

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

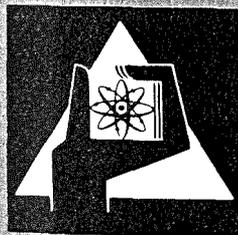
November 1977

KFK 2479

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde
für flüssige Metalle**

St. Müller, G. Thun



**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

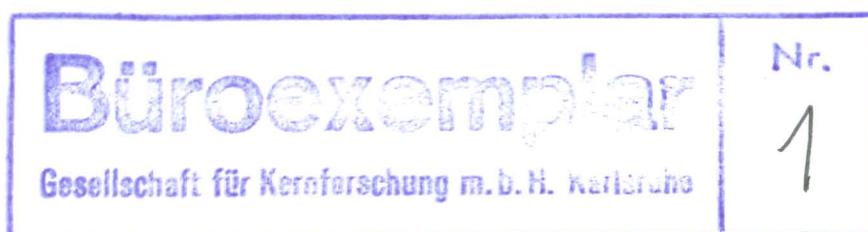
Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Schneller Brüter

KFK 2479

Permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde
für flüssige Metalle

St. Müller, G. Thun



Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. Karlsruhe

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Bericht werden Einzelheiten des Aufbaus und der Funktion einer besonderen Flüssigmetall-Durchflußmesser-Sonde vorgestellt. In dieser Sonde sind kleine Permanentmagnete eingebaut. Zur Durchflußmessung wird vornehmlich die Laufzeit der natürlichen Geschwindigkeitsfluktuationen zwischen zwei hintereinander angeordneten Magneten bestimmt.

Experimente haben gezeigt, daß die verwendeten AlNiCo 450-Magnete längere Zeit (10 000 h) bei erhöhten Temperaturen (600°C) erfolgreich eingesetzt werden können.

Die Durchflußmesser sind bereits in verschiedenen Versuchskreisläufen verwendet worden. Sie sind ebenfalls für den Einsatz im BR2- und KNK II-Reaktor vorgesehen.

Die Leistungsfähigkeit einer Miniatursonde (2 mm \varnothing) wird aufgezeigt und darüberhinaus die Anwendung der Sonde zur Bestimmung des Gasanteils in einer Na-Inertgas-Strömung vorgestellt.

Permanent Magnet Probe-type Flowmeter for Liquid Metal

ABSTRACT

In this paper details of the design and operation of a unique liquid metal flow meter probe are presented. Small permanent magnets are employed in the device. Flow rate measurements involve especially determination of the transit time for natural velocity fluctuations using a double-magnet configuration.

Experiments have shown, that the used AlNiCo 450-permanent-magnets performed successfully for long times (10 000 h) at elevated temperatures (600°C).

Flow meters have been employed in different test loops. They will be installed also in the BR2- and KNK II-reactors.

The performance of a miniatur probe (2 mm ϕ) and application of the device for the determination of the void fraction in a Na-inert gas stream are also presented.

Inhaltsübersicht

Seite

1.	Einführung	1
2.	Magnete zur Sondenherstellung, Anforderungen und Eigenschaften	2
2.1	Werkstoffauswahl	2
2.2	Magnetgeometrie	3
2.3	Feldverteilung am Magneten	4
2.4	Temperaturfestigkeit des Magneten	5
2.4.1	Reversible Magnetstärkeänderung mit der Temperatur	5
2.4.2	Verhalten bei zyklischem Aufheizen und Abkühlen	5
2.4.3	Dauerstandsfestigkeit bei gleichbleibender Temperatur	5
2.5	Strahlenbeständigkeit des Magneten	6
3.	Die permanentmagnetische Durchflußmessersonde	7
3.1	Das Funktionsprinzip	7
3.2	Aufbaumöglichkeiten einer Sonde	9
3.3	Geschwindigkeitsmessung mit dem statischen An- teil der Induktionsspannung	10
3.4	Durchflußbestimmung aus der Laufzeit der Geschwindigkeitsfluktuationen	11
4.	Anwendungsbeispiele	13
4.1	Genauere Durchflußbestimmung in Na-Kreisläufen	13
4.2	Messungen in einer Zweiphasenströmung Na-Gas	14
4.3	Messungen mit einer Miniatursonde	15
4.4	Doppelmagnetsonde für Experimente im BR 2	16
4.5	Doppelmagnetsonde für KNK II-Stopfenversuche	17
5.	Schlußbemerkungen	18
6.	Bezeichnungen	19
7.	Literatur	20

1. Einführung

Die magnetische Durchflußmessung beruht auf dem allgemeinen Induktionsgesetz. Sie ist wegen ihrer Einfachheit und der linearen Zusammenhänge die am häufigsten angewandte Meßmethode bei Flüssigmetallen.

Im folgenden werden hauptsächlich Durchflußmesser vorgestellt, bei welchen zwei oder drei Magnete hintereinander angeordnet sind. Die Vorteile dieser Anordnung liegen vor allem in der Möglichkeit, den Durchfluß nach der Laufzeitmethode unabhängig von Temperatur- und Alterungseinflüssen des Magneten zu ermitteln. Informationsträger sind dabei die in turbulenter Strömung stets vorhandenen Geschwindigkeitsfluktuationen.

Abb. 1 gibt eine Vorstellung, auf welche Weise eine Durchflußmessersonde über dem Core, also am Bündelaustritt, angeordnet werden kann. In der an der rechten Seite gezeigten Sonde sind drei Magnete für die 2 aus 3 Sicherheitsbeschaltung (Redundanz) angedeutet. Die Natriumtemperatur am Bündelaustritt ist mit 540°C angenommen. Aus Sicherheitsgründen sollen die Durchflußmesser noch Temperaturen um 600°C , kurzzeitig auch höher, standhalten.

Das Ziel des Vorhabens ist es daher, eine einfach aufgebaute und leicht aus der Instrumentierungsplatte natriumgekühlter Reaktoren austauschbare Durchflußmeßsonde zu entwickeln. Die Sonde soll in der Lage sein, den Durchfluß in einem Brennelement eines natriumgekühlten Reaktors über eine Einsatzzeit von mindestens einem Jahr auf einige Prozent genau zu messen und etwaige Durchflußstörungen möglichst schnell (< 1 Sekunde) anzuzeigen. Eine Sonde mit diesen Eigenschaften könnte einen wichtigen Beitrag zur Sicherheitsinstrumentierung natriumgekühlter Reaktoren leisten, aber auch generell in Flüssigmetallsystemen eingesetzt werden.

Für die kommerzielle Nutzung werden die Sonden ab 1.1.78 von der Fa. INTERATOM, D 5060 Bergisch Gladbach 1, in Lizenz der GfK-Karlsruhe gebaut und vertrieben.

2. Magnete zur Sondenherstellung - Anforderungen und Eigenschaften

Der Magnet ist der eigentliche Energiespeicher des Durchflußmeßsystems. Deshalb sollen seine Eigenschaften und sein Verhalten bei verschiedenen Belastungen näher betrachtet werden:

Der Dauermagnetismus wird durch elektrostatische Wechselwirkung innerhalb ferritischer Festkörper verursacht. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß die mittlere Spinrichtung einer größeren Anzahl von Elektronen benachbarter Elementarzellen übereinstimmt und auch dann noch erhalten bleibt, wenn das zur Magnetisierung verwendete äußere Feld abgeschaltet wird.

Die ferromagnetische Hysteresekurve (Abb. 2) liefert eine Aussage über den Verlauf der magnetischen Induktion B als Funktion der Feldstärke H . Wird an ein Ferromagnetikum eine Feldstärke H angelegt, dann verläuft die Induktion B zunächst nach der Neukurve und gelangt für $H = H_{\max}$ in die Sättigung. Wird anschließend die Feldstärke abgeschaltet, so fällt die Induktion nicht auf Null, sondern auf den Remanenzwert B_r . Wird nun der Magnet aus dem Magnetisierungsloch herausgenommen, so entmagnetisiert er sich teilweise wieder, d. h. der Magnet behält in Wirklichkeit nur die zum Gleichgewichtspunkt, dem Arbeitspunkt "C" im II. Quadranten der Hysteresekurve gehörende Induktion. Die Entmagnetisierungskennlinien eines Dauermagneten lassen sich daher in diesem Quadranten darstellen.

2.1 Werkstoffauswahl

Es war aus der Literatur /1/ bekannt, daß die titanhaltigen AlNiCo-Legierungen die besten Voraussetzungen für eine dem Anwendungszweck entsprechende Langzeit- und Temperaturstabilität besitzen. In Zusammenarbeit mit der Industrie, vor allem den TEW in Dortmund, wurde daher das titanhaltige, hochkoerzitive und handels-

Übliche Material AlNiCo 450 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Der Curie-Punkt dieses Werkstoffes liegt bei 890°C . AlNiCo 450 entspricht dem Werkstoff der Bezeichnung AlNiCo VIII wie es z. B von ANL (USA) für ähnliche Anwendungen ausgewählt wurde /2/.

Das Material besitzt folgende Zusammensetzung in Gew. %:

Al-Fe	7,2	Ni	14,0
Fe	34,3	Co	35,0
Cu	4,0	TiH ₂	5,5

In Abb. 3 sind die Entmagnetisierungskennlinien dieses Werkstoffes dargestellt. Parameter ist die Temperatur. Mit zunehmender Temperatur wird die Magnetenergie, die sich auch mit dem Produkt aus $B \cdot H$ darstellen läßt, immer kleiner.

2.2 Magnetgeometrie

Die Stabilität eines Magneten ist auch eine Funktion der Geometrie. Die Lage des Arbeitspunktes auf der Entmagnetisierungskennlinie wird bei stabförmigen Magneten mit rundem Querschnitt vom Dimensionsverhältnis l/d bestimmt. l ist die Länge des Magneten in Magnetisierungsrichtung, d die Dicke quer dazu. In gleicher Weise kann die Geometrie von diametral magnetischen, scheibenförmigen Magneten gekennzeichnet werden. Dies ist insbesondere im vorliegenden Fall zulässig, bei dem Querschnittverengungen quer zur Magnetisierungsrichtung infolge von Aussparungen für die Leistungsdurchführungen vorhanden sind (Abb. 3 links oben). Weiterhin sind in Abb. 3 die Geraden für die l/d Verhältnisse von 1, 2 und 4 eingezeichnet. Zusammen mit den $B \cdot H = \text{const}$ -Hyperbeln und den Entmagnetisierungskennlinien läßt sich daraus die optimale Geometrie ermitteln. Sie liegt im Bereich von $(l/d) = 2$, weil hier die $B \cdot H$ -Hyperbeln und die l/d -Linien einen günstigen (nahezu rechtwinkligen) Schnittwinkel ergeben.

2.3 Feldverteilung am Magneten

In den Abbn. 4, 5 und 6 sind die Feldstärkeverteilungen H in den drei räumlichen Richtungen dargestellt. Sie wurden für einen scheibenförmigen Magneten bestimmt, wie er für den Sondenaufbau verwendet wird.

Abb. 4 zeigt den Verlauf der Feldstärke bei axialer Verschiebung der Magnetfeld-Meßsonde (Hall-Sonde) in z -Richtung ($\hat{=}$ Strömungsrichtung des Na). Bereits nach 10 mm oberhalb und unterhalb der Magnetmitte ist die Feldstärke auf Null abgesunken. Bei einer Doppelanordnung der Magnete sollte der Abstand von Magnet-Mitte zu Magnet-Mitte so gewählt werden, daß sich die beiden Magnetfelder nicht gegenseitig beeinflussen. Für einen Magneten von 14 mm Durchmesser und 7 mm Höhe ist daher ein Abstand von 20 mm ausreichend.

Abb. 5 zeigt den Verlauf der Feldstärke bei radialer Verschiebung der Hall-Sonde in x -Richtung. In einem Abstand von 30 mm von der Mitte eines Magneten mit den oben angegebenen Maßen ist die Feldstärke vernachlässigbar klein geworden. Der Abfall zeigt daher die Grenzen für die Wirksamkeit des Magnetfeldes im durchströmten Ringkanal.

Abb. 6 zeigt den Verlauf der Feldstärke in Polarkoordinatendarstellung für den Fall der Draufsicht auf den Magneten. Im Polscheitel erscheinen wieder die auch in Abb. 4 und 6 ersichtlichen 80 mT als Maximalwerte. Zwischen den Polen, also bei 90° und 270° Drehung, ist keine Feldstärke vorhanden.

Aus den gezeigten Verläufen ist zu entnehmen, daß der Magnet ein flaches, hantelförmiges Kraftfeld besitzt, welches im Vergleich zur Größe des Magnetes relativ weit in den Meßraum hineinreicht.

2.4 Temperaturfestigkeit des Magneten

2.4.1 Reversible Magnetstärkeänderung mit der Temperatur

Die Feldstärke nimmt, wie am Verlauf der Entmagnetisierungskennlinie (Abb. 3) ersichtlich, mit steigender Temperatur ab. Abb. 7 zeigt den Feldstärkeverlauf gemessen an der ausgewählten Magnetgeometrie bis 650°C . Danach beträgt die Minderung bei 600°C 14 % und bei 650°C 18 %. Ähnliche Werte wurden auch von Dietrich /1/ gemessen.

2.4.2 Verhalten bei zyklischem Aufheizen und Abkühlen

In einen Versuch wurde der Magnet einem dauernden Temperaturwechsel zwischen 20°C und 600°C unterzogen, um den Einfluß zyklischer Temperaturwechsel auf die Feldstärke zu untersuchen.

Die Kurve zeigt den Abfall der Feldstärke bei Raumtemperatur, die untere Kurve bei 600 bzw. 650°C in Abhängigkeit von der Zyklenzahl. Der parallele Abstand der Kurven entspricht den reversiblen Verlusten nach Abb. 7. Die bleibenden Verluste betragen nach 550 Zyklen, die sich über ein halbes Jahr erstreckten, ca. 4 %. Sie erhöhten sich nach weiteren 50 Zyklen bei 650°C auf 15 %.

2.4.3 Dauerstandsfestigkeit bei gleichbleibender Temperatur

Von besonderem Interesse war die Langzeitstabilität des Magneten bei Dauertemperaturen um 600°C . Dazu wurden Versuche in unserem Auftrag beim Hersteller der Magnete den TEW in Dortmund durchgeführt. In drei Meßanordnungen mit unterschiedlicher Temperatur wurden je 10 Magnete ununterbrochen ein Jahr lang betrieben. Diese Anordnungen oder Öfen mußten so gebaut werden, daß die Magnetstärken bei der jeweiligen Betriebstemperatur vermessen werden konnten.

Abb. 9 zeigt eine Ansicht der Versuchseinrichtung; rechts die drei Öfen mit wassergekühlten Meßeinrichtungen, links die Temperaturregel- und Registriereinheit.

In Abb. 10 sind die Ergebnisse dargestellt. Über der Betriebszeit in Tagen ist die Feldstärke aufgetragen. Diese wurde für jeden Magneten beim erstmaligen Erreichen der Solltemperatur gleich 100 % gesetzt. Betrachtet man z. B. die bei 600°C eingesetzten Magnete, so zeigt sich, daß nach 50 Tagen ein Feldstärkeabfall einsetzt; nach einem Jahr waren noch 64 % der Anfangsfeldstärke vorhanden, extrapoliert auf 2 Jahre wären noch ca. 50 % vorhanden.

Aus Versuchen von ANL /2/ wurde zusätzlich ein Wert in die Abb. 10 eingezeichnet. Es ist ein wesentlich früherer Abfall auf 60 % ersichtlich. Dies kann mit dem gewählten ungünstigen l/d -Verhältnis (0,18) erklärt werden, da für dieses Verhältnis die Langzeitstabilität geringer ist /1/.

2.5 Strahlenbeständigkeit des Magneten

Neben der Temperaturbelastung ist der Magnet im Reaktor auch der dort herrschenden radioaktiven Strahlung ausgesetzt. Zur Strahlenbeständigkeit von Magneten sind nur wenige Aussagen in der Literatur zu finden, z. B. in /3/ und /4/. Daraus lassen sich nur geringfügige Änderungen der Magnetisierung teils in positiver, teils in negativer Richtung ersehen. Eine direkte Übertragung auf das hier betrachtete Material und die ausgewählte Geometrie ist jedoch nicht möglich.

In einem eigenen Bestrahlungsvorhaben, Mol 3K im belgischen Reaktor BR2, soll deshalb das Magnetstärkeverhalten bei gleichzeitiger Temperatur (600°C) und Strahlenbelastung (bis zu $1,5 \times 10^{21}$ nvt, $E > 0,1$ MeV) untersucht werden. Der Reaktoreinsatz erfolgt voraussichtlich Ende 1977. Diese Arbeiten werden gemeinsam mit dem Institut für Material- und Festkörperforschung

(IMF) durchgeführt. Von den Verfassern wurde dazu die in Abb. 11 gezeigte Durchflußmesser- und Magneteinheit fertiggestellt. Mit dieser Einrichtung ist es möglich, in der abgeschlossenen Kapsel über ein Faltenbalgsystem eine Bewegung des Natriums im Durchflußmesserspalt zu erzeugen und aus dem Durchflußmessersignal auf die Stabilität der Magnete während der Einsatzdauer, von zunächst 1/2 Jahr, zu schließen. Die Aufheizung der Magnete wird dabei durch γ -Strahlen-Absorption hervorgerufen. Da die Co-haltigen Magnete im Reaktor aktiviert werden, müssen die Nachbestahlungsuntersuchungen in den Heißen Zellen durchgeführt werden. Der Einsatz von Hall-Sonden zur Magnetvermessung bei gleichzeitigem Vorhandensein einer γ -Strahlung wurde erprobt. Die Hall-Sonden sind für die zu erwartende Meßdauer von einigen Stunden ausreichend stabil /5/.¹⁾

3. Die permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde

3.1 Das Funktionsprinzip

Die Funktion eines permanentmagnetischen Durchflußmessers beruht auf dem Induktionsgesetz. Ein elektrischer Leiter, im vorliegenden Fall das flüssige Natrium, schneidet magnetische Kraftlinien; als Folge davon werden Spannungen induziert. Diese Spannungen sind ein direktes Maß für die mittlere Na-Geschwindigkeit.

In der Abb. 12 ist das Funktionsprinzip dargestellt, oben für einen konventionellen Durchflußmesser mit Außenmagneten und unten für die hier vorgestellte Durchflußmesser-Sonde mit Innenmagneten und den zugehörigen inneren Elektrodenableitungen.

Für die Außenmagnetanordnung mit theoretisch unendlich langem und homogenen Feld über dem Meßrohr gilt nach dem Induktionsgesetz für die Spannung E an den Abnahmepunkten;

$$E = \bar{v} \cdot H \cdot D \cdot K$$

1) In /5/ sind noch weitere Arbeiten der Verfasser zum Thema permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde aufgeführt.

darin bedeuten:

\bar{v} = mittlere Na-Geschwindigkeit

H = magnetische Feldstärke

D = Rohrdurchmesser

K = zusammengefaßter Korrekturfaktor für Temperatur-, Strahlen- und Alterungseinflüsse des Magnetmaterials, Shuntwirkung der Rohrwand, Permeabilität des Mediums.

Bei der Innenmagnetanordnung steht zwar das Magnetfeld nach wie vor senkrecht auf der Geschwindigkeit, ist aber über dem durchströmten Ringraumquerschnitt nicht homogen, deshalb geht hierbei theoretisch auch noch das Geschwindigkeitsprofil mit ein. Es gilt hier für die Spannung E zwischen den Elektrodenpunkten a und b

$$E = K \int_a^b (\vec{v} \times \vec{H}) \, d\vec{s}$$

darin bedeuten:

$\vec{v} \cong$ örtliche Geschwindigkeit des leitfähigen Mediums

$\vec{H} \cong$ örtliche Feldstärke

$d\vec{s} \cong$ Wegelement auf dem Weg von a nach b

Bei den praktischen Messungen in den unter Abschnitt 3.3 genannten Grenzen für r_2 zeigt sich jedoch, daß der Einfluß des Geschwindigkeitsprofils auf die Signalspannung sehr klein (unter 1 %) ist. Deshalb dürfen die Spannungen (für r_1 und $r_2 = \text{const.}$) als direkt proportional zur Geschwindigkeit angenommen werden (s. Abb. 16).

