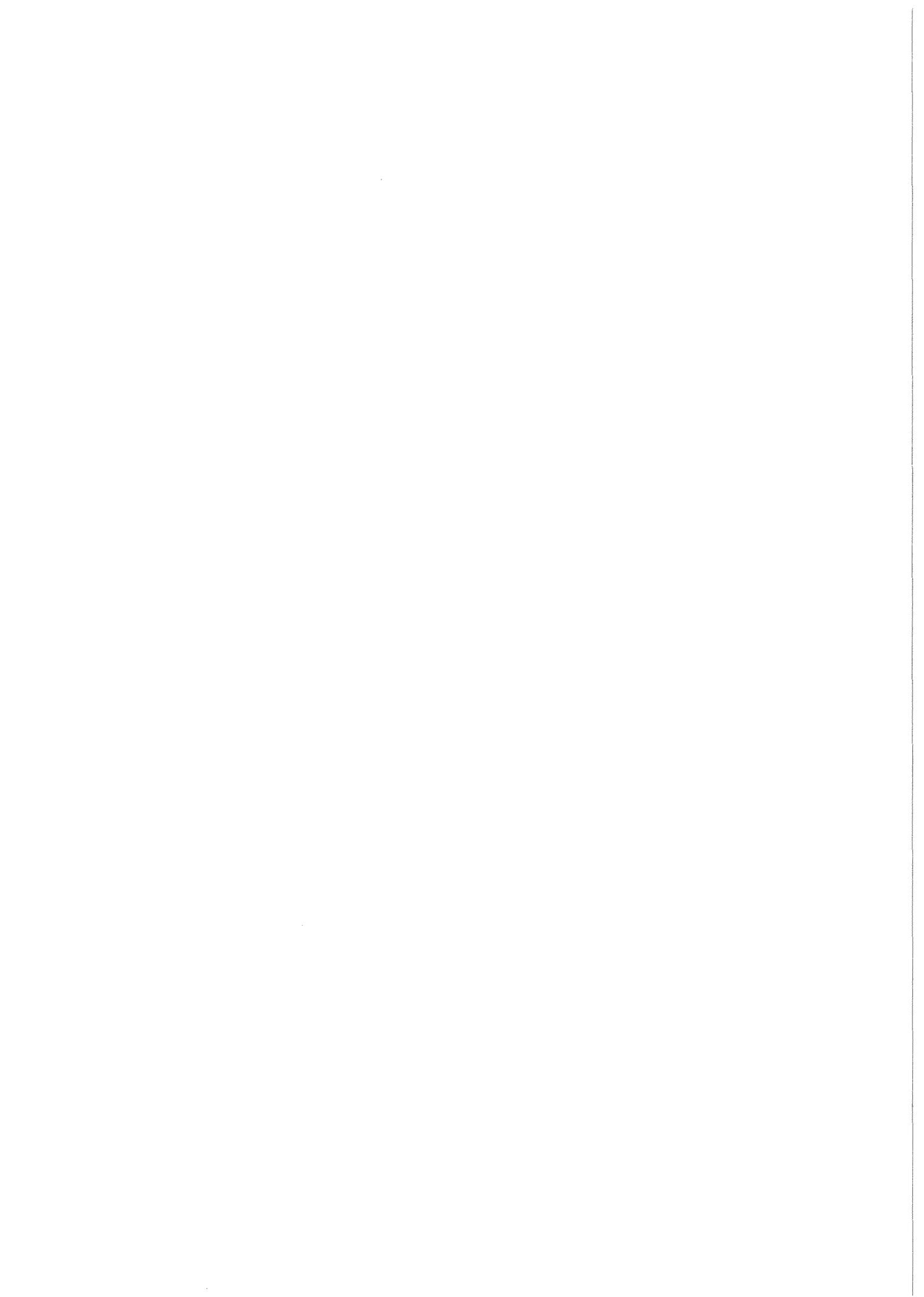


KfK 4369
März 1988

Verfahren zur Messung örtlicher Geschwindigkeiten nach dem Prinzip der Temperatur-Puls-Propagations- Methode

**V. Casal, G. Arnold, W. Hame,
R. Kirchner, H. Kußmaul, H. Miller**
Institut für Reaktorbauelemente

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente

KfK 4369

**Verfahren zur Messung örtlicher Geschwindigkeiten nach dem
Prinzip der Temperatur-Puls-Propagations-Methode**

V. Casal, G. Arnold, W. Hame*, R. Kirchner, H. Kußmaul, H. Miller

*Ingenieurbüro W. Hame, Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In dem Bericht wird eine Methode zur Messung örtlicher Geschwindigkeiten vorgestellt. Sie beruht auf der Messung der zeitlichen Ausbreitung von Temperaturpulsen, welche im Fluid erzeugt werden. Die Methode läßt sich auch einsetzen in langsam strömendem Flüssigmetall mit überlagertem Magnetfeld, bei dem sonst gebräuchliche Meßmethoden versagen.

Das diskutierte Meßsystem besteht aus einem Meßkopf, einem Heizsystem, aus Verstärkern und einem Rechner, der die Prozeßsteuerung durchführt, Meßwerte aufnimmt und daraus Geschwindigkeiten ermittelt. Der Meßkopf enthält eine miniaturisierte Heizung (Pulsgeber), die vom Heizsystem pulsartig beheizt wird, und eine Anzahl von Thermoelementen (Sensoren), die in definierten Abständen vom Pulsgeber zur Detektion der Signale der künstlich erzeugten Temperaturpulse angeordnet sind.

Es wird berichtet über die Auslegung, den Bau und die Erprobung einer entwickelten Meßanordnung.

Measuring Probe for Measurement of Local Velocities

Abstract

The report describes a method for measurement of local velocities. It bases on the detection of the propagation of a temperature pulse induced into the fluid. The method can also be applied in flowing liquid metals with superimposed magnetic field; in this case common measuring principles fail application.

The measuring system discussed consists of, a measuring head, a heating system, amplifiers and a PC. The latter performs process operation, data sampling, and evaluation of velocity. The measuring head itself includes a miniaturized heater (as a pulse marker) heated by the heating system in a short pulse, and a number of thermocouples (sensors) for detection of signals.

The design, construction, and examination of a developed measuring device is described.

Inhalt	Seite
Nomenklatur	.4
1. Einleitung	5
2. Rechnerische Grundlagen	7
3. Anforderungen an das Meßsystem	13
4. Verwirklichung des Meßsystems	14
4.1 Meßkopf	14
4.2 Heizsystem	15
4.3 Verstärker	16
4.4 Prozeßsteuerung und Datenverarbeitung	18
4.5 Versuchsauswertung	18
4.5.1 Datenaufbereitung	18
4.5.2 Auswertung der aufbereiteten Daten	19
4.5.2.1 Bestimmung des Maximums	19
4.5.2.2 Anpassung der analytischen Funktion	20
4.5.2.3 Kreuzkorrelation	21
4.5.3 Simulation von Meßsignalen	22
5. Erprobung des Meßsystems	23
5.1 Messung im Kupferblock	23
5.2 Messung in Quecksilber	26
5.3 Messung in Natrium	28
5.3.1 Messung in ruhendem Natrium	28
5.3.2 Messung in strömendem Natrium	31
6. Bewertung	35
Literatur	36

Nomenklatur

A		Zusammengefaßt Konstante der Gln. (1-3) in Gl. (6)
a	[m ² /s]	Temperaturleitzahl
c	[J/kgK]	spezifische Wärme
E	J	Pulsenergie
F	[m ²]	Fläche
K		Konstante
l	[m]	Länge (Pulsgeber)
n	-	Zahl
Q ₁ -Q ₄		Koeffizienten in Gl. (14)
R		Produkt der Kreuzkorrelation in Gl. (15)
r	[m]	Zeitabhängiger Abstand
r _n	[m]	Abstand Pulsgeber - Sensor n
S(t)		Meßsignal
T	[s]	Zeitwert
t	[s]	Zeit
t _L	[s]	Laufzeit des Temperaturmaximums
t _{Lo}	[s]	= t _L bei u = 0
t _{LM}	[s]	gemessene Laufzeit des Temperaturmaximums
Δt _{LM}	[s]	gemessene Laufzeitdifferenz zwischen zwei Sensoren
Δt _{Kreuz}	[s]	Laufzeitdifferenz zwischen zwei Sensoren, ermittelt mit der Kreuzkorrelation
Δt _{Max}	[s]	Laufzeitdifferenz zwischen zwei Sensoren ermittelt aus dem Signalmaximum
Δt _{soll}	[s]	Laufzeitdifferenz zwischen zwei Sensoren
u	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
u(t)		Variable
v(t)		Variable
α	[-]	Winkel
θ	[K]	Temperatur
λ	[W/mK]	Wärmeleitzahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
τ	[s]	Totzeit

1. Einleitung

Grundbedingung zur Entwicklung von Blankets für Fusionsreaktoren mit Flüssigmetallkühlung ist die Beherrschung des magneto-hydrodynamischen (MHD) Verhaltens der Strömung. Eine nicht optimierte Auslegung führt leicht zu unzulässigen MHD-Druckverlusten. Deshalb wurde im Institut für Reaktorbauelemente des KfK ein Forschungsprogramm zur Bereitstellung von Auslegungsdaten für ein Blanketkonzept begonnen. In der Testanlage MEKKA sollen an konzeptspezifischen Konfigurationen Druckverteilungen und Geschwindigkeitsprofile der Flüssigmetallströmung unter dem Einfluß von Magnetfeldern gemessen werden. Sie sind notwendig zur Interpretation der physikalischen Vorgänge und ihrer mathematischen Modellierung.

Im IRB wurde ein Geschwindigkeitsmeßsystem entwickelt, welches unter den genannten Bedingungen die Messung örtlicher Geschwindigkeiten im Flüssigmetall ermöglicht. Es beruht auf der Temperatur-Puls-Laufzeit-Methode (TPL-Methode). Es verwendet die Laufzeitmessung künstlich erzeugter Temperaturstörungen als Meßgröße. Laufzeitmessungen an zufällig vorhandenen Temperaturmustern werden in vielen Bereichen angewendet. Durch eine Rauschanalyse wird die Laufzeit ermittelt, welche ein Maß für die örtliche Strömungsgeschwindigkeit ist. Ist jedoch eine Flüssigmetallströmung einem starken Magnetfeld ausgesetzt, so wird die natürliche Turbulenz der Strömung stark gedämpft. Mitgeschleppte, zufällig entstandene Temperaturvariationen werden wegen der hohen Temperaturleitfähigkeit von Flüssigmetall geglättet. Um in diesem Falle erkennbare Temperaturmuster zu erhalten, werden von dem von uns entwickelten Meßsystem am Ort der Messung Temperaturpulse ins Fluid gesetzt, deren Ausbreitung durch Thermolemente gemessen.

Das diskutierte Meßsystem besteht aus einem Meßkopf, aus einer Energiequelle mit Schalter, aus Verstärkern und einem Rechner, der die Prozeßsteuerung durchführt, Meßwerte aufnimmt und daraus Geschwindigkeiten ermittelt. Der Meßkopf enthält eine miniaturisierte Heizung (Pulsgeber), die vom Heizsystem pulsartig beheizt wird, und eine Anzahl von Thermolementen (Sensoren), die in definierten Abständen vom Pulsgeber angeordnet sind, zur Detektion der Laufzeit der künstlich erzeugten Temperaturpulse.

