

499 | Februar 1990

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Thomas Knaack

LDV- Messungen der Reynolds-Spannungen im Nachlauf eines Schiffmodells im Windkanal

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

LDV-Messungen der Reynolds-Spannungen im Nachlauf eines Schiffsmodells im Windkanal

Thomas Knaack, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1990

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 499

LDV-Messungen der Reynolds-Spannungen im Nachlauf eines Schiffmodells im Windkanal

Thomas Knaack

Februar 1990

	Seite
I Zusammenfassung	1
II Einleitung	2
III Das Modell	3
IV Kenntnisse über das Strömungsfeld	4
IV.1 Grundlagen	4
IV.2 Frühere Untersuchungen des Modells	5
V Entwicklung des Laser-Doppler Velocimeters	7
V.1 Erste Ausbaustufe (bis 1986)	7
V.2 Zweite Ausbaustufe (1986 - 89)	9
Untersuchungen zu:	
Seeding	9
Glasfasern	10
Koinzidente Messung	11
Wahl der Messrichtungen	13
Beschreibung des Gesamtsystems	14
Genauigkeiten und Grenzen des Systems	16
VI Messungen im Windkanal	17
VI.1 Messungen im ersten Bewilligungszeitraum	17
VI.2 Messungen im zweiten Bewilligungszeitraum	19
VII Auswertung und Darstellung der Ergebnisse	20
VIII Ausblick	26
Literatur	28
Nomenklatur	30
Anhang	31
I Scheinbare Turbulenz durch Glasfasern	32
II Gleichzeitige Bestimmung der Geschwindigkeits- komponenten	35
III Der Einfluß von Messungenauigkeiten auf den Reynoldstensor	39
IV Rechnergesteuerte Messwerterfassung und Auswertung	44

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Institut für Schiffbau und wurde von Oktober 1984 bis Mai 1988 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Vorhabens "LDV-Messungen der Reynoldsspannungen im Nachlauf eines Schiffmodells im Windkanal " (WI 65/39-1 und -2) gefördert.

Herr Prof. Dr. K. Wieghardt hat diese Arbeit angeregt. Für die Möglichkeit die Arbeit im Institut für Schiffbau durchführen zu können, möchte ich Herrn Prof. Wieghardt recht herzlich danken.

Herrn Dr. J. Kux möchte ich für die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit danken.

Herrn J. Denker danke ich für kritische Diskussionen und zahlreiche Hilfen bei der numerischen Umsetzung der Messwerterfassung und Auswertung der Daten.

Bei Herrn U. Gietz möchte ich mich für die intensive Unterstützung bei den Experimenten bedanken.

Hamburg, im April 1990

Thomas Knaack

I Zusammenfassung

Für die experimentelle Untersuchung der Reynoldsspannungen im Nachlauf eines Schiffdoppelrumpffmodells im Windkanal, wurde ein Laser-Doppler Velocimeter entwickelt, mit welchem neben den Komponenten der mittleren Geschwindigkeit die Komponenten des Reynoldstensors vollständig bestimmt werden können.

Dieser Bericht beschreibt die verschiedenen Phasen der Entwicklung des Velocimeters (Planung und Realisation) von den ersten Einkomponentenmessungen in Totwassergebieten im Jahr 1986 bis zum Einsatz des Dreikomponenten-velocimeters unter Verwendung von Glasfasern ab 1988.

Ziel des Vorhabens war unter anderem die Erstellung von experimentellem Datenmaterial zur direkten Prüfung verschiedener Terme aus der Turbulenzmodellierung. Hierzu wurde in einigen Gebieten im Nachstrom ein sehr feines Messraster gewählt und die räumlichen Ableitungen der Komponenten der mittleren Geschwindigkeit ermittelt, indem die experimentell gewonnenen Werte numerisch differenziert wurden.

Erste Messungen aus 1988 sowie umfangreiche Messungen vom Jan. bis Sept. 1989 und deren Auswertungen, soweit diese bis zur Erstellung des Berichts abgeschlossen waren, werden diskutiert.

II Einleitung

Die komplexe turbulente Strömung im Nachstrom eines Schiffes ist bis heute numerisch nur durch empirische Ansätze in der Turbulenzmodellierung zu beschreiben. Diese Modelle sind bisher kaum auf ihren Gültigkeitsbereich zu untersuchen, da es an Messungen - sowohl in der Anzahl als auch in der Genauigkeit zur Bestimmung von mittleren Geschwindigkeiten und deren Schwankungsgrößen - fehlt.

In früheren Jahren wurde im Institut für Schiffbau der Nachstrom eines Doppelrumpfmodells im Windkanal mit Drucksonden (Fünflochsonden) an einer großen Zahl von Messpunkten aufgemessen. Zur Erfassung der dreidimensionalen Verteilung der mittleren Geschwindigkeit in einem weiten Bereich des Nachstroms wurden an insgesamt 14000 Punkten Messungen durchgeführt. Hierbei wurde die mittlere Geschwindigkeit in allen drei Komponenten in einem dichten Messpunktraster bestimmt und die räumlichen Ableitungen der Geschwindigkeitsmittelwerte numerisch ermittelt. Eine Bestimmung der turbulenten Schwankungsgrößen war mit den verwendeten Drucksonden nicht möglich.

Für die experimentelle Prüfung von Turbulenzmodellen ist neben der Bestimmung der Ableitungen der Geschwindigkeitsmittelwerte die vollständige Bestimmung des Reynoldstensors notwendig.

Erfahrungen bei der Aufmessung von turbulenten Strömungsfeldern mit Hilfe der Laser-Doppler Velocimetrie (LDV) gehen im Institut für Schiffbau bis in das Jahr 1972 zurück. Messungen im Windkanal an einem Schiffsdoppelmodell wurden von Scheinflug 1976 durchgeführt.

Bis 1988 wurden im Windkanal des IFS verschiedene Einkomponenten LDV-Systeme verwendet. Diese Geräte wurden für spezielle Messaufgaben - wie z.B. Messungen im Totwasser sowie in wandnahen Gebieten der Grenzschicht - weiterentwickelt. In letzter Ausbaustufe kam im ersten Bewilligungszeitraum dieses Vorhabens ein Einkomponenten LDV-System zum Einsatz.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde ein Dreikomponenten LDV-System entwickelt, dessen technische Spezifikationen sich aus Ergebnissen umfangreicher Vorversuche (Anhang I - IV) ergaben. Beschreibungen wichtiger Schritte der Planung und Entwicklung dieses Velocimeters finden sich in Kapitel V.

Das Gesamtsystem wurde im Januar 1988 im Windkanal erstmals unter Realbedingungen eingesetzt. In ausgewählten Gebieten der Nachlaufströmung wurde ein sehr feines Messraster gewählt, um den Forderungen der räumlichen Differenzierbarkeit von experimentellen Messdaten mit ausreichender Genauigkeit nachkommen zu können.

Die Auswertung der Ergebnisse ist in Kap. VII dargestellt. Eine Fehlerrechnung zur Abschätzung der Genauigkeit des Gerätes wird in Kap. V durchgeführt.

III Das Modell

Die experimentelle Untersuchung der Nachlaufströmung erfolgt im Windkanal des Instituts für Schiffbau an einem Doppelrumpfmodell eines völligen Massengutfrachters. Der Blockkoeffizient des Schiffes beträgt 0.85. Ein Spantenriß ist in Abb. 1 gezeigt. Das Doppelrumpfmodell ist an seiner Wasserlinie gespiegelt, so daß Effekte der freien Oberfläche vernachlässigt werden. Die Messung am Modell erfolgt im nominellen Nachstrom, d.h. ohne Propeller und Ruder. Für die Messungen der vergangenen Jahre wurde ein Koordinatensystem (vgl. Abb. 1) mit dem Ursprung in der Stevvenuß (Austrittspunkt der nicht vorhandenen Welle) eingeführt. Die Anströmung des Modells erfolgt in positive x-Richtung.

Die Modellgrößen betragen Länge 2.72 m, Breite 0.43 m und Tiefe $2 * 0.15$ m. Die Messungen im Windkanal erfolgen in einer halb offenen Meßstrecke, d.h. das Modell wird in einen längsgeschlitzten Messkäfig (slotted wall) eingespannt, so daß wie bei einem offenen Kanal ein Ausgleich des statischen Druck in der Meßstrecke zum Außendruck erfolgen kann. Andererseits hält der Messkäfig den Luftstrom zusammen, so daß dieser nicht wie bei einem offenen Kanal auffächert. Der Durchmesser des Messkäfigs beträgt 1.2 m, seine Länge 5 m.

Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 27 m/s beträgt die Reynoldszahl $5 * 10^6$.

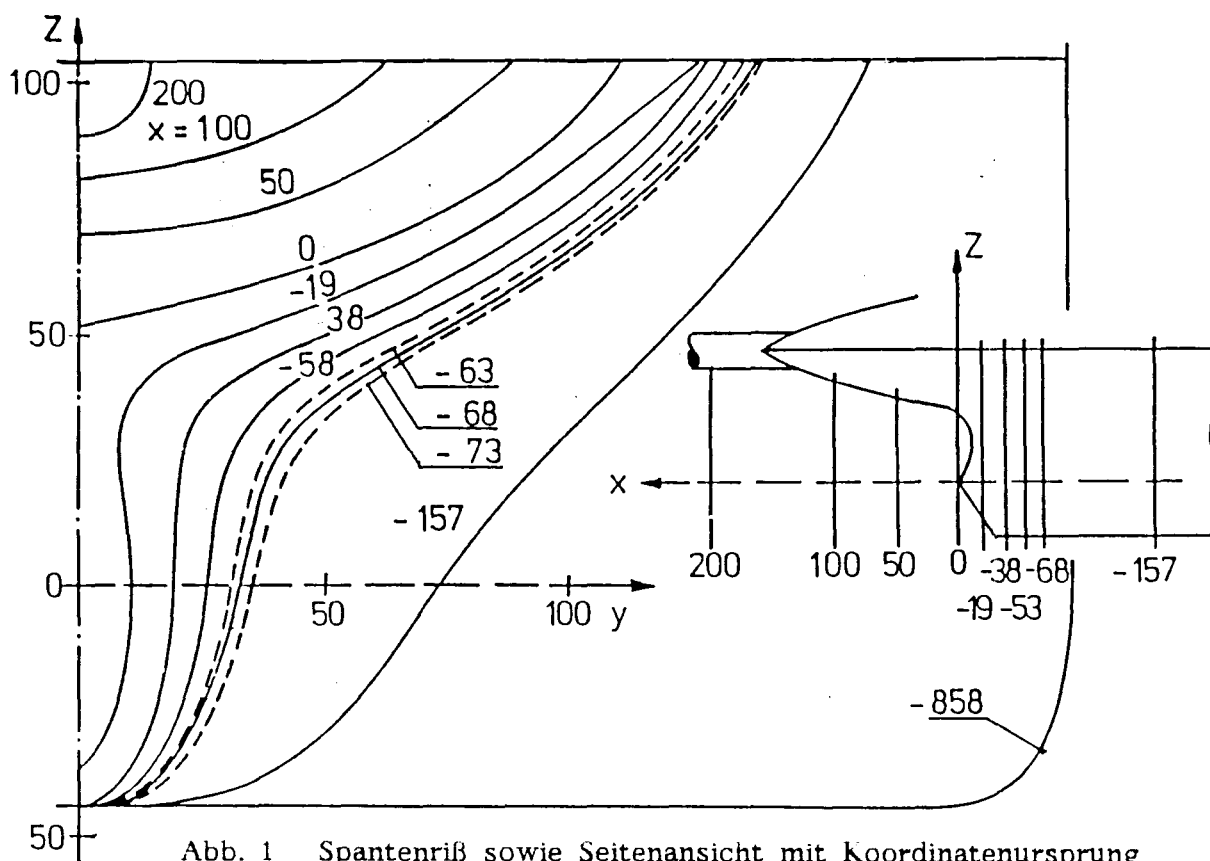


Abb. 1 Spantenriß sowie Seitenansicht mit Koordinatenursprung

IV Kenntnisse über das Strömungsfeld

IV.1 Grundlagen

Eine dreidimensionale inkompressible turbulente Strömung wird durch die zeitlich gemittelte Navier-Stokes Gleichung

$$\overline{v_{ilj} v_j} = - \frac{1}{\bar{\rho}} \bar{p}_{,i} - \left(\overline{v'_i v'_j} \right)_{,j} + \bar{\nu} \overline{v_{ilkk}} \quad (1)$$

mit den Komponenten der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}_i , den Geschwindigkeitsschwankungen v'_i , der Dichte $\bar{\rho}$, dem Druck \bar{p} , und der kinematischen Zähigkeit $\bar{\nu}$ beschrieben. Sie enthält auf der linken Seite den Gradiententensor

$$\mathbf{V} = \left(\overline{v_{ilj}} \right) \quad (2)$$

Seine Komponenten konnten durch Berechnung der Ableitungen aus den experimentellen Daten der früheren Drucksondenmessungen bestimmt werden /1/. Der Reynoldstensor

$$\mathbf{R} = \left(\overline{v'_i v'_j} \right) \quad (3)$$

auf der rechten Seite war aus Experimenten bisher nur in einigen Komponenten an wenigen Messpunkten bekannt /2/.