Das Zeitverhalten der Spannung E bei angenommener, sprungförmiger Änderung von v läßt sich mit einem RL-Glied vergleichen. Ist L die Induktivität im Strömungskanal und R der Widerstand, den die Wirbelstromlinien erfahren, so läßt sich die Zeitkonstante T des Systems aus der Beziehung

$$T = \frac{L}{R}$$

ermitteln.

Die Werte liegen für die hier betrachteten Sonden- und Kanalgrößen weit unter 1 ms. Das System registriert demnach die in der Praxis vorkommenden Massenbeschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsrampen nahezu verzögerungsfrei.

Um die Shuntwirkung der Rohrwand klein zu halten, wird man die Wanddicke nicht zu groß ansetzen (0,5 mm) und die elektrische Leitfähigkeit des Materials klein wählen (z. Edelstahl).

3.2 Aufbaumöglichkeiten einer Sonde

Eine Sonde mit der hier gewählten scheibenförmigen Magnetform läßt sich auf verschiedene Weise und je nach gewünschtem Verwendungszweck aufbauen (Abb. 13). Bei einer Sonde mit mehreren Magneten sind unterschiedliche Anordnungen denkbar: Nord über Nord und Süd über Nord.

Die abstoßende, bzw. anziehende Wirkung des Magneten ist aus dem Feldlinienverlauf gut zu erkennen. Es ist auch ersichtlich, daß die Feldlinien in der Anordnung mit abstoßendem Verlauf (Abb. 13b) günstiger zur Strömungsrichtung stehen und weiter in den Kanal hineinreichen. Mit der Doppelanordnung (Abb. 13 b und c) ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, die Geschwindigkeit aus der Laufzeit der Geschwindigkeitsfluktuationen vom ersten zum zweiten Magneten zu bestimmen. Die Bauform mit 3 Magneten (Abb. 13d) kann für die Sicherheitsbeschaltung 2 aus 3 (Redundanz) verwendet werden. An der Dreifachsonde läßt sich die Laufzeitmessung entsprechend vom ersten Magneten zum zweiten, vom ersten zum dritten sowie vom zweiten zum dritten Magneten durchführen.

Wie bereits in 2.3 erwähnt, sollte der Abstand der Magnete so bemessen sein, daß die Signalspannungen (diese sind über die gleiche Rohrwandung gekoppelt) sich gegenseitig nicht oder nur wenig beeinflussen. Wird der Abstand der Magnete über dieses notwendige Maß wesentlich vergrößert, so vermindert sich die

Ähnlichkeit der Fluktuationssignale und damit die Genauigkeit der Laufzeitmessung.

3.3 Geschwindigkeitsmessung mit dem statischen Anteil der Induktionsspannung

Nach dem in 3.1 genannten Gesetz ist die Induktionsspannung ein direktes Maß für die Flüssigmetall-Geschwindigkeit. In den erfaßten Bereichen ist der Zusammenhang bei jeweils konstanter Temperatur linear.

Abb. 14 zeigt die Kennlinienschar einer Sonde, Parameter ist die Temperatur. Mit steigender Temperatur nimmt die Spannung bei gleichbleibendem Durchfluß ab (reversible Feldstärkeabnahme). Die Messung selbst ist eine einfache Gleichspannungserfassung, es bedarf also keiner speziellen Meßelektronik. Sollen schnelle Geschwindigkeitsrampen erfaßt werden, und diesen folgt das System fast trägheitslos, sind entsprechend schnelle Verstärker oder Aufzeichnungsgeräte zu verwenden.

Das Signalverhalten einer Sonde bei verschiedenen Ringkanalquerschnitten ist mit der in der Abb. 15 gezeigten Anordnung untersucht worden.

Mit auswechselbaren Verdrängerkörpern mit einem Bohrungsdurchmesser von 17, 20, 30, 50 und 80 mm wurde der Strömungskanal um die Sonde variiert. Die Sonde selbst besitzt einen Durchmesser von 15 mm. Mit kleiner werdendem Bohrungsdurchmesser des Verdrängerkörpers steigt bei gleichem Volumenstrom die vom Durchflußmesser abgegebene Spannung an, da sich in diesem Fall die Natriumgeschwindigkeit erhöht (Abb. 16).

3.4 Durchflußbestimmung aus den dynamischen Signalanteilen, aus der Laufzeit der Geschwindigkeitsfluktuationen

Diese Methode baut auf dem Tatbestand auf, daß bei turbulenten Strömungsvorgängen Wirbel unterschiedlicher Größe vorhanden sind, die sich mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit fortbewegen.

Diese Wirbel erzeugen stochastische Schwankungen des Meßsignals, die dem statischen Mittelwert überlagert sind.

Für viele Messungen z. B. Laufzeitmessungen oder Siededetektion in Na ist daher die Kenntnis dieser Geschwindigkeitsschwankungen von Bedeutung. Als Beispiel ist in Abb. 17 das Leistungsdichtespektrum eines Sondersignals bei einem Durchfluß von $3,8 \text{ m}^3/\text{h}$ gezeigt, Parameter ist wiederum der Bohrungsdurchmesser des Verdrängerkörpers. Demnach nehmen die Amplituden der Schwankungen im kleineren Querschnitt ab, werden aber hochfrequenter. In Abb. 18 ist das Leistungsdichtespektrum für einen Bohrungsdurchmesser von 30 mm in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigen die Amplituden der Leistungsdichten (besseres Signal- zu Rausch-Verhältnis) und die Anteile höherer Frequenzen an (kürzere Meßzeiten).

Ordnet man zwei Magnete hintereinander an, so erhält man im Idealfall identische Signale, jedoch um die Laufzeit τ verschoben (Abb. 19). Bei praktischen Messungen vermindert sich jedoch die Ähnlichkeit der Signale mit zunehmendem Abstand zwischen den beiden Magneten.

Bei ausgeprägten Signalen, schematisch in Abb. 20 gezeigt, läßt sich die Laufzeit direkt aus der Darstellung über der Zeit, z. B. an einem Oszillographen, ablesen. Genauer läßt sich diese Laufzeit aus der Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Geschwindigkeitsfluktuationssignale ermitteln. Diese besitzt an der Stelle $\tau = \tau_{\text{max}}$ ein Maximum (Abb. 22). Mit dem Laufzeitkorrelator nach /10/, der eine autom. Maximumsuche besitzt, wird ein der Geschwindigkeit entsprechendes analoges Signal auch direkt ausgegeben.

Aus der einfachen Beziehung $\bar{v} = s/\tau_{\max}$
mit $s =$ Magnetmittenabstand (= Elektrodenabstand)
erhält man die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} .

Für den Volumendurchfluß \dot{Q} gilt: $\dot{Q} = \frac{V_R}{\tau_{\max}}$

V_R = Volumen des Ringraumes zwischen Magnet A und B
 τ_{\max} = Laufzeit zwischen Magnet A und B

Die Formeln berücksichtigen nur noch die Geometrie bzw. die über die Korrelation ermittelte Laufzeit. Von den anderen genannten Einflußfaktoren wie Temperatur, Alterung, Shuntwirkung, etc., ist man mit dieser Methode unabhängig geworden.

Unter Verwendung der oben genannten Anordnung mit fünf verschiedenen Durchflußquerschnitten (Abb. 15) wurde der Volumenstrom \dot{Q}_L nach der Laufzeitmethode bestimmt und mit dem aus der Anzeige des Durchflußmessers der Betriebsinstrumentierung ermittelten Volumenstrom \dot{Q}_1 verglichen (Abb. 21). Das Verhältnis $(\dot{Q}_L - \dot{Q}_1)/\dot{Q}_1$ aufgetragen über \dot{Q}_1 läßt so die prozentuale Abweichung bei den verschiedenen Querschnitten erkennen.

An diesem Beispiel wird die Leistungsfähigkeit aber auch die Grenze für eine feste Sondengeometrie sichtbar. Bei dem sehr engen Kanalquerschnitt mit $D = 17$ mm ist eine genaue Bestimmung des Volumensstromes über die Laufzeitmessung nicht mehr möglich. Aus den Messungen geht hervor, daß sich der Absolutwert des Durchflusses beim Einhalten des Geometriebereiches

$$1,3 \leq \frac{D}{d} \leq 3$$

und des Durchflußbereiches:

$$1,5 \leq \dot{Q} \text{ [m}^3\text{/h]} \leq 10$$

nach der Laufzeitmethode auf ca. ± 2 % Genauigkeit direkt bestimmen läßt. Diese Bereiche und Genauigkeiten sind für die meisten Anwendungen ausreichend. Da die Geometrie während der Einsatzdauer der

Sonde konstant bleibt, die Laufzeit sich also nur in Abhängigkeit vom Volumenstrom ändert, kann mit der Laufzeitmethode unabhängig von der Einsatzdauer der Magnete stets der richtige Volumenstrom gemessen werden. Darüberhinaus können die an einer solchen Doppelsonde gemessenen statischen Anteile (= Mittelwerte) der Induktionsspannung, die von der Temperatur und anderen Einflußfaktoren abhängen, immer auf den richtigen Durchflußwert bezogen bzw. korrigiert werden (In-pile-Eichung).

Ein weiteres Beispiel für die Genauigkeit der Durchflußbestimmung aus der Laufzeitmessung ist mit einer kleineren Doppelsonde im folgenden Abschnitt (4.1) aufgezeigt und dort auch mit anderen Verfahren verglichen.

4. Anwendungsbeispiele

4.1 Genaue Durchflußbestimmung in Na-Kreisläufen

Mit einer in einem Kanal von 12 mm Durchmesser eingesetzten Doppelsonde von 7,6 mm Durchmesser, sind über die Laufzeit Massenströme (\dot{m}_L) gemessen worden. Zusammen mit den aus 3 weiteren, unabhängigen Meßmethoden:

- dem Auslitern (\dot{m}_A)
- der Wärmebilanz (\dot{m}_W)
- und dem als geeicht gekauften Kreislaufdurchmesser (\dot{m}_D)

ermittelten Werten, wurden Untersuchungen zur Genauigkeit durchgeführt /6/.

Die Abb. 23 zeigt die Ergebnisse. Es ist eine gute Übereinstimmung aller Verfahren mit dem Kreislaufdurchflußmesser bis zu den höchsten Werten (sie entsprechen ca. 20 m/s) ersichtlich.

Hierzu ein Rechenbeispiel:

Für die oben genannten Sonden- und Kanalabmessungen sowie einem Magnetabstand $s = 10$ mm ergibt sich bei einer gemessenen Laufzeit von $\tau_{\max} = 0,9$ ms, wie im vorhergehenden Abschnitt (3.4) beschrieben und in Abb. 22 dargestellt, die mittlere Natriumgeschwindigkeit v zu:

$$\bar{v} = \frac{s}{\tau_{\max}} = \frac{10}{0,9} = 11,1 \text{ m/s}$$

Für das Ringraumvolumen zwischen Magnet A und B mit $V_R = 0,68 \text{ cm}^3$ errechnet sich für dieses Beispiel der Volumendurchfluß:

$$\dot{Q}_L = \frac{V_R}{\tau_{\max}} = \frac{0,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}{0,25 \cdot 10^{-6} \text{ h}} = 2,72 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.2 Messungen in einer Zweiphasenströmung Na-Gas

Werden im Na-Strom Gasblasen mittransportiert, so stören diese beim Durchgang durch das Magnetfeld an der Sonde die Ausbildung der Wirbelstromlinien. Dies macht sich entsprechend im gemessenen Spannungsverlauf bemerkbar.

In Abb. 24 ist dieser Verlauf über die Zeit schematisch dargestellt. Ohne Gas ist das nur mit geringen Geschwindigkeitsfluktuationen überlagerte Signal gezeigt. Wird nun in den Kreislauf unterhalb der Durchflußmesser-Sonde Gas eingegeben, so wird zunächst die ganze Na-Säule beschleunigt, was die Sonde sofort als Geschwindigkeitszunahme anzeigt. Es stellt sich ein Spannungspegel ein, der der neuen Na-Geschwindigkeit entspricht (= Anfangsgeschwindigkeit vermehrt um den Gasvolumenanteil im Leistungsstück unterhalb der Sonde). Erreicht eine Gasblase die Sonde, so sinkt während der Durchlaufzeit durch das Magnetfeld die Spannung ab. Die Spannung fällt bei großen Blasen (z. B. Ringkolben) auf Null.

Aus der Dauer des Signalabfalls (Laufzeit der Gasblase) kann man vereinfacht durch Summieren der mittleren Peakbreiten direkt auf den prozentualen Gasvolumenanteil schließen.

Dazu sind einige Beispiele in den Abbn. 25 bis 27 wiedergegeben. Diese Signale wurden mit der Sonde von 7,6 mm \emptyset im 12 mm-Kanal aufgenommen.

Die in die Teststrecke kontinuierlich eingespeiste Gasmenge (Argon) wurde über Gasdurchflußmesser überwacht /7/, der einphasige Natriumdurchsatz wurde mit dem geeichten Kreislaufdurchflußmesser bestimmt.

Abb. 25 zeigt Einzelblasen an den Sonden A und B. Hierbei liegt wie in den beiden folgenden Bildern Gas oben und Na unten. Es ist die Laufzeit und auch ein geringes Übersprechen von Signal A auf B und umgekehrt sichtbar: Der kleine Peak unmittelbar nach dem Hauptpeak im Signal der Sonde A rührt vom Hauptpeak der Sonde B her und umgekehrt. Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, tritt diese gegenseitige Beeinflussung der Sondersignale nur bei kleinen Abständen der Magnete auf.

Abb. 26 zeigt einen Vergleich von Chen-Sonden-Signalen (örtliche Messung im Ringkanal) mit den Magnetsonden-Signalen (über den Ringkanal integrierend) bei einem Gasvolumenanteil von 20 %. Die Chen-Sonde zeigt wegen der örtlichen Messung weniger Gasanteil an.

Abb. 27 zeigt den Vergleich bei ca. 55 % Gasvolumenanteil. Bei diesen Verhältnissen unterscheiden sich die Signale der beiden Sonden nicht mehr so stark, weil hier großvolumige Gaskolben vorherrschen, die nahezu den ganzen Ringraum umfassen.

4.3 Messungen mit einer Miniatursonde

Bei sonst gleichbleibendem Aufbau wurde eine Sonde mit ca. 2 mm Außendurchmesser gebaut. Der Magnet hat dabei noch eine Länge von ca. 1 mm. Das Dimensionsverhältnis $l/d = 2$ wurde ebenfalls beibehalten.

Mit dieser kleinen Sonde kann die Geschwindigkeit in einem örtlichen Volumenelement bestimmt werden. In den Abbn. 28 und 29 ist die Signalstärke über der Na-Geschwindigkeit aufgetragen.

Die Signalhöhe ist ab ca. 0,5 m/s ausreichend. Eine Verstell-
einrichtung für die Sonde unter Na ist in Vorbereitung, es soll
versucht werden, ein Geschwindigkeitsprofil auszumessen.

4.4 Doppelmagnetsonde für Experimente im BR 2

Für die in-pile-Untersuchungen (des Instituts für Reaktorent-
wicklung) eines Stabbündels bei Kühlungsstörungen, Vorhaben Mol-
7C, wurde die Verwendbarkeit der Doppelmagnet-Sonde anstelle des
bis dahin vorgesehenen Wirbelstrom-DFM der Fa. Interatom und
Kaman geprüft /8/. Dazu wurde ein Modell der für den Einsatz im
Reaktor gebauten Teststrecke mit den permanentmagnetischen
Durchflußmessern ausgerüstet und an den out-of-pile-Natriumkreis-
läufen NSK(IRE) und WÖP II (IRB) betrieben /9/.

Abb. 30 zeigt schematisch die Teststrecke mit der Position der
Sonden am Einlauf und Auslauf. Abb. 31 zeigt diese Einbauposi-
tionen etwas genauer. Der Einbau einer Kanalverengung von 50 mm
Ø auf 30 mm Ø brachte eine wesentliche Verbesserung des Signal-
pegels und der überlagerten Schwankungen.

In Abb. 32 oben sind diese Signale für die beiden Kanaldurch-
messer wiedergegeben. Bei einem Durchsatz von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ sind die
Schwankungshöhen von 12,5 % auf 2,8 % abgesunken, bezogen auf
den jeweiligen Signalmittelwert. Wie erwartet ist das Signal
im engen Kanal jedoch hochfrequenter.

Ebenfalls für einen Durchsatz von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ (bei gleicher Einbau-
position in der gleichen Modell-Teststrecke) wurde das Signal
des genannten Interatom-DFM in Abb. 32 unten dargestellt. Ver-
glichen mit dem Zustand ohne Verdrängerkörper bei der Magnet-
Sonde, weist der Interatom-DFM größere (22 %) und langsamere
Schwankungen auf. Diese Unterschiede sind wahrscheinlich durch
das Übertragungsverhalten des Trägerfrequenzsystems bedingt,
da dieses System nur niederfrequente Signale erfassen kann.

Die Testergebnisse der Doppelmagnetsonde für Mol 7C Verhältnisse waren insgesamt befriedigend. Für die weiteren Mol 7C-Reaktoreinsätze wurde deshalb diese Sondenform vorgesehen. Von den Verfassern sind inzwischen 3 Doppelsonden nach Abb. 33 und 34 fertiggestellt, geprüft und abgeliefert worden.

Einzelheiten wie Elektrodenart, Elektrodenlänge, Durchführungs-lötungen, Schweißnahtausführungen usw. sind aus der Zeichnung in Abb. 35 ersichtlich.

4.5 Doppelmagnetsonde für KNK II-Stopfenversuche

Für die Pos. 626/1 (Zentralposition) des Versuchsreaktors KNK II ist ebenfalls der Einsatz einer Doppelmagnetsonde für Meß- und Testzwecke vorgesehen. Da die Einsatzzeit dieses Stopfens ca. 1 Jahr betragen soll, werden diese Versuche die genannten Bestrahlungstests im BR 2, Mol 3K gut ergänzen, die Bedingungen Schnelles Core, Temperatur und Position entsprechen hier gut den Verhältnissen an einem SNR.

Ein weiterer Einsatz der Doppelmagnetsonden ist für den nuklearen Siedegenerator im KNK II geplant. Hierzu ist in /11/ ein ausführlicher Vergleich verschiedener Durchflußmesser durchgeführt worden. Es ist vorgesehen, sechs Doppelmagnetsonden in den Instrumentierungsstopfen der Zentralposition des KNK II einzubauen (Abb. 3b).

Dies ist ein Beispiel dafür, wie man durch Unterteilen in definierte Unterkanäle (je 30 Ø) auch in größeren Komponenten mit der Sonden-geometrie von 15 Ø messen kann.

5. Schlußbemerkungen

Die Grundlagenuntersuchungen an Dauermagnet-Durchflußmessersonden für Flüssigmetalle sind vom IRB zum größten Teil abgeschlossen; die Ergebnisse der Bestrahlungstests stehen jedoch noch aus. Die noch geplanten Arbeiten sind jetzt hauptsächlich anwendungstechnischer und begleitender Art.

Für die Magnete konnte in den Temperatur- und Dauerstandstests die Leistungsfähigkeit aber auch die obere Grenze aufgezeigt werden.

In Anbetracht der Tatsache, daß man mit einer Doppelmagnetanordnung und der Kreuzkorrelation der Geschwindigkeitsfluktuationen innerhalb bestimmter Bereiche von diesen Einflußfaktoren unabhängig geworden ist, haben sich jedoch dem System wieder neue Möglichkeiten und Einsatzgebiete aufgetan.

Für die kommerzielle Nutzung werden die Sonden ab 1.1.78 von der Fa. INTERATOM, D 5060 Bergisch Gladbach 1, in Lizenz der GfK-Karlsruhe gebaut und vertrieben.