Die Gestaltung des Meßkopfes hängt von den Anforderungen ab. Soll das Strömungsprofil der Kernströmung gemessen werden, wird ein miniaturisierter beweglicher Meßkopf verwendet mit linienförmigem Pulsgeber. Ist dagegen die Strömung der wandnahen Schichten zu untersuchen, sollte der Pulsgeber direkt in die Kanalwand eingebaut werden, die Sensoren selbst stromabwärts ebenfalls in die Wand oder in die Grenzschicht.

2. Rechnerische Grundlagen

In einem ruhenden Fluid wird die radiale Ausbreitung einer längs einer Geraden erzeugten Wärmexplosion durch Gl. (1) beschrieben [1]:

$$(1) \quad \theta(r,t) = \frac{E}{4\pi\lambda l t} \exp - \frac{r^2}{4at}$$

Bei punktförmiger Wärmequelle gilt Gl. (2)

$$(2) \quad \theta(r,t) = \frac{E}{(4\pi a t)^{3/2} \rho c} \exp - \frac{r^2}{4at}$$

bei einer Ebene als Wärmequelle Gl. (3)

$$(3) \quad \theta(r,t) = \frac{E}{(4\pi a t)^{1/2} F \rho c} \exp - \frac{r^2}{4at}$$

Für $r = 0$ (Ort der Wärmexplosion) ist die Temperaturerhöhung θ zum Zeitpunkt $t = 0$ unendlich; sie flacht mit $(1/t)^n$ ab. Das Maximum der Temperaturstörung liegt für alle t bei $r = 0$. Betrachtet man einen Ort im festen Abstand $r = r_n$ vom Ort der Wärmexplosion, so herrscht hier zu den Zeiten $t = 0$ und $t = \infty$ die Temperaturerhöhung $\theta = 0$; dazwischen gibt es ein Maximum. Den Zeitverzug t_{Lo} bis zum Auftreten dieses Maximums erhält man durch Differenzieren der Gleichungen (1-3) nach der Zeit und zu Null setzen der Ableitung (Gl. (4)).

$$(4) \quad t_{Lo} = \frac{r_n^2}{K \cdot a}$$

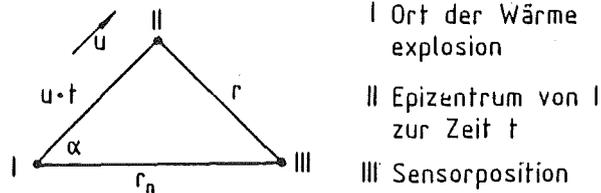
- Quelle längs einer Strecke: $K = 4$
- punktförmige Quelle: $K = 6$
- Flächenquelle: $K = 2$

Die Höhe des im Abstand r_n auftretenden Maximums erhält man durch Einsetzen der Gleichung (4) in die entsprechenden Gleichungen (1-3).

Bewegt sich das Fluid mit gleichbleibender Geschwindigkeit ohne Turbulenz und wird die Wärme explosionsartig im Fluid freigesetzt, so lassen sich auch die Gleichungen (1-3) verwenden. Die Größe r ist dann allerdings nicht mehr wie im

ruhenden System eine feste Größe, nämlich der Abstand r_n Pulsgeber - Sensor, sondern r ist dann eine Funktion der Zeit, der Fluidgeschwindigkeit u und der Bewegungsrichtung α . Diese Funktion wird durch den Cosinussatz beschrieben (Gl. 5).

$$(5) \quad r^2 = r_n^2 + u^2 t^2 - 2r_n u t \cos \alpha$$



Die Wärmeexplosion ereignet sich zur Zeit $t = 0$ in I. Ihr Epizentrum strömt in der Zeit t mit dem Fluid die Strecke $u \cdot t$ nach II; entsprechend ändert sich der Abstand des Epizentrums zu einem in III angeordneten Sensor von r_n zum Zeitpunkt $t = 0$ auf r zum Zeitpunkt t . Die zeitliche Änderung von r beschreibt Gleichung (5).

Setzt man Gl. (5) in die Gleichungen (1-3) ein, so nehmen diese folgende Form an:

$$(6) \quad \theta = \exp \frac{r_n u \cos \alpha}{2a} \cdot \frac{A}{t^n} \cdot \exp - \left(\frac{r_n^2}{4at} + \frac{u^2 t}{4a} \right)$$

Zur Bestimmung des Zeitverzuges bis zum Auftreten eines Temperaturmaximums im Abstand r_n vom Ort der Wärmeexplosion muß Gl. (6) nach der Zeit differenziert und zu Null gesetzt werden. Gl. (6) enthält 3 Faktoren, von denen nur zwei die Zeit t enthalten; sie läßt sich umschreiben zu:

$$(6a) \quad \theta = K u(t) v(t)$$

Nur der Faktor K in Gln. (6a) enthält die Bewegungsrichtung α . Folglich ist der Zeitverzug bis zum Auftreten eines Temperaturmaximums im Abstand r_n bei strömendem Fluid unabhängig von der Bewegungsrichtung α .

Nach Ausführen der mathematischen Operation erhält man als Zeitverzug (Laufzeit t_L).

$$(7) \quad t_L = - \frac{K \cdot a}{u^2} + \sqrt{\left(\left(\frac{K \cdot a}{u^2} \right)^2 + \frac{r_n^2}{u^2} \right)}$$

- Quelle längs einer Strecke: $K = 2$
- Punktförmige Quelle: $K = 3$
- Flächenquelle: $K = 1$.

Die Stoffeigenschaften des Fluids (a) der Sensorabstand r_n und die Strömungsgeschwindigkeit u bestimmen den Zeitverzug t_L ; jedoch weder die Bewegungsrichtung noch die zugeführte Größe des Energiepulses. Die Höhe des Temperaturmaximums im Abstand r_n erhält man durch Einsetzen von Gl. (7) in die Gln. (1-3). Man erkennt, die Signalhöhe hängt im Gegensatz zur Verzugszeit von der Bewegungsrichtung α ab.

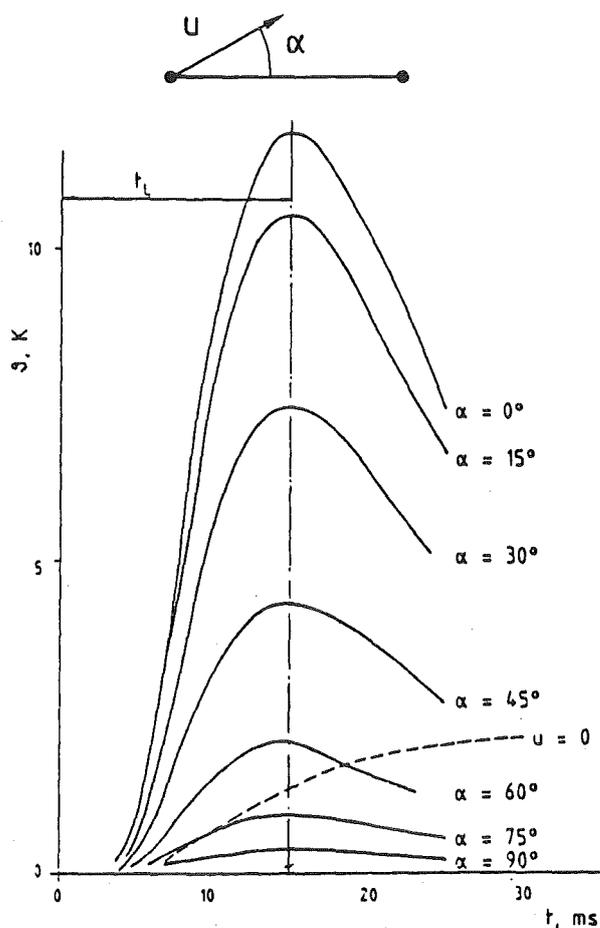


Abb. 1: Zeitliches Temperaturprofil in 2 mm Abstand von der Quelle in NaK; $u = 0,1$ bzw. $0,0$ m/sec.

Dieses Ergebnis ist in Abb. 1 für das Fluid NaK dargestellt. Sie zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur in einem Abstand von $r_n = 2$ mm vom Ort der Wärmeexplosion bei linienförmiger Wärmequelle. Die durchgezogenen Kurven gelten für eine Fluidgeschwindigkeit von $u = 0,1$ m/sec. Die Bewegungsrichtung α ist Parameter. Zum Vergleich ist gestrichelt die Kurve für ruhendes Fluid ($u = 0$) eingetragen.

Durch Umformen von Gl. (7) läßt sich aus dem gemessenen Zeitverzug t_L die Fluidgeschwindigkeit u bestimmen.

Es gilt:

$$(8) \quad u = \sqrt{\left(\frac{r_n^2}{t_L^2} - \frac{K \cdot a}{t_L} \right)}$$

- Quelle längs einer Strecke: $K = 4$
- Punktförmige Quelle: $K = 6$
- Flächenquelle: $K = 2$

In obiger Gleichung beschreibt der erste Term unter der Wurzel das Quadrat der Gesamtgeschwindigkeit, der zweite den Beitrag der Konduktionsgeschwindigkeit. Die s.g. Konduktionsgeschwindigkeit ($u_K = r_n/t_{L,0}$) wird nach Gl. (4) für das ruhende System beschrieben durch:

$$(9) \quad u_K = \frac{K \cdot a}{r_n}$$

Mit wachsendem Abstand r_n geht u_K gegen Null. Entsprechend geht dann mit wachsendem Abstand die Gl. (8) über in die Form:

$$(10) \quad u = r_n/t_L.$$

In diesem Falle erfolgt der Transport des Temperaturpulses nur noch durch Konvektion. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2 dargestellt. Sie zeigt für eine Wärmequelle längs einer Strecke die Laufzeitdifferenzen zwischen zwei Sensoren (angeordnet in unterschiedlichen Abständen vom Pulsgeber) in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit u . Die durchgezogenen Kurven gelten für Sensoren im Abstand $r_1/r_2 = 2/4$ mm, die gestrichelte Kurve für $r_1/r_2 = 8/10$ mm. Fluide sind Parameter. In der doppellogarithmischen Darstellung ist Gl. (10) die rechte Gerade. Damit läßt sich aus Abb. 2 der Bereich abschätzen, für den die Konduktionsgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann. Durch die Wahl geeigneter Abstände läßt sich das System für ein bestimmtes Fluid und einen geforderten Geschwindigkeitsbereich empfindlich machen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß mit wachsendem Abstand r_n die Höhe des Maximums abnimmt.

