

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

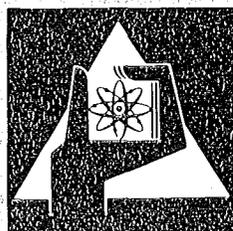
Oktober 1975

KFK 2196

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Natrium-Loopanlage zur Untersuchung der Brennstoff-Natrium-
Wechselwirkung mit elektrisch beheizten UO_2 -Stäben**

H. Deckers, H. Drexler, H. Lehning, D. Piel, H. Reiser



**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

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KFK 2196

Natrium-Loopanlage zur Untersuchung der Brennstoff-Natrium-
Wechselwirkung mit elektrisch beheizten UO_2 - Stäben

von

H. Deckers

H. Drexler

H. Lehning

D. Piel

H. Reiser

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung nach einer Leistungsexkursion wurde eine out of pile-Versuchsanlage erstellt. Diese ermöglicht es, bis zu 7 Brennstäbe in Bündelgeometrie durch direkte elektrische Beheizung unter strömendem Natrium abzuschmelzen. Die aktive UO_2 -Länge im Brennstab beträgt maximal 160 mm. Die Kühlbedingungen und die hydraulischen Verhältnisse in der Teststrecke sind denen im SNR-Brennelement angenähert, sie sind jedoch variabel. Während der Tests werden maximal 27 Meßwerte auf Magnetband analog aufgezeichnet. Diese werden digitalisiert und mit Hilfe des Programmsystems SEDAP ausgewertet.

Die Loopanlage wurde im Frühjahr 1975 in Betrieb genommen. Eine erste Versuchsserie mit Einzelstäben und 7-Stabbündeln ist derzeit im Gange.

Sodium Loop Facility for Investigation of Fuel Sodium Interaction by Means of Electrically Heated UO_2 Rods

Summary

An out of-pile test facility has been erected for investigation of the fuel-sodium interaction taking place after power excursion. This facility allows melting down of up to 7 fuel pins arranged in bundles through direct electric heating in flowing sodium. The maximum active UO_2 length in the fuel pin is 160 mm. The cooling and hydraulic conditions in the test section have been chosen similar to that in the SNR fuel element, although they are variable. In the course of testing 27 measuring values at the maximum are recorded in an analog mode on magnetic tape. They are digitized and evaluated using the SEDAP program system.

The loop facility started operation in April 1975. A first test series relating to single pins and 7-pin bundles is presently being conducted.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung
2. Anforderungen an die Versuchseinrichtung
3. Beschreibung der Versuchseinrichtung
 - 3.1 Brennstab
 - 3.2 Teststrecke
 - 3.3 Natriumanlage
 - 3.4 Stromversorgung
 - 3.5 Versuchsinstrumentierung und Meßwarterfassung
4. Ablauf der Experimente
5. Erste Versuchsergebnisse
6. Schlußbemerkungen

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Schematische Darstellung des Brennstabes
- Abb. 2 Schematische Darstellung der Teststrecke
- Abb. 3 Querschnitt durch das Stabbündel
- Abb. 4 Fließschema
- Abb. 5 Spezifischer elektrischer Widerstand von UO_2
- Abb. 6 Meßstellenliste
- Abb. 7 Druckaufnehmer
- Abb. 8 Meßwerterfassung
- Abb. 9 Temperaturprofil im Brennstab
- Abb. 10 Zeitlicher Verlauf der elektrischen Werte
- Abb. 11 Schematische Darstellung der Natriumkapsel
- Abb. 12 Zeitlicher Verlauf der Meßwerte beim Kapselversuch
- Abb. 13 Ersatzschaltbild des Brennstabes
- Abb. 14 Druckmeßwerte beim Kapselversuch
- Abb. 15 Versagensstelle des Brennstabes
- Abb. 16 Querschnitt des Brennstabes
- Abb. 17 Zeitlicher Verlauf der Meßwerte beim Loopversuch

1. Einführung

Im Institut für Material- und Festkörperforschung wurde im Frühjahr 1975 eine Anlage für die Durchführung von out pile-Experimenten zur Untersuchung der Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung mit elektrisch beheizten UO_2 - Brennstäben in Betrieb genommen. Der Hintergrund für dieses Vorhaben sind theoretische Reaktivitätsstörfälle in Natrium gekühlten Schnellen Brüttern, bei denen etwa folgender Störungsablauf auftreten würde:

Durch Leistungserhöhung steigt die Temperatur im Brennstoff und in den Brennstäben an. Es kommt zu einem örtlichen Versagen der Stabhüllen und damit zu einem Ausspritzen von geschmolzenem Brennstoff in das noch unterkühlte strömende Natrium. Bei der nun einsetzenden Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung entstehen beträchtliche Druckspitzen. Das Natrium wird ganz oder teilweise aus dem Brennelement ausgetrieben. Dies führt zu zusätzlicher positiver Reaktivitätszufuhr.

Wegen der großen Bedeutung werden diese Vorgänge in einer Vielzahl von Experimenten sowohl in pile, als auch out pile untersucht. Ziel dieser Versuche ist es, möglichst sichere Grundlagen für die theoretische Beschreibung der Störfallverläufe zu schaffen.

Unser Vorhaben hat den speziellen Zweck in einer Vielzahl von relativ wenig aufwendigen Experimenten durch elektrische Beheizung einzelne Stäbe und kleine Stabbündel in einem Loop zum Versagen zu bringen und dabei die Auswirkung der Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung messtechnisch zu erfassen. In den Kühlkanälen sollen Bedingungen vorliegen, die möglichst repräsentativ für die im SNR-Brennelement sind. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Kühlkanalgeometrie und der Kühlverhältnisse. Jedoch sollen die Betriebsparameter in einem weiten Bereich

Zum Druck eingereicht am 19.9.1975

verändert werden, um ihren Einfluß auf die Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung zu ermitteln.

Nicht voll repräsentativ sind dagegen die Stabkonstruktion und damit die Vorgänge während der Transiente im Stab selbst, die bei diesem Versuchsprogramm nicht im Vordergrund stehen sollen.

2. Anforderungen an die Versuchseinrichtung

Die Anlage wurde so konzipiert, daß folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Ein UO_2 - Brennstab bzw. 7 Stäbe in Bündelanordnung können unter strömendem Natrium abgeschmolzen werden.
- Die Kühlkanalgeometrie ist im Hinblick auf eine Simulation der hydraulischen Verhältnisse im SNR-Brennelement ausgeführt. Der Brennstabdurchmesser beträgt daher 7 mm. Bei Einstabversuchen kann ein ringförmiger Kühlkanal von 1 bis etwa 3,5 mm radialer Breite vorgesehen werden. Beim 7-Stabbündel ist der Stababstand mit 8,75 mm so klein wie möglich ausgeführt, um das P/D-Verhältnis dem im SNR-Brennelement weitgehend anzupassen.
- Die Kühlbedingungen bzw. die hydraulischen Verhältnisse im Kühlkanal sind variabel.

Natriumgeschwindigkeit: von Null bis etwa 5 m/s
(bei Einzelstabversuchen bis 10 m/sec)

Natriumtemperatur: bis 650°C
(eventuell bei reduzierter Geschwindigkeit auch höher)

Kühlmitteldruck: einstellbar zwischen 1 und 16 bar

- Der Brennstabinnendruck, der die Austrittsgeschwindigkeit des flüssigen UO_2 in den Kühlkanal bestimmt, kann zwischen 0,5 bar und 40 bar gewählt werden.

3. Beschreibung der Versuchseinrichtung

3.1 Brennstab

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau des elektrisch beheizten Brennstabes. Dieser unterscheidet sich grundsätzlich dadurch vom Brüterbrennstab, daß der Brennstoff gegen das Hüllrohr elektrisch isoliert sein muß. Die Länge der beheizten Brennstoffzone ist durch die beim Anfahren des Brennstoffes zulässige elektrische Spannung vorgegeben (Abschnitt 4). Sie besteht aus 1 oder 2 UO_2 - Zylindern von 5 mm Durchmesser und je maximal 80 mm Länge. Zur elektrischen Isolierung werden Al_2O_3 - Hülsen mit den Maßen 6,4 / 5,8 mm Durchmesser verwendet, die mit geringem Spiel in das Hüllrohr von 7 mm Außendurchmesser eingepaßt sind. Zwischen Brennstoff und Isolierschicht bleibt ein Gasspalt von 0,4 mm radialer Breite. Dadurch wird erreicht, daß die Temperatur der Isolierung auch bei sehr hohen Brennstoffoberflächentemperaturen niedrig bleibt. Das heißt, daß in jedem Betriebszustand eine gute Isolierwirkung der Al_2O_3 - Schicht gewährleistet ist. Die Zentrierung der UO_2 - Säule erfolgt durch spezielle Zentrierhülsen mit angeschliffenen, 1 mm breiten Ringen.

Der Gasspalt ist nach unten durch einen Wolframzylinder verschlossen. Dieser verhindert, daß flüssiger Brennstoff innerhalb des Brennstabes nach unten fließt, anstatt den Brennstab durch die Hülle zu verlassen.

Der Strom wird über Wolframelektroden zur Brennstoffzone geführt. Zum Ausgleich von temperaturbedingten Längenänderungen der Brennstabeinbauten, insbesondere des Brennstoffes, ist die untere Stromzuführung

in der Brennstabhülle axial verschiebbar. Sie wird während des Betriebes pneumatisch auf den Brennstoff aufgepreßt. Dadurch wird ein sicherer elektrischer Kontakt bis in die Abschmelzphase hinein aufrecht erhalten. Die axiale Beweglichkeit der IsolierhülSENSäule ist durch ein spezielles Federelement gewährleistet.

Die obere Elektrode ist mit einer zentralen Bohrung versehen, durch die der Brennstab evakuiert und mit Gas von variablem Druck geflutet werden kann. Als Füllgas wird Argon verwendet.

Die Abdichtung der Elektroden gegenüber dem Brennstab-Hüllrohr erfolgt durch Viton-O-Ringe in speziellen Teflonlagerungen an den kalten Brennstabenden.

Bei der Festlegung der Länge der Brennstabenden wurde berücksichtigt, daß über die Brennstoffzone hinaus eine gewisse ungestörte Bündellänge erforderlich ist. Die Verhältnisse eines SNR-Brennelementes lassen sich jedoch nicht erreichen. Aus Gründen der Betriebssicherheit wurde die Brennstablänge auf 1.200 mm begrenzt, was einer Kühlkanalhöhe von 500 mm entspricht.

3.2 Teststrecke

Die Teststrecke ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Sie ist für den Einsatz von maximal 7 Testbrennstäben ausgelegt. Da sich während der Vorversuche schon bald zeigte, daß die Stromführung zum Brennstoff gegenüber dem Hüllrohr potentialfrei erfolgen muß, kam nur ein Brennstabeinsatz in Frage, der die Teststrecke nach oben und unten durchdringt.

Dementsprechend hat der fest eingebaute Teststreckenteil eine durchgehende Bohrung von 50 mm lichtem Durchmesser. Der auswechselbare Test-

einsatz besteht aus dem Brennstab bzw. dem Stabbündel und dem Natriumführungsrohr, die fest mit 2 Endverschlüssen verbunden sind. Diese Einheit wird von oben her in die Teststrecke eingebaut. Die Endverschlüsse werden von innen und die Druckrohrenden von außen intensiv durch Gas gekühlt, so daß in diesem Bereich zur Abdichtung Viton-O-Ringe verwendet werden können.

Das Kühlmittel Natrium tritt unten in die Teststrecke ein und wird über ein Sieb aus Drahtgewebe in das Natriumführungsrohr und entlang den Stäben nach oben geleitet. Es tritt - wiederum durch ein Drahtsieb - aus der Teststrecke aus.

Der elektrische Strom wird über Kupferstäbe zu den Wolfram-Elektroden geführt. Die stromführenden Brennstabeinbauten sind nach oben durch elektrisch isolierende Gegenlager fixiert. Die untere Elektrode wird durch pneumatisch betätigte Kolben nachgeführt.

Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch das 7-Stabbündel. Der Stabmittenabstand wurde mit 8,75 mm so klein wie möglich gehalten. Die Innenschlüsselweite des sechskantförmigen Natriumführungsrohres beträgt 24 mm.

Die Wandstärke der Teststrecke wurde so ausgelegt, daß bei den zu erwartenden Druckspitzen bis ca. 100 bar mit Sicherheit keine plastische Verformung stattfindet. Damit wird sichergestellt, daß die gesamte, bei der Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung frei werdende mechanische Energie der Natrium-Säule mitgeteilt wird.

3.3 Natriumanlage

Abbildung 4 zeigt ein vereinfachtes Fließschema der Natriumanlage. Die Anlage ist so kompakt wie möglich aufgebaut.

Der den Druckstößen ausgesetzte Teil besteht aus einer Rohrschleife mit Nennweite 25. Sie enthält die Teststrecke, einen Natrium-Stickstoff-Wärmeaustauscher, zwei parallel geschaltete elektromagnetische Pumpen und eine elektrische Heizstrecke. Der Abzweig zum Expansionsgefäß liegt hinter dem Teststreckenaustritt. Im Eintritt des Expansionsgefäßes wurde eine Blende von 15 mm Durchmesser eingebaut. Diese Blende wirkt durch ihre Drosselwirkung der Beschleunigung der Natriumsäule bei der Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung entgegen. Sie kompensiert also zum Teil den gegenüber dem SNR-Brennelement geringeren Druckverlust des Teststabbündels.

Die gesamte Natriumanlage ist von einem Sicherheitsbehälter mit den Abmessungen 3 m x 4 m x 5 m umschlossen.

Durch Spülen mit Stickstoff wird jeweils vor Inbetriebnahme der Anlage der Sauerstoffgehalt im Sicherheitsbehälter auf maximal 5 % reduziert. Damit kann bei einer Natriumleckage kein Brand entstehen.

Die Wärmeabfuhr aus dem Natriumkreislauf erfolgt aus Sicherheitsgründen durch Stickstoff. Hierzu wird eine von früheren Versuchen her vorhandene Kreislaufanlage eingesetzt.

Das Natrium kann aus dem Kreislaufsystem über ein Feinfilter zur Abscheidung fester Partikel in einen Abfalltank abgelassen werden. Der Inhalt dieses Behälters beträgt ein Vielfaches des Kreislaufinhaltes. Da keine Natrium-Reinigungsanlage vorhanden ist, hat er gleichzeitig die Aufgabe über lange Zeit hinweg die Sauerstoffmengen abzuscheiden, die zum Beispiel beim Ein- und Ausbau der Testeinsätze in das Natriumsystem eindringen.

Auslegung:

Die Fördermenge der Pumpen beträgt je $2 \text{ m}^3/\text{h}$ Natrium bei einer Förderhöhe von 1,5 bar und einer maximal zulässigen Natriumtemperatur von 600°C .

Der elektrische Vorheizer kann das Natrium weiter bis auf maximal ca. 650°C aufheizen. Seine Heizleistung beträgt 22 kW. Der Gaskühlschleife hat eine Wärmeleistung von etwa 40 kW. Diese reicht also aus, zusätzlich die in der Teststrecke erzeugte Wärme abzuführen.

Der Teil des Natriumsystems, der während der Experimente Druckstößen ausgesetzt sein kann, wurde für eine kurzzeitige Druckbelastung von 150 bar ausgelegt. Das ist insbesondere der Hauptkreislauf einschließlich des Pumpenkanals. Die maximal zulässige Natriumtemperatur zwischen Teststrecke und Wärmetauscher beträgt 700°C .

3.4 Stromversorgung

Die Stromversorgung und Regelung eines jeden Brennstabes im Stabstrahl muß unabhängig erfolgen, und zwar sowohl während des stationären Betriebes, als auch während der Leistungsstöße.

Die Stromversorgungsanlage für die 7-Stabversuche besteht daher aus 7 Leistungsteilen einschließlich Regelung mit einem gemeinsamen Steuerblock. Es handelt sich dabei um halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltungen mit Phasenanschnittsteuerung. Durch Ändern der Sekundärspannung des Transformators können 2 Maximalspannungen, nämlich 270 Volt und 440 Volt erreicht werden. Die maximale Stromstärke pro Einheit beträgt 300 A, und dementsprechend die maximale Leistung 135 kW. Die Dauerbetriebsleistung pro Anlage beträgt 13 kW. Die Stromversorgungsanlage verfügt über die Möglichkeit, die Exkursion von mehreren Stäben in gesteuerter Folge auszulösen.

Zur Strombegrenzung wurde ein Widerstand mit dem Brennstab in Reihe geschaltet. Er beträgt - einschließlich der inneren Widerstände der Anlage - $0,5 \Omega$. Außerdem wurde eine Gleichstromdrossel vorgesehen. Damit

sollen Spannungsspitzen abgebaut und so die Meßwerterfassung erleichtert werden.

Regelung:

In Abbildung 5 ist der spezifische elektrische Widerstand von UO_2 als Funktion der Temperatur dargestellt / 1 /. Er sinkt von Raumtemperatur bis Schmelztemperatur um ca. 4 Zehnerpotenzen.

Bei unseren Experimenten ist es erforderlich, daß die Brennstäbe längere Zeit (maximal etwa 30 Minuten) bei konstanter Last betrieben werden, bevor die Exkursion ausgelöst wird. Diese Zeit ist notwendig, um Kühlparameter einzustellen, oder - z. B. beim 7-Stabbündel - weitere Stäbe in Betrieb zu nehmen. Es mußte daher eine automatische Regelung vorgesehen werden.

Als die beste Lösung erschien zunächst eine Regelung auf konstante Brennstabtemperatur. Da ein Temperatugeber innerhalb des Brennstabes nicht zur Verfügung steht, mußte der Umweg über eine Regelung auf konstanten Brennstabwiderstand gewählt werden, der eindeutig der mittleren Brennstofftemperatur zugeordnet ist. Hierbei wird als Eingangssignal für den Regler der Quotient aus Spannung und Strom gebildet. Diese Art der Regelung ist insbesondere für stark schwankende Kühlbedingungen vorteilhaft, wie sie bei unseren ersten Vorversuchen unter Gas vorlagen.

Für die Versuche im Natriumloop wurde später eine zusätzliche Regelmöglichkeit auf konstante Brennstableistung geschaffen. Das Reglersignal ist hier das Produkt aus Strom und Spannung.

3.5 Versuchsinstrumentierung und Meßwerterfassung

Die für die Ermittlung der Vorgänge bei der Brennstoff-Natrium-Wechsel-

wirkung wichtigsten Meßwerte sind einmal Natriumdurchfluß, -druck und -temperatur, und zum anderen Strom und Spannung zur Errechnung der von den Brennstäben aufgenommenen Energie.

Die Tabelle in Abbildung 6 gibt einen Überblick über die vorgesehenen Meßstellen.

Je 2 Durchflußmesser mit verschiedenen Meßbereichen sind vor und hinter der Teststrecke angebracht. Die Geräte arbeiten nach dem permanentmagnetischen Prinzip.

Druckmeßeinrichtungen zur Erfassung der sehr hohen und steilen Druckspitzen sind insbesondere an der Teststrecke selbst (3 Stück) und am Ein- und Austritt der Teststrecke vorgesehen. Zusätzlich wird der Druck im Natrium- und im Gasraum des Expansionstanks gemessen.

Um den Druckverlauf möglichst nahe dem Reaktionsort verfolgen zu können, müssen die Aufnehmer für Temperaturen bis etwa 500°C ausgelegt sein. Sie müssen außerdem eine hohe nutzbare Meßfrequenz (> 40 kHz) besitzen.

Für diese speziellen Anforderungen wurden im IMF Membran-Druckaufnehmer entwickelt.

Die Meßglieder - nämlich Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen - werden " flame - spray " - appliziert.

Die Dehnmeßstreifen in Halbbrückenschaltung sind auf der Membran derart angeordnet, daß bei Belastung eine dem Druck proportionale Widerstandsänderung erfolgt.

Abbildung 7 zeigt 2 Typen von Druckgebern, die sich bezüglich ihrer Montage und Einsatzmöglichkeit unterscheiden. Die Ausführung 2 kann direkt in das Innere von Natriumsystemen eingesetzt werden.

Die Aufnehmer werden einzeln in Stufen zwischen 300 und 500°C statisch kalibriert. Ein dynamischer Test wurde in einer Stoßrohranlage durchgeführt. Die Versorgung der DMS-Geber erfolgt über DMS-Gleichspannungsmeßverstärker, die Bandbreite dieser Geräte beträgt maximal 40 kHz.

Die Natriumtemperatur am Austritt der Teststrecke wird mit Chromel/Alumel-Mantelthermoelementen mit 0,5 mm Mantel-Ø gemessen. Zur Verringerung der Zeitkonstante ist die Meßstelle nicht isoliert, sie ist mit dem Mantel am vorderen Ende verschweißt und liegt im strömendem Natrium. Es ist deshalb mit Ansprechzeiten von ≤ 20 ms zu rechnen.

Die Spannung wird an den Stromzuführungen des Brennstabes abgegriffen und über spezielle Hochspannungs-Trennverstärker in die Meßwarte geleitet.

Der Strom fließt über einen in Reihe mit dem UO_2 liegenden Strombegrenzungswiderstand, welcher gleichzeitig als Meßwiderstand gilt. Die dort abgegriffene Spannung wird ebenfalls über Hochspannungstrennverstärker in die Meßwarte geleitet.

Es werden in allen Fällen Augenblickswerte gemessen, die Ermittlung der Effektivwerte erfolgt bei der Auswertung rechnerisch.

Meßwerterfassung

Abbildung 8 zeigt das Schema der Meßwerterfassung. Sämtliche in der Meßwarte ankommenden 28 Meßsignale werden über Breitband-Trennverstärker aus Sicherheitsgründen galvanisch getrennt. Außerdem ist eine galvanische Trennung nötig, da die Eingänge der Bandkanäle einseitig geerdet sind.

Die Verstärker haben eine Bandbreite von maximal 100 kHz, sie gestatten eine Verstärkung in kalibrierten Stufen. Mit einer zusätzlichen kontinuierlichen Verstärkungsfaktoreneinstellung ist eine Anpassung der Meßgröße an die Ausgangsspannung möglich.

Die Ausgangsspannungen der Trennverstärker werden mit einem Analog-Magnetbandgerät registriert. Zur Erweiterung der Kanalzahl werden 2 PCM-Module eingesetzt, die es gestatten, je 8 Meßwerte auf je 1 Bandspur Puls-Code-moduliert aufzuzeichnen und analog wiederzugeben. Die Bandbreite der PCM-Kanäle beträgt bei 60 Zoll/s Bandgeschwindigkeit 600 Hz, die der FM-Kanäle 40 kHz.

Aus Abbildung 6 und 8 ist die Verteilung der Meßwerte auf die verschiedenen FM- bzw. PCM-Kanäle ersichtlich.

Zur Versuchsauswertung wird das Band wegen der besseren zeitlichen Auflösung mit einer Zeitdehnung von 1:32 abgespielt. Die wiedergegebenen Signale werden zur Zeit im Institut für Reaktorentwicklung auf der ERA-Anlage digitalisiert. Die Bandbreite beträgt bei der Bandgeschwindigkeit von $1 \frac{7}{8}$ Zoll / s 19 Hz für die PCM-Kanäle bzw. 1,25 kHz für die FM-Kanäle. Mit der maximalen Abtastrate der ERA-Anlage von 2500 Hz/Kanal bei 8 Kanälen werden die FM-Kanäle digitalisiert. Für die PCM-Kanäle wird eine Abtastrate von 125 Hz/Kanal bei 16 Kanälen (2 PCM-Module) gewählt. Damit ergibt sich beim Digitalisieren eine Meßwertfrequenz von 20 kHz (FM) bzw. 2.000 Hz (PCM) und bezogen auf die Problemzeit eine Meßwertfrequenz von 640 kHz (FM) bzw. 64 kHz (PCM). Die Meßdauer während des Versuches beträgt ca. 1,5 s, so daß insgesamt etwa 1 Million Meßwerte pro Experiment anfallen.