6. Bezeichnungen

B [mT]	=	magnetische Induktion
H [Oe]	=	magnetische Feldstärke
X	=	Arbeitspunkt des Magneten
l	=	Länge des Magneten in Magnetisierungsrichtung
d	=	Dicke des Magneten quer zur Magnetisierungsrichtung
E [mV]	=	Quellspannung des DFM
v [m/s]	=	mittlere Na-Geschwindigkeit
D [mm]	=	Rohr- oder Kanaldurchmesser
K	=	Korrekturfaktor
r ₁	=	Radius der Sonde
r ₂	=	Radius des Durchflußkanals (= D/2
T [s]	=	Zeitkonstante
L [H]	=	Induktivität des durchströmten Kanals
R [Ω]	=	wirksamer Widerstand den die Wirbelstromlinien im durchströmten Kanal erfahren
s [mm]	=	Mittenabstand der Sondenmagnete
τ [s]	=	Laufzeit
Q̇ [m ³ /h]	=	Volumendurchfluß
ṁ [kg/h]	=	Massendurchsatz
A	=	erster Magnet in Strömungsrichtung
B	=	zweiter Magnet in Strömungsrichtung
V _R	=	Ringraumvolumen zwischen Magnet A und B

7. Literatur

- /1/ Dietrich, H.Z. angew. Phys. 21 (1966) 125-129;
Kobalt Nr. 30 (1966) 3-16
- /2/ F. Verber and G.A. Forster
Permanent-magnet Probe-type Flowsensors
ANL-RDP-12, p. 4.3 (USA) Febr. 1973
- /3/ "Temperature and Radiation Effects on Permanent Magnets",
General Magnetic Corporation, Detroit, Michigan 1966
- /4/ Daniel I. Gordon
Irradiating Magnetic Materials
42 Electro-Technology, June 1965
- /5/ Müller, St.; Thun, G.
Nachweis von Durchflußstörungen am Brennelement
In: Projekt Schneller Brüter

2. Vierteljahresb. 1974. KFK-1274/2 (Okt.74) S. 124/1-3
3. " 1975. KFK-1275/3 (Dez.75) S. 124/1-2
4. " 1975. KFK-1275/4 (April 76)S.124/1-2
1. " 1976. KFK-1276/1 (Juli 76) S.124/1-2
1. " 1977. KFK-1277/1 (Juni 77) S.124/1-2
- /6/ Baumgärtner, E.; Marten, K.; Müller, St.
Nachweis von Durchflußstörungen am Brennelement
In: Projekt Schneller Brüter
2. Vierteljahresb. 1976. KFK-1276/2 (Nov. 76) S.124/1-2
- /7/ Baumgärtner, E.; et al.
Einfluß von Gasblasen auf die Temperaturverteilung
einer thermisch hochbelasteten Oberfläche (unveröffentlicht)
- /8/ Drexler, H.; Ochs, G.; Römer, H.K.; Schleisiek, K.
Test der Wirbelstromdurchflußmesser im Natrium-Siedekreis-
lauf, (NSK) 1976, unveröffentlicht
- /9/ Müller, St.; Thun, G.; Ochs, G.; Römer, H.K.; Schleisiek, K.
Test der Permanentmagnet-Durchflußmesser-Sonde in den
Kreisläufen NSK (IRE) und WÖP II (IRB) (1977) unveröffentlicht

/10/ Kipphan, H.

Bestimmung von Transportkenngrößen bei Mehrphasenströmungen
mit Hilfe der Korrelationsmeßtechnik

Chem.-Ing.-Technik 49 (1977) Nr. 9, S. 695-707

/11/ Ehrhardt, J.; Hoppé, P.

Instrumentierung, Grenzwerte und Signalverarbeitung
für den nuklearen Siedegenerator an KNK II (1977)

unveröffentlicht

Müller, St.

Verfahren und Einrichtung zum Messen der Strömungsge-
schwindigkeit und des Gasvolumenanteils eines Flüssig-
metallstromes

Pat. angemeldet

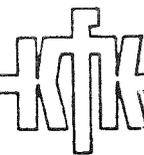
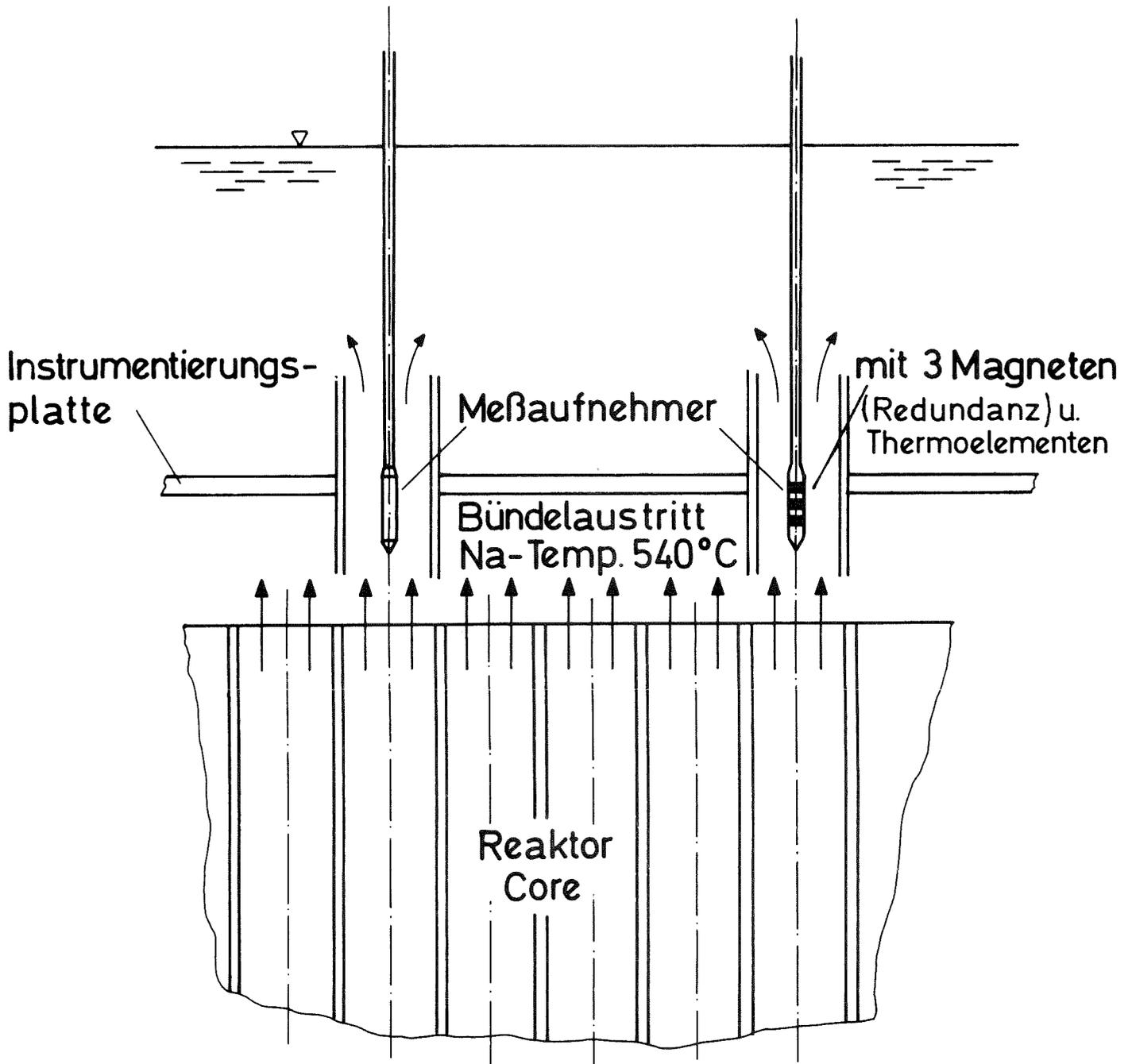


Abb.1 Schema der Durchflußmesseranordnung über einem natriumgekühlten Kernreaktor

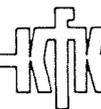
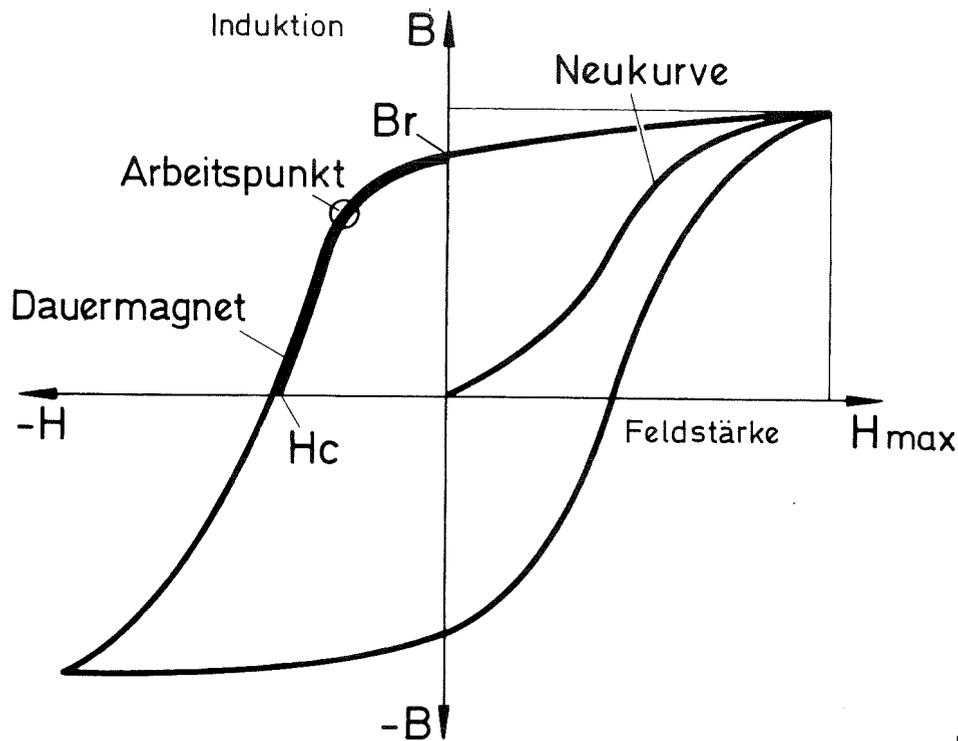


Abb. 2 Ferromagnetische Hysteresekurve

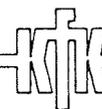
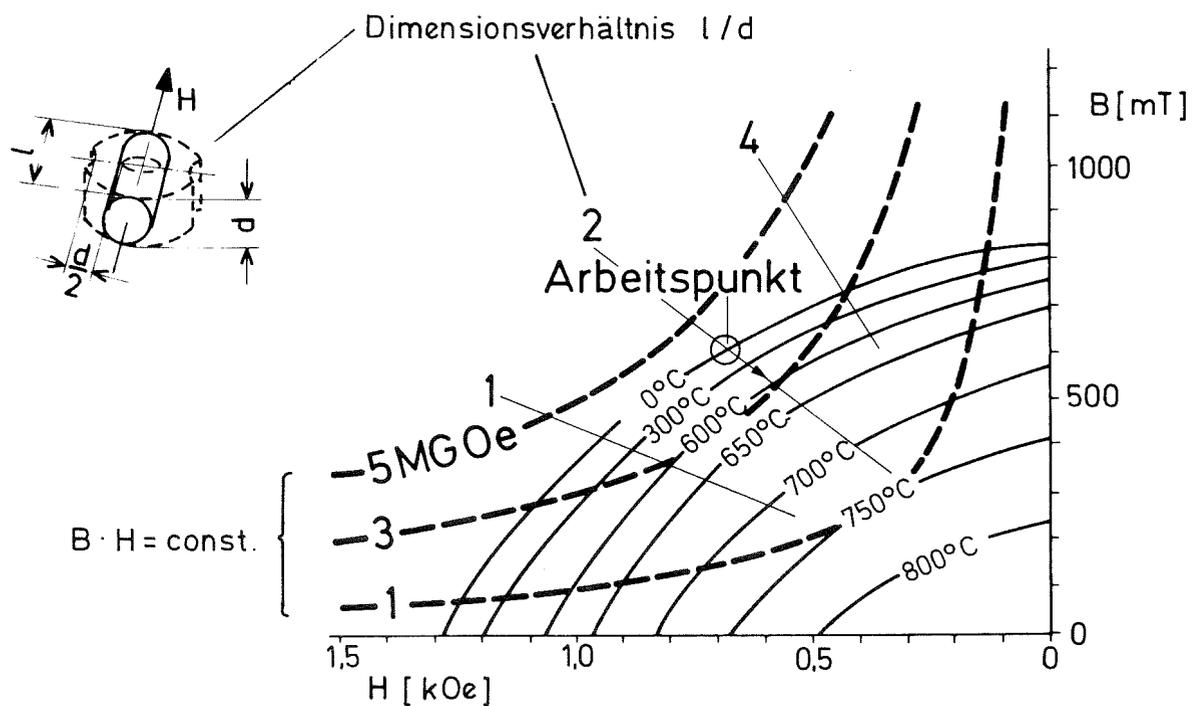


Abb. 3 Entmagnetisierungskurven von AlNiCo 450 bei verschiedenen Temperaturen (nach Dietrich)

