

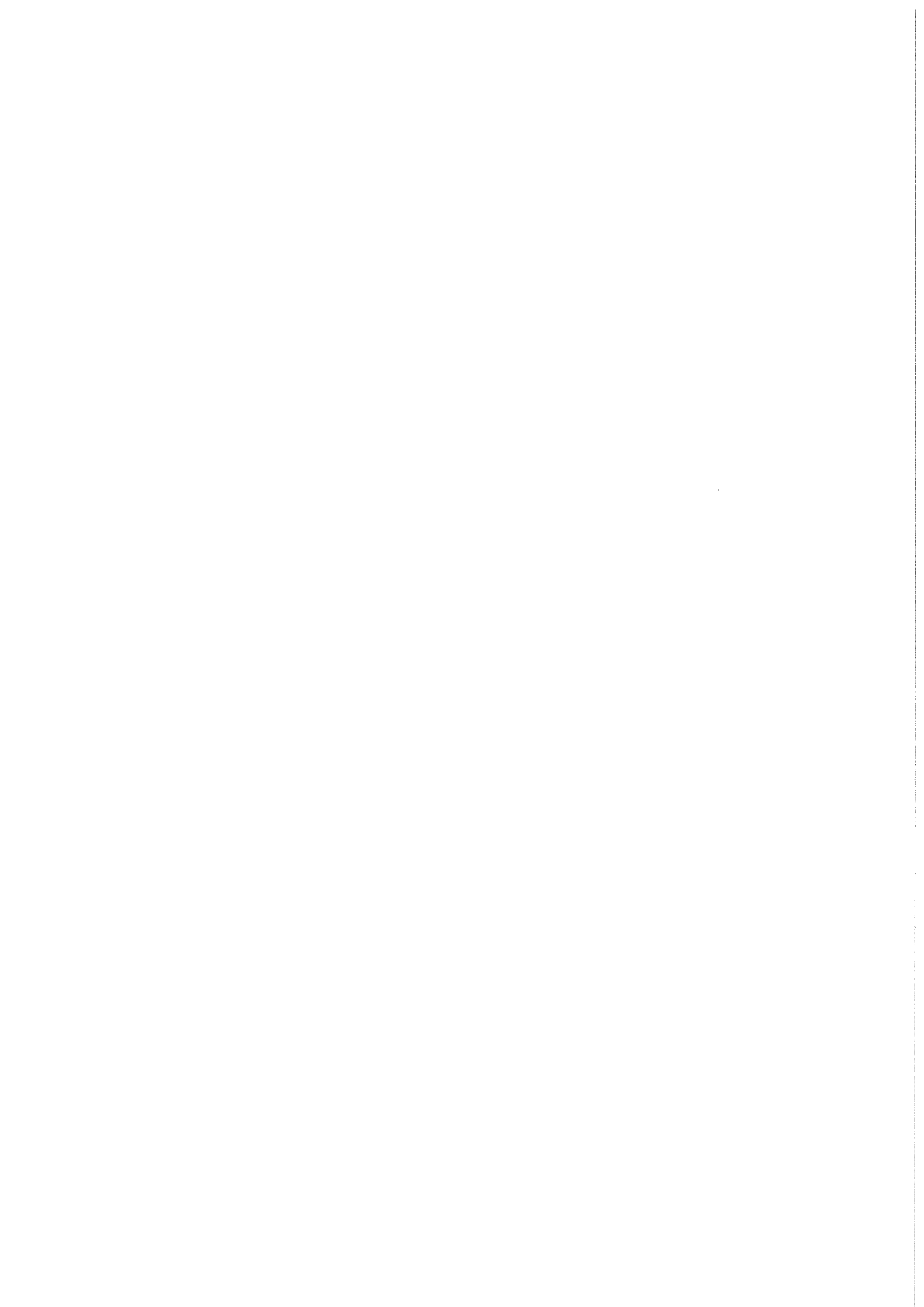


KfK 5215
September 1993

Kalibrierung einer Miniatur-Permanentmagnet- Potentialsonde zur Geschwindigkeits- und Temperaturmessung in Natrium

J. U. Knebel, L. Krebs
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

KfK 5215

**KALIBRIERUNG EINER
MINIATUR-PERMANENTMAGNET-POTENTIALSONDE
ZUR GESCHWINDIGKEITS- UND TEMPERATURMESSUNG
IN NATRIUM**

J. U. Knebel, L. Krebs

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0303-4003

Kalibrierung einer Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde zur Geschwindigkeits- und Temperaturmessung in Natrium

Kurzfassung

Für die Kalibrierung einer Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde, deren Funktionsweise auf dem Faradayschen Induktionsgesetz beruht, wird eine Meßvorschrift dargestellt, die es ermöglicht, die Empfindlichkeit der Potentialsonde und die Offsetwerte der temperaturkorrigierten Spannungen reproduzierbar zu ermitteln. Die Potentialsonde hat einen Außendurchmesser von 2.5 mm und ist mit Dreileiter-Thermoelementen (Alumel/Chromel/Stahl) ausgestattet. Die für die Potentialsonde charakteristischen K - und S_N^* -Werte werden bestimmt und interpretiert.

In der Teststrecke TEFLU werden das Geschwindigkeits- und das Temperaturfeld eines achsensymmetrischen, turbulenten Freistrahls in Natrium für elf Abstände vom Einspritzort ausgemessen.

Die Messungen werden zweimal unter identischen Bedingungen durchgeführt.

Die gemessenen radialen Geschwindigkeits- und Temperaturprofile sind für alle Abstände vom Einspritzort identisch reproduzierbar. Die Profile können sehr gut durch eine der Gaußschen Glockenkurve entsprechende Exponentialfunktion angenähert werden. Das Abklingen der maximalen Meßwerte für die Geschwindigkeit und die Temperatur auf der Kanalachse kann sehr gut durch Potenzgesetze als proportional zu $(x/d)^{-1}$ beschrieben werden.

Die bei vorangegangenen Potentialsonden aufgetretene Schiefe der Geschwindigkeitsprofile und die Nichtlinearitäten der gemessenen Spannungen bei den Kalibrierungsmessungen sind bei dieser Potentialsonde nicht zu erkennen.

Die berechnete Geschwindigkeit ist unabhängig von der verwendeten Paarung der Thermoelementadern.

**Calibration of a Miniature Permanent Magnet Flowmeter Probe
for Velocity and Temperature Measurement in Sodium**

Abstract

For the calibration of a miniature permanent magnet flowmeter probe, the working principle of which is based on the induction law, a measuring specification is given which allows to determine reproducibly the sensitivity of the flowmeter probe and the zero offsets of the temperature compensated voltages. The flowmeter probe has an outer diameter of 2.5 mm and is equipped with three-wire-thermocouples (Alumel/Chromel/stainless steel). The K - and S_N^* -values which are characteristic of the flowmeter probe are determined and discussed.

In the test section TEFLU the velocity and the temperature field of an axisymmetric turbulent jet of sodium is measured at eleven distances from the injection point.

The measurements are done twice under identical conditions.

The measured radial velocity and temperature profiles can be identically reproduced for all distances from the injection point. The profiles can be very well described with a Gaussian bell shaped exponential function. The decay of the maximum values of velocity and temperature along the center line can be very well described with potential laws as proportional to $(x/d)^{-1}$.

The skew in the velocity profiles and the nonlinearities of the measured voltages during calibration cannot be seen in connection with this flowmeter probe.

The calculated velocity is independent of the combination of thermocouple wires used.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Verzeichnis der Symbole	VII
Danksagung	X
1. Einführung und Problemstellung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Problemstellung	3
2. Natrium-Versuchsanlage	5
2.1 Wärmeübergangsprüfstand WÜP	5
2.2 Teststrecke TEFLU	7
2.3 Teststrecke FLUTMIK II	9
3. Temperaturkompensierte Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde	11
3.1 Physikalische Grundprinzipien	11
3.2 Aufbau und Wirkungsweise der MPP-Sonde	12
3.3 Signalverarbeitung	16
3.4 Bestimmung des Geschwindigkeits- und des Temperaturanteils aus den Spannungen	18
3.5 Ideale Kalibrierungsmessung und Voraussetzungen	20
3.6 Modifizierte Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^*	21
3.7 Geschwindigkeitsmessung bei überlagertem Temperaturgradienten	23
3.7.1 Bestimmung der Geschwindigkeit nach der K-Methode	23
3.7.2 Bestimmung der Geschwindigkeit nach der α -Methode	26
3.8. Reale Seebeckkoeffizienten S_A , S_C , S_S und ihre Auswirkungen	29
3.8.1 Auswirkung auf die Temperaturmessung	29
3.8.2 Auswirkung auf die gemessenen Spannungen am Beispiel der Kalibrierungsmessung	31
3.8.2.1 Kalibrierungsmessung ohne Temperaturgradient über die MPP-Sonde	31
3.8.2.2 Kalibrierungsmessung mit Temperaturgradient über die MPP-Sonde	32
3.9 Änderung der Offsetwerte durch Inhomogenitäten in den Thermoelementadern	33
3.10 Einsatz von Dreileiter-Thermoelementen	34

4. Kalibrierungsmessung und Eichmessung	37
4.1 Ermittlung der scheinbaren Temperaturdifferenzen	38
4.2 Kalibrierungsmessung	38
4.3 Meßvorschrift für die Kalibrierungsmessung	47
4.4 Bestimmung der K - und S_N^* -Werte (Eichmessung)	48
5. Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes in einem turbulenten Freistrah	53
5.1 Strömungskonfiguration und Versuchsparameter	53
5.2 Geschwindigkeitsmessung	55
5.3 Temperaturmessung	63
5.4 Vergleich mit vorangegangenen Messungen	70
5.5 Zusammenfassung der Meßergebnisse	71
6. Fehlerrechnung	72
7. Literatur	78
A. Anhang	81
A.1 Herleitung der Gleichungen (3.9) bis (3.13)	81
A.2 Scheinbare und reale Temperaturdifferenzen	82
A.2.1 Herleitung der scheinbaren Temperaturdifferenz ΔT_{21sch}	82
A.2.2 Herleitung der realen Temperaturdifferenz ΔT_{21}	84
A.3 Kalibrierungsmessung	86
A.3.1 Kalibrierungsmessung ohne Temperaturgradient über die MPP-Sonde	86
A.3.2 Kalibrierungsmessung mit Temperaturgradient über die MPP-Sonde	87
A.4 Daten des Wärmeübergangsprüfstands	88
A.5 Stoffdaten für Wasser und Natrium und Seebeckkoeffizienten	89

Verzeichnis der Symbole

Lateinisches Alphabet:

A_1, A_2	(V)	Konstante in Gl.(A.5), Gl.(A.6)
A_u, A_T	(1)	Abklingkonstanten in Gl.(5.5), Gl.(5.7)
B	(m^4/s^3)	Auftriebsfluß
\vec{B}	(Vs/ m^2)	Magnetfeld
B_u, B_T	(m^{-2})	Flankenneigung in Gl.(5.4), Gl.(5.6)
C_1, C_2	(1)	Konstante in Gl.(3.40), Gl.(3.41)
d	(m)	Durchmesser der Düsenblockbohrungen
D_i	(V)	Offsetwerte
E	(V)	induzierte, geschwindigkeitsproportionale Spannung
ES	(V/(m/s))	Empfindlichkeit der MPP-Sonde
\vec{E}_{th}	(V/m)	thermoelektrische Feldstärke
Fr	(1)	densimetrische Froude-Zahl
K	(1)	K-Wert der MPP-Sonde
K_1, K_2	($^{\circ}C$)	Konstanten in Gl.(3.40), Gl.(3.41)
M	(m^4/s^2)	Impulsfluß
M_i	(1)	Konstante in Gl.(A.13)
N_i	($^{\circ}C$)	Konstante in Gl.(A.13)
\vec{r}	(m)	Ortsvektor
r	(m)	radiale Meßposition der MPP-Sonde
Re	(1)	Reynolds-Zahl
R_{u0}, R_{T0}	(m)	Abstand der Maximalgeschwindigkeit, Maximal- temperatur aus Glockenkurvenfit zur Rohrachse
S	(V/K)	Seebeckkoeffizient
T	($^{\circ}C$)	Temperatur

u	(m/s)	Geschwindigkeit
U	(V)	Potentialdifferenz
x	(m)	Abstand der Meßebeine vom Düsenblock

Griechisches Alphabet:

α	(1)	α -Wert der MPP-Sonde
Γ	(m ² /s)	molekulare Diffusivität
λ	(W/m/K)	molekulare Wärmeleitfähigkeit
μ	(Ns/m ²)	dynamische Viskosität
ν	(m ² /s)	kinematische Viskosität
ρ	(kg/m ³)	Dichte
Φ	(V)	elektrisches Potential

Indizes:

a	Wert in der Anströmung
A	Alumel
AC	Thermoelementpaarung Alumel/Chromel
AS	Thermoelementpaarung Alumel/Stahl
ber	berechnet
cal	auf die Kalibrierungsmessung bezogen
C	Chromel
CL	Kanalachse (Center-Line)
O	Wert am Düsenaustritt
M	maximal
N	Natrium
S	Stahl
sch	scheinbar
v	auf die Vergleichsstelle bezogen

1, 2, 3, 4, 5

Positionsnummer der Thermoelementspitzen

21

auf die untere Sondenmeßebene 21 bezogen

43

auf die obere Sondenmeßebene 43 bezogen

Sonstige Zeichen:

—

zeitliche Mittelung

∇

Nabla-Operator

⊗

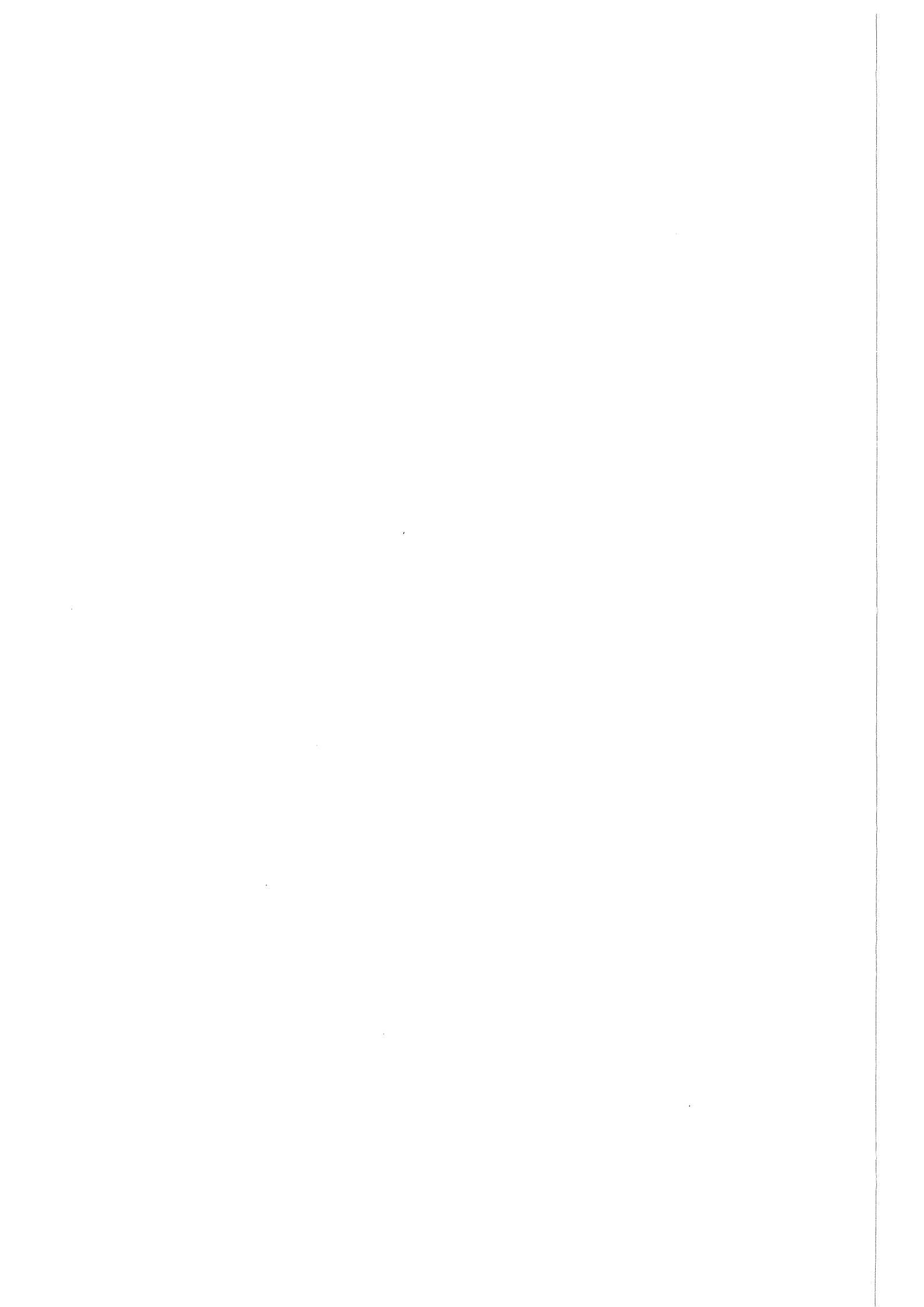
Kreuzprodukt

TK

temperaturkorrigiert

OK

offsetkorrigiert



Danksagung

Die ersten, umfangreichen Untersuchungen an einer temperaturkompensierten Potentialsonde zur Messung kleiner Geschwindigkeiten in einer Flüssigmetallströmung wurden in Zusammenarbeit mit Herrn S. Horanyi, Atomenergy Research Institute, Budapest, Ungarn, und darauf aufbauend von Herrn M. Prüßmann im Rahmen einer Studienarbeit in der Natrium-Teststrecke TEFLU am Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Sie umfaßten Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen in einem beheizten Freistrahle. Herr M. Prüßmann führte außerdem umfangreiche Kalibrierungs- und Eichmessungen mit 2.5 mm- und 5.0 mm-Potentialsonden durch.

Einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Kalibrierung leistete Herr B.P. Axcell, Manchester University, Manchester, United Kingdom, der den Einfluß von thermoelektrischen Effekten auf die Signale der Potentialsonde während der Kalibrierungsmessungen untersuchte und quantifizierte. Diese Erkenntnisse wurden von Herrn D. Giebert im Rahmen einer weiteren Studienarbeit angewandt.

Hatte der ursprüngliche Meßfehler bei Geschwindigkeiten von 0.1 m/s etwa 30 % betragen, so konnte aufbauend auf diesen Arbeiten eine 2.5 mm-Potentialsonde mit einer Empfindlichkeit von $47 \mu V/(m/s)$ soweit ertüchtigt werden, daß mittlere Geschwindigkeiten, die größer als 0.05 m/s sind, jetzt trotz eines überlagerten Temperaturgradienten mit einem Fehler gemessen werden können, der kleiner als 7 % ist.

Eine solche Genauigkeit für eine Geschwindigkeitsmessung in einer langsamen Flüssigmetallströmung mit Temperaturgradienten wurde bisher noch nicht erreicht.

Die Autoren möchten daher an dieser Stelle dem Leiter des Instituts für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik, Herrn Professor U. Müller, und allen beteiligten Kollegen danken, die durch Ihre intensive Mitarbeit dazu beigetragen haben, die vorgestellten Ergebnisse zu erzielen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn G. Laubscher, der mit außerordentlicher Gewissenhaftigkeit und Einsatzfreude den Natriumkreislauf betreute.

1. Einführung und Problemstellung

1.1 Einführung

In industriellen Anlagen, bei denen Prozesse bei hoher Wärmeleistungsdichte und hohen Temperaturen ablaufen, werden Flüssigmetalle aufgrund ihrer hohen molekularen Wärmeleitfähigkeit und ihres hohen Siedepunktes als Wärmeträgermedium eingesetzt.

Unter den Flüssigmetallen wird Natrium weltweit als Kühlmittel in Reaktoren großer Leistungsdichte, wie schnelle Brutreaktoren und Fusionsreaktoren, aber auch in Solarkraftanlagen eingesetzt.

Zur Untersuchung von thermo- und fluiddynamischen Austauschvorgängen in turbulenten Strömungen in flüssigem Natrium werden im Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH eine Reihe von Modellexperimenten durchgeführt. Parallel dazu werden die Ergebnisse der Modellexperimente durch Modellrechnungen simuliert.

Diese Untersuchungen sind in das Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur sicheren Nachwärmeabfuhr durch Naturkonvektion für den Europäischen Natriumgekühlten Schnellen Brutreaktor (European Fast Reactor, EFR) eingebunden. Das experimentelle Programm, das im folgenden kurz zusammengefaßt wird, ist von Hoffmann et al. (1991) ausführlich beschrieben.

Die Modellexperimente befassen sich sowohl mit den unterschiedlichen Kühlungsmechanismen und thermohydraulischen Phänomenen im Primärkreislauf und im Tauchkühlersystem (Direct Reactor Cooling system, DRC) des EFR als auch mit grundlegenden Untersuchungen in auftriebsbehafteten Strömungen. Dazu kommen Experimente im Natriumgekühlten Brutreaktor selbst.

Die Modellexperimente zur Reaktorkühlung werden in vereinfachten, zweidimensionalen und komplexen, dreidimensionalen Modellgeometrien durchge-

führt, die unterschiedliche Maßstäbe zum wirklichen Brutreaktor haben und die Wirklichkeit mit größer werdendem Maßstab immer genauer nachbilden. Der EFR ist zusammen mit den Systemen zur Nachwärmeabfuhr in Abb.(1-1) schematisch dargestellt.

Hoffmann und Weinberg (1992) stellen die wesentlichen Modellexperimente AQUARIUS (2D-Geometrie im Maßstab 1:20), RAMONA (3D-Geometrie im Maßstab 1:20) und NEPTUN (3D-Geometrie im Maßstab 1:5) vor, die am Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt werden. Als Modellfluid wird Wasser verwendet. Die Übertragung der in AQUARIUS, RAMONA und NEPTUN gewonnenen Ergebnisse auf die wirkliche Geometrie des Brutreaktors wird nach Weinberg et al. (1986) über Maßstabsgesetze vollzogen, die auf einer Übertragbarkeit der Reynolds-Zahl basieren.

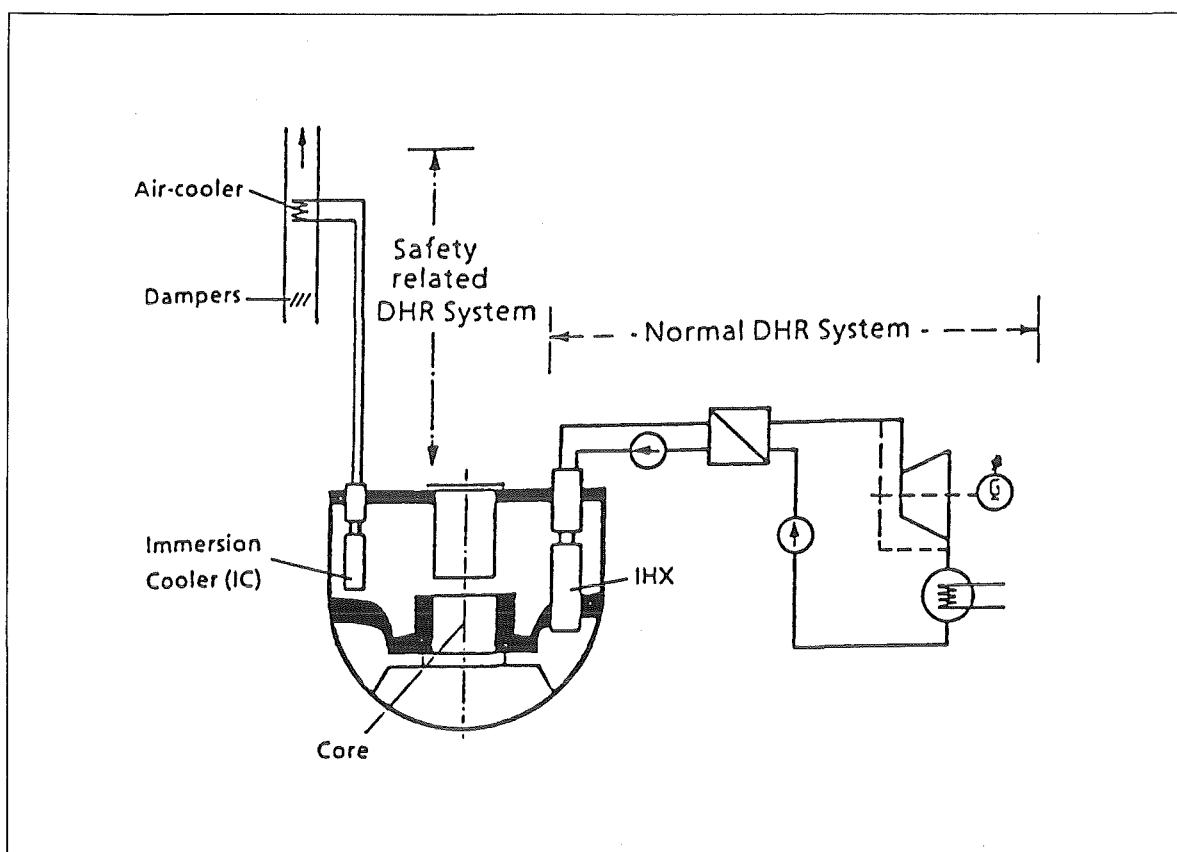


Abb.(1-1) Schematische Darstellung der Systeme zur Nachwärmeabfuhr des EFR nach Hoffmann et al. (1991).

Am Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik (IATF) soll an der Natrium-Teststrecke FLUTMIK II (Fluktuationen in turbulenter Mischkonvek-tion) das grundlegende Problem einer turbulenten Mischkonvektionsströmung hinter einem senkrecht stehenden, beheizten Zylinder in einer schwach turbulenten Grundströmung untersucht werden. Experimente in einer geometrisch identischen Wasser-Teststrecke FLUTMIK I wurden von Suckow (1993) durchgeführt.

Die Messungen in Natrium sollen mit den Messungen in Wasser verglichen werden, um eine Aussage über die Übertragbarkeit der thermo- und fluid-dynamischen Austauschvorgänge von Wasser auf Natrium zu treffen. Flüssiges Natrium besitzt ähnliche dynamische Eigenschaften wie Wasser, zeichnet sich aber durch eine um drei Größenordnungen kleinere molekulare Prandtl-Zahl aus. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Beschreibung der sich ändernden Transportmechanismen von Impuls und Wärme und dem sich ändernden Charakter der Strömung. Von Interesse ist der Einfluß der hohen molekulären Wärmeleitfähigkeit auf die Kopplung zwischen dem Geschwindigkeitsfeld und dem Temperaturfeld.

Ziel des Natrium-Experimentes ist die Messung des mittleren Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes und die Messung der Temperaturschwankungen stromab des beheizten Zylinders. Die Temperaturschwankungen werden nach statistischen Kennfunktionen wie Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, Leistungsdichtespektrum, Autokorrelationsfunktion und Kenngrößen wie integrale Zeit- und Längenmaßstäbe ausgewertet.

1.2 Problemstellung

Die Leistungsfähigkeit von Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonden, im folgenden als MPP-Sonden bezeichnet, im Bereich hoher und mittlerer Geschwindigkeiten (größer als 20 cm/s) ist in den vergangenen Jahren von

Horanyi und Krebs (1988) und Bremhorst und Krebs (1989, 1992) an der Teststrecke TEFLU (Temperatur-Fluktuationen) an Freistrahlen demonstriert worden. Die eingesetzten MPP-Sonden waren mit Zweileiter-Thermoelementen ausgestattet. Bei mittleren Geschwindigkeiten kleiner als 20 cm/s zeigen baugleiche MPP-Sonden, die von Axcell und Walton (1993) in der Teststrecke TEFLU eingesetzt wurden, ein physikalisch nicht erwartetes Verhalten:

- Die ermittelten Geschwindigkeitsprofile weisen eine Schiefe bezüglich der Längsachse der Teststrecke auf.
- Die Kalibrierungsmessungen der MPP-Sonde zeigen ein nichtlineares Verhalten.
- Die Meßergebnisse werden durch thermoelektrische Effekte beeinflusst.

Im Hinblick auf die an der Teststrecke FLUTMIK II durchzuführenden Experimente werden im Rahmen dieser Arbeit Vorversuche an Freistrahlen mit einer modifizierten MPP-Sonde durchgeführt. Diese MPP-Sonde ist mit Dreileiter-Thermoelementen ausgestattet.

Die in den Vorversuchen eingestellte Bulk-Geschwindigkeit (Geschwindigkeit bei gleichem Volumenstrom über den Querschnitt der Teststrecke) entspricht näherungsweise der mittleren Geschwindigkeit in der Teststrecke FLUTMIK II.

Vornehmliches Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung einer Meßvorschrift für die Kalibrierungsmessungen, mit Hilfe welcher die Empfindlichkeit der MPP-Sonde und die Offsetwerte der gemessenen Spannungen exakt und reproduzierbar ermittelt werden können. Ausgehend von den Kalibrierungsmessungen soll für einen Freistrahler ein reproduzierbarer Satz von mittleren Geschwindigkeits- und Temperaturprofilen ausgemessen und mit den Ergebnissen vorangegangener Messungen verglichen werden. Die Vorversuche sollen Aufschluß darüber geben, ob bei einem Übergang von Zweileiter auf Dreileiter-Thermoelemente eine Verbesserung der Geschwindigkeitsmessung möglich ist.

Zudem werden die Ergebnisse in Natrium kurz mit Ergebnissen in Wasser aus der Literatur verglichen.

2. Natrium-Versuchsanlage

2.1 Wärmeübergangsprüfstand WÜP

Das Kreislaufschema des Wärmeübergangsprüfstands ist in Abb.(2-1) dargestellt.