Mit der ERA-Anlage kann die obere Grenzfrequenz von 40 kHz auf der Analogseite nicht voll wiedergegeben werden. Es wird daher daran gedacht, im IMF eine spezielle Digitalisieranlage zu beschaffen.

Der Auswerteprozess erfolgt mit Hilfe des Programmsystems SEDAP / 2 /, das eine einfache und schrittweise Verarbeitung auf den Datenverarbeitungsanlagen der GfK erlaubt.

4. Ablauf der Experimente

Im folgenden wird der Ablauf eines Abschmelzexperimentes in der Loopanlage dargestellt. Es wird ein Brennstab mit 80 mm Brennstofflänge angenommen. Die maximale Spannung am Ausgang der Stromversorgung beträgt 270 Volt. Das Natriumführungsrohr hat einen inneren Durchmesser von 12 mm. Die Natriumgeschwindigkeit beträgt 3,8 m/s.

Der Kaltwiderstand des Brennstabes ist so hoch (ca. 50 k Ω), daß die vorhandene Spannung nicht ausreicht, um eine nennenswerte Leistung im Brennstoff zu erzeugen.

Daher wird vor der Inbetriebnahme des Brennstabes zunächst der Natriumkreislauf auf eine Temperatur von ca. 600°C aufgeheizt. Der Brennstabwiderstand sinkt dabei auf etwa 1 k Ω ab.

Bei diesem Stabwiderstand liegt die " Anfahrschwelle ". Das heißt, die elektrische Leistungserzeugung von etwa 75 Watt reicht nun aus, die Temperatur des Brennstoffes über die Natriumtemperatur hinaus - zunächst sehr langsam - hochlaufen zu lassen. Infolge des negativen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes von UO₂ beschleunigt sich die Temperatur und Leistungszunahme immer mehr.

Der Reglersollwert wird während des Anfahrvorganges normalerweise auf eine Stabileistung von 50 W/cm eingestellt. Dies entspricht einer mittleren

Brennstofftemperatur von etwa 1.200°C . Wird dieser Betriebszustand erreicht, bringt die Regelung den Brennstab unter Kontrolle.

Bei Experimenten mit 7-Stabbündeln werden nacheinander alle Stäbe in der beschriebenen Weise angefahren.

Durch Herabsetzen des Reglersollwertes wird die Stabileistung aller Stäbe auf den für den Beginn der Transiente günstigsten Wert gesteigert. Dieser Wert liegt nach unseren Erfahrungen bei einer Stabileistung von etwa 120 W/cm .

Das dieser Leistung entsprechende Temperaturprofil im Brennstab entspricht der untersten Linie in Abbildung 9.

Die Temperatur der Brennstabhülle liegt im Mittel nur etwa 10 bis 15°C über der Natriumtemperatur. Ebenfalls gering ist die Kühlmittelaufheizung mit nur ca. 5°C . Die mittlere Brennstofftemperatur jedoch beträgt etwa 2.550°C und die Zentraltemperatur liegt mit 2.800°C nur wenig unterhalb der Schmelztemperatur.

Der Brennstabinnendruck kann während des Anfahrvorganges kontrolliert auf einen vorgegebenen Wert gehalten werden. Erst vor Beginn der Leistungsexkursion wird die Gaszuleitung unmittelbar über dem Brennstab durch ein Magnetventil abgesperrt.

Zum Auslösen der Leistungsexkursion wird innerhalb von 30 msec die volle Spannung auf den Brennstab aufgebracht. Die Temperatur im Brennstoffzentrum steigt sehr schnell an und überschreitet schon nach ca. 100 msec die Schmelztemperatur des UO_2 . Nach 400 msec sind etwa 40% des Brennstoffes aufgeschmolzen. Nur eine äußere Schicht von etwa $0,9\text{ mm}$ Stärke befindet sich unterhalb der Schmelztemperatur.

Aus Abbildung 9 geht hervor, daß die Temperatur des Natriums und der Hülle während der Leistungsexkursion praktisch nicht ansteigt. Der Grund dafür ist die gute thermische Isolierung des Brennstoffes gegen die Hülle im elektrisch beheizten Brennstab.

Das bedeutet einmal, daß die beim Reaktorstörfall bis zum Stabversagen eintretende Erhöhung der Natriumtemperatur nicht simuliert wird. Bei unseren Versuchen wird daher das zum Zeitpunkt des Stabversagens gewünschte Temperaturniveau im Natrium schon vor der Exkursion eingestellt.

Zum anderen wird deutlich, daß die Hülle immer unterhalb des Schmelzpunktes bleibt. Sie schmilzt also nur örtlich an den Stellen auf, an denen sie während der Leistungstransiente in Kontakt mit flüssigem Brennstoff gerät. Das ist vorzugsweise im Bereich des unteren Brennstoffendes der Fall.

Die stationären und instationären Temperaturverläufe in Abbildung 9 wurden mit dem Programm ELEKTRA gerechnet / 1 /. Dieses Programm berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von UO_2 und damit auch der Leistungsdichte im Brennstoff. Es ist daher speziell zur Berechnung der instationären Vorgänge in elektrisch beheizten Brennstäben bei Leistungsexkursionen geeignet.

Abbildung 10 zeigt den rechnerisch ermittelten Verlauf von Spannung, Strom, elektrischem Widerstand, Leistung und Energie-Aufnahme im elektrisch beheizten Brennstab während der Leistungsexkursion. Die Spannung fällt unter der Wirkung des Vorwiderstandes mit zunehmender Stromstärke stetig ab. Die Leistung erreicht einen Maximalwert in der Größenordnung von 30 kW; das sind etwa 3,75 kW pro cm Stablänge.

5. Erste Versuchsergebnisse

Die ersten Versuche wurden unter Gaskühlung durchgeführt. Das Ziel war, erste Erfahrungen über die Technik der elektrischen Beheizung von UO_2 -Brennstäben und über das Verhalten des Brennstoffes und des Isolations-

materials bei hohen Temperaturen zu gewinnen. Auf Grund der Versuchsergebnisse wurde das oben beschriebene Brennstabkonzept und die Stromversorgung mit Regelung entwickelt.

Für die Versuche konnte ein vorhandener Gaskreislauf verwendet werden. Es wurde lediglich eine Teststrecke neu hergestellt. In dieser Teststrecke war es möglich einen Brennstab durch einen verschiebbaren Rohrofen auf die für die direkte Beheizung notwendige Temperatur aufzuheizen, und dann unter Sicht stationär zu betreiben und abzuschmelzen. Es wurden zunächst Versuche mit nicht umhüllten, später mit umhüllten Brennstoffzylindern durchgeführt.

Das erste Ergebnis dieser Versuche war, daß bei Stromrückführung über Masse schon zu Beginn der Exkursion elektrische Kurzschlüsse eintraten, daß aber bei potentialfreier Stromführung durch den Brennstab die Isolierung zwischen Brennstoff und Hülle bei extremen Bedingungen ausreichend wirksam bleibt.

Eine zweite Versuchsgruppe wurde in einer Natriumkapsel unter stehendem Natrium durchgeführt. Abbildung 11 zeigt schematisch die Ausführung der Kapsel.

Der Brennstab entspricht in seinem grundsätzlichen Aufbau schon der anfangs beschriebenen endgültigen Ausführung. Ebenfalls prototypisch ist die Anordnung der Druckgeber. Es wurden in Höhe der Reaktionszone je 2 induktive KAMAN-Druckaufnehmer und 2 Dehnungsmeßstreifen-Aufnehmer eigener Entwicklung angebracht. Daher standen 2 völlig getrennte Druckmeßsysteme zur Verfügung.

Auf Grund der Erfahrungen aus dieser Versuchsserie konnte der Brennstabaufbau und die Experimentiertechnik so weit verbessert werden, daß während der Exkursion bis zum Eintreten des elektrischen Kurzschlusses ein großer

Teil des Brennstoffes aufschmilzt und etwa 30 % des Brennstoffinventars den Brennstab in flüssiger Form verlassen. Weiterhin wurde im Laufe dieser Versuche nach und nach die Qualität der Meßwerterfassung so verbessert, daß keine Fehlinterpretationen durch Fremdeinstreuungen mehr zu befürchten sind.

Die Meßwerte eines der letzten Kapselversuche zeigt Abbildung 12. Bei diesem Versuch hatte die Länge der Brennstoffsäule 100 mm und die Natriumtemperatur zu Beginn der Leistungsexkursion 600°C betragen.

Die obere Kurve gibt den Verlauf der elektrischen Spannung wieder. Sie steigt ausgehend von dem durch die Regelung stark angeschnittenen Verlauf des stationären Betriebes sprunghaft auf den vollen Wert von etwa 240 V an.

Der Strom steigt - mit fallendem Brennstabwiderstand - bis auf maximal 230 A an. Er erhöht sich nochmals sprunghaft beim Kurzschluß auf über 300 A.

In Abbildung 12 ist weiterhin die Spannung der oberen bzw. unteren Stromzuführung gegen Masse aufgezeichnet. Die Höhe der Spannungswerte zu jedem Zeitpunkt ist ein Maß für die Qualität der Isolierung der entsprechenden Stromzuführung gegen Masse. Abbildung 13 zeigt das Ersatzschaltbild des Stabwiderstandes (R_L) mit seinen zugehörigen Isolationswiderständen (R_{isoI} I und R_{isoI} II). Bei normalem Betrieb liegen R_{isoI} I und R_{isoI} II in derselben Größenordnung, und über jeden Isolationswiderstand fällt ein Teil der Klemmenspannung ab.

Dies ist bis zum Zeitpunkt 1 (in Abbildung 12) der Fall. Nun sinkt das Potential des unteren Brennstabendes innerhalb kurzer Zeit stark ab. Es wird U_{isoI} II ~ 0 , U_{isoI} I $\sim U_k$. Das heißt, flüssiger Brenn-

stoff hat am unteren Ende der Brennstoffsäule die noch feste Brennstoffschicht und die Isolierung durchdrungen und durchschmilzt die Hülle. Es setzen heftige Druckstöße im Natrium ein. Die Leistungsexkursion wird dadurch aber noch nicht unterbrochen. Erst im Zeitpunkt 2 tritt am oberen Brennstoffende Kurzschluß ein; der Strom kann nun zwischen den beiden Elektroden unter Umgehung des Brennstoffes über das Natrium fließen.

Die beiden unteren Kurven in Abbildung 12 geben die Meßwerte der zwei verwendeten Druckgebertypen wieder.

Es ist eine größere Anzahl sehr kurzer Druckspitzen bis maximal etwa zu 60 bar Höhe aufgetreten. Das geringfügige Auswandern des Grundpegels nach unten beim DMS-Druckaufnehmer und das überlagerte 50 Hertz-Signal beim KAMAN-Aufnehmer stören die Auswertung nicht, wie Abbildung 14 zeigt.

Hier sind nochmals die Meßwerte der Druckaufnehmer dargestellt.

Die Zeitdauer der Druckspitzen an der Basis beträgt im Mittel nur etwa 0,5 bis 1 msec.

Die Druckpulse treten mit recht regelmäßigen zeitlichen Abständen auf. Die Frequenz liegt etwa um 300 Hertz.

Abbildung 15 zeigt die Versagensstelle eines Brennstabes. Die Öffnung befindet sich exakt auf dem Niveau der Brennstoff-Unterkante. In der Öffnung ist der zur unteren Elektrode gehörende Wolfram-Kolben zu erkennen.

In Abbildung 16 ist ein Querschnitt des Brennstabes kurz über der Austrittsöffnung dargestellt. Der zentrale Kanal verläuft im allgemeinen gleichmäßig über die ganze Länge des Brennstoffes.