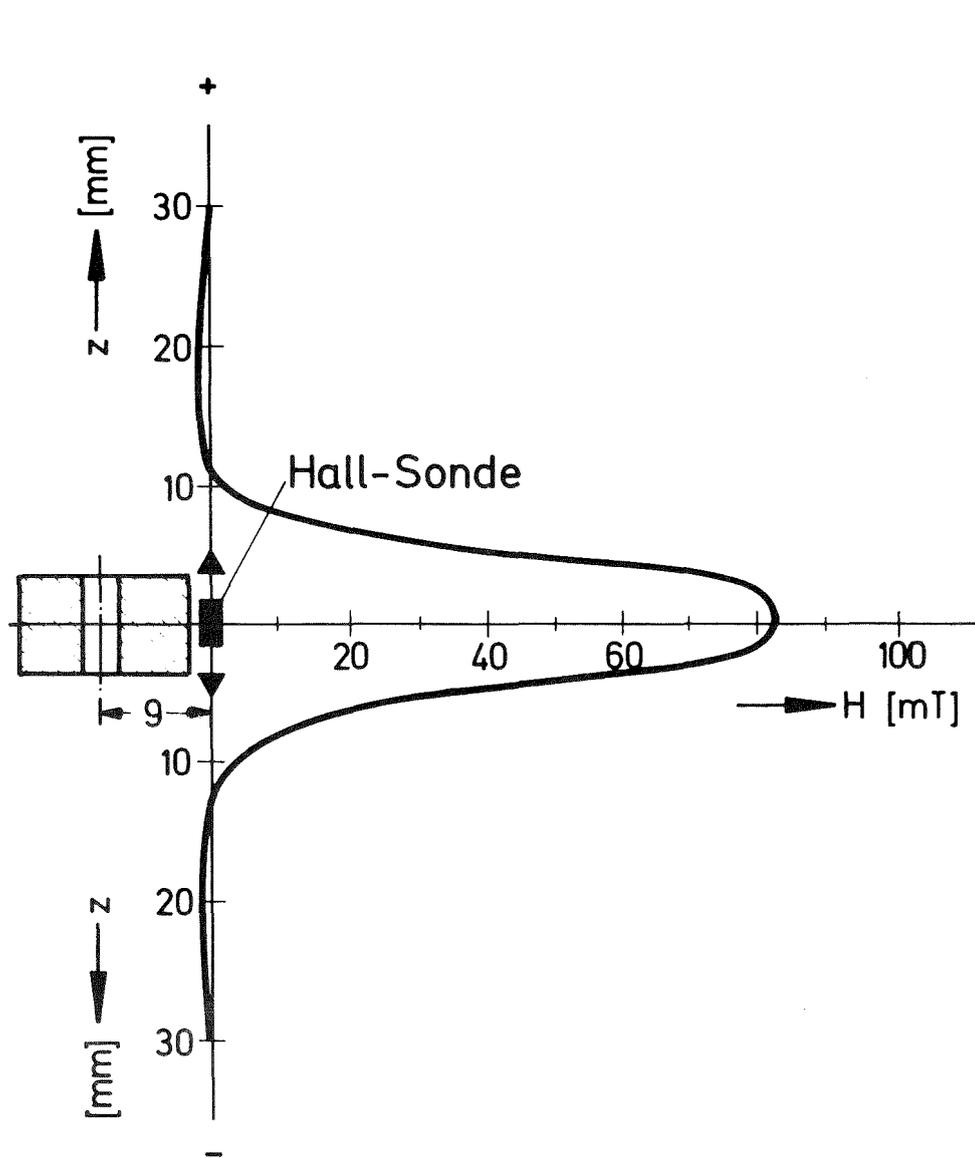


Abb. 4 Magnetfeldstärke, axial

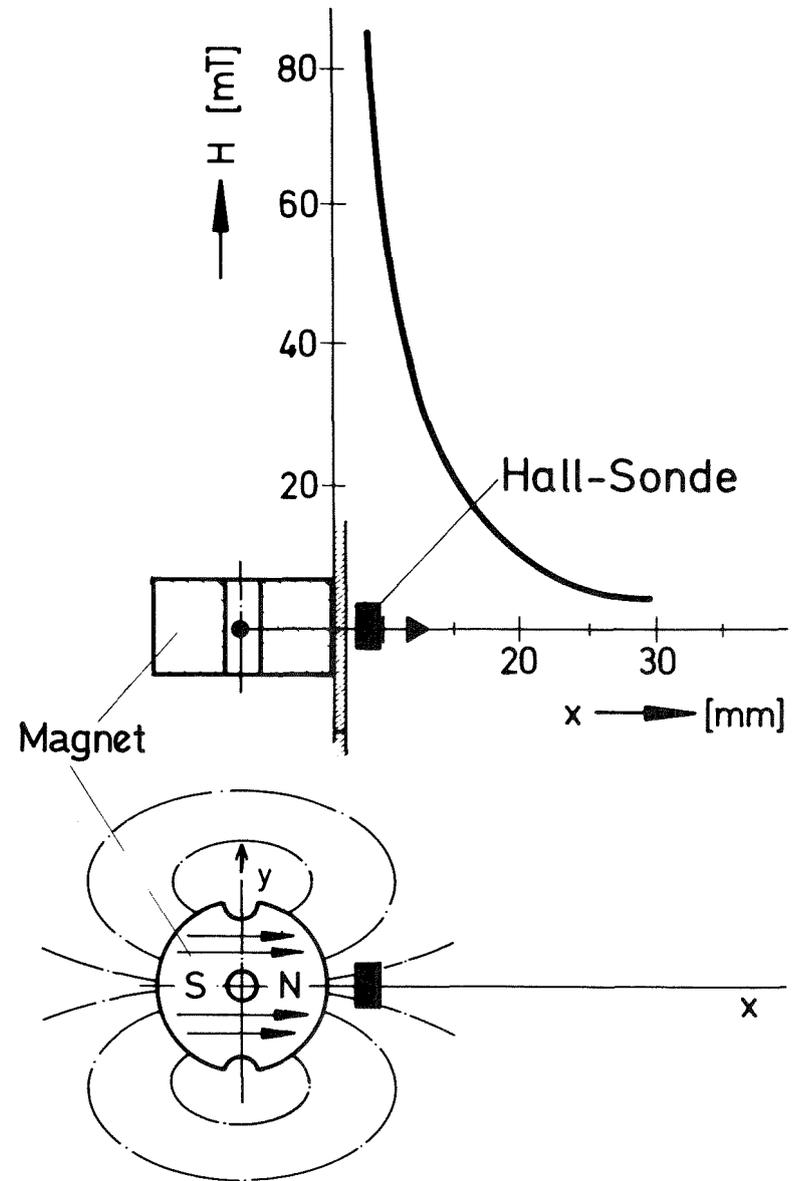


Abb. 5 Magnetfeldstärke, radial

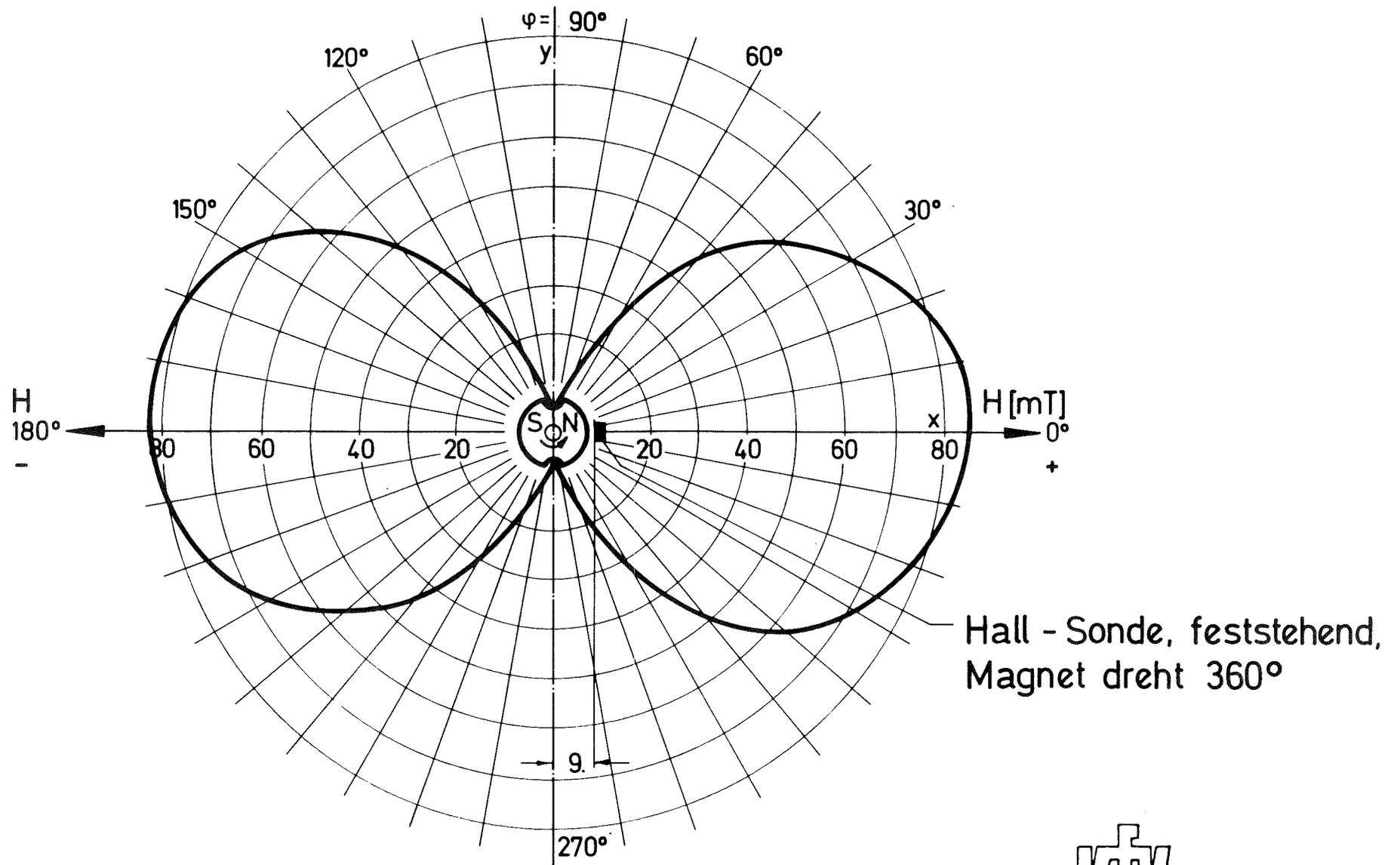


Abb. 6 Azimutale Magnetfeldstärke

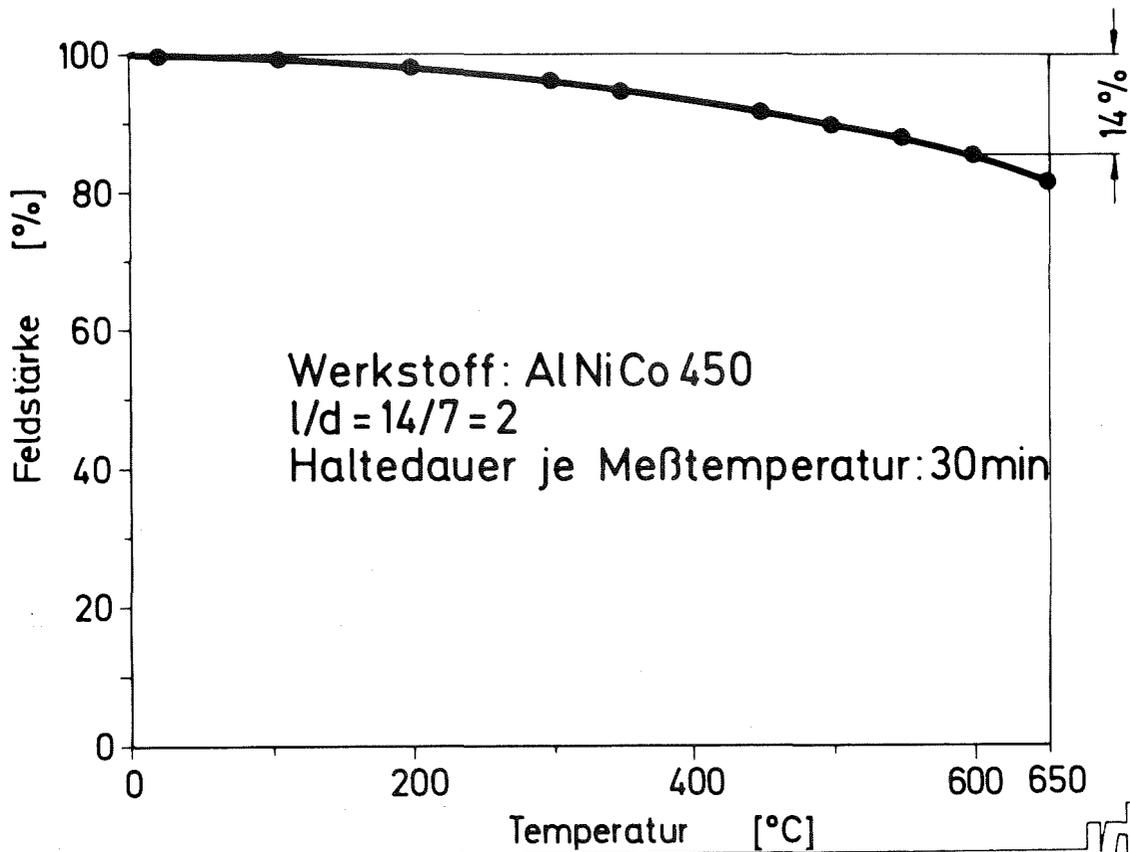


Abb. 7 Prozentualer Abfall der Feldstärke über der Temperatur (reversibler Anteil)

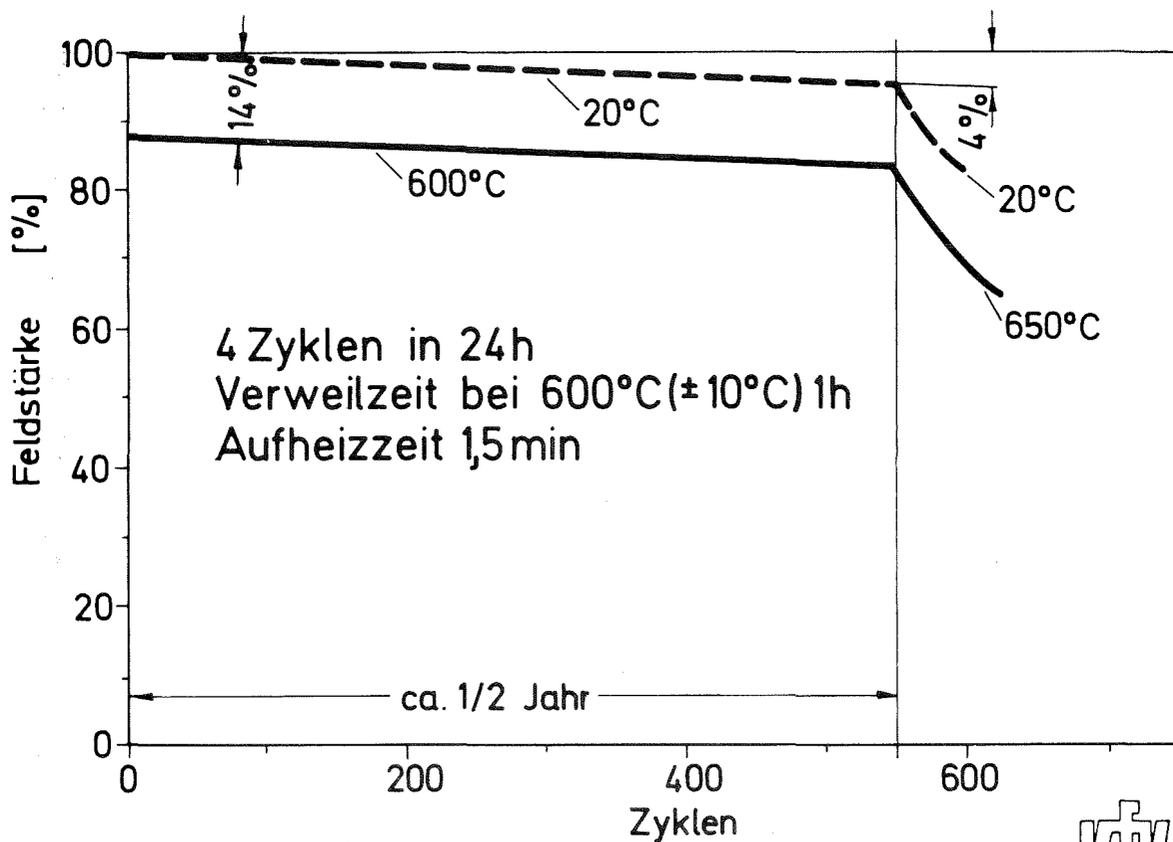


Abb. 8 Magnetstärke bei zyklischer Aufheizung

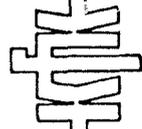
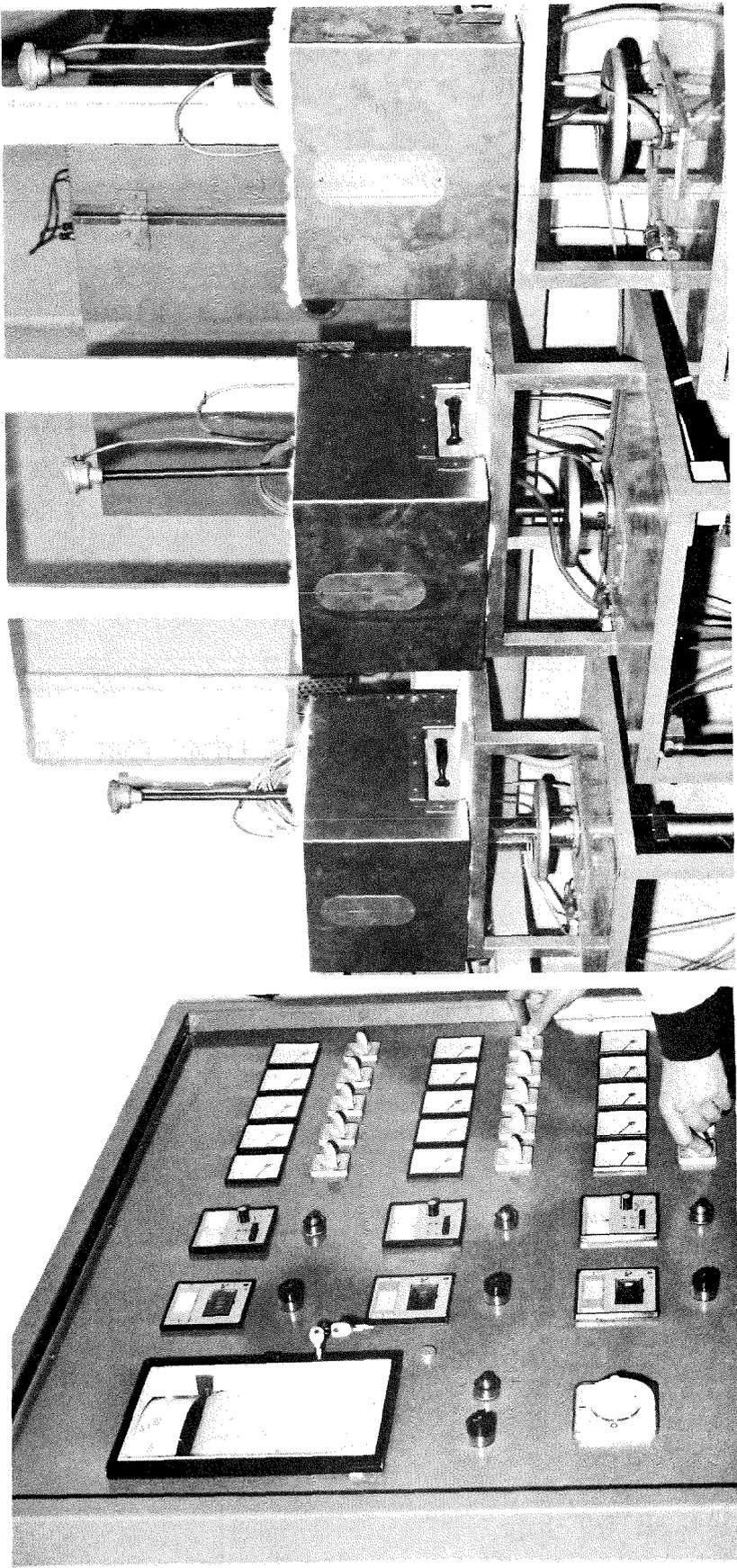


Abb. 9 Ansicht der Versuchseinrichtung bei TEW

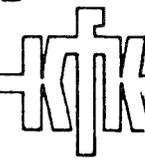
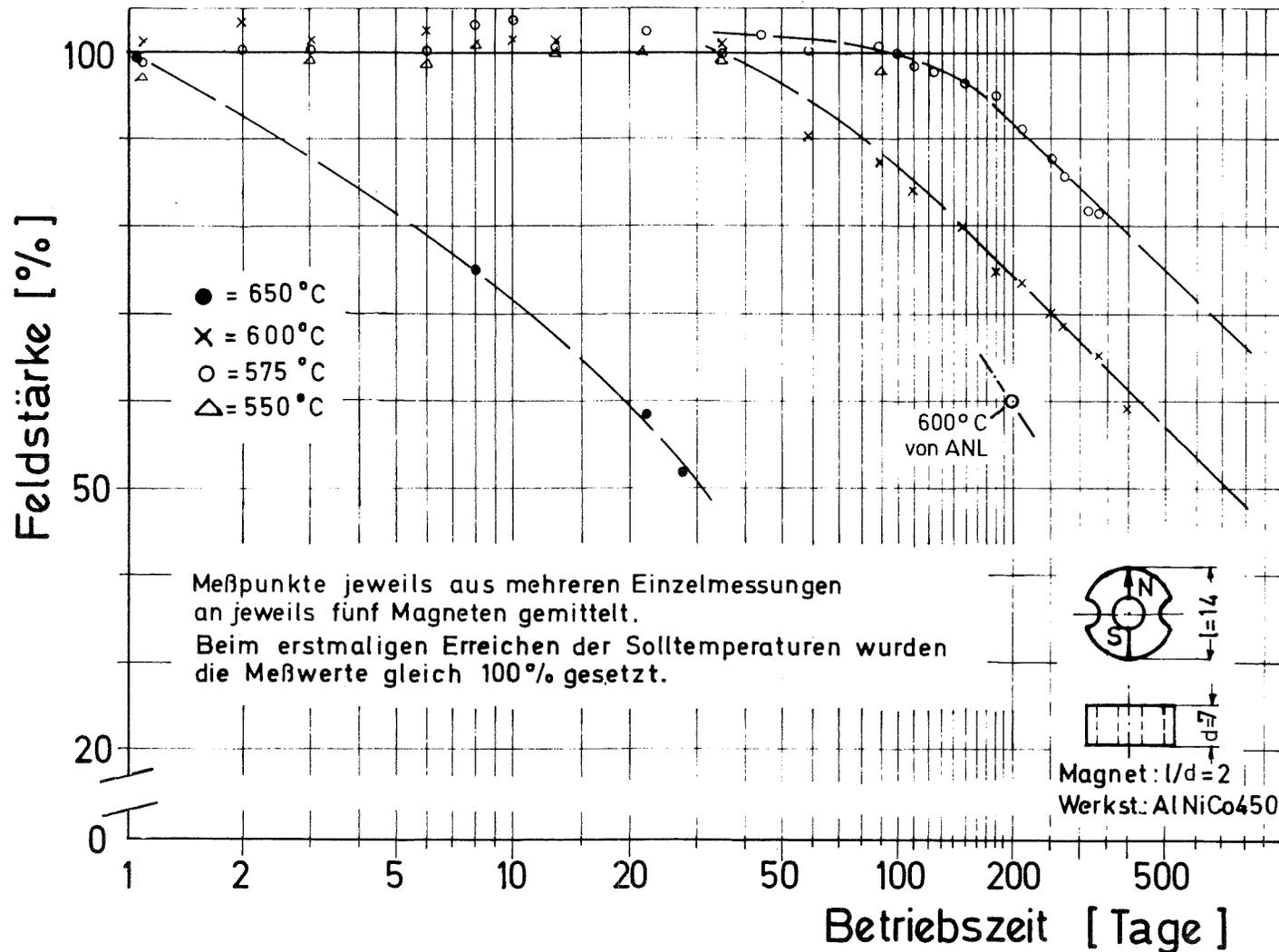


Abb.10 Temperaturdauerstandtests des Magneten (GfK-TEW)