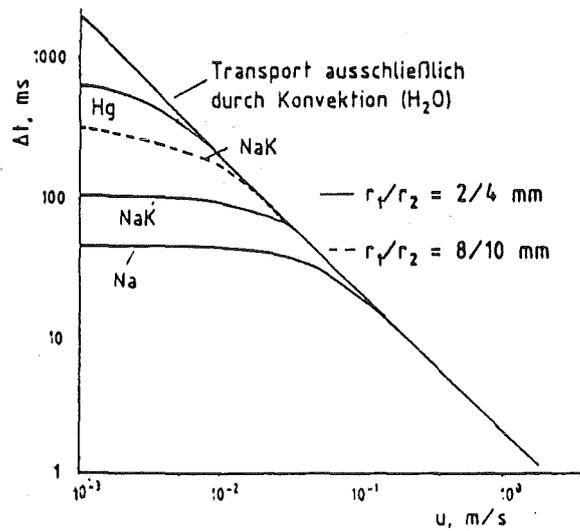


Abb. 2: Laufzeitdifferenz des Temperaturmaximums zwischen 2 Sensoren als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit.

Die Messung von Laufzeitdifferenzen zwischen Sensoren in verschiedenen Abständen empfiehlt sich zur Reduzierung von Totzeiteinflüssen des Pulsgebers; dies wird im folgenden noch näher diskutiert.

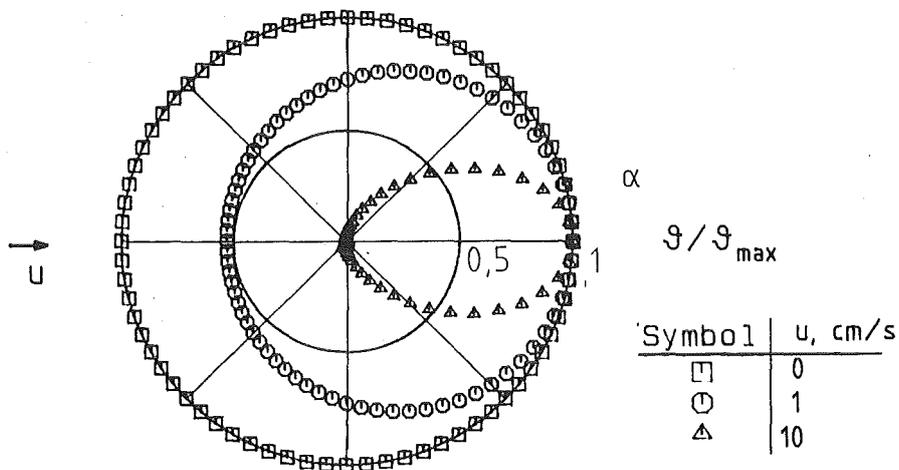


Abb. 3: Höhe des Temperaturmaximums in Na als Funktion der Strömungsrichtung α .

Abb. 3 zeigt in Polarkoordinaten die Höhe des Maximums in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung α bei linienförmiger Wärmequelle in Na. Die Strömungsgeschwindigkeit u ist Parameter, gültig für einen Sensor im Abstand $r_n = 4$ mm. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit orientiert sich die ursprünglich richtungsunabhängige Signalhöhe immer stärker an der Strömungsrichtung ($\alpha = 0$). Je größer die Fluidgeschwindigkeit, um so besser

müssen Sensoren in Strömungsrichtung angeordnet sein, um noch eine genügende Signalthöhe vorzufinden.

Bei der Umsetzung des Diskutierten in eine Meßanordnung müssen von den theoretischen Annahmen Abstriche gemacht werden. So läßt sich eine Wärmeexplosion in definierter Form, z.B. längs einer Strecke, in Flüssigmetall nicht realisieren. Als Pulsgeber verwenden wir z.B. Miniaturheizleiter von 0,5 - 0,6 mm Durchmesser. Diese lassen sich mit einem geeigneten Heizsystem zwar nahezu explosionsartig beheizen, aber der Transport der Wärme vom Stromleiter im Innern des Heizleiters zu dessen Oberfläche benötigt Zeit. Die Wärmeabgabe an das Fluid wird deshalb verzögert und zeitlich verschmiert erfolgen. Der Einfluß eines reinen Zeitverzuges (verspätete explosionsartige Energiefreigabe) läßt sich durch Einführen einer fiktiven Totzeit τ gut theoretisch beschreiben. Die meßbare Laufzeit t_{LM} bis zur Detektion eines Maximums im Abstand r_n wäre dann um τ größer als die theoretische.

$$(11) \quad t_{LM} = t_L + \tau.$$

Ein Verschmieren der Wärmeabgabe läßt sich dagegen mit den diskutierten analytischen Gleichungen nicht beschreiben; abweichende Versuchsergebnisse könnten die Folge sein. Eine übliche Methode zur Reduzierung der Wirkung von verzögerter und verschmierter Wärmeabgabe ist die Differenzmessung an Sensoren in verschiedenen Abständen ($r_1; r_2$). Nach Einführen der Totzeit und gleichzeitiger Laufzeitmessung in den Abständen $r_1; r_2$ läßt sich die Gl (7) modifizieren zu:

$$(12) \quad u = \frac{1}{\Delta t_{LM}} \sqrt{\left(r_2^2 - 2\sqrt{\left(r_1^2 \cdot r_2^2 + (K \cdot a \cdot \Delta t_{LM})^2 \right) + r_1^2} \right)}$$

- Quelle längs einer Strecke: $K = 4$
- Punktförmige Quelle: $K = 6$
- Flächenquelle: $K = 2$.

Bei Behandlung des Zeitverzuges durch eine fiktive Totzeit τ läßt sich bei Differenzmessung τ eliminieren. Für nicht leitende Fluide ($a = 0$) geht Gl. (12) über in

$$(12a) \quad u = \Delta r / \Delta t_{LM}$$

3. Anforderungen an ein Meßsystem

Aus dem bisher diskutierten und aus zusätzlich leicht einsehbaren Anforderungen muß ein Meßsystem folgende Bedingungen erfüllen:

- Das Heizsystem muß eine nahezu explosionsartige Beheizung des Pulsgebers erlauben, damit die analytischen Gleichungen anwendbar sind.
- Der Pulsgeber muß die Energie mit geringer Verzögerung an das Fluid übertragen.
- Die übertragbare Energiemenge muß hoch sein, damit gut meßbare Signale erzeugt werden; jedoch darf am Pulsgeber kein Oberflächensieden auftreten.
- Der Pulsgeber muß kleine Abmessungen haben, um das zu messende Strömungsfeld nicht zu stören.
- Sensoren müssen geringe Abmessungen und kurze Ansprechzeiten haben.
- Verstärker müssen die Meßsignale einerseits mit hoher Verstärkung und geringer Verzögerung, andererseits mit geringem Rauschanteil an eine Datenverarbeitungsanlage übertragen. Denn nur wenn verzögerungs- und störungsarm große Signalverstärkung erreicht wird, läßt sich das Meßsystem verwirklichen; eine Miniaturisierung des Pulsgebers beschränkt die übertragbare Energiemenge.
- Die aufgezeichneten Signale müssen vom Rauschen getrennt werden.

4. Verwirklichung des Meßsystems

Im folgenden werden die Komponenten des Meßsystems diskutiert; es besteht aus dem Meßkopf mit Pulsgeber und Sensoren, dem Heizsystem, den Verstärkern zur Signalverstärkung und einem Rechner zur Steuerung des Heizsystems, zur Aufzeichnung der Meßwerte und zu ihrer Aufarbeitung, Auswertung und Darstellung. Abb. 4 zeigt den schematischen Aufbau.

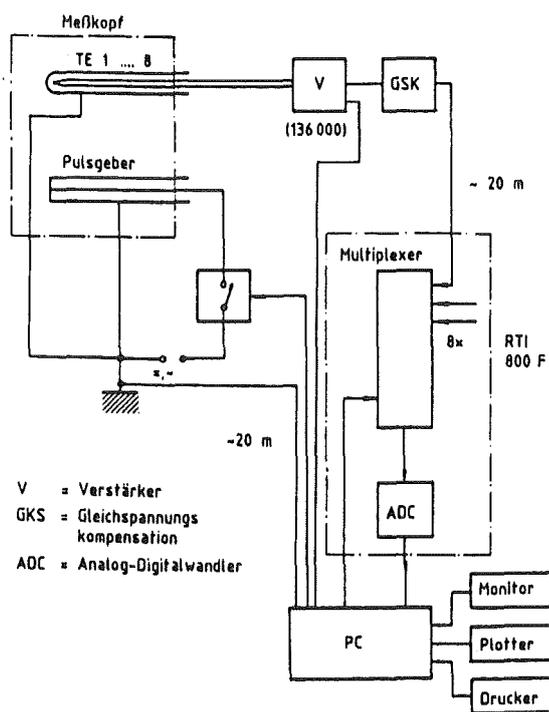


Abb. 4: Meßanordnung

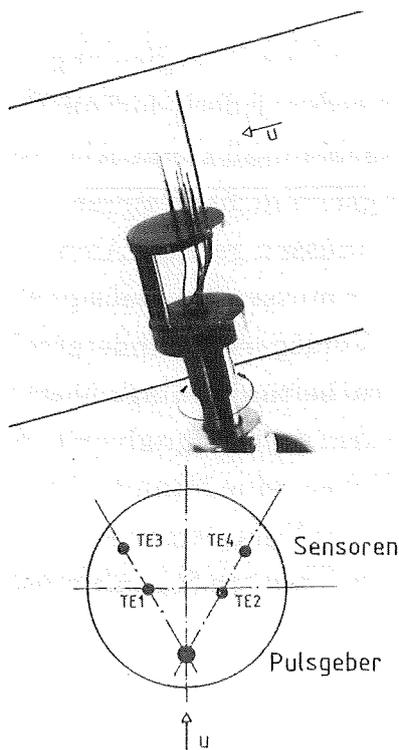


Abb. 5: Meßkopf

4.1 Meßkopf

Die Gestaltung des Meßkopfes hängt von der geplanten Einsatzart ab. Zur Ausmessung von Geschwindigkeitsprofilen in großen Kanalabmessungen, außerhalb der Wandgrenzschicht, verwenden wir den in Abb. 5 dargestellten Meßkopf. Er läßt sich im Strömungskanal bewegen. Das Fluid strömt senkrecht zur Achse des Pulsgebers in Richtung auf die Sensoren. Pulsgeber ist ein Miniaturheizer von 0,5-0,6 mm Außendurchmesser. Er besitzt eine Edelmantelhülle und MgO bzw., BN-Isolation. Er läßt sich mit einer Energie von 30 bzw. mit 120 J/m pulsen. Die Wärme wird längs einer Strecke erzeugt. Die Totzeiten solcher Heizer liegen bei 40 msec. Als Sensoren werden stahlummantelte isolierte Thermoelemente (TEs)

von 0,25 mm Durchmesser mit BN-Isolation verwendet. Ihre Ansprechzeit in Flüssigmetall beträgt ca. 2 msec. Im vorliegenden Falle sind 4 solcher TEs auf einer Seite des Pulsgebers auf Radien im Abstand von 3 und 5 mm angeordnet. Jeweils zwei Thermoelemente bilden mit dem Pulsgeber eine Gerade, so daß bei entsprechender Ausrichtung jeweils zwei Sensoren die größtmögliche Signalthöhe erfassen. Diese Konfiguration eignet sich zur Messung kleiner Geschwindigkeiten; sollen größere Geschwindigkeiten gemessen werden, so wird man größere Abstände der Sensoren wählen.

