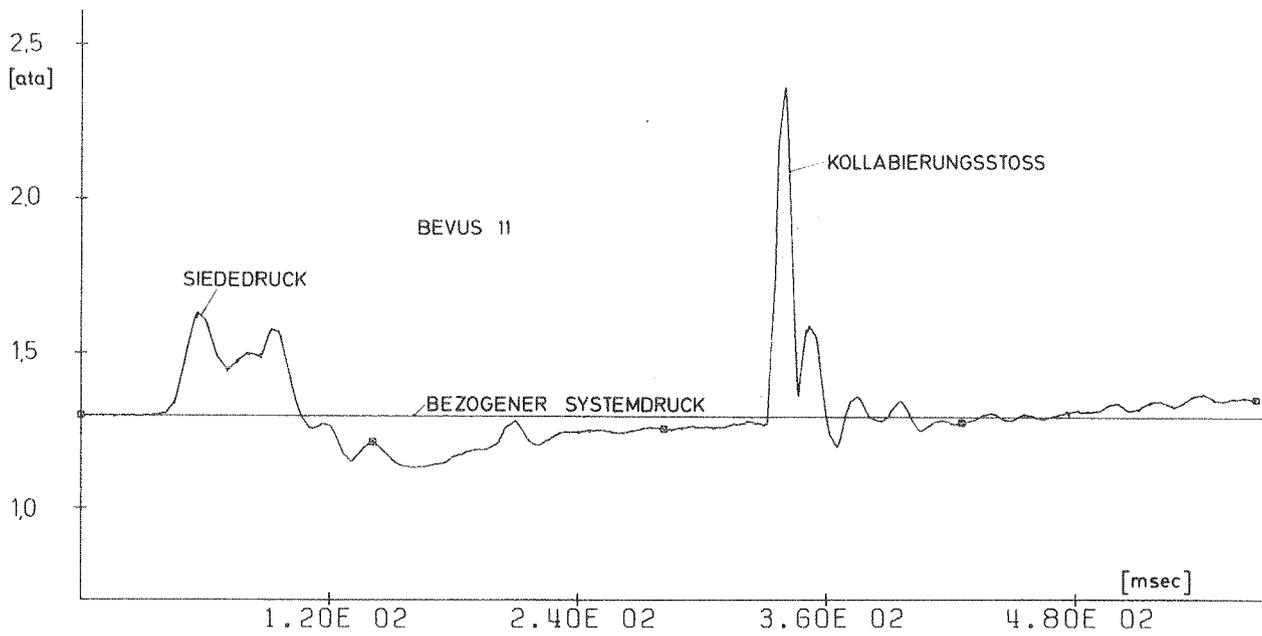


ABB.00004 BEVUS 8,10,11 DRUCKVERLAEFE ALS FKT DER ZEIT

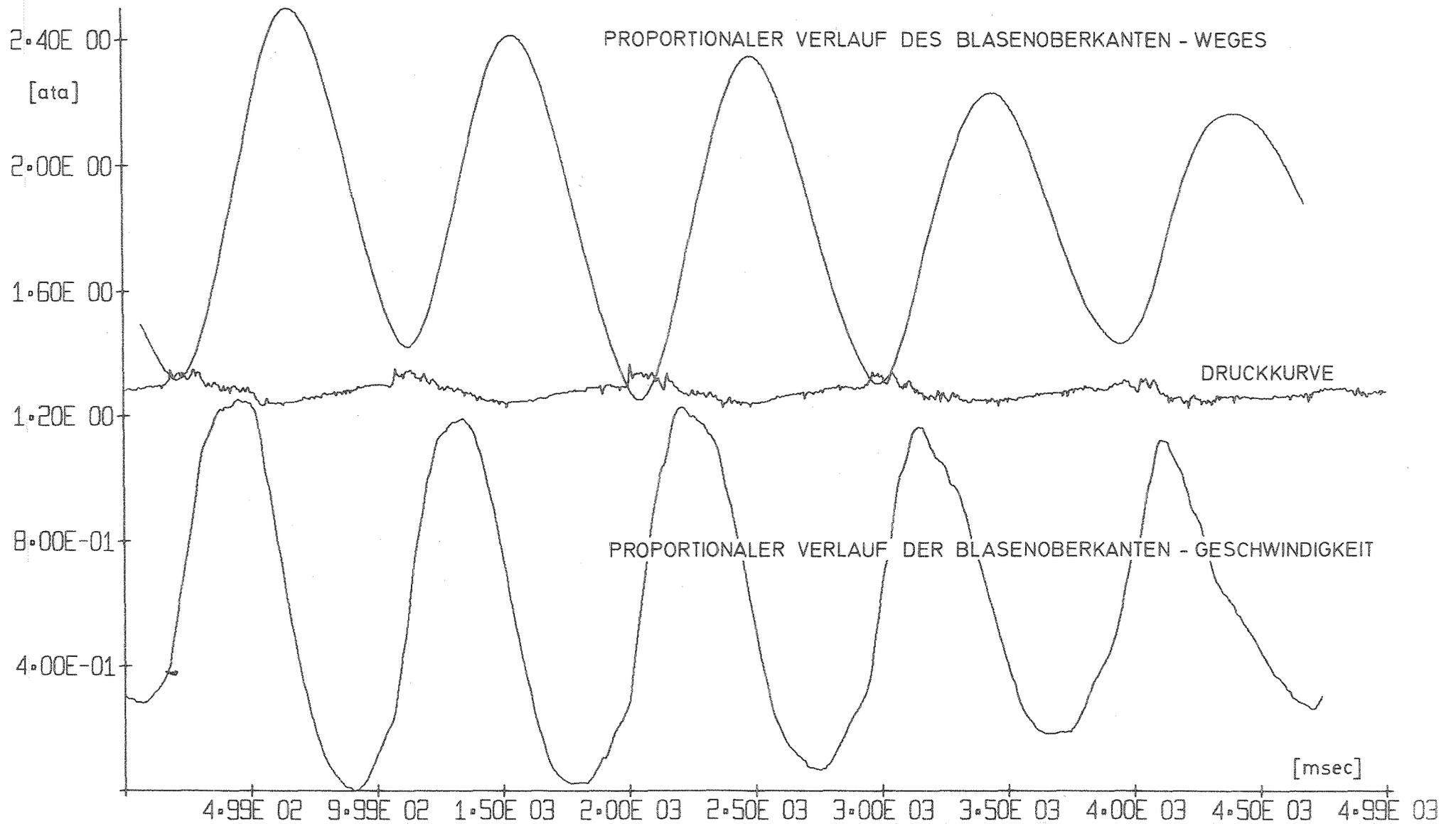