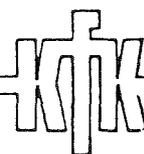
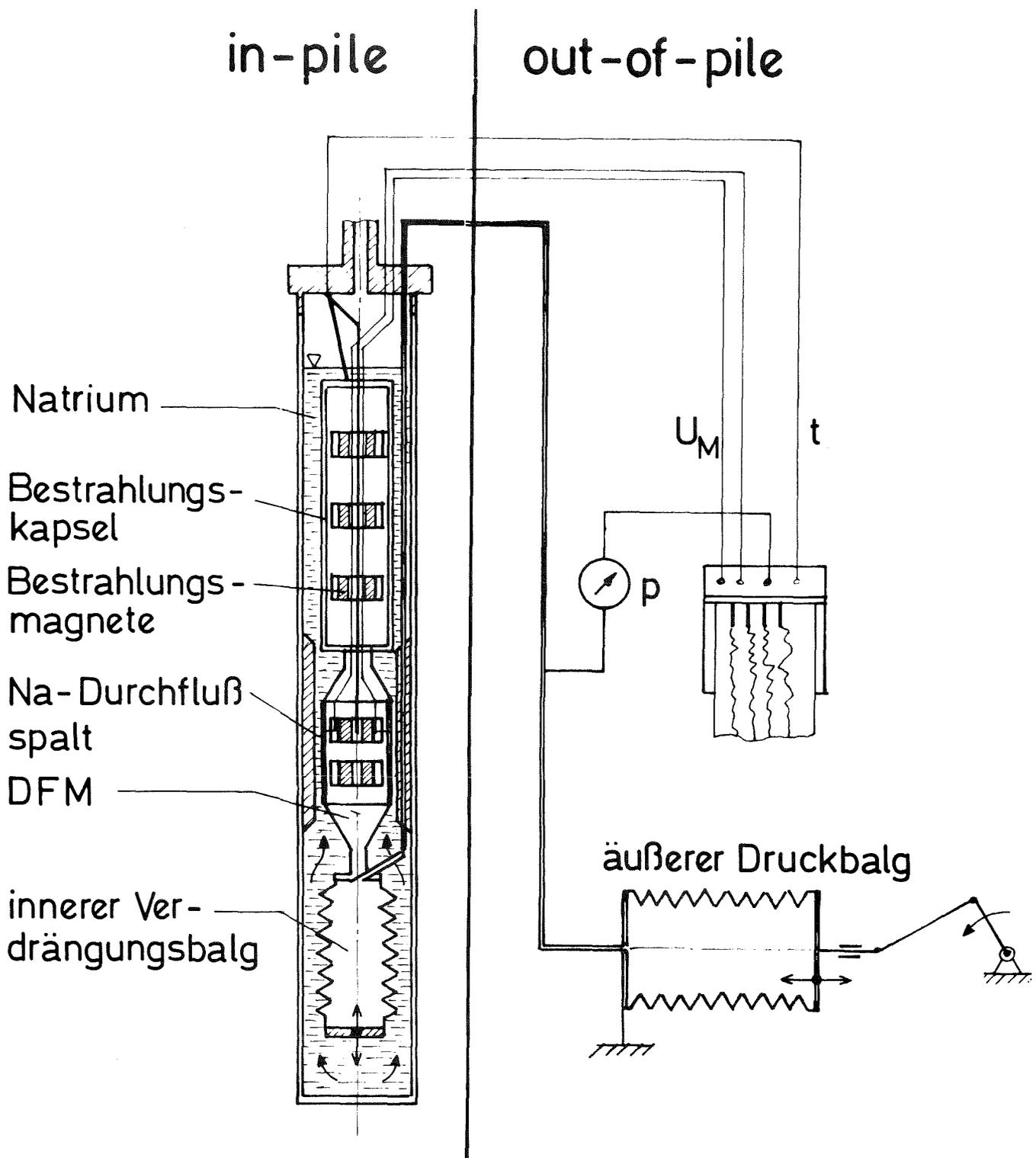
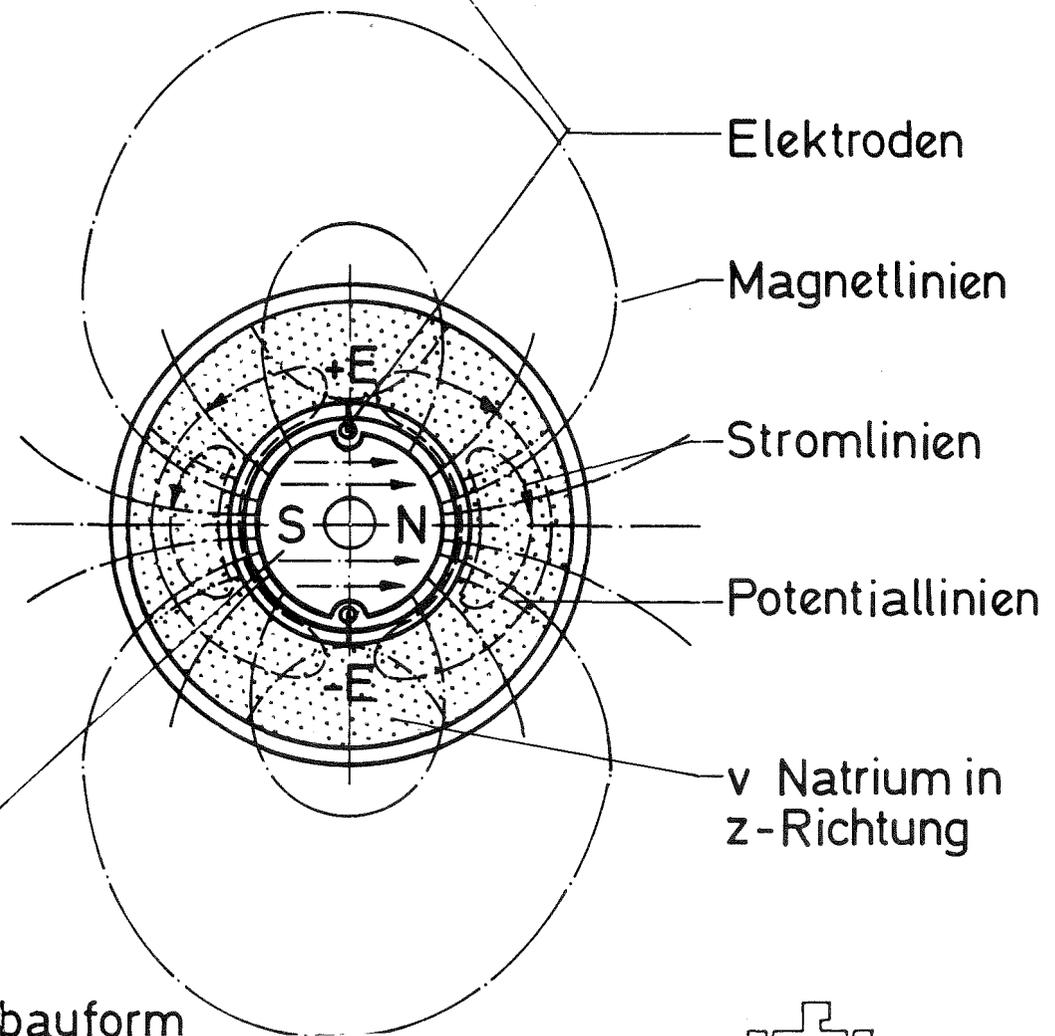
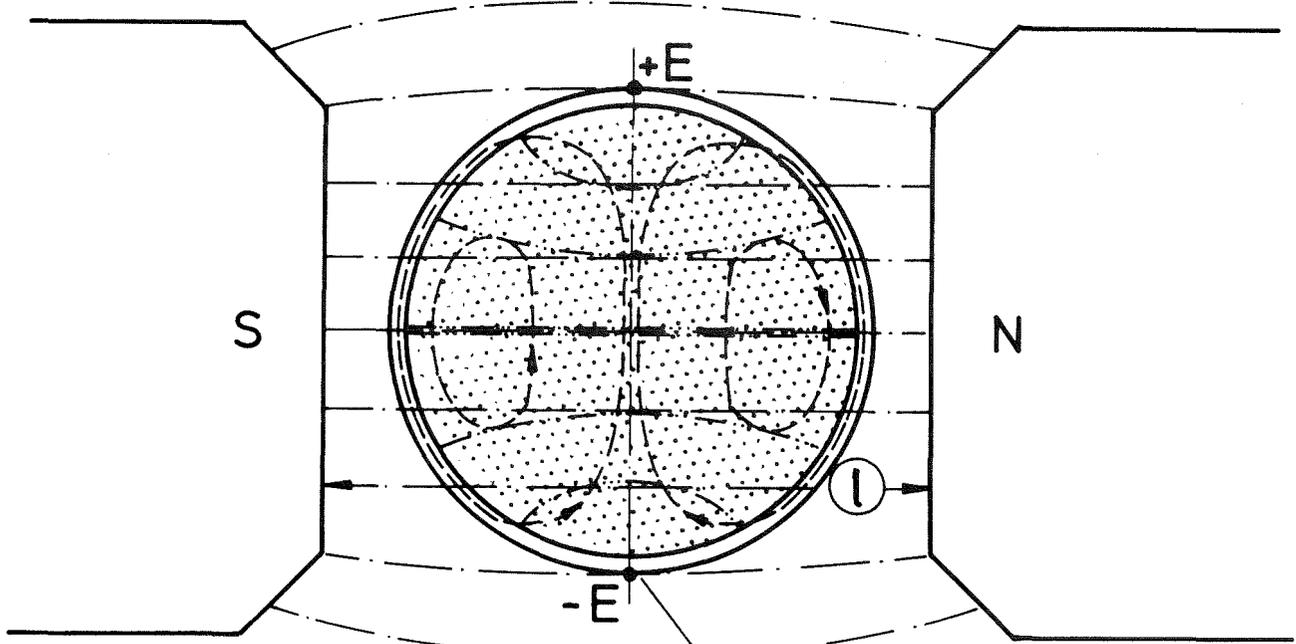


Abb. 11 Bestrahlungseinsatz Mol 3K mit Magnetstärkemessung (schematisch)

DFM mit Außenmagnetanordnung



DFM in Sondenbauform

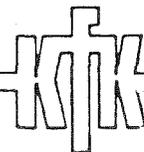


Abb. 12 Funktionsprinzip eines PM-DFM

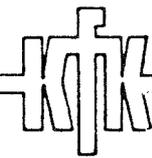
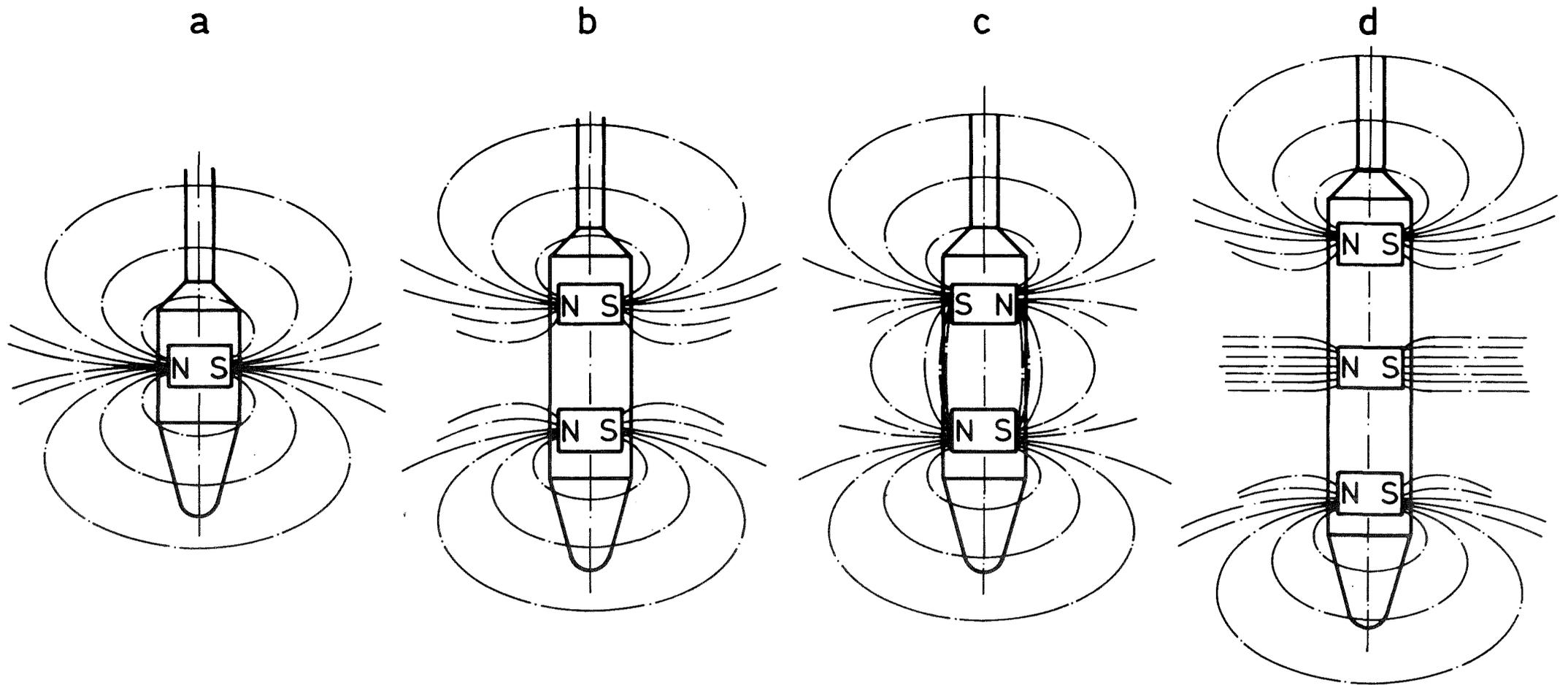


Abb. 13 Feldlinienverlauf an Sonden bei unterschiedlicher Magnetanordnung

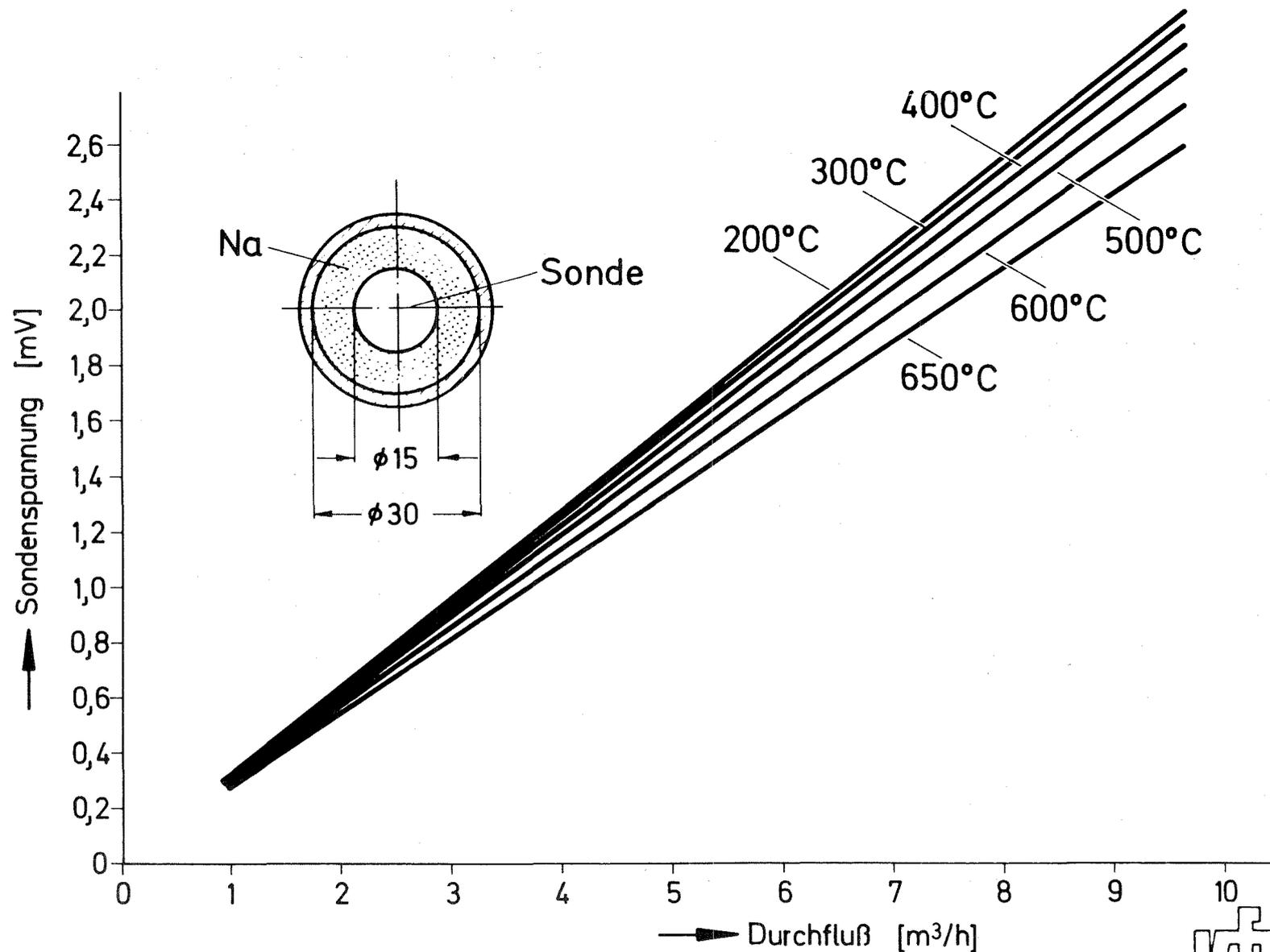
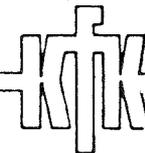


Abb.14 Sondenspannung als Funktion des Durchflusses; Parameter: Temperatur



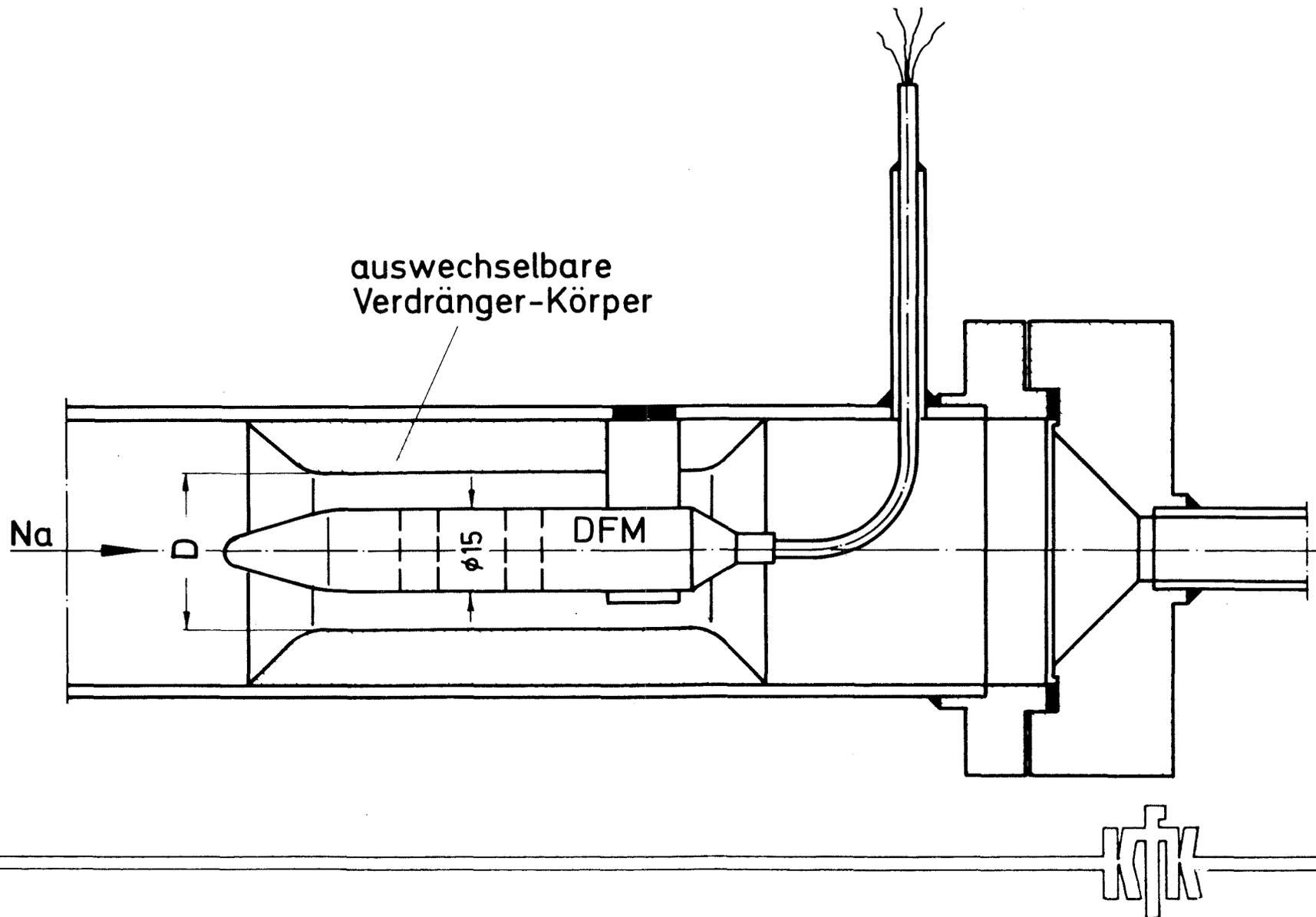


Abb. 15 Doppelmagnet - Sonde in einer Teststrecke mit veränderbarem Kanaldurchmesser D