Die Teststrecken FLUTMIK II und TEFLU befinden sich an den mit TT1 (Testteil 1) und TT2 (Testteil 2) gekennzeichneten Stellen und sind in den WÜP integriert.

Das Natrium wird von einer elektromagnetischen Pumpe Ppel in einem geschlossenen Kreislauf umgewälzt. Die während des Betriebs der Teststrecken von Natrium durchströmten Rohrleitungen und Einbauten sind in Abb.(2-1) dick unterlegt. F1, F2 und F3 kennzeichnen induktive Volumenstrommeßgeräte, K1 bezeichnet einen Natrium/Luft-Wärmetauscher. E1 ist ein Erhitzer im Hauptstrom. Vor dem Erhitzer E1 wird vom Hauptstrom ein Nebenstrom abgezweigt (gestrichelte Rohrleitungen). Für viele Fälle ist es ausreichend, den Durchfluß durch Drosselung des Hauptstroms vor der Teststrecke TT1 einzustellen. Bei einem starken Druckverlust oder einem hohen Durchfluß wird die elektromagnetische Pumpe Ppe2 eingesetzt. Mit dem Erhitzer E2 kann der Nebenstrom separat aufgeheizt werden. Über eine thermisch isolierte Leitung kann der Nebenstrom als Freistrahler in die Teststrecke TT1 eingebracht werden.

Aufgrund der Schmelztemperatur des Natriums von $T_{\text{schmelz}} = 98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ist das gesamte Rohrleitungssystem von elektrischen Begleitheizungen umgeben. Durch das Begleitheizsystem wird die Natriumtemperatur konstant auf einer vorgegebenen Temperatur (bis maximal $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$) gehalten. Die Schwankungen liegen im Stundenbereich unter 0.3 K , im Minutenbereich unter 0.1 K . Die von Natrium durchströmten Komponenten sind mehrschichtig isoliert, um Wärmeverluste an die Umgebung möglichst gering zu halten. Zur Kompensation der

temperaturbedingten Volumenänderung des Natriums und zur Sicherstellung einer gasfreien Natriumströmung im gesamten Kreislauf ist im höchsten Punkt des WÜP ein Ausgleichsbehälter B2 angeordnet. Sämtliche freie Oberflächen sind mit Argon beaufschlagt, um eine Oxidation des Natriums zu verhindern. Um unvorhergesehene Lufteinbrüche zu vermeiden, wird der gesamte WÜP bei leichtem Überdruck betrieben. Ein im Bypass betriebener Hilfskreislauf ermöglicht die ständige Reinigung des Natriums in einer Kaltfalle KF1.

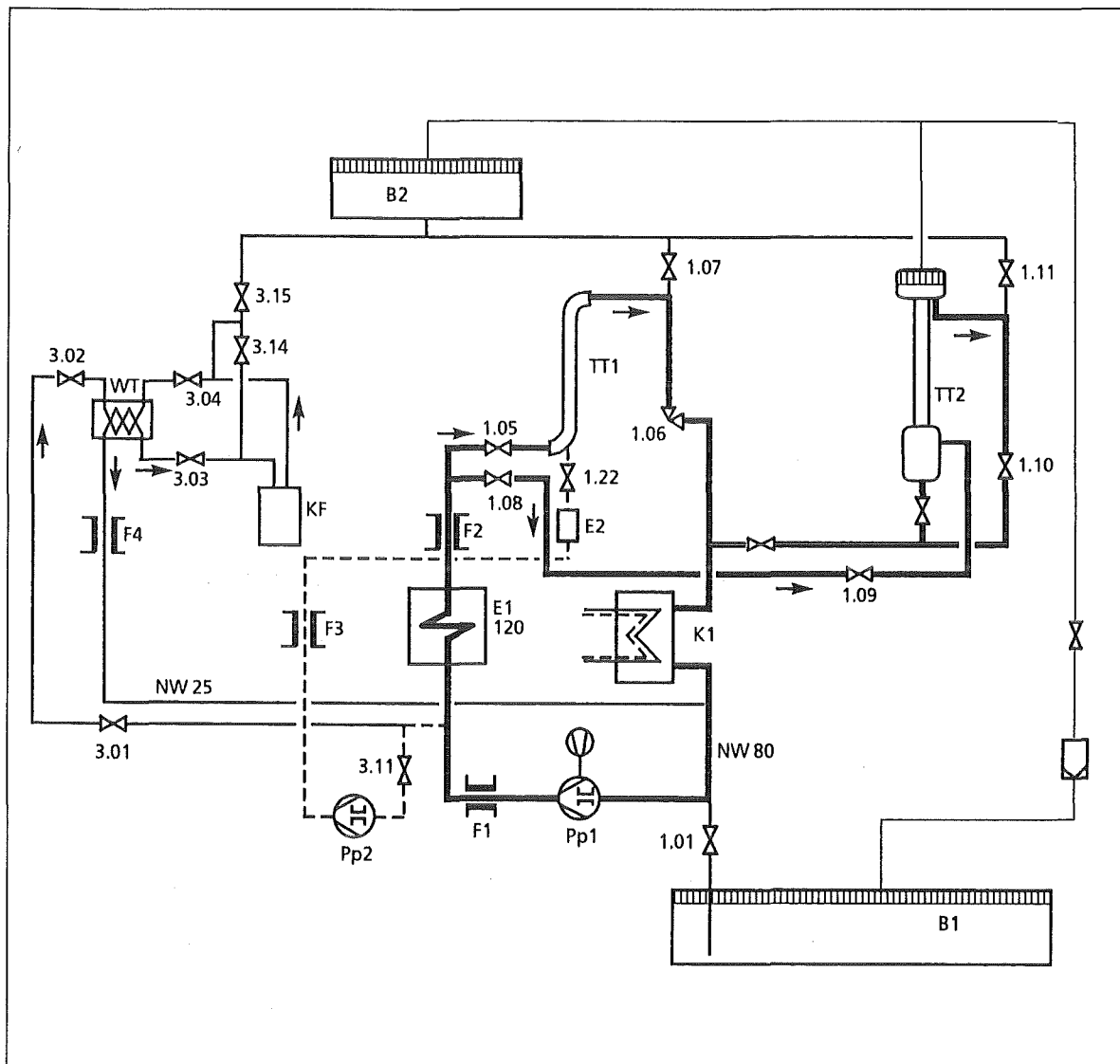


Abb. (2-1) Kreislaufschema des Wärmeübergangsprüfstands WÜP.

2.2 Teststrecke TEFLU

Der prinzipielle Aufbau der Teststrecke TEFLU ist in Abb.(2-2) dargestellt. Die Teststrecke TEFLU besteht aus einem vertikal angeordneten Rohr (Innendurchmesser 110 mm) und einem in diesem Rohr axial verstellbaren Düsenblock (Abb.(2-3)). Die Teststrecke hat eine Gesamtlänge von 2146 mm .

Das Natrium durchströmt die Teststrecke von unten nach oben. Der Düsenblock enthält 158 Bohrungen mit einem Durchmesser von $d = 7.2\text{ mm}$. Die Bohrungen liegen auf den Eckpunkten gleichseitiger Dreiecke und haben einen Lochmittenabstand von 8.2 mm . Der Düsenblock hat eine Länge von 120 mm . Durch die mit dem Einspritzkanal verbundene zentrale Bohrung wird dem Hauptstrom (mittlere Temperatur \bar{T}_a , mittlere Geschwindigkeit \bar{u}_a) ein Freistrahler der mittleren Temperatur \bar{T}_0 und der mittleren Geschwindigkeit \bar{u}_0 überlagert. Der Freistrahler breitet sich durch konvektiven und diffusiven Impuls- und Wärmetransport stromab vom Düsenblock in die kältere und langsamere Anströmung aus.

Zur Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes können Meßsonden in zwei Meßebenen eingebaut werden. Der axiale Abstand der beiden Meßebenen voneinander beträgt 500 mm .

Eine automatische Verstelleinrichtung ermöglicht es, eine Meßsonde über den Rohrquerschnitt in einem Bereich von $10\text{ mm} \leq r \leq 100\text{ mm}$ zu verfahren. Mit Hilfe der axialen Verstelleinrichtung des Düsenblocks kann der Abstand x zwischen der ersten Meßebene und dem Düsenblock in einem Bereich von $1.4 \leq x/d \leq 70$ variiert werden. Der Abstand x vom Düsenblock wird mit dem Durchmesser d der Düsenblockbohrungen normiert.

Im folgenden wird das in Abb.(2-3) dargestellte Koordinatensystem zugrunde gelegt.

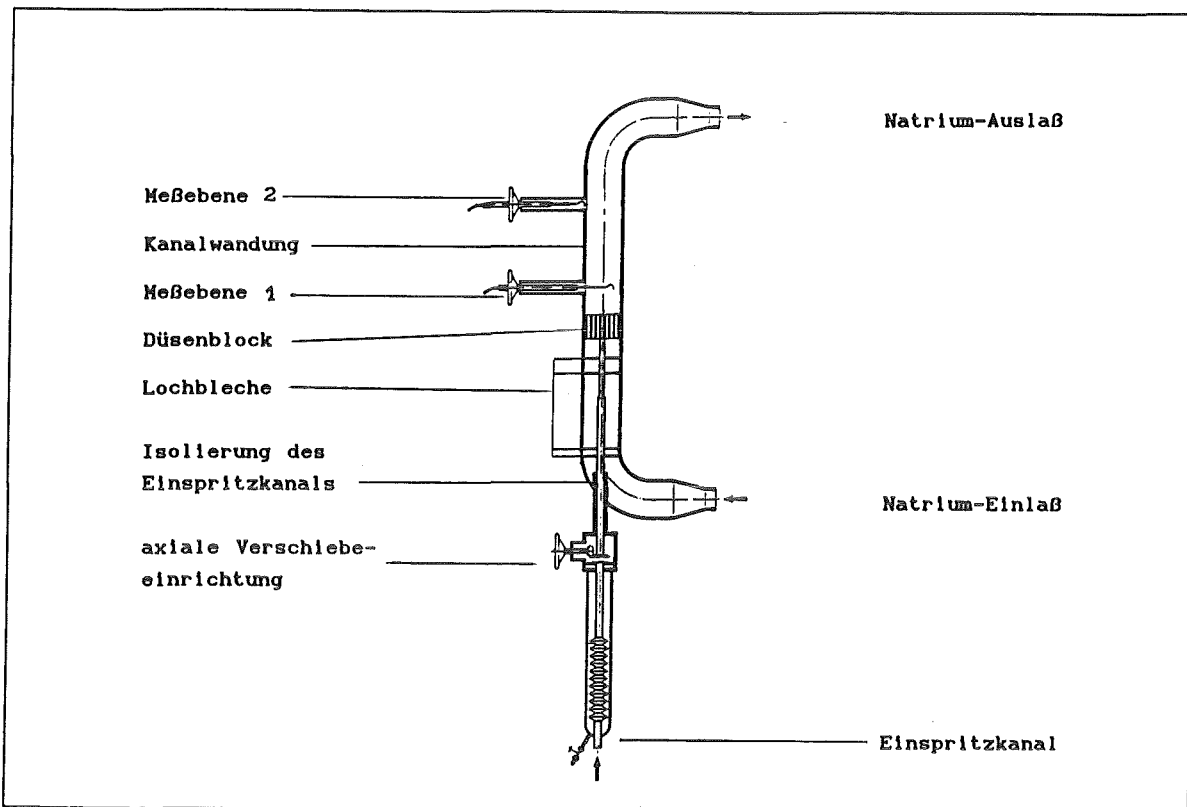


Abb. (2-2) Schematische Darstellung der Teststrecke TEFLU.

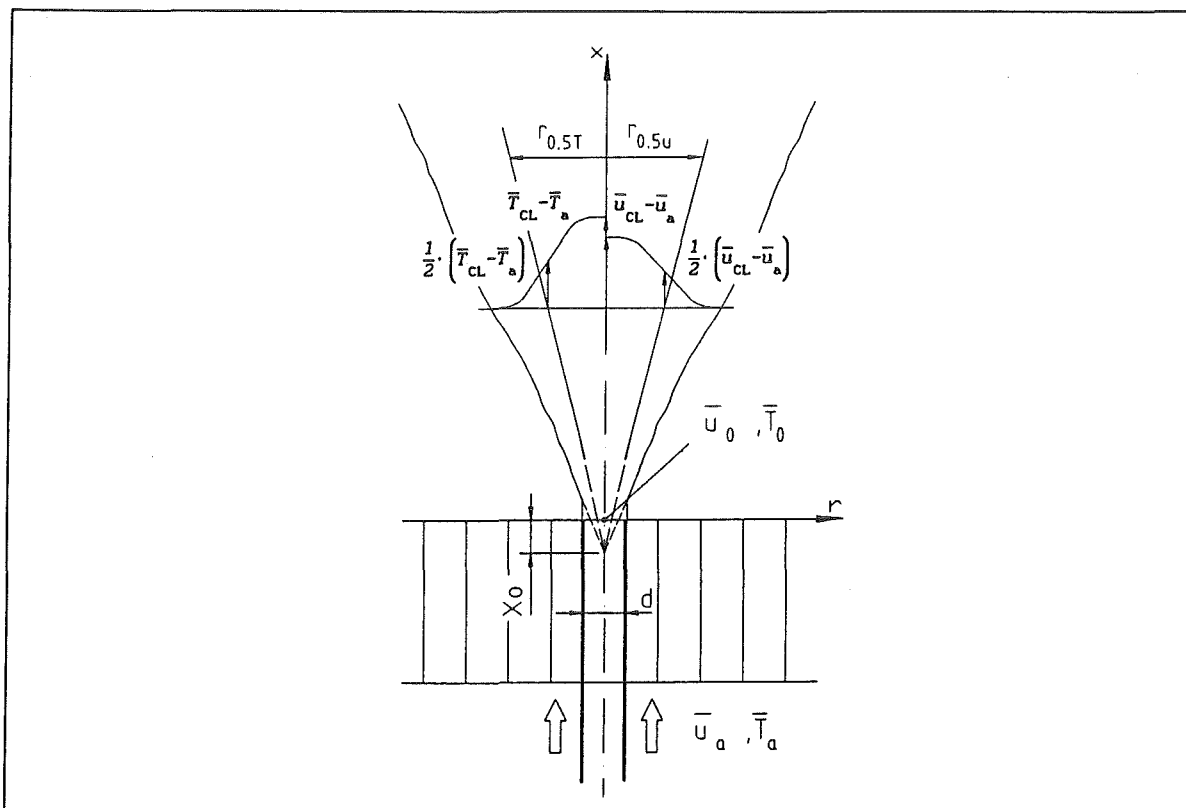


Abb. (2-3) Schematische Darstellung des Düsenblocks und des verwendeten Koordinatensystems.

2.3 Teststrecke FLUTMIK II

Der prinzipielle Aufbau der Teststrecke FLUTMIK II ist in Abb.(2-4) dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung gibt Knebel (1990).

Mit dieser Teststrecke wird die Nachlaufströmung eines senkrecht stehenden, beheizten Zylinders in einer turbulenten Grundströmung untersucht. Die Strömung ist dem Bereich der turbulenten Mischkonvektion zuzuordnen.

Die Teststrecke besteht aus einem Einlauf, der über einen Zylinderspalt in einen Beruhigungsbehälter mündet, in dem eine Lochplatte angebracht ist. Die Lochplatte erzwingt eine gleichmäßige Strömung über den gesamten Querschnitt des Behälters. Aus dem Beruhigungsbehälter strömt das Natrium über einen Einlauftrichter in einen Rechteckkanal. Der Rechteckkanal hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von *140 mm*. Der Rechteckkanal besteht aus zwei Abschnitten: Der Einlaufstrecke und der Meßstrecke. Der Zylinderheizer wird mit Hilfe des Zylinderheizergrundstabes von unten in die Meßstrecke eingeführt und positioniert. Der Zylinderheizer hat einen Durchmesser von *10 mm*. Unterhalb des Zylinderheizers sind ein Gleichrichterblock und zwei Glättungssiebe angeordnet. Ihr Druckabfall und ihr Abstand zueinander ist so ausgelegt, daß sie Ungleichmäßigkeiten in der Anströmung ausgleichen. An den Zylinderheizer schließt die Meßstrecke mit einer Länge von *1000 mm* an. Am Ende der Meßstrecke fließt das Natrium über Schlitze in einen Ablaufbehälter mit freier Natriumoberfläche. Auf den Ablaufbehälter ist ein 3-Achsen-Sondenpositioniersystem aufgesetzt. Von diesem werden 2 Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonden, die an der Spitze eines Sondengrundstabes sitzen, über Servomotoren im Bereich der Meßstrecke positioniert. Der Sondengrundstab ist über zwei Membranbälge gegenüber der Umgebung abgedichtet.

Der Zylinderheizergrundstab und der Sondengrundstab können über Flansche mit Schweißlippendichtungen gewechselt werden.

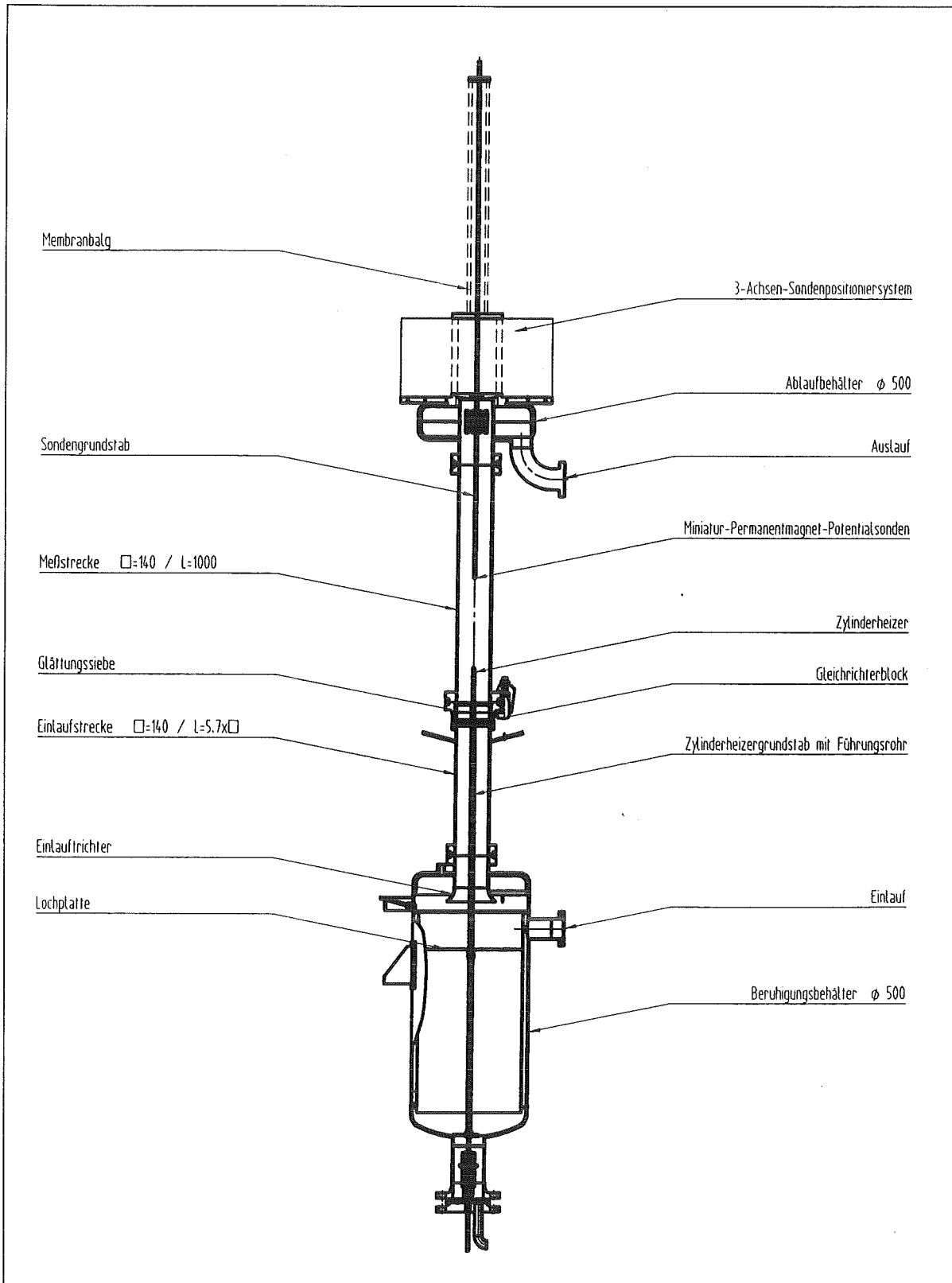


Abb. (2-4) Natrium-Teststrecke FLUTMIK II (Fluktuationen in turbulenter Mischkonvektion).

3. Temperaturkompensierte Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde

3.1 Physikalische Grundprinzipien

Um die späteren Ausführungen über Aufbau und Wirkungsweise der MPP-Sonde leichter verstehen zu können, soll hier auf die Begriffe thermoelektrische Potentialdifferenz und Faradaysches Induktionsgesetz näher eingegangen werden.

Thermoelektrische Potentialdifferenz (Seebeck-Potential)

Besitzt ein elektrischer Leiter an seinen beiden Enden verschiedene Temperaturen T_2 und T_1 mit $T_2 > T_1$, so wird zwischen diesen Enden eine thermoelektrische Potentialdifferenz erzeugt. Die Ursache dafür ist eine Störung des thermodynamischen Gleichgewichts der freien Elektronen im Leiter.

Durch Einführung der thermoelektrischen Feldstärke

$$\vec{E}_{th} = S(T) \cdot \text{grad } T \quad (3.1)$$

ergibt sich mit

$$d\Phi = \vec{E}_{th} \cdot d\vec{r} \quad (3.2)$$

die thermoelektrische Potentialdifferenz $\Delta\Phi_{21}$ zwischen den Punkten 1 und 2 des Leiters zu

$$\Delta\Phi_{21} = \Phi_2 - \Phi_1 = \int_{T_2}^{T_1} S(T) \cdot dT \quad (3.3)$$

Darin ist $S(T)$ der Seebeckkoeffizient, der vom Material des verwendeten elektrischen Leiters und von der Temperatur abhängt.

Besitzt der elektrische Leiter im betrachteten Temperaturintervall $[T_1, T_2]$ einen konstanten Seebeckkoeffizienten S , so ergibt sich die thermoelektrische Potentialdifferenz zwischen den Punkten 1 und 2 zu

$$\Delta\Phi_{21} = -S \cdot (T_2 - T_1) = -S \cdot \Delta T_{21} \quad (3.4)$$

Faradaysches Induktionsgesetz

Bewegt man einen elektrischen Leiter in einem magnetischen Feld \vec{B} , so wird in ihm eine elektromotorische Kraft \vec{E} (EMK) induziert, die sowohl senkrecht zur Bewegungsrichtung als auch senkrecht zum Magnetfeld gerichtet ist. Durch die EMK erfolgt eine Ladungstrennung. Das dabei erzeugte elektrische Feld ist proportional dem Magnetfeld und der Bewegungsgeschwindigkeit \vec{u} des elektrischen Leiters.

$$\vec{E} \propto \vec{u} \otimes \vec{B} . \quad (3.5)$$

3.2 Aufbau und Wirkungsweise der MPP-Sonde

Die Konstruktion der MPP-Sonde basiert auf den in Kapitel 3.1 erläuterten physikalischen Effekten. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb.(3-1) dargestellt.

In zwei übereinanderliegenden Sondenmeßebenen sind jeweils zwei Thermoelemente mit den Positionssnummern 1 und 2 für die untere und den Positionssnummern 3 und 4 für die obere Sondenmeßebene angeordnet. Der Abstand der beiden Sondenmeßebenen voneinander beträgt 3 mm. Zwischen den Thermoelementen der unteren Sondenmeßebene ist ein scheibenförmiger *AlNiCo 450* Permanentmagnet mit diagonaler Magnetisierungsrichtung eingebaut. Dieser Permanentmagnet zeichnet sich nach Müller und Thun (1977) dadurch aus, daß sein Magnetfeld über einen langen Zeitraum hinweg konstant bleibt. Die Thermoelemente der unteren Sondenmeßebene sind so angeordnet, daß ihre Verbindungslinie senkrecht zu den Magnetfeldlinien des Permanentmagneten steht.

Der Außendurchmesser der MPP-Sonde beträgt 2.5 mm.

Flüssiges Natrium, das ein guter elektrischer Leiter ist, strömt mit der mittleren Geschwindigkeit \vec{u} an dem Permanentmagneten vorbei. Die Strömungs-

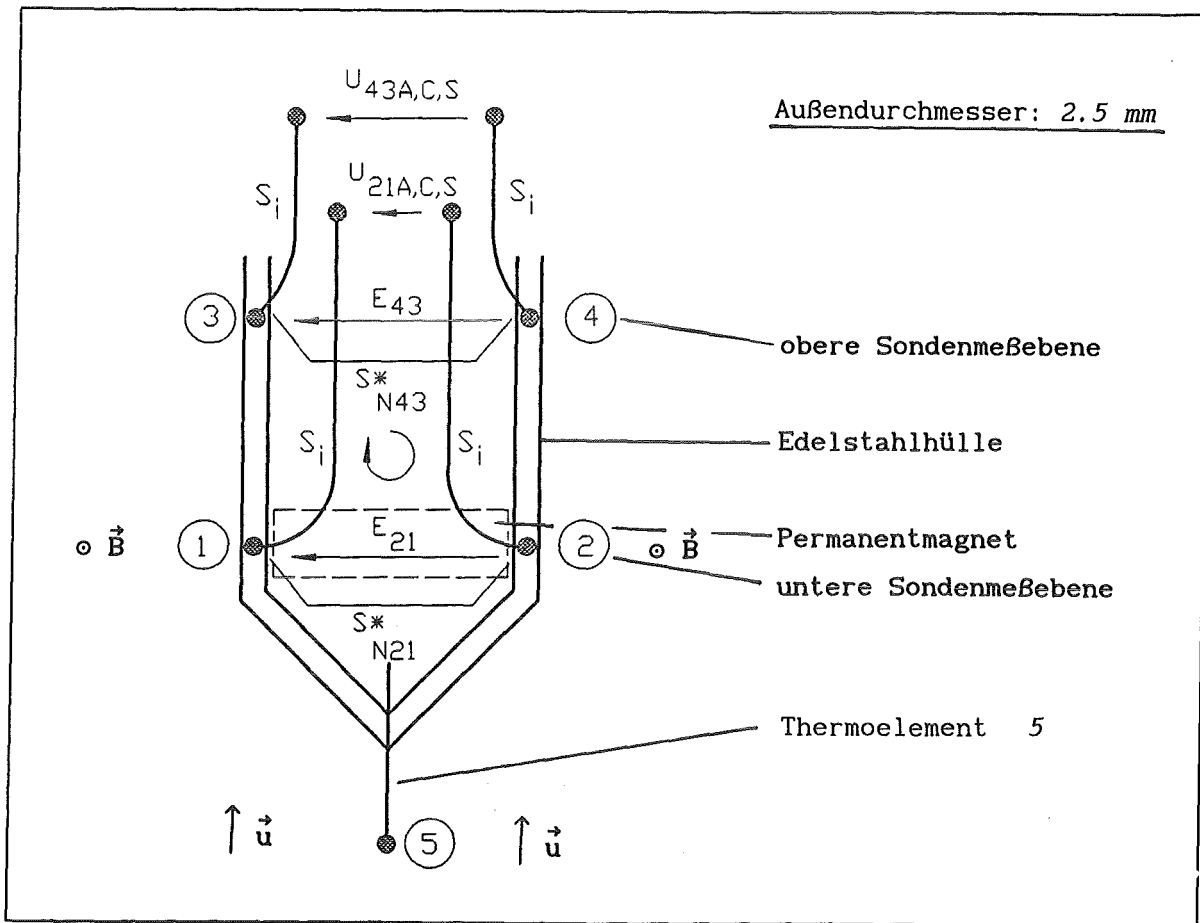


Abb.(3-1) Prinzipieller Aufbau der Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde.

richtung ist senkrecht zur magnetischen Feldstärke \vec{B} . Aufgrund des Magnetfeldes erfahren die freien Elektronen im Natrium Kräfte, die sowohl auf die MPP-Sonde zu als auch von der MPP-Sonde weggerichtet sind. Dadurch wird zwischen den Punkten 1 und 2 eine Potentialdifferenz induziert.

Setzt man eine isotherme Strömung voraus, so berechnet sich die Poisson-Gleichung für das elektrische Potential Φ aus den stationären Maxwell-Gleichungen und dem Ohmschen Gesetz nach von Weissenfluh (1984) zu

$$\nabla^2 \Phi = \text{div}(\vec{u} \otimes \vec{B}) . \quad (3.6)$$

Wird ein zeitlich konstantes Magnetfeld \vec{B} vorausgesetzt, so ist das induzierte elektrische Potential Φ direkt proportional zur mittleren Geschwin-

digkeit \vec{u} des Natriums. Das Potential wird durch folgende physikalischen Effekte beeinflusst:

- induziertes magnetisches Feld,
- Grenzschicht an der Sondenoberfläche,
- thermomagnetisches Potential (Nernst-Ettinghausen-Effekt),
- thermoelektrische Potentialdifferenz aufgrund eines Temperaturgradienten über die MPP-Sonde (Seebeck-Potential).

Eine Vernachlässigung der ersten 3 Effekte ist aufgrund ihrer geringen Größe nach von Weissenfluh (1984) gerechtfertigt. Der Einfluß des Seebeck-Potentials muß allerdings berücksichtigt werden.