Soll die Geschwindigkeit in der Grenzschicht gemessen werden, läßt sich obiger Meßkopf wegen zu großer Abmessungen nicht verwenden. Flüssigmetallströmungen in dünnwandigen Rohren unter Wirkung eines starken Magnetfeldes weisen aber gerade in der Grenzschicht hohe Geschwindigkeiten auf - um Faktoren höher als in der Kernströmung. Zusätzlich ist die rechnerische Bestimmung dieser Geschwindigkeiten nur schwer möglich. Zur Messung fehlen bisher geeignete Meßverfahren. Andererseits ist der Durchsatz im Grenzschichtbereich so hoch, daß er entscheidend zur Kühlung von Kanalwänden eines Blankets beitragen kann. Geschwindigkeitsmessung in der Grenzschicht ist deshalb besonders wichtig. Für diese Anwendung sehen wir vor, die Grenzschicht der Flüssigmetallströmung durch fest installierte Pulsgeber zu markieren und deren Signale durch fest installierte Sensoren zu detektieren. Dieser Fall läßt sich allerdings nicht einfach analytisch berechnen, wie in Kapt. 2 geschehen, da in der Grenzschicht sehr große Geschwindigkeitsgradienten auftreten und das Problem daher dreidimensional zu behandeln ist. Zur Auslegung des Meßkopfes müssen in diesem Falle spezielle numerische Temperaturfeldrechnungen durchgeführt werden.

4.2 Heizsystem

Das Heizsystem besteht aus in Reihe geschalteten 12 V-Autobatterien (max. 8). Zur Steuerung eines Gleichstromheizpulses dient ein programmierbarer Frequenzgenerator, welcher einen Halbleiterschalter für ein wählbares Zeitintervall öffnet. Das Heizsystem wird von einem Rechner gestartet. Bei überlagertem Magnetfeld von 2 Tesla würde sich ein frei stehender Pulsgeber verbiegen. Um dies zu vermeiden, ist eine Auflösung des Gleichstrompulses in einen hochfrequenten Wechselstrompuls von 10 kHz vorgesehen; bei einer Pulsdauer von 1 ms wird dann mit 10 Zyklen beheizt.

4.3 Verstärker

Durch die Vorgabe, Meßsignale im μV -Bereich zu erfassen, kam nur ein begrenztes Angebot an Operationsverstärkern zur Auswahl. Die im IRB entwickelte Verstärkereinheit besteht aus Vorverstärker, Hauptverstärker, Integrierer, Endverstärker. Bei den umfangreichen Tests hat sich die in Abb. 6 dargestellte Verstärkeranordnung bewährt. Sie verwendet als Eingangsverstärker hochgenaue Differenzverstärker der Firma Burr Braun.

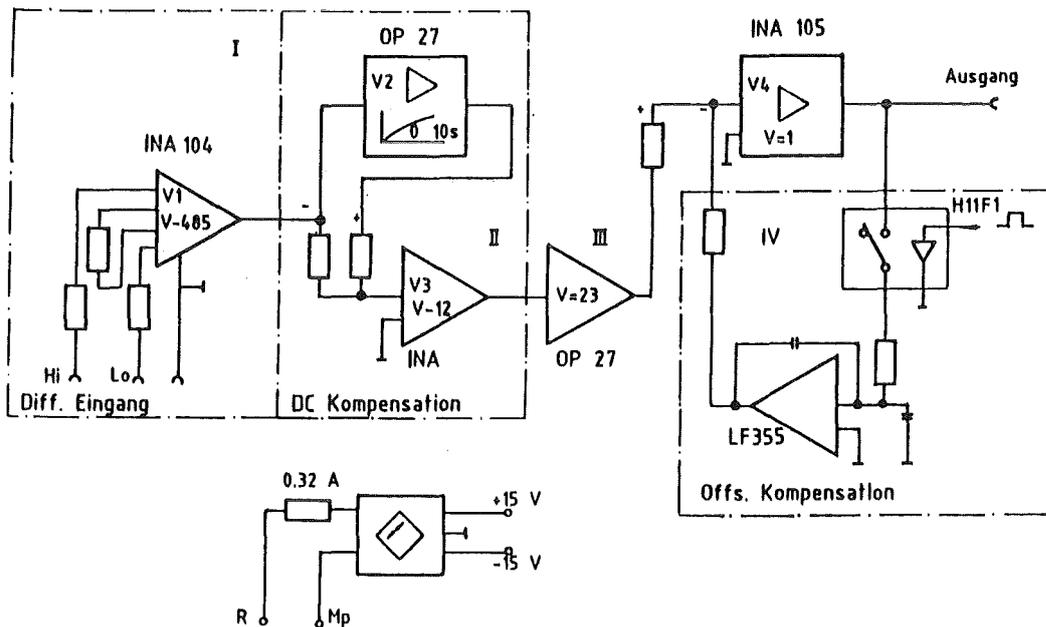


Abb. 6: Verstärker

Vorverstärker Nr. I ist als Differenzverstärker ($V = 485$) aufgebaut und hat die Aufgabe, die Eingangstemperaturpulse potentialfrei mit ca. 500facher Verstärkung an die nachfolgende Verstärkerkette (II) weiterzuleiten. Diese Verstärkerkette besteht aus einem schnellen Summierverstärker (V3) und einem in Differenzschaltung angeordneten Integrierer (V2) mit umschaltbarer Zeitkonstante ($1/10 \text{ sec}$). Dadurch werden die schnellen Temperatursignale verstärkt und der konstante Temperaturmittelwert eliminiert. Stufe II und Stufe III (Zwischenverstärker) haben insgesamt einen Verstärkungsfaktor von 280. Verstärker V4 ist mit einer automatischen Offset-Kompensation versehen (IV). Sie subtrahiert den über ca. 5 msec. integrierten Offset am Ausgang von Verstärker V4 von dessen Eingangssignal. Diese Kompensation wird zu Beginn der Messung vom Rechner mit geeigneter Zeitschaltung unterbrochen; die letzte Offset-Kompensation vor der Messung wird nun als konstanter Wert vom Nutzsignal bis zum Ende der Messung subtrahiert.

Es wurden zwei verschiedene Verstärker mit unterschiedlichem dynamischen Verhalten ausgelegt. Eine langsame Version besitzt eine Grenzfrequenz (FG) von 11 Hz; dabei ist die Verstärkung um 3 dB gedämpft ($1/\sqrt{2}$). Eine schnelle Version hat ihre FG bei 35 Hz. Zur Unterdrückung von 50 Hz-Störungen wird die schnelle Version mit einer 50 Hz Bandsperre mit 14 dB ausgerüstet. Die Charakteristik beider Verstärkertypen ist in Abb. 7, die des Bandsperrefilters in Abb. 8 dargestellt. Beide Verstärker sind zur Übertragung der Ausgangssignale mit Leitungstreibern (100 mA) ausgestattet.

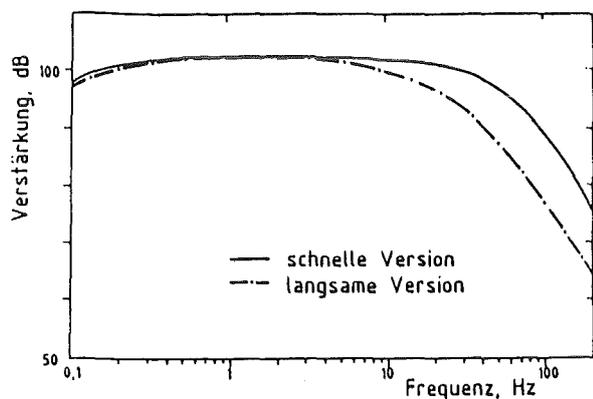


Abb. 7: Verstärkerkennfeld

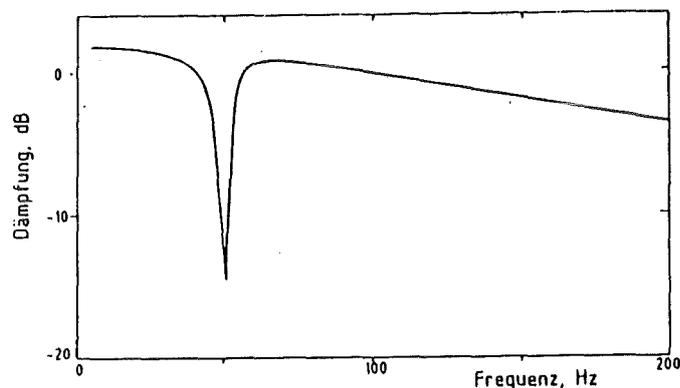


Abb. 8: Filterkennfeld

Der gesamte Verstärkungsfaktor der Verstärkungseinheit beträgt $V = 1,3 \cdot 10^5$. Jede Verstärkereinheit ist mit einer eigenen stabilisierten Spannungsversorgung (± 15 V) ausgerüstet (V), um dynamische Störeinflüsse auszuschließen. Mit der beschriebenen Verstärkereinheit sind Temperaturwellen von $0,1 \text{ K} = 4 \mu\text{V}$ ohne störendes Rauschen der Verstärkereinheit sicher zu detektieren. Bei der hier beschriebenen Auslegung darf das Meßsignal am Eingang des Verstärkers maximal $73 \mu\text{V} = 1,8 \text{ K}$ nicht übersteigen. Das Gesamttrauschen der Verstärkereinheit mit angeschlossenem Meßfühler beträgt $< 0,02 \text{ K}$. Abb. 9 zeigt dieses.

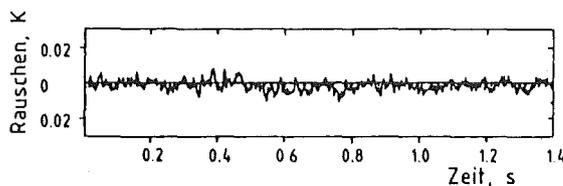


Abb. 9: Verstärkerrauschen

4.4 Prozeßsteuerung und Datenverarbeitung

Das Meßsystem erfordert als manuelle Einstellungen,

- die Spannungshöhe zur Beheizung des Pulsgebers,
- die Dauer der Heizzeit,
- die Rückstellzeit des Verstärkers,
- die Position des Meßkopfes im Strömungskanal.

Die übrigen Steuergrößen werden in einem Rechner (IBM-PC-AT2) festgelegt. Sie laufen über ein Datenerfassungssystem (Analog Device RTI 800-F); dieses kann bei Verwendung mehrere Kanäle (maximal 8) die Meßwerte (12 bit) in einer Taktzeit von $t > 42 \mu\text{sec}$ aufzeichnen. Die im Rechner festzulegenden Größen sind:

- Anzahl der Heizpulse
- Taktzeit der Heizpulse
- Kennzeichnung der abzufragenden Meßkanäle
- Abtastrate der Meßkanäle $> 42 \mu\text{sec}$
- Datenmenge je Meßkanal.