KTK

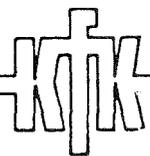
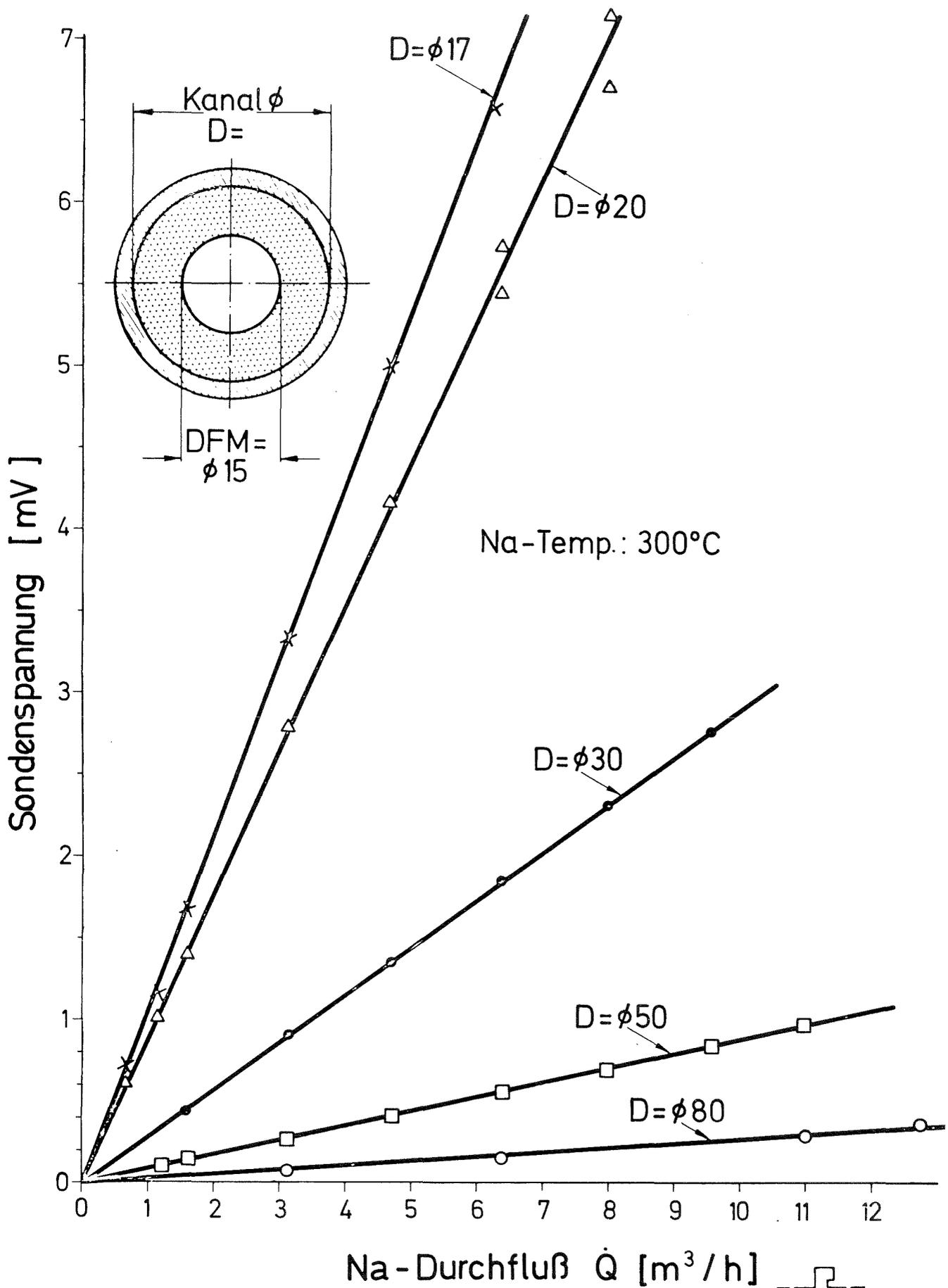


Abb. 16 Sonden - Gleichspannungen über dem Kreislaufdurchfluß, Parameter: Kanal ϕ D

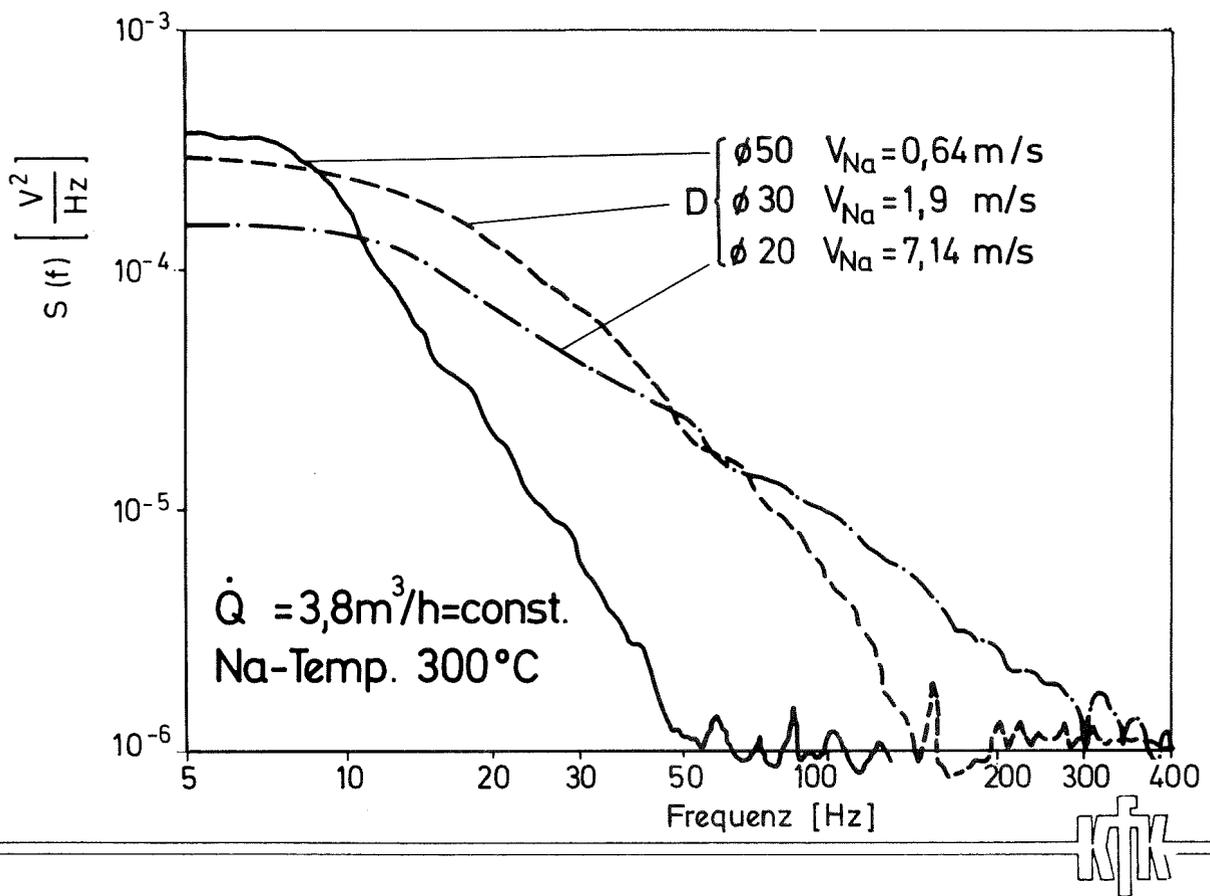


Abb. 17 Leistungsdichtespektren, Parameter: Kanal ϕ D

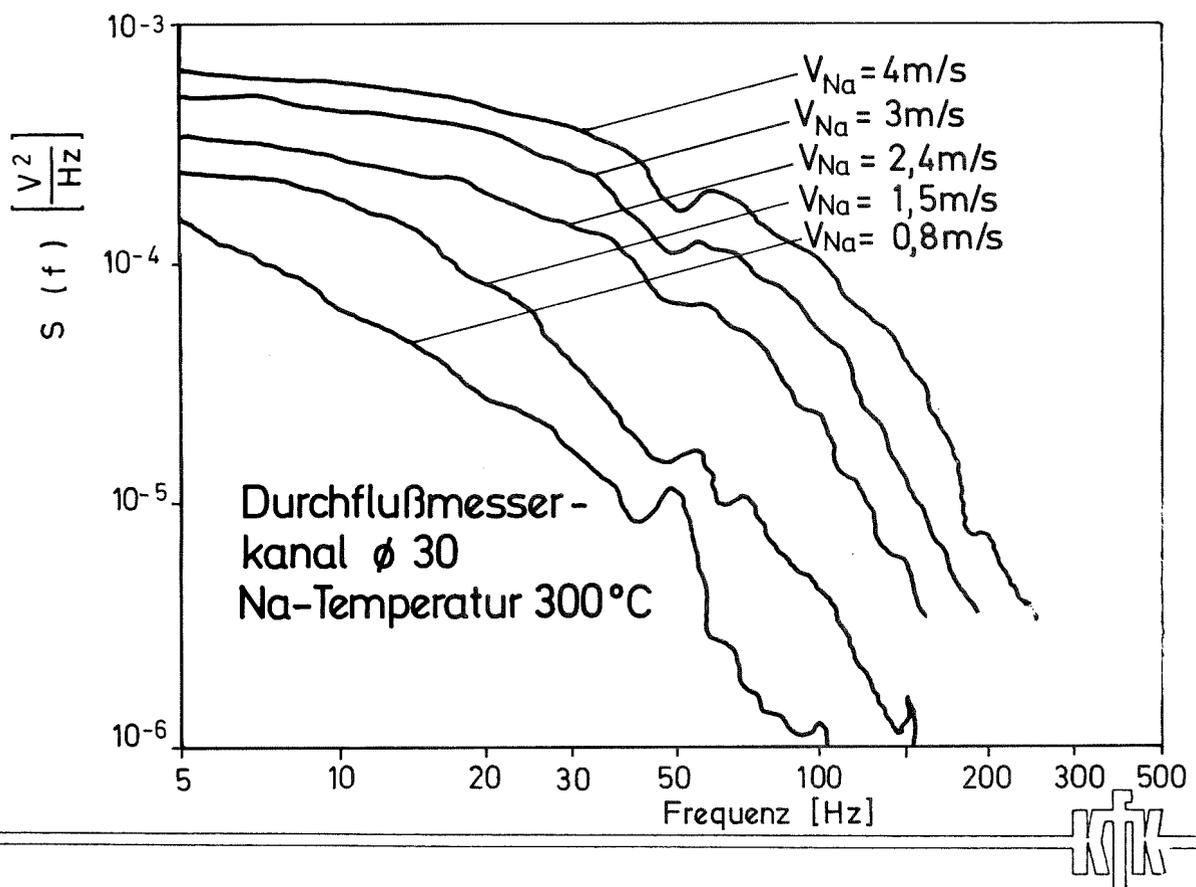


Abb. 18 Leistungsdichtespektren, Parameter: Na-Geschwindigkeit

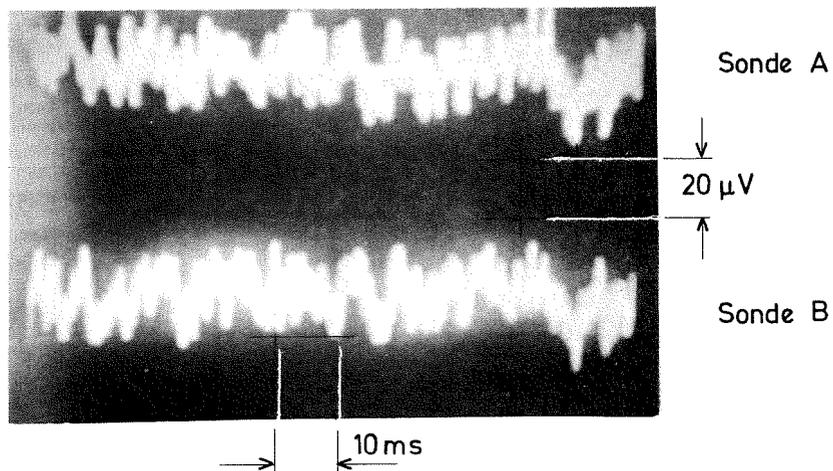


Abb.19 Geschwindigkeitsfluktuationen - Signal einer Doppel - Magnetsonde

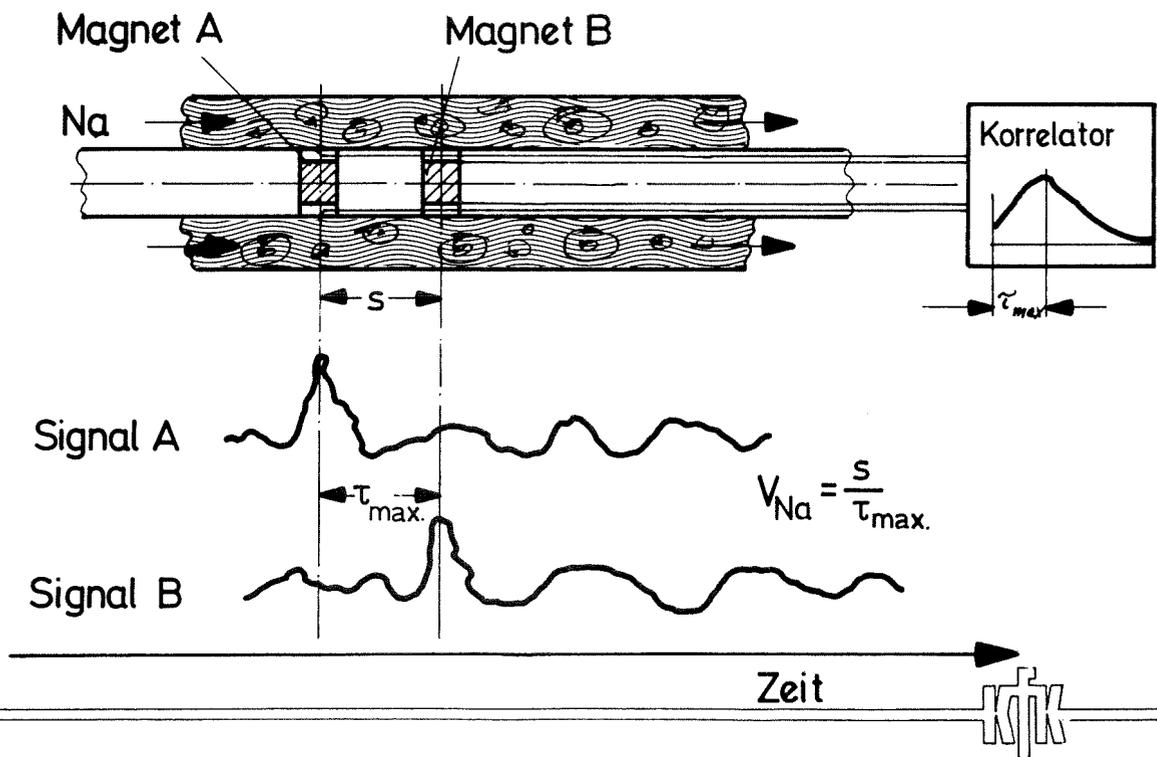


Abb.20 Signalbewegung an einer Doppelsonde

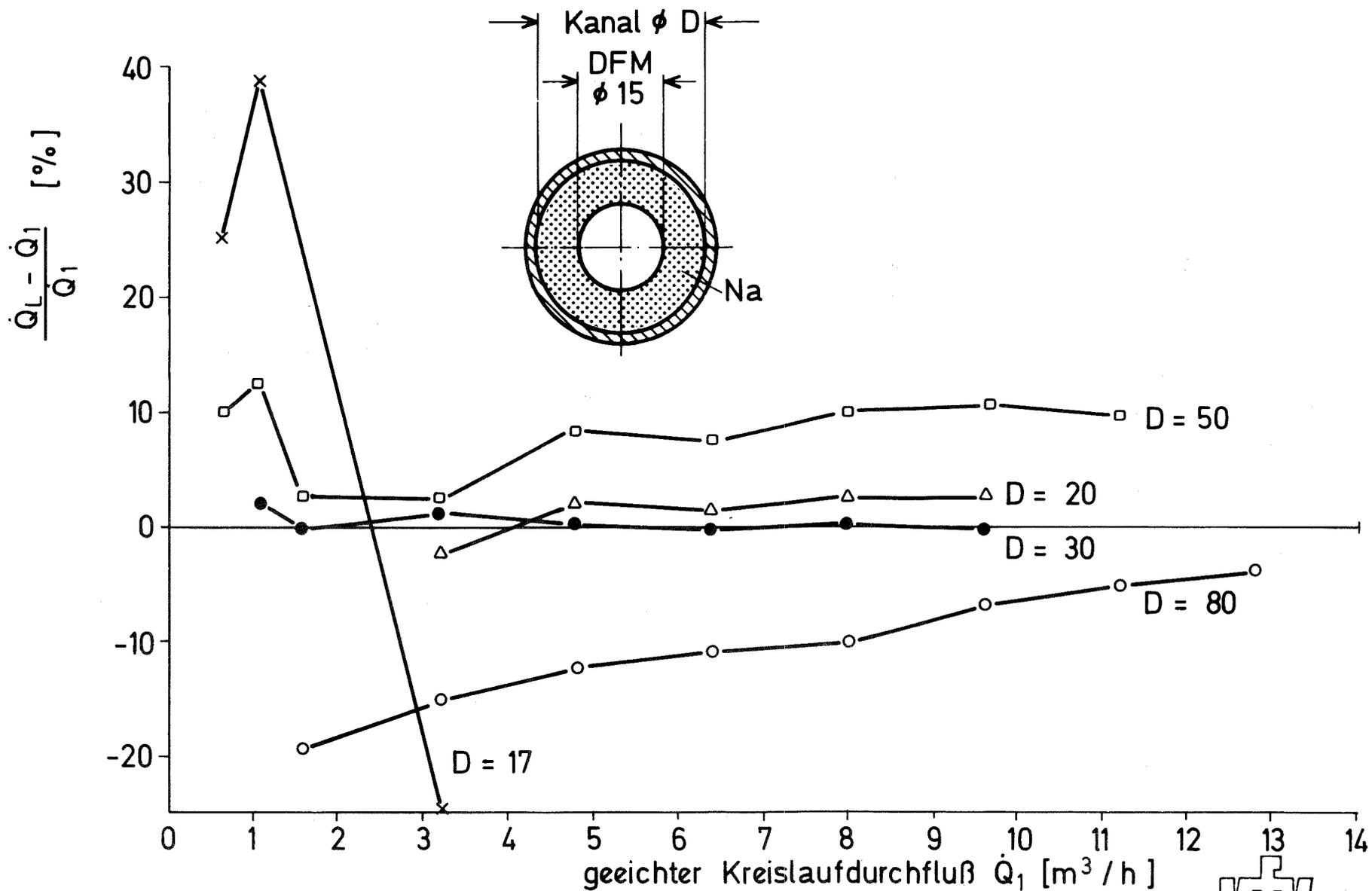
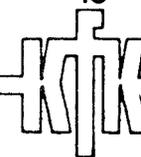


Abb. 21 Abweichung in % des nach der Laufzeit bestimmten Volumensstroms \dot{Q}_L vom jeweiligen \dot{Q}_1 , Parameter: Kanal ϕD