Zur Messung der induzierten Potentialdifferenz und zur Kompensation des thermoelektrischen Potentials werden Dreileiter-Thermoelemente mit auf 0.25 mm Durchmesser verjüngter Meßspitze verwendet. Jedes Thermoelement besitzt drei Adern: Alumel (Ni-Legierung), Chromel (NiCr-Legierung) und Stahl (1.4550). Die Meßstelle ist als TM-Meßstelle ausgeführt, das heißt die Spitzen sind mit dem Thermoelementmantel verschweißt. Die Thermoelementadern besitzen eine hohe Oxidationsbeständigkeit bei erhöhten Temperaturen (ASTM (1971), Kinzie (1973)).

Die Seebeckkoeffizienten von Alumel, Chromel und Stahl sind nach Powell et al. (1974) und den für die Versuche relevanten Temperaturbereich in Tabelle (3-1) angegeben. Das Bezugsmaterial ist Platin, dessen Seebeckkoeffizient zu Null definiert ist. Für die Auswertung der Messungen werden die Seebeckkoeffizienten, wie sie sich für eine mittlere Temperatur von $\bar{T} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$ ergeben, verwendet.

Das vornehmliche Ziel dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung, ob bei der Verwendung der Stahlader anstelle der stark temperaturempfindlichen Chromelader eine Verbesserung der Geschwindigkeitsmessung möglich ist.

An der Spitze der MPP-Sonde ist ein zusätzliches Thermoelement 5 mit einem Außendurchmesser von 0.25 mm angebracht, das 5 mm in das Natrium hineinreicht. Es kann zur Messung der mittleren Temperatur und der Temperaturschwankungen herangezogen werden. Der Abstand zwischen der unteren Sondenmeßebene und der Spitze des Thermoelements 5 beträgt $1 \cdot x/d$. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen ist das Thermoelement 5 nicht angeschlossen. Mit den Thermoelementen 1 bis 4 können an den 4 Sondenmeßpunkten die mittlere Temperatur gemessen werden.

Temperatur [°C]	Seebeckkoeffizienten [$\mu V/K$]		
	Alumel	Chromel	Stahl
300	- 7.334	34.125	11.693
301	- 7.337	34.133	11.668
303	- 7.342	34.150	11.616
305	- 7.348	34.166	11.565
307	- 7.353	34.181	11.514
309	- 7.358	34.197	11.463
311	- 7.363	34.212	11.413
313	- 7.368	34.226	11.363
<u>315</u>	<u>- 7.373</u>	<u>34.241</u>	<u>11.314</u>
317	- 7.378	34.254	11.265
319	- 7.383	34.268	11.217
321	- 7.388	34.281	11.169
323	- 7.393	34.294	11.122
325	- 7.398	34.306	11.075
327	- 7.403	34.319	11.028
329	- 7.408	34.330	10.982
330	- 7.410	34.336	10.959

Tabelle (3-1) Seebeckkoeffizienten von Alumel, Chromel und Stahl für den Temperaturbereich $300 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \bar{T} \leq 330 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
Bezugsmaterial ist Platin.

3.3 Signalverarbeitung

Der Abgriff der an der MPP-Sonde anliegenden Spannungen und deren Weiterverarbeitung ist in Abb.(3-2) schematisch dargestellt.

Die zwischen den Thermoelementadern gleichen Materials anliegenden Mittelwerte der Potentialdifferenzen U_{21A} , U_{21C} , U_{21S} in der unteren Sondenmeßebene 21 und die Mittelwerte der Potentialdifferenzen U_{43A} , U_{43C} , U_{43S} in der oberen Sondenmeßebene 43 werden mit Digitalmultimetern erfaßt. Diese Potentialdifferenzen werden im folgenden als Spannungen bezeichnet.

Parallel dazu werden ebenfalls mit Digitalmultimetern die Mittelwerte der Thermoelementspannungen aufgenommen, die zwischen den Alumel- und Chromeladern der an den Sondenmeßpunkten 1 bis 5 angebrachten Thermoelemente anliegen. Die maximale Auflösung der Digitalmultimeter beträgt für die Gleichspannungsmessung $0.1 \mu V$.

Zusätzlich kann der RMS-Wert von Thermoelement 5 erfaßt werden. Außerdem können die Temperaturschwankungssignale von Thermoelement 5 in einer getrennten Aufnahmeelektronik verstärkt, nach Abzug des Temperaturmittelwertes gefiltert und nochmals verstärkt werden.

Die analog/digital gewandelten Meßwerte der Digitalmultimeter werden über IEEE-Schnittstellen an einen Personal Computer übergeben.

Parallel zu den Daten der MPP-Sonde werden die Kreislaufdaten

- mittlere Geschwindigkeit der Anströmung \bar{u}_a ,
- mittlere Geschwindigkeit des Freistrahls am Düsenaustritt \bar{u}_0 ,
- mittlere Temperatur des Freistrahls am Düsenaustritt \bar{T}_0 ,
- Wandtemperatur der Teststrecke \bar{T}_w und
- radiale Position r der MPP-Sonde

mit einem Datenlogger aufgenommen und über eine serielle Schnittstelle RS232 an den Personal Computer weitergegeben. Die maximale Auflösung beträgt $\pm 10 \mu V$.

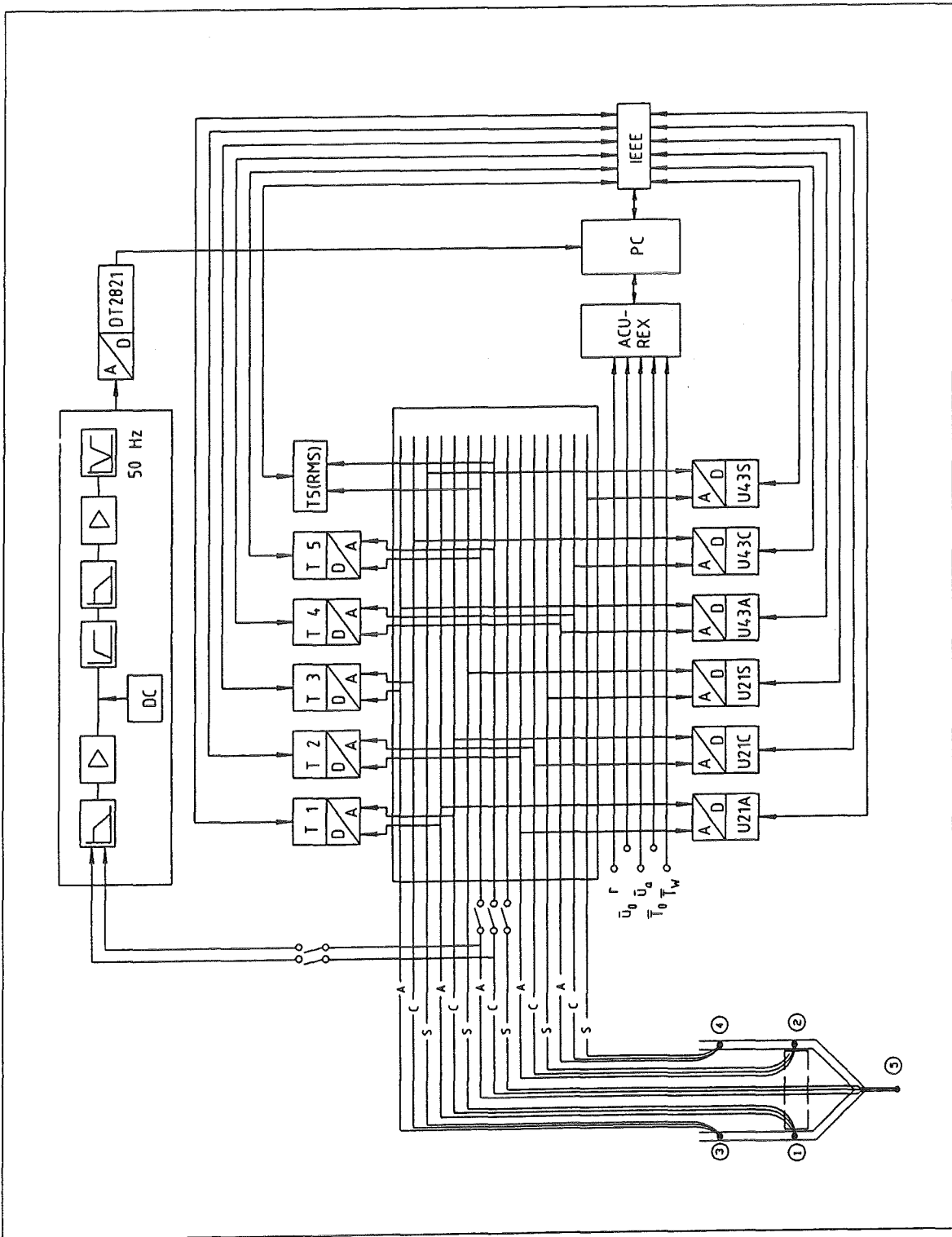


Abb. (3-2) Signalverarbeitung an der Natrium-Teststrecke TEFLU.

3.4 Bestimmung des Geschwindigkeits- und des Temperaturanteils aus den Spannungen

Um die Spannungen U_{21A} , U_{21C} , U_{21S} und U_{43A} , U_{43C} , U_{43S} formelmäßig beschreiben zu können, werden folgende Überlegungen angestellt:

1. Für den in den Experimenten untersuchten Temperaturbereich $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \bar{T} \leq 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden die Seebeckkoeffizienten S_A , S_C und S_S der Thermoelementdrähte Alumel, Chromel und Stahl als konstant angenommen und gleich den in Tab.(3-1) für $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ angegebenen Werten gesetzt.

2. Die Edelmühlhülle der MPP-Sonde und das die MPP-Sonde umgebende flüssige Natrium sind elektrische Leiter. In der unteren Sondenmeßebene stellt der Permanentmagnet im Vergleich zur oberen Sondenmeßebene einen zusätzlichen elektrischen Leiter dar, sofern zwischen Permanentmagnet und Edelmühlhülle eine elektrisch leitende Verbindung vorhanden ist. Liegt ein Temperaturgradient über die MPP-Sonde vor, so werden zwischen den Spitzen der Thermoelemente der oberen und den Spitzen der Thermoelemente der unteren Sondenmeßebene thermoelektrische Potentialdifferenzen erzeugt.

Durch Einführung von modifizierten Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* für die untere und S_{N43}^* für die obere Sondenmeßebene, die bei elektrisch leitender Verbindung zwischen Permanentmagnet und Hülle unterschiedliche Werte aufweisen können, können diese Potentialdifferenzen berechnet werden. Die Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^* sind temperatur- und sondenabhängig.

Mit Gl.(3.4) ergeben sich die thermoelektrischen Potentialdifferenzen $\Delta\Phi_{21}$ und $\Delta\Phi_{43}$ zwischen den Meßpositionen 21 und 43 in der unteren und oberen Sondenmeßebene nach Abb.(3-1) zu

$$\Delta\Phi_{21} = - S_{N21}^* \cdot (T_2 - T_1) , \quad (3.7)$$

$$\Delta\Phi_{43} = - S_{N43}^* \cdot (T_4 - T_3) . \quad (3.8)$$

3. Aufgrund des geringen Abstandes der beiden Sondenmeßebeben zueinander beeinflußt das Magnetfeld des Permanentmagneten die Sondersignale beider Sondenmeßebeben.

Zusätzlich zur thermoelektrischen Spannung wird eine der Geschwindigkeit des Natriums proportionale Potentialdifferenz induziert. Die Größe dieser geschwindigkeitsproportionalen Spannung ist infolge der abgeschwächten Wirkung des Magnetfeldes in der oberen Sondenmeßebeben geringer als in der unteren Sondenmeßebeben.

Die Spannungen zwischen den Thermoelementadern gleicher Materialien lassen sich nach der Kirchhoffschen Regel mit den Gln.(3.3), (3.7) und (3.8) nach Abb.(3-1) für die beiden Sondenmeßebeben wie folgt angeben.

Untere Sondenmeßebeben:

$$U_{21A} = (S_A - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} , \quad (3.9)$$

$$U_{21C} = (S_C - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} , \quad (3.10)$$

$$U_{21S} = (S_S - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} . \quad (3.11)$$

Obere Sondenmeßebeben:

$$U_{43A} = (S_A - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} , \quad (3.12)$$

$$U_{43C} = (S_C - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} , \quad (3.13)$$

$$U_{43S} = (S_S - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} . \quad (3.14)$$

Die Herleitung der Gleichungen ist im Anhang A.1 gegeben.

E_{21} und E_{43} sind die der Geschwindigkeit des Natriums proportionalen induzierten Spannungen. Der Index 21 bezieht sich auf die untere Sondenmeßebeben 21, der Index 43 auf die obere Sondenmeßebeben 43.

Die Temperaturen an den Thermoelementmeßspitzen $j = 1, 2, 3, 4$ und 5 werden über die Thermospannungen zwischen den Alumel- und Chromeladern der jeweiligen Thermoelemente unter Verwendung von Gl.(3.4) berechnet.

$$T_{\text{ber}}^{(j)} = \frac{U_{\text{gem}}^{(j)}}{S_C - S_A} + T_V . \quad (3.15)$$

Darin sind U_{gem} die gemessene Thermospannung, T_{ber} die berechnete Temperatur und T_V die konstante Temperatur der Vergleichsstelle, bei der die Thermospannungen gemessen werden.

3.5 Ideale Kalibrierungsmessung und Voraussetzungen

Der Ausgangspunkt für jede Messung ist eine Kalibrierungsmessung. Sie dient der Ermittlung des Proportionalitätsfaktors zwischen der gemessenen Spannung und der Geschwindigkeit des Natriums.

Setzt man die Temperaturen

$$T_2 = T_1 = T_{\text{cal}} \quad (3.16)$$

und

$$T_4 = T_3 = T_{\text{cal}} , \quad (3.17)$$

so verschwinden in den Gln. (3.9) bis (3.14) die Temperaturdifferenzen ΔT_{21} und ΔT_{43} . Damit sind die sechs gemessenen Spannungen U_{21A} bis U_{43S} der Geschwindigkeit des Natriums direkt proportional.

Zur Messung der geschwindigkeitsproportionalen Spannungen dürfen sowohl das Temperatur- als auch das Geschwindigkeitsfeld keine radialen Gradienten im Bereich der MPP-Sonde aufweisen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so ergeben sich bei einer schrittweisen Erhöhung des Volumenstroms durch die Teststrecke und einer gleichzeitigen Messung der induzierten Spannungen die in Abb.(3-3) dargestellten idealen, linearen Verläufe.

Der Volumenstrom selbst wird mit einem induktiven Durchflußmesser bestimmt. Da die in der oberen Sondenmeßebene induzierte Spannung E_{43} im Vergleich zu der in der unteren Sondenmeßebene induzierten Spannung E_{21} kleinere Werte

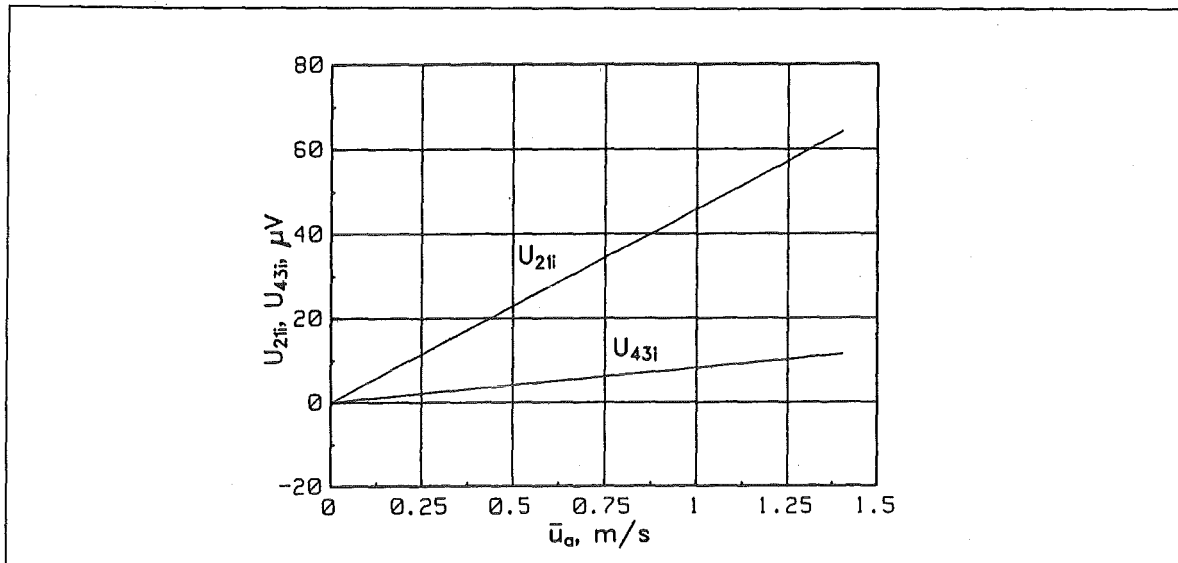


Abb.(3-3) Verlauf der induzierten Spannungen bei einer idealen Kalibrierungsmessung.

aufweist, ergeben sich zwei Ursprungsgeraden mit unterschiedlichen Steigungen. Die Steigungen der Geraden werden im folgenden als Empfindlichkeiten ES_{21} und ES_{43} der Sondenmeßebenen bezeichnet. Die Empfindlichkeiten haben die Dimension $\mu V/(m/s)$.

Aus Abb.(3-3) ergeben sich für die induzierten Spannungen folgende zwei Gleichungen:

$$E_{21} = ES_{21} \cdot \bar{u}_{Na} \quad (3.18)$$

$$E_{43} = ES_{43} \cdot \bar{u}_{Na} \quad (3.19)$$

Hierin ist \bar{u}_{Na} die aus dem Volumenstrom ermittelte mittlere Geschwindigkeit des Natriums.

3.6 Modifizierte Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^*

Durch Addition der Gln.(3.9), (3.10) und (3.9), (3.11) erhält man nach geeigneter Umformung beider Zwischenergebnisse zwei Gleichungen für den Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* der unteren Sondenmeßebene.

$$S_{N21}^* = - \frac{U_{21A} + U_{21C} - 2 \cdot E_{21}}{2 \cdot (T_2 - T_1)} + \frac{S_A + S_C}{2}, \quad (3.20)$$

$$S_{N21}^* = - \frac{U_{21A} + U_{21S} - 2 \cdot E_{21}}{2 \cdot (T_2 - T_1)} + \frac{S_A + S_S}{2}. \quad (3.21)$$

Eine analoge Rechnung mit den Gln.(3.12), (3.13) und (3.12), (3.14) führt zu zwei Gleichungen für den Seebeckkoeffizienten S_{N43}^* der oberen Sondenmeßebene.

$$S_{N43}^* = - \frac{U_{43A} + U_{43C} - 2 \cdot E_{43}}{2 \cdot (T_4 - T_3)} + \frac{S_A + S_C}{2}, \quad (3.22)$$

$$S_{N43}^* = - \frac{U_{43A} + U_{43S} - 2 \cdot E_{43}}{2 \cdot (T_4 - T_3)} + \frac{S_A + S_S}{2}. \quad (3.23)$$

Die Gln.(3.19) bis (3.23) zeigen, daß die modifizierten Seebeckkoeffizienten für die jeweilige Sondenmeßebene auf zwei Arten, das heißt unter Verwendung der Thermoelementpaarung Alumel/Chromel oder der Thermoelementpaarung Alumel/Stahl, bestimmt werden können. In Kapitel 3.10 wird auf diese Vorgehensweise näher eingegangen.

Bestimmung der S_N^* -Werte

Die Bestimmung von S_{N21}^* und S_{N43}^* erfolgt durch eine Eichmessung. Die Eichmessung wird in einem Geschwindigkeitsfeld definierter Größe und ohne radiale Gradienten durchgeführt, dem ein Temperaturfeld mit großen, radialen Gradienten überlagert ist.

Bei der Eichmessung wird die MPP-Sonde über den Rohrquerschnitt verfahren. Bei einem konstanten Volumenstrom, dem die über den Rohrquerschnitt konstante Strömungsgeschwindigkeit \bar{u}_{Na} entspricht, können mit Hilfe der Empfindlichkeiten ES_{21} und ES_{43} aus den Gln.(3.18) und (3.19) die geschwindigkeitsproportionalen Spannungen E_{21} und E_{43} angegeben werden. Die Span-

nungen U_{21A} bis U_{43S} (Gl. (3.9) bis (3.14)) sind Meßgrößen; die Temperaturen T_1 bis T_4 werden aus den gemessenen Thermospannungen berechnet. Da die Seebeckkoeffizienten S_A , S_C und S_S bekannt sind (Tabelle (3-1)), lassen sich auf diese Weise die S_N^* -Werte aus den Gln. (3.20) bis (3.23) bestimmen. Ist der Temperaturgradient über die MPP-Sonde klein, so verschwinden die Temperaturdifferenzen $(T_2 - T_1)$ und $(T_4 - T_3)$. Die Spannungen U_{21A} , U_{21C} , U_{21S} und U_{43A} , U_{43C} , U_{43S} entsprechen in diesem Fall den induzierten, geschwindigkeitsproportionalen Spannungen E_{21} oder E_{43} . Damit ergeben sich für die ersten Summanden in den Gln. (3.20) bis (3.23) Ausdrücke der Form " $\frac{0}{0}$ ". Hieraus folgt, daß sich die S_N^* -Werte nur bei hinreichend großen Temperaturgradienten in der Strömung bestimmen lassen.

3.7 Geschwindigkeitsmessung bei überlagertem Temperaturgradienten

Um die Geschwindigkeit des Natriums angeben zu können, muß die induzierte, geschwindigkeitsproportionale Spannung E_{21} bekannt sein. Liegt ein Temperaturgradient über die MPP-Sonde vor, so ist dieser geschwindigkeitsproportionalen Spannung eine thermoelektrische Potentialdifferenz überlagert, deren Anteil getrennt bestimmt werden muß.

Im folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, die durch Kompensation des Temperatureinflusses eine Bestimmung der geschwindigkeitsproportionalen Spannung E_{21} erlauben: die K-Methode und die α -Methode.

3.7.1 Bestimmung der Geschwindigkeit nach der K-Methode

Mit den Gln. (3.9) und (3.10) für die untere Sondenmeßebene und die Thermo-elementpaarung Alumel/Chromel erhält man durch Eliminierung der Temperaturdifferenz ΔT_{21}

$$\frac{U_{21A} - E_{21}}{S_A - S_{N21}^*} = \frac{U_{21C} - E_{21}}{S_C - S_{N21}^*} \quad (3.24)$$

Wird jetzt ein K-Wert K_{AC} mit

$$K_{AC} = \frac{S_A - S_{N21}^*}{S_C - S_{N21}^*} = \frac{U_{21A} - E_{21}}{U_{21C} - E_{21}} \quad (3.25)$$

eingeführt, so ist bei Kenntnis dieses K-Wertes eine Berechnung der geschwindigkeitsproportionalen Spannung E_{21} über die gemessenen Spannungen U_{21A} und U_{21C} möglich. Es gilt

$$E_{21} = \frac{U_{21A} - K_{AC} \cdot U_{21C}}{1 - K_{AC}} \quad (3.26)$$

Eine analoge Rechnung mit den Gln.(3.9) und (3.11) ergibt für die untere Sondenmeßebene und die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl einen K-Wert K_{AS} mit

$$K_{AS} = \frac{S_A - S_{N21}^*}{S_S - S_{N21}^*} = \frac{U_{21A} - E_{21}}{U_{21S} - E_{21}} \quad (3.27)$$

Mit bekanntem K_{AS} läßt sich die geschwindigkeitproportionale Spannung E_{21} über die gemessenen Spannungen U_{21A} und U_{21S} berechnen zu

$$E_{21} = \frac{U_{21A} - K_{AS} \cdot U_{21S}}{1 - K_{AS}} \quad (3.28)$$

Aus der geschwindigkeitsproportionalen Spannung E_{21} kann mit Gl.(3.18) die mittlere Geschwindigkeit des Natriums angegeben werden.

Wie die Gln.(4.26) und (4.28) zeigen, kann die Spannung E_{21} bei der K-Methode auf zwei Arten bestimmt werden: Zum einen über die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel und zum anderen über die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl.

Bestimmung der K-Werte

Die K-Werte K_{AC} und K_{AS} werden zuvor durch eine Eichmessung bestimmt. Die Eichmessung entspricht der Messung zur Bestimmung der modifizierten Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^* . Sie wird in einem Geschwindigkeitsfeld definierter Größe und ohne radiale Gradienten durchgeführt, dem ein Temperaturfeld mit großen radialen Gradienten überlagert ist. Dabei wird die MPP-Sonde über den Rohrquerschnitt verfahren. Die für die Bestimmung der K-Werte benötigte geschwindigkeitsproportionale Spannung E_{21} läßt sich bei vorgegebener und über den Rohrquerschnitt konstanter Strömungsgeschwindigkeit nach einer vorausgegangenen Kalibrierungsmessung aus Gl. (3.18) berechnen. Durch Messen der Spannungen U_{21A} , U_{21C} und U_{21S} sind jetzt alle Größen in den Gln. (3.25) und (3.27) bekannt.

Wie bereits bei der Bestimmung der S_N^* -Werte festgestellt, sind bei der Bestimmung der K-Werte große radiale Temperaturgradienten, das heißt starke Temperaturgefälle über der MPP-Sonde, erforderlich, da bei verschwindender Temperaturdifferenz ΔT_{21} auch die Gln. (3.25) und (3.27) in unbestimmte Ausdrücke der Form " $\frac{0}{0}$ " übergehen.

Die beiden K-Werte K_{AC} und K_{AS} besitzen eine Temperatur- und Sondenabhängigkeit, die durch die temperaturabhängigen Seebeckkoeffizienten S_A , S_C , S_S und S_{N21}^* bedingt ist. Die Sondenabhängigkeit wird ausschließlich durch den S_{N21}^* -Wert bewirkt, der von der Bauweise der MPP-Sonde abhängt.

Die K-Werte K_{AC} und K_{AS} werden in einem Bereich des Rohres bestimmt, in dem der Wandeinfluß keine Rolle spielt. Die K-Methode ist zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Natriums in Wandnähe nicht anwendbar. In der Nähe der nichtmagnetischen Rohrwand wird das magnetische Feld nur teilweise vom Flüssigmetall durchströmt. Dies führt zu einer Verringerung der induzierten Spannung.

3.7.2 Bestimmung der Geschwindigkeit nach der α -Methode

Ausgangspunkt für die α -Methode sind die Gln.(3.9) bis (3.14) für die sechs gemessenen Spannungen U_{21A} bis U_{43S} .

Durch Einführung eines α -Wertes mit

$$E_{43} = \alpha \cdot E_{21} , \quad (3.29)$$

der das Verhältnis der geschwindigkeitsproportionalen Spannungen von unterer zu oberer Sondenmeßebene darstellt und somit den abgeschwächten Einfluß des Permanentmagneten auf die obere Sondenmeßebene angibt, lassen sich die Gln.(3.12) bis (3.14) der oberen Sondenmeßebene umformen zu

$$U_{43A} = (S_A - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + \alpha \cdot E_{21} , \quad (3.30)$$

$$U_{43C} = (S_C - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + \alpha \cdot E_{21} , \quad (3.31)$$

$$U_{43S} = (S_S - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + \alpha \cdot E_{21} . \quad (3.32)$$

Der α -Wert ist sondenabhängig.

Damit der α -Wert den Einfluß des Permanentmagneten auf die obere Sondenmeßebene korrekt wiedergibt, muß die mittlere Geschwindigkeit an der unteren und der oberen Sondenmeßebene gleich sein. Dies ist aufgrund des geringen Abstands der beiden Sondenmeßebeben zueinander in einer axialen Kanalströmung gut erfüllt.

Die Bestimmung des α -Wertes erfolgt mit Hilfe einer Kalibrierungsmessung, wie sie in Kapitel 3.5 beschrieben ist. Unter Berücksichtigung der Gln.(3.18) und (3.19) kann der α -Wert auch als Quotient der Empfindlichkeiten der beiden Sondenmeßebeben geschrieben werden als

$$\alpha = \frac{ES_{43}}{ES_{21}} . \quad (3.33)$$

Setzt man zusätzlich voraus, daß die Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^* der unteren und oberen Sondenmeßebene gleich sind

$$S_{N21}^* \stackrel{!}{=} S_{N43}^* \stackrel{!}{=} S_N^*, \quad (3.34)$$

so folgt durch Eliminierung des Faktors $(S_A - S_N^*)$ in den Gln.(3.9) und (3.30) für die Spannung U_{21A}

$$U_{21A} = (U_{43A} - \alpha \cdot E_{21}) \cdot \frac{\Delta T_{21}}{\Delta T_{43}} + E_{21}. \quad (3.35)$$

Wird der Faktor $(S_C - S_N^*)$ in den Gln.(3.10) und (3.31) eliminiert, so ergibt sich für die Spannung U_{21C}

$$U_{21C} = (U_{43C} - \alpha \cdot E_{21}) \cdot \frac{\Delta T_{21}}{\Delta T_{43}} + E_{21}. \quad (3.36)$$

Ein Gleichsetzen der Terme $\Delta T_{21}/\Delta T_{43}$ in den Gln.(3.35) und (3.36) ergibt nach algebraischer Umformung die geschwindigkeitsproportionale Spannung E_{21} zu

$$E_{21} = \frac{U_{43A} \cdot U_{21C} - U_{21A} \cdot U_{43C}}{U_{43A} - U_{43C} + \alpha \cdot (U_{21C} - U_{21A})}. \quad (3.37)$$

E_{21} ist ausschließlich von den vier gemessenen Spannungen U_{21A} , U_{21C} , U_{43A} und U_{43C} und dem mit einer Kalibrierungsmessung bestimmten α -Wert abhängig. Eine analoge Rechnung mit den Gln.(3.11) und (3.32) ergibt für die Spannung U_{21S}

$$U_{21S} = (U_{43S} - \alpha \cdot E_{21}) \cdot \frac{\Delta T_{21}}{\Delta T_{43}} + E_{21}. \quad (3.38)$$

Durch Eliminierung des Terms $\Delta T_{21}/\Delta T_{43}$ in den Gln.(3.35) und (3.38) erhält man die der Geschwindigkeit des Natriums proportionale Spannung E_{21} zu

$$E_{21} = \frac{U_{43A} \cdot U_{21S} - U_{21A} \cdot U_{43S}}{U_{43A} - U_{43S} + \alpha \cdot (U_{21S} - U_{21A})}. \quad (3.39)$$

E_{21} ist ausschließlich von den gemessenen Spannungen U_{21A} , U_{21S} , U_{43A} und U_{43S} und dem α -Wert abhängig.