In der Loopanlage wurden bisher 3 Versuche durchgeführt. Auf die Ergebnisse dieser Versuche soll nur insoweit eingegangen werden, als sie für die Beurteilung der Funktion der Natriumanlage und der Meßwerterfassung von Interesse sind. Eine detaillierte Auswertung und Interpretation der Meßergebnisse ist noch nicht durchgeführt worden. Abbildung 17 zeigt die wichtigsten Meßwerte des ersten Versuches, der bei etwa 520°C Natriumtemperatur durchgeführt wurde. Die beiden oberen Kurven geben den aus Abbildung 12 bekannten charakteristischen Verlauf von Spannung und Strom wieder. In der Teststrecke werden Druckspitzen von mehr als 50 bar gemessen. Der Druck am Teststreckeneintritt ist - durch die Querschnittsveränderungen in der Teststrecke - stark eingebnet und verschliffen. Die Spitzendrücke betragen nur noch etwa 4 bar.

Der Natriumdurchsatz am Eintritt zur Teststrecke fällt kurzzeitig von 1 m³/h auf ca. 0,2 m³/h ab. Entsprechend nimmt die Durchflußgeschwindigkeit am Austritt, also über der Teststrecke zu. Die hier sichtbare abklingende Schwingung dürfte mit dem aus dem Brennstab freigesetzten Füllgas zusammenhängen.

6. Schlußbemerkungen

Als erste Versuchsserie wird in der Loopanlage eine Reihe von Parameter-tests durchgeführt, sowohl mit Einzelstäben, als auch mit 7-Stab-Bündeln. Bei jedem der Tests wird einer der eingangs erwähnten Parameter, also Natriumgeschwindigkeit, -temperatur und -druck, Brennstabinnendruck und Kühlkanalgeometrie geändert.

Die Anlage ist so flexibel, daß später auch Versuchsprogramme, die auf spezielle Fragestellungen ausgerichtet sind, mit relativ geringem Aufwand an Mitteln und Zeit durchgeführt werden können.

Literaturverzeichnis

/ 1 / KFK 2197: D. Piel

Berechnung der Temperaturverteilung in einem umhüllten, direkt elektrisch beheizten UO_2 -Stab bei transientem Leistungsverlauf

/ 2 / KFK 1594: M. Audoux et al.,

SEDAP - An Integrated System for Experimental Data Processing

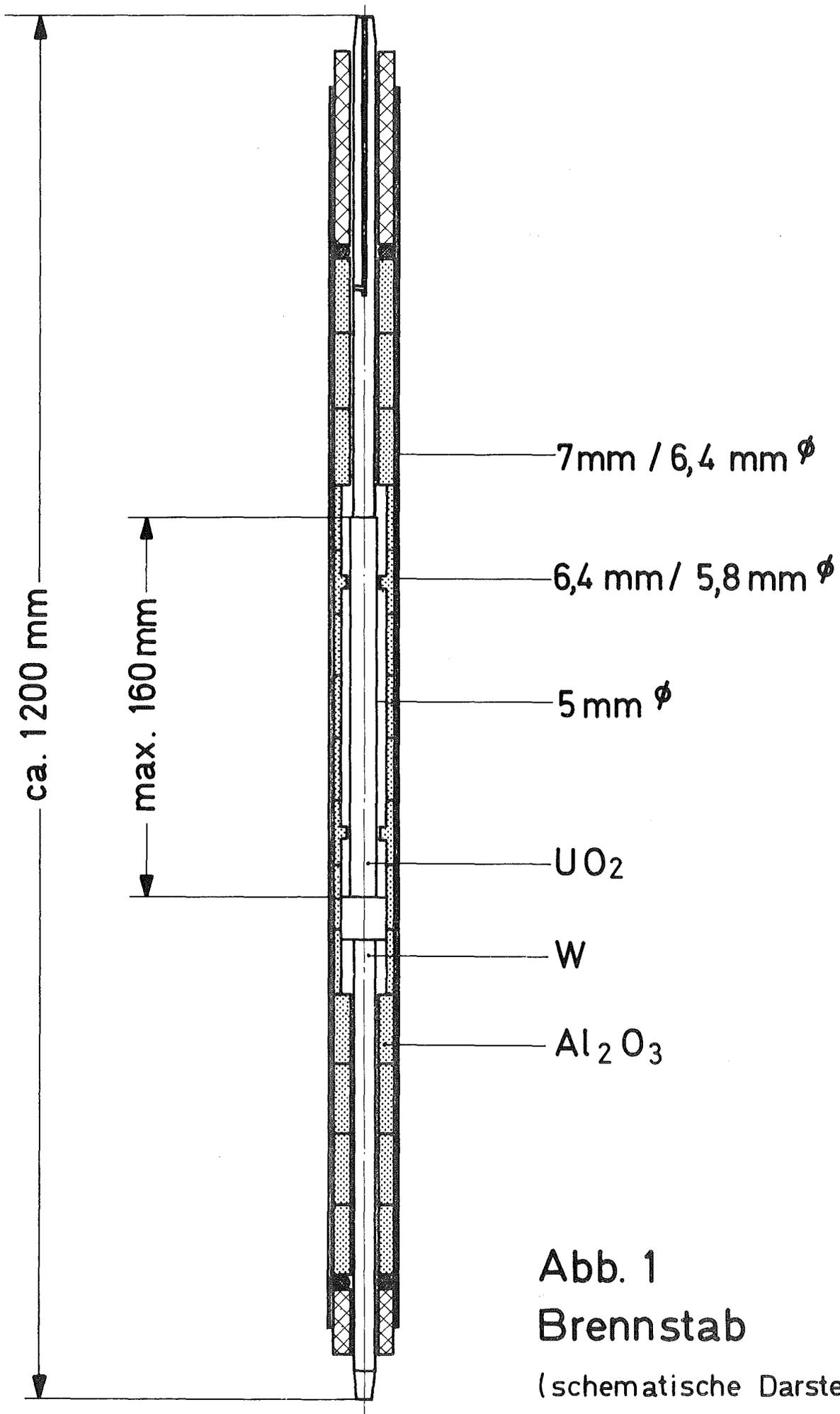


Abb. 1
Brennstab

(schematische Darstellung)

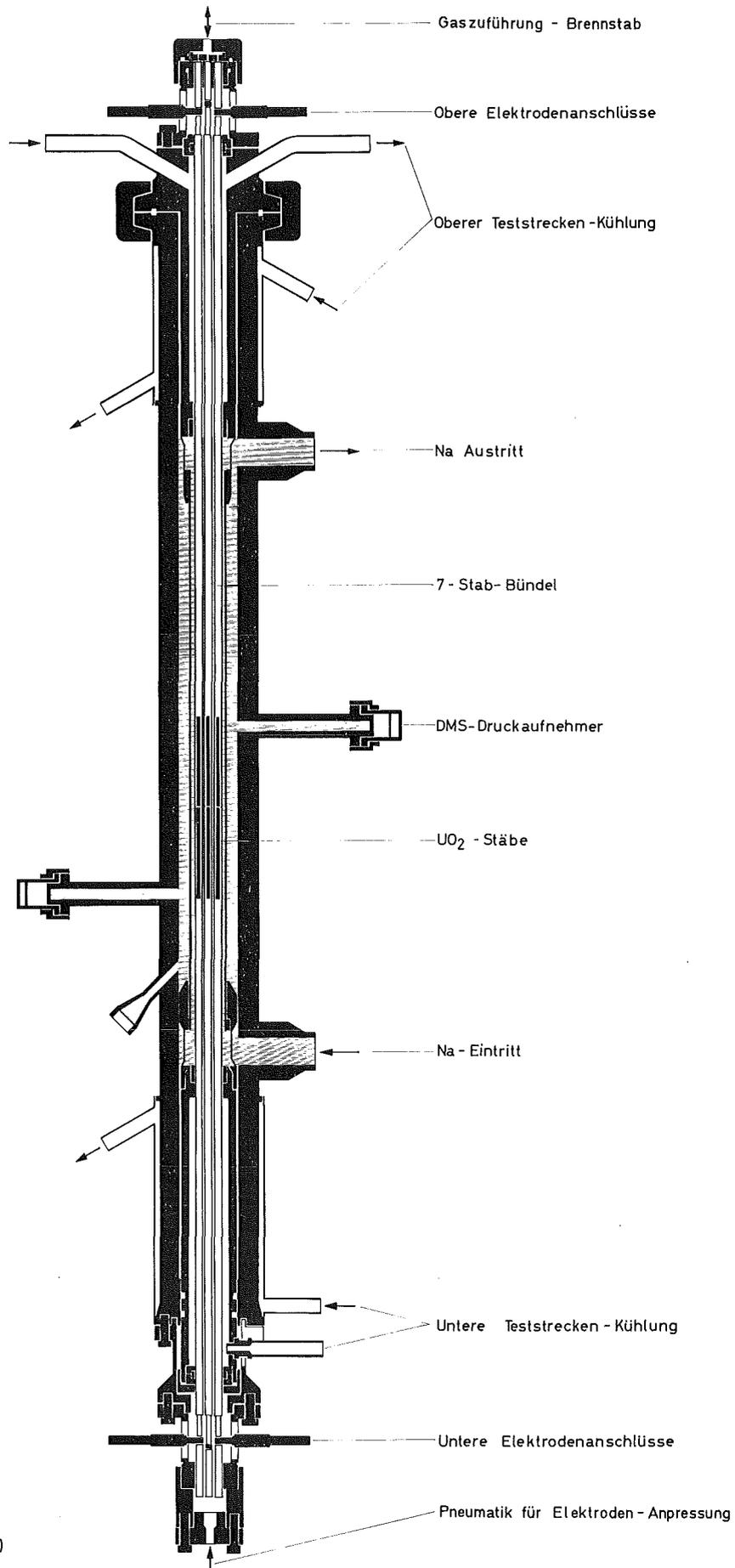


Abb. 2
 Teststrecke
 (schematische Darstellung)

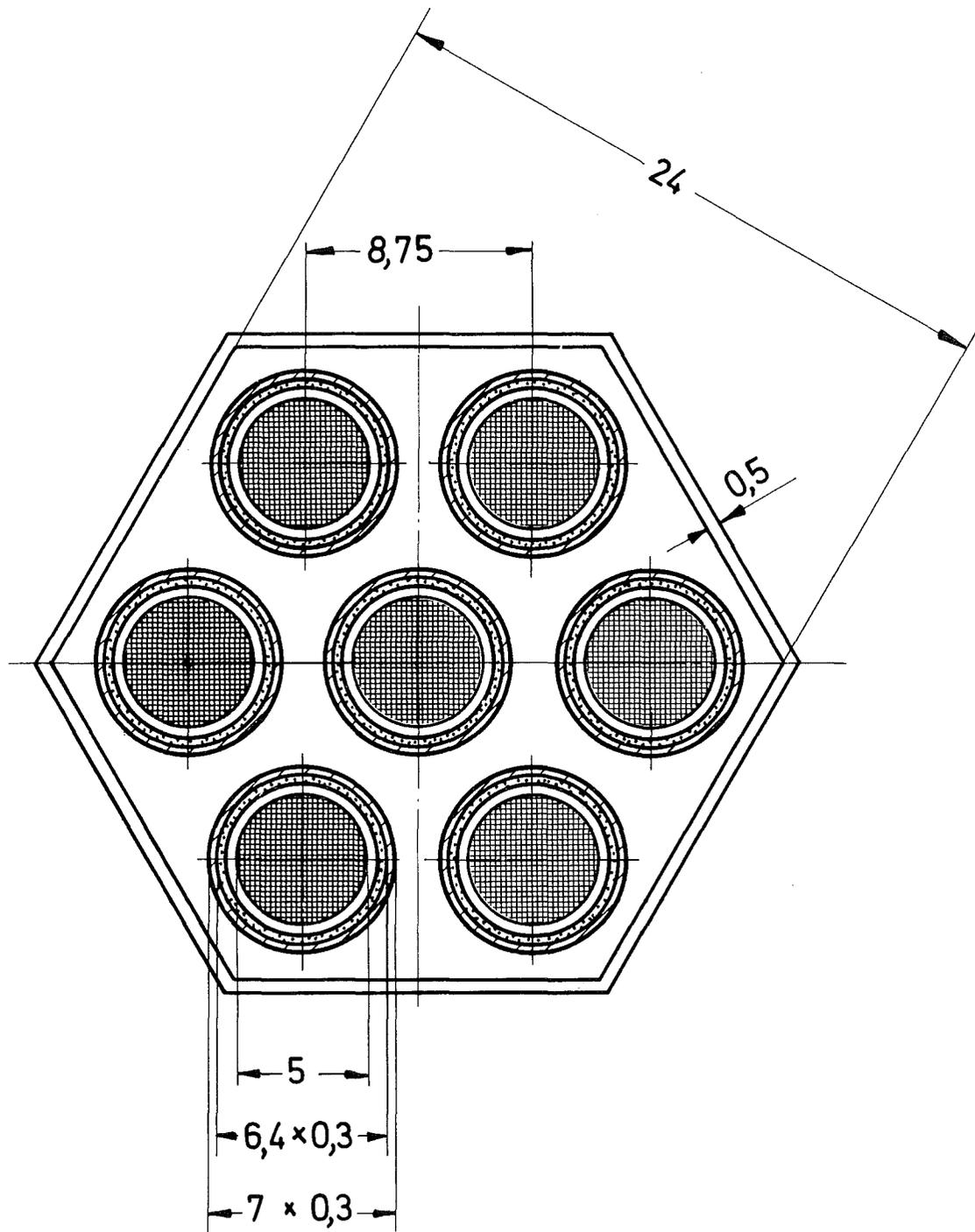


Abb. 3 Querschnitt durch das Stabbündel

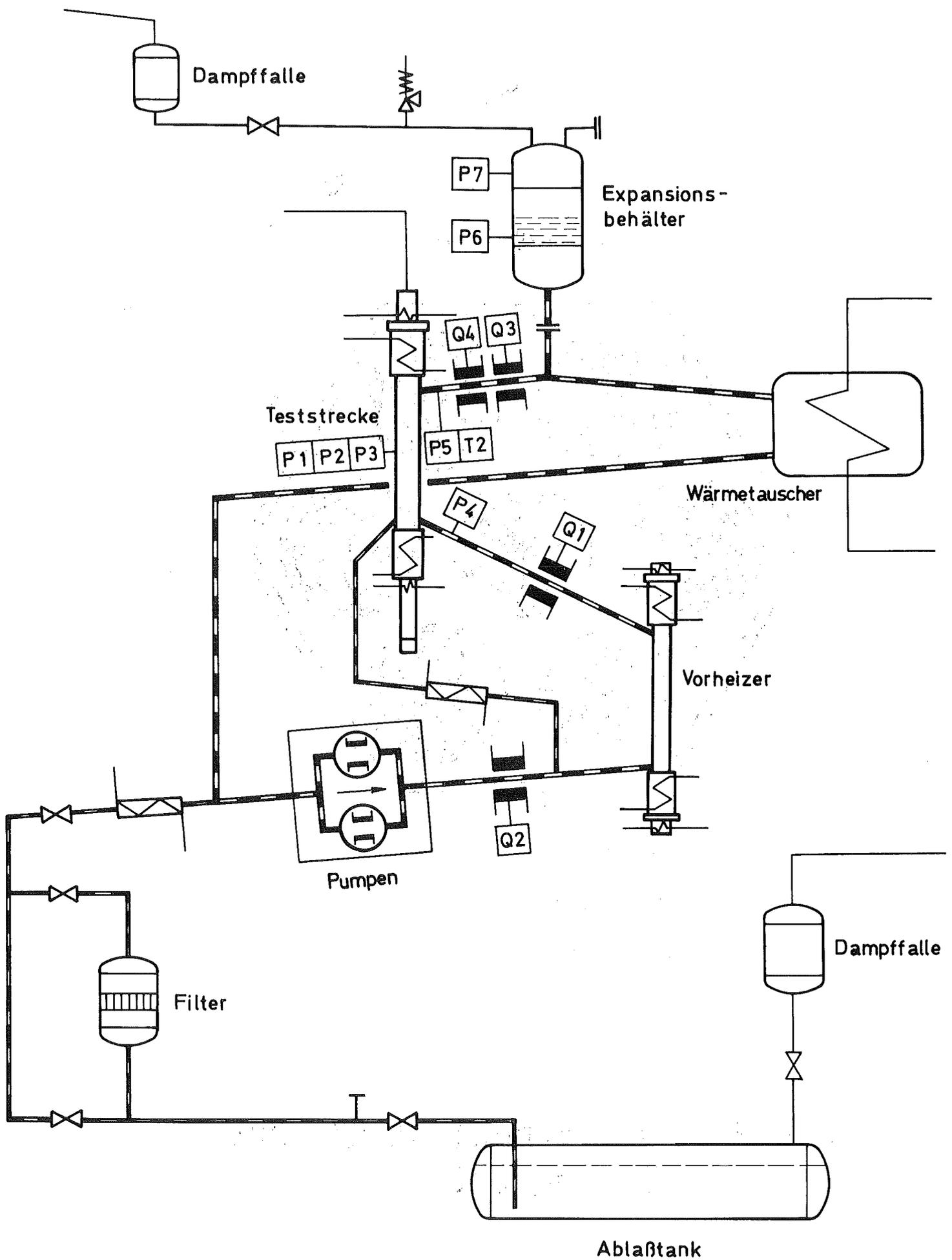


Abb. 4 Fließschema

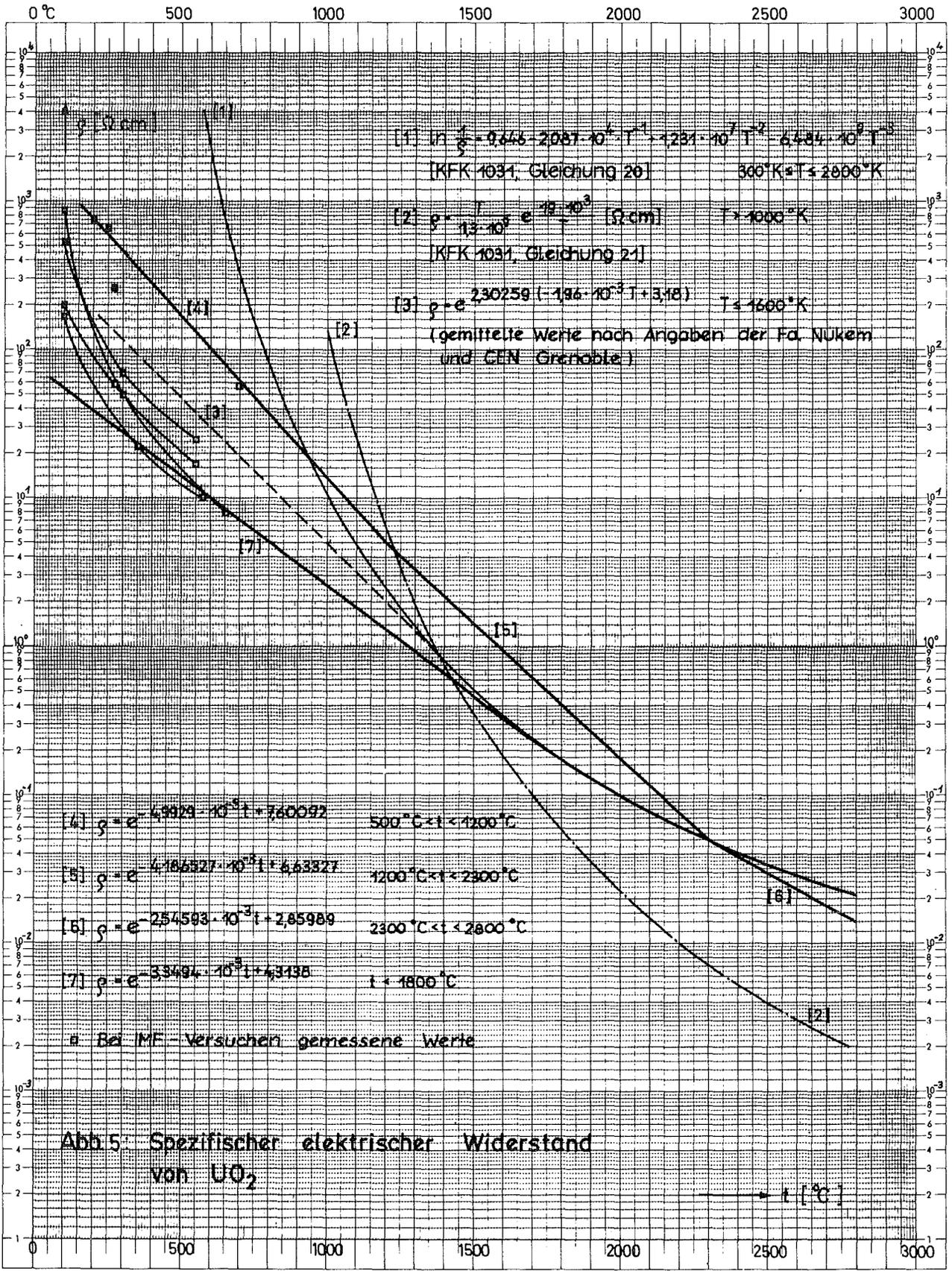


Abb. 5: Spezifischer elektrischer Widerstand von UO₂

Meßkanal	Meßstelle				Verstärker		Analog - Magnetband				Digitalisierung (mit 32-facher Zeit- dehnung)	
	Nr.	Bezeichnung	Lage	Meßbereich	Empfindlichkeit	Ver- stärkungs- faktor	Ausgangs- empfind- lichkeit	Bandkanal Nr.	Meßbereich	Ausgangs- empfindlich- keit	Bandbreite	Abtastfrequenz I II
1	Q1	Eintritt Teststrecke	6,44 m ³ /h	4,35 mV/ (m ³ /h)	50	4,6(m ³ /h)/V	FM1	1,4 V	4,6 (m ³ /h)/V	10 kHz	2,5 kHz	
2	Q4	Austritt Teststrecke	6,44 m ³ /h	4,35 mV/ (m ³ /h)	50	4,6(m ³ /h)/V	FM2	1,4 V	4,6 (m ³ /h)/V	10 kHz	2,5 kHz	
3	P1	in Teststrecke	54,7 at	25,6 mV/at	1	39,1 at/V	FM3	1,4 V	39,1 at/V	40 kHz	2,5 kHz	
4	P2	in Teststrecke	95,2 at	14,7 mV/at	1	58 at/V	FM4	1,4 V	58 at/V	40 kHz	2,5 kHz	
5	P3	in Teststrecke	54,7 at	12,8 mV/at	2	39,1 at/V	FM5	1,4 V	39,1 at/V	40 kHz	2,5 kHz	
6	P4	Eintritt Teststrecke	21,5 at	65 mV/at	1	15,4 at/V	FM6	1,4 V	15,4 at/V	40 kHz	2,5 kHz	
7	P5	Austritt Teststrecke	30,8 at	2,27 mV/at	20	22 at/V	FM7	1,4 V	22 at/V	40 kHz	2,5 kHz	
8	CLOCK						FM 10				2,5 kHz	125 Hz
9	U1	Spannung Stab 1	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM I-1	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
10	J1	Strom Stab 1	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM I-2	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
11	U2	Spannung Stab 2	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM I-3	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
12	J2	Strom Stab 2	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM I-4	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
13	U3	Spannung Stab 3	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM I-5	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
14	J3	Strom Stab 3	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM I-6	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
15	U4	Spannung Stab 4	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM I-7	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
16	J4	Strom Stab 4	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM I-8	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
17	U5	Spannung Stab 5	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM II-1	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
18	J5	Strom Stab 5	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM II-2	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
19	U6	Spannung Stab 6	500 V	1 mV/V	10	100 V/V	PCM II-3	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
20	J6	Strom Stab 6	1000 A	1 mV/A	10	100 A/V	PCM II-4	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
21	U7	Spannung Stab 7	500 V	10 mV/V	1	100 V/V	PCM II-5	5 V	100 V/V	600 Hz		125 Hz
22	J7	Strom Stab 7	1000 A	10 mV/A	1	100 A/V	PCM II-6	10 V	200 A/V	600 Hz		125 Hz
23	T2	Austritt Teststrecke	1210°C	0,0413 mV/°C	100	242°C/V	PCM II-7	5 V	242°C/V	600 Hz		125 Hz
24	Reserve						PCM II-8			600 Hz		
25	P6	Druck Exp.-Beh. (Na-Raum)	4,2 at	66,7 mV/at	5	3 at/V	FM 11	1,4 V	3 at/V	600 Hz	Analog Wiedergabe	
26	P7	Druck Exp.-Beh. (Gas-Raum)	22,4 at	62,5 mV/at	1	16 at/V	FM 12	1,4 V	16 at/V	600 Hz	Analog Wiedergabe	
27	Q2	Austritt Pumpe	23,3 m ³ /h	0,6 mV/ (m ³ /h)	100	16,7(m ³ /h)/V	FM 13	1,4 V	16,7(m ³ /h)/V	10 kHz	Analog Wiedergabe	
28	Q3	Austritt Teststrecke	23,3 m ³ /h	0,6 mV/ (m ³ /h)	100	16,7(m ³ /h)/V	FM 14	1,4 V	16,7(m ³ /h)/V	10 kHz	Analog Wiedergabe	

Q - Durchfluß
P - Druck
U - Spannung
J - Strom
T - Temperatur

Abb. 6: Meßstellenliste

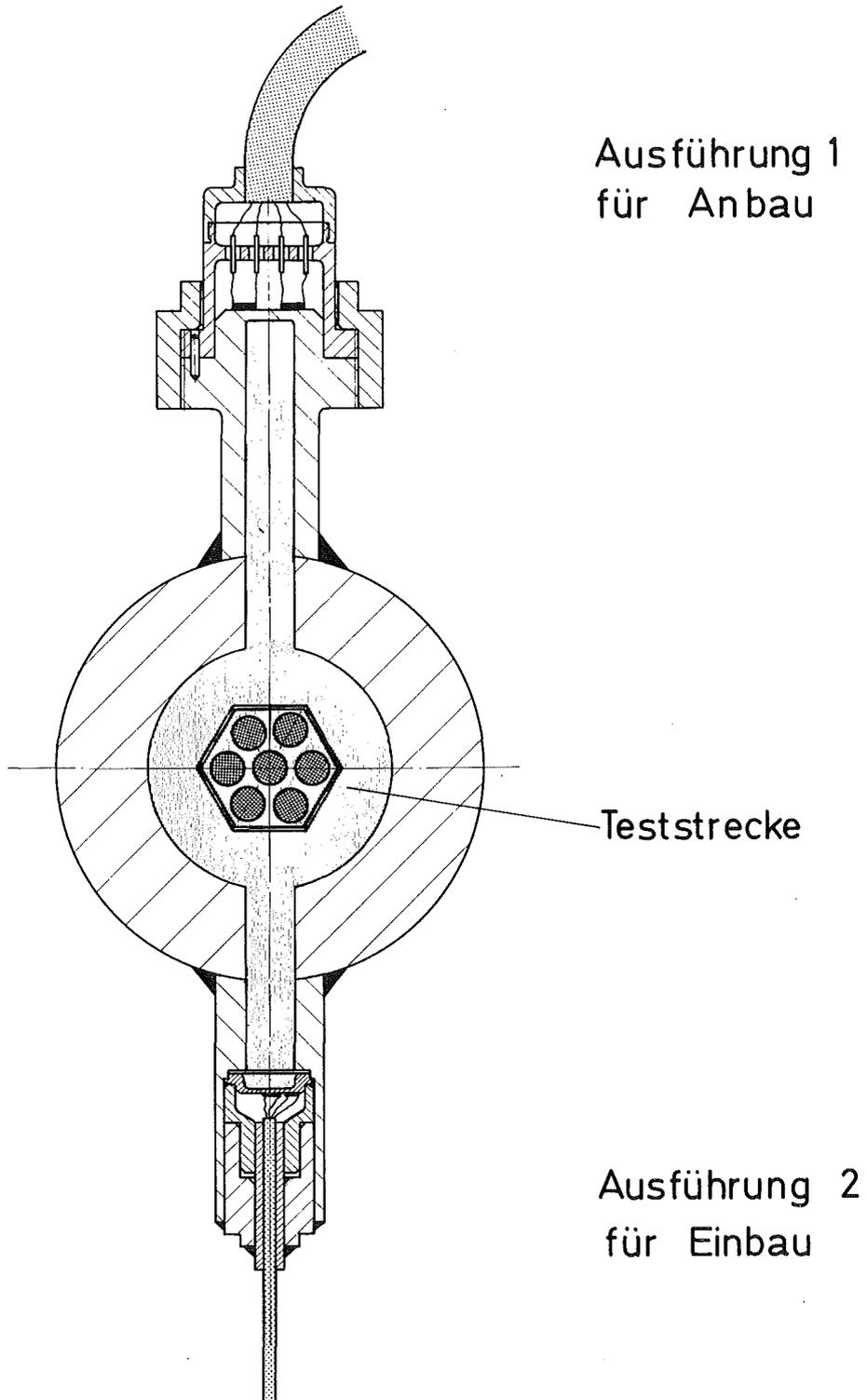


Abb.7 Druckaufnehmer

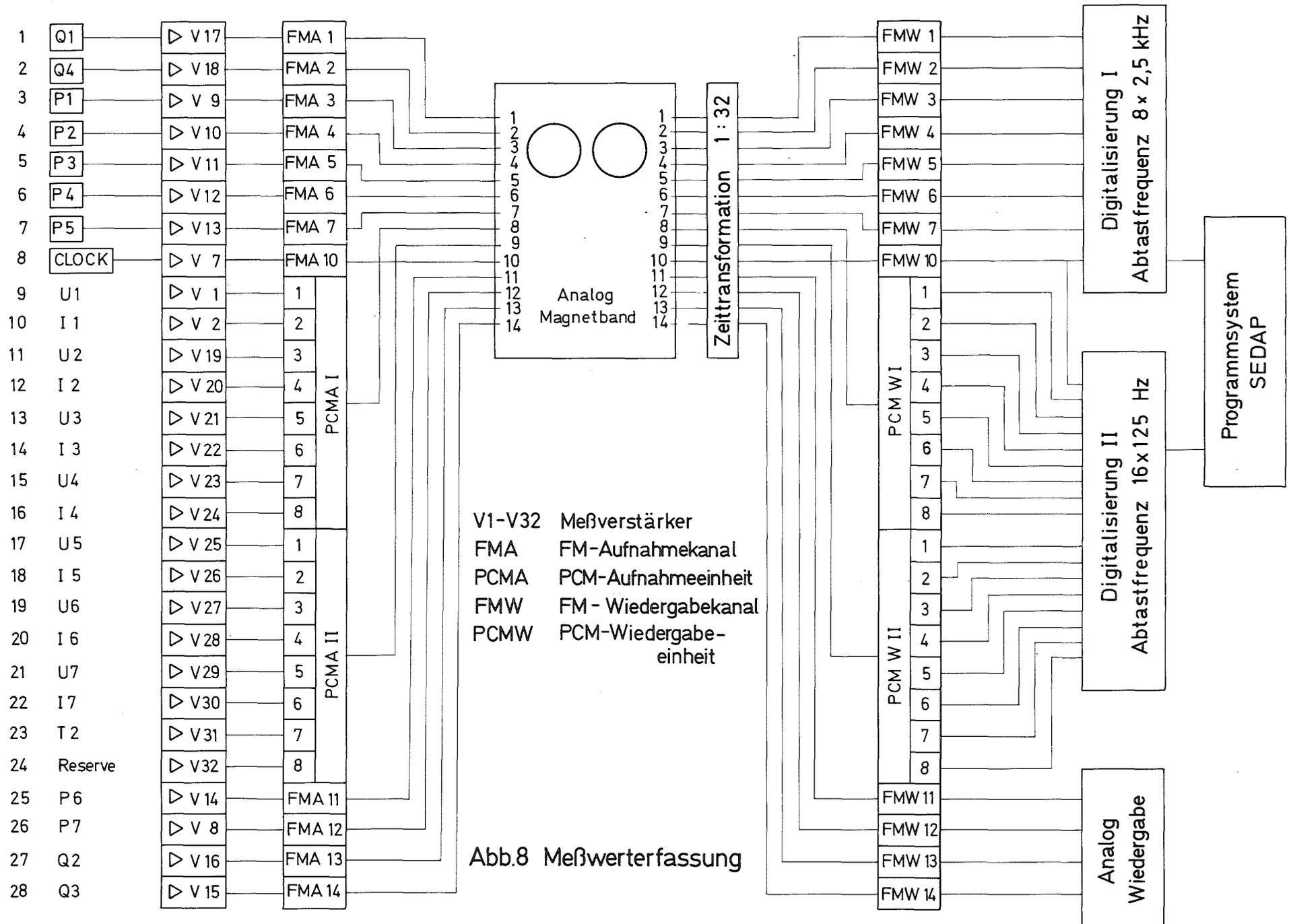


Abb.8 Meßwerterfassung

V1-V32 Meßverstärker
 FMA FM-Aufnahmekanal
 PCMA PCM-Aufnahmeeinheit
 FMW FM - Wiedergabekanal
 PCMW PCM-Wiedergabeeinheit

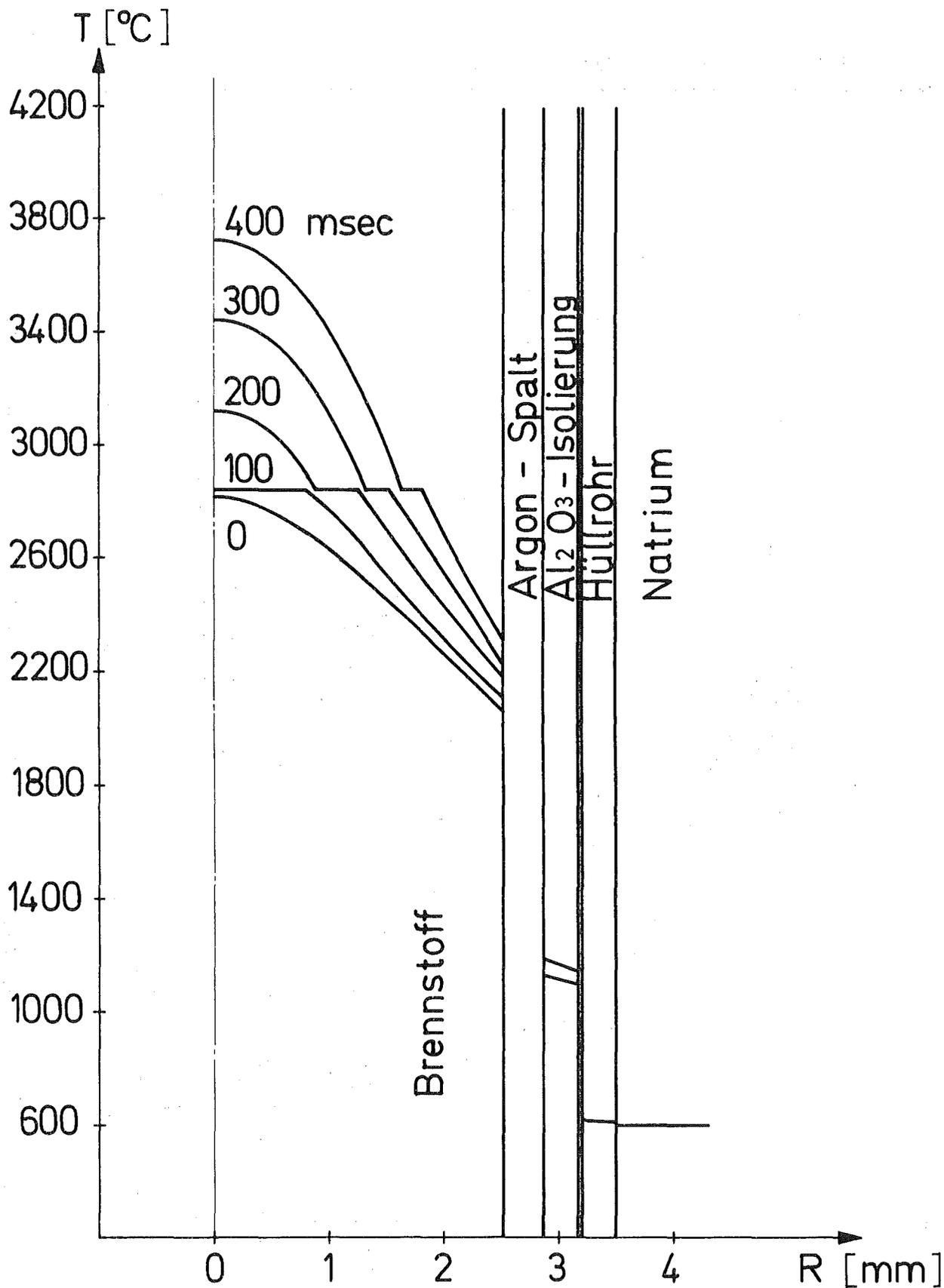


Abb.9 Temperaturprofil im Brennstab

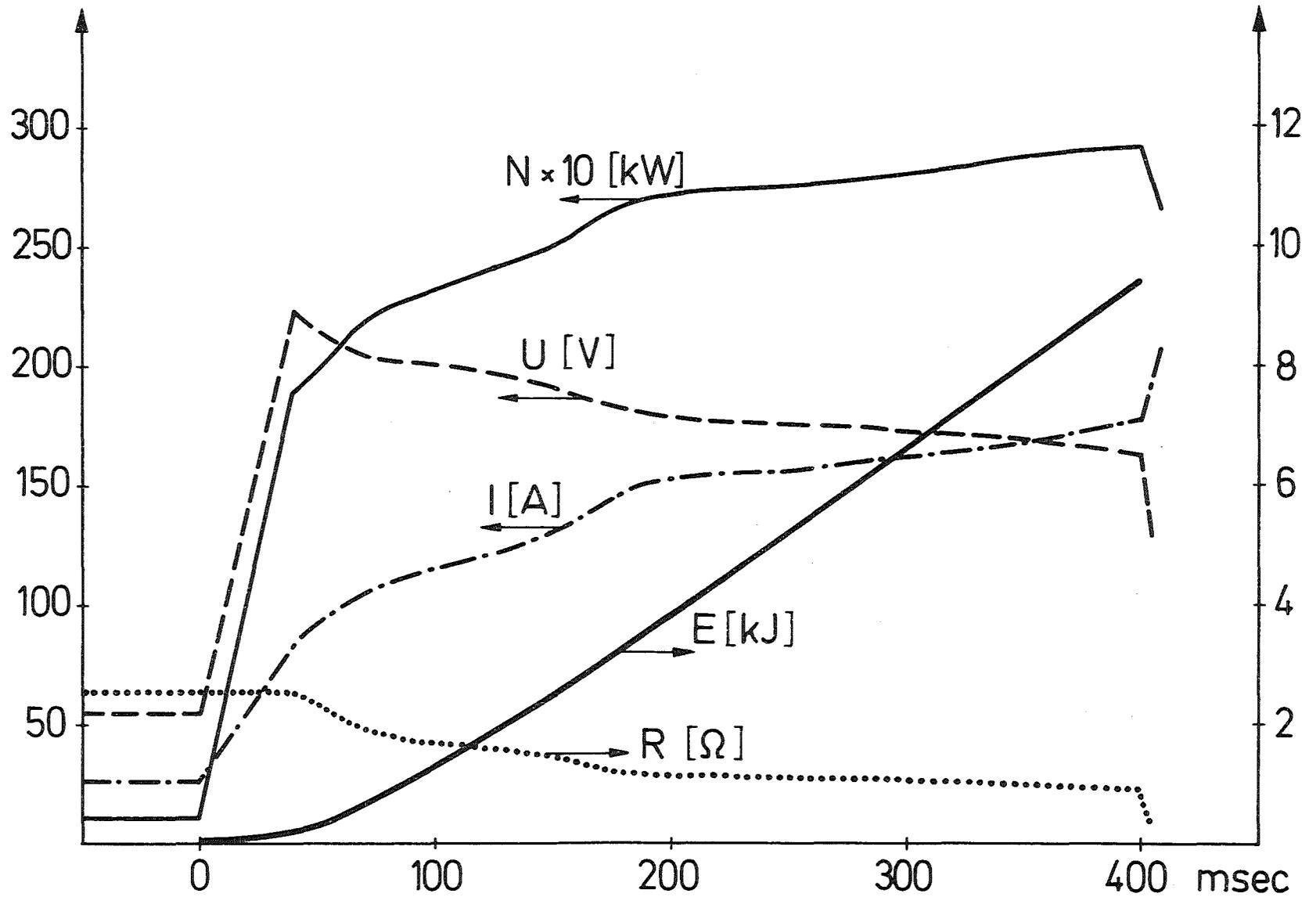


Abb.10 Zeitlicher Verlauf der elektrischen Werte.

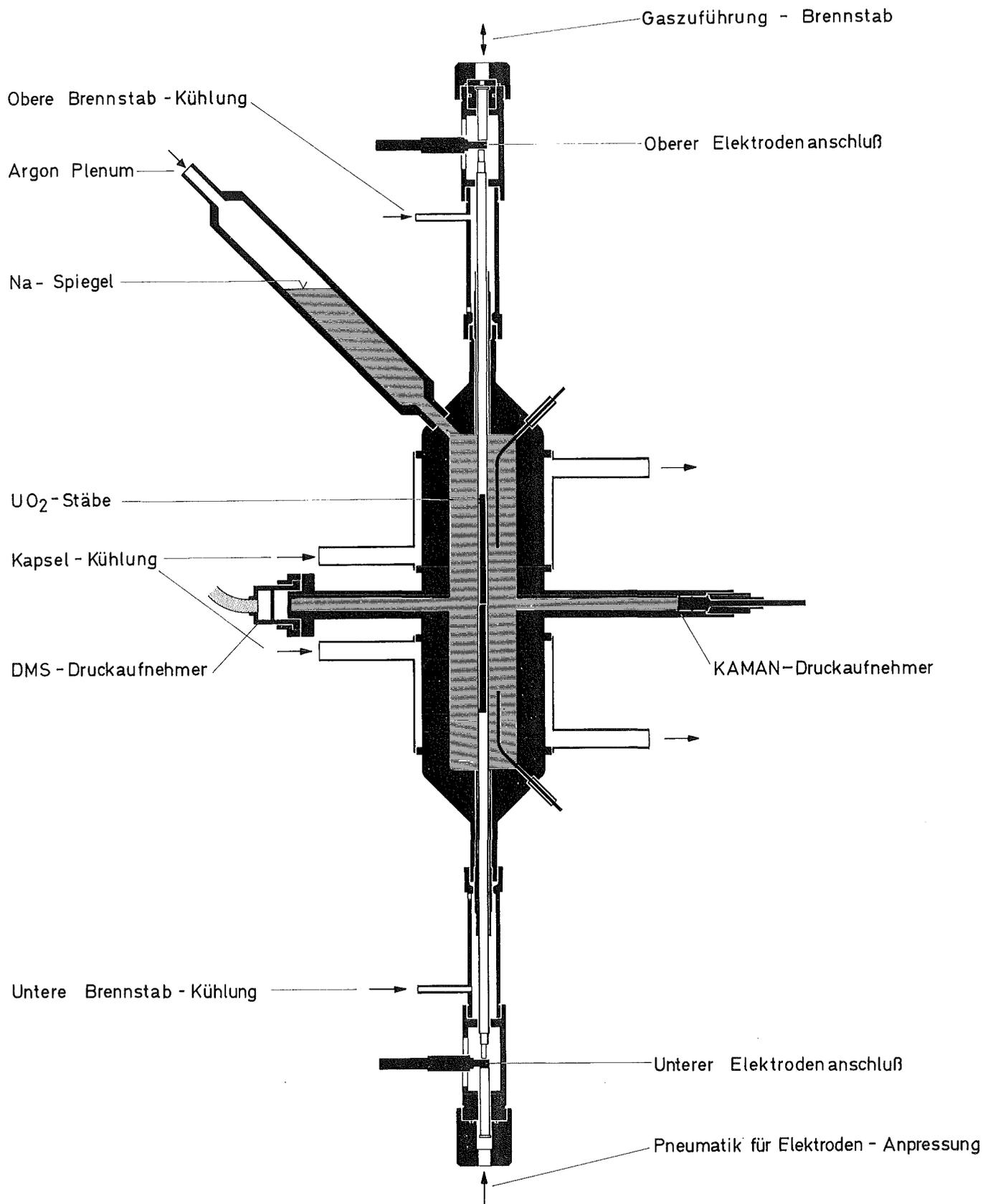
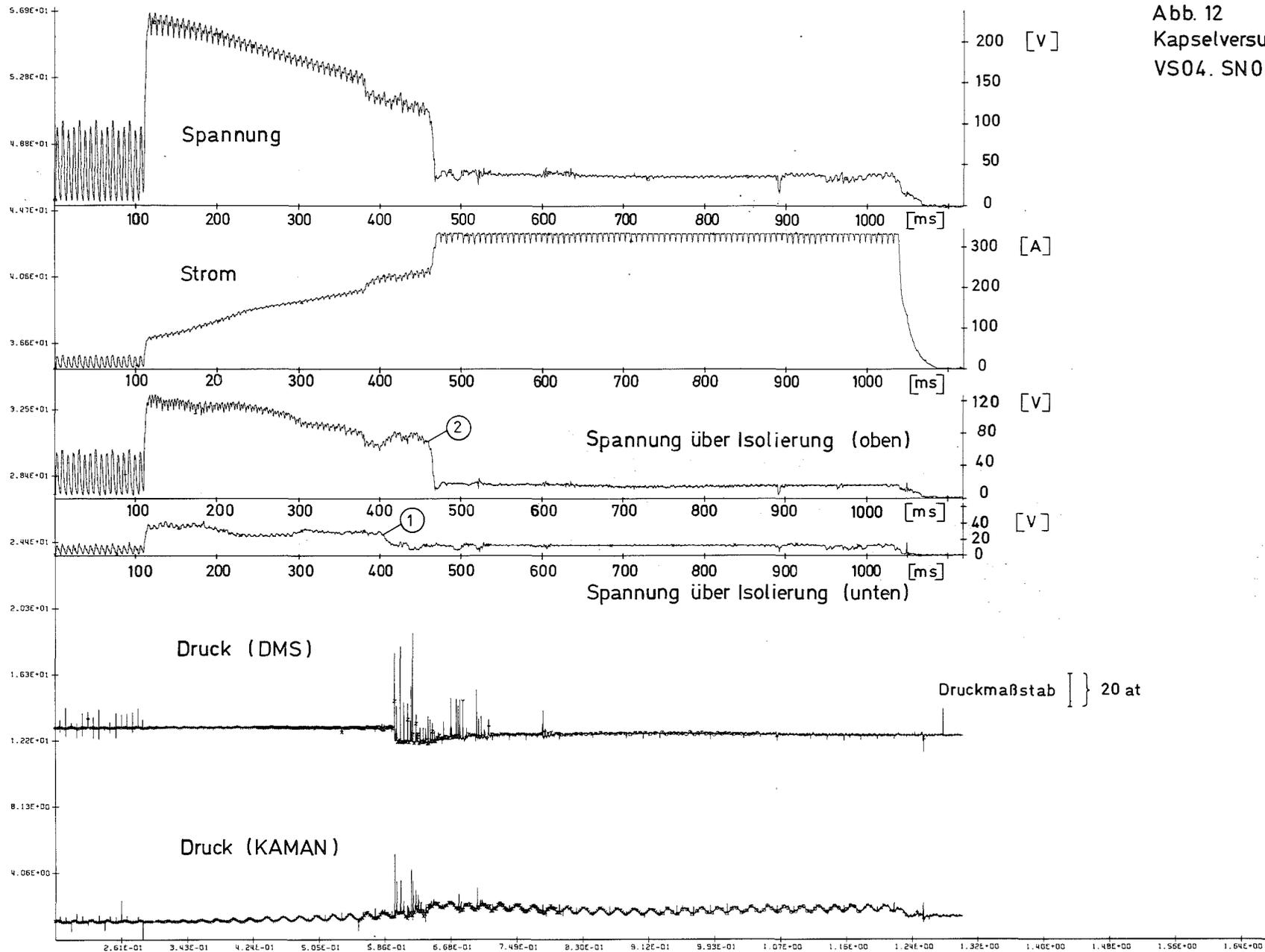


Abb. 11
 Natrium - Kapsel
 (schematische Darstellung)

Abb. 12
 Kapselversuch
 VS04. SN08



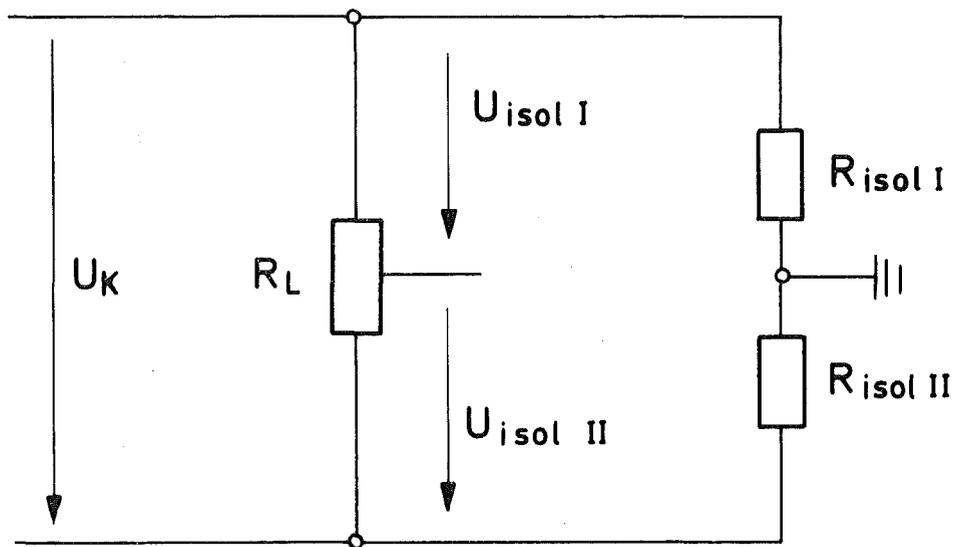


Abb. 13 Ersatzschaltbild des Brennstabes

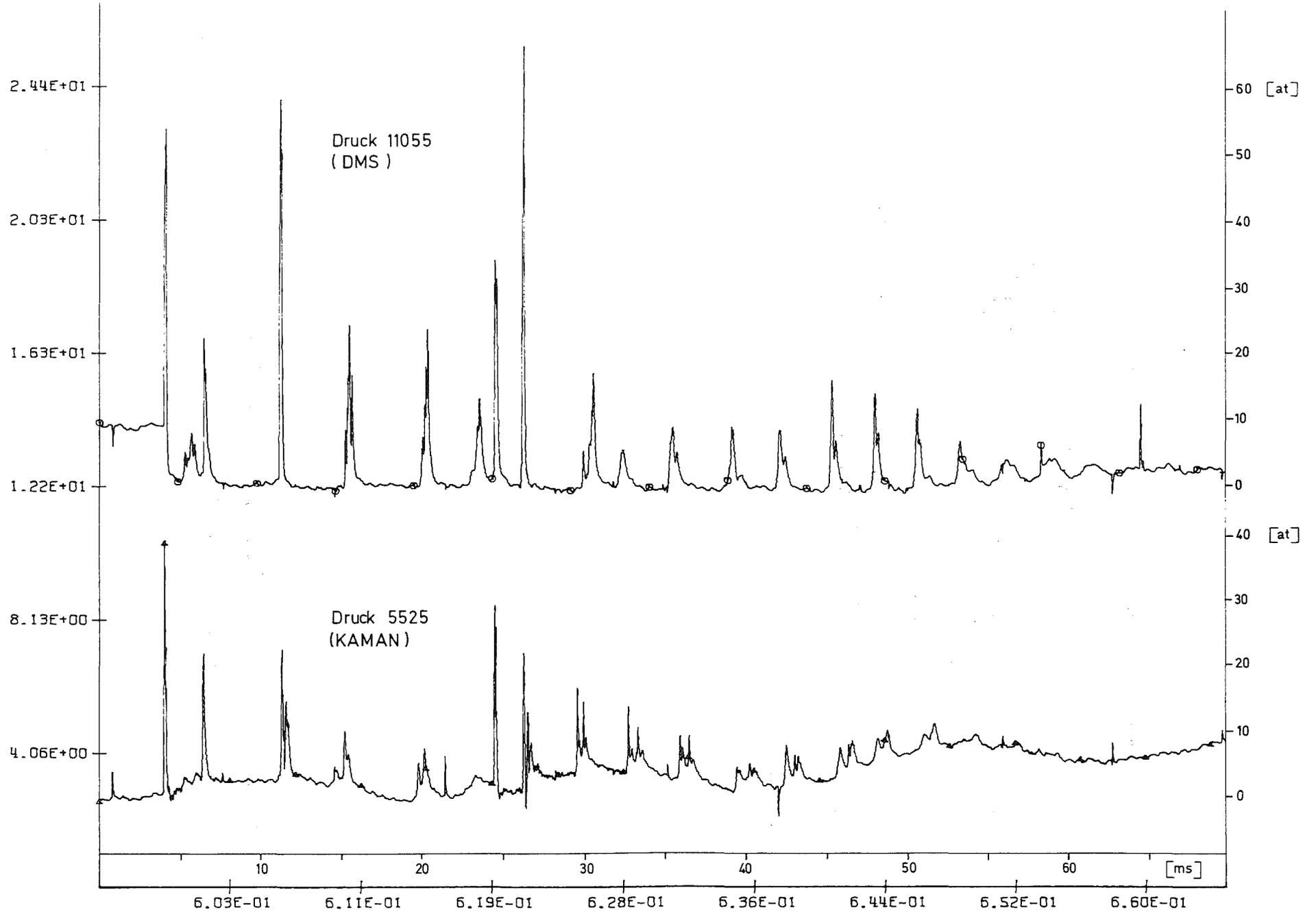


Abb. 14 VS04.SN08 V. 24.03.75 / PISS, PIZS (30 KHZ) VON 595 - 665 MS

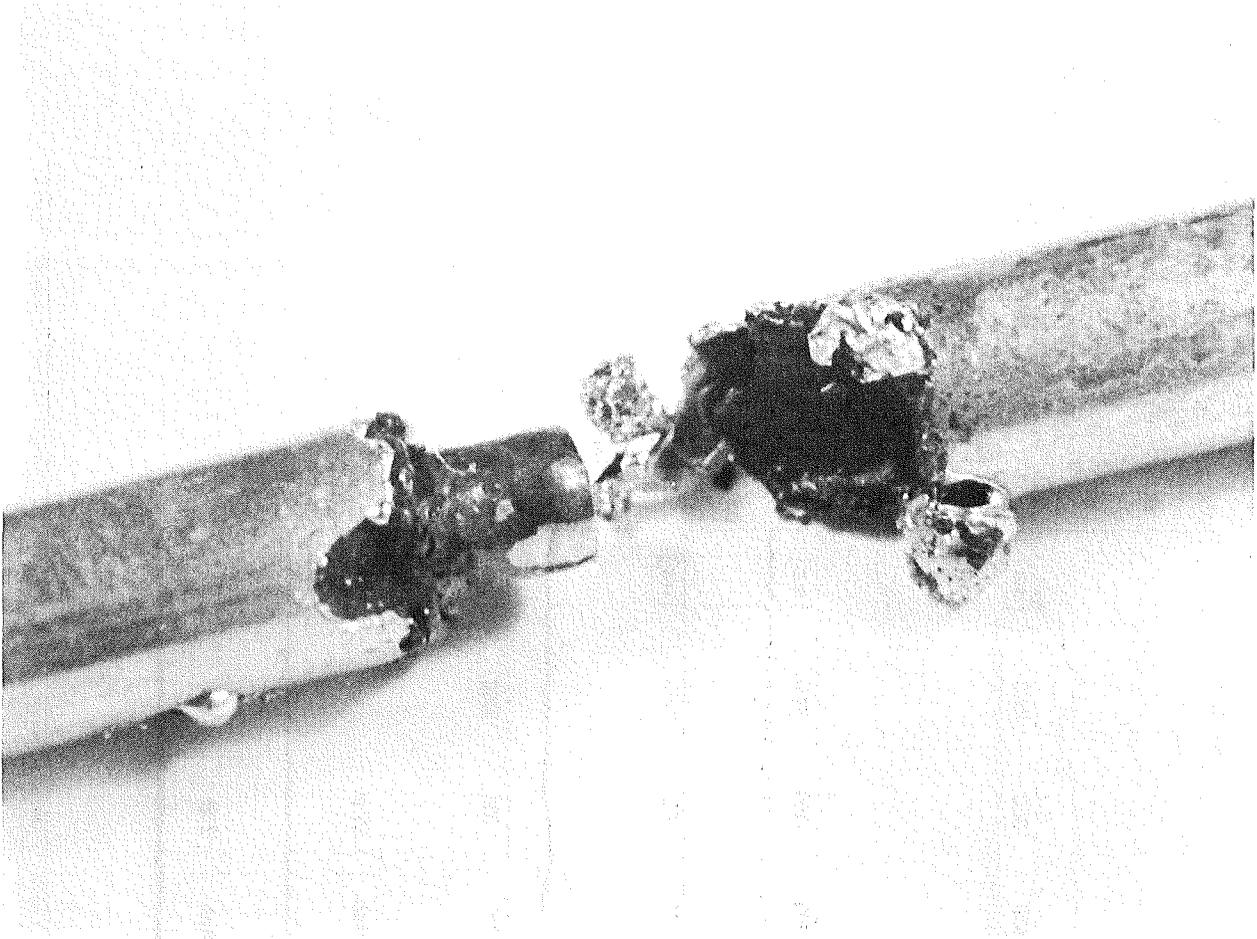


Abb. 15 Versagensstelle des Brennstabes

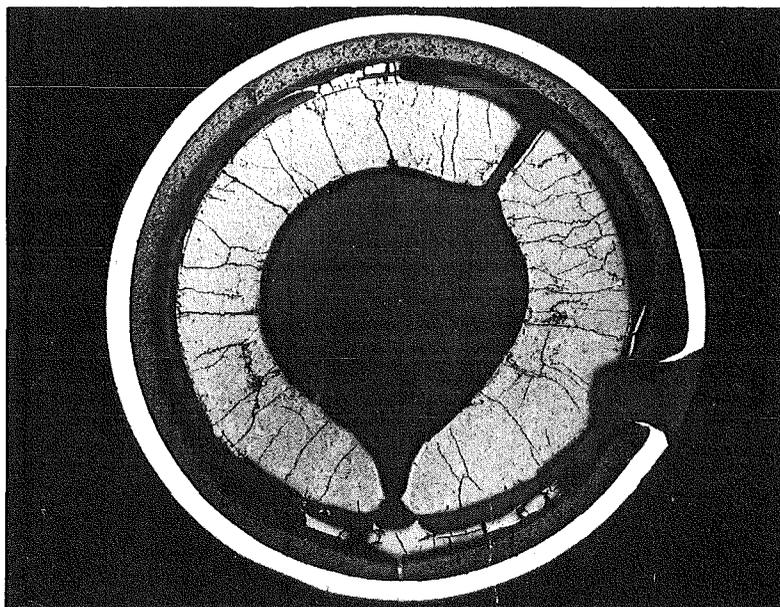


Abb.16 Querschnitt des Brennstabes

Abb.17
 Loopversuch
 VS05.SN01