Zusätzlich fixiert der Rechner während der Messungen die Nullpunktskompensation der Verstärker. Nach Starten des Rechners läuft der Meßprozeß und die Datenaufnahme in der festgelegten Form ab. Im Rechner werden die Daten gespeichert; zusätzlich können die Meßdaten aufbereitet und ausgewertet werden. Beides kann nach entsprechender Vereinbarung entweder unmittelbar im Anschluß an die Meßwertaufzeichnung erfolgen, oder frühere Meßdaten können erneut ausgewertet werden, u. U. mit neuen Auswerteparametern.

4.5 Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung besteht aus einer Datenaufarbeitung und der Auswertung der aufbereiteten Daten.

4.5.1 Datenaufbereitung

Glättung der Meßdaten

Die Meßdaten $S(t)$ werden durch Aufsummieren der Meßwerte über einen wählbaren Bereich (T) geglättet. Dadurch läßt sich Rauschen unterdrücken. Wird der Glättungsbereich zu groß gewählt, so werden allerdings unsymmetrische Signale verfälscht. Die Glättung erfolgt nach Gl. (13).

$$(13) \quad S(t,T) = \frac{1}{T} \sum_{t-T/2}^{t+T/2} S(t) \Delta t$$

Korrektur der Daten

Die Sensoren (Thermoelemente) registrieren den Temperaturpuls aufgrund ihrer Trägheit mit Verzögerung (Ansprechzeit ca. 2 ms). Die nachgeschalteten Verstärker sind mit einer Nullpunktskompensation ausgestattet; nur schnelle Temperaturänderungen werden angezeigt, ein konstant anstehendes Signal wird eliminiert. Die Rückstellzeit der Verstärker ($U = U_0/e$) kann mit 1 oder 10 sec gewählt werden. Zusätzlich ist es möglich, daß zu steile Rampen vom Verstärker mit Verzögerung weitergegeben werden. Die aufgenommenen Meßkurven werden korrigiert, um die Trägheit der Thermoelemente und die Rückstellung der Verstärker auszugleichen. Zusätzlich ist durch eine Fourier-Analyse der Temperatursignale sicherzustellen, daß die Dynamik der Verstärker zur verzögerungsfreien Signalübertragung ausreicht.

4.5.2 Auswertung der aufbereiteten Daten

Die Datenauswertung ist bisher für Meßköpfe mit Wärmeexplosion längs einer Strecke eingerichtet. Das Auswerteprogramm liefert folgende Möglichkeiten:

4.5.2.1 Bestimmung des Maximums

Aus den aufgenommenen Temperatur-Zeit-Meßkurven wird das Maximum bestimmt; dazu müssen die Meßkurven hinreichend glatt sein. Methoden zur Glättung verrauschter Kurven sind einmal das Mitteln über möglichst viele Einzelkurven und zusätzlich das Glätten sowohl der Einzelkurven als auch der gemittelten Kurven nach Gl. (13). Aus der Messung in ruhendem Fluid läßt sich die Totzeit des Pulsgebers (τ) aus der Differenz von Meßwert und theoretischem Wert bestimmen. Solche Totzeitmessungen sind notwendig, um auszuschließen, daß nicht andere, nicht vom Pulsgeber verursachte Effekte, auftreten. Sie würden bei Auswertung an verschiedenen Sensoren zu unterschiedlichen Totzeiten führen. Bei Messung in strömendem Fluid läßt sich aus der gemessenen Laufzeit dann nach Gl. (12) die Strömungsgeschwindigkeit berechnen. Die Bestimmung des Maximums erfolgt durch numerisches Differenzieren der aufbereiteten Meßdaten. Dadurch wird vermieden, daß durch zufällig verbliebene Spitzen das Maximum verfälscht wird.

4.5.2.2 Anpassung der analytischen Funktion

Durch Anpassen der analytischen Funktion an Meßkurven nach dem Prinzip der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate läßt sich die Geschwindigkeit ermitteln (MFQ-Methode). Weil die analytische Gleichung (Gl. 6) nur für ein idealisiertes System gilt, wurde sie für ein System mit Wärmeerzeugung längs einer Geraden wie folgt modifiziert:

$$(14) \quad \theta = \frac{Q_1}{t^{Q_3}} \cdot \exp \left[\frac{Q_2}{t} + Q_4 \cdot t \right]$$

mit

$$Q_1 = \frac{E}{4\pi\lambda l} \cdot \exp \left[\frac{r_n u \cos\alpha}{2a} \right];$$

$$Q_2 = \frac{r_n^2}{4a}; \quad Q_3 = \text{Zahl};$$

$$Q_4 = \frac{u^2}{4a}; \quad t = t_M - \tau.$$

Gl.(14) geht in Gl. (6) über, wenn $Q_3 = 1$. Die verzögerte Wärmefreigabe des Pulsgebers wird bei $Q_3 = 1$ als spontane Freisetzung mit der Verzögerungszeit τ behandelt. Bei der Anpassung an Meßkurven lassen sich wahlweise alle Koeffizienten durch den Rechner optimieren oder einzelne können vorgegeben werden. So kann es sinnvoll sein, in einem Eichversuch ohne Geschwindigkeit $Q_4 = 0$ zu setzen und die übrigen Koeffizienten durch das Programm optimieren zu lassen. Bei nachfolgenden Versuchen mit Geschwindigkeit wird dann Q_2 , Q_3 und τ aus dem Eichversuch übernommen und nur Q_1 und Q_4 optimiert, weil nur diese beiden die Geschwindigkeit u enthalten. Aus den optimierten Werten von Q_1 und Q_4 läßt sich die gesuchte Strömungsgeschwindigkeit ermitteln. Der Bereich der Meßkurve, an welche Gl. (14) angepaßt werden soll, läßt sich durch wählbare Markierungen individuell festlegen. Die gravierendste Abweichung eines realisierbaren Systems von dem analytischen Ansatz ist die verschmierte Energieabgabe des Pulsgebers an das Fluid. Um trotzdem eine Anpassung der Gleichung zu ermöglichen, wurde Q_3 eingeführt; Q_1/t^{Q_3} beschreibt mit $Q_3 = 1$ das Abklingen der Wärmeexplosion längs einer Geraden am Ort ihrer Entstehung. Bei Freigabe von Q_3 zur Optimierung hat der Rechner die Möglichkeit, das Abklingen an die Meßkurve anzupassen.

4.5.2.3 Kreuzkorrelation

Zur Bestimmung der Laufzeitdifferenzen zwischen Signalen in verschiedenen Abständen vom Pulsgeber kann das Auswerteprogramm Kreuzkorrelationen zwischen beliebigen Sensoren nach Gl. 15 berechnen

$$(15) \quad R = \int S_1(t-T) \cdot S_2(t) dt$$

Die Zeitverschiebung T , bei denen R sein Maximum hat, ist ein Maß für die Laufzeitdifferenz. Vorteil der Kreuzkorrelationen ist ihre Unempfindlichkeit gegen verrauschte Signale. Durch das Integrieren eliminiert sich stochastisches Rauschen. Nachteil der Kreuzkorrelation ist, daß die Zeitverschiebung T zwischen zwei Sensoren nur ein Maß für die Laufzeitdifferenz zwischen 2 Sensoren darstellt.

Sind die an zwei Sensoren gemessenen Signale identisch oder geometrisch ähnlich (z.B. eine Sinushalbwelle, die Sensor 2 gegenüber Sensor 1 nur gedämpft wahrnimmt), so entspricht die Zeitverschiebung bei R_{\max} der Laufzeitdifferenz. Diesem Falle entsprechen etwa unsere Signale bei überlagerter Strömungsgeschwindigkeit. Bei ruhendem Fluid haben die Signale einen anderen Charakter. Signal 2 liegt in diesem Falle für alle Zeiten innerhalb von Signal 1.

Abb. 10 zeigt an analytisch erzeugten Signalen die bezogene Abweichung der Laufzeitdifferenz (T) der Kreuzkorrelation vom Sollwert (Δt_L) als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit in Natrium; Parameter sind die Sensorabstände. Man erkennt, die Kreuzkorrelation liefert zu geringe Laufzeitdifferenzen. Mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit des Natriums nähert sich die so ermittelte Laufzeitdifferenz an den Sollwert an. Je nach den Sensorabständen wird eine Fehlerschranke von 3 % erst ab 30 - 50 cm/sec Strömungsgeschwindigkeit unterschritten. Die Streuung der Werte ist durch aufsummierte Rechenungenauigkeiten des PC entstanden.

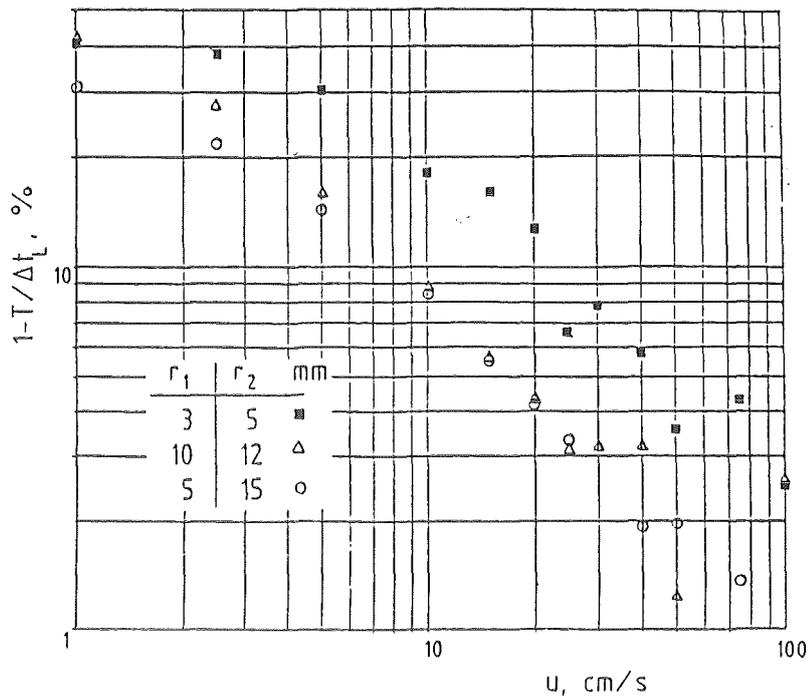


Abb. 10: Auswertung theoretischer Signale mittels Kreuzkorrelation; bezogene Abweichung der Laufzeitdifferenz vom Sollwert.

4.5.3 Simulation von Meßsignalen

Zur Erprobung der optimalen Auswertemethoden ist es hilfreich, vom Rechner Meßsignale simulieren zu lassen. Der Rechner liefert solche Signale nach Gl. 14, nachdem die Koeffizienten $Q_1 - Q_4$, die Abstände der Sensoren und die Stoffwerte des Fluids vorgegeben wurden.