Ist die geschwindigkeitsproportionale Spannung auf diese Weise bestimmt, so kann mit Gl.(3.18) die mittlere Geschwindigkeit des Natriums angegeben werden. Wie bei der K-Methode ist eine Bestimmung von E_{21} auf zwei Arten möglich: Zum einen über die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel und zum anderen über die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl.

Im Fall gleich großer Seebeckkoeffizienten ist die α -Methode dann vorteilhaft, wenn die Geschwindigkeitsmessung in einer Flüssigmetallströmung mit unterschiedlichen Temperaturbereichen durchgeführt werden soll. Mit der α -Methode wird die Temperaturabhängigkeit der Seebeckkoeffizienten automatisch kompensiert.

Weichen die Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^* der unteren und oberen Sondenmeßebene stark voneinander ab, so kann die α -Methode zur Berechnung der Spannung E_{21} nicht angewendet werden.

Die α -Methode versagt außerdem in Bereichen mit kleinen Temperaturgradienten über die MPP-Sonde, da die Gln.(3.37) und (3.39) bei vernachlässigbaren Temperaturdifferenzen ΔT_{21} und ΔT_{43} in unbestimmte Ausdrücke der Form " $\frac{0}{0}$ " übergehen. In Wandnähe verliert sie ebenfalls ihre Gültigkeit, da die Rohrwand den Querschnitt des von Natrium durchströmten magnetischen Feldes verringert und somit die induzierte Spannung beeinflusst.

Die Berechnung der Geschwindigkeit des Natriums mit der in der oberen Sondenmeßebene induzierten, geschwindigkeitsproportionalen Spannung E_{43} ist mit der K-Methode und der α -Methode generell möglich. Aufgrund der geringen Empfindlichkeit ES_{43} ist dieses Vorgehen jedoch nicht sinnvoll.

3.8. Reale Seebeckkoeffizienten S_A , S_C , S_S und deren Auswirkungen

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt werden für die Geschwindigkeitsmessungen, die bei Temperaturen zwischen 300 °C und 330 °C durchgeführt werden, die Seebeckkoeffizienten von Alumel S_A , Chromel S_C und Stahl S_S für eine mittlere Temperatur von 315 °C aus Powell et al. (1974) entnommen und als konstant über den untersuchten Temperaturbereich angenommen (Tabelle (3-1)).

Die tatsächlichen Seebeckkoeffizienten der Thermoelementadern weichen von den angegebenen Literaturwerten ab. Gründe für eine Abweichung können chemische Verunreinigungen oder Inhomogenitäten im Material sein, das heißt lokal unterschiedliche Zusammensetzungen der Adern, Einschlüsse oder lokale Gitterstrukturänderungen infolge einer Gefügeumwandlung bei erhöhter Temperatur (Alterung). Auch Phasenausscheidungen in Bereichen, die erhöhter Temperatur ausgesetzt waren, führen zu einer ungleichmäßigen Zusammensetzung des Materials.

Die Abweichung der tatsächlichen Seebeckkoeffizienten von den Literaturwerten hat eine Differenz zwischen den gemessenen Spannungen und den Spannungen bei idealem Verhalten nach Gl.(3.9) bis (3.13) zur Folge. Die Auswirkungen dieses Effekts auf die Temperatur- und die Geschwindigkeitsmessung und die notwendigen und möglichen Vorgehensweisen zur Behebung derselben werden im folgenden näher erläutert.

3.8.1 Auswirkungen auf die Temperaturmessung

Die Temperaturen an den Sondenmeßpunkten 1, 2, 3 und 4 werden nach Gl.(3.15) mit den Spannungen berechnet, die zwischen den Alumel- und Chromeladern der Thermoelemente abgegriffen werden.

Die mit Gl.(3.15) berechnete Temperatur T_{ber} stimmt nicht mit der tatsäch-

lichen, realen Temperatur T überein, da für die Seebeckkoeffizienten S_A , S_C und S_S die Literaturwerte und nicht die realen Seebeckkoeffizienten der Adern verwendet werden. Zudem werden die Literaturwerte als konstant angenommen.

Betrachtet man eine isotherme Strömung der Temperatur $T = T_a$, so ergeben sich aufgrund der Abweichung zwischen berechneter und realer Temperatur scheinbare Temperaturdifferenzen ΔT_{21sch} und ΔT_{43sch} über die MPP-Sonde von

$$\Delta T_{21sch} = T_{a,ber}^{(2)} - T_{a,ber}^{(1)} = C_1 \cdot T_a + K_1, \quad (3.40)$$

$$\Delta T_{43sch} = T_{a,ber}^{(4)} - T_{a,ber}^{(3)} = C_2 \cdot T_a + K_2. \quad (3.41)$$

Die Herleitung der Gln.(3.40) und (3.41) ist im Anhang A.2.1 gegeben. Darin sind C_1 , C_2 , K_1 und K_2 Konstanten. Der hochgestellte Index bezeichnet die Positionsnummern 1, 2, 3, und 4 der Thermoelemente.

Eine Bestimmung der scheinbaren Temperaturdifferenzen erfolgt im Experiment. Dazu wird eine isotherme Strömung der Temperatur $T = T_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt und die Differenz der berechneten Temperaturen ermittelt. Die Konstanten C_1 und C_2 sind klein, so daß eine Temperaturabhängigkeit der scheinbaren Temperaturdifferenzen vernachlässigt werden kann. Liegt ein Temperaturgradient über die MPP-Sonde vor, so ergeben sich die realen Temperaturdifferenzen ΔT_{21} und ΔT_{43} zu

$$\Delta T_{21} = (T_{2,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)}) - \Delta T_{21sch}, \quad (3.42)$$

$$\Delta T_{43} = (T_{4,ber}^{(4)} - T_{3,ber}^{(3)}) - \Delta T_{43sch}. \quad (3.43)$$

Die Herleitung der Gln.(3.42) und (3.43) ist im Anhang A.2.2 gegeben.

In den Gleichungen, die in den Kapiteln 3.4 bis 3.8 abgeleitet werden, müssen die realen Temperaturdifferenzen eingesetzt werden. Das heißt, daß die berechneten Temperaturdifferenzen um die jeweiligen scheinbaren Temperaturdifferenzen zu korrigieren sind.

3.8.2 Auswirkungen auf die gemessenen Spannungen am Beispiel der Kalibrierungsmessung

3.8.2.1 Kalibrierungsmessung ohne Temperaturgradient über die MPP-Sonde

Die ideale Kalibrierungsmessung der MPP-Sonde wird in einer isothermen Strömung durchgeführt. Dadurch werden thermoelektrische Potentialdifferenzen vermieden, solange die Seebeckkoeffizienten gleicher Adern nicht voneinander abweichen. Da jede Thermoelementader einen individuell verschiedenen Seebeckkoeffizienten S_{ij} besitzt, wird der geschwindigkeitsproportionalen Spannung trotz isothermer Strömung eine resultierende thermoelektrische Spannung überlagert. Der Index i bezieht sich auf das Material der Ader, der Index j auf das Thermoelement.

Somit ergeben sich für eine Kalibrierung bei isothermer Strömung die gemessenen Spannungen aus der Summe der geschwindigkeitsproportionalen Spannung E_{21} oder E_{43} und den resultierenden, thermoelektrischen Spannungen D_{21A} bis D_{43S} (s. Anhang A.3.1).

$$U_{21A} = D_{21A} + E_{21} , \quad (3.44)$$

$$U_{21C} = D_{21C} + E_{21} , \quad (3.45)$$

$$U_{21S} = D_{21S} + E_{21} , \quad (3.46)$$

$$U_{43A} = D_{43A} + E_{43} , \quad (3.47)$$

$$U_{43C} = D_{43C} + E_{43} , \quad (3.48)$$

$$U_{43S} = D_{43S} + E_{43} . \quad (3.49)$$

Die thermoelektrischen Spannungen werden im folgenden als Offsetwerte bezeichnet. Die Offsetwerte sind von der Kalibrierungstemperatur abhängig. Schließt man Werkstoffalterung der Adern aus, so sind die Offsetwerte bei konstanter Kalibrierungstemperatur konstant.

Subtrahiert man in den Gln. (3.44) bis (3.49) die jeweiligen Offsetwerte von den gemessenen Spannungen, so erhält man die geschwindigkeitsproportionalen Spannungen E_{21} und E_{43} . Die Subtraktion der Offsetwerte von den gemessenen Spannungen wird im folgenden als Offsetkorrektur bezeichnet.

3.8.2.2 Kalibrierungsmessung mit Temperaturgradient über die MPP-Sonde

Die für die Kalibrierungsmessung erforderliche isotherme Strömung läßt sich über einen langen Zeitraum hinweg nicht exakt realisieren. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten treten Temperaturschwankungen im Natrium-Kreislauf auf, die zu momentanen Temperaturgradienten über die MPP-Sonde führen. Die Größenordnung der dabei maximal auftretenden Temperaturgradienten über die MPP-Sonde beträgt $0.5 \text{ K}/2.5 \text{ mm}$.

Die Spannungen zeigen für die Meßpunkte, an denen ein Temperaturgradient über die MPP-Sonde vorliegt, eine Abweichung vom linearen Verlauf.

Für die gemessenen Spannungen gelten näherungsweise folgende Gleichungen. Die Herleitung ist in Anhang A.3.2 gegeben.

$$U_{21A} = D_{21A} + (S_A - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} , \quad (3.50)$$

$$U_{21C} = D_{21C} + (S_C - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} , \quad (3.51)$$

$$U_{21S} = D_{21S} + (S_S - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21} , \quad (3.52)$$

$$U_{43A} = D_{43A} + (S_A - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} , \quad (3.53)$$

$$U_{43C} = D_{43C} + (S_C - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} , \quad (3.54)$$

$$U_{43S} = D_{43S} + (S_S - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43} . \quad (3.55)$$

Werden in den Gln. (3.50) bis (3.55) von den gemessenen Spannungen U_{21A} bis U_{43S} die Terme $(S_i - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21}$ oder $(S_i - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43}$ subtrahiert, erhält man die in den Gln. (3.44) bis (3.49) angegebenen Ausdrücke. Dies wird als

Temperaturkorrektur bezeichnet.

Aus den temperaturkorrigierten Spannungen können die Offsetwerte und die Empfindlichkeiten der oberen und unteren Sondenmeßebeine der MPP-Sonde bestimmt werden. Subtrahiert man von den gemessenen Spannungen die jeweiligen Offsetwerte, so erhält man die in den Gln.(3.9) bis (3.14) angegebenen Spannungen.

In den Gln.(3.20) bis (3.23) zur Bestimmung der S_N^* -Werte, den Gln.(3.25) bis (3.28) zur Bestimmung der K-Werte und der geschwindigkeitsproportionalen Spannung nach der K-Methode und den Gln. (3.37) und (3.39) zur Bestimmung der geschwindigkeitsproportionalen Spannung nach der α -Methode sind die offsetkorrigierten Spannungen einzusetzen.

3.9 Änderungen der Offsetwerte durch Inhomogenitäten in den Thermoelementadern

Lokale Inhomogenitäten in den Thermoelementadern und damit Bereiche unterschiedlicher Seebeckkoeffizienten können zu Änderungen der Offsetwerte führen. In Abhängigkeit des Temperaturgradienten, der über den Bereich mit den Inhomogenitäten anliegt, werden unterschiedliche thermoelektrische Spannungen induziert. Ist ein großer Temperaturgradient wie zum Beispiel zwischen dem flüssigen Natrium und der Außenwand der Teststrecke vorhanden, so ist nach Gl.(3.4) der Einfluß auf die gemessenen Spannungen groß. Ändert die MPP-Sonde während einer Messung ihre radiale Position, so wandern die Thermoelementadern und damit die lokalen Inhomogenitäten durch den Bereich des Temperaturgradienten zwischen dem flüssigen Natrium und der Außenwand der Teststrecke.

Dieser Sachverhalt ist in Abb.(3-4) schematisch dargestellt.

Die Folge sind Änderungen der Offsetwerte. Die bei einer Kalibrierungsmessung für einen festen Radius ermittelten Offsetwerte müssen nicht über den gesamten Rohrquerschnitt konstant sein. Die Offsetwerte sind somit temperatur- und geometrieabhängig.

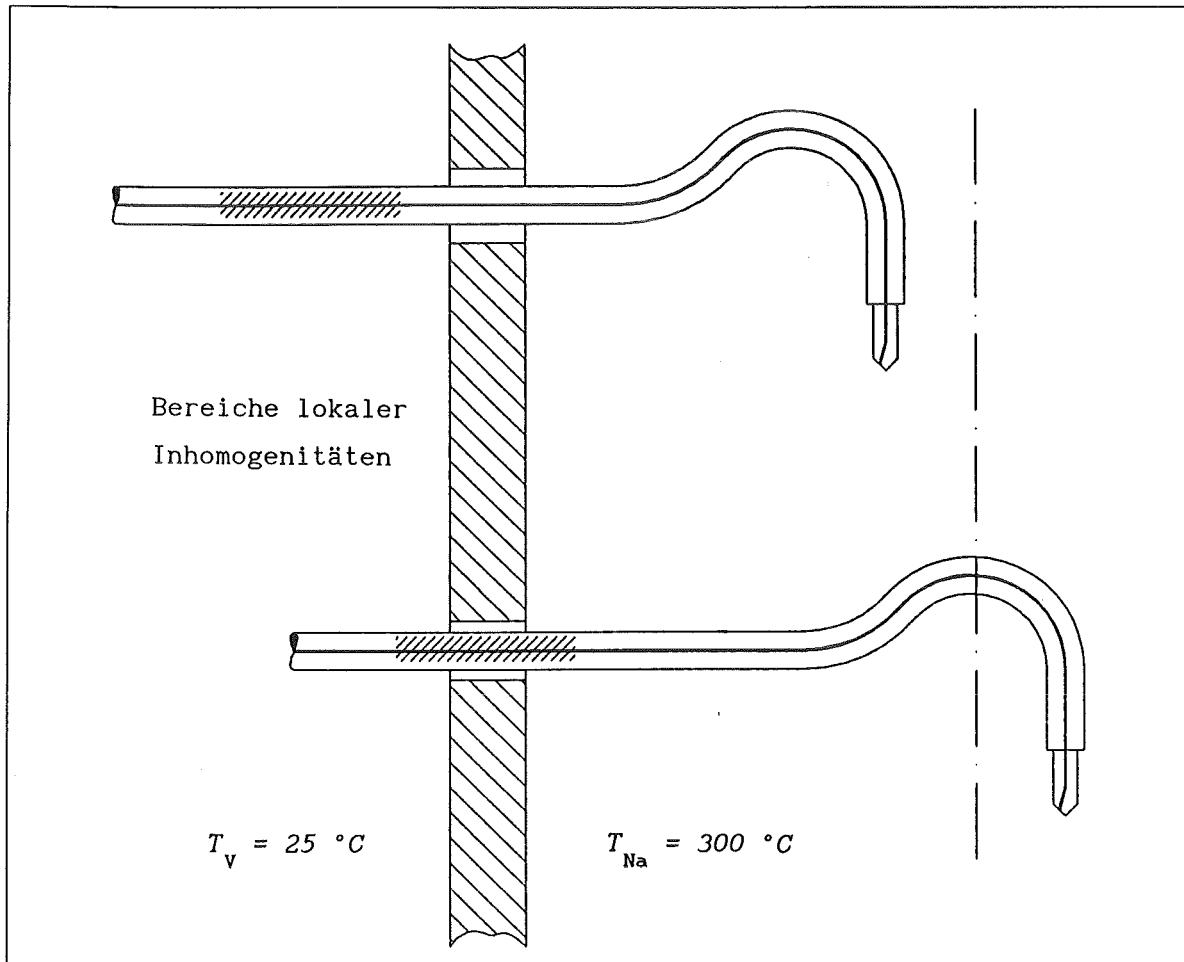


Abb. (3-4) Zusammenhang zwischen Bereichen lokaler Inhomogenitäten und radialer Position der MPP-Sonde.

3.10 Einsatz von Dreileiter-Thermoelementen

Frühere Sonden, bei denen Zweileiter-Thermoelemente der Thermoelementpaarung Alumel/Chromel eingesetzt wurden, zeigen bei der Geschwindigkeitsmessung folgendes, physikalisch nicht geklärte Verhalten:

1. Die in sich symmetrischen Geschwindigkeitsprofile sind über den gesamten Rohrquerschnitt um bis zu 3 Grad gegenüber der Horizontalen geneigt. Diese Schiefe ist nach Axcell und Walton (1993) auf die Offsetwerte zurückzuführen, die sich über den Rohrquerschnitt ändern.

Eine Reduzierung dieses Effektes ist durch die Verwendung von weniger thermospannungsempfindlichen Materialien wie Stahl oder sehr reine Materialien wie Platin möglich.

2. Die mit der MPP-Sonde gemessene Geschwindigkeit der Anströmung liegt im Vergleich zu dem Wert, der mit dem induktiven Durchflußmesser bestimmt wird, zu hoch.

Als Ursache dafür können nach Axcell und Walton (1993) Nichtlinearitäten der Spannungen bei den Kalibrierungsmessungen und die dadurch fehlerhaft ermittelten Offsetwerte und Empfindlichkeiten der Sonde angeführt werden. Durch Verwendung von Thermoelementadern mit kleinen Seebeckkoeffizienten kann der Effekt der Nichtlinearität verringert werden, da das Verhältnis von induzierter thermoelektrischer Spannung zu geschwindigkeitsproportionaler Spannung geringer wird.

Die Thermoelemente der modifizierten MPP-Sonde besitzen drei Adern: Alumel, Chromel und Stahl. Die Alumel- und Stahladern erfüllen die Anforderung des niedrigen Seebeckkoeffizienten. Die Chromeladern besitzen einen hohen Seebeckkoeffizienten und zeigen starke Inhomogenitäten, wodurch die Effekte von Nichtlinearität und die Radiusabhängigkeit der Offsetwerte verstärkt werden. Dies bestätigen Fenton (1969, 1971, 1979) und Kollie et al. (1975).

Um den Einfluß der Seebeckkoeffizienten der Thermoelementadern auf die Berechnung der Geschwindigkeit ermitteln zu können, wird die Geschwindigkeit zum einen unter Verwendung der Alumel- und Chromelspannungen und zum anderen unter Verwendung der Alumel- und Stahlspannungen berechnet. Damit

ergeben sich für die modifizierten Seebeckkoeffizienten S_{N21}^* und S_{N43}^* und für die geschwindigkeitsproportionale Spannung E_{21} nach der K- und α -Methode jeweils zwei Berechnungsmöglichkeiten.

Die für die Berechnung der Temperatur nach Gl.(3.15) gemessenen Spannungen sind um bis zu zwei Größenordnungen größer als die geschwindigkeitsproportionalen Spannungen. Eine Beeinflussung der berechneten Temperaturen durch Inhomogenitäten ist somit zu vernachlässigen.

Die thermoelektrischen Potentialdifferenzen werden zwischen den Alumel- und Chromeladern der Thermoelemente abgegriffen, da somit die höchste Empfindlichkeit erzielt wird.

4. Kalibrierungsmessung und Eichmessung

In der Natrium-Teststrecke TEFLU werden mit der modifizierten MPP-Sonde K15 die in den Tabellen (4-1) und (4-2) angegebenen Kalibrierungsmessungen und Eichmessungen durchgeführt. Die Versuchsparameter sind wie folgt:

1. Kalibrierungsmessung

Reynolds-Zahl der Anströmung: $Re_a = 14 \cdot 10^3 \div 430 \cdot 10^3$,

Geschwindigkeit der Anströmung: $\bar{u}_a = 0.05 \text{ m/s} \div 1.5 \text{ m/s}$,

Temperatur der Anströmung: $\bar{T}_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$,

Temperaturstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{T}_0 = 0 \text{ K}$,

Geschwindigkeitsstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{u}_0 = 0 \text{ m/s}$,

Abstand vom Düsenblock: $x/d = 20$, Meßpositionen: $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$.

2. Bestimmung der K - und S_N^* -Werte (Eichmessung):

Reynolds-Zahl der Anströmung: $Re_a = 280 \cdot 10^3$,

Geschwindigkeit der Anströmung: $\bar{u}_a = 0.98 \text{ m/s}$,

Temperatur der Anströmung: $\bar{T}_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$,

Temperaturstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{T}_0 = 32 \text{ K}$,

Geschwindigkeitsstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{u}_0 = 0 \text{ m/s}$,

Abstand vom Düsenblock: $x/d = 20$, Meßpositionen: $-25 \text{ mm} \leq r \leq +25 \text{ mm}$.

Datensatz	$r = -25 \text{ mm}$: A018, A019, D011, D016, D030
	$r = +25 \text{ mm}$: A021, A022, D012, D020, D035
	$r = -25 \text{ mm}$: D031, D055, D057, D079, D080
	$r = +25 \text{ mm}$: D037, D059, D061, D081, D082

Tabelle (4-1) Kalibrierungsmessungen.

Datensatz	D025
Datensatz der Kalibrierung	$r = -25 \text{ mm}$: D011, D016
	$r = +25 \text{ mm}$: D012, D020

Tabelle (4-2) Messung zur Bestimmung der K - und S_N^* -Werte (Eichmessung).

4.1 Ermittlung der scheinbaren Temperaturdifferenzen

Zur Berechnung der Geschwindigkeit des Natriums werden die scheinbaren Temperaturdifferenzen $\Delta\bar{T}_{21\text{sch}}$ und $\Delta\bar{T}_{43\text{sch}}$ aus den ersten Kalibrierungsmessungen (A018, A019, A021, A022) ermittelt, da diese die Voraussetzung eines stationären, isothermen Temperaturfeldes sehr gut erfüllen. Die hieraus ermittelten Werte ergeben sich zu $\Delta\bar{T}_{21\text{sch}} = -0.32 \text{ K}$ und $\Delta\bar{T}_{43\text{sch}} = -0.055 \text{ K}$.

4.2 Kalibrierungsmessung

Die Kalibrierungsmessungen werden in einem Abstand von $x/d = 20$ vom Düsenblock durchgeführt. In diesem Abstand liegt ein Geschwindigkeitsprofil vor, bei dem nach Krebs et al. (1981) die Einzelstrahlen des Düsenblocks bereits abgebaut sind und das außer in Wandnähe keine radialen Gradienten zeigt.

Um den Aufwand der Kalibrierung zu minimieren, werden die Kalibrierungsmessungen an zwei zur Rohrachse symmetrischen Positionen von $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$ durchgeführt. An diesen Positionen ist die MPP-Sonde sowohl von der Rohrachse als auch von der Rohrwand weit genug entfernt. Eine Störung der isotachen Strömung aufgrund der sich entlang der Rohrwand ausbildenden Grenzschicht oder durch kleine Unterschiede der Geschwindigkeit von Einspritzstrahl und Anströmung ist bei diesen radialen Positionen zu vernachlässigen. Eine Beeinflussung der isothermen Strömung durch einen nach außen gerichteten Wärmestrom ist ebenfalls vernachlässigbar.

Die Geschwindigkeit der Anströmung wird ausgehend von einem unteren Wert von 0.05 m/s schrittweise auf 1.5 m/s erhöht.

Stellvertretend für alle Kalibrierungsmessungen sind hier die Messungen A018 bei $r = -25 \text{ mm}$ und A021 bei $r = +25 \text{ mm}$ in den Abb.(4-1) und (4-2) dargestellt.

In den Abb.(4-1a) und Abb.(4-2a) sind die mittleren Temperaturdifferenzen $\bar{T}_2 - \bar{T}_1$ und $\bar{T}_4 - \bar{T}_3$ über die Geschwindigkeit der Anströmung \bar{u}_a aufgetragen. Für kleine Geschwindigkeiten der Anströmung ergeben sich maximale Temperaturdifferenzen von $+0.05 \text{ K}$ bei $r = -25 \text{ mm}$ und -0.1 K bei $r = +25 \text{ mm}$.

In den Abb.(4-1b) und Abb.(4-2b) sind die gemessenen Spannungen über der Geschwindigkeit der Anströmung aufgetragen.

Es zeigt sich deutlich eine Abweichung vom linearen Verlauf, sobald ein Temperaturgradient über die MPP-Sonde vorliegt. Aufgrund der großen Temperaturempfindlichkeit von Chromel ist die Abweichung bei den zwischen den Chromeladern gemessenen Spannungen am größten. Die zwischen den Alumeladern gemessenen Spannungen werden durch einen Temperaturgradienten am wenigsten beeinflusst.

In den Abb.(4-1c) und Abb.(4-2c) sind die temperaturkorrigierten (TK) Spannungen dargestellt. Es wird deutlich, daß der Einfluß des Temperaturgradienten durch die Temperaturkorrektur gut beseitigt werden kann. Die temperaturkorrigierten Meßwerte werden durch eine Regressionsgerade, die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird, sehr gut beschrieben.

Die Abb.(4-1d) und Abb.(4-2d) zeigen den Verlauf der temperatur- (TK) und offsetkorrigierten (OK) Spannungen. Die Regressionsgeraden treffen für die Geschwindigkeit Null alle im Ursprung zusammen. Die Steigungen der Regressionsgeraden für die drei Thermoelementadern unterscheiden sich wie erwartet nur geringfügig voneinander.

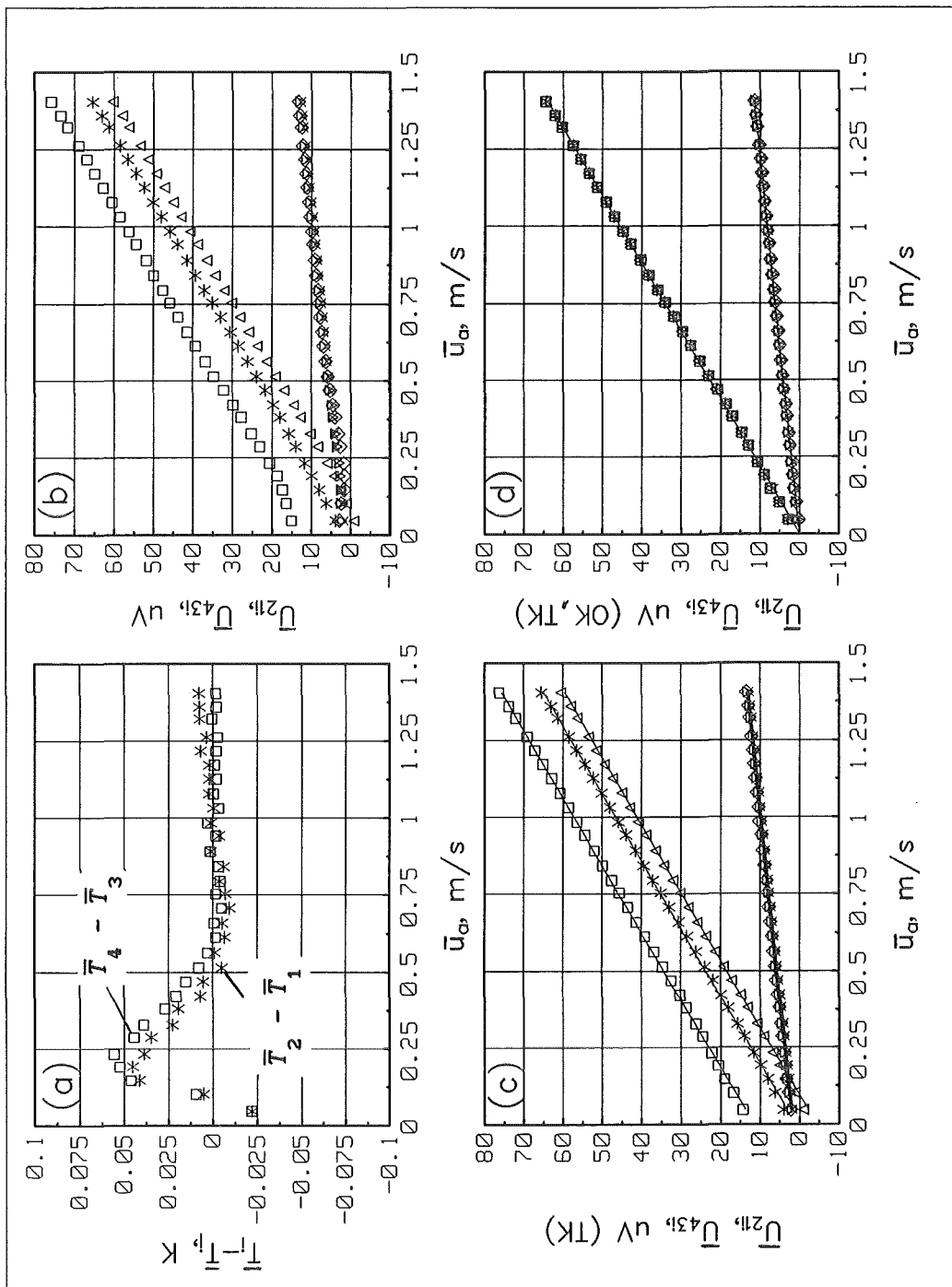


Abb. (4-1) Kalibrierungsmessung A018 bei $r = -25$ mm.