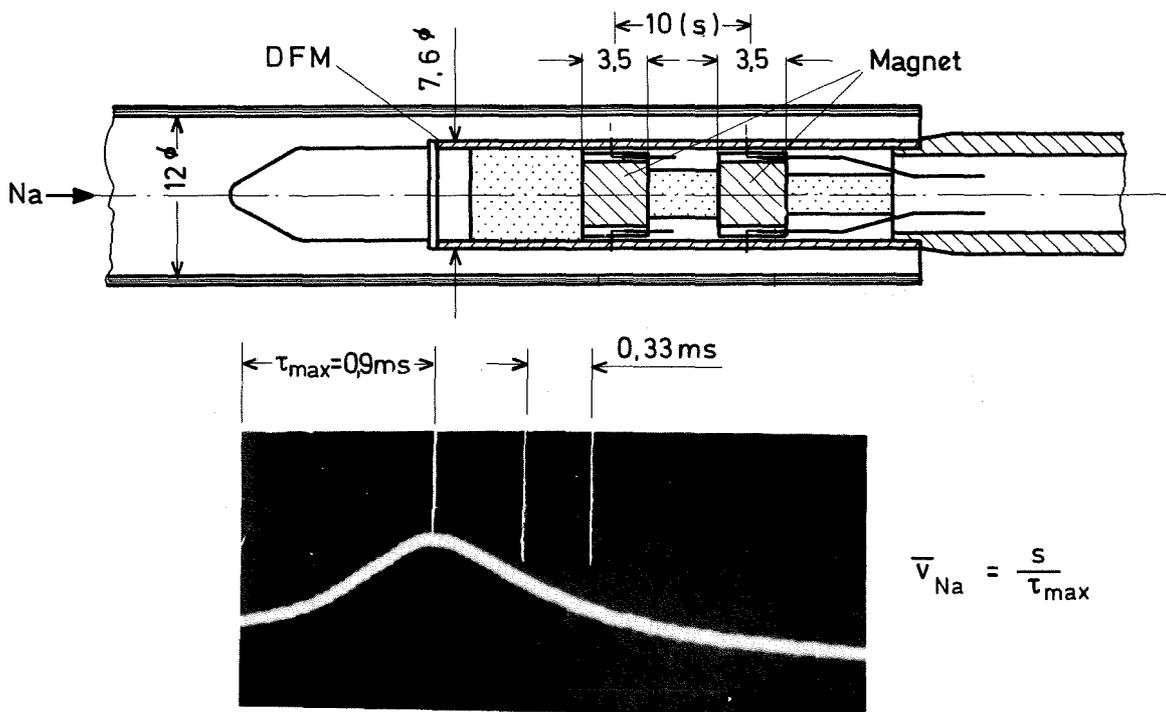


Abb. 22 Kreuzkorrelationskurve der Doppel-Magnetsondensignale

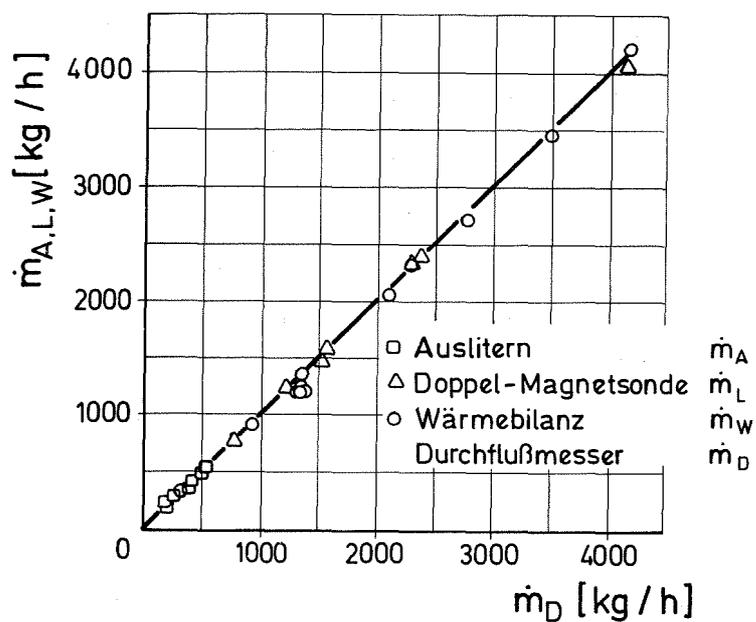


Abb. 23 Vergleich der Massendurchsätze \dot{m}_A , \dot{m}_L und \dot{m}_W mit \dot{m}_D

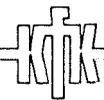
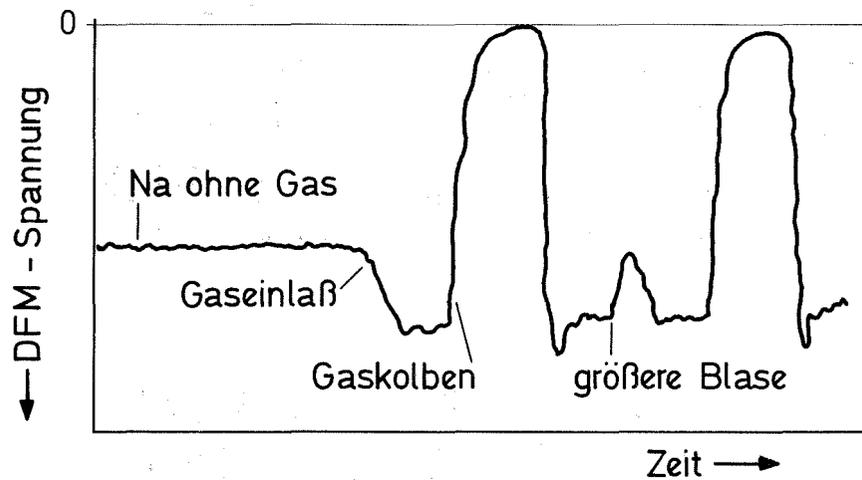


Abb. 24 Durchflußmesser - Signal bei einer Na-Strömung mit und ohne Gas

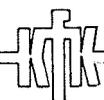
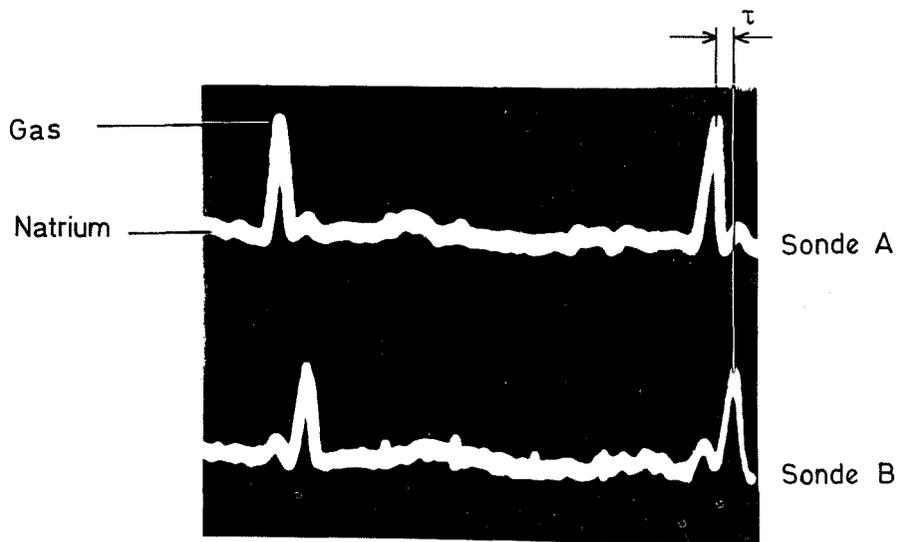


Abb.25 Einzelblasen an den Magnetsonden

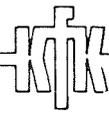
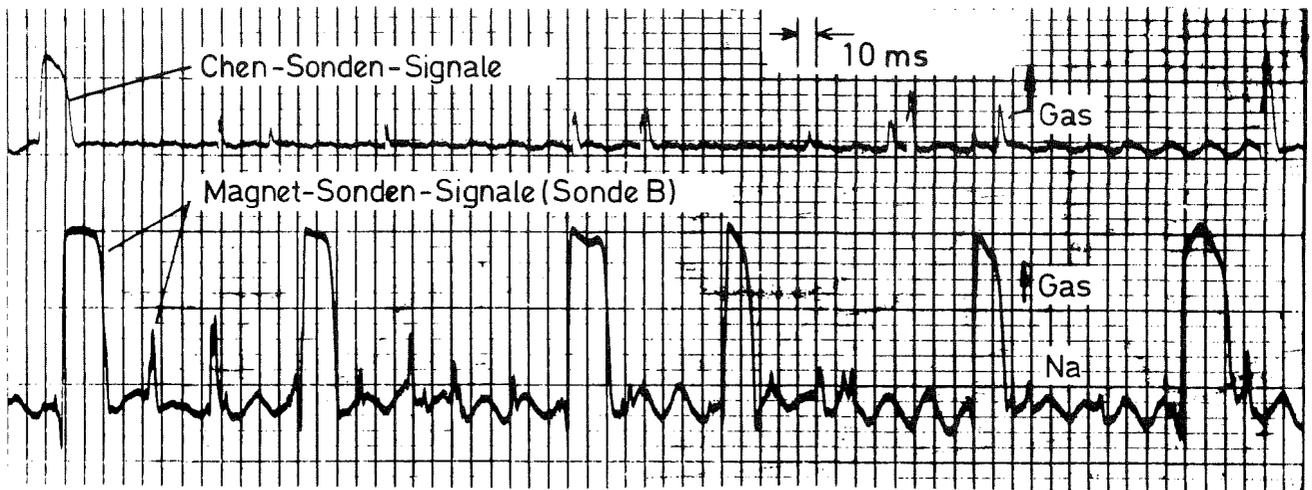


Abb. 26 Einzelblasen und Kolben mit einer Magnet- u. einer Chen - Sonde gemessen, Gasvolumenanteil 20 %

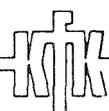
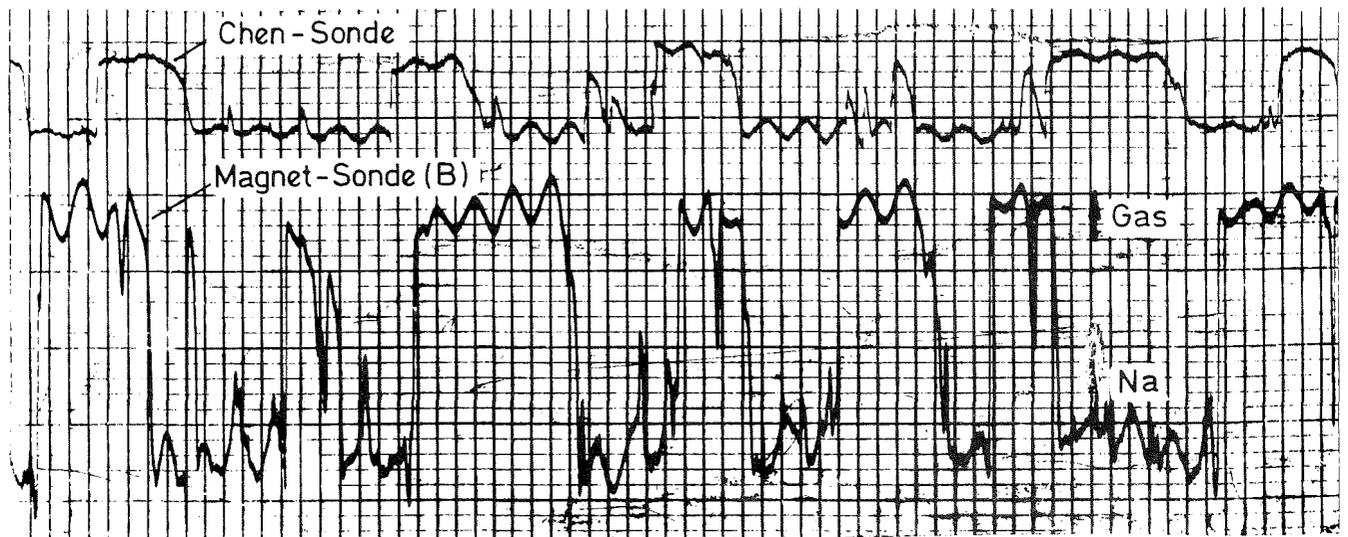


Abb. 27 Kolbenströmung mit Magnet- u. Chen - Sonde gemessen, Gasvolumenanteil 55 %

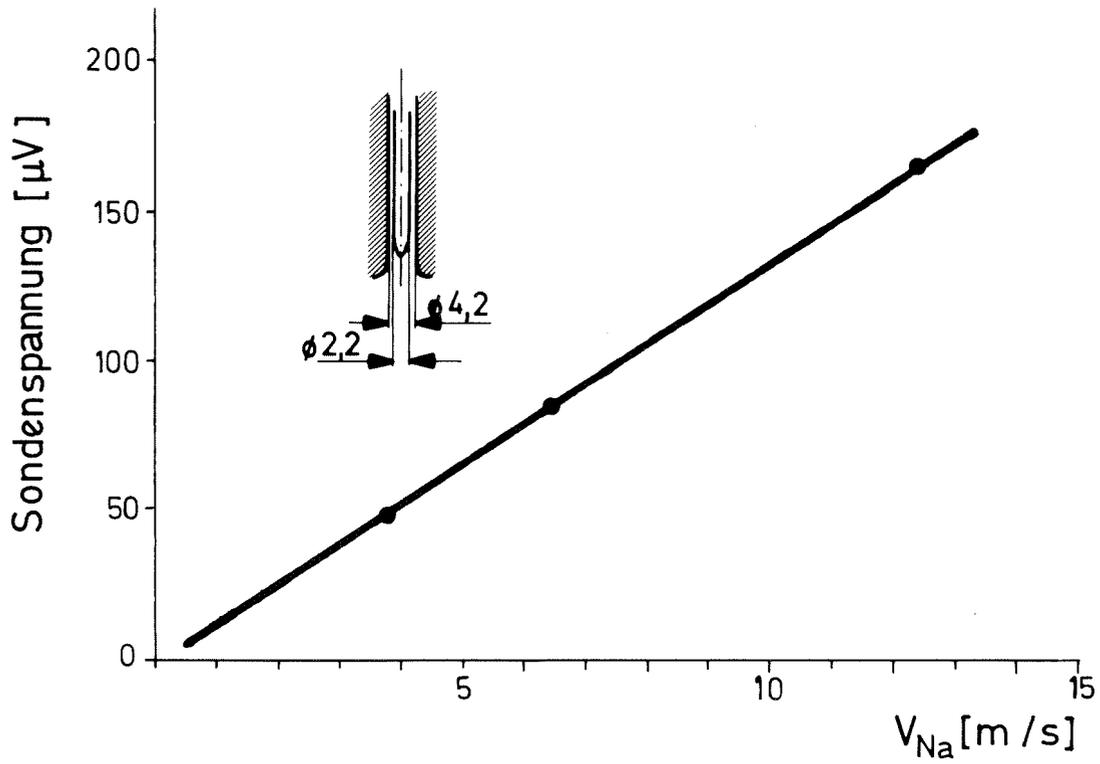


Abb. 28 Miniatursonde im engen Kanal

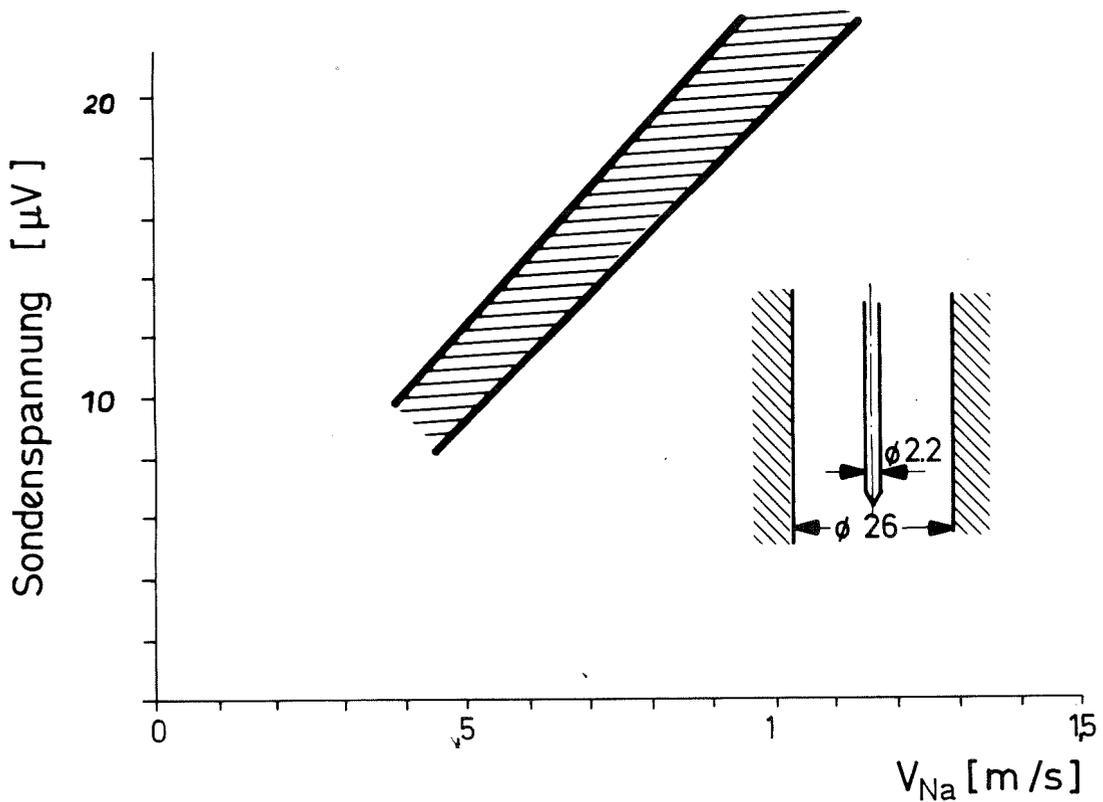


Abb. 29 Miniatursonde im weiten Kanal

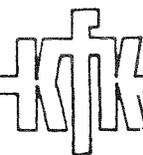
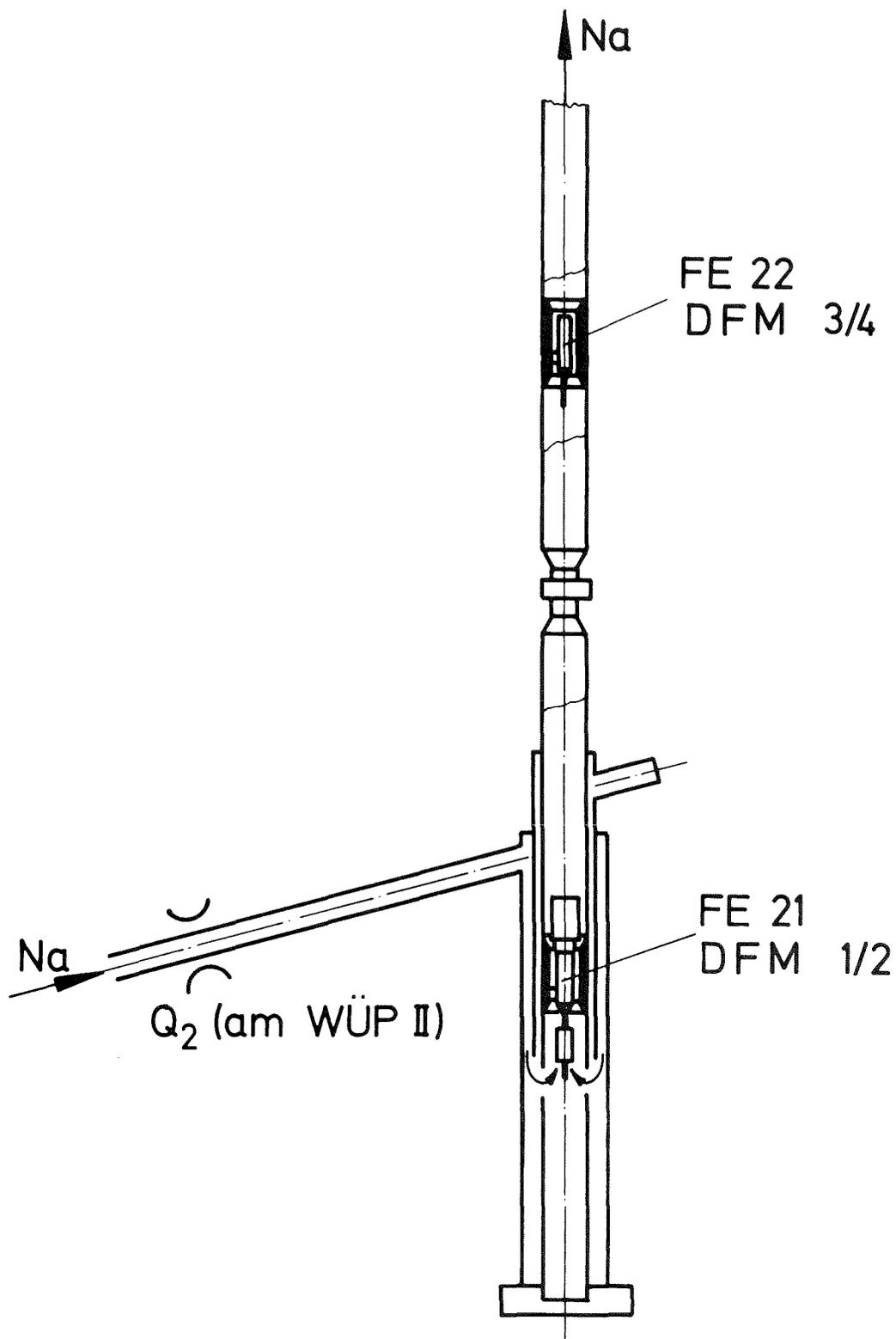