Für eine numerische Berechnung einer turbulenten Strömung wird die Navier-Stokes-Gleichung zur Schliessung des Systems um Gleichungen ergänzt, welche die Zusammenhänge der Reynoldsspannungen mit den mittleren Geschwindigkeiten postuliert /3/

In einer Klasse von Turbulenzmodellen /4/ wird z. B.

$$- \overline{v'_i v'_j} = \nu_t \frac{1}{2} \left(\overline{v_{ilj} + v_{jli}} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

gesetzt. Mit ν_t als turbulente Scheinzähigkeit (eddy viscosity) und k der kinetischen Energie der Turbulenz

$$k = \frac{1}{2} \overline{v_i v_i'} \quad (5)$$

Für ν_t gibt es verschiedene empirische Ansätze. Hier sei nur auf die Folgerungen eingegangen, welche sich aus der Eigenschaft von ν_t als Skalar ergeben.

Werden die Tensoren \mathbf{V} und \mathbf{R} im eddy-viscosity-Turbulenzmodell über einen Skalar verknüpft, so sind gleiche Eigenrichtungen der beiden Tensoren postuliert. Eine Eigenwertuntersuchung experimenteller Daten für beide Tensoren scheint geboten.

IV. 2 Frühere Untersuchungen des Modells

Obwohl dieses Schiff nicht als Großausführung gebaut worden ist, sind in mehreren Forschungsinstituten Berechnungen an diesem Modell durchgeführt worden. In verschiedenen Berichten wird dieses Modell im allgemeinen als HSVA-Tanker bezeichnet. Ausführliche Drucksondenmessungen im Windkanal des Instituts für Schiffbau an dem Modell sind in den Berichten /5/ und /6/ beschrieben. Hierin finden sich auch die Berechnungen z.B. der Reynoldskräfte und der Rotation ($\text{rot } \vec{v}$), welche sich aus den Ableitungen der experimentellen Daten ergeben. Ergebnisse von Grenzschichtmessungen waren bereits beim ITTC workshop 1980 in Göteborg Grundlage von numerischen Modellen zur Berechnung der Strömung.

Die räumliche Verteilung der Komponenten der mittleren Geschwindigkeit im Nachstrom des Modells ist durch eine Vielzahl von Messungen bekannt. Turbulente Schwankungen der Geschwindigkeiten können mit den verwendeten Drucksonden nicht aufgelöst werden. Die vorhandene Turbulenz führte bei Drucksondenmessungen zu einer Verfälschung der Messergebnisse für die mittlere Geschwindigkeit. In Gebieten mit hohem Turbulenzgrad war ein experimentelles Ergebnis für die Geschwindigkeit daher nicht zu erhalten. In Bereichen mit großen Querkomponenten der Geschwindigkeit konnte der Geschwindigkeitsvektor nicht bestimmt werden, da die Drucksonde gültige Ergebnisse nur bis zu einem Anströmwinkel von ca. 30° liefert.

Ein qualitativer Eindruck der Strömungsvorgänge in Wandnähe, insbesondere

der Wandschubspannungen. konnte durch Ölanstrichversuche gewonnen werden (Abb. 2). Insbesondere deutet der Verlauf der Wandschubspannungen auf Gebiete mit linien- oder punktförmiger Ablösung der Grenzschicht hin. Aufgrund dieser Betrachtungen wurden die Gebiete (vgl. Abb.2) ausgewählt. in denen sehr detaillierte Messungen der Reynoldsspannungen durchgeführt werden sollten.

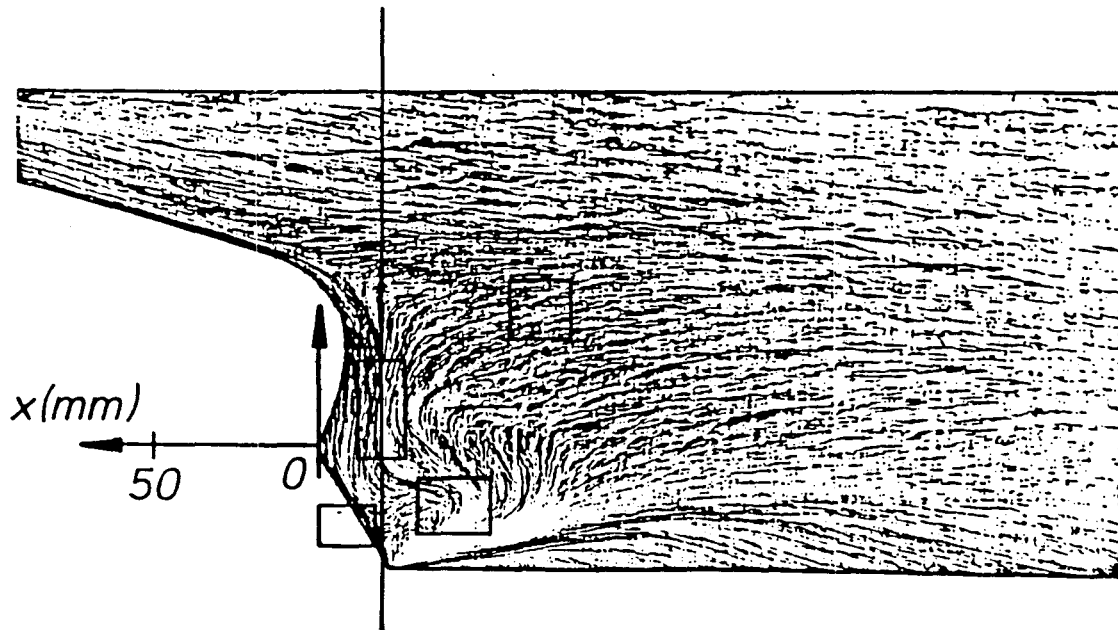


Abb. 2 Anstrichversuch zur Sichtbarmachung der Wandschubspannungen
(Ebene $x = -19 \text{ mm}$ und Gebiete der Messungen 88/89)

V Entwicklung des Dreikomponenten-Velocimeters

Nach der Bewilligung des Vorhabens wurde als Ziel der Geräteentwicklung ein Mehrkomponenten LDV-System angestrebt, mit welchem die turbulenten Schwankungen der Geschwindigkeit auch in Gebieten mit Rückströmung in ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Der Messkopf des Velocimeters sollte beweglich sein, um auch an schwer zugänglichen Raumpunkten im Strömungsfeld, also hier etwa am Hinterschiff mit seinen Übergängen von konkav- und konvexgekrümmten Flächen, messen zu können. Gerade in diesen Bereichen sind die störenden Reflexe der Laserstrahlen von der Modelloberfläche durch eine geeignete Wahl der Messrichtungen und damit der Richtungen der einfallenden Laserstrahlen und der Beobachtungsrichtungen zu minimieren.

Da aus den Ergebnissen der Messung räumliche Ableitungen errechnet werden sollen, ist bei der Positionierung der Messpunkte ein hohes Maß an Genauigkeit gefordert. Zudem sollte die gesamte Steuerung des Velocimeters wegen der angestrebten Vielzahl der Messungen weitgehend automatisiert werden.

V.1 Erste Ausbaustufe (Bewilligungszeitraum bis 10/86)

Die Bestimmung aller sechs Komponenten des Reynoldstensors mit einem Einkomponenten LDV-System wurde im IfS am Doppelrumpfmodell 1984 durchgeführt /7/. Hierbei trat unter Verwendung eines Correlators als Auswertungs-elektronik das Problem auf, daß Geschwindigkeitsverteilungen an einem Messpunkt nicht mehr bestimmt werden konnten, sobald der lokale Turbulenzgrad in Messrichtung

$$\eta_M = \frac{\sqrt{v_M'^2}}{\bar{v}_M} \quad (6)$$

größer als 40% wurde (M bezeichnet die Messrichtung). Auch Gebiete mit negativer mittlerer Geschwindigkeit konnten nicht untersucht werden.

Die Vorgaben für eine Erweiterung der Optik des Gerätes lagen in zwei Punkten. Zum einen sollte es möglich sein, auch in Gebieten mit hohem lokalen Turbulenzgrad zu messen, z.B. in Gebieten mit Rückströmung. Zum anderen sollte eine Verbesserung der Positionierung des Messpunktes in Bezug auf Genauigkeit und auf Automatisierung erfolgen.

In dieser ersten Phase war vorgesehen, weiterhin einen Correlator zur Bestimmung der Dopplerfrequenz zu verwenden. Da mit den vorhandenen Correlatoren Frequenzen von maximal 10 MHz bestimmt werden können, konnte zur

Bestimmung des Vorzeichens der gemessenen Komponente der Strömungsrichtung keine herkömmliche Braggzelle verwendet werden. (Die Shiftfrequenz von Braggzellen liegt üblicherweise bei 40 MHz) /8/.

Unter Verwendung einer Doppelbraggzelle, wobei die Differenzfrequenz der Braggzellen auf ca. 5 MHz eingestellt wurde, konnten in Gebieten mit Rückströmung befriedigende Ergebnisse erzielt werden.

Ebenso konnte in dieser ersten Phase durch Verwirklichung einer computer-gesteuerten Koordinatenpositionierung eine räumliche Reproduzierbarkeit der Messpunkte von 0.01 mm erreicht werden. Für die Berechnung der räumlichen Ableitungen aus den experimentellen Ergebnissen war dies eine entscheidende Verbesserung.

Grenzen des Gerätes in erster Ausbaustufe

Das Problem der Messungen unmittelbar an der Modellwand, also z.B. Meßpunkte mit einem Abstand von weniger als 10 mm von der Wand, konnte in dieser ersten Phase nicht befriedigend gelöst werden. Die hohe Empfindlichkeit auf extrem niedrigen Streulichtleistungen, welche den Correlator auszeichnet, führt bei Messungen in Wandnähe zu dem Problem, daß die Elektronik übersteuert, sobald nur ein geringer Anteil von Streulicht von Reflexen der einfallenden Laserstrahlen auf der Modellwand in die Empfangsoptik fällt.

In dem Antrag für eine weitere Entwicklung des Gerätes war vorgesehen, mittels eines digitalen Speicheroszilloskops Messungen in Wandnähe, auch bei geringem Signal/Rausch-Verhältnis, eine verbesserte Auswertung der Messsignale durchführen zu können /9/. Zudem sollte durch einen beweglichen Messkopf, welcher von den anderen optischen Modulen mechanisch getrennt, aber mittels Glasfasern /10/ verbunden werden sollte, eine Wahl der Messrichtungen ermöglicht werden, die eine Minimierung der Wandreflexe erlaubt.

V.2 Zweite Ausbaustufe (Bewilligungszeitraum 86 - 89)

Gerade in dieser Phase der Planung der zweiten Erweiterung der Optik wurde für das IfS im Rahmen eines Großgeräteantrags (aus dem Jahr 1978) ein Mehrkomponenten LDV-System bewilligt. Durch diese zusätzlichen Mittel wurde die bisherige Planung des Velocimeters auf ein Dreikomponentensystem erweitert.

Ein Dreikomponentensystem bietet die Möglichkeit, die zeitabhängigen Komponenten der Geschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen gleichzeitig zu bestimmen. Ein Correlator als Signalprozessor liefert keine zeitabhängigen Größen, sondern das zeitliche Mittel der gemessenen Geschwindigkeitskomponente /11/ sowie die Breite der Geschwindigkeitsverteilung (auf einen Correlator im "single burst" Betrieb gehe ich hier nicht ein). Counter als Signalprozessoren liefern die zeitabhängigen Komponenten der Geschwindigkeit, erfordern wegen der geringeren Empfindlichkeit auf Streulichtleistungen im Gegensatz zum Correlator die Zugabe von Streuteilchen (Seeding) in das Strömungsmedium.

Seeding

Das Hauptaugenmerk des gesamten Projektes liegt auf der Untersuchung des Reynoldstensors. Störungen der Strömung durch das Seeding - weniger durch die Streuteilchen selbst als vielmehr durch Schwankungen der Geschwindigkeit, die von dem Seedinggenerator induziert werden - würden die Komponenten des Reynoldstensors verändern.

Der Zusatz von Streuteilchen im Randbereich der Strömung erfordert für die notwendige Verteilung der Teilchen über den gesamten Querschnitt der Messstrecke - zumindest über den Messbereich - den Einsatz von größeren Mengen des zerstäubten Materials über eine längere Zeit, da sich die Teilchen nach mehreren Umläufen in dem Windkanal zwar verteilen, aber auch an den Wänden des Kanals absetzen.

Diese Art des Seedings ist im Windkanal des IfS kaum möglich, da ein Anteil der Teilchen - wegen der offenen Meßstrecke - in den Umgebungsbereich des Experimentes austreten und sich dort ablagern würde. Wegen der Verschmutzung der Messgeräte und auch aus gesundheitlichen Gründen für die Experimentatoren ist dies nicht tragbar.

Unter der Vorgabe, wenig Seedingmaterial zu verwenden, bietet sich an, den Seedinggenerator auf einer Stromlinie vor dem Messpunkt in der Vorkammer des Windkanals zu positionieren /12/. Die Teilchen, aber auch vom Seedinggenerator induzierte Geschwindigkeitsänderungen, werden auf diese Weise direkt zum Messpunkt gelangen.

Die Größenordnung oben beschriebener Einflüsse auf die mittleren Geschwindigkeiten und turbulenten Schwankungen am Messpunkt waren zu untersuchen. Mit einem Test-LDV-System unter Verwendung des Correlators wurden vergleichende Messungen im Windkanal mit und ohne Seedinggenerator durchgeführt.

Mit dieser Anordnung war es möglich, den lokalen Turbulenzgrad am Messpunkt auf 1% genau zu bestimmen. Messbare Änderungen der mittleren Geschwindigkeit oder der lokalen Turbulenz, welche von dem Seedinggenerator induziert werden, konnten nicht festgestellt werden.