TK = temperaturkorrigierte Spannungen, OK = offsetkorrigierte Spannungen, untere Sondenmeßebene: * U_{21A} , $\square U_{21C}$, ΔU_{21S} , obere Sondenmeßebene: x U_{43A} , $\diamond U_{43C}$, ∇U_{43S} .

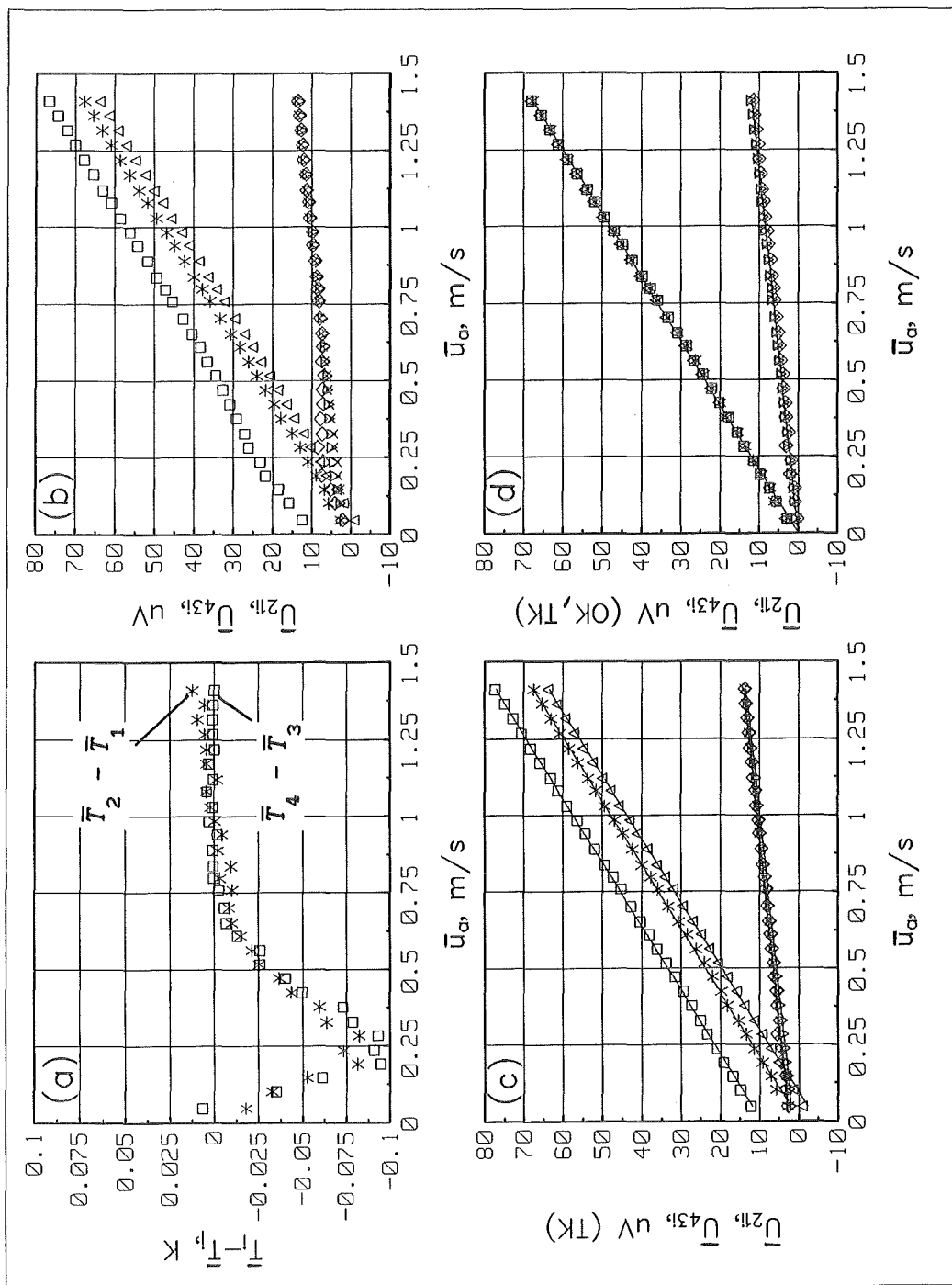


Abb.(4-2) Kalibrierungsmessung A021 bei $r = +25$ mm.

TK = temperaturkorrigierte Spannungen, OK = offsetkorrigierte Spannungen, untere Sondenmeßebene: * U_{21A} , $\square U_{21C}$, ΔU_{21S} , obere Sondenmeßebene: $\times U_{43A}$, $\diamond U_{43C}$, ∇U_{43S} .

Um den Einfluß der beiden Thermoelementpaarungen Alumel/Chromel und Alumel/Stahl auf die Geschwindigkeitsmessung zu ermitteln, werden sowohl die Steigungen der Alumel- und Chromel-Regressionsgeraden als auch die Steigungen der Alumel- und Stahl-Regressionsgeraden für die jeweilige Sondenmeßebene gemittelt. Man erhält somit in Abhängigkeit von der Sondenmeßebene und der Paarung der Adern vier Empfindlichkeiten.

Diese Empfindlichkeiten sind in den Gln. (3.18) und (3.19) einzusetzen.

Wird die Regressionsgerade durch die nicht temperaturkorrigierten Meßwerte gelegt, so ergeben sich falsche Empfindlichkeiten und Offsetwerte.

In Tabelle (4-3) und Tabelle (4-4) sind beispielhaft die Offsetwerte und die Empfindlichkeiten der Kalibrierungsmessungen A018 ($r = -25 \text{ mm}$) und A021 ($r = +25 \text{ mm}$) für den temperaturkorrigierten und den nicht temperaturkorrigierten Fall dargestellt.

Es kann festgehalten werden:

- Durch die Temperaturkorrektur ergeben sich wie erwartet für die zwischen den Chromeladern gemessenen Spannungen die größten Änderungen der Empfindlichkeiten und der Offsetwerte.
- Bei den Kalibrierungsmessungen ist in jedem Fall eine Temperaturkorrektur aller gemessenen Spannungen durchzuführen.

Wie Tabelle (4-3) zeigt, ändern sich die Offsetwerte D_{21A} bis D_{435} über den Rohrquerschnitt.

Um einen einfachen Zusammenhang zwischen den Offsetwerten und dem Radius und somit dem Gültigkeitsbereich der Offsetwerte zu ermitteln, wird für eine isotache und isotherme Strömung, wie sie sich am ersten Meßpunkt einer Kalibrierungsmessung einstellt, ein komplettes, radiales Profil ausgemessen.

Für Messung A020 gilt: $\bar{u}_a = 0.05 \text{ m/s}$, $\bar{T}_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\bar{u}_0 = 0 \text{ m/s}$, $\Delta\bar{T}_0 = 0 \text{ K}$.

Die gemessenen Spannungen aus Messung A020 werden zum einen mit den mittleren Offsetwerten aus den Kalibrierungsmessungen A018 und A019 ($r = -25 \text{ mm}$) und zum anderen mit den mittleren Offsetwerten aus den Kalibrierungsmessungen A021 und A022 ($r = +25 \text{ mm}$) korrigiert.

Größe	nicht-temperaturkorrigiert		temperaturkorrigiert	
	$r = -25 \text{ mm}$	$r = +25 \text{ mm}$	$r = -25 \text{ mm}$	$r = +25 \text{ mm}$
D_{21A}	1.089	-0.355	1.030	-0.146
D_{21C}	11.110	11.513	11.692	9.469
D_{21S}	-4.461	-3.687	-4.232	-4.489
D_{43A}	1.505	1.880	1.365	2.228
D_{43C}	1.101	4.472	1.952	2.356
D_{43S}	1.400	2.165	1.705	1.407

Tab. (4-3) Offsetwerte der Kalibrierungsmessungen A018 und A021 für den temperaturkorrigierten und den nicht-temperaturkorrigierten Fall.

Größe	nicht-temperaturkorrigiert		temperaturkorrigiert	
	$r = -25 \text{ mm}$	$r = +25 \text{ mm}$	$r = -25 \text{ mm}$	$r = +25 \text{ mm}$
ES_{21A}	45.529	48.183	45.572	47.961
ES_{21C}	45.971	45.837	45.551	48.005
ES_{21S}	45.591	47.413	45.427	48.264
ES_{43A}	8.000	8.650	8.132	8.305
ES_{43C}	8.985	6.013	8.157	8.108
ES_{43S}	8.292	7.684	8.005	8.434

Tab. (4-4) Empfindlichkeiten der Kalibrierungsmessungen A018 und A021 für den temperaturkorrigierten und den nicht-temperaturkorrigierten Fall.

In Abb.(4-3a) sind mit einem Stern (*) als Symbol die nach der K-Methode und der Thermoelementpaarung Alumel/Chromel bestimmten Geschwindigkeiten dargestellt, für deren Berechnung die mittleren Offsetwerte bei $r = -25 \text{ mm}$ als konstant über den gesamten Rohrquerschnitt angenommen werden. Die Geschwindigkeit ist mit der Geschwindigkeit der Anströmung normiert. Das Geschwindigkeitsprofil fällt mit größer werdendem Radius linear ab. Dieses Verhalten ist in Abb.(4-3b) bei den Spannungen U_{21A} und U_{21C} ebenfalls zu erkennen. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung des Geschwindigkeitsverlaufs mit der eingestellten Geschwindigkeit der Anströmung wird für kleine Radien erreicht, das heißt dort, wo die verwendeten Offsetwerte gleich den tatsächlichen Offsetwerten sind.

Weiterhin sind in Abb.(4-3a) die Geschwindigkeiten mit einem Quadrat (\square) als Symbol dargestellt, für deren Berechnung die mittleren Offsetwerte bei $r = +25 \text{ mm}$ als konstant über den gesamten Rohrquerschnitt angenommen werden. Es ergibt sich nur für die Radien eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der berechneten Geschwindigkeit und der eingestellten Geschwindigkeit der Anströmung, an denen die verwendeten Offsetwerte gleich den tatsächlichen Offsetwerten sind. Mit kleiner werdendem Radius r nimmt die Geschwindigkeit linear zu.

Wird jetzt eine lineare Abhängigkeit zwischen den Offsetwerten und dem Radius angenommen, so ergibt sich für die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel in Abb.(4-3a) die mit einem Dreieck (Δ) als Symbol dargestellte Geschwindigkeit. Unter Verwendung der Thermoelementpaarung Alumel/Stahl erhält man den mit einem umgekehrten Dreieck (∇) gekennzeichnete Verlauf. Die Geschwindigkeit ist für beide Thermoelementpaarungen über den gesamten Rohrquerschnitt konstant, was die angesetzte lineare Beziehung zwischen Offsetwert und Radius als richtig ausweist. Die Geschwindigkeit kann für

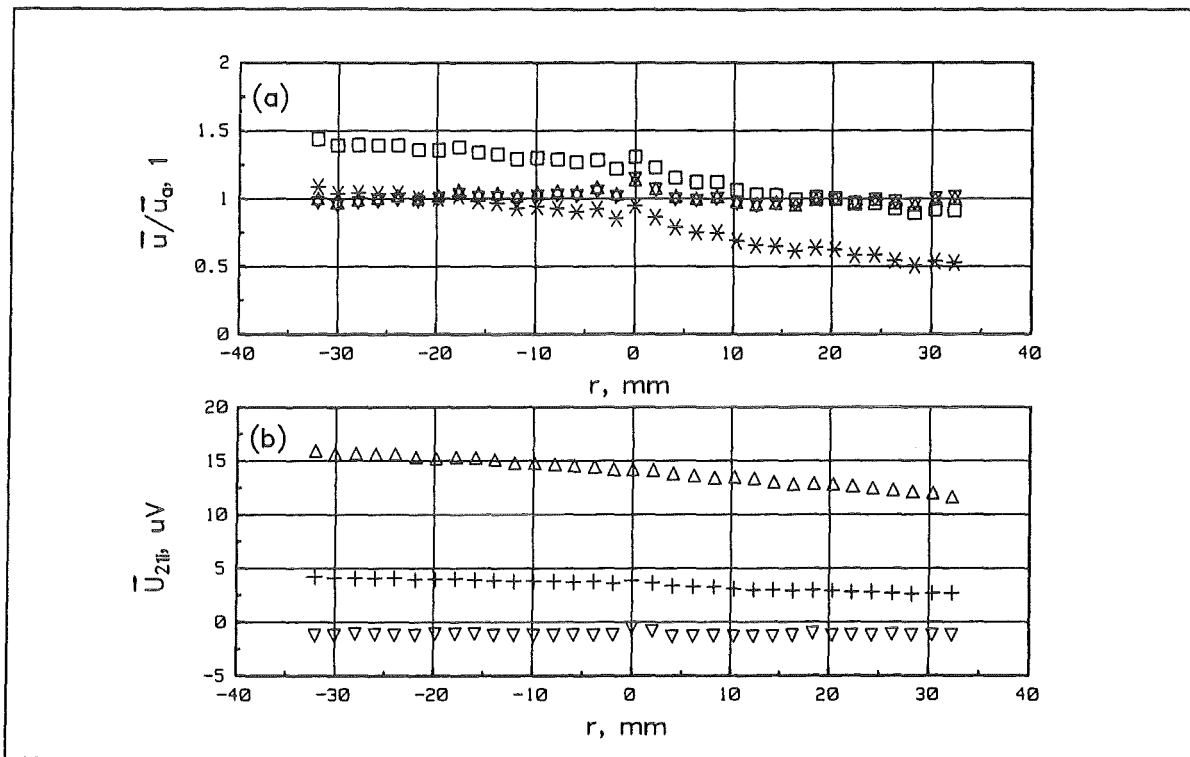


Abb.(4-3) Normierte Geschwindigkeit und gemessene Spannungen der Messung

A020 mit $\bar{u}_a = \bar{u}_0 = 0.05 \text{ m/s}$, $\bar{T}_a = \bar{T}_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

+ U_{21A} , ΔU_{21C} , ∇U_{21S} , * \bar{u}/\bar{u}_a (Paarung AC, Offsetwerte von $r = -25 \text{ mm}$), $\square \bar{u}/\bar{u}_a$ (Paarung AC, Offsetwerte von $r = +25 \text{ mm}$), $\Delta \bar{u}/\bar{u}_a$ (Paarung AC, lineare Offsetwerte), $\nabla \bar{u}/\bar{u}_a$ (Paarung AS, lineare Offsetwerte).

beide Thermoelementpaarungen gleichberechtigt bestimmt werden. Die eingestellte Strömung wird von der Messung richtig wiedergegeben.

Für die Kalibrierungsmessungen kann festgehalten werden:

- Die Offsetwerte der Spannungen können als linear abhängig vom Radius angenommen werden.

■ Das mit dieser linearen Beziehung berechnete Geschwindigkeitsprofil besitzt entsprechend der Physik über den gesamten Rohrquerschnitt den selben Wert. Dieser Wert liegt gegenüber der eingestellten Geschwindigkeit der Anströmung um etwa 0.015 m/s zu hoch.

Die Ursache für den Unterschied zwischen der berechneten Geschwindigkeit und der eingestellten Geschwindigkeit der Anströmung läßt sich damit begründen, daß 1. die Literaturwerte der Seebeck-Koeffizienten von den tatsächlichen Seebeck-Koeffizienten der einzelnen Adern abweichen und 2. die tatsächlichen Seebeck-Koeffizienten der Adern gleichen Materials voneinander abweichen.

Nach Anhang A.3.2 und Gl.(A.29) ergibt sich mit dem Term $(S_{i2} - S_{i1}) \cdot T_{cal}$ eine Verfälschung der berechneten Geschwindigkeit, die durch den Unterschied der tatsächlichen Seebeck-Koeffizienten der Adern gleichen Materials hervorgerufen wird.

Zur Abschätzung dieser Verfälschung wird am Beispiel der Messung A020 angenommen, daß für die Seebeck-Koeffizienten der Alumel-Adern $(S_{A2} - S_{A1}) = 0.0015 \mu\text{V/K}$ und die Seebeck-Koeffizienten der Chromel-Adern $(S_{C2} - S_{C1}) = 0.01 \mu\text{V/K}$ gilt. Eine Berechnung der Geschwindigkeit mit um $(S_{i2} - S_{i1}) \cdot T_{cal}$ korrigierten Spannungen führt zu einer Absenkung der Geschwindigkeit um etwa 0.014 m/s gegenüber der ohne diesen Term berechneten Geschwindigkeit. Dieser Sachverhalt erlaubt es, die nach den Gln.(3.26) und (3.28) berechneten Geschwindigkeiten um einen über den Rohrquerschnitt konstanten Betrag auf die eingestellte Geschwindigkeit der Anströmung zu verschieben.

4.3 Meßvorschrift für die Kalibrierungsmessung

Die Kalibrierungsmessungen werden in einem Abstand von $x/d = 20$ vom Düsenblock und bei radialen Positionen von $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$ durchgeführt. An diesen Punkten ist das Strömungsprofil isotherm und isotach. Für jeden Radius müssen jeweils zwei Messungen durchgeführt werden.

Die Offsetwerte und die mittleren Empfindlichkeiten für die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel und die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl werden über die beiden Meßpositionen bei $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$ jeweils gemittelt.

Weiter werden die mittleren Sondenempfindlichkeiten aus den Kalibrierungsmessungen bei $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$ gemittelt.

Für die Offsetwerte wird jetzt ein linearer Zusammenhang zwischen den Werten bei $r = -25 \text{ mm}$ und $r = +25 \text{ mm}$ angenommen und für jeden Radius ein neuer Offsetwert bestimmt.

Die somit erhaltenen Sondenempfindlichkeiten und Offsetwerte sind die Berechnungsgrundlage für die Ermittlung der Geschwindigkeit.

4.4 Bestimmung der K- und S_N^* -Werte (Eichmessung)

Die K- und S_N^* -Werte, für deren Bestimmung identische Anforderungen an das radiale Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil gestellt werden, werden aus der Eichmessung D025 berechnet.

Beschreibung der Temperatur- und Spannungsverläufe für Eichmessung D025

In Abb.(4-4a) ist exemplarisch die Temperatur \bar{T}_1 über dem Rohrquerschnitt dargestellt. Zur besseren Übersicht ist in allen Diagrammen nur jeder zweite Meßpunkt eingezeichnet. In Abb.(4-4b) oben ist der sich aus der Temperatur \bar{T}_1 ergebende Temperaturgradient über die MPP-Sonde eingezeichnet.

Abb.(4-4c) zeigt den Verlauf der offsetkorrigierten Spannungen über dem Radius. Die Spannungen verlaufen punktsymmetrisch zur Rohrachse. Sie weisen folgende charakteristischen Merkmale auf:

1. In den Bereichen ohne radialen Temperaturgradienten ist die gemessene Spannung proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Natriums. Da eine isotache Strömung eingestellt wird, ergeben sich in den Randbereichen horizontale Spannungsverläufe.
2. Im Bereich des Temperaturfreistrahls ist deutlich die dem Temperaturgradienten proportionale thermoelektrische Spannung zu erkennen. Der "sinusförmige" Verlauf des Temperaturgradienten bewirkt einen "sinusförmigen" Verlauf der Spannungen.
3. Die Amplituden der thermoelektrischen Spannungen sind für die untere und die obere Sondenmeßebeine gleich groß, was auf einen gleichmäßigen radialen Temperaturgradienten über die MPP-Sonde schließen läßt.
4. Die zwischen den Alumeladern gemessenen Spannungen weisen im Vergleich

zu den anderen Spannungen einen Verlauf mit entgegengesetztem Vorzeichen auf, da Alumel einen negativen und Chromel und Stahl einen positiven Seebeckkoeffizienten besitzen.

5. Die abgeschwächte Wirkung des Magnetfeldes auf die obere Sondenmeßebene ist deutlich zu erkennen. Die Spannungen \bar{U}_{43A} , \bar{U}_{43C} und \bar{U}_{43S} haben aufgrund der kleineren geschwindigkeitsproportionalen Spannung kleinere Werte als die Spannungen \bar{U}_{21A} , \bar{U}_{21C} und \bar{U}_{21S} . Sowohl die Spannungen der unteren als auch die Spannungen der oberen Sondenmeßebene liegen in den Bereichen ohne radialen Temperaturgradienten wie erwartet auf jeweils dem selben Niveau.

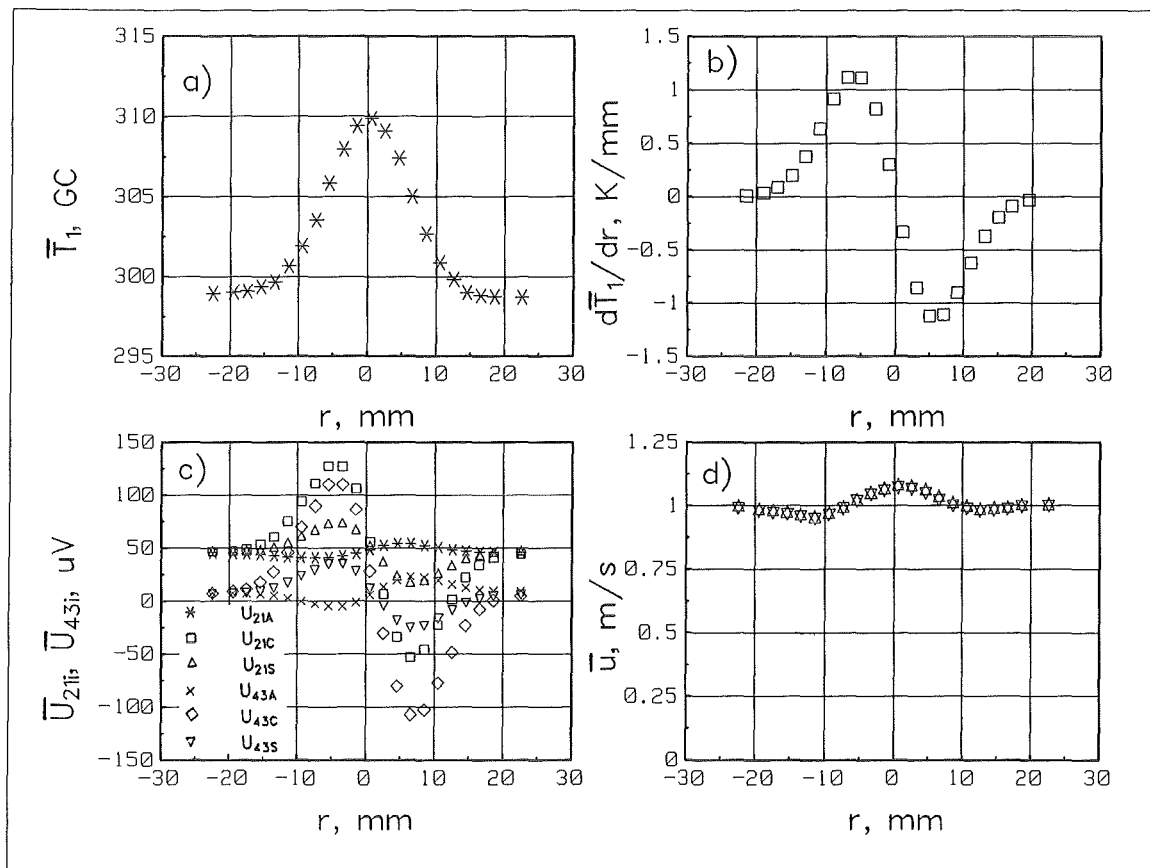


Abb. (4-4) Bestimmung der K - und S_N^* -Werte (Eichmessung D025).

Zu d): Δ Alumel/Chromel, ∇ Alumel/Stahl. Zur besseren Übersicht ist nur jeder zweite Meßpunkt eingezeichnet.

Bestimmung der K-Werte

Die K-Werte berechnen sich nach den Gln.(3.25) und (3.27) für die untere Sondenmeßebene und die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel zu $K_{21AC} = -0.0693$. Für die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl ergibt sich ein Wert von $K_{21AS} = -0.2325$. Für die Bestimmung der K-Werte werden nur diejenigen Meßpunkte verwendet, bei denen die Temperaturdifferenzen $\Delta\bar{T}_{21}$ und $\Delta\bar{T}_{43}$ betragsmäßig größer als 1.5 K sind. Die Werte, die sich für die unterschiedlichen Radien ergeben, werden gemittelt.

Für die obere Sondenmeßebene ergeben sich die K-Werte zu $K_{43AC} = -0.1294$ und $K_{43AS} = -0.4687$.

Bestimmung der S_N^* -Werte

Zur Bestimmung der S_N^* -Werte nach den Gln.(3.20) bis (3.23) werden analog zur Bestimmung der K-Werte nur diejenigen Meßpunkte verwendet, bei denen die Temperaturdifferenzen $\Delta\bar{T}_{21}$ und $\Delta\bar{T}_{43}$ betragsmäßig größer als 1.5 K sind. Die Werte, die sich für die unterschiedlichen Radien ergeben, werden gemittelt.

Der S_N^* -Wert der unteren Sondenmeßebene wird zudem als Mittelwert aus den Werten S_{N21AC}^* der Thermoelementpaarung Alumel/Chromel und S_{N21AS}^* der Thermoelementpaarung Alumel/Stahl gebildet. Entsprechendes gilt für S_{N43}^* .

$$S_{N21}^* = \frac{S_{N21AC}^* + S_{N21AS}^*}{2}, \quad (4.1)$$

$$S_{N43}^* = \frac{S_{N43AC}^* + S_{N43AS}^*}{2}. \quad (4.2)$$

Damit ergeben sich der modifizierte Seebeckkoeffizient für die untere Sondenmeßebene zu $S_{N21}^* = -3.506 \mu V/K$ und für die obere Sondenmeßebene zu $S_{N43}^* = -1.489 \mu V/K$.

Die S_N^* -Werte für die untere und die obere Sondenmeßebene besitzen unterschiedliche Werte. Ein Grund dafür ist der Permanentmagnet, der in der unteren Sondenmeßebene eine zusätzliche elektrisch leitende Verbindung darstellt.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der S_N^* -Werte ist über die Gln. (3.25) und (3.27) und den zuvor berechneten K -Werten gegeben. Durch Umformung erhält man:

$$S_{N21AC}^* = \frac{K_{AC} \cdot S_C - S_A}{K_{AC} - 1}, \quad (4.3)$$

$$S_{N21AS}^* = \frac{K_{AS} \cdot S_S - S_A}{K_{AS} - 1}, \quad (4.4)$$

Der modifizierte Seebeckkoeffizient ergibt sich damit für die untere Sondenmeßebene zu $S_{N21}^* = -4.262 \mu V/K$ und für die obere Sondenmeßebene zu $S_{N43}^* = -2.007 \mu V/K$. Diese Werte bestätigen die zuvor ermittelten. Die Abweichungen von bis zu 30 % zeigen jedoch die Grenzen bei der Bestimmung von Größen mit Empfindlichkeiten von wenigen Mikrovolt pro Kelvin.

Geschwindigkeitsverlauf für Messung D025

Abb. (4-4d) zeigt die nach der K -Methode und den Thermoelementpaarungen Alumel/Chromel (Δ) und Alumel/Stahl (∇) berechnete Geschwindigkeiten der Eichmessung D025 über dem Rohrquerschnitt. Dabei werden die oben angegebenen K -Werte zugrundegelegt.

Das berechnete Geschwindigkeitsprofil und die daraus ermittelte integrale Geschwindigkeit der Anströmung von $\bar{u}_a = 1.00 \text{ m/s}$ stimmt sehr gut mit der eingestellten Geschwindigkeit von $\bar{u}_a = 0.98 \text{ m/s}$ überein. Die berechnete Geschwindigkeit ist unabhängig von der Paarung der Thermoelementadern. Das bedeutet, daß die K - und S_N^* -Werte hinreichend genau bestimmt sind.

In der Rohrmitte zeigt sich eine leichte Geschwindigkeitsüberhöhung gegen-

über der Anströmung. Dies ist auf eine erhöhte Geschwindigkeit im zentralen Teilkanal zurückzuführen. Diese Erhöhung kann gegenüber dem Gesamtdurchsatz durch die Teststrecke vernachlässigt werden.

Die Temperaturabhängigkeit der K -Werte und der modifizierten Seebeckkoeffizienten ist für die MPP-Sonde K15 nicht untersucht. Aus diesem Grund wird auf vorangegangene Messungen mit der Sonde K12 zurückgegriffen. Diese MPP-Sonde hat einen Außendurchmesser von 5.0 mm . Für die Sonde K12 wurden Eichmessungen in einem Temperaturbereich von $200^\circ\text{C} \leq \bar{T}_a \leq 400^\circ\text{C}$ durchgeführt, wobei alle 50°C eine Messung durchgeführt wurde. Die Ergebnisse sind in Abb.(4-5a) für die K -Werte und in Abb.(4-5b) für die S_N^* -Werte dargestellt. Die K -Werte und die S_N^* -Werte sind relativ zu den entsprechenden Werten bei 300°C angegeben. Zwischen 300°C und 350°C , was dem Temperaturbereich der aktuellen Untersuchungen entspricht, ändern sich die K -Werte um maximal 5 % und die S_N^* -Werte um maximal 8 %. Damit können die K -Werte und die modifizierten Seebeckkoeffizienten in guter Näherung für Messungen in einem Temperaturbereich von $300^\circ\text{C} \leq \bar{T} \leq 330^\circ\text{C}$ als temperaturunabhängig und somit konstant angenommen werden. Das Ergebnis der MPP-Sonde K12 wird auf die MPP-Sonde K15 übertragen.