Abb. 30 Mol 7C-Modell - Teststrecke für
out-of-pile DFM - Erprobung

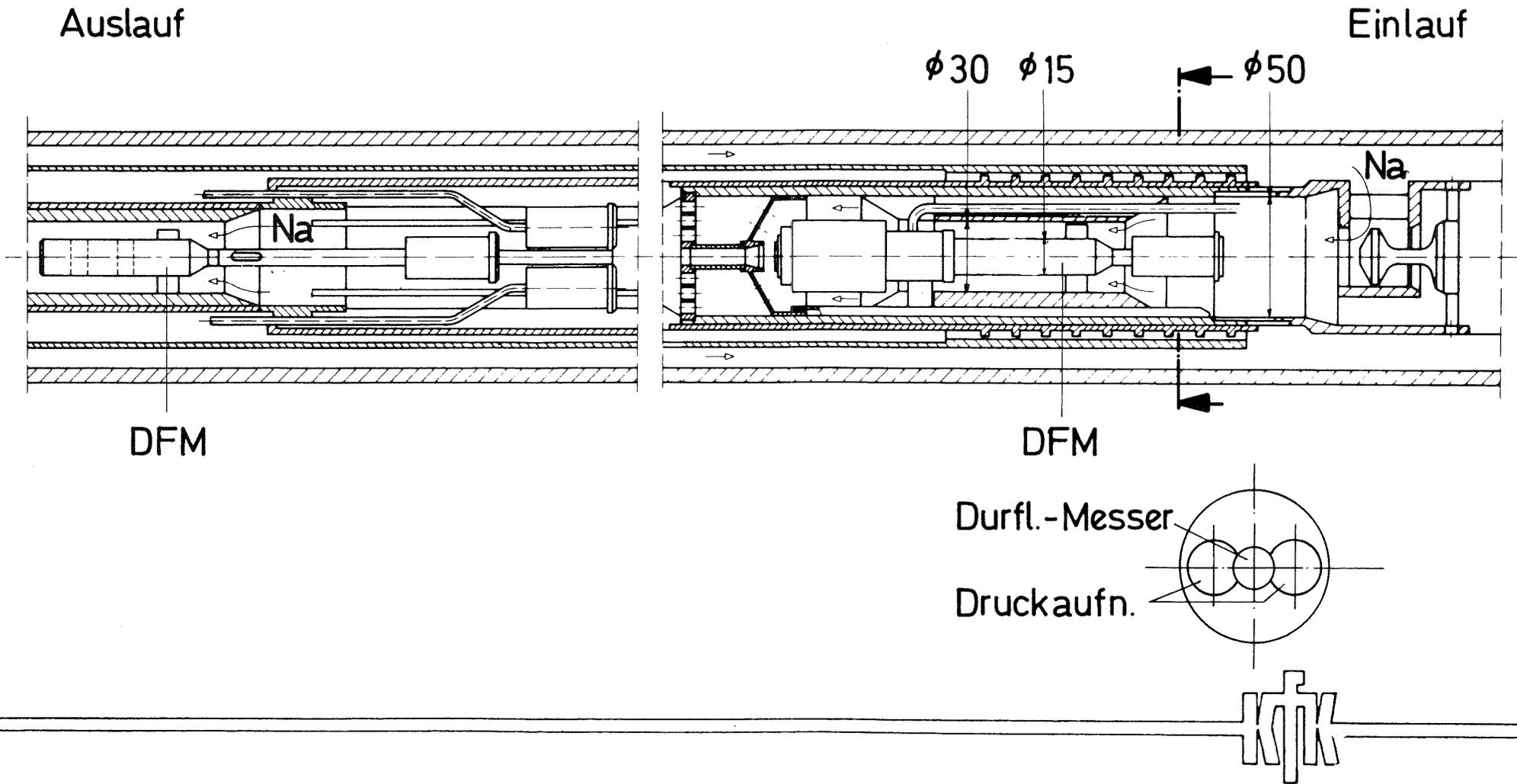


Abb. 31 Einbaupositionen der Doppelmagnetsonden in der Mol 7C Teststrecke

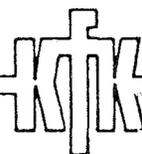
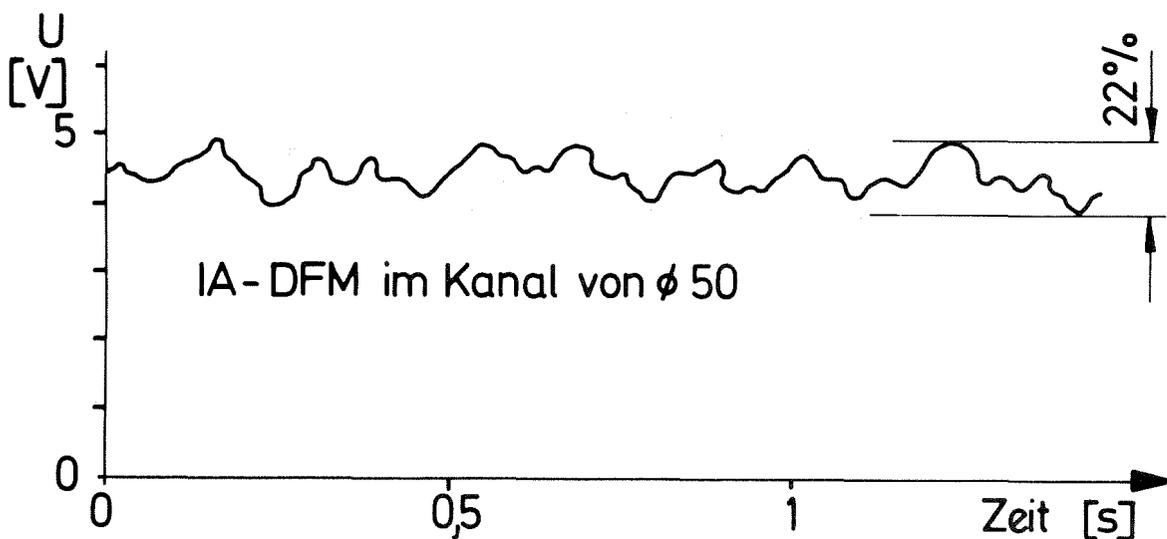
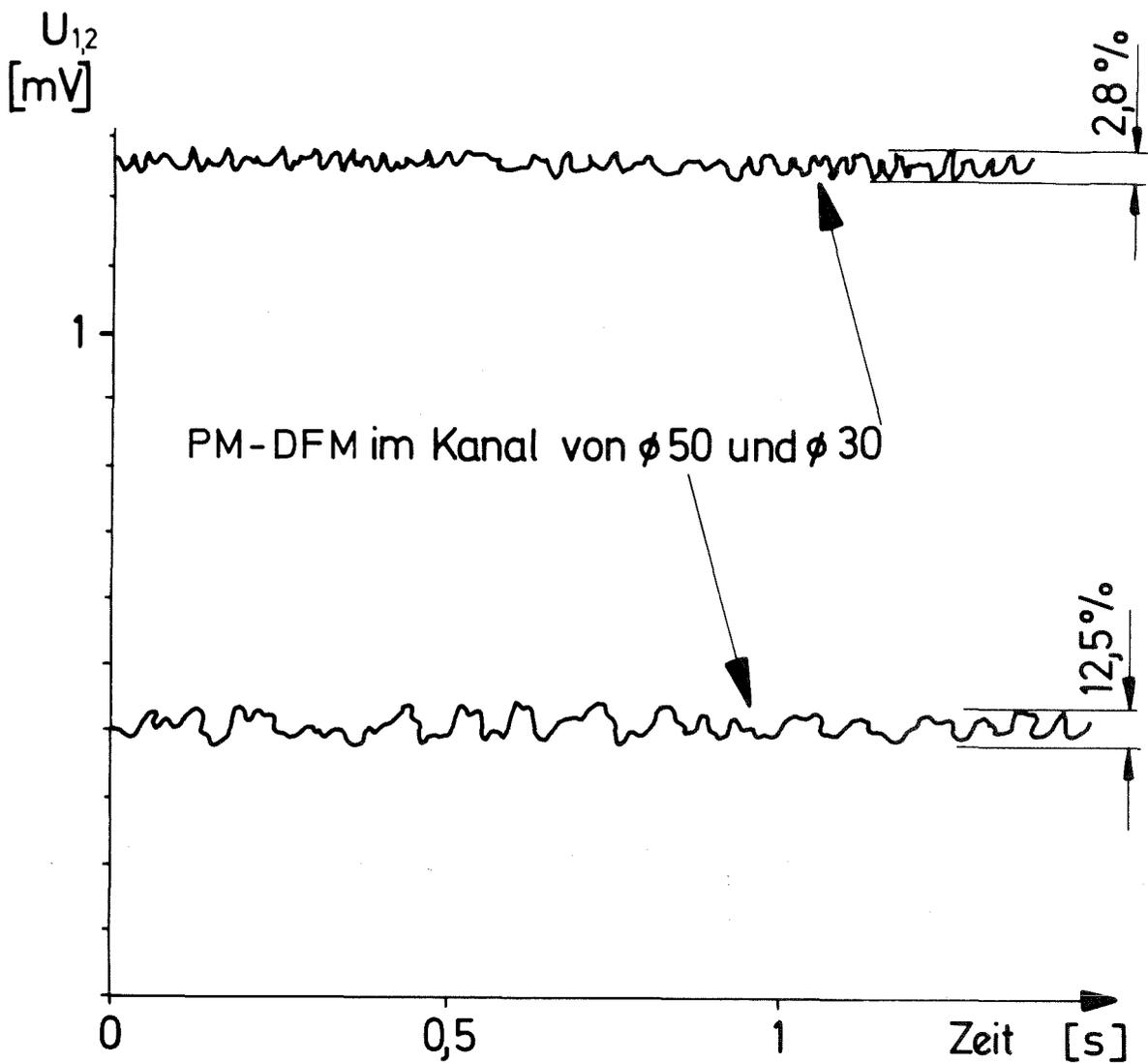


Abb. 32 Vergleich der Signalschwankungen

(an Position des FE 21, $\dot{Q} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$, Na Temp. 300°C)

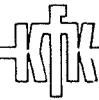
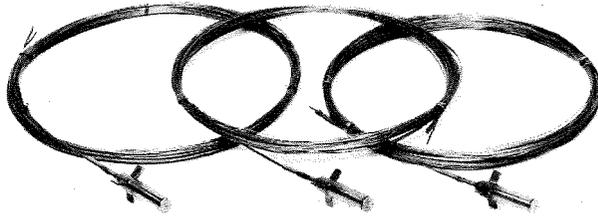
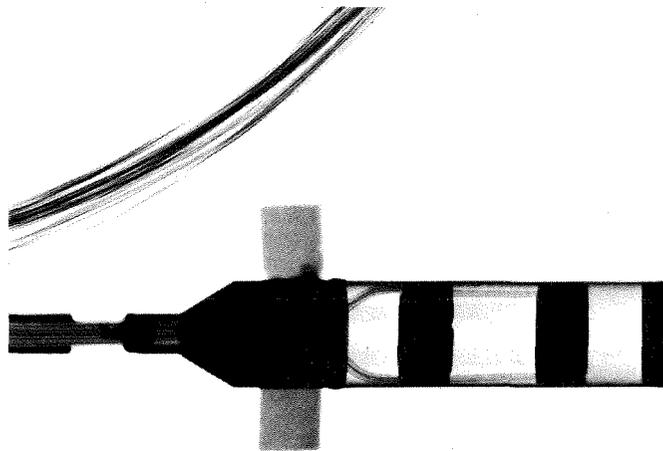


Abb. 33 Ansicht der fertigen Durchflußmesser - Sonden für Mol 7 C Versuche



3

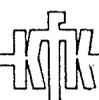


Abb.34 Röntgenaufnahme einer Sonde nach Mol 7C Version

Laserstrahlschweißung

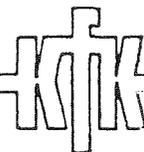
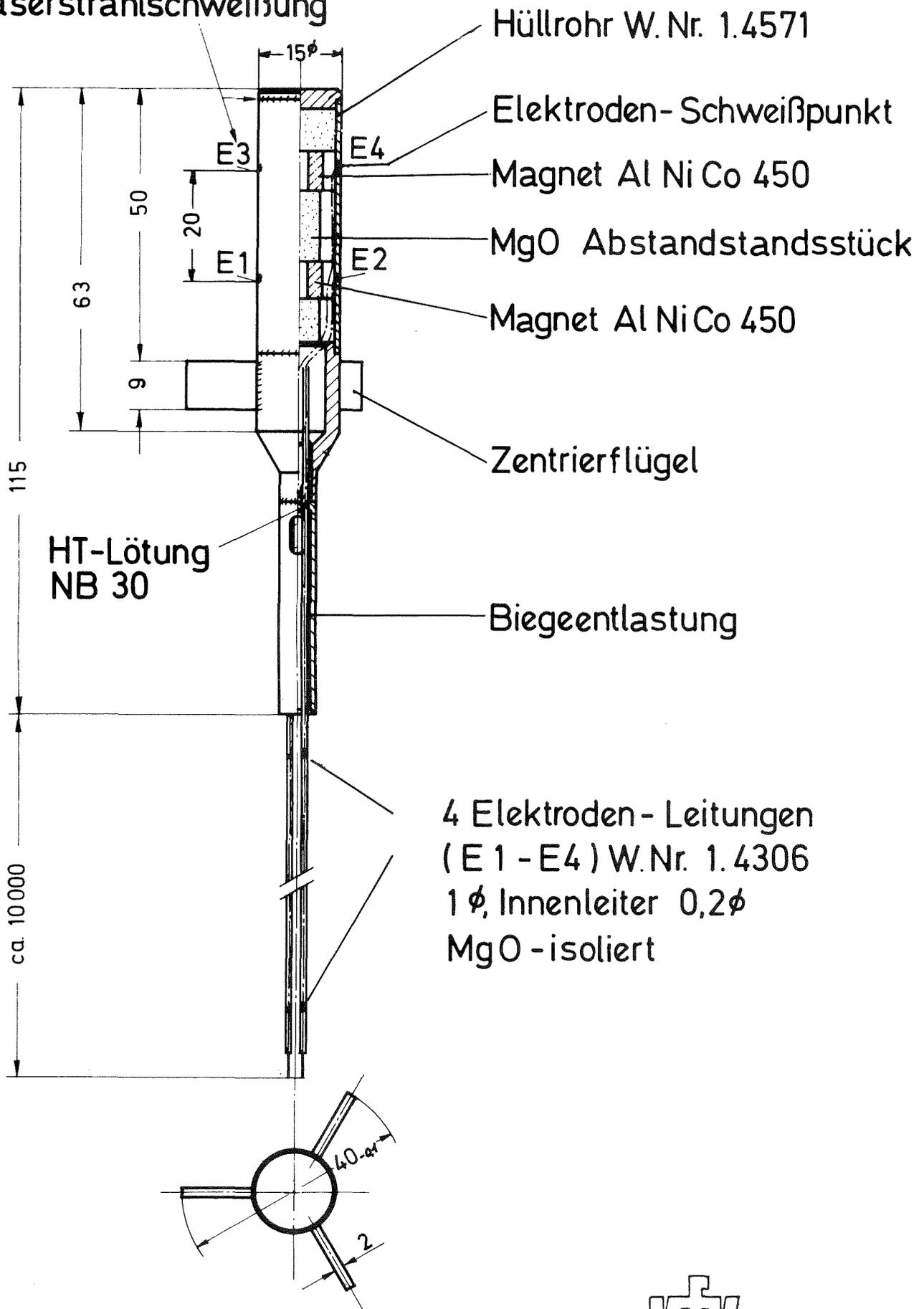


Abb. 35 Mol 7C - DFM-Sonde

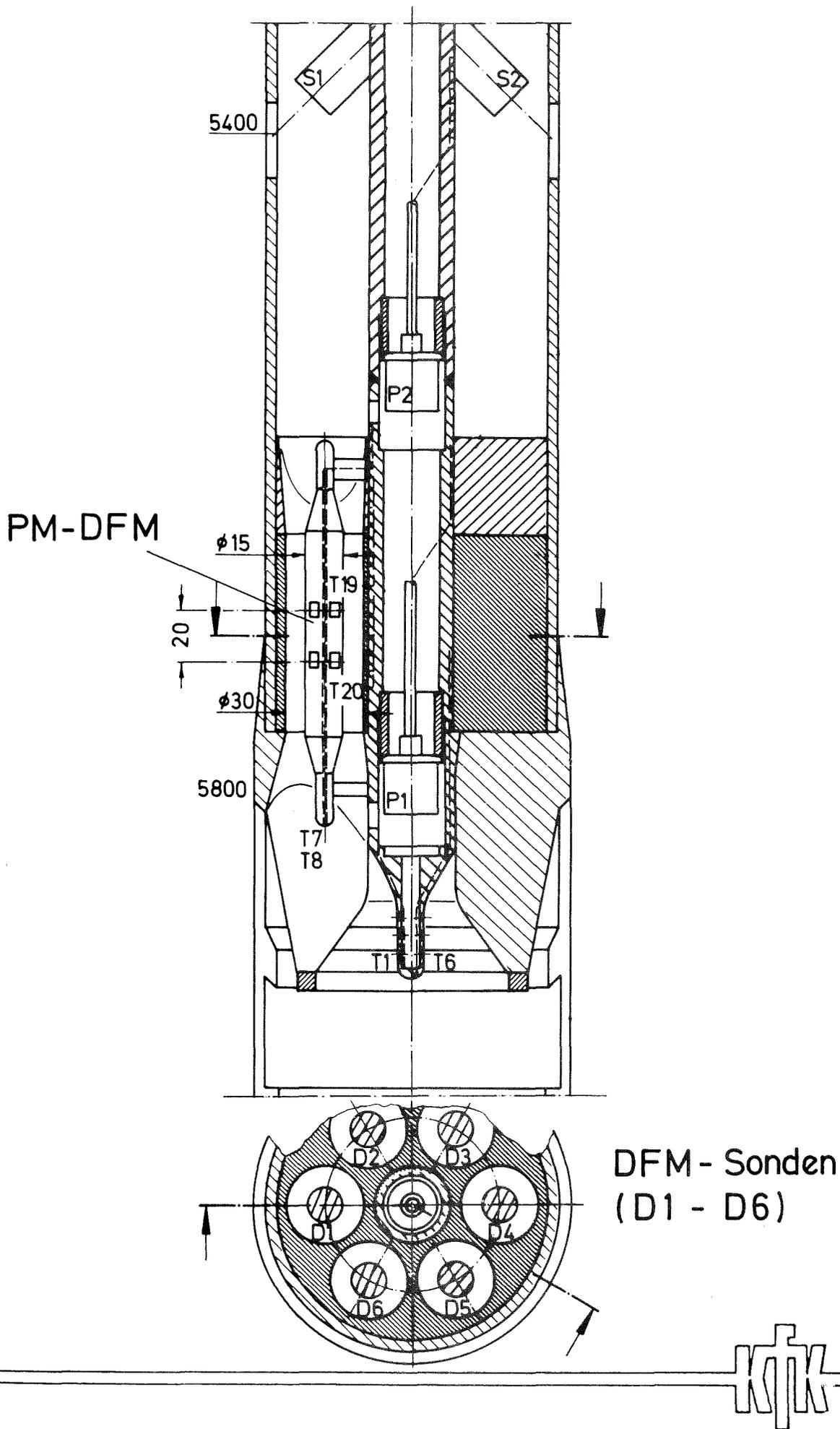


Abb. 36 Entwurf zum Einbau von 6 DFM-Sonden im KNK-II-Siedegeneratormesskopf