Störungen der Strömung durch den Seedinggenerator sind zu vernachlässigen, obwohl der Messpunkt im Nachlauf des Generators liegt. Dieser geringe Einfluß ist mit zwei Gründen zu erklären. Das Kontraktionsverhältnis des Windkanals im IfS von der Vorkammer zur Meßstrecke beträgt 14:1, so daß bei der geringen Geschwindigkeit in der Vorkammer und der Größe der Seedingdüse von nur ca. 0.05 m kein nachweisbarer wirbelbehafteter Nachstrom der Seedingdüse nachzuweisen ist (die Reynoldszahl für die Seedingdüse würde ca. 6000 betragen). Die Geschwindigkeit, welche durch den Seedinggenerator induziert wird, ist wegen der gering eingestellten Leistung zu vernachlässigen.

Zur Ergänzung der Partikel wurde ein Gemisch aus ca. 5% Glycerin und 95% Wasser in der Vorkammer zerstäubt. Der Zerstäuber wurde mit sehr geringer Leistung betrieben, so daß der Verbrauch des Gemisches nur ca. 0.5 cm³ pro Stunde betrug.

Glasfasern

Mitte 1986 wurden von verschiedenen Anbietern von LDV Systemen zwei unterschiedliche Prinzipien bei der Verwendung von Glasfasern vertreten.

In Variante A (vertreten von der Firma TSI) wurden pro Messrichtung zwei Glasfasern, d.h. pro Laserstrahl der Sendeoptik eine Faser, eingesetzt. Die ersten optischen Komponenten eines LDV-Systems, wie Farbteiler für die verschiedenen Komponenten, Strahlteiler und Braggzellen, werden lokal fest installiert. Dann werden die Laserstrahlen (in diesem Fall sechs, zwei für jede der drei Komponenten) durch je eine einzelne Glasfaser geführt. Diese Anordnung bietet den Vorteil, daß nur wenige optische Module für den eigentlichen Messkopf verbleiben, und letzterer relativ leicht wird.

In Variante B (vertreten durch die Firma Dantec) war nur eine Glasfaser für die gesamte Sendeoptik vorgesehen. Die Aufteilung in die verschiedenen Farben für die unterschiedlichen Messrichtungen und die Teilung der verschiedenen Farben in jeweils zwei Strahlen hatte nach der Faser in dem Messkopf zu erfolgen. Hierdurch wird der Messkopf jedoch wesentlich schwerer werden.

Unter Verwendung von zwei verschiedenen Fasern für ein Strahlenpaar wird durch eine mechanische Bewegung oder Schwingung dieser Glasfasern eine Verschiebung in der Phasenlage der Strahlen gegeneinander auftreten. Dieses führt zu einer Bewegung des Streifensystems und somit zu einer scheinbaren Turbulenz in den Ergebnissen. Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Systemen bestand in der Streitfrage, ob diese scheinbare Turbulenz zu einer wesentlichen Verfälschung der Ergebnisse führt.

Beide Hersteller waren 1986 bereit, einen Prototyp ihrer damals neu erscheinenden Produkte zum Test im Labor dem IfS zur Verfügung zu stellen.

Mit beiden Einkoppelsystemen für die Glasfasern ließ sich unabhängig von der Laserleistung (im Bereich bis 4 Watt Leistung) ein Transmissionskoeffizient von ca. 60% erreichen. In beiden Systemen wurden Glasfasern von ca. 5 μm Durchmesser verwendet. Die Mechanik der Einkopplung der Laserstrahlen in die Fasern mußte eine Justierung in μm -Bereich ermöglichen und vor allem in dieser Genauigkeit zeitlich und thermisch stabil sein. Diese Ansprüche an die Mechanik wurden ausführlich getestet und von beiden Systemen erfüllt.

Tests der Verbreiterung der Geschwindigkeitsverteilung durch mechanische Schwingungen von Fasern in einem optischen Aufbau der Variante A lieferten folgende Ergebnisse (vgl. Anhang I):

- Schwingungen der Fasern mit unterschiedlichen Frequenzen mit Schwingungsamplituden im Bereich von wenigen Zentimetern führten zu Fehlern in der Geschwindigkeit, welche unterhalb der zu erwartenden Genauigkeit des Gesamtsystems von ca. 1% liegen.
- Schwingungen mit größeren Amplituden führten zu größeren Fehlern. Letztere Schwingungen wurden im Experiment durch eine schützende elastische Führung der Fasern verhindert.

Nach Durchführung aller Tests fiel die Entscheidung letztlich zu Gunsten eines leichteren Messkopfes (vgl. unten: Beschreibung des Gesamtsystems), welcher durch die Variante A verwirklicht werden konnte.

Koinzidente Messungen

Ziel der Messung ist die Bestimmung aller Komponenten des Reynoldstensors. Zur Bestimmung der Nichtdiagonalelemente

$$\overline{v_i v_j} \quad \text{mit } i \neq j$$

ist die Bestimmung der zeitabhängigen Komponenten der Geschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen gleichzeitig notwendig (vgl. Anhang II). Durchkreuzt ein Streuteilchen das Messvolumen und für alle drei Messrichtungen werden Signale detektiert und ausgewertet, so bezeichnen wir diese Signale als koinzident. Zur vollständigen Bestimmung des Reynoldstensors konnten nur koinzidente Signale benutzt werden, daher sind einige mechanische und eine elektronische Anpassung des Velocimeters notwendig.

Die Mechanik zur Halterung des Messkopfes muß so justiert werden, daß die Messvolumina der drei Messrichtungen sich in ihren Zentren überdecken. Der Durchmesser der Messvolumina beträgt 0,1 mm. Bei einer Brennweite der Frontlinsen von 1,2 m überstreicht ein Strahl bei einer Drehung der Auskopplung der Glasfaser von 20 Bogensekunden das gemeinsame Schnittvolumen.

In dieser Winkelgenauigkeit muß justiert werden, und die Mechanik muß stabil gegenüber Temperaturschwankungen und mechanischen Schwankungen des Windkanals erstellt werden.

Über eine Kontrollelektronik zur Steuerung der Counter wurde sichergestellt, daß nur Teilchen berücksichtigt werden, welche gültige Signale für alle drei Messrichtungen innerhalb eines Zeitfensters erzeugen (Dreifachkoinzidenz). Hierzu wurde ein Interface erstellt, welches die Zeitintervalle zwischen den Signalen für verschiedene Messrichtungen mit einem Zeitfenster vergleicht und Ergebnisse von nicht koinzidenten Signalen verwirft. Die Größe des Zeitfensters ist u. a. abhängig von der Verweilzeit der Teilchen in den Messvolumen. Da sowohl in der Außenströmungen mit hohen Geschwindigkeiten, also kurzen Verweilzeiten, als auch im Totwasser mit umgekehrten Verhältnissen gemessen werden sollte, kann das Zeitfenster vom μs - bis zu s-Bereich eingestellt werden.

Mechanische und elektronische Probleme konnten in Labortests zufriedenstellend gelöst werden.

Bei Windkanalmessungen zeigte sich jedoch, daß zum Teil wesentlich weniger koinzidente Signale zu erhalten waren als erwartet. Dies ist wie folgt zu erklären. Bei fallendem Signal/Rausch-Verhältnis der Messsignale unter Realbedingungen, insbesondere bei Messungen in Wandnähe, nimmt die Zahl der gültigen Messungen ab. D.h. das Verhältnis von Signalen, welche durch die Elektronik als gültig detektiert werden, zu denen, welche in ihrer Intensität die Triggerchwelle der Elektronik ansprechen (Validation), nimmt ab. Bei Tests im Windkanal mit konventionellen Countern zeigte sich, daß in Grenzbereichen die Validation unter 20% fallen kann.

Bei Untersuchungen von schlechten Koinzidenzraten - hier das Verhältnis der Anzahl von koinzidenten Signalen zu der Anzahl von Signalen pro einzelner Messrichtung - trat folgendes Problem auf. Eine parallele Auswertung der gleichen Serie von verrauschten Signalen in zwei verschiedenen Countern lieferte zwar im Mittel für beide Counter die gleiche Validation, die Gültigkeit der Einzelsignale kann aber für beide Counter durchaus verschieden sein. In einem Beispiel bedeutet dies, daß ein verrauschtes Signal eines Teilchens aus einer Messrichtung in einem Counter als gültig ausgewertet und dasselbe Signal in einem zweiten Counter als ungültig verworfen wird. Dies ist nicht auf die Güteunterschiede der Counter zurückzuführen, denn im Mittel zeigen beide Counter die gleiche Zahl von gültigen Signalen an.

Diese, wie wir es nannten, "Selbstkoinzidenzrate" (Anzahl von gleichzeitig gültigen Auswertungen eines Signals in zwei Countern zu der Anzahl von gültigen Auswertungen in den einzelnen Countern), fiel bei Tests zum Teil unter 30%. Betrachten wir die Signale eines Teilchens für die verschiedenen Messrichtungen, so fällt bei schlechtem Signal-/Rauschverhältnis nach einer einfachen Abschätzung, wobei in erster Näherung alle sonstigen Justierungen mit 100% Güte angenommen werden (was sicher nicht der Fall ist), die Wahrscheinlichkeit ein Teilchen im gemeinsamen Messvolumen für alle drei Messrichtungen

gültig und koinzident zu detektieren, auf unter 3% (bezogen auf die Anzahl der gültigen Detektionen der Teilchen pro einzelner Messrichtung).

Experimentelle Tests zeigten, daß unter Verwendung von Countern bei fallendem Signal-/Rauschverhältnis des Signals oben beschriebener Wahrscheinlichkeit auch weit unter 1% fallen kann. Dies ist verständlich, da die Güte und die Anzahl der Signale für die verschiedenen Messrichtungen sehr verschieden ist (z.B. ist für die Messrichtungen mit unterschiedlichen Wellenlängen für das Laserlicht die Leistung in den Strahlen sehr unterschiedlich, vgl. auch unten: Beschreibung des Gesamtsystems).

Verbesserungsmöglichkeiten des Velocimeters zu diesem Thema sind unter Abschnitt VIII ausgeführt.

Wahl der Messrichtungen

Die Komponenten der Geschwindigkeit in Messrichtung werden für alle Messrichtungen auf 1% genau bestimmt. Die Genauigkeiten der Geschwindigkeitskomponenten nach der Transformation in ein orthogonales Koordinatensystem sind von der Wahl der Messrichtungen abhängig.

Abb. 3 zeigt die Lage der Messrichtungen (Einheitsvektoren in Messrichtung) bei der Messung am Doppelrumpfmodell. Messrichtung 1 liegt in Richtung der x-Achse, so daß die axiale Geschwindigkeitskomponente direkt bestimmt wird.

Messrichtung 2 liegt in der y-z-Ebene mit einem Winkel zur z-Achse von 5° . Eine Messung genau in Richtung der z-Achse hätte eine genauere Bestimmung der Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung ermöglicht. Ohne Drehung der Messrichtung um 5° wären aber Messungen im Wandbereich unterhalb von waagerechten Abschnitten der Schiffshülle nicht möglich.

Bei der Auswahl von Messrichtung 3 in der y-z-Ebene mußte zwischen dem Auflösungsvermögen in y-Richtung und der mechanischen Stabilität und Handhabung des Messkopfes abgewogen werden. Von Seiten der Mechanik wurden Winkel zwischen Messrichtung 2 und 3 im Bereich von 15° bis 30° vorgesehen. Im beschriebenen Aufbau betrug der Winkel zwischen den Messrichtungen 2 und 3 25° , somit der Winkel von Messrichtung 3 zur z-Achse 30° .

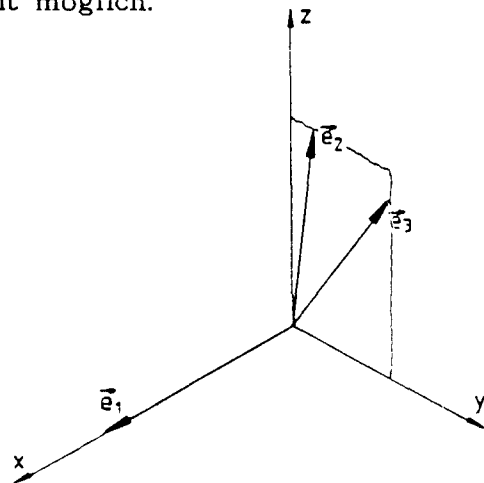


Abb. 3 Lage der Messrichtungen

Die sich ergebende geringere Auflösung in y-Richtung ist im Abschnitt "Genauigkeiten und Grenzen des Velocimeters" näher ausgeführt.

Beschreibung des Gesamtsystems

Die optischen Module des Velocimeters sind in zwei Gruppen zu gliedern. Ein fester Teil der Optik mit den schwereren Modulen und ein beweglicher Meßkopf. Abb. 4 zeigt eine Gesamtansicht der optischen Komponenten. Als Laser wird ein INNOVA 70-4 von Coherent verwendet, die optischen Module sind im wesentlichen Teile aus einer 9100-12 Optik von TSI.

Im festen Teil wird der Laser mit einer Leistung von 2 W (all line) in der TEM₀₀ Mode betrieben. Durch ein Doppelprisma im Strahlteiler wird der Strahl nach seinen Wellenlängen aufgespalten. Die drei leistungsstärksten Farben grün (514,5 nm), grünblau (488 nm) und blau (476 nm) sind auf drei verschiedene optische Achsen einjustiert. Die Strahlen aller drei Farben durchlaufen danach folgende Komponenten: Polarisationsdreher ($\lambda/2$), Strahlteiler, Braggzellen und Einkopplung in die Glasfaser. Innerhalb dieser Module wird die optische Achse von grün parallel versetzt, so daß das grüne und das grünblaue Strahlenpaar um 90° gegeneinander verdreht sind, aber eine gemeinsame optische Achse besitzen.

Im beweglichen Messkopf werden die sechs Strahlen nach der Auskopplung aus den Glasfasern zunächst parallel versetzt. Der Strahlabstand der Paare beträgt vor der Aufweitung jeweils 22 mm. Der Aufweitungsfaktor beträgt 3,75. Die Frontlinsen haben eine Brennweite von 1,2 m. Das Streulicht wird in Rückwärtsstreuung 25° "off axis" empfangen, d.h. jede der beiden Einheiten des Messkopfes empfängt das Streulicht der Farben, welche die andere Einheit sendet.

Der Betrieb des Velocimeters mit drei Farben für drei Messrichtungen hat sich bewährt. Die Trennung der Signale aus den verschiedenen Messrichtungen durch die Interferenzfilter ist gut möglich. Probleme mit der Leistungs- oder Modenkonzanz des Lasers bei Verwendung von drei Farben traten nicht auf.

Zur Signalverarbeitung werden drei Counter vom Typ 1980B von TSI benutzt. Die Elektronik zur Kontrolle der Koinzidenz der Signale wurde im IfS entwickelt.

Die Messwerterfassung erfolgt mit einem PC (IBM XT 286). Die Software zur Steuerung der Messung wurde im IfS erstellt (vgl. Anhang IV); sie enthält neben der Steuerung der Counter auch die Kontrolle des Windkanals und die Positionierung des Messpunktkoordinaten. Nach Vorgabe eines Messpunktstarters erfolgt die Steuerung der Messung vollautomatisch. Die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse wird nach Übertragung der Rohdaten auf dem Rechner VAX des IfS durchgeführt.

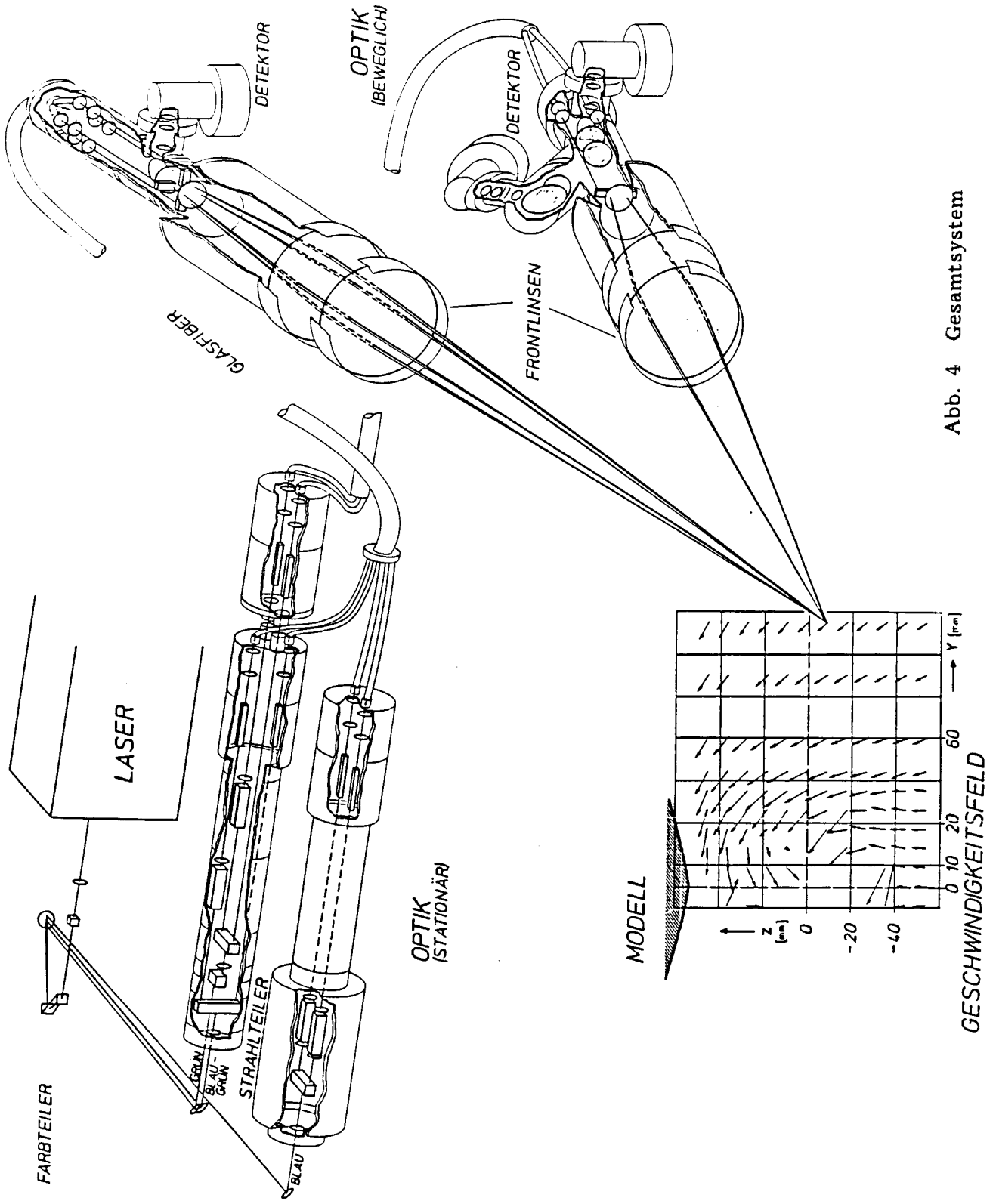


Abb. 4 Gesamtsystem

Genauigkeiten und Grenzen des Velocimeters

In einer Genauigkeitsabschätzung bei der Ausmessung eines Strömungsfeldes sind einerseits die Größe und Positioniergenauigkeit des Messvolumens, andererseits die Genauigkeit bei der Bestimmung der gemessenen Geschwindigkeitskomponenten entscheidend.

Eine experimentelle Bestimmung der Größe des Messvolumens ergab eine Länge von 0.25 mm und eine Breite von 0.1 mm. Dies räumliche Auflösungsvermögen könnte bei Bedarf noch verbessert werden. Dadurch würde aber auch die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt eines Teilchens durch das Messvolumen verkleinert und damit die Messzeit bei gleicher statistischer Genauigkeit vergrößert werden.

Die Positionierung des Messvolumens relativ zum Modell ist auf 0.1 mm genau möglich, wobei die untere Grenze der Genauigkeit durch die Einstellung des Koordinatenursprungs am Modell festliegt. Die Genauigkeit der einzelnen Messpunkte zueinander ist besser als 0.1 mm.

Die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeitskomponenten in Messrichtung ist auf 1% möglich. Die Schwankungsbreiten sind in Messrichtung auf 5% genau bekannt. Für die Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten im orthogonalen System ergeben sich abhängig von den Messrichtungen (vgl. oben) nach Fehlerrechnung folgende relative Fehler: Für die Geschwindigkeit in x-Richtung 1%, in y-Richtung 4% und in z-Richtung 1.2%.

Hierbei ist berücksichtigt, daß die Bestimmung der Lage der Messrichtungen selbst auf drei verschiedene Arten durchgeführt wurde und die Ergebnisse weniger als 1% voneinander abwichen.

Vor den Messungen in Wandnähe wurde untersucht, wie nahe der Messpunkt an der Wand liegen durfte, bevor die Wandreflexe die Meßsignale überdeckten. Die Genauigkeit der Berechnung der Schwankungsbreite im orthogonalen System ist in Anhang III detailliert ausgeführt.

Bei diesen Untersuchungen wurde das Messvolumen wenige Millimeter vor einer Wand positioniert. Wurden die Wandreflexe noch verringert, z.B. durch Schwärzen der Modellwand oder durch Auftragen einer fluoreszierenden Farbe, so konnten Ergebnisse für die Messung in den einzelnen Messrichtungen noch 3 mm vor der Wand erhalten werden.

Da hierbei das Signal/Rausch-Verhältnis stark abnimmt und die Validation fällt, geht die Datenrate für koinzidente Messungen (vgl. oben) schon 5 Millimeter vor der Wand gegen null. Die für eine sinnvolle statistische Auswertung notwendige Zahl von koinzidenten Messungen ist in unmittelbarer Wandnähe mit der verwendeten Art von Elektronik in einer akzeptablen Messzeit (max. 30 Minuten pro Punkt) nicht zu erhalten.

Einige Verbesserungsvorschläge für die optischen und elektronischen Komponenten sind im Kap. VIII aufgeführt.

VI Messungen im Windkanal

Alle in diesem Bericht dargestellten Größen wurden normiert aufgetragen. Die mittleren Geschwindigkeiten wurden auf die Anströmgeschwindigkeit normiert. Die Komponenten des Reynoldstensors sind auf das Quadrat der Anströmgeschwindigkeit bezogen.

VI.1 Messungen im ersten Bewilligungszeitraum

Als Vergleich zu früheren Messungen mit unterschiedlichen Messverfahren (LDV, Drucksonden) wurde im Nachstrom die Ebene $x = 0$ mm aufgemessen. Im Referenzprofil $z = -18$ mm zeigt sich (Abb. 5) in dieser Ebene ein starker Abfall der axialen Komponente der mittleren Geschwindigkeit zur Mitte des Schiffes hin bei gleichzeitigem Anstieg der Schwankungskomponente in axialer Richtung (Abb. 6). Frühere Drucksondenmessungen sowie frühere LDV Messungen konnten keinen Einblick in das Gebiet mit erwarteter Rückströmung geben. Die Geschwindigkeitsprofile dieser früheren Messungen brechen bei ca. $y = 18$ mm ab. Die Messungen von 1986 zeigen sehr gute Übereinstimmung mit den früheren Messungen für größere y -Werte und vor allem den erwarteten Verlauf des Profils.

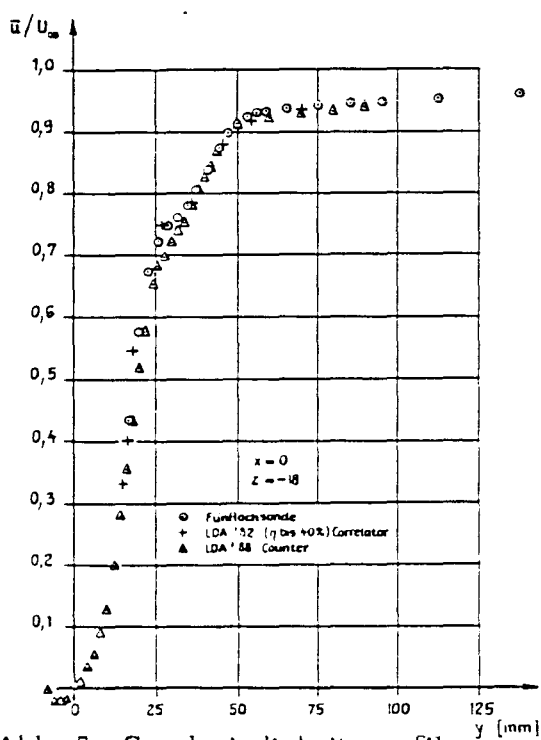


Abb. 5 Geschwindigkeitsprofile

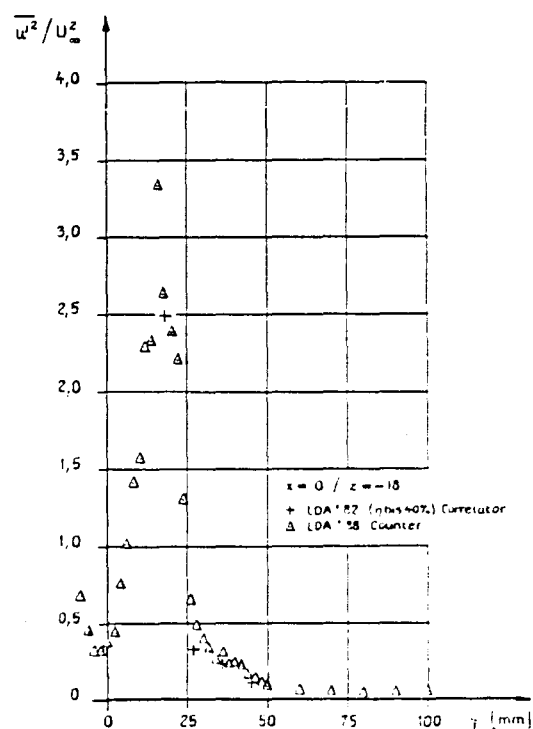


Abb. 6 Turbulenzprofile

In der Isoliniendarstellung (Abb. 7) der axialen Komponente der mittleren Geschwindigkeit in der Ebene $x = 0$ mm zeigt sich im Bereich unterhalb der Stevenguß ($-6 \text{ mm} < y < 6 \text{ mm}$; $-20 \text{ mm} < z < 0 \text{ mm}$) ein Gebiet mit Rückströmung in den mittleren Geschwindigkeiten. Der lokale Turbulenzgrad (6) erreicht an einzelnen Meßpunkten Werte von über 3000%.

Da diese Messungen mit einem Einkomponenten LDV-System durchgeführt wurden, wären zur vollständigen Bestimmung aller Reynoldsspannungen sechs Messungen mit unabhängigen Messrichtungen an jedem Messpunkt notwendig gewesen. Zu dieser Zeit wurde, wie oben erwähnt, das Velocimeter für drei Komponenten bewilligt. Mit Hinblick auf baldige Messungen unter Einsatz des Dreikomponenten LDV-Systems, mit welchem alle sechs Komponenten des Reynoldstensors mit einer Messung bestimmt werden können, wurde Anfang 1987 auf weitere Messungen einzelner Komponenten des Reynoldstensors mit dem Einkomponenten LDV-System verzichtet.

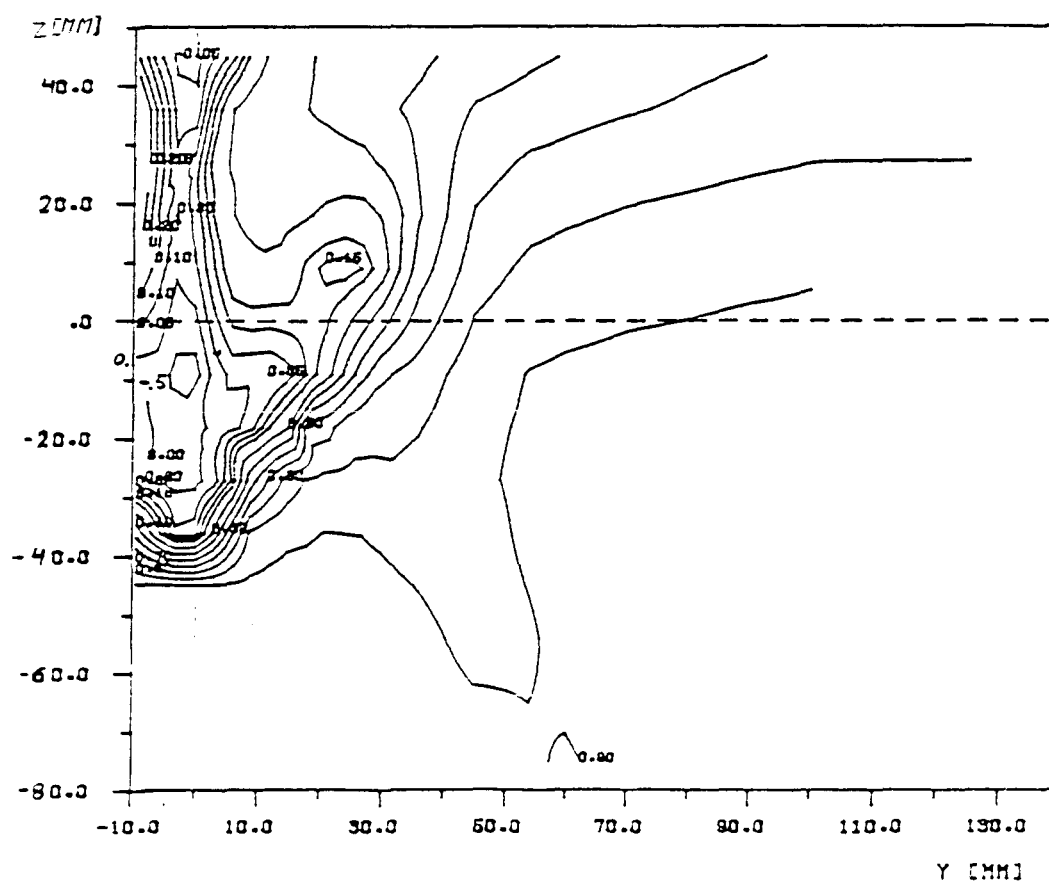


Abb. 7 Axiale Komponente der mittleren Geschwindigkeit

VI.2 Messungen im zweiten Bewilligungszeitraum

Nach Durchführung aller Vorversuche wurden von Januar bis März 1988 im Windkanal des IfS erste Versuche mit dem Dreikomponenten-Velocimeter am Doppelrumpfmodell durchgeführt. Hierbei trat die Forderung an die Justierung für koinzidente Messungen (kurz Koinzidenzjustierung) als wichtiger Zeitfaktor auf. In der ersten Zeit konnten nur koinzidente Datenraten (vgl. Kap. V) von ca. 1 Hz erreicht werden, obwohl die Datenraten der einzelnen Counter mit 100 Hz als ausreichend angesehen wurden. Erst nach der Entwicklung neuer Vorgehensweisen für die Koinzidenzjustierung wurden im März 1988 und vor allem ab 1989 koinzidente Datenraten von über 15 Hz erreicht.

Die Bestimmung der Komponenten des Reynoldstensors erfolgt aus der dreidimensionalen Verteilung der Geschwindigkeit (vgl. Kap. VII). Zur ausreichend genauen Bestimmung dieser statistischen Geschwindigkeitsverteilung werden an jedem Messpunkt insgesamt 1000 koinzidente Messungen aufgenommen. Wegen der geringen Datenrate ergab sich Anfang 1988 eine Messzeit von 5 bis zu 15 min pro Messpunkt.

Die Größenordnung der Strukturen der Strömung am Modell und die Forderung der Differenzierbarkeit der Messergebnisse ließ ein Messpunktraster von 2 mm Gitterabstand sinnvoll erscheinen. Wegen der Vielzahl von Messpunkten in einem derart feinen dreidimensionalen Raster war bei oben beschriebener Messzeit pro Punkt eine Beschränkung der Messung auf kleine ausgewählte Gebiete am Modell notwendig.

Aus Ölanstrichversuchen (vgl. Abb. 2) wurden 4 Gebiete mit unterschiedlichen Charakteristika der Strömung ausgewählt.

Gebiet 1 - im Totwasser

- 2 - im axialen Wirbel, wo der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und dem Vektor der Rotation groß ist
- 3 - wo das Anstrichbild auf punktförmige Ablösung hindeutet
- 4 - in der ungestörten Grenzschicht

In den verschiedenen Gebieten - im folgenden auch Quader genannt - konnte bis ca. 6 mm an die Modellwand heran gemessen werden. In kleineren Wandabständen wurde das Signal/Rausch-Verhältnis so klein, daß mit der vorhandenen Auswerteelektronik Messungen nicht möglich waren.

VII Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Zur Auswertung der 1000 Einzelmessungen mit koinzidenter Bestimmung aller drei Geschwindigkeitskomponenten wird an die Geschwindigkeitsverteilung eine dreidimensionale Gaußverteilung /13/ angepaßt. Hieraus ergeben sich als Schwerpunkte die mittleren Geschwindigkeiten und als Schwankungsbreite bzw. deren Korrelaton die sechs Komponenten des Reynoldstensors. Ausreißer in den Einzelmessungen, bei denen der momentane Wert einer Komponente um mehr als 3σ vom Mittelwert abwich, wurden für die Folgeauswertung nicht berücksichtigt.

Die einzelnen Messungen wurden mit dem Betrag des momentanen Geschwindigkeitsvektors gewichtet (velocity-bias Korrektur) /14/. Gerade in Totwasser-gebieten mit mittlerer Geschwindigkeit gegen null zeigt sich ohne velocity-bias Korrektur eine schiefssymmetrische Geschwindigkeitsverteilung. Abb. 8 und 9 zeigen eine Komponente einer gemessenen Geschwindigkeitsverteilung mit bzw. ohne velocity-bias Korrektur und jeweils zwei Gaußkurven. Eine Kurve als Startwert der Gaußanpassung und eine als deren Ergebnis.

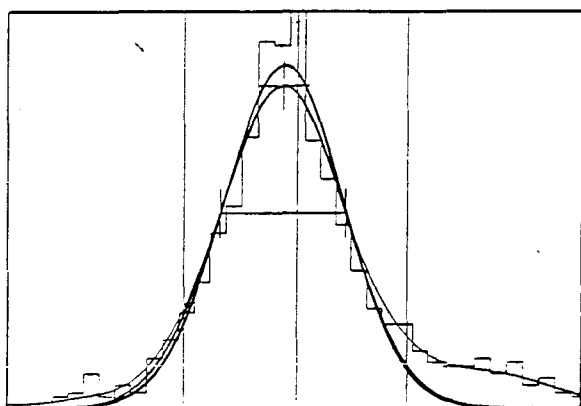


Abb. 8 Geschwindigkeitsverteilung
ohne velocity-bias Korrektur

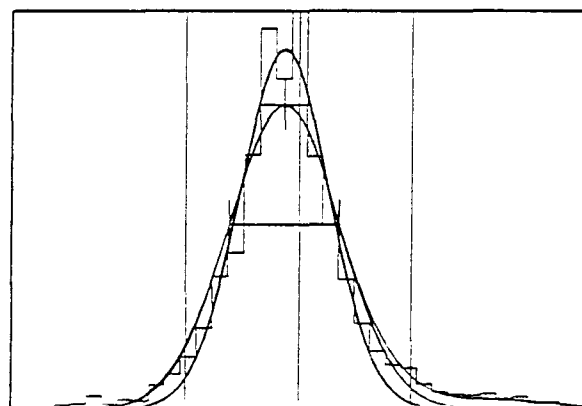


Abb. 9 Geschwindigkeitsverteilung
mit velocity-bias Korrektur

Für die Komponenten des Vektors der mittleren Geschwindigkeit wurden je alle drei räumlichen Ableitungen berechnet /15/.

Die gezeigten Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeit, der turbulenten Schwankungsgrößen und der Ableitungen wurden nicht geglättet.

Im folgenden sind Ergebnisse verschiedener Strömungsgrößen aus Quader 1 dargestellt. Für Ergebnisse aus anderen Quadern sei auf die Literatur /15/ und /16/ verwiesen. Abb. 10 zeigt eine Ansicht des Hinterschiffbereichs mit der Ebene $x = -19$ mm und der Lage des Quaders 1. Messungen aus 1986 zeigten unterhalb der Stevenguß in diesem Quader ein Totwasser mit hohem Turbulenzgrad.

Abb. 11 zeigt Isolinien der axialen Komponente der mittleren Geschwindigkeit und Vektoren der Quergeschwindigkeiten in der Ebene $x = -2$ mm. Der Bereich mit negativen Größen der axialen Komponente, wie 1986 gefunden (vgl. Abb. 7), wird durch diese Messung bestätigt. Der starke Geschwindigkeitsgradient ab $y = 4$ mm zeigt die Abgrenzung des Totwassers zur Außenströmung. Hier ist zudem in den Quergeschwindigkeiten ein Wirbel zu erkennen. Die Verschiebung der Symmetrieachse von $y = 0$ mm auf -3 mm ist seit mehreren Jahren bekannt. Das Modell ist im Hinterschiffbereich geringfügig deformiert.

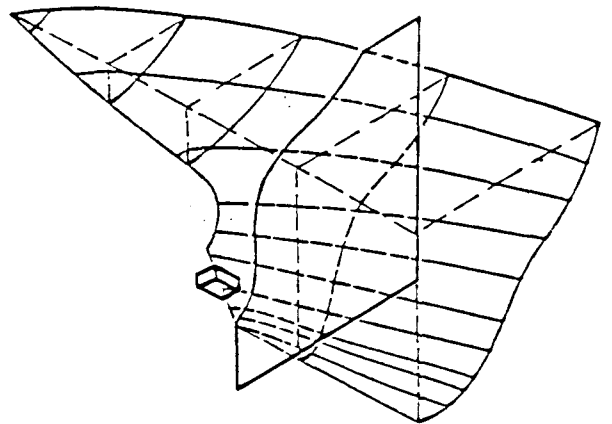


Abb. 10 Ansicht Hinterschiff mit Ebene $x = -19$ mm und Quader 1

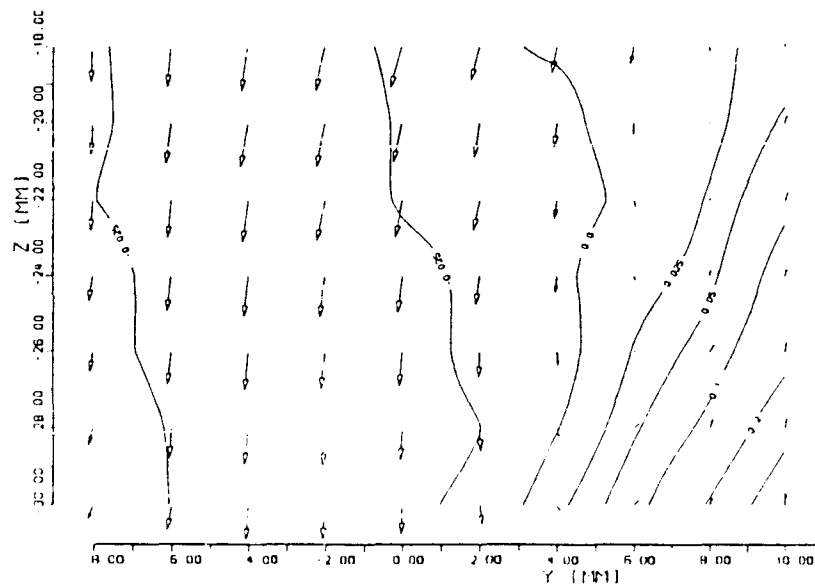


Abb. 11 Isolinien der axialen Komponente und Vektoren der Querkomponenten der mittleren Geschwindigkeit

In einer Längsebene bei $y = 8$ mm (Abb. 12) zeigt sich ein Wirbel mit einer Achse in y -Richtung in einer Größenordnung von wenigen Millimetern. Gerade dieses Ergebnis zeigt, daß die Annahme einer stationären Strömung gerechtfertigt ist, da die Punkte mit verschiedenen x -Koordinaten an verschiedenen Tagen aufgemessen wurden. Die gezeigte Ebene liegt im Bereich des Wirbels ca. 4 mm von der Modellwand entfernt. Die Wirbelachse steht beinahe senkrecht auf der Wand. Die Annahme einer punktförmigen Ablösung liegt nahe. Eine experimentelle Untersuchung näher an der Wand konnte wegen fallendem Signal-Rausch-Verhältnis jedoch nicht durchgeführt werden.

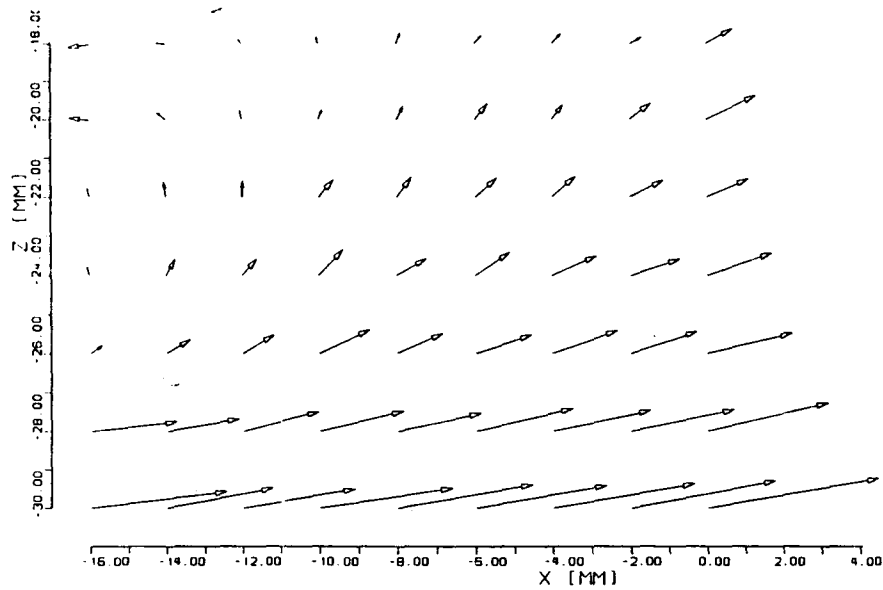


Abb. 12 mittlere Geschwindigkeit in einer Längsebene $y = 10$ mm

Die Geschwindigkeiten in der Mittschiffsebene (Abb. 13) zeigt unmittelbar unter der Stevennuß an der Modellwand eine Abwärtsströmung entgegen der

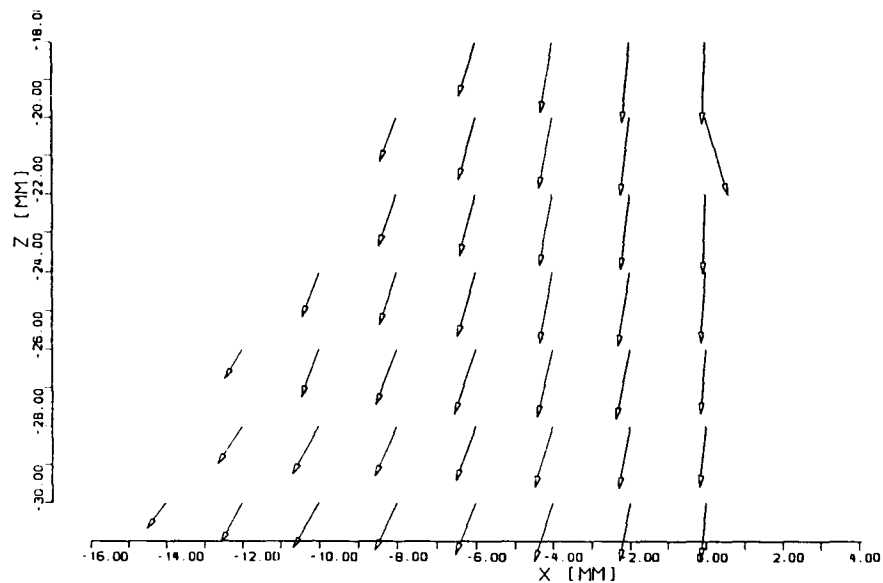


Abb. 13 mittlere Geschwindigkeit in der Mittschiffsebene ($y = 0$ mm)

Anströmung, wohingegen sich weiter von der Wand entfernt (z.B. in Abb. 12) die Außenströmung mit einer Aufwärtsströmung in Hauptströmungsrichtung durchsetzt. Unter der Stevenguß befindet sich ein Wirbel mit einer Achse in y -Richtung.

Schwankungsgrößen können zunächst als Verteilung einzelner Komponenten des Reynoldstensors betrachtet werden. Abb. 14 und 15 zeigen die Diagonalelemente $\overline{v_1'^2}$ und $\overline{v_3'^2}$ in Abb. 16 ist das Nichtdiagonalelement $\overline{v_2'v_3'}$ gezeigt. In Abb. 17 die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie k .

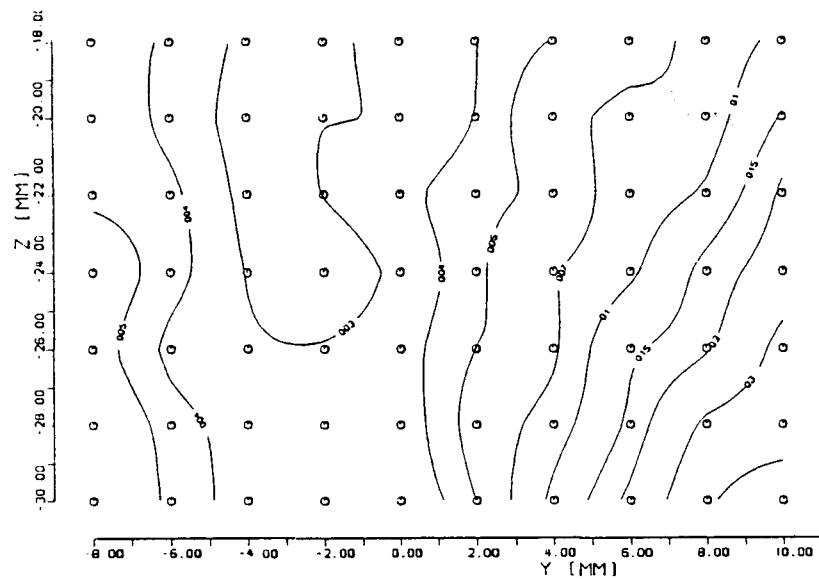


Abb. 14 $\overline{v_1'^2} / U_0^2$ in der Ebene $x = -2$ mm

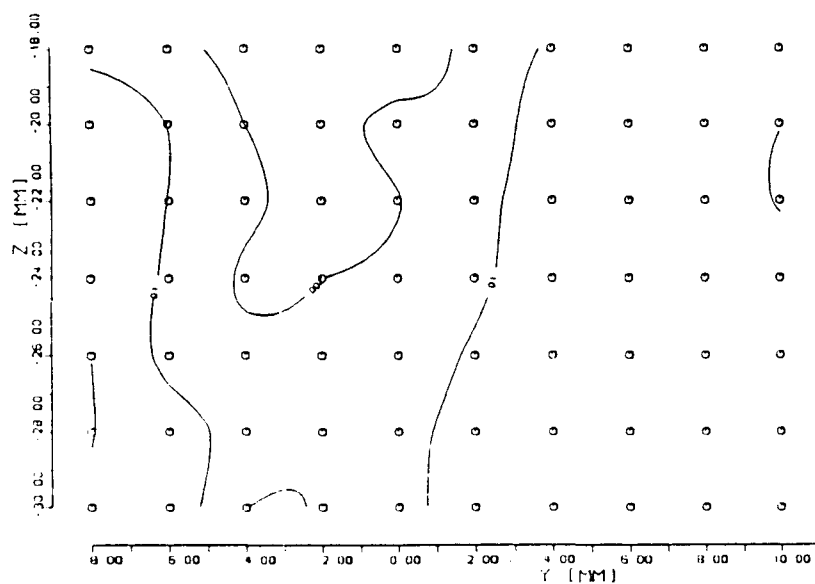


Abb. 15 $\overline{v_3'^2} / U_0^2$ ($x = -2$ mm)

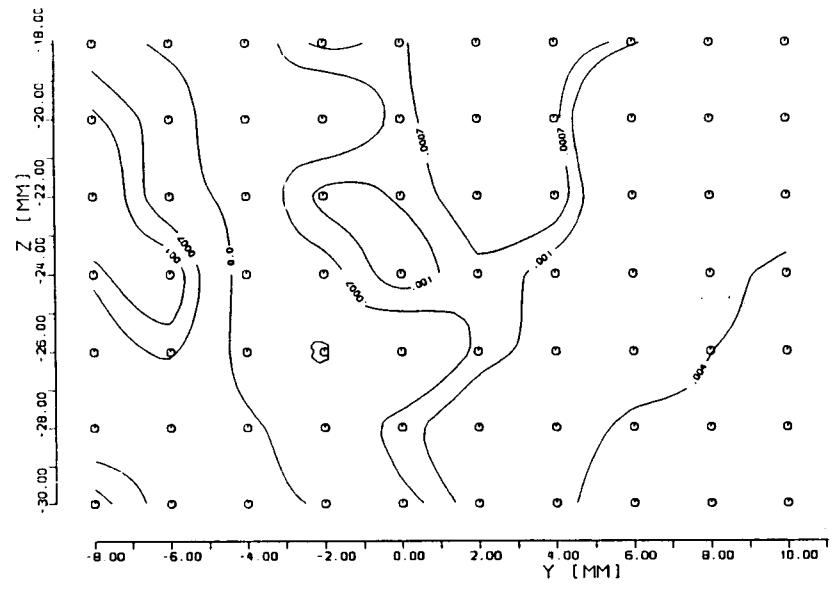


Abb. 16 $\overline{v'_2 v'_3} / U_0^2$ ($x = -2$ mm)

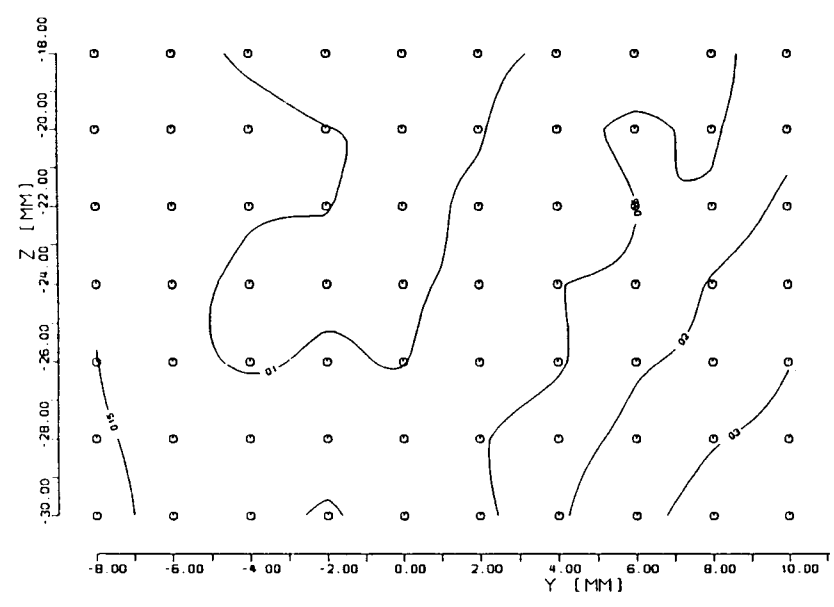


Abb. 17 turbulente kinetische Energie k ($x = -2$ mm)

Für die experimentelle Prüfung der Gültigkeitsbereiche verschiedener Turbulenzmodelle ist die Betrachtung des Reynoldstensors in seinen einzelnen Komponenten fraglich. Diese können zwar einzelnen Komponenten des Gradiententensors (2) gegenübergestellt werden (Abb. 18), jedoch sind die Komponenten beider Tensoren abhängig vom Koordinatensystem.

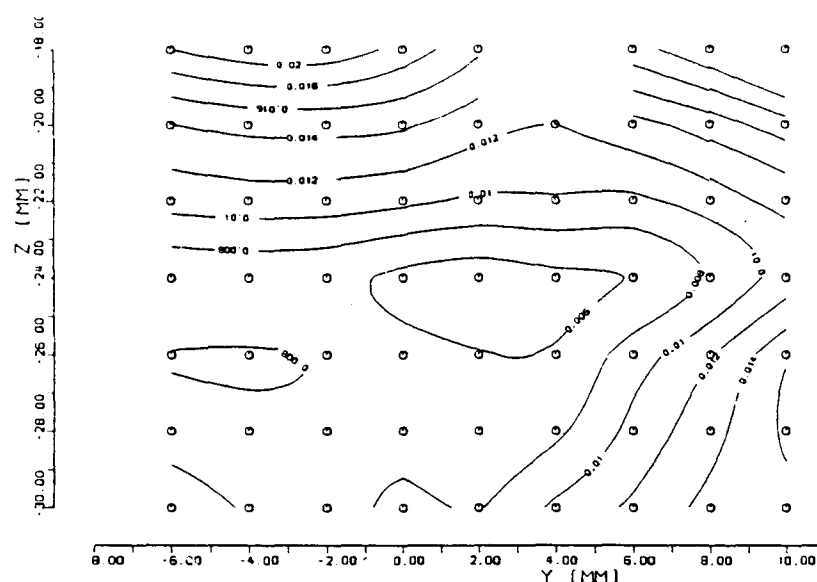


Abb. 18 \bar{v}_{111} , erstes Element des Gradiententensors ($x = -2$ mm)

Zum besseren Verständnis der räumlichen Struktur dieser Tensoren erscheint eine Untersuchung ihrer Invarianten notwendig. Hier wurden beide Tensoren auf ihre Hauptachsen transformiert. Von den drei sich ergebenden Eigenvektoren ist für die folgenden Abbildungen nur jeweils einer pro Messpunkt ausgewählt worden. In perspektivischer Darstellung sind die Eigenvektoren des Gradiententensors (Abb. 19) und des Reynoldstensors (Abb. 20) mit den jeweiligen Projektionsvektoren auf die gezeigte Ebene dargestellt. Im eddy-viscosity Turbulenzmodell (4) werden z.B. für beide Tensoren gleiche Eigenrichtungen postuliert.

Aussagen über Gültigkeitsbereiche des eddy-viscosity Turbulenzmodells aufgrund von Eigenvektorbetrachtungen beider Tensoren sind sicher erst nach vergleichenden Untersuchungen in Gebieten mit unterschiedlichen Strömungscharakter möglich (vgl. VI.2). Das experimentelle Datenmaterial für diese Untersuchungen wurde in diesem Vorhaben erstellt. Detaillierte Auswertungen werden folgen.

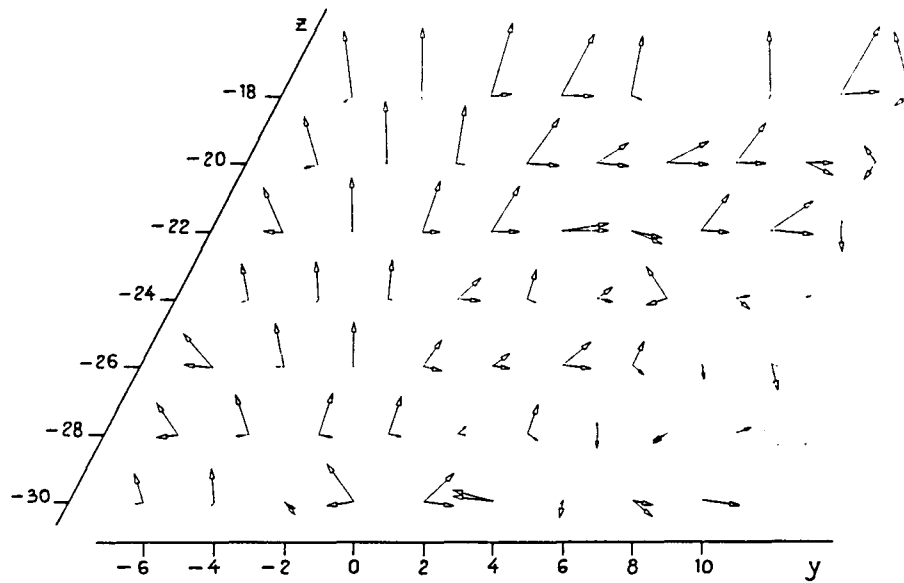


Abb. 19 Eigenvektoren des Gradiententensors

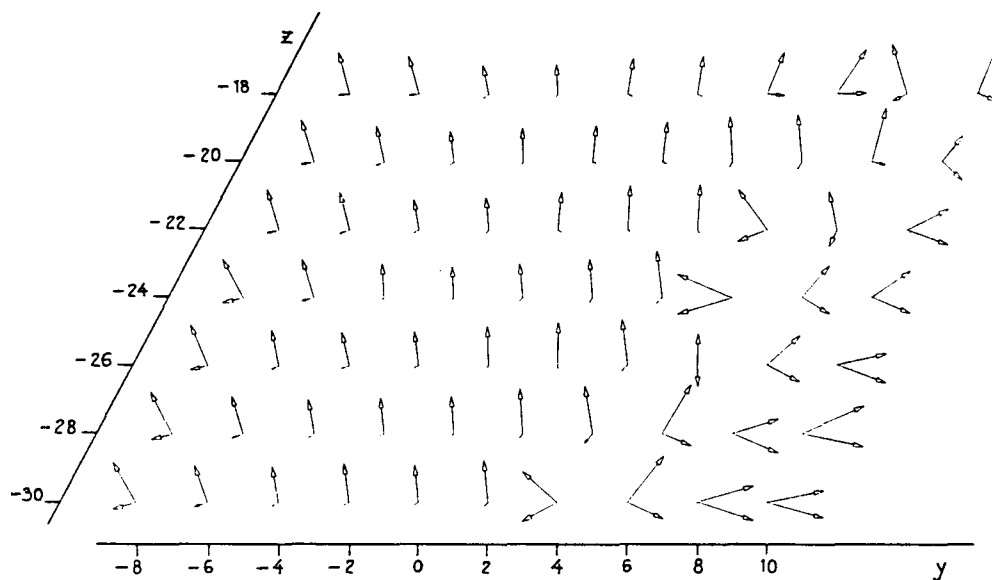


Abb. 20 Eigenvektoren des Reynoldstensors

VIII Ausblick

Mit dem entwickelten Dreikomponenten LDV-System können Strömungsfelder im Windkanal in einer sehr hohen räumlicher Auflösung aufgemessen werden. Der Vektor der mittleren Geschwindigkeit sowie alle sechs Komponenten des Reynoldstensors können experimentell bestimmt werden. Für die Komponenten der mittleren Geschwindigkeit können die räumlichen Ableitungen berechnet werden.

Auswertungen der experimentellen Daten, die im Rahmen dieses Vorhabens erstellt wurden, zeigen, daß das Datenmaterial in seiner Genauigkeit für die direkte Prüfung von Termen aus verschiedenen Turbulenzmodellen geeignet ist. Die Auswertung des umfangreichen Datenmaterials ist bis zur Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen.

Das Laser-Velocimeter ist für die gleichzeitige Bestimmung der drei Geschwindigkeitskomponenten geeignet. Die geforderten Genauigkeiten in der Auflösung der Komponenten der mittleren Geschwindigkeit sowie deren turbulente Schwankungsgrößen sind von dem Laser-Velocimeter erfüllt worden.

Messungen in wandnahen Bereichen sind bis ca. 6 mm vor einer Wand möglich. Bei kleineren Wandabständen (Wandabstand in Strahlrichtung) ist eine Signalverarbeitung mit Countern wegen der Wandreflexe nicht praktikabel. Die "koinzidente" Datenrate geht in Wandnähe gegen null.

Wie aus verschiedenen Untersuchungen bekannt ist, sind in Grenzschichten wenige Streuteilchen vorhanden. Dies ist aber nicht der Hauptgrund für die geringe "koinzidente" Datenrate. Einige Untersuchungen in wandnahen Bereichen ergaben unter Verwendung von Countern z.B. trotz stark verrauschter Signale eine ausreichende Datenrate von ca. 30 Detektionen pro Sekunde für einzelne Messrichtungen. Die "koinzidente" Datenrate lag jedoch unter 1 pro Sekunde. Es zeigte sich, daß mit hoher Wahrscheinlichkeit das Signal eines Teilchens für alle drei Messrichtungen die geforderte Minimalintensität erreichte (d.h. die Triggerschwelle der Counter wurde überschritten), wegen der schlechten Signalqualität wurde das Signal aber häufig von mindestens einem Counter verworfen und damit nicht als "koinzidentes" Signal anerkannt.

Für die Auswertung derart verrauschter Signale sind aus der Literatur und auch aus Untersuchungen im IfS verschiedene Vorgehensweisen bekannt. Es bieten sich u.a. Korrelationstechniken oder Fourieranalysen zur Frequenzbestimmung der Dopplersignale an. Ab 1989 wurde von verschiedenen Herstellern eine neue vielversprechende Generation von Auswerteelektroniken für LDV Signale mit beiden genannten Techniken vorgestellt. Da diese Geräte Signale mit schlechtem Signal-/Rauschverhältnis verarbeiten können, scheint eine eigene Entwicklung einer derartigen Signalverarbeitung nicht angebracht.

Die Güte der Signale ist für unterschiedliche Messrichtungen verschieden. Dies ist u.a. durch die Anordnung der optischen Module oder auch durch die unterschiedliche Leistung des Lasers auf verschiedenen Wellenlängen bedingt. Daher vergrößert eine Verbesserung der Signalverarbeitung die "koinzidente" Datenrate auch dann, wenn diese Verbesserung zunächst für einzelne "schwache" Messrichtungen vorgenommen wird.

Die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten und die Bestimmung der Diagonalelemente des Reynoldstensors ist auch in wandnahen Bereichen möglich, da hierfür keine "koinzidenten" Messungen notwendig sind.

Literatur

- /1/ K. Wieghardt, J. Kux, "Nomineller Nachstrom auf Grund von Windkanalversuchen", Schiffbautechnische Gesellschaft, Jahrbuch 1980, Band 74
- /2/ T. Knaack, J. Kux, K. Wieghardt., "On the Structure of the Flow Field on Ship Hulls", Osaka Int. Colloquium on Ship Viscous Flow, Osaka, 1985
- /3/ V. G. Patel, " Ship Stern and Wake Flows: Status of Experiment and Theory", 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, Den Haag, 1988
- /4/ T. Cebeci, S. Wenhan, "Separation of three-dimensional laminar boundary layers on a prolate spheroid", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 191, pp. 47-77. 1988
- /5/ L. Larsson, editor: SSPA-ITTC Workshop on Ship Boundary Layers 1980. Proceedings, S-162 Vaellingby, Sweden
- /6/ H.P. Hoffmann, "Untersuchung der 3-dimensionalen, turbulenten Grenzschicht an einem Schiffsdoppelmodell im Windkanal", IfS Bericht Nr. 343, 1976
- /7/ T. Knaack, "Laser-Doppler velocimetrische Messungen an einem Schiffsdoppelmodell im Windkanal", IfS Bericht Nr. 439, 1984
- /8/ F. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, "Principles and Practice of Laser-Doppler- Anemometry", Academic Press, London, New York, 1981
- /9/ D. Pallek, "Fast digital data acquisition and analysis of LDA signals by means of a transient recorder and an array processor", Proceedings of the ICIA SF '85 record, Stanford University, August 1985
- /10/ S. L. Kaufman, "Fiber Optics in LDV Applications", International Conference on Laser Anemometer - Advances and Applications, Manchester, UK, December 1985
- /11/ J. B. Abbiss, "Photon Correlation Velocimetry in Aerodynamics"; in H. Z. Cummins, E. Pike, "Photon Correlation Spectroscopy and Velocimetry", Plenum Press, 1977
- /12/ R. C. Hastings, K. G. Moreton, "An investigation of a separated equilibrium turbulent boundary layer", Proceedings of the International Symposium on Applications of LDA to Fluid Mechanics, Lisbon, 1982
- /13/ K. S. Miller, "Multidimensional Gaussian Distributions", New York, 1964

- /14/ D. K. Mc Laughlin, W. G. Tiedermann, "Biasing Correction for Individual Realisation of Laser Anemometer Measurements in Turbulent Flow", in The Physics of Fluids, Vol. 16. 1973
- /15/ K. Wieghardt, "On a feature of threedimensional free turbulence", 12th Georg-Weinblum-Lecture, Washington D. C., 11.4.1990
- /16/ T. Knaack, J. Kux, K. Wieghardt, "Theoretical Analysis of the Detaching Turbulent Three-Dimensional Flow in the Stern Region of a Hull", Tenth Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, 1989
- /17/ T. Oboka, "Application of Laser Doppler Anemometer with Fiber Optics to an Internal Combustion Engine", ISAE Review, April 1985
- /18/ J. D. C. Jones, "Design of fibre-optic systems for Doppler difference laser spectroscopy", paper no. 6.6, Lisbon LDA Symposium, 1988
- /19/ I. Szabo, "Höhere technische Mechanik", Springer Verlag, 1977

Nomenklatur

A	Amplitude der Gaußverteilungsfunktion (s.a. Index C, M)
C	(als Index) bezeichnet eine Größe unter Berücksichtigung des Frequenzfehlers
C	Frequenzfehlertensor
E	Transformationsmatrix vom orthogonalen Koordinatensystem in das Messkoordinatensystem
ER1, ER2	Eigenrichtungen der Schwankungsellipse
\vec{e}_1	Einheitsvektor in Messrichtung
G	Gaußverteilungsfunktion (s.a. Index C, M); $G(v)$ eindimensional; $G(\vec{v})$ dreidimensional
M	(als Index) bezeichnet eine Größe in Messrichtung
$M_1(t)$	Zeitabhängige Geschwindigkeitskomponente in Messrichtung \vec{e}_1 ; \overline{M}_1, M_1' (zeitliches Mittel, Schwankungsgröße vgl. v_1)
M1, M2	Werte einer Geschwindigkeitskomponente in Messrichtung
\overline{p}	Druck, zeitlich gemittelt
R	Reynoldstensor
T	Integrationszeit für die Mittelwertbildung
U_0, U_∞	Anströmgeschwindigkeit
V	Gradiententensor
$v_1(t)$	Zeitabhängige Komponente der Geschwindigkeit im orthogonalen Koordinatensystem
\overline{v}_1	Komponente der mittleren Geschwindigkeit
v_1'	Komponente der Geschwindigkeitsschwankung
$\overline{v_1' v_1'}$	Komponente des Reynoldstensors
$\overline{v_{1j}}$	Räumliche Ableitung einer Komponente der mittleren Geschwindigkeit Komponente des Gradiententensors
x, y, z	Orthogonale Koordinaten

Δt	Zeitversatz zwischen zwei Signalen verschiedener Messrichtungen
Δt_K	"Koinzidenzintervall": Zeitintervall als obere Grenze für Δt , in dem zwei Signale als zeitgleich (koinzident) betrachtet werden
η_M	Lokaler Turbulenzgrad in Messrichtung
ν	Kinematische Zähigkeit
ν_D	Dopplerfrequenz
ν_M	Messfrequenz
ν_S	Shiftfrequenz
ν_t	Turbulente Scheinzähigkeit (eddy viscosity)
$\bar{\rho}$	Dichte, zeitlich gemittelt
σ	Korrelationstensor der Gaußverteilungsfunktion (s.a. Index C, M)

Anhang I Scheinbare Turbulenz durch Glasfasern

Der Einsatz von Glasfasern in der LDV vereinfacht die Handhabung der optischen Komponenten wesentlich. Im einfachsten Fall eines Einkomponenten LDV Systems mit kurzer Brennweite (z.B. 20 - 80 mm) sind heute fertig justierte Glasfaser LDV Systeme mit einem Messkopf von ca. 20 mm Durchmesser und einer Länge von ca. 100 mm zu erhalten. Auch für ein Dreikomponenten LDV System mit einer Brennweite von 1200 mm kann durch Einsatz von Glasfasern ein beweglicher Messkopf erstellt werden (vgl. Kap IV). Die gewonnene mechanische Beweglichkeit des Messkopfes wirft aber die Frage auf, ob eine Bewegung der Glasfasern während der Messung - z.B. durch Vibration - die Meßergebnisse beeinflusst.

Unabhängig vom Typ der Glasfasern (vgl. Abb 21) ist die Ausbreitung des Lichts in einer Glasfaser durch das Phänomen der "inneren Totalreflexion" an den Trennflächen von Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex zu erklären. Detaillierte Beschreibungen von Glasfasern finden sich in der Literatur /10/, /17/, /18/.

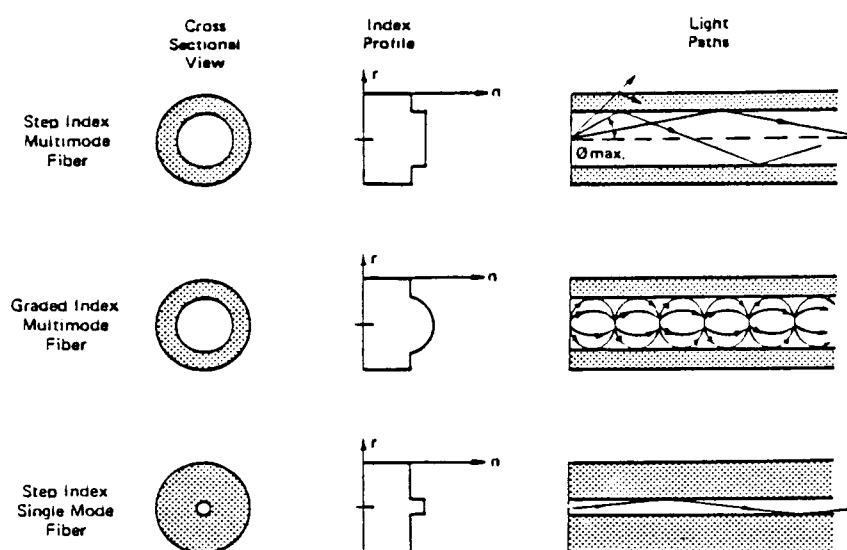


Abb. 21 Verschiedene Typen von Glasfasern

Änderungen der Krümmung einer Glasfaser ändern den "optischen Weg" des Lichts. D.h. die Phasenlage des Lichts beim Austritt aus der Glasfaser ist für unterschiedliche Krümmungen verschieden. Betrachten wir zwei Strahlen eines kohärenten Strahlenpaares auf ihrem Weg durch zwei Glasfasern und nehmen unterschiedliche zeitabhängige Krümmungen der beiden Glasfasern an, so ergibt sich für die Strahlen nach Austritt aus den Fasern ein zeitabhängiger Phasenunterschied.

Im anschaulichen Streifenmodell zur Beschreibung der LDV [7] bedeutet dies, daß das Streifensystem bei Bewegung der Glasfasern schwingt. Bei der Messung wird der Geschwindigkeit der Teilchen im Messvolumen die Bewegung des Streifensystems überlagert. Ist diese Bewegung zeitabhängig, so wird die gemessene Geschwindigkeitsverteilung verbreitert. Man erhält eine zusätzliche scheinbare Turbulenz.

Die Größe dieser scheinbaren Turbulenz durch die Bewegung der Glasfasern wurde in verschiedenen Experimenten untersucht. In der folgenden Tabelle sind die variierten Parameter der Bewegungen der Glasfaser gezeigt. Die Untersuchungen wurden in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen einer Strömung durchgeführt. In den Abbildungen (Abb. 22 a - e) sind die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen mit jeweils 1000 Einzelmessungen bei einer mittleren Geschwindigkeit von 0.8 m/s im Geschwindigkeitsintervall 0.4 - 1.2 m/s dargestellt.

Untersuchung (Abb. 22)	Schwingungs- amplitude	Schwingungs- frequenz
a	ohne Bewegungen	
b	< 10 mm	> 10 Hz
c	> 10 mm	ca. 1 Hz
d	entspr. b und c zusammen	
e	> 10 mm	ca 10 Hz

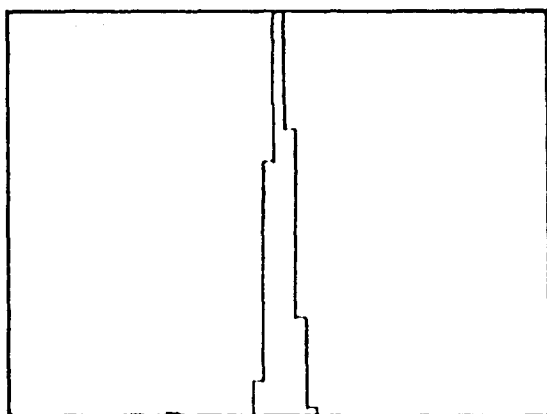


Abb. 22a

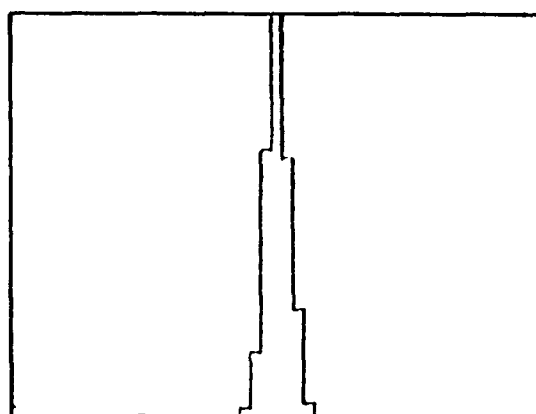


Abb. 22b

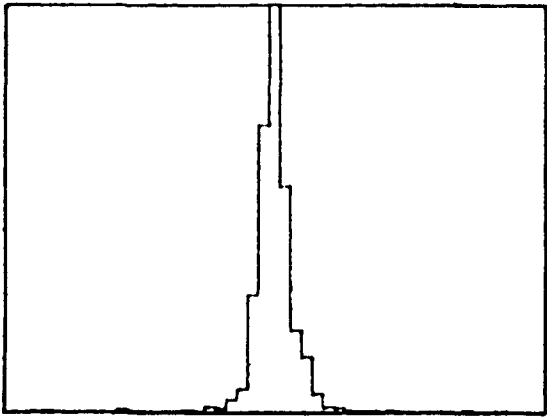


Abb. 22c

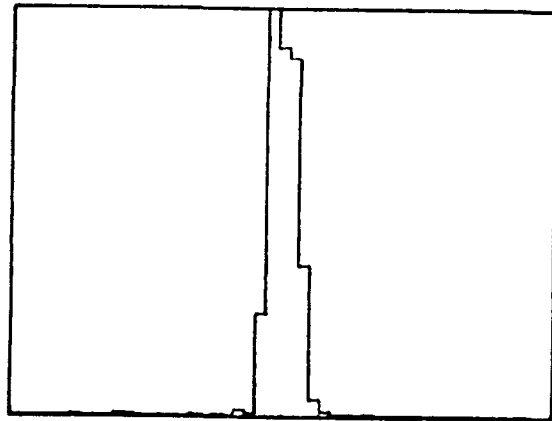


Abb. 22d

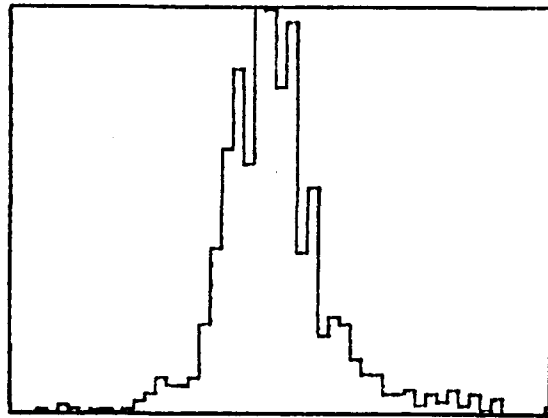


Abb. 22e

Bewegungen der Glasfasern mit Amplituden > 10 mm bewirken eine wesentliche Verbreiterung der Geschwindigkeitsverteilung. Derartige Bewegungen werden während des Experiments durch eine elastische schwingungsdämpfende Lagerung der Glasfaser verhindert. Durch diese Lagerung werden auch Bewegungen kleinerer Amplitude (vgl. b) unterdrückt, obwohl deren Einflüsse (vgl. a zu b) vernachlässigbar klein sind.

Wurde die Glasfaser derartig gelagert, waren Unterschiede in der Geschwindigkeitsverteilung bei vergleichenden Messungen mit und ohne Glasfaser bei sonst gleichen optischen Komponenten nicht mehr festzustellen.

Anhang II Gleichzeitige Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten

Die experimentelle Bestimmung der Komponenten der Geschwindigkeit erfolgt mit einem LDV System i. a. nicht im orthogonalen Koordinatensystem, sondern vielmehr durch Messung in einem Koordinatensystem mit drei linear unabhängigen Messrichtungen mit den Einheitsvektoren \vec{e}_i . i bezeichnet die Nummer der Messrichtung (vgl. Kap. V.2 Abb. 3).

Eine Detektion eines Teilchens, welches das Messvolumen durchquert, liefert einen Wert der zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponenten in Messrichtung $M_i(t)$. Für die einzelnen Messrichtungen sind hieraus die mittleren Geschwindigkeiten \overline{M}_i und deren Standardabweichungen $\sqrt{\overline{M}_i^2}$ zu berechnen. Für die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung im orthogonalen System werden die zeitabhängigen Komponenten der Geschwindigkeit transformiert.

$$v_i(t) = E_{ij}^{-1} M_j(t) \quad (\text{A1})$$

Die invertierte Transformationsmatrix E_{ij}^{-1} bildet sich aus den Komponenten der Einheitsvektoren \vec{e}_i . Die Komponenten der mittleren Geschwindigkeit lassen sich wegen

$$\begin{aligned} \overline{v}_i &= \frac{1}{T} \int_0^T E_{ij}^{-1} M_j(t) dt \\ &= \frac{1}{T} E_{ij}^{-1} \int_0^T M_j(t) dt \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

aus zeitlich unabhängigen $M_j(t)$ der verschiedenen Messrichtungen bestimmen. Die zeitlichen Mittelwerte der Schwankungsgrößen - die Komponenten des Reynoldstensors - enthalten nach der Transformation in das orthogonale Koordinatensystem

$$\begin{aligned} \overline{v'_i v'_j} &= E_{ik}^{-1} E_{jl}^{-1} \overline{M'_k M'_l} \\ &= \frac{1}{T} E_{ik}^{-1} E_{jl}^{-1} \int_0^T M'_k(t) M'_l(t) dt \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

die zeitliche Korrelation der Größen $M'_k(t)$ und $M'_l(t)$. Die experimentelle Ermittlung aller Komponenten des Reynoldstensors mit einer Messung erfordert die

zeitgleiche Bestimmung der zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponenten in Messrichtung. (Andere Messmethoden, wie die Bestimmung des Reynoldstensors mit einem Einkomponenten LDV System durch Messung in sechs unabhängigen Messrichtungen nacheinander, sind z. B. in /7/ aufgeführt.)

Derartige zeitgleiche Messungen der Geschwindigkeitskomponenten (auch ko-incidente Messungen genannt) erfordern von Seiten der Optik ein hohes Maß an Justiergenauigkeit. Die sechs Laserstrahlen (zwei pro Messrichtung) müssen in einem Punkt zum Schnitt gebracht werden. Der Durchmesser der Strahlen im Messvolumen beträgt 0,1 mm. Bei einer Brennweite der Frontlinsen von 1,2 m würde bei einer Winkeländerung eines Strahls (z. B. an der Auskopplung der Glasfasern im Messkopf) von 11 Bogensekunden dieser Strahl nicht mehr im gemeinsamen Schnittvolumen aller Strahlen liegen. Die Kontrolle dieser Justierung ist durch die stark vergrößerte Abbildung des gemeinsamen Schnittvolumens mit einer kurzbrennweitigen Linse möglich.

Schneiden sich alle sechs Strahlen in einem Punkt, so beträgt der Schnittwinkel der Strahlenpaare pro Messrichtung jeweils ca. 4.1° . Die Länge der drei einzelnen Schnittvolumina beträgt 2,3 mm, ihr Durchmesser 0,1 mm. Der Winkel der Beobachtungsrichtung beträgt 25° "off-axis". In Abb. 23 a sind die geometrischen Verhältnisse der Schnittvolumina für zwei Messrichtungen gezeigt. (Aus den Ellipsen der Schnittvolumina - durch dickere Linien gezeichnet - von 0,1 mm Dicke und 2,3 mm Länge ist hier ein Abschnitt des fast parallelen Mittelteils gezeigt.) Als deren Schnitt mit den Beobachtungsrichtungen (durch dünnere Linien gezeichnet) bilden sich die Messvolumina (schraffiert).