5. Erprobung des Meßsystems

Laufzeitmessungen an thermischen Markierungen in einem Fluid, das schnell strömt, sind einfach; künstlich gesetzte Temperaturpulse haben wenig Zeit zum Zerfließen, die detektierbaren Signale sind daher groß, die Strömungsgeschwindigkeit ist nahezu umgekehrt proportional zur gemessenen Laufzeit. Man muß nur darauf achten, die Sensoren in Strömungsrichtung anzuordnen, weil die Signale noch schmal sind. Schwieriger ist es dagegen, kleine Geschwindigkeiten in gut leitenden Fluiden zu messen. Hier kann der Anteil der Konvektionsgeschwindigkeit auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Temperaturpulses klein sein gegen dessen Konduktionsanteil (Gl. 8). Deshalb wurde mit Messungen in ruhenden, teilweise sogar in festen Medien begonnen. Im letzten Falle lassen sich Abweichungen der Sensorabstände im Rahmen der Meßgenauigkeit ausschließen. Als Stoffe wurden Kupfer (fest) mit einer Temperaturleitzahl von $a = 117 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ Quecksilber ($a = 4,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) und Natrium ($a = 63 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$) verwendet. Die Messungen erlauben es, das Meßsystem mit all seinen Komponenten auf seine Funktion und auf ihr Zusammenspiel zu überprüfen und zu untersuchen, welche Auswirkungen Abweichungen vom idealisierten System haben. Zusätzlich bieten diese Messungen die Möglichkeit, die Auswertung der Meßkurven (Findung der Laufzeit des Temperaturmaximums) unter besonders kritischen Bedingungen zu überprüfen. Denn im ruhenden System steigt das Signal - ermittelt im Abstand r vom Ort der Wärmeexplosion - steil an und fällt sehr flach ab. Dies ergibt sich aus der Darstellung der Gln. (1-3) für ein festes r . Bestimmt nun ein Rechenprogramm das Maximum einer solchen Kurve, so wird Restrauschen leicht ein Maximum bei zu großen Zeiten (Verschiebung zum flachen Kurvenast) vortäuschen. Dagegen steigt das Signal im bewegten Fluid steil an und fällt auch wieder steil ab, so daß Restrauschen dann nur zu kleinen Fehlern führt.

5.1 Messung im Kupferblock

Bei den Messungen im Kupferblock waren je ein Pulsgeber (Heizleiter) und mehrere Sensoren (Thermoelemente) in Bohrungen eingelötet; um eine einwandfreie Lötung zu erzielen, wurden Pulsgeber und Sensoren vorher vergoldet. Die Abstände Pulsgeber - Sensor betragen 3-6 mm. Mit diesem System wurden zwei verschiedene Versuchsserien durchgeführt. Eine mit einem Pulsgeber von 1,5 mm Durchmesser, gepulst mit 56 J/m, Pulsdauer 1 msec. In diesem Falle wurden die Signale nach dem Verstärker auf einem Oszillographen

mit Digitalspeicher aufgezeichnet; die Laufzeit des Temperaturmaximums wurde visuell am Oszillographen abgelesen. Die gesamte Apparatur war mit kurzen Meßleitungen verbunden. Die äußeren Versuchsbedingungen waren relativ störungsfrei. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Meßabstände [mm]	5-4	6-5	6-4
Laufzeitdifferenz gemessen Δt_L (msec)	22	24	46
Laufzeitdifferenz gerechnet Δt_L (msec)	19,2	23,5	42,7

Die geringen Abweichungen zwischen Rechnung und Messung lassen sich durch eine Positionsabweichung um weniger als 0,2 mm deuten.

Durch Angabe der Laufzeitdifferenzen zwischen den auf verschiedenen Abständen sitzenden Sensoren fallen die Verzögerungszeiten heraus. Bei Einzelmessungen ergaben sich Verzögerungszeiten des Gebers von $\tau = 70$ msec; dabei wird eine spontane Wärmefreisetzung nach 70 msec angenommen.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Pulsgeber von 0,6 mm Durchmesser verwendet, wie sie später bei den Messungen in strömenden Fluiden zur Anwendung kommen. Diese wurden mit 46 J/m gepulst. Der Kupferklotz, die Stromversorgung und die Verstärkereinheit waren in der Natriumversuchshalle nahe einem großen Natriumprüfstand untergebracht. Die Signale von den Verstärkern wurden dann über eine Strecke von ca. 20 m in die Schaltwarte zum PC übertragen. Der PC steuerte die Heizpulse, speicherte die Meßwerte und wertete sie aus. Die äußeren Versuchsbedingungen waren sehr störungsbehaftet. Im Gegensatz zur ersten Meßreihe waren die Signale sehr verrauscht. Eine Auswertung der aufgezeichneten Meßkurven machte uns die Überlegenheit der Menschen gegenüber einem modernen PC deutlich. Während der Mensch aufgrund der graphischen Darstellung auch bei einer verrauschten Kurve das sinnvolle Maximum der Meßkurve mit großer Genauigkeit findet, liefert die Auswertung auf dem PC oft fehlerhafte Ergebnisse. Man kann feststellen:

- Sucht das Auswerteprogramm das Maximum der Meßkurve, so detektiert es bei falschen Zeiten, weil die Signale verrauscht sind. Werden die Meßwerte vorher geglättet, so verschiebt sich das Maximum bei zu starker Glättung

leicht zum flacheren Kuvast. Eine richtige Auswertung erfordert eine sinnvolle Auswahl der Glättungsparameter.

- Paßt das Auswerteprogramm nach der MFQ-Methode die analytische Kurve an Meßkurven an, so mißlingt die Anpassung häufig, wenn der Zeitbereich nicht sinnvoll gewählt wird. Eine Anpassung über den gesamten Meßbereich gibt beispielsweise in der Regel eine schlechte Anpassung; sinnvoller ist es, die Anpassung auf den Kurvenbereich mit großen Temperaturänderungen zu beschränken.

Ergebnisse der zweiten Versuchsserie im Kupferklotz zeigt die nachfolgende Tabelle:

Sensorabstand [mm]		Laufzeitdifferenz		
r ₂	r ₁	Δt _{soll} [ms]	Δt _{LM} [ms]	
7,2	4,8	55,4	56,3	0,016
5,3	4,5	16,7	15,5	-0,072
7,1	5,4	47,1	49,2	0,045
6,6	4,5	49,5	47,4	0,042
5,4	4,5	17,9	18,1	0,011
5,4	4,5	17,9	20,3	0,134
6,6	5,4	31,6	30,0	0,041
7,1	6,6	15,5	16,3	0,052
4,5	4,0	8,5	7,4	-0,129
6,4	4,5	45,0	47,8	0,062
7,2	4,0	76,8	75,8	-0,013
4,1	4,0	2,1	1,8	-0,143
6,4	4,0	53,3	54,2	0,017
6,4	4,1	51,0	52,4	0,027
7,2	6,4	23,5	21,0	-0,106

Wie zu erkennen, stimmen die aus den Maxima bestimmten Laufzeitdifferenzen bis auf einige Millisekunden mit den Sollwerten überein. Größere Relativfehler treten bei kleineren Laufzeitdifferenzen auf. Für genaue Messungen erscheinen die Laufzeitabweichungen insgesamt groß. Deshalb wurden die Verstärker nach diesen Messungen durch Wahl rauschärmerer Bauteile verbessert.

5.2 Messungen in Quecksilber

Das Meßsystem läßt sich nur einsetzen, wenn Geber und Sensoren vom umgebenden Medium benetzt werden. Dies bei Quecksilber zu erreichen, ist schwierig; die Teile wurden deshalb verkupfert und anschließend vergoldet. Die Goldschicht gewährleistet eine sehr gute Benetzung, ihre Haltbarkeit in bewegtem Quecksilber ist aber auf wenige Minuten beschränkt. Die darunter liegende Kupferschicht ist haltbarer. Sie wird jedoch nur benetzt, wenn sie frei von Oxidschichten ist, weshalb sie mit der Goldschicht geschützt wurde. Der beschichtete Geber besaß einen Außendurchmesser von 0,55 mm und eine beheizte Länge von 20 mm. Er wurde mit einer Pulsdauer von 1,2 msec und einer Energie von 13,5 J/m je Puls beheizt. Zwei Sensoren (0,30 mm Durchmesser) waren in Abständen von 2 und 4 mm vom Geber angeordnet.

Der Meßkopf, bestehend aus Träger mit Geber und Sensoren, wurde in einen offenen Quecksilber-Ringkanal eingetaucht. Dieser Ringkanal war in ein horizontal angeordnetes Rad von ca. 700 mm Durchmesser eingelassen; es wurde von einem Synchronmotor angetrieben. Aus der bekannten Drehzahl des Ringkanals konnte die Relativgeschwindigkeit zwischen Hg und Meßkopf bestimmt werden. Die Laufzeiten des Temperaturmaximums vom Geber zu den Sensoren in Abhängigkeit von Betrag und Richtung der Relativgeschwindigkeit wurde ermittelt.

Mit einem Meßkopf wurden direkt nach dem Einsatz Messungen im ruhenden System durchgeführt; danach Messungen bei $u_1 = 9,708 \cdot 10^{-3}$ m/sec; $u_2 = 2 \cdot u_1$; $u_3 = 4 \cdot u_1$.

Abb. 11 zeigt für drei Geschwindigkeiten jeweils in der oberen Hälfte die Abhängigkeit der Laufzeit von der Strömungsrichtung und in der unteren Hälfte die Höhe des Temperaturmaximums. Von Meßwertstreuungen abgesehen erkennt man, daß die Laufzeiten der Temperaturmaxima bei Winkeln der Konvektionsrichtung von $\alpha > 15^\circ$ gegen den Sensor richtungsunabhängig sind. Für kleinere Werte von α ist eine Richtungsabhängigkeit der Einzellaufzeiten zu erkennen, nicht jedoch bei Differenzmessungen zwischen 2 Sensoren. Die Meßwertaufzeichnung erfolgte in diesem Falle mit Hilfe eines digitalen Speicheroszillographen. Nach den theoretischen Überlegungen (Gl. 7) sollte die Laufzeit t_L dagegen völlig richtungsunabhängig sein. Dieser Unterschied erklärt sich daraus, daß in der mathematischen Behandlung eine spontane Energiefreisetzung angenommen wird, während das bisher realisierte System