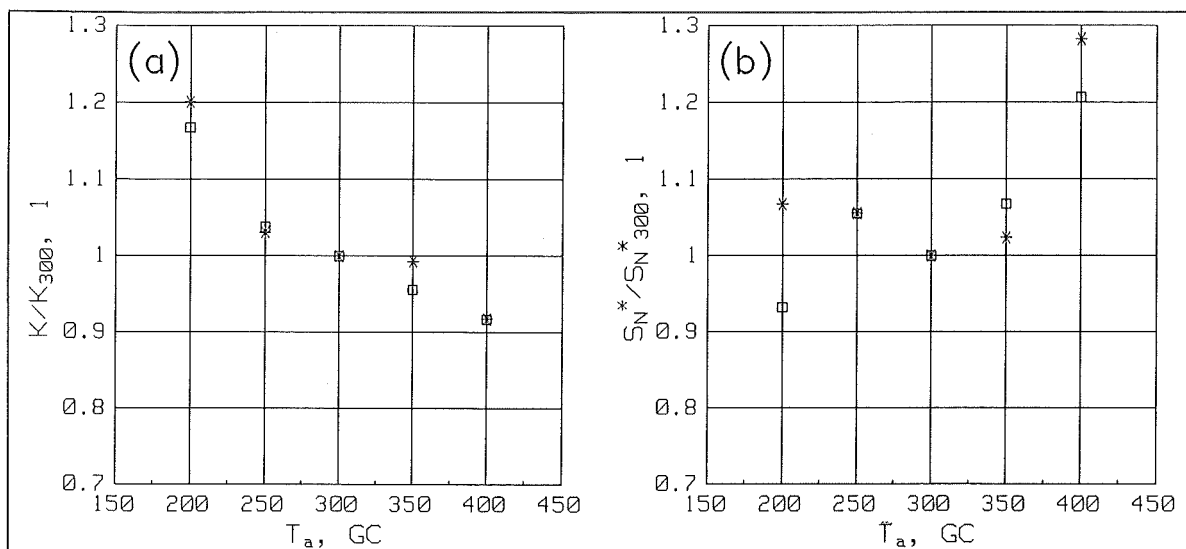


Abb. (4-5) Temperaturabhängigkeit der K -Werte und der S_N^* -Werte.

* untere Sondenmeßebene 21, □ obere Sondenmeßebene 43.

5. Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes in einem turbulenten Freistrah

Die nach den Meßvorschriften in Kapitel 4 geeichte und kalibrierte MPP-Sonde K15 wird zur Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes in turbulenten Freistrahlen mit und ohne Auftrieb von Knebel (1993) eingesetzt. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde werden im folgenden Untersuchungen an einem turbulenten Freistrah mit erhöhter Temperatur aber ohne Auftrieb, der in eine langsame Anströmung eintritt, diskutiert.

5.1 Strömungskonfiguration und Versuchsparameter

Die für die Messungen ausgewählte Strömungskonfiguration (vergleiche auch Abb.(2-3)) und die Versuchsparameter mit den zugeordneten Datensätzen sind in Tabelle (5-1) zusammengefaßt.

Geschwindigkeits- und Temperaturmessung (Messungen D1 und D2)

Reynolds-Zahl der Anströmung: $Re_a = 14 \cdot 10^3$,

Geschwindigkeit der Anströmung: $\bar{u}_a = 0.05 \text{ m/s}$,

Temperatur der Anströmung: $\bar{T}_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$,

Densimetrische Froude-Zahl: $Fr_0 = 521$,

Temperaturstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{T}_0 = 30 \text{ K}$,

Geschwindigkeitsstörung im zentralen Teilkanal: $\Delta\bar{u}_0 = 0.45 \text{ m/s}$,

Abstand vom Düsenblock: $x/d = 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40$,

Meßpositionen: $-35 \text{ mm} \leq r \leq +35 \text{ mm}$.

Messung D1							
x/d	4	6	8	10	12	15	20
Datensatz	D053	D051	D049	D046	D045	D043	D041
Kalibr.	$r = -25 \text{ mm}$: D030, D031; $r = +25 \text{ mm}$: D035, D037						
x/d	25	30	35	40			
Datensatz	D065	D067	D069	D071			
Kalibr.	$r = -25 \text{ mm}$: D055, D057; $r = +25 \text{ mm}$: D059, D061						

Messung D2							
x/d	4	6	8	10	12	15	20
Datensatz	D089	D088	D087	D086	D085	D084	D083
Kalibr.	$r = -25 \text{ mm}$: D079, D080; $r = +25 \text{ mm}$: D081, D082						
x/d	25	30	35	40			
Datensatz	—	D075	—	D073			
Kalibr.	$r = -25 \text{ mm}$: D055, D057; $r = +25 \text{ mm}$: D059, D061						

Tabelle (5-1) Geschwindigkeits- und Temperaturmessung (Messungen D1 und D2).

Bei der untersuchten Strömungskonfiguration der Messungen D1 und D2 handelt es sich um einen vertikalen, achsensymmetrischen Impulsstrahl in eine Rohrströmung, dem ein Temperaturprofil überlagert ist. Der Impulsstrahl und die Rohrströmung sind turbulent. Der Charakter des Impulsstrahls am Düsenaustritt wird durch die densimetrische Froude-Zahl Fr_0 beschrieben, die einen Wert von 521 annimmt. Die densimetrische Froude-Zahl hat für reine Impulsstrahlen den Wert Unendlich und für reine Auftriebsstrahlen den Wert Null. Sie kann als das Verhältnis aus dem Quadrat der Reynolds-Zahl und der Grashof-Zahl dargestellt werden.

Die densimetrische Froude-Zahl kann auch als Verhältnis von Trägheitskräften zu Auftriebskräften verstanden werden.

$$Fr_0 = \frac{M_0 \cdot \bar{u}_0}{B_0 \cdot d} . \quad (5.1)$$

M ist der Impulsfluß des Impulsstrahls relativ zum Impulsfluß der Anströmung mit

$$M = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{\infty} (\bar{u}^2 - \bar{u}_a^2) \cdot r \cdot dr \quad (5.2)$$

und B ist der Auftriebsfluß mit

$$B = 2 \cdot \pi \cdot g \cdot \int_0^{\infty} (\rho_a - \rho(\bar{T})) / \rho(\bar{T}) \cdot \bar{u} \cdot r \cdot dr . \quad (5.3)$$

ρ ist die von der Temperatur abhängige Dichte.

Für radiale Meßpositionen von $-35 \text{ mm} \leq r \leq +35 \text{ mm}$ wird alle 1 mm ein Meßpunkt aufgenommen. An jedem Meßpunkt wird 30 s über die Sondensignale integriert. Die Stoffgrößen werden für den Zustand der Anströmung berechnet.

5.2 Geschwindigkeitsmessung

Die mit der K-Methode berechneten radialen Geschwindigkeitsprofile ergeben unabhängig von der verwendeten Thermoelementpaarung Alumel/Chromel oder Alumel/Stahl für die Messungen D1 und D2 identische Ergebnisse (vgl. Abb.(4-3), Abb.(4-4)).

Eine Berechnung der Geschwindigkeit nach der α -Methode ist mit der MPP-Sonde K15 nicht möglich, da die Voraussetzung gleicher S_N^* -Werte für die obere und die untere Sondenmeßebene nicht erfüllt ist (vgl. Gl.(3.34)).

Aus diesen Gründen wird in der Diskussion der Ergebnisse und den Abbildungen stellvertretend nur die mit der K-Methode und der Thermoelementpaarung Alumel/Chromel berechnete Geschwindigkeit behandelt.

In Abb.(5-1a) sind für die Messung D1 und die Abstände $x/d = 4, 6, 8, 10, 12, 15$ und in Abb.(5-1b) für die Abstände $x/d = 20, 25, 30, 35, 40$ vom Düsenblock die mittlere Geschwindigkeit $\bar{u} - \bar{u}_a$ bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit am Düsenaustritt $\bar{u}_0 - \bar{u}_a$ über dem Radius r aufgetragen. Die Abb.(5-2a) und (5-2b) zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Messung D2. Die Geschwindigkeit ist immer relativ zur Geschwindigkeit der Anströmung \bar{u}_a angegeben.

Die radialen Profile können für beide Messungen sehr gut durch Glockenkurven nach Gauß (durchgezogene Linie gemäß Knebel et al. (1988)) angenähert werden.

$$\frac{\bar{u}_i(r_i) - \bar{u}_a}{\bar{u}_0 - \bar{u}_a} = \frac{\bar{u}_M \cdot \exp(-B_u^2 \cdot (r_i - r_{u0})^2) - \bar{u}_a}{\bar{u}_0 - \bar{u}_a} \quad (5.4)$$

Hierin sind \bar{u}_i die für den Radius r_i gemessenen Geschwindigkeiten, \bar{u}_M der Maximalwert und B_u die Flankenneigung der Verteilung. r_{u0} ist der Abstand des Maximalwertes zur Rohrachse.

Für die Berechnung der drei Parameter \bar{u}_M , B_u und r_{u0} werden nur die Meßwerte \bar{u}_i verwendet, die größer als 20 % des auf 1.0 normierten maximalen Meßwertes sind. Ungenauigkeiten bei der Geschwindigkeitsmessung infolge von Grenzschichteinflüssen entlang der Rohrwand rechtfertigen dies. Die durch diese Näherung entstehenden Profile werden im folgenden als Glockenkurvenfit der Meßwerte bezeichnet.

Die radialen Profile der mittleren Geschwindigkeit sind symmetrisch zur Rohrachse. Die mittlere Geschwindigkeit in der rechten Kanalhälfte liegt bei geringfügig höheren Werten als die Geschwindigkeit in der linken Kanalhälfte. Dieser Unterschied ist auf die Offsetwerte der gemessenen Spannungen zurückzuführen. Er ist gegenüber der bei früheren Messungen beobachteten Schiefe bezüglich der Rohrachse vernachlässigbar klein. Die Streuung

der Meßwerte für Radien von $r > \pm 15 \text{ mm}$ ist mit den durch den Düsenblock erzeugten Strahlen zu begründen, die in einem anfänglichen Formierungsbereich abgebaut werden müssen.

Ein Vergleich der Glockenkurvenfits der Messungen D1 und D2 zeigt eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeitsmessung.

Das Abklingverhalten der mittleren Geschwindigkeit des Impulsstrahls auf der Kanalachse $\bar{u}_{\text{CL}} - \bar{u}_a$ bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit am Düsenaustritt $\bar{u}_0 - \bar{u}_a$ ist über dem Abstand x/d vom Düsenblock für beide Messungen in Abb.(5-3) aufgetragen.

Das Abklingen der mittleren Geschwindigkeit auf der Kanalachse läßt sich für beide Messungen und Abstände von $x/d \geq 8$ durch einen Potenzansatz nach

$$\frac{\bar{u}_{\text{CL}} - \bar{u}_a}{\bar{u}_0 - \bar{u}_a} = A_u \cdot \left(\frac{x}{d} - \frac{x_{01}}{d} \right)^{-1} \quad (5.5)$$

annähern. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ergeben sich die Abklingkonstante A_u zu 6.25 und der virtuelle Abstand x_{01}/d vom Düsenblock zu -2.94. Die Meßwerte für $x/d < 8$ werden nicht verwendet, da in diesem Bereich die Strahlen hinter den einzelnen Bohrungen des Düsenblocks nicht vollständig abgebaut sind. Die durch den Düsenrand gebildeten Scherschichten haben sich noch nicht bis auf die Strahlachse ausgebreitet. Die Form des Strahls ist in diesem Formierungsbereich von der Geometrie der Düse abhängig.

Knebel (1993) findet sowohl für einen starken Impulsstrahl ($Fr = 8123$) als auch für einen Impulsstrahl ($Fr = 521$) in Natrium eine Abklingkonstante von $A_u = 6.08$. Die gute Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeitsmessung ist somit gegeben.

Der für die Abklingkonstante A_u der mittleren Geschwindigkeit ermittelte Wert von 6.25 ist in guter Übereinstimmung mit dem von Chen und Rodi (1980)

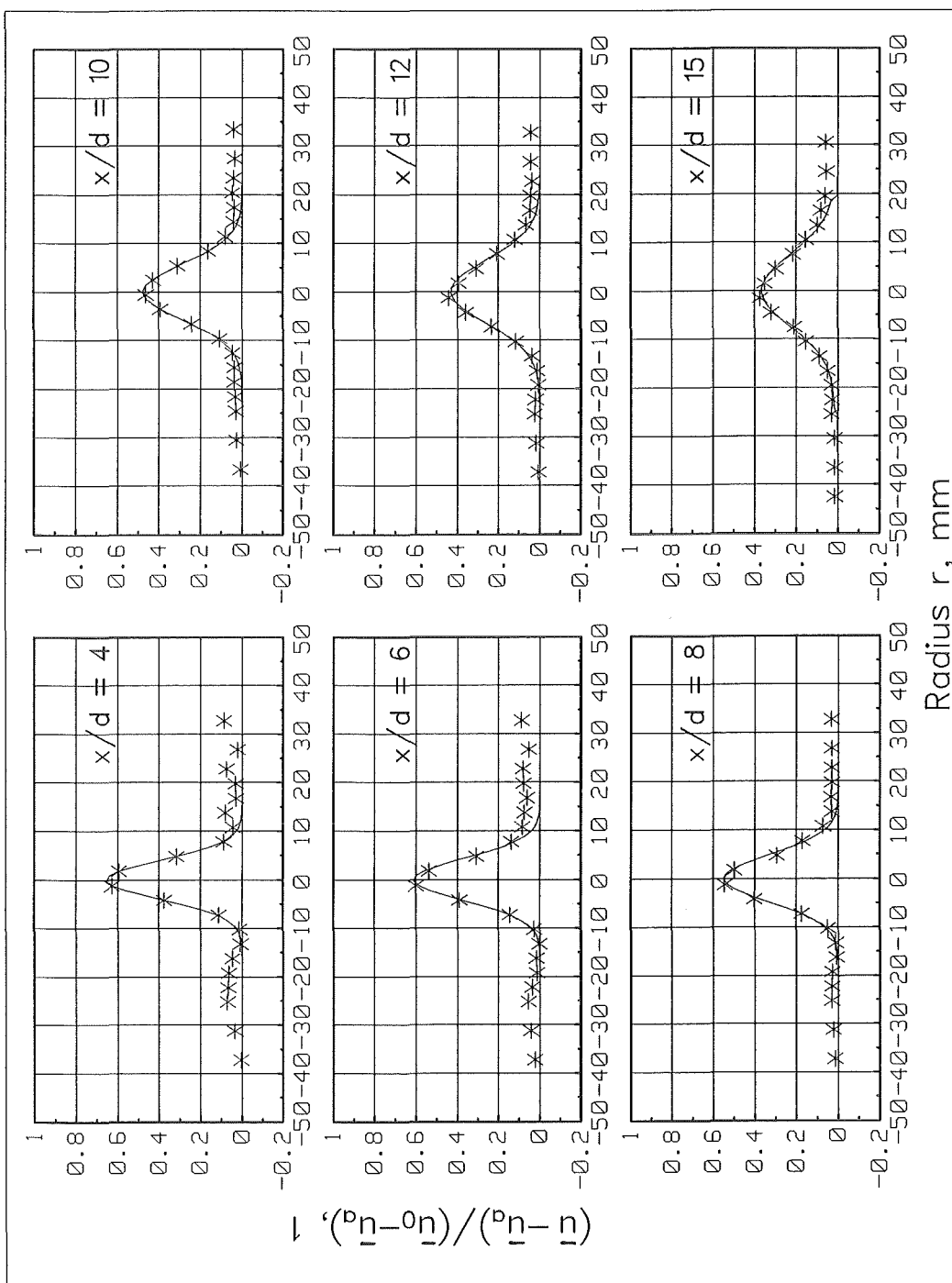


Abb.(5-1a) Vergleich der normierten Geschwindigkeitsmeßwerte (Messung D1) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

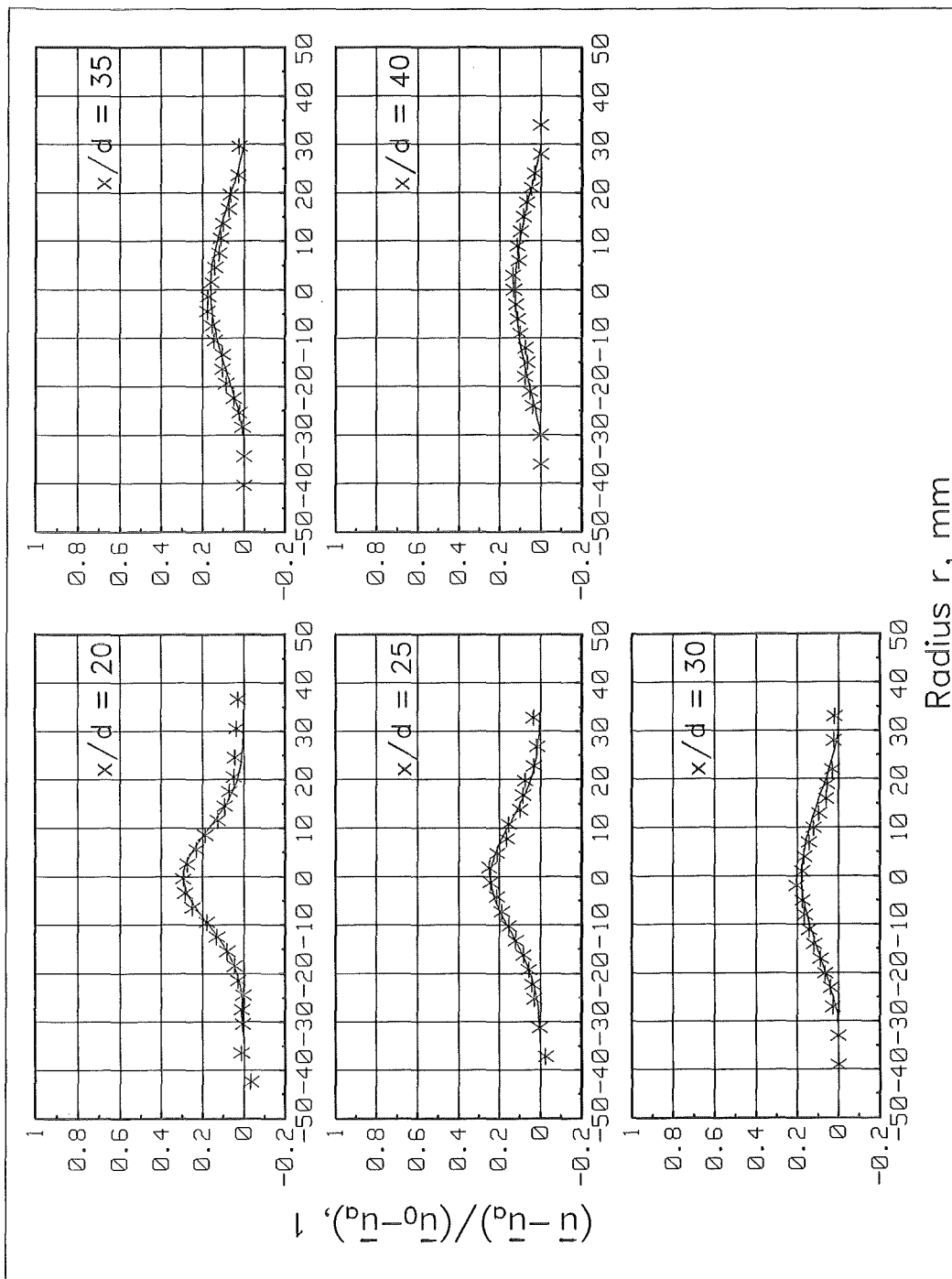


Abb.(5-1b) Vergleich der normierten Geschwindigkeitsmeßwerte (Messung D1) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

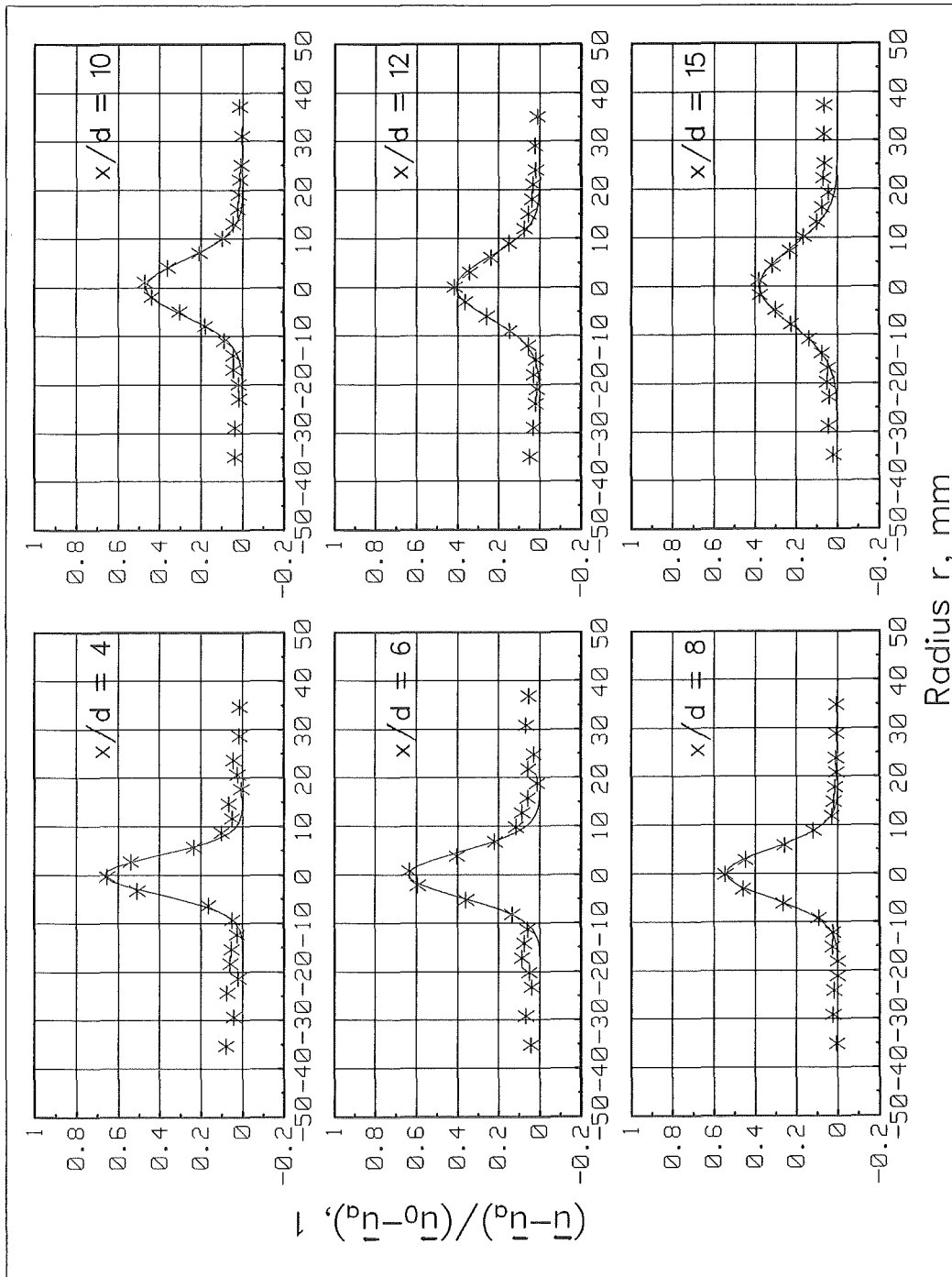


Abb.(5-2a) Vergleich der normierten Geschwindigkeitsmeßwerte (Messung D2) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

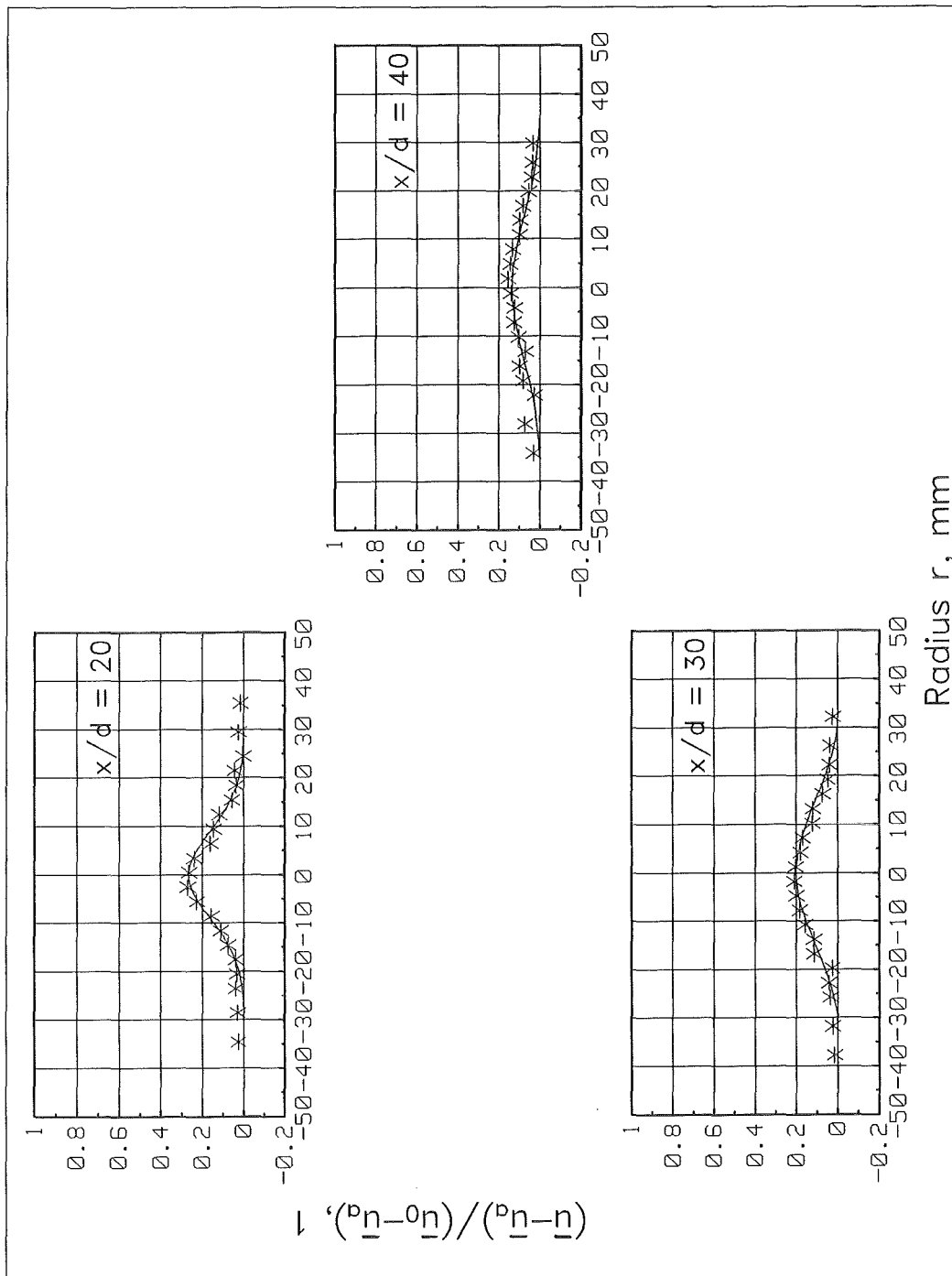


Abb.(5-2b) Vergleich der normierten Geschwindigkeitsmeßwerte (Messung D2) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

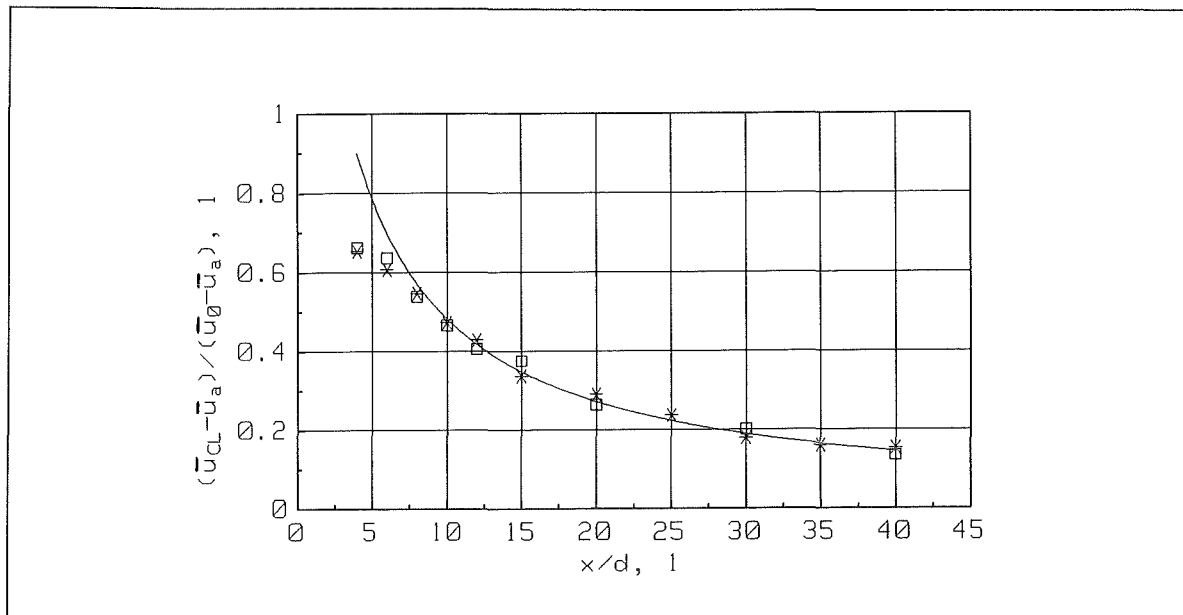


Abb.(5-3) Dimensionslose mittlere Geschwindigkeit auf der Kanalachse über x/d ; * Messung D1, \square Messung D2.

angegebenen Wert von 6.2, der ein Mittelwert von in der Literatur angegebenen Messungen in reinen Impulsstrahlen ist. Ogino et al. (1980) geben einen Wert von 5.8 und Papanicolaou und List (1988) einen Wert von 6.71 an. Diese Messungen sind in Luft und Wasser durchgeführt. Ein Vergleich der Meßergebnisse zeigt, daß das Abklingverhalten eines Impulsstrahls mit überlagertem Temperaturprofil in Natrium (molekulare Prandtl-Zahl von $Pr = 0.0059$) mit dem selben Potenzgesetz nach Gl.(5.5) beschrieben werden kann, das für Fluide mit molekularen Prandtl-Zahlen größer oder gleich 0.7 bekannt ist. Das läßt darauf schließen, daß die Dynamik eines achsensymmetrischen, turbulenten Impulsstrahls in Wasser und in Natrium durch die selbe Gesetzmäßigkeit beschrieben werden kann. Die Temperatur kann zudem als passiver Skalar betrachtet werden.

5.3 Temperaturmessung

Die radialen Temperaturprofile der Thermoelemente 1, 2, 3 und 4 ergeben bei den Messungen D1 und D2 identische Ergebnisse.

Aus diesem Grund wird in der Diskussion der Ergebnisse und den Abbildungen stellvertretend nur die Temperatur des Thermoelements 1 behandelt.

In Abb.(5-4a) sind für die Messung D1 und die Abstände $x/d = 4, 6, 8, 10, 12, 15$ und in Abb.(5-4b) für die Abstände $x/d = 20, 25, 30, 35, 40$ vom Düsenblock die mittlere Temperatur $\bar{T} - \bar{T}_a$ bezogen auf die mittlere Temperatur am Düsenaustritt $\bar{T}_0 - \bar{T}_a$ über dem Radius r aufgetragen. Die Abb.(5-5a) und Abb.(5-5b) zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Messung D2. Die Temperatur ist immer relativ zur Temperatur der Anströmung angegeben.

Die radialen Profile können für beide Messungen sehr gut durch Glockenkurven nach Gauß (durchgezogene Linie gemäß Knebel et al. (1988)) angenähert werden.

$$\frac{\bar{T}_i(r_i) - \bar{T}_a}{\bar{T}_0 - \bar{T}_a} = \frac{\bar{T}_M \cdot \exp(-B_T^2 \cdot (r_i - r_{TO})^2) - \bar{T}_a}{\bar{T}_0 - \bar{T}_a} \quad (5.6)$$

Hierin sind \bar{T}_i die für den Radius r_i gemessenen Temperaturen, \bar{T}_M der Maximalwert und B_T die Flankenneigung der Verteilung. r_{TO} ist der Abstand des Maximalwertes zur Rohrachse.

Für die Berechnung der drei Parameter \bar{T}_M , B_T und r_{TO} werden nur die Meßwerte \bar{T}_i verwendet, die größer als 20 % des auf 1.0 normierten maximalen Meßwertes sind.

Die radialen Profile der mittleren Temperatur sind symmetrisch zur Rohrachse. Die Meßwerte der mittleren Temperatur liegen im Unterschied zu den Meßwerten der mittleren Geschwindigkeit anfänglich leicht oberhalb der

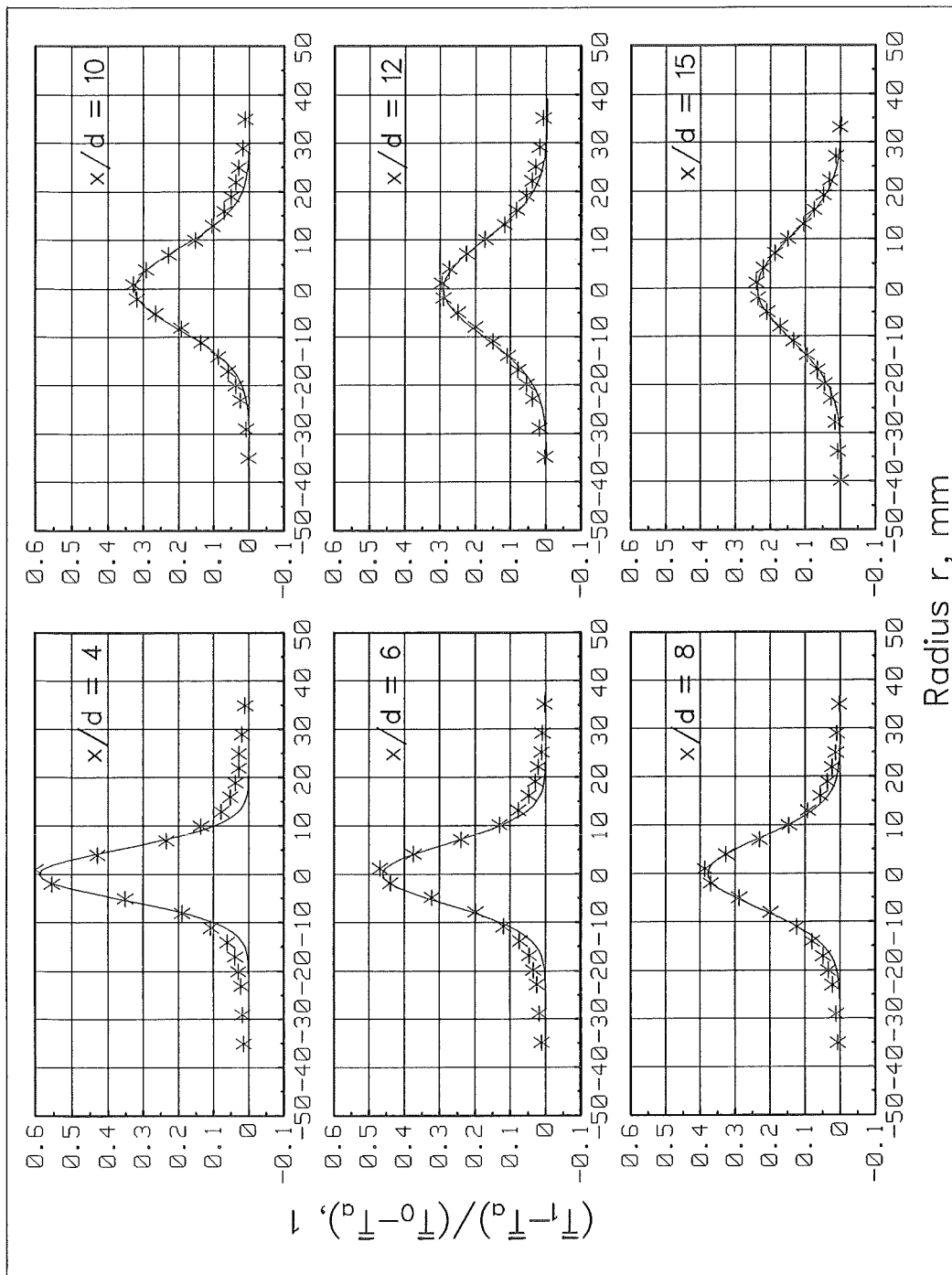


Abb. (5-4a) Vergleich der normierten Temperaturmeßwerte (Messung D1) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist nur jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

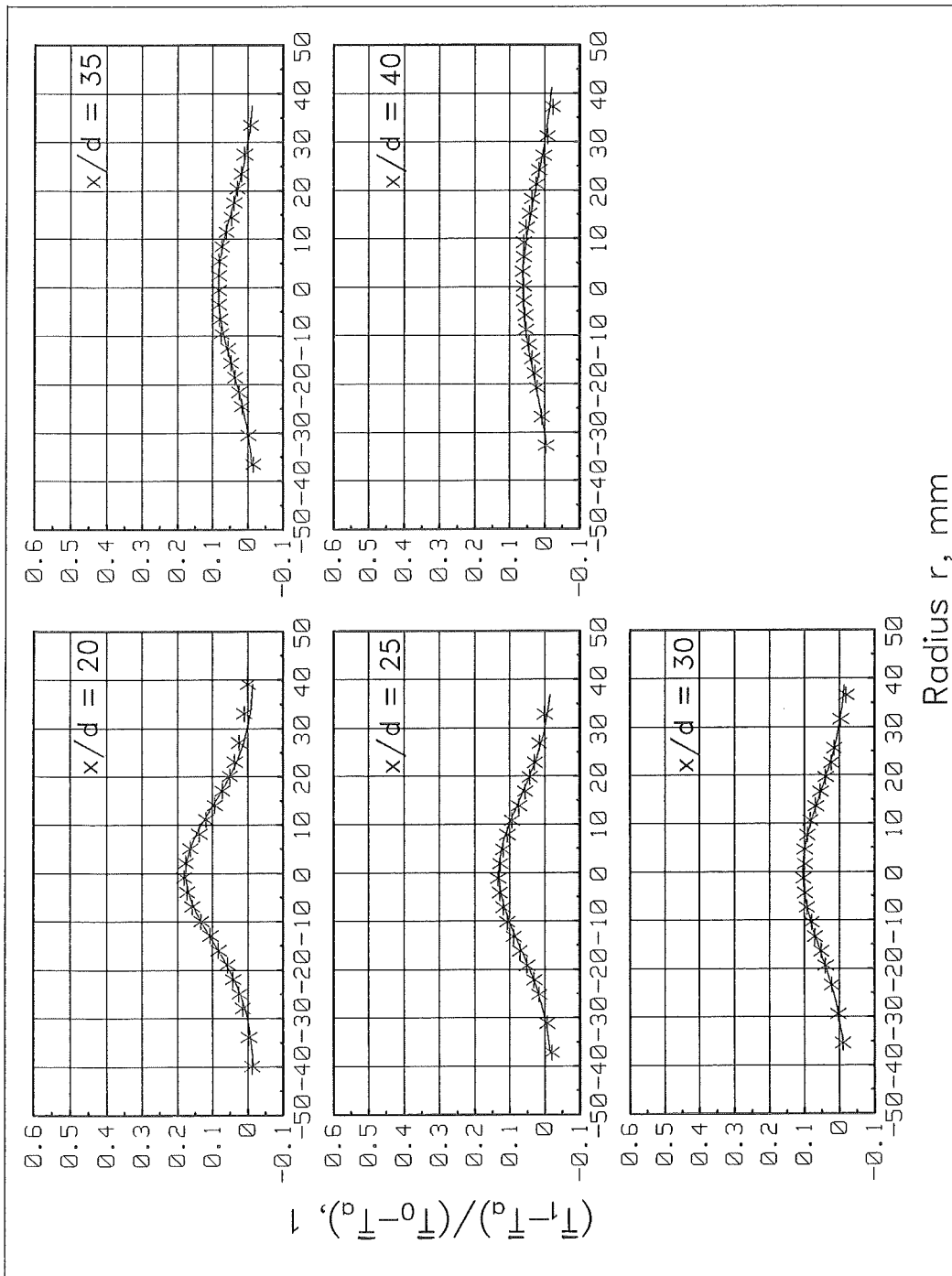


Abb. (5-4b) Vergleich der normierten Temperaturmeßwerte (Messung D1) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist nur jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

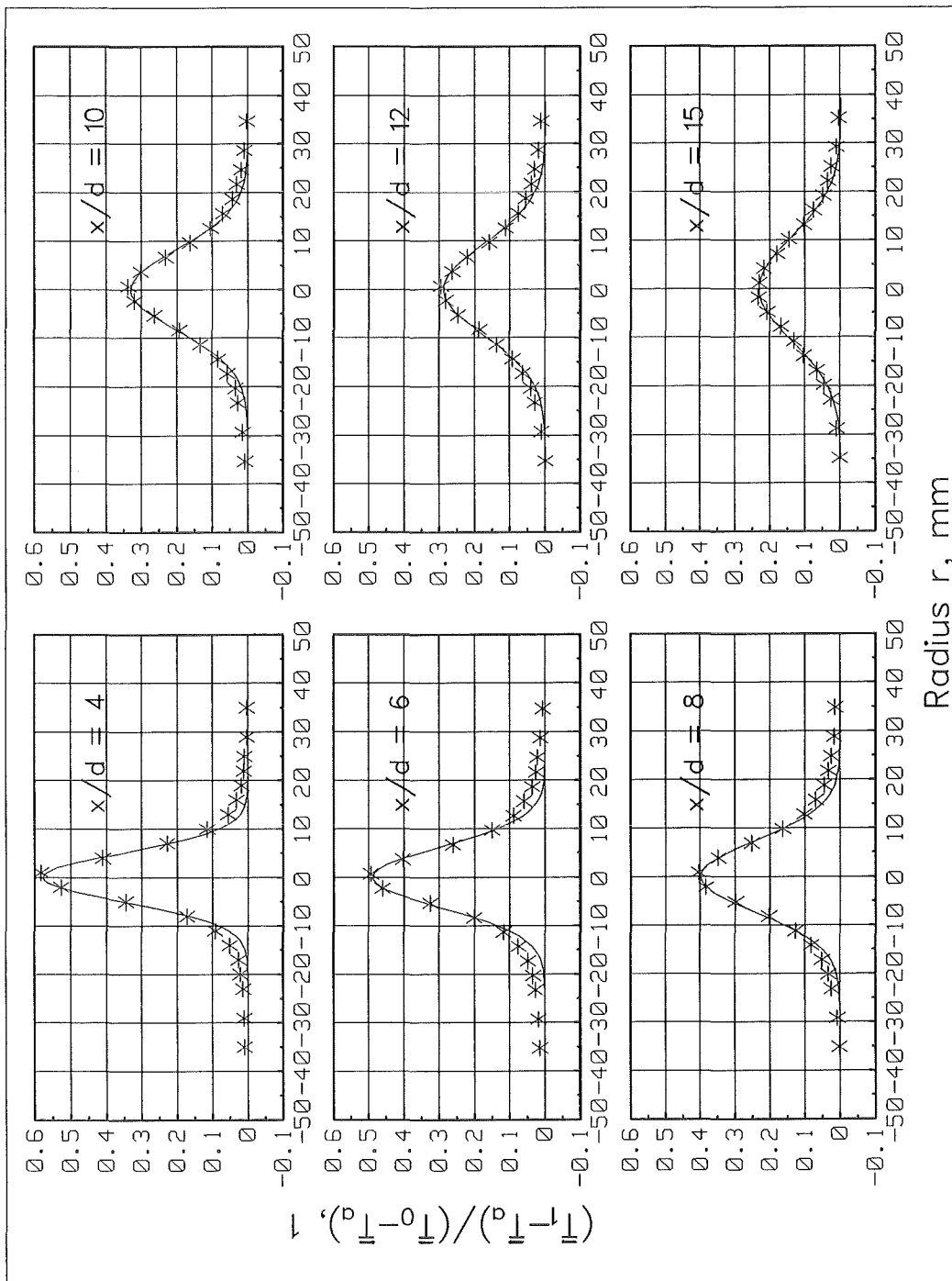


Abb. (5-5a) Vergleich der normierten Temperaturmeßwerte (Messung D2) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist nur jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

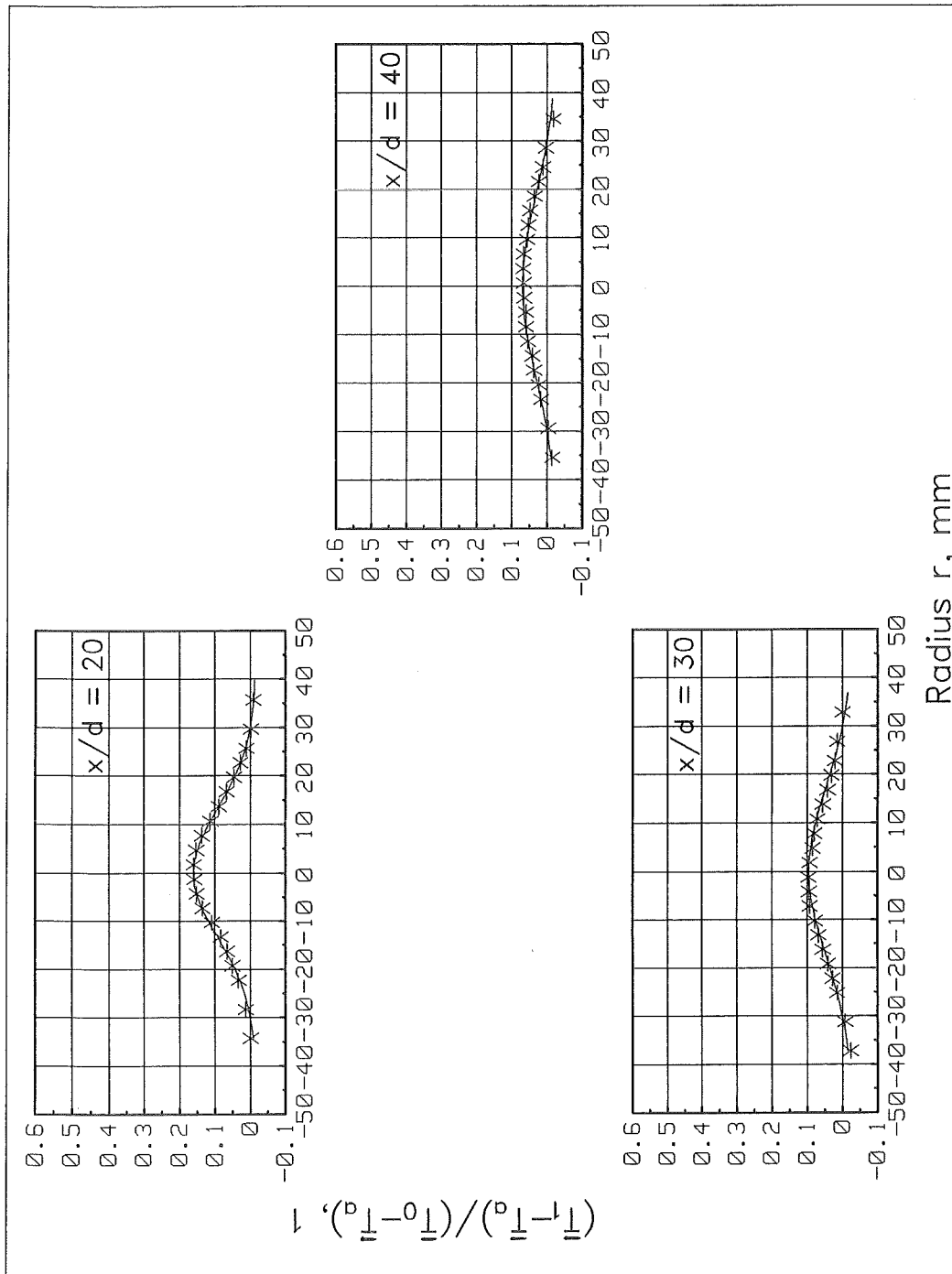


Abb. (5-5b) Vergleich der normierten Temperaturmeßwerte (Messung D2) mit dem normierten Glockenkurvenfit der Meßwerte. Zur besseren Übersicht ist nur jeder dritte Meßpunkt eingezeichnet.

Glockenkurve nach Gauß. Dieses Verhalten läßt sich mit der niedrigen molekularen Prandtl-Zahl von Natrium erklären, die für die Temperatur aufgrund der hohen molekularen Wärmeleitfähigkeit ein breiteres Profil erwarten läßt.

Ein Vergleich der Glockenkurvenfits der Messungen D1 und D2 zeigt eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung.

Das Abklingverhalten der mittleren Temperatur des Strahls auf der Kanalachse $\bar{T}_{CL} - \bar{T}_a$ bezogen auf die mittlere Temperatur am Düsenaustritt $\bar{T}_0 - \bar{T}_a$ ist über dem Abstand x/d vom Düsenblock für beide Messungen in Abb.(5-6) aufgetragen.

Das Abklingen der mittleren Temperatur auf der Kanalachse läßt sich für beide Messungen und Abstände von $x/d \geq 6$ durch einen Potenzansatz nach

$$\frac{\bar{T}_{CL} - \bar{T}_a}{\bar{T}_0 - \bar{T}_a} = A_T \cdot \left(\frac{x}{d} - \frac{x_{03}}{d} \right)^{-1} \quad (5.7)$$

annähern. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ergeben sich die Abklingkonstante A_T zu 3.819 und der virtuelle Abstand x_{03}/d vom Düsenblock zu -1.82. Knebel (1993) findet in getrennten Experimenten eine Abklingkonstante von $A_T = 4.01$. Die Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung ist sehr gut erfüllt.

Für Abstände $x/d \geq 30$ hat sich das Temperaturprofil über den untersuchten Radiusbereich von $-35 \text{ mm} \leq r \leq +35 \text{ mm}$ hinaus in radialer Richtung ausgebreitet, so daß die mittlere Temperatur der Anströmung \bar{T}_a aus dem gemessenen radialen Profil für große Abstände von der Kanalachse nicht mehr korrekt bestimmt werden kann. Die Werte auf der Kanalachse kommen etwas unterhalb der erwarteten Potenzfunktion nach Gl.(5.7) zu liegen, die ein Abklingen proportional zu $(x/d)^{-1}$ fordert. Dieses Abklingverhalten ergibt sich zum Beispiel nach einer Ähnlichkeitsanalyse, wie sie von Chen und

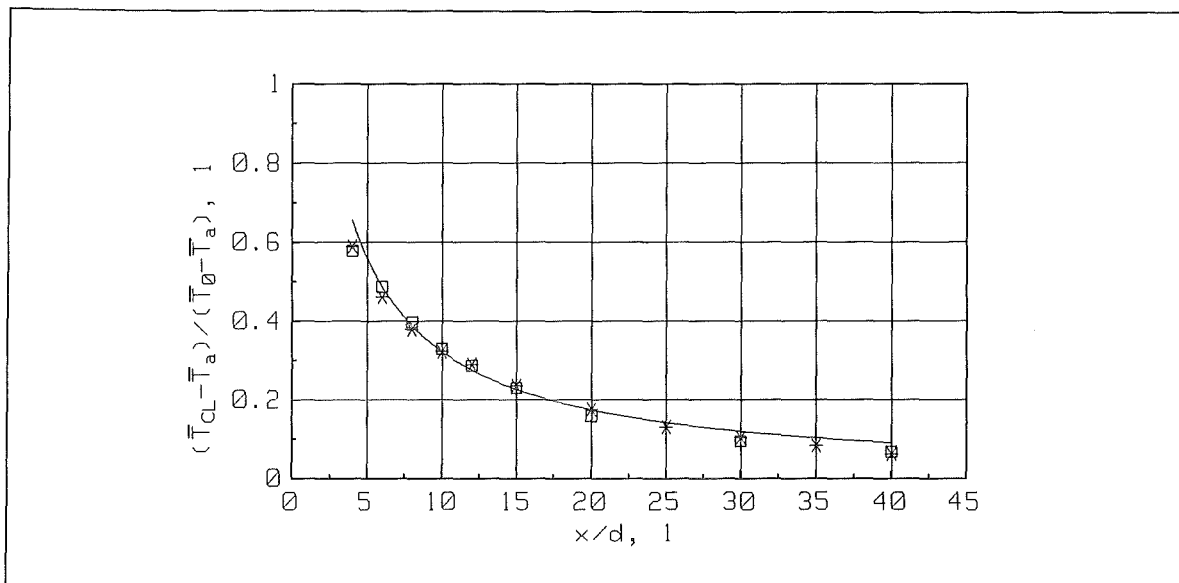


Abb.(5-6) Dimensionslose mittlere Temperatur auf der Kanalachse über x/d ; * Messung D1, \square Messung D2.

Rodi (1980) durchgeführt wird.

Die Abklingkonstante A_T für die mittlere Temperatur liegt mit 3.819 deutlich niedriger als der von Chen und Rodi (1980) angegebene Wert von 5.0. Ogino et al. (1980) geben einen Wert von 4.8, Papanicolaou und List (1987 und 1988) geben Werte von 5.37 und 5.65 an.

Bei Natrium führt die molekulare Diffusion von Wärme aufgrund der um zwei Zehnerpotenzen höheren molekularen Wärmeleitfähigkeit von Natrium gegenüber Luft und Wasser zu einer sehr viel schnelleren radialen Ableitung der Wärme und damit zu einem schnelleren Abklingen der Temperatur auf der Kanalachse. Dies rechtfertigt die kleinere Abklingkonstante von $A_T = 3.819$ für Natrium.

Ein Vergleich des Abklingverhaltens der mittleren Temperatur (Abb.(5-6)) und der mittleren Geschwindigkeit (Abb.(5-3)) auf der Kanalachse zeigt deutlich, daß sich aufgrund der sehr kleinen molekularen Prandtl-Zahl von Natrium ($Pr = 0.0059$) die Wärme (die Temperatur) sehr viel schneller durch molekulare, diffusive Transportvorgänge in radialer Richtung ausbreitet als der Impuls (die Geschwindigkeit).

5.4 Vergleich mit vorangegangenen Messungen

Ein Meßprogramm, das dem Meßprogramm aus Tabelle (5-1) entspricht, wurde mit unterschiedlichen und im wesentlichen baugleichen MPP-Sonden, die mit Zweileiter-Thermoelementen (Thermoelementpaarung Alumel/Chromel) ausgestattet waren, sowohl von den Autoren als auch teilweise von Axcell und Walton (1993) durchgeführt. Diese MPP-Sonden werden im folgenden als alte MPP-Sonden bezeichnet.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen aller MPP-Sonden zeigen wie erwartet nur Unterschiede, die darauf zurückzuführen sind, daß die in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Temperatur- und Offsetkorrekturen nicht durchgeführt wurden.

Die mit den alten MPP-Sonden gemessenen Geschwindigkeiten zeigen ein um bis zu 3 Grad im Uhrzeigersinn gedrehtes Geschwindigkeitsprofil. Die rechte und die linke Flanke sind jedoch symmetrisch zueinander. Der Unterschied zwischen eingestellter und gemessener Geschwindigkeit der Anströmung ist nicht reproduzierbar und schwankt zwischen 2 und 5 *cm/s*.

Da für diese Messungen keine Kalibrierungsmessungen für einen Radius von $r = +25 \text{ mm}$ vorliegen, ist eine lineare Anpassung der Offsetwerte über den Radius nachträglich nicht möglich. Die Schiefe der Geschwindigkeitsprofile kann somit nachträglich nicht beseitigt werden.

Die Kalibrierungsspannungen zeigen für Geschwindigkeiten der Anströmung, die kleiner als 15 *cm/s* sind, eine deutliche Abweichung vom erwarteten linearen Verlauf. Dieses Verhalten läßt sich mit einem Temperaturgradienten über die MPP-Sonden erklären und durch eine Temperaturkorrektur weitgehend beseitigen.

Die Verbesserung der in dieser Arbeit vorgestellten Messungen wird auf eine sorgsame Auswahl des Thermoelementmaterials und eine verbesserte Fertigung der MPP-Sonde K15 zurückgeführt.

5.5 Zusammenfassung der Meßergebnisse

Unter Anwendung der in Kapitel 4.3 erarbeiteten Meßvorschrift ist es möglich, die Empfindlichkeit einer temperaturkompensierten Miniatur-Permanentmagnet-Potentialsonde (MPP-Sonde) und die Offsetwerte der temperaturkorrigierten Spannungen reproduzierbar zu ermitteln. Der Einfluß von thermoelektrischen Effekten auf die Spannungen kann eliminiert werden. Ein nichtlineares Verhalten der Spannungen wird bei der MPP-Sonde K15, die einen Außendurchmesser von 2.5 mm hat und mit Dreileiter-Thermoelementen (Alumel/Chromel/Stahl) ausgestattet ist, nicht beobachtet. Die MPP-Sonde hat eine hohe Empfindlichkeit von $47\ \mu\text{V}/(\text{m/s})$.

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der neuentwickelten MPP-Sonde wird in der Teststrecke TEFLU das Geschwindigkeits- und Temperaturfeld eines turbulenten achsensymmetrischen Freistrahls für elf Abstände vom Einspritzort ausgemessen.

Die gemessenen radialen Geschwindigkeits- und Temperaturprofile sind für alle Abstände vom Einspritzort identisch reproduzierbar. Die Profile können sehr gut durch einen Potenzansatz, der analog der Gaußschen Glockenkurvenfunktion ist, angenähert werden. Das Abklingen der maximalen Meßwerte für Geschwindigkeit und Temperatur auf der Kanalachse kann sehr gut durch Potenzgesetze als proportional zu $(x/d)^{-1}$ beschrieben werden. Die relative statistische Fehlergrenze der mittleren Geschwindigkeit liegt für Geschwindigkeiten größer als 0.05 m/s bei $\pm 6.8\%$.

Die bei vorangegangenen Potentialsonden aufgetretene Schiefe der Geschwindigkeitsprofile ist für die MPP-Sonde K15 nicht zu erkennen. Die nach der K -Methode berechnete Geschwindigkeit ist unabhängig von der verwendeten Paarung der Thermoelementadern. Die α -Methode kann nicht für die Berechnung der Geschwindigkeit herangezogen werden, da die Gleichheitsbedingung der modifizierten Seebeckkoeffizienten der beiden Sondenmeßebenen nicht erfüllt ist.

Die in dieser Arbeit erzielte entscheidende Verbesserung der Messungen wird auf eine sorgsame Auswahl des Thermoelementmaterials und eine verbesserte Fertigung der MPP-Sonde zurückgeführt. Die Verwendung von Dreileiter-Thermoelementen wird empfohlen.

6. Fehlerrechnung

Die für die Fehlerrechnung grundlegenden Überlegungen und Vorschriften sind VDE/VDI-Richtlinie 2620 (1973) und DIN 1319 (1983) entnommen.

Allgemeine Grundlagen

Ziel jeder Messung ist es, den wahren Wert einer Meßgröße zu ermitteln. Da jeder Meßwert und damit jedes Meßergebnis zum einen durch Unvollkommenheit der Meßgeräte, der Meßeinrichtungen und des Meßverfahrens und zum anderen durch Umwelteinflüsse beeinflusst wird, muß zur Abschätzung des sich bei der Messung ergebenden Fehlers eine Fehlerrechnung durchgeführt werden.

Die Meßabweichung des gemessenen Wertes vom realen Wert, im folgenden als Abweichung bezeichnet, läßt sich in eine zufällige und eine systematische Abweichung aufteilen.

Unter den zufälligen Abweichungen faßt man die nicht beherrschbaren und nicht einseitig gerichteten Einflüsse während mehrerer Messungen am selben Meßobjekt auf. Sie führen zu einer Streuung der Meßwerte um den Mittelwert der Meßreihe. Unter einer systematischen Abweichung versteht man die während einer Messung auftretende konstante Abweichung. Die systematische Abweichung kann durch Kalibrierung der Komponenten der Meßkette minimiert werden.

Fehlerfortpflanzung

Ein Meßergebnis y kann aus mehreren Meßgrößen x_1, x_2, \dots, x_i gebildet werden. Somit besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Meßergebnis y und den voneinander unabhängigen Meßgrößen x_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (6.1)$$

Um den Fehler Δy des Meßergebnisses y abschätzen zu können, wird die Funktion y in eine Taylorreihe entwickelt, wobei die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt werden.

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i . \quad (6.2)$$

Hierin sind Δx_i die Fehler der Meßgrößen x_i , wobei $\Delta x_i \ll x_i$ vorausgesetzt wird.

Da die Fehler der Meßgrößen nach Betrag und Vorzeichen unbekannt sind, ergeben sich die Fehlergrenzen y^* des Meßergebnisses y , die zu 100 % eingehalten werden, zu folgendem Ausdruck.

$$\Delta y^* = \pm \left[\left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \right] . \quad (6.3)$$

Hierin sind die Δx_i die größten Fehlergrenzen der Meßgrößen beziehungsweise der Meßgeräte.

Da es unwahrscheinlich ist, daß die Fehler Δx_i sämtlicher Meßwerte x_i nur an der positiven oder an der negativen Fehlergrenze liegen, ist es auch unwahrscheinlich, daß die sicheren Ergebnisfehlergrenzen von Δy^* in Anspruch genommen werden. Man geht deshalb zu den statistischen Fehlergrenzen Δy^{**} über.

$$\Delta y^{**} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2} . \quad (6.4)$$

Durch Division der statistischen Ergebnisfehlergrenzen Δy^{**} mit dem Meßergebnis y erhält man die relativen statistischen Ergebnisfehlergrenzen $\Delta y^{**} / y$.

Fehlerrechnung

Die Fehlerrechnung wird nur für die nach der K-Methode berechnete Geschwindigkeit durchgeführt. Die sich ergebenden Gleichungen sind sowohl für die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel als auch für die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl gültig. In den Gleichungen ist lediglich der Index i durch den Index C für die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel oder den Index S für die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl zu ersetzen.

Die Geschwindigkeit berechnet sich aus Gl. (3.18).

Darmit ergeben sich die relativen statistischen Ergebnisfehlergrenzen der Geschwindigkeit zu:

$$\frac{\Delta \bar{u}_{Na, Ai}^{***}}{\bar{u}_{Na, Ai}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta ES_{21, Ai}}{ES_{21, Ai}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_{21, Ai}}{E_{21, Ai}}\right)^2} \quad (6.5)$$

Die geschwindigkeitsproportionale Spannung $E_{21, Ai}$ ergibt sich nach den Gln. (3.26) und (3.28) zu

$$E_{21, Ai} = \frac{U_{21A} - K_{Ai} \cdot U_{21i}}{1 - K_{Ai}} \quad (6.6)$$

Die relativen statistischen Ergebnisfehlergrenzen der geschwindigkeitsproportionalen Spannung ergeben sich zu

$$\frac{\Delta E_{21, Ai}^{***}}{E_{21, Ai}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{21A}}{U_{21A} - K_{Ai} \cdot U_{21i}}\right)^2 + \left(\frac{K_{Ai} \cdot \Delta U_{21A}}{U_{21A} - K_{Ai} \cdot U_{21i}}\right)^2 + \left(\frac{(U_{21A} - U_{21i}) \cdot \Delta K_{Ai}}{(U_{21A} - K_{Ai} \cdot U_{21i}) \cdot (1 - K_{Ai})}\right)^2} \quad (6.7)$$

Der K-Wert ergibt sich nach den Gln. (3.25) und (3.27) zu

$$K_{Ai} = \frac{U_{21A} - E_{21,ber,Ai}}{U_{21i} - E_{21,ber,Ai}} \quad (6.8)$$

Hieraus ergeben sich die statistischen Fehlergrenzen des K-Wertes zu

$$\Delta K_{Ai}^{**} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{21A}}{U_{21C} - E_{21,ber,Ai}}\right)^2 + \left(\frac{K_{Ai} \cdot \Delta U_{21A}}{U_{21C} - E_{21,ber,Ai}}\right)^2 + \frac{((U_{21A} - U_{21i}) \cdot \Delta E_{21,ber,Ai})^2}{(U_{21C} - E_{21,ber,Ai})^4}} \quad (6.9)$$

Der Ausdruck $E_{21,ber,Ai}$ in Gl. (6.9) ergibt sich zu

$$E_{21,ber,Ai} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (ES_{21A,30} + ES_{21A,80}) + \frac{1}{2} \cdot (ES_{21i,30} + ES_{21i,80}) \right) \cdot Q_{main} \quad (6.10)$$

Darin sind $ES_{21A,30}$, $ES_{21A,80}$ und $ES_{21i,30}$, $ES_{21i,80}$ die Empfindlichkeiten der Alumeladern und der Chromel- beziehungsweise Stahladern, die zum einen aus einer Kalibrierungsmessung bei $r = -25 \text{ mm}$ zum anderen aus einer Kalibrierungsmessung bei $r = +25 \text{ mm}$ ermittelt werden.

Die statistischen Fehlergrenzen der berechneten geschwindigkeitsproportionalen Spannung $E_{21,ber,Ai}$ folgen damit zu

$$\Delta E_{21,ber,Ai}^{**} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{4} \cdot Q_{main}\right)^2 \cdot \left((\Delta ES_{21A,30})^2 + (\Delta ES_{21A,80})^2 + (\Delta ES_{21i,30})^2 + (\Delta ES_{21i,80})^2\right) + \left(\frac{1}{4} \cdot (ES_{21A,30} + ES_{21A,80} + ES_{21i,30} + ES_{21i,80}) \cdot \Delta Q_{main}\right)^2} \quad (6.11)$$

Der in Gl. (6.5) auftretende Term ES_{21A1} ergibt sich zu

$$ES_{21A1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (ES_{21A,30} + ES_{21A,80}) + \frac{1}{2} \cdot (ES_{211,30} + ES_{211,80}) \right) \quad (6.12)$$

Daraus folgt für die statistischen Fehlergrenzen der Empfindlichkeiten ES_{21A1}

$$\Delta ES_{21A1}^{**} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{4} \right)^2 \cdot \left((\Delta ES_{21A,30})^2 + (\Delta ES_{21A,80})^2 + \right. \\ \left. + (\Delta ES_{211,30})^2 + (\Delta ES_{211,80})^2 \right)} \quad (6.13)$$

Die sich aus den Gln. (6.5), (6.7), (6.8), (6.11) und (6.13) ergebenden relativen statistischen Fehlergrenzen der Meßgrößen sind für die beiden Thermoelementpaarungen Alumel/Chromel und Alumel/Stahl in Tabelle (6-1) dargestellt.

Die für deren Berechnung benötigten statistischen Fehlergrenzen sind in Tabelle (6-2) angegeben.

Die relativen statistischen Fehlergrenzen der Geschwindigkeit ergeben sich für die Thermoelementpaarung Alumel/Chromel zu $\pm 6.79 \%$ und für die Thermoelementpaarung Alumel/Stahl zu $\pm 6.22 \%$.

Größe	Alumel/Chromel	Alumel/Stahl
$\frac{\Delta E_{21,ber}^{**}}{E_{21,ber}}$	$\pm 1.26 \%$	$\pm 1.21 \%$
$\frac{\Delta K^{**}}{K}$	$\pm 17.7 \%$	$\pm 23.2 \%$
$\frac{\Delta E_{21}^{**}}{E_{21}}$	$\pm 6.67 \%$	$\pm 6.19 \%$
$\frac{\Delta ES_{21}^{**}}{ES_{21}}$	$\pm 0.675 \%$	$\pm 0.625 \%$
$\frac{\Delta u_{Na}^{-**}}{\bar{u}_{Na}}$	$\pm 6.79 \%$	$\pm 6.22 \%$

Tabelle (6-1) Relative statistische Meßgrößen für die Thermoelementpaarungen Alumel/Chromel und Alumel/Stahl.

Größe	Einheit	Alumel	Chromel	Stahl
$\Delta ES_{21,30}$	$\mu V/(m/s)$	± 0.565	± 0.466	± 0.400
$\Delta ES_{21,80}$	$\mu V/(m/s)$	± 0.758	± 0.675	± 0.542
ΔU_{21}	μV	± 0.8	± 0.8	± 0.8
ΔQ_{main}	m/s	unabhängig von der Theroelementader ± 0.01		

Tabelle (6-2) Statistische Fehlergrenzen.

7. Literatur

American Society for Testing and Materials (ASTM), (1971)

Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement ASTM Special Technical Publication 470A, Philadelphia.

Axcell B.P., Walton A., (1993)

Thermoelectric Effects in Miniature Permanent Magnet Probes Used for Velocity Measurement in Flowing Sodium, Experimental Thermal and Fluid Science 6, 309-323.

Bremhorst K., Krebs, L., (1989)

Turbulent Prandtl Number in Liquid Sodium from Measurements of Mean Velocity and Temperature in a Heated Jet, 4th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 764-768, Karlsruhe.

Bremhorst K., Krebs, L., (1992)

Experimentally Determined Turbulent Prandtl Numbers in Liquid Sodium at Low Reynolds Numbers, Int. J. Heat Mass Transfer 35, 351-359.

Chen C.J., Rodi W., (1980)

Turbulent Buoyant Jets - A Review of Experimental Data, HMT Vol.4, Pergamon Press.

Deutsche Norm DIN 1319 Teil 3, (1983)

Grundbegriffe der Meßtechnik, Begriffe für die Meßunsicherheit und für die Beurteilung von Meßgeräten und Meßeinrichtungen.

Fenton A.W., (1969)

Errors in Thermoelectric Thermometers, Proc. of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 116 No. 7, 1277-1285.

Fenton A.W., (1971)

The Travelling Gradient Approach to Thermocouple Research, 5th Symp. on Temperature, 1973-1990, Washington USA.

Fenton A.W., (1979)

A Note on How Thermocouples Work, UKAEA, Northern Div. Report ND-R-327(R).

Golden G.H., Tokar J.V., (1967)

Thermophysical Properties of Sodium, ANL-Rep. 7223, Argonne IL USA.

Hall C.A., Porsching T.A., Dougall R.S., (1980)

EPRI-Rept. NP-1416.

Hoffmann H., Sardain P., Webster R., (1991)

The European R+D-Program on Natural Convection Decay Heat Removal for the EFR, Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol.2, 13.5.1-9, Kyoto, Japan.

Hoffmann H., Weinberg D., (1992)

Investigations on Natural Convection Decay Heat Removal for the EFR Using Various Model Geometries, Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol.3, 26.2.1-7, Tokyo, Japan.

Horanyi S, Krebs L., (1988)

Temperature Compensated Miniature Permanent Magnet Flowmeter For Liquid Metal, in Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 1988 (Proc. 1st World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 4-9 Sept. 1988, Dubrovnik, Yugoslavia), R.K. Shah, E.N. Ganic and K.T. Yang, Eds., 279-285, Elsevier, New York.

Kinzie P.A., (1973)

Thermocouple Temperature Measurements, John Wiley & Sons, New York.

Knebel J.U., (1990)

Kernforschungszentrum Karlsruhe, unveröffentlicher Bericht.

Knebel J.U., (1993)

Experimentelle Untersuchungen in turbulenten Auftriebsstrahlen in Natrium, Dissertation KfK 5175, Kernforschungszentrum Karlsruhe.

Knebel J.U., Suckow D., Krebs L., (1988)

Kernforschungszentrum Karlsruhe, unveröffentlicher Bericht.

Kollie T.G., Horton J.L., Carr K.R., Herskovitz M.B., Mossman C.A., (1975)

Temperature Measurement Errors With Type K (Chromel vs Alumel) Thermocouples Due To Short-Range Ordering in Chromel, Rev. Sci. Instrum., Vol. 46 No. 11., 1447-1461.

Krebs L., Bremhorst K., Müller U., (1981)

Measurement and Prediction of the Mean and Fluctuating Temperature Field Downstream of a Multibore Jet Block in which one Jet is Heated, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 24, No. 8., 1305-1312.

Müller St., Thun G., (1977)

Permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde für flüssige Metalle, KfK 2479, Kernforschungszentrum Karlsruhe.

Ogino F., Takeuchi H., Kudo I., Mizushina T., (1980)

Heated Jet Discharged Vertically into Ambient of Uniform and Linear Temperature Profile, Int. J. Heat Mass Transfer 23, 1581-1588.

Papanicolaou P.N., List E.J., (1987)

Statistical and Spectral Properties of Tracer Concentration in Round Buoyant Jets, Int. J. Heat Mass Transfer 30, 2059-2071.

Papanicolaou P.N., List E.J., (1988)

Investigations of Round Vertical Turbulent Buoyant Jets, J. Fluid Mech. 195, 341-391.

Powell R.L., Hall W.J., Hyink C.H., Sparks L.L., Burns G.W., Scroger M.G., Plumb H.H., (1974)

Thermocouple Reference Tables, based IPTS-68, U.S. Department of Commerce.

Suckow D., (1993)

Experimentelle Untersuchung turbulenter Mischkonvektion im Nachlauf einer beheizten Kugel, Dissertation KfK 5174, Kernforschungszentrum Karlsruhe.

VDE/VDI-Richtlinie 2620/1, (1973)

Fortpflanzung von Fehlergrenzen bei Messungen, Grundlagen.

Weinberg D., Hoffmann H., Hain H., Hofmann F., Düweke M., (1986)

Experimental and Theoretical Program to Study Natural Convection Decay Heat Removal System of the SNR-2, Conf. on the Science and Technology of Fast Reactor Safety, Vol.1, 289-294, Guernsey UK.

Weissenfluh von, T., (1984)

Turbulenter Wärmetransport in flüssigem Natrium, Dissertation 7464, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz.

A. Anhang

A.1 Herleitung der Gleichungen (3.9) bis (3.14)

Sind T_v die Temperatur der Vergleichsstelle und S_i die Seebeckkoeffizienten der Thermoelementadern i aus der Literatur, so ergeben sich die gemessenen Spannungen wie folgt:

Untere Sondenmeßebene:

$$\begin{aligned}
 U_{21i} &= \int_{T_v}^{T_2} S_i \cdot dT + S_{N21}^* \cdot (T_1 - T_2) + \int_{T_1}^{T_v} S_i \cdot dT + E_{21}, \\
 &= \int_{T_v}^{T_1} S_i \cdot dT + \int_{T_1}^{T_2} S_i \cdot dT + S_{N21}^* \cdot (T_1 - T_2) - \int_{T_v}^{T_1} S_i \cdot dT + E_{21}, \\
 &= \int_{T_1}^{T_2} S_i \cdot dT - S_{N21}^* \cdot (T_2 - T_1) + E_{21}. \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

Da S im Temperaturintervall $[T_1, T_2]$ konstant ist, ergibt sich U_{21i} zu

$$U_{21i} = (S_i - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21}. \tag{A.2}$$

Für die Spannungen der oberen Sondenmeßebene sind die Indizes 1, 2 und 21 durch 3, 4 und 43 zu ersetzen.

$$U_{43i} = (S_i - S_{N43}^*) \cdot \Delta T_{43} + E_{43}. \tag{A.3}$$

A.2 Scheinbare Temperaturdifferenzen, reale Temperaturdifferenzen

Die Herleitung wird hier nur für die Gln.(3.40) und (3.42) durchgeführt. Die Gln.(3.41) und (3.43) erhält man, indem 1 und 2 durch 3 und 4 ersetzt werden.

Annahmen und Voraussetzungen

- Für die Spannungen und Temperaturen:

Die obere Zahl in Klammern bezeichnet die Positionsnumern 1, 2, 3 und 4 der Thermoelementspitzen.

- Für die Seebeckkoeffizienten:

Der erste Index bezeichnet das Material der Thermoelementadern.

Der zweite Index bezeichnet das Thermoelement.

Die Seebeckkoeffizienten S_{ij} weichen im betrachteten Temperaturintervall nur geringfügig von den Literaturwerten ab.

Die individuellen Seebeckkoeffizienten der Chromel- und Alumeladern werden im betrachteten Temperaturbereich als konstant angenommen.

- T_v ist die Temperatur der Vergleichsstelle.

A.2.1 Herleitung der scheinbaren Temperaturdifferenz ΔT_{21sch}

Die Temperatur T_a ist konstant über den Querschnitt.

Für die gemessene Spannung zwischen der Alumel- und der Chromel-Ader des Thermoelementes 1 gilt:

$$\begin{aligned}
 U_{gem}^{(1)} &= \int_{T_v}^{T_a} S_{C1} \cdot dT + \int_{T_a}^{T_v} S_{A1} \cdot dT = \int_{T_v}^{T_*} S_{C1} \cdot dT + \int_{T_*}^{T_a} S_{C1} \cdot dT - \int_{T_v}^{T_*} S_{A1} \cdot dT - \int_{T_*}^{T_a} S_{A1} \cdot dT, \\
 &= \int_{T_v}^{T_*} (S_{C1} - S_{A1}) \cdot dT - (S_{C1} - S_{A1}) \cdot T_* + (S_{C1} - S_{A1}) \cdot T_a. \quad (A.4)
 \end{aligned}$$

Führt man die Konstante $A_1 = \int_{T_v}^{T_*} (S_{C1} - S_{A1}) \cdot dT - (S_{C1} - S_{A1}) \cdot T_*$ ein, so ergibt sich:

$$U_{\text{gem}}^{(1)} = (S_{C1} - S_{A1}) \cdot T_a + A_1. \quad (\text{A.5})$$

Für die gemessene Spannung am Thermoelement 2 gilt entsprechend:

$$U_{\text{gem}}^{(2)} = (S_{C2} - S_{A2}) \cdot T_a + A_2. \quad (\text{A.6})$$

Hierin ist die Konstante

$$A_2 = \int_{T_v}^{T_*} (S_{C2} - S_{A2}) \cdot dT - (S_{C2} - S_{A2}) \cdot T_*. \quad (\text{A.7})$$

Die berechneten Temperaturen an den Thermoelementen 1 und 2 ergeben sich zu (vgl. (3.15)):

$$T_{\text{a,ber}}^{(1)} = \frac{U_{\text{gem}}^{(1)}}{S_C - S_A} - T_v, \quad (\text{A.8})$$

$$T_{\text{a,ber}}^{(2)} = \frac{U_{\text{gem}}^{(2)}}{S_C - S_A} - T_v. \quad (\text{A.9})$$

Setzt man die Gln. (A.5) und (A.6) in die Gln. (A.8) und (A.9) ein, so ergibt sich:

$$T_{\text{a,ber}}^{(1)} = T_a \cdot \left[\frac{(S_{C1} - S_{A1})}{S_C - S_A} \right] + \frac{A_1}{S_C - S_A} - T_v, \quad (\text{A.10})$$

$$T_{\text{a,ber}}^{(2)} = T_a \cdot \left[\frac{(S_{C2} - S_{A2})}{S_C - S_A} \right] + \frac{A_2}{S_C - S_A} - T_v. \quad (\text{A.11})$$

Subtrahiert man Gl. (A.10) von (A.11), so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$T_{a,ber}^{(2)} - T_{a,ber}^{(1)} = T_a \cdot \left[\frac{(S_{C2} - S_{A2})}{S_C - S_A} - \frac{(S_{C1} - S_{A1})}{S_C - S_A} \right] + \frac{1}{S_C - S_A} \cdot (A_2 - A_1). \quad (\text{A.12})$$

Führt man die Konstanten

$$C_1 = \left[\frac{(S_{C2} - S_{A2})}{S_C - S_A} - \frac{(S_{C1} - S_{A1})}{S_C - S_A} \right], \quad (\text{A.13})$$

und

$$K_1 = \frac{1}{S_C - S_A} \cdot (A_2 - A_1) \quad (\text{A.14})$$

ein, so ergibt sich Gl. (A.12) zu

$$T_{a,ber}^{(2)} - T_{a,ber}^{(1)} = \Delta T_{21sch} = C_1 \cdot T_a + K_1. \quad (\text{A.15})$$

A.2.2 Herleitung der realen Temperaturdifferenz ΔT_{21}

Durch Einführung der Konstanten M_i und N_i mit

$$M_i = \left[\frac{(S_{Ci} - S_{Ai})}{S_C - S_A} \right] \text{ und } N_i = \frac{A_i}{S_C - S_A} - T_v, \quad (\text{A.16})$$

gehen die Gl. (A.10) und (A.11) über in

$$T_{a,ber}^{(1)} = T_a \cdot M_1 + N_1, \quad (\text{A.17})$$

$$T_{a,ber}^{(2)} = T_a \cdot M_2 + N_2. \quad (\text{A.18})$$

Mit Gl. (A.18) ergibt sich

$$T_{2,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(2)} = (T_2 - T_1) \cdot M_2. \quad (\text{A.19})$$

Durch Umformung von Gl.(A.19) ergibt sich die reale Temperaturdifferenz

$T_2 - T_1$ zu

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{M_2} \cdot \left[(T_{2,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)}) - (T_{1,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)}) \right]. \quad (A.20)$$

Da C_1 (Gl.(A.13)) einen kleinen Wert aufweist, kann für den Ausdruck

$(T_{1,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)})$ näherungsweise

$$(T_{1,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)}) \cong (T_{a,ber}^{(2)} - T_{a,ber}^{(1)}) \quad (A.21)$$

geschrieben werden.

Die Konstante M_2 ergibt sich zu ungefähr 1. Somit gilt für die reale Temperaturdifferenz $T_2 - T_1$ näherungsweise:

$T_2 - T_1$ näherungsweise:

$$T_2 - T_1 \cong (T_{2,ber}^{(2)} - T_{1,ber}^{(1)}) - \Delta T_{21sch}. \quad (A.22)$$

A.3 Kalibrierungsmessung

Voraussetzungen:

- S_{ij} sind die individuellen Seebeckkoeffizienten der Thermoelementadern.
Der Index i bezeichnet das Drahtmaterial, der Index j das Thermoelement.
Die Seebeckkoeffizienten S_{ij} weichen im betrachteten Temperaturintervall nur geringfügig von den Literaturwerten ab.
Die Seebeckkoeffizienten S_{ij} werden im betrachteten Temperaturbereich als konstant angenommen.
- T_{cal} ist die Kalibrierungstemperatur mit $T_{cal} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.
- T_v ist die Temperatur der Vergleichsstelle.

A.3.1 Kalibrierungsmessung ohne Temperaturgradient über die MPP-Sonde

Für die zwischen den Thermoelementadern gleichen Materials i gemessenen Spannungen gilt:

Untere Sondenmeßebene:

$$U_{21i} = \int_{T_v}^{T_{cal}} S_{i2} \cdot dT + \int_{T_{cal}}^{T_v} S_{i1} \cdot dT + E_{21}, \quad (\text{A.23})$$

Obere Sondenmeßebene:

$$U_{43i} = \int_{T_v}^{T_{cal}} S_{i4} \cdot dT + \int_{T_{cal}}^{T_v} S_{i3} \cdot dT + E_{43}. \quad (\text{A.24})$$

Die Offsetwerte ergeben sich zu

$$D_{21i} = \int_{T_v}^{T_{cal}} S_{i2} \cdot dT + \int_{T_{cal}}^{T_v} S_{i1} \cdot dT, \quad (\text{A.25})$$

und

$$D_{43i} = \int_{T_v}^{T_{cal}} S_{i4} \cdot dT + \int_{T_{cal}}^{T_v} S_{i3} \cdot dT, \quad (A.26)$$

Daraus sind die Gln.(3.44) bis (3.49) ableitbar.

In den Gln.(A.25) und (A.26) ist deutlich die Abhängigkeit der Offsetwerte von der Kalibrierungstemperatur T_{cal} zu erkennen.

A.3.2 Kalibrierungsmessung mit Temperaturgradient über die MPP-Sonde

Für die gemessenen Spannungen gilt:

$$U_{21i} = \int_{T_v}^{T_2} S_{i2} \cdot dT + S_{N21}^* \cdot (T_1 - T_2) + \int_{T_1}^{T_v} S_{i1} \cdot dT + E_{21},$$

$$= \int_{T_v}^{T_{cal}} S_{i2} \cdot dT + \int_{T_{cal}}^{T_2} S_{i2} \cdot dT + S_{N21}^* \cdot (T_1 - T_2) + \int_{T_{cal}}^{T_v} S_{i1} \cdot dT + \int_{T_1}^{T_{cal}} S_{i1} \cdot dT + E_{21}. \quad (A.27)$$

Mit Gl.(A.25) ergibt sich aus Gl.(A.27):

$$U_{21i} = D_{21i} + S_{i2} \cdot (T_2 - T_{cal}) + S_{i1} \cdot (T_{cal} - T_1) + S_{N21}^* \cdot (T_1 - T_2) + E_{21}. \quad (A.28)$$

und durch geeignete Umformung

$$U_{21i} = D_{21i} + (S_{i2} - S_i) \cdot T_2 - (S_{i2} - S_{i1}) \cdot T_{cal} - (S_{i1} - S_i) \cdot T_1 +$$

$$+ (S_i - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21}. \quad (A.29)$$

Da die Faktoren $(S_{i2} - S_i)$, $(S_{i2} - S_{i1})$ und $(S_{i1} - S_i)$ kleine Werte ergeben, kann für U_{21i} näherungsweise geschrieben werden:

$$U_{21i} = D_{21i} + (S_i - S_{N21}^*) \cdot \Delta T_{21} + E_{21}. \quad (A.30)$$

A.4 Daten des Wärmeübergangsprüfstands WÜP

Die wesentlichen Komponenten des in Abb.(2-1) dargestellten Wärmeübergangsprüfstands sind:

- die elektromagnetische Pumpe Ppel mit einer maximalen Fördermenge von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von 44 m ,
- der Erhitzer E_1 mit einer Leistung von 120 kW ,
- der Erhitzer E_2 mit einer Leistung von 12 kW ,
- die induktiven Durchflußmesser F1, F2 und F3,
- der Natrium-Vorratsbehälter B1 mit einem Inhalt von 2 m^3 ,
- der Ausdehnungsbehälter B2 zur Kompensation der temperaturbedingten Volumenänderung des Natriums und zur Gewährleistung einer gasfreien Natriumströmung im gesamten Kreislaufsystem,
- der im Bypass betriebene Hilfskreislauf zur Natriumreinigung (die Temperatur des Natriums in der Kaltfalle KF1 beträgt $120 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einem maximalen Bypass-Volumenstrom von $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$),
- das Inertgassystem, das mit Argon arbeitet,
- der Natrium/Luft-Wärmetauscher mit einer maximalen Kühlleistung von 325 kW bei einer Eintrittstemperatur des Natriums von $320 \text{ }^\circ\text{C}$.

A.5 Stoffdaten für Wasser und Natrium und Seebeckkoeffizienten

In Tabelle (A-1) ist eine Übersicht über die Stoffdaten von Wasser aus Hall et al. (1980) bei einer Temperatur von $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und von flüssigem Natrium aus Golden und Tokar (1967) bei einer Temperatur von $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegeben. Zusätzlich sind die Seebeckkoeffizienten von Natrium, Alumel, Chromel und Edelstahl (1.4550) aufgeführt.

physikalische Größe	Einheit	Wasser $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	Natrium $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dichte ρ	kg/m^3	997.048	879.981
dynamische Viskosität μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot 10^{-6}$	890.8	344.6
kinematische Viskosität ν	$\text{m}^2/\text{s}\cdot 10^{-6}$	0.8904	0.3916
spez. Wärmekapazität c_p	$\text{kJ}/\text{kg}/\text{K}$	4.1796	1.30449
molek. Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W}/\text{m}/\text{K}$	0.609	76.58
molek. Diffusivität Γ	$\text{m}^2/\text{s}\cdot 10^{-6}$	0.146	66.712
Volumenexpansionskoeffizient α	$1/\text{K}\cdot 10^{-4}$	2.569	2.69
molek. Prandtl-Zahl Pr	1	6.13	0.00587
Seebeckkoeffizient Natrium S_{Na}	$\mu\text{V}/\text{K}$	-11.2	-11.2
Seebeckkoeffizient Alumel S_{A}	$\mu\text{V}/\text{K}$	-13.42	-7.34
Seebeckkoeffizient Chromel S_{C}	$\mu\text{V}/\text{K}$	27.08	34.13
Seebeckkoeffizient Stahl S_{S}	$\mu\text{V}/\text{K}$	18.02	11.69

Tabelle (A-1) Stoffdaten von Wasser und Natrium und Seebeckkoeffizienten.