ABB.00005 BEVUS 10 BESCHLEUNIG. GESCHWINDIGK. UND WEG DER NA-SAEULE

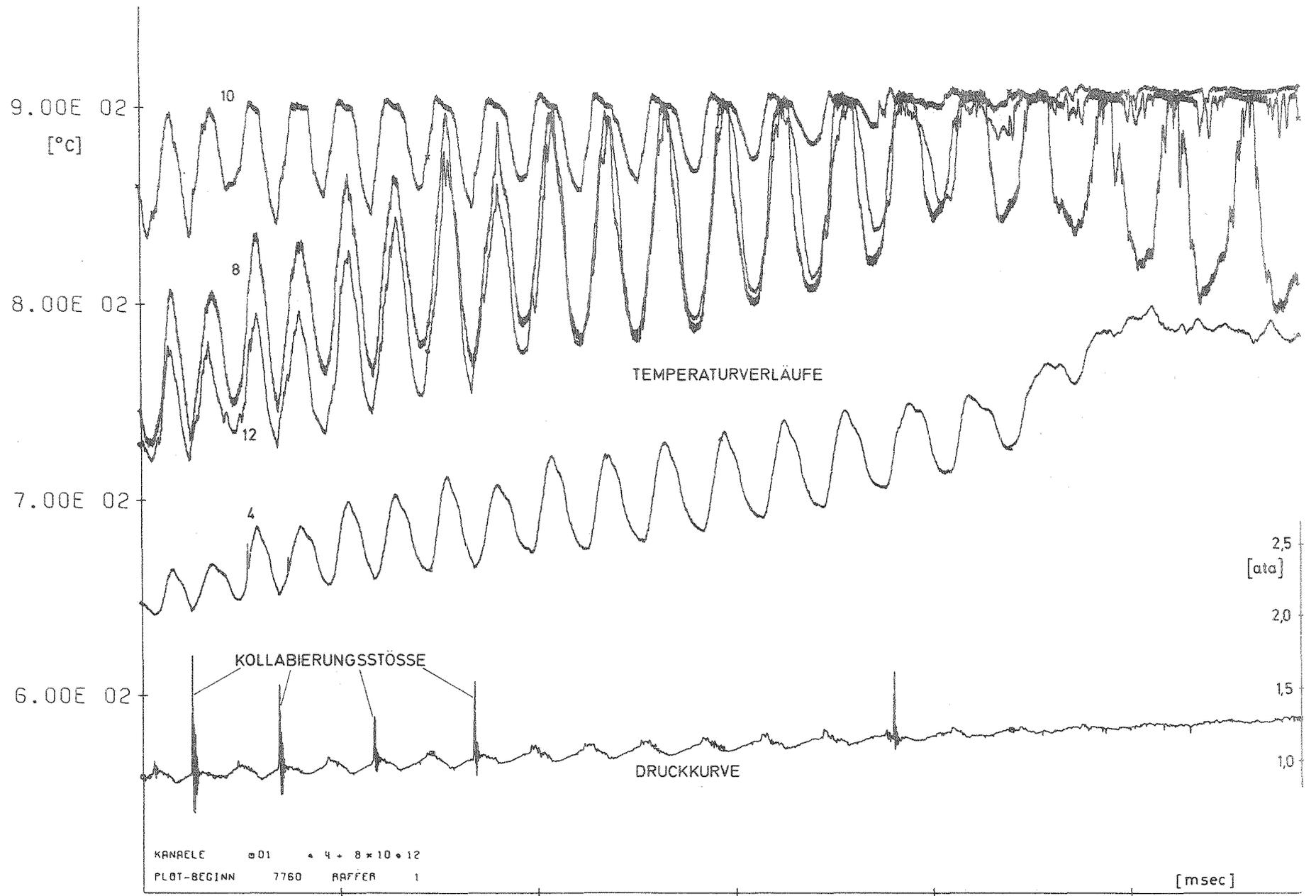
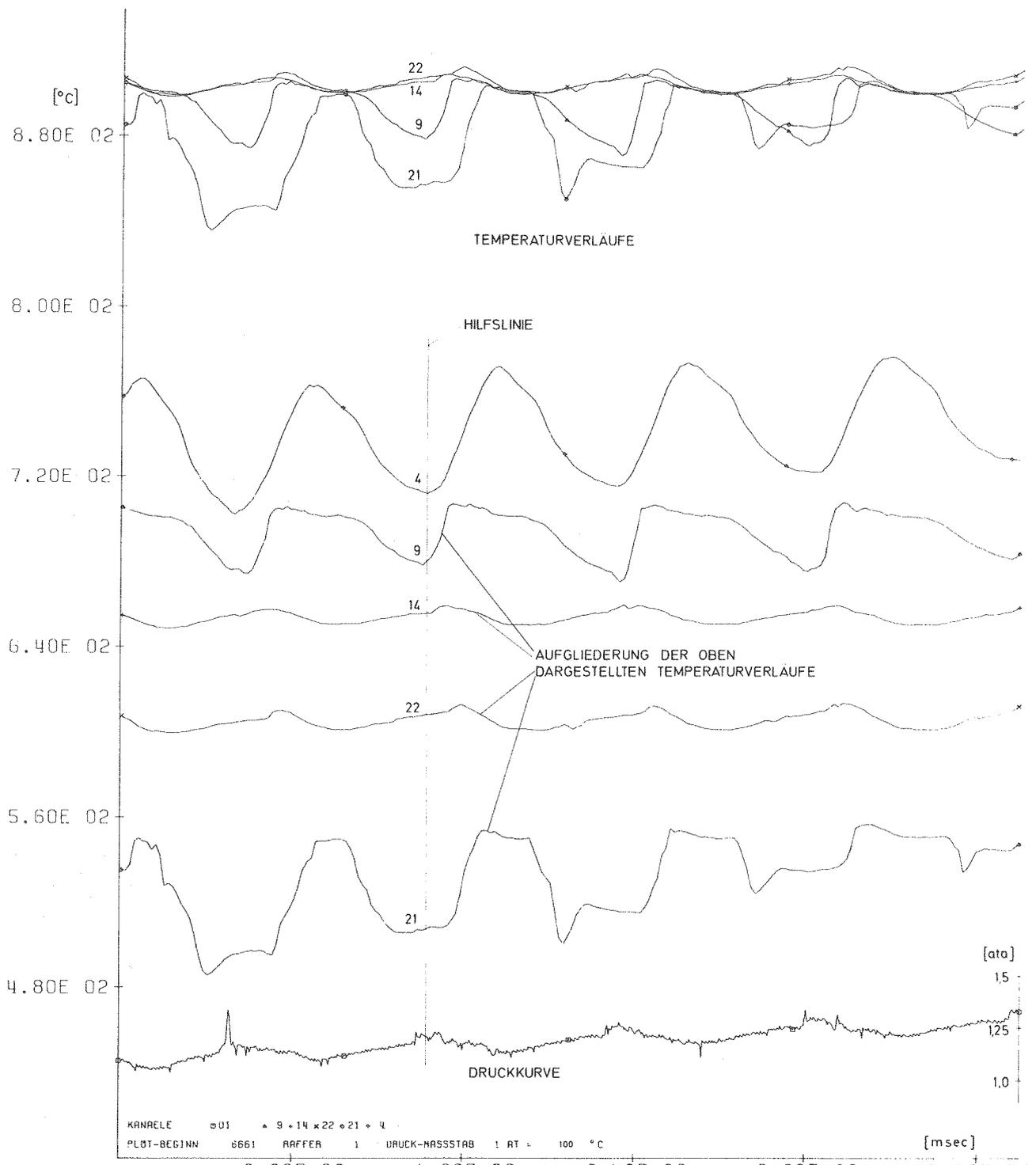


ABB.00006

BEVUS 5

DRUCK- UND TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT



KANAELE 01 9-14-22-21-4
 PLOT-BEGINN 8661 RAFFER 1 DRUCK-MASSSTAB 1 AT - 100 °C [msec]
 ABB.00007 BEVUS 10 DRUCK- UND TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT

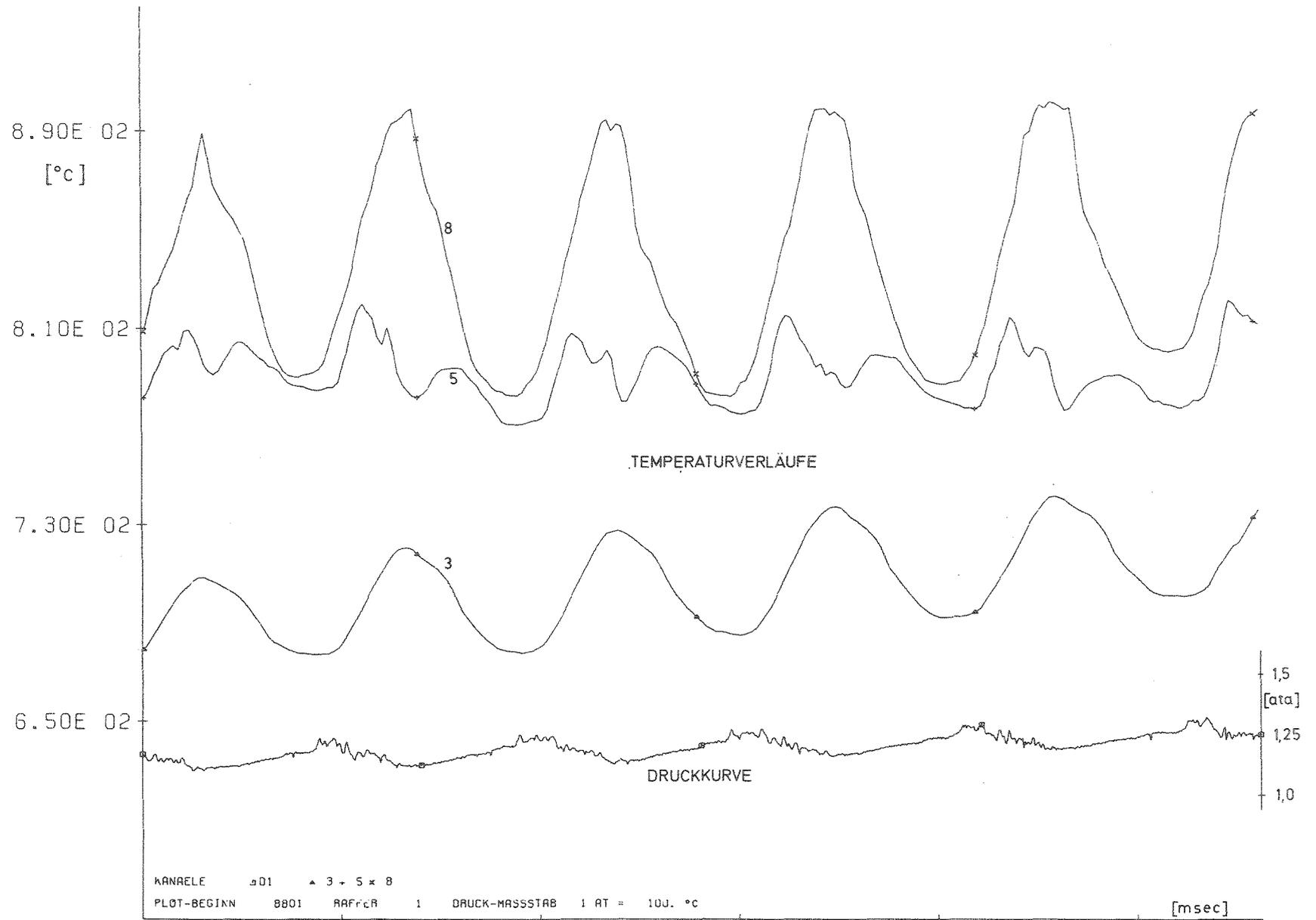
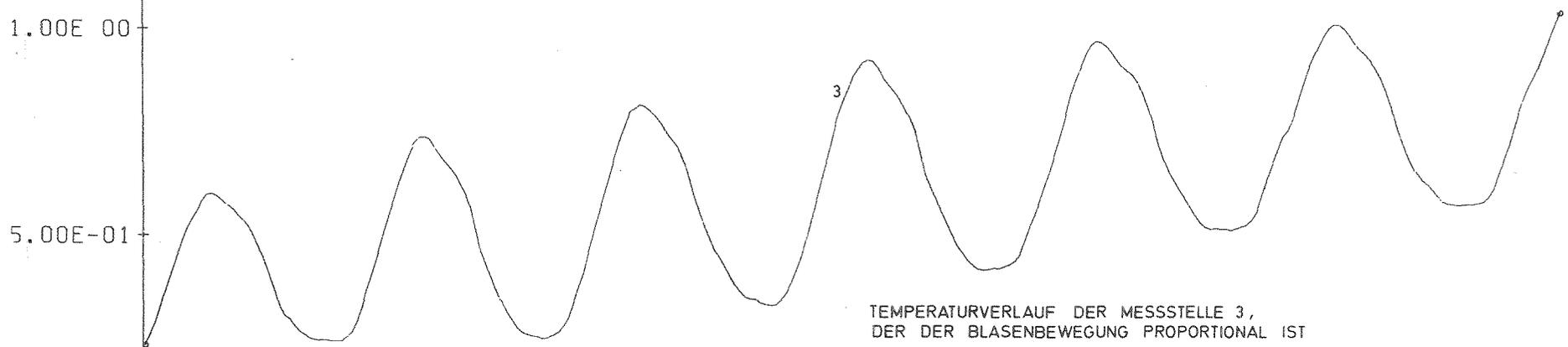
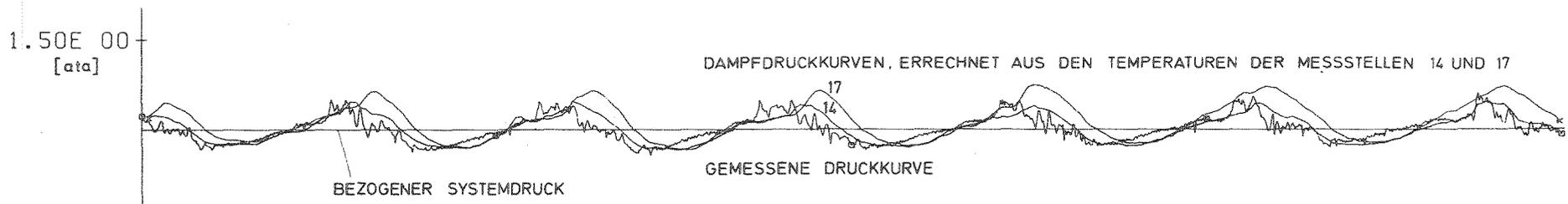
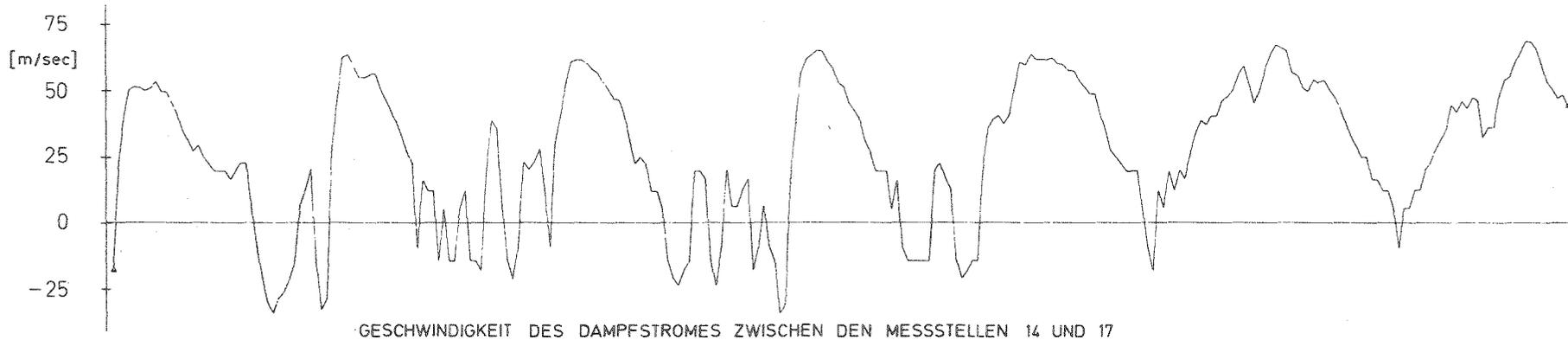
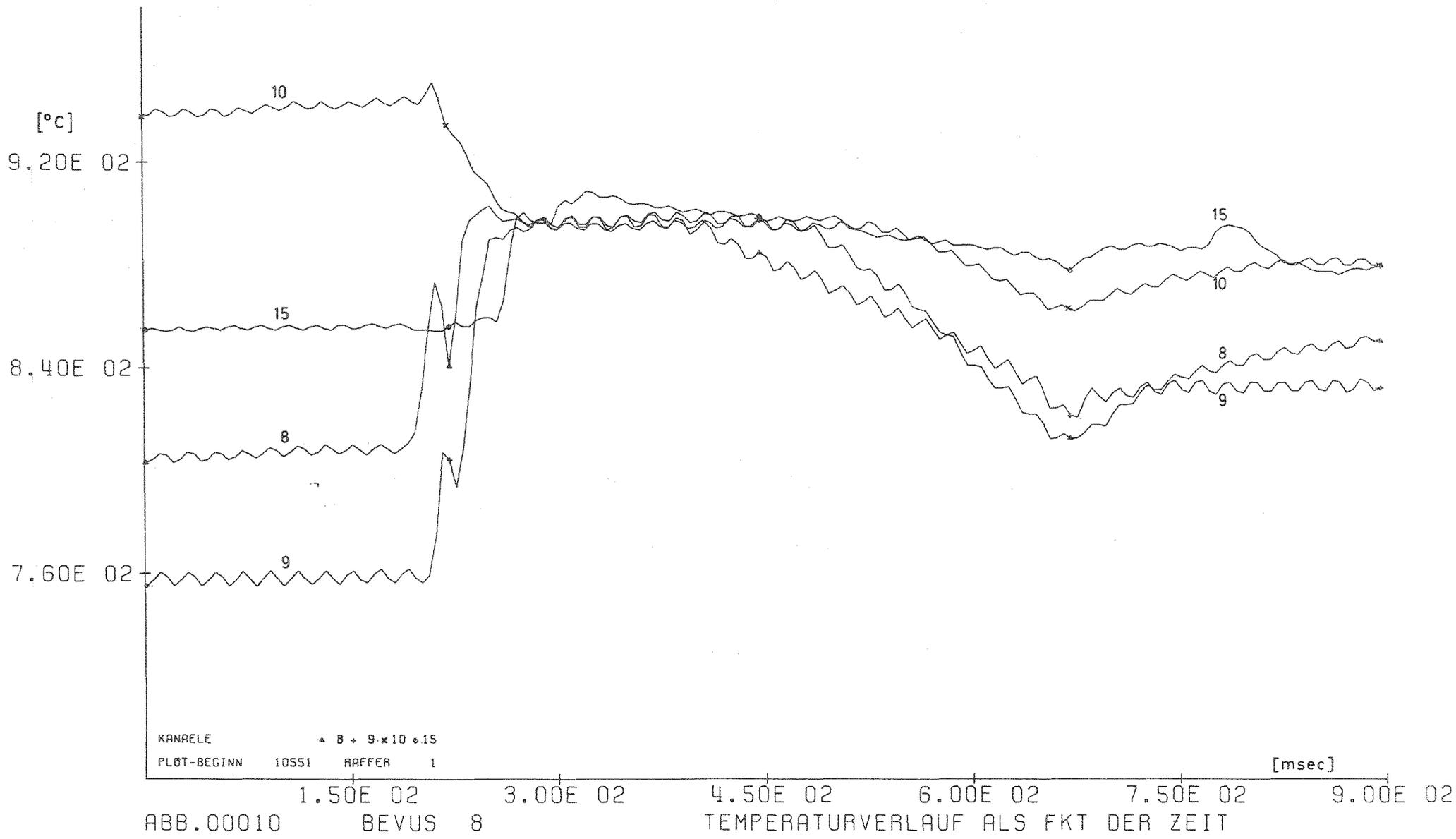


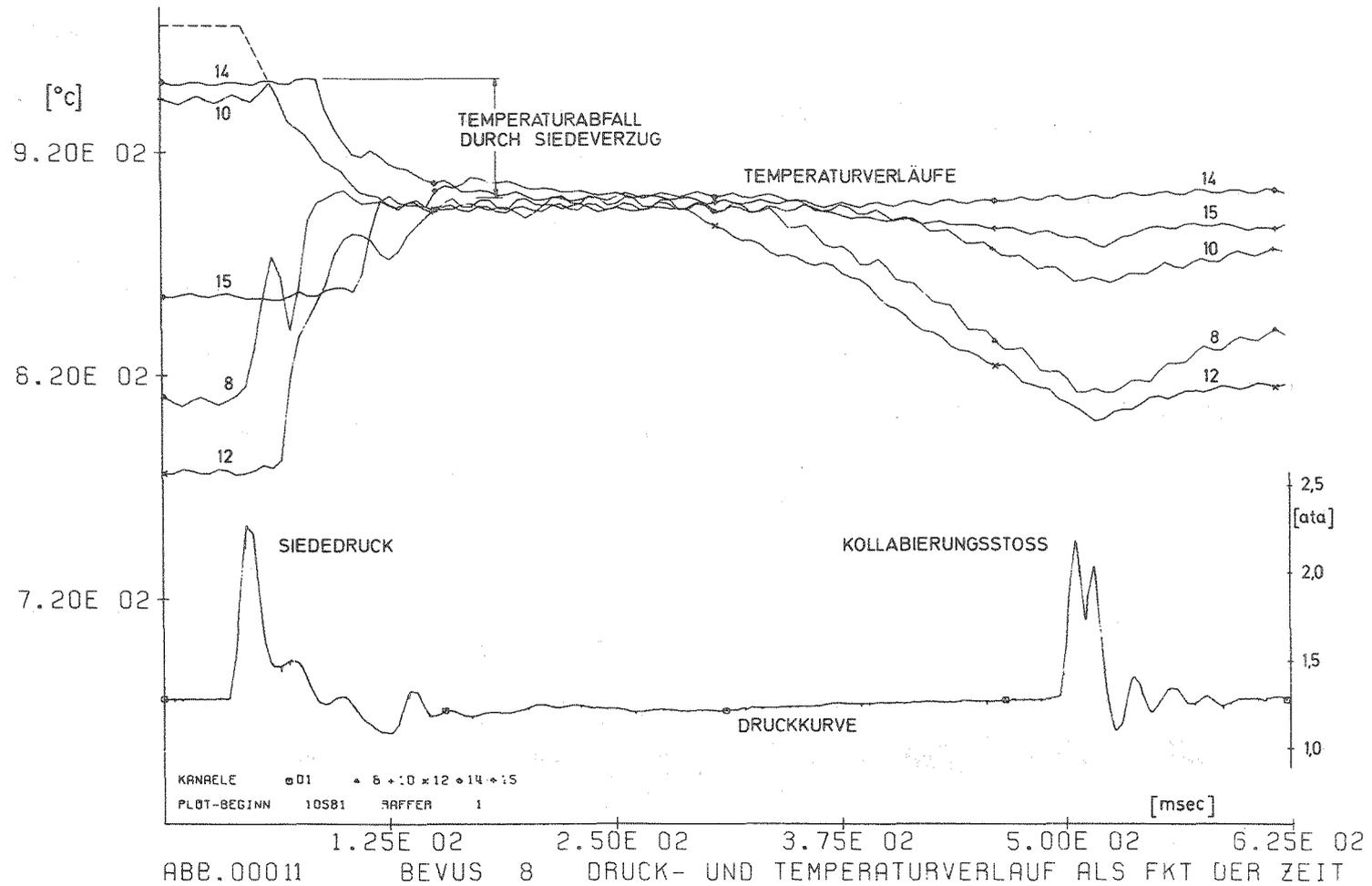
ABB.00008 BEVUS 5 DRUCK- UND TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT



KANALE 001 3-14-17 14 17
 PLOT-BEGINN 0796 RAFFER 1 GESCHWINDIGKEIT 100M/S = 0.625 ATA [msec]

ABB.00009 7.99E 02 1.60E 03 2.40E 03 3.20E 03 4.00E 03 4.80E 03
 BEVUS 5 DAMPFDRUCK UND -GESCHWINDIGKEIT ALS FKT DER ZEIT





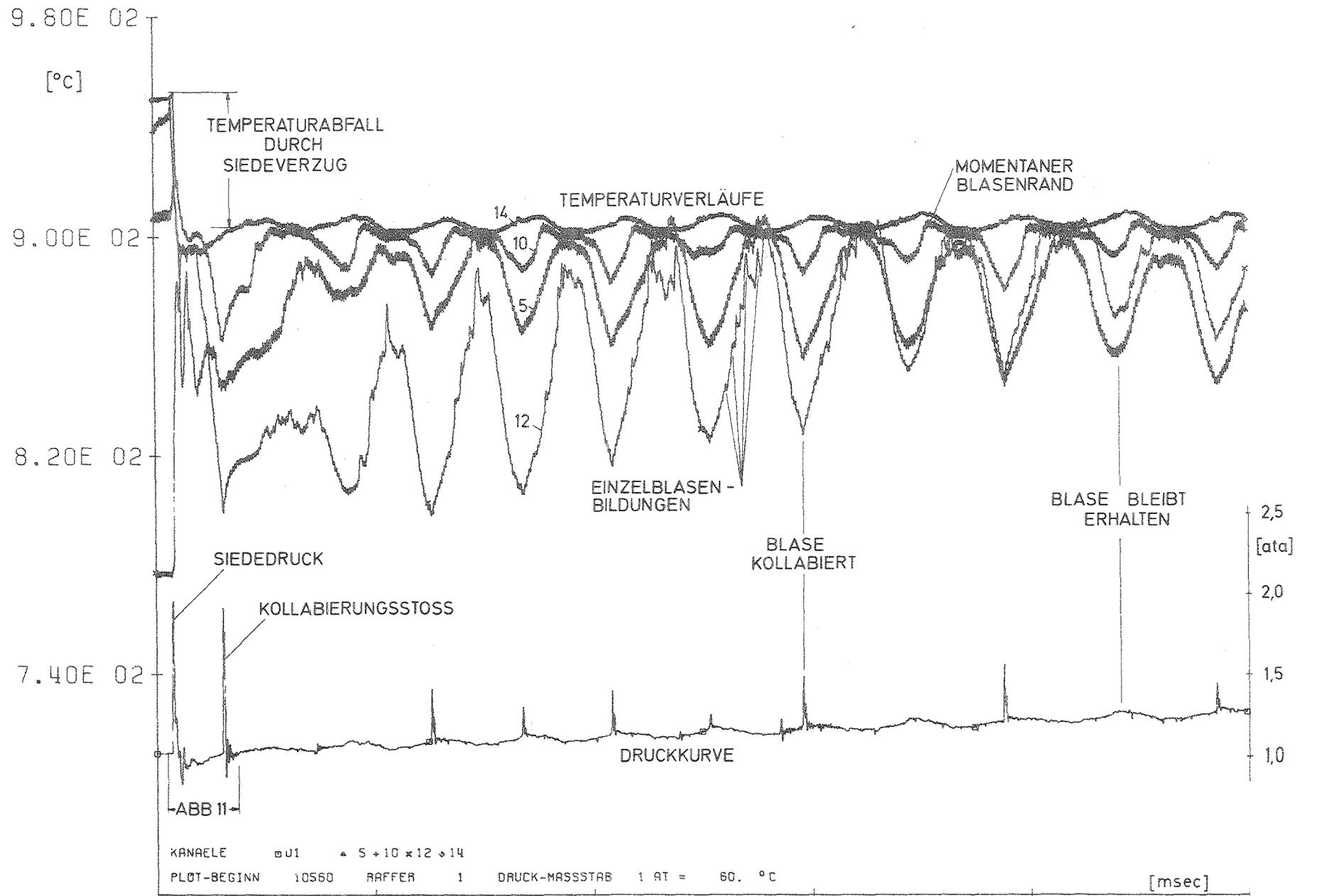


ABB.00012 BEVUS 8 DRUCK- UND TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT

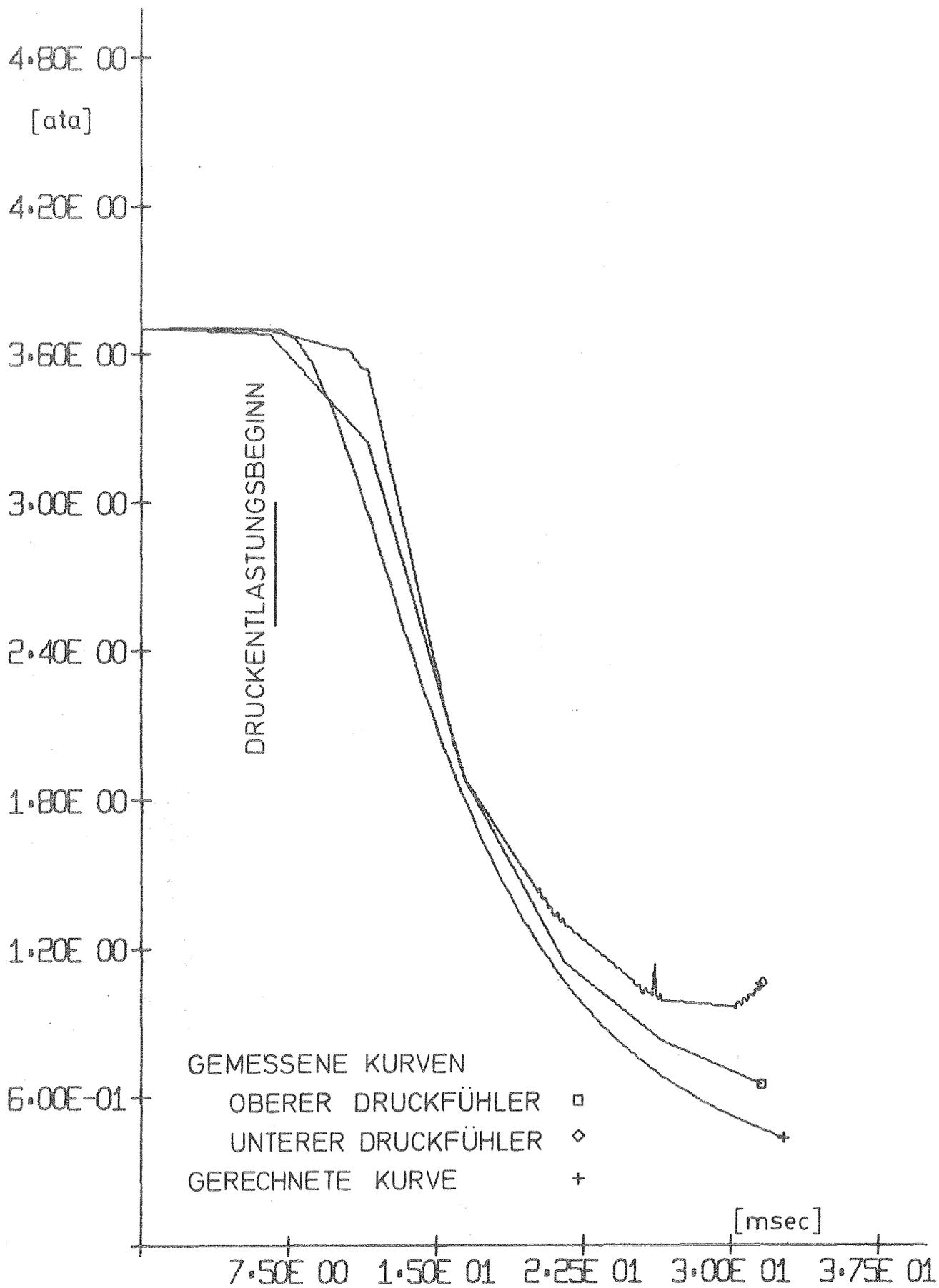
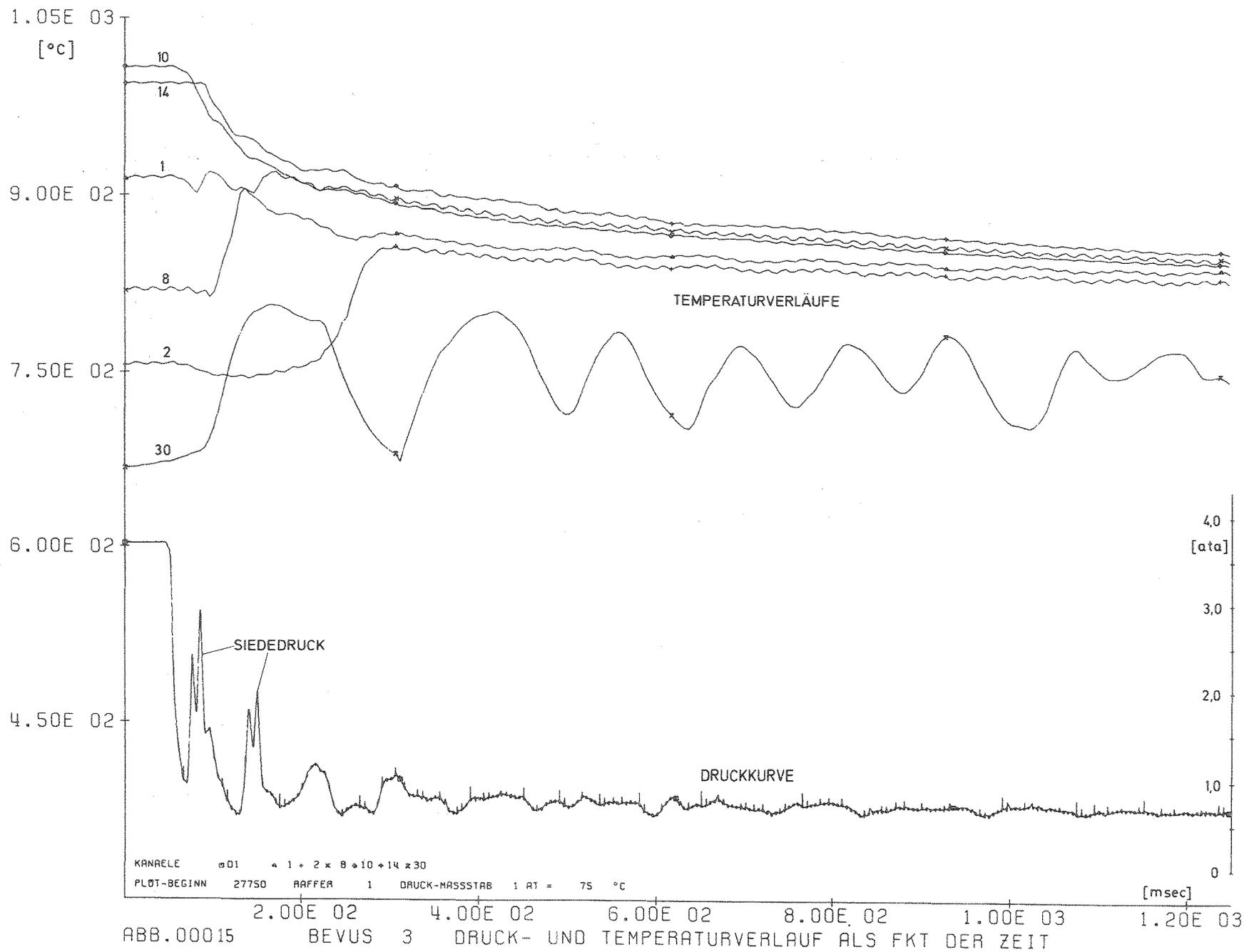
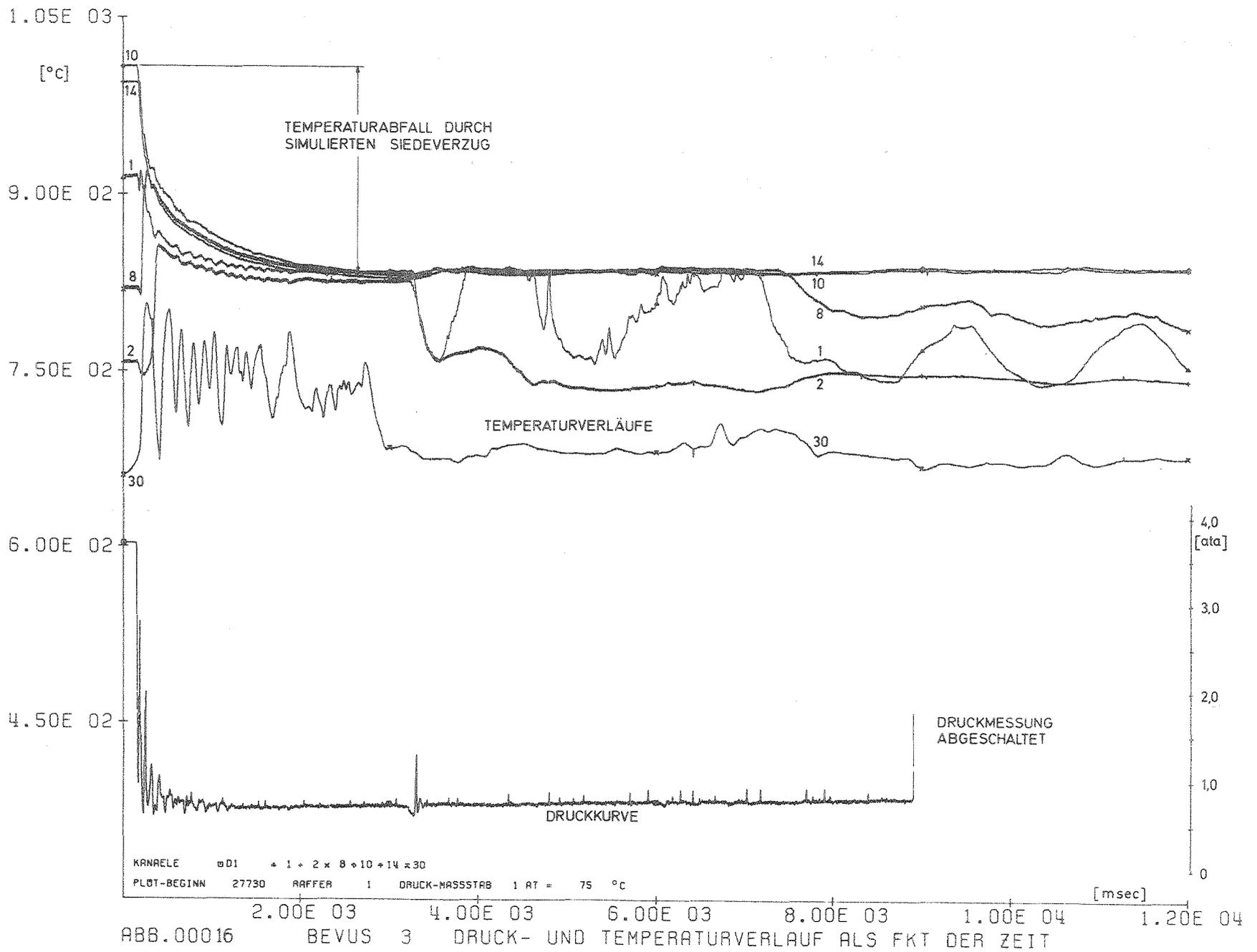
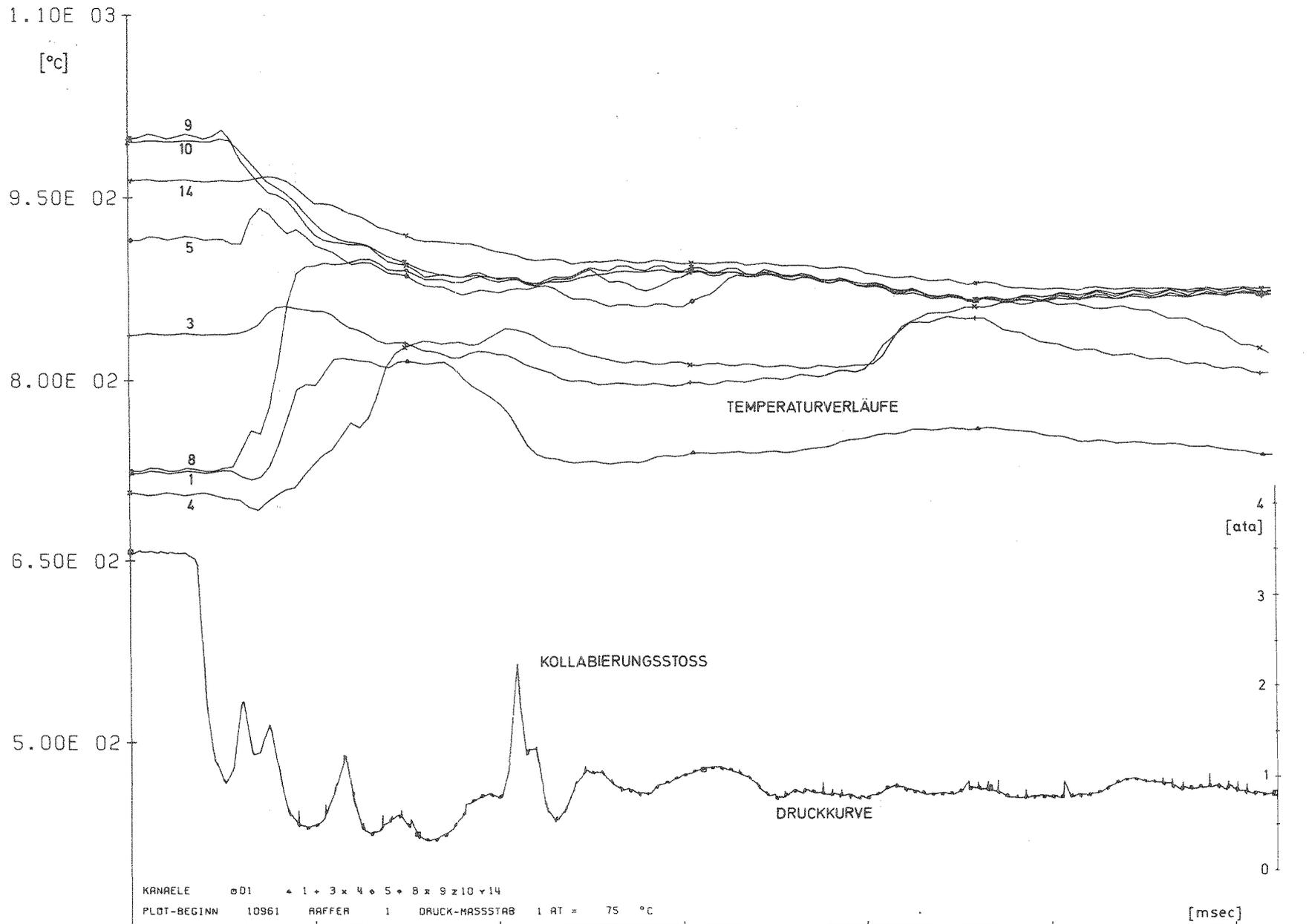


ABB.00014

BEVUS 3 DRUCKVERLAUF ALS FKT DER ZEIT







KANALE 001 1 + 3 x 4 + 5 + 8 x 9 z 10 v 14
 PLOT-BEGINN 10961 RAFFER 1 DRUCK-MASSSTAB 1 AT = 75 °C

ABB.00017 BEVUS 4 DRUCK- UND TEMPERATURVERLAUF ALS FKT DER ZEIT

VERFORMUNG [mm]

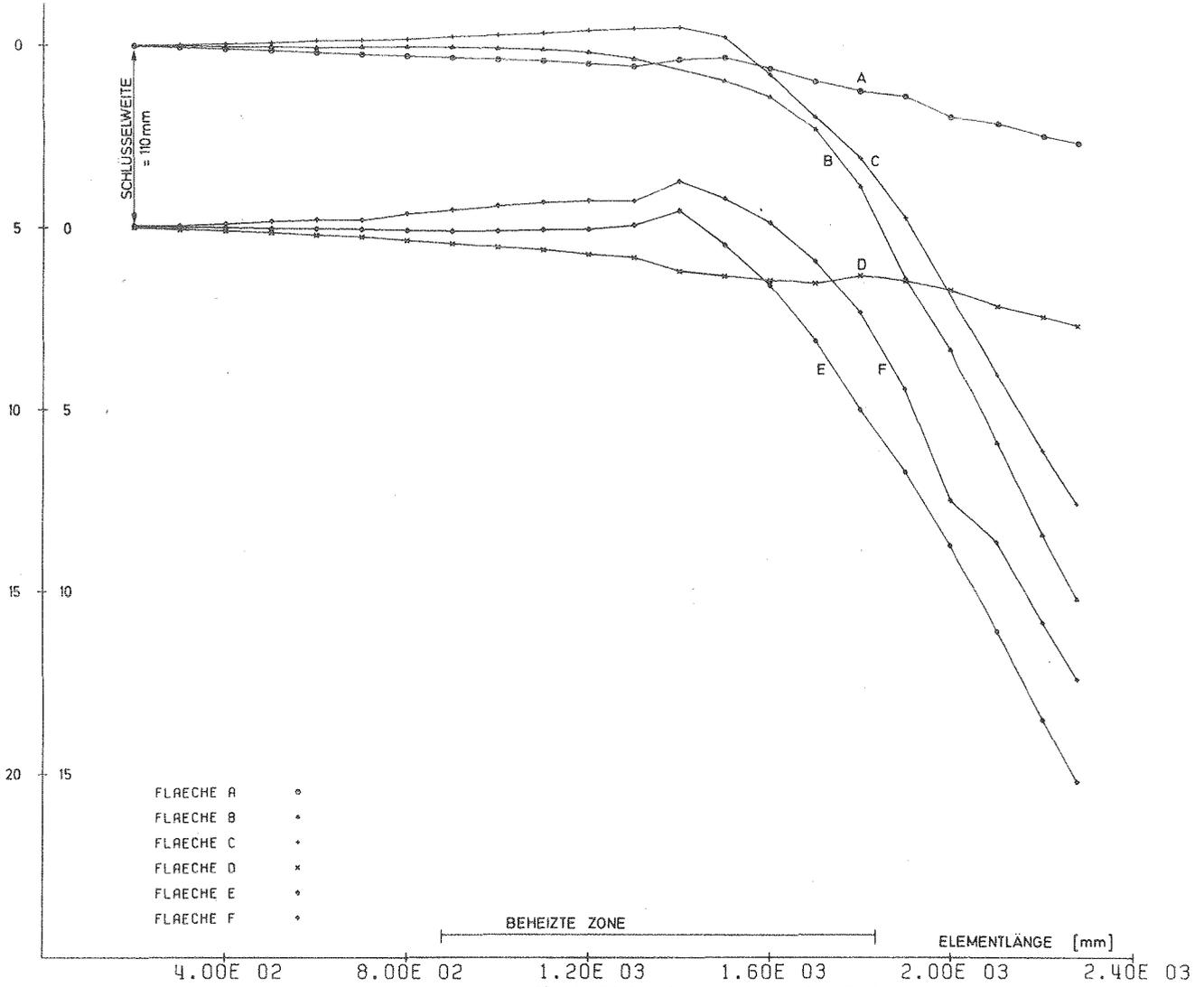


ABB.00018 VERFORMUNG DES ELEMENTKASTENS BEI DER 1. BEVUS VERSUCHSSERIE