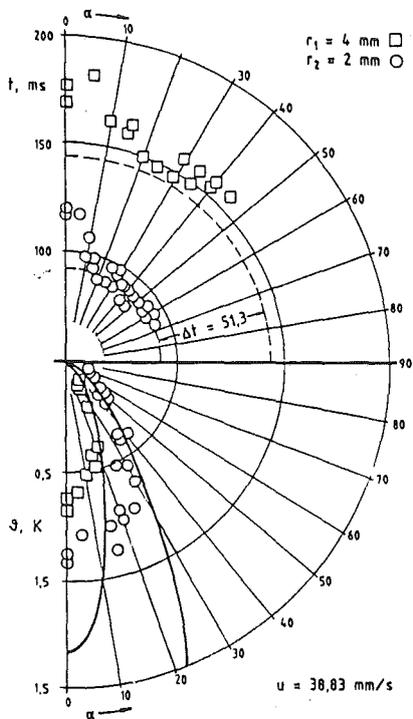
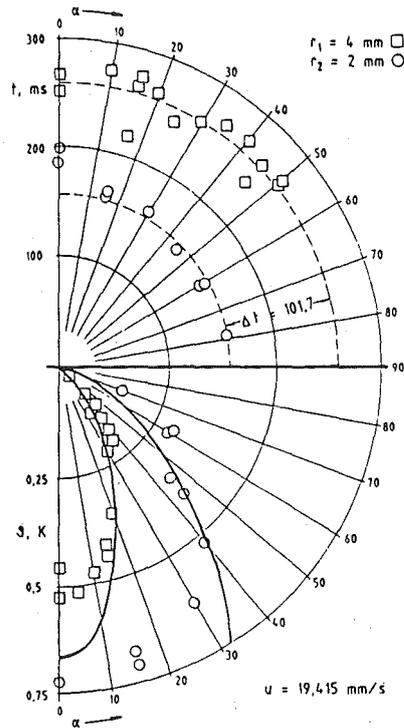
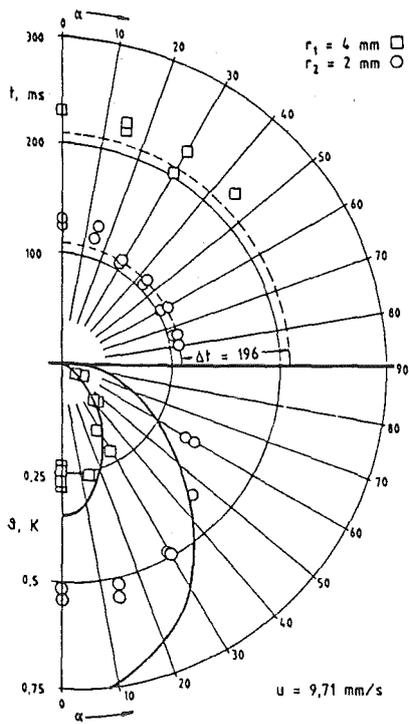


Abb. 11:
 Laufzeit und Höhe des Temperaturmaximums in strömendem Hg in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung, ermittelt an zwei Sensoren.

relativ hohe Verzögerungszeiten τ aufweist, so daß trotz der kurzen Pulszeit von 1,2 msec die Energie verschmiert über vielleicht 100 msec ans Fluid übertragen wird. Während dieser gedehnten Übertragungszeit wird der Fluidbereich, welcher Wärme vom Pulsgeber übernimmt, umso stärker gerichtet sein, je größer die Konvektionsgeschwindigkeit und um so kleiner die Temperaturleitzahl sind. Bei gleicher Geschwindigkeit sollte also der Anisotropieeffekt bei Natrium (α groß) geringer sein als im Quecksilber (α klein). Beachtenswert erscheint, daß trotz der großen Verzögerungszeiten die Messungen gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen. In der unteren Hälfte der Abbildungen sind die gemessenen Temperaturmaxima aufgetragen. Man erkennt, die berechneten Profile (durchgezogen) besitzen eine stärkere Richtungsabhängigkeit als die gemessenen, was ebenfalls auf eine verschmierte Energieabgabe in Strömungsrichtung ($\alpha = 0^\circ$) hindeutet.

5.3 Messungen in Natrium

Messungen in Natrium wurden in einem aufwärts durchströmten Testrohr von 110 mm Innendurchmesser durchgeführt. Der Meßkopf, Natriumsonde 2 (NS-2), abgebildet in Abb. 5, konnte in z-Richtung auf dem Kanalradius bewegt und zusätzlich um seine Achse in Richtung $\pm\alpha$ gedreht werden. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids wurde aus dem gemessenen Durchsatz berechnet. Die Daten des Meßkopfes lauten:

Pulsgeber: MgO-Heizleiter; 0,5 mm Durchm.; 20 mm lang,

zul. Energiezufuhr: 33 J/m

gewählte Energiezufuhr: 20 J/m

Pulsdauer: 1,84 msec.

Sensoren: isolierte TEs mit BN-Isolation; Außendurchmesser 0,25 mm.

Abstände Pulsgeber-Sensor: $r_1 = 2,78$ mm, $r_2 = 3,06$ mm,
 $r_3 = 4,84$ mm, $r_4 = 5,02$ mm.

5.3.1 Messungen in ruhendem Natrium

Messungen in ruhendem Natrium, gemittelt über 100 Einzelmessungen, lieferten nachfolgende Ergebnisse. Dabei wurden die Laufzeiten durch Suchen des Signalmaximums durch den PC bestimmt. Bei Laufzeitdifferenzen wurde auch die Kreuzkorrelation angewendet.

Sensor	TE 1	TE 3	TE 2	TE 4
Laufzeit t_L [msec] gerechnet	30,7	92,7	37,0	99,6
t_{LM} [msec] gemessen	72,0	133,25	93,5	149,75
Totzeit Geber τ [msec] = $t_{LM} - t_L$	41,4	40,6	56,5	50,2
Δt_L $\Delta t_{LM} / \Delta t_{Kreuz}$	62,00 61,25/	47,25	62,60 56,25/	39,25

Nach den Annahmen in den analytischen Betrachtungen wird die Totzeit τ nur vom Geber verursacht. Ist diese Annahme richtig, so müssen sich bei Messungen mit allen Sensoren für τ gleiche Werte ergeben. Tatsächlich liefern aber nur die Messungen an den TEs 1 und 3 übereinstimmende Werte, die an den TEs 2 und 4 weichen davon ab. Für TE 1 und TE 3 wurden schnelle Verstärker verwendet; sie dämpfen ein Signal von 35Hz mit 3 dB. Diese Verstärker scheinen eine genügende Dynamik zur Signalübermittlung zu haben. Dagegen wurden für TE 2 und TE 4 langsamere aber rauschärmere Verstärker verwendet. Ihr 3-dB-Punkt ist bereits bei 11Hz erreicht. Die Dynamik dieser Verstärker scheint zur Signalübertragung zu gering.

Die Behandlung der Unterschiede zwischen Messung und Rechnung allein durch die Totzeit τ führt zu einem Vergleich deutlich unterschiedlicher Signale. Abb.12 zeigt dies; das analytische Signal steigt später und steiler an als das Meßsignal

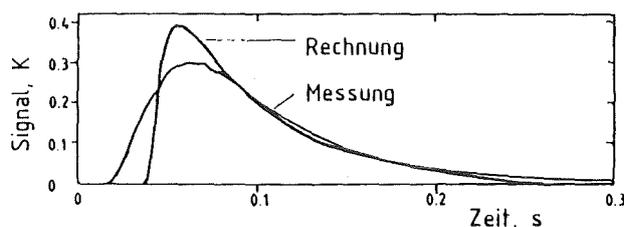


Abb. 12: Vergleich theoretischer mit gemessenen Signalen bei gleicher Laufzeit des Maximums

und fällt auch steiler ab, weil eine Wärmeexplosion angenommen ist. Die Totzeit wurde so gewählt, daß beide zum gleichen Zeitpunkt ihr Maximum haben. Diese Behandlung ist zulässig, wenn durch geeignete Eichmethoden eine gleiche Totzeit τ an verschiedenen Sensoren festgestellt wird, und wenn sich dieses τ auch bei überlagerter Geschwindigkeit nicht ändert. Als Auswertemethode wird in diesem Falle das Suchen des Maximums der Meßkurven verwendet. Ihr Nachteil,

die notwendige Glätte der Meßsignale, erfordert ein Mitteln über viele Messungen (≥ 10) sowie ein Glätten der Signale.

Diese Nachteile lassen sich vermeiden, wenn die MFQ-Methode (Minimierung der Fehlerquadrate zwischen der analytischen und der Meßkurve) angewendet wird. Selbst verrauschte Meßkurven sind damit auswertbar. Das Problem dieser Methode liegt darin, daß analytische Signale von Meßsignalen in ihrer Form so stark abweichen, wie in Abb. 12 zu sehen war. Eine bessere Anpassung wird erzielt, wenn die modifizierte analytische Gleichung (Gl. 14) verwendet wird. Dies zeigt Abb. 13; das gemessene Temperatur-Zeit-Signal, gemessen im Abstand von 2,8 mm vom Pulsgeber, ihr korrigierter Verlauf und die angepaßte Gl. 14 sind dargestellt. Beide sind deckungsgleich.

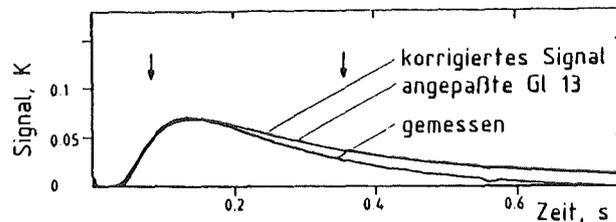


Abb. 13: Signal in ruhendem Na; wie aufgenommen, korrigiert, Anpassung von Gl. 13

Für die Anwendung der MFQ-Methode wurde in diesem Falle $Q_4 = 0$ gesetzt ($Q_4 \sim u$); $Q_1 - Q_3$ wurden vom Rechner optimiert. Er lieferte für 2 TE's:

TE	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
1	2,7	0,16	2,02	0 (fest)
3	3,0	0,277	2,04	0 (fest)

Nach der analytischen Beschreibung klingt eine Wärmeexplosion längs einer Geraden mit $1/t$ ab, Q_3 müßte also 1 sein; selbst die Punktquelle wird mit $Q_3 = 1,5$ beschrieben. Ein Abklingen einer Wärmeexplosion mit $Q = 2$ ist also nicht möglich; daß der Rechner für beide Sensoren die beste Anpassung mit $Q = 2$ erreicht, liegt an der zeitlich gedehnten Energieabgabe an das Fluid. Die Totzeit wurde bei Anwendung der MFQ-Methode als Null angenommen, die Anpassung erfolgte in dem durch senkrechte Markierungen in Abb. 13 bezeichneten Bereich. Bei Anwendung der MFQ-Methode bei Versuchen mit strömendem Fluid wurden die Koeffizienten Q_2 und Q_3 aus den Versuchen ohne Geschwindigkeit übernommen (sie enthalten nicht die Geschwindigkeit u), der PC optimierte Q_1 und Q_4 . Daraus läßt sich u ermitteln.

5.3.2 Messungen in strömendem Natrium

Messungen in strömendem Natrium wurden bisher bei drei Geschwindigkeiten durchgeführt. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit betrug 0,05 m/sec, 0,1 m/sec bzw. 0,2 m/sec. Bei den drei Durchsätzen wurde der Meßkopf in Kanalmitte um seine Achse gedreht (α -Richtung); dabei sollte die Abhängigkeit der Laufzeit von der Strömungsrichtung ermittelt werden. Messungen in Hg hatten gezeigt, daß nur für Winkel $\alpha < 15^\circ$ eine solche Abhängigkeit besteht. Bei Natrium sollte dieser Isotropieeffekt wegen dessen höherer Temperaturleitzahl geringer sein. Zusätzlich wurde die Sonde in Stellung $\alpha = 0$ bei einem Fluiddurchsatz ($u = 0,1$ m/sec) von der Strömungskanalmitte zu dessen Rand bewegt, um das Strömungsprofil zu vermessen. Vorab mußte jedoch erst überprüft werden, ob das System mit den gewählten Abständen Pulsgeber - Sensor bei strömendem Natrium noch richtig mißt. Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle zu sehen. Sie enthält Mittelungen der TE 1 und TE 3, ausgerüstet mit schnellen Verstärkern. Die angegebenen Totzeiten des Pulsgebers sind bestimmt aus der Differenz der gemessenen Laufzeit der Temperaturmaxima zu den Rechenwerten.

u	Re 10^{-4}	TE1 (Max)		TE3 (Max)		Δt_{LM}		Δt_L theor.
		t_{LM}	τ	t_{LM}	τ	Max.	Kreuz.	
m/sec	-	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
0	0	72,0	41,4	133,3	40,6	61,25	47,20	62,00
0,0530	1,56	65,6	41,2	97,9	40,8	32,45	27,1	32,84
0,0996	2,94	50,4	32,5	70,9	33,5	20,5	19,1	19,50
0,1982	5,85	34,8	23,6	47,3	25,9	12,5	12,1	10,21

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u wurde aus der Fluiddurchsatzmessung bestimmt. Man erkennt:

- bei $u = 0,053$ m/sec liefern beide Sensoren gleiche Totzeiten τ für den Geber. Die Werte stimmen mit denen bei $u = 0$ überein. Die Laufzeitdifferenz ermittelt aus der Auswertung der Maxima (Δt_{LM}) entspricht den Rechenwerten; Laufzeitdifferenz ermittelt durch Kreuzkorrelationen liefert, wie bei $u = 0$, zu niedrige Werte.

- Bei $u = 0,0996$ m/sec liefern beide Sensoren zwar übereinstimmende aber niedrigere Totzeiten als bei kleinerem u . Die Laufzeitdifferenzen, ermittelt aus dem Maxima und aus der Kreuzkorrelation, entsprechen den Rechenwerten.
- Bei $u = 0,198$ m/sec wurden an beiden Sensoren unterschiedliche Totzeiten ermittelt. Diese Unterschiede zeigen an, daß der durch die theoretischen Annahmen abgedeckte Bereich verlassen ist.

Abb. 14 zeigt die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung für die drei untersuchten Geschwindigkeiten. Der Meßkopf befand sich bei diesen Messungen in der Kanalmitte und wurde um seine Achse geschwenkt. Bei Pos. $\alpha = 0$ ist die Strömung vom Pulsgeber zum Sensor gerichtet. Ausgewertet wurde durch:

- Suchen des Maximums.
- die MFQ-Methode; sie ließ sich allerdings nur befriedigend einsetzen bei $u = 5$ cm/sec, bei der noch keine Änderung der Totzeit ermittelt wurde. Bei größeren Geschwindigkeiten ließ sich eine befriedigende Anpassung an die Meßkurve nicht erzielen, wenn die geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten Q_2 und Q_3 der Gl. 13 aus den Versuchen mit $u = 0$ übernommen wurden.
- die Kreuzkorrelationen, wobei in Erinnerung zu rufen ist, daß diese Methode nach Abb. 11 bei Sensorabständen von 3 bzw. 5 mm und den untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten zu hohe Werte liefert.

Um die Darstellung übersichtlicher zu machen, wurde die Auswertung der Signalmaxima bei positiven Winkelpositionen aufgetragen (jeweils links), die nach der MFQ-Methode und nach der Kreuzkorrelation wurden um die Achse $\alpha = 0$ nach rechts geklappt.

Es ist folgendes festzustellen:

- Die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind in allen untersuchten Bereichen unabhängig von ihrer Strömungsrichtung α , wie dies die analytische Beschreibung fordert. Ein Anisotropieeffekt, wie bei Quecksilber, ist nicht zu beobachten.
- Die Geschwindigkeitsermittlung aus der Laufzeit des Temperaturmaximums liefert wesentlich größere Streuungen als die MFQ-Methode oder die Kreuzkorrelation.
- Die MFQ-Methode läßt sich bei den gewählten Sensorabständen nur im Falle von $u = 0,05$ m/sec sinnvoll anwenden; bei höheren Geschwindigkeiten erhält

man bei Vorgabe der Koeffizienten Q_2 und Q_3 , ermittelt aus Versuchen mit $u = 0$ keine sinnvolle Anpassung.

- Die Kreuzkorrelation liefert schon ab $u = 0,1$ m/sec richtige Ergebnisse.

Auswertung

Laufzeitmaxima

Kreuzkorrelation
+ MFQ-Methode

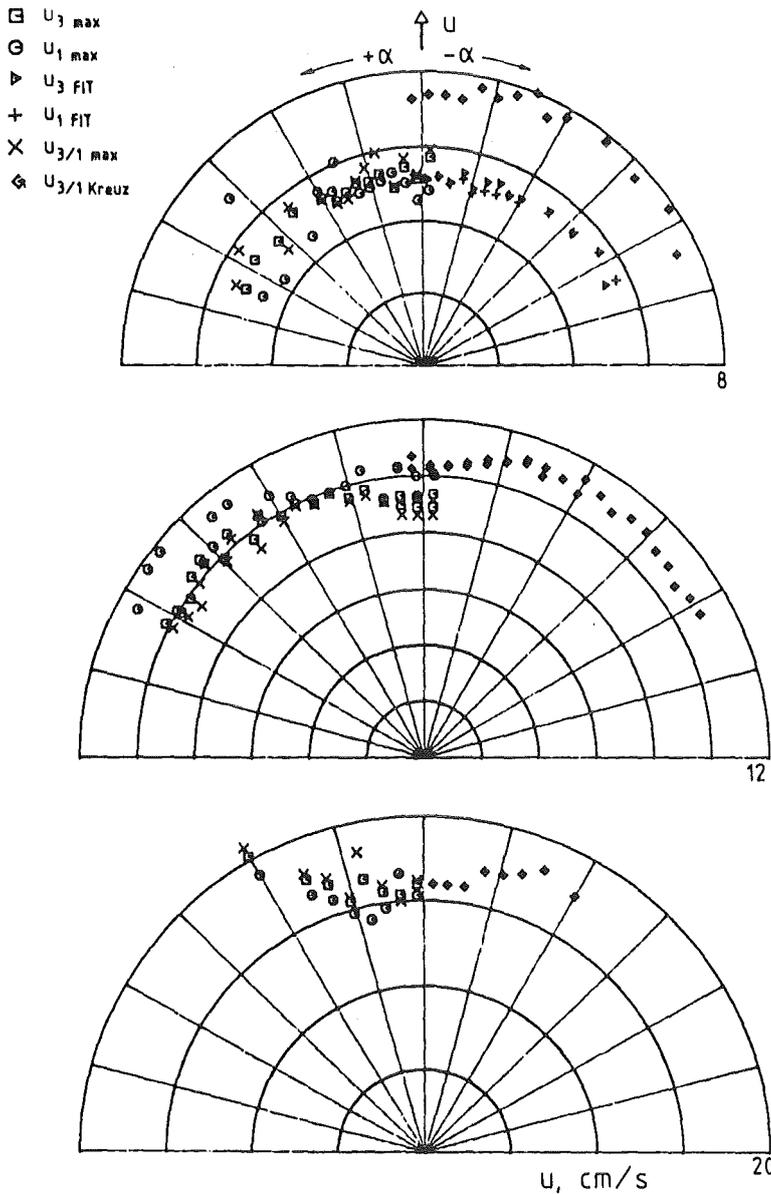


Abb. 14: Geschwindigkeit u in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung α

Abb. 15 zeigt das Geschwindigkeitsprofil gemessen über den Rohrradius; die Störungen nahe der Rohrwand ($r/R_0 \approx 1$) sind von der Sondendurchführung hervorgerufen.

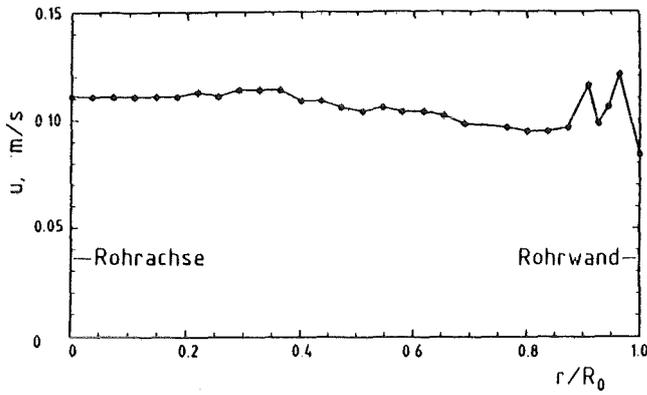


Abb. 15: Geschwindigkeitsprofil über Rohrradius

6. Bewertung

Die bisher durchgeführte Erprobung des Meßsystems läßt sich wie folgt bewerten:

Das Meßsystem eignet sich zur Messung von örtlichen Geschwindigkeiten. Selbst bei Einsatz des Meßkopfes in einem großen Natriumprüfstand und Meßwertübertragung über eine Strecke von 20 m wurden rauscharme Signale aufgezeichnet. Die Verstärker erfüllen die Forderung nach unverfälschter Signalverstärkung. Das Rauschen des gesamten Meßsystems von nur 0,02 K, die im Laufe der hier diskutierten Messungen erreicht wurden, ist sehr gering. Die verwendeten Miniaturheizleiter besitzen zwar eine, verglichen mit den Laufzeiten, recht große Totzeit; es zeigt sich jedoch, daß trotzdem, bei richtiger Wahl der Sensorabstände, gleiche Laufzeitdifferenzen zwischen 2 Sensoren erreicht werden, wie es die analytischen Gleichungen voraussagen. Die gemessenen Signalformen weichen nur wenig von den analytisch ermittelten ab.

Die Auswertung der Temperaturmaxima erlaubt es, Geschwindigkeiten über einen großen Meßbereich zu ermitteln. Allerdings erfordert sie ein Aufsummieren mehrere Meßkurven (10), um die notwendige Glätte der Signale zu erzielen.

Die große Ähnlichkeit der gemessenen Signale mit den theoretischen legte eine Auswertung durch Anpassen der analytischen Gleichung nahe. Diese Methode liefert für kleine Strömungsgeschwindigkeiten eine gute Versuchsauswertung. Der Gültigkeitsbereich dieser Methode hängt von den gewählten Sensorabständen ab. Die diskutierten Ergebnisse zeigen ein geringeres Streuen als bei der Auswertung der Laufzeiten der Temperaturmaxima.

Bei großen Strömungsgeschwindigkeiten ($u > 20$ cm/s) empfiehlt sich eine Versuchsauswertung mittels Kreuzkorrelation. Sie ist die einfachste Auswertemethode mit nur geringem Streuen der Auswerteergebnisse. Außerdem können bereits zwei Einzelsignale miteinander korreliert werden; durch die Integration beim Kreuzkorrelieren bleibt Rauschen von Einzelsignalen ohne Auswirkung auf das Ergebnis.

Die noch ausstehenden Aufgaben umfassen die Erprobung des Systems über einen größeren Geschwindigkeitsbereich, die Optimierung von Meßkopf und

Verstärkern für spezielle Meßanforderungen und die Anpassung des Systems für einen Einsatz in einem starken Magnetfeld.

Literatur

[1] U. Grigull, H. Sandner: Wärmeleitung; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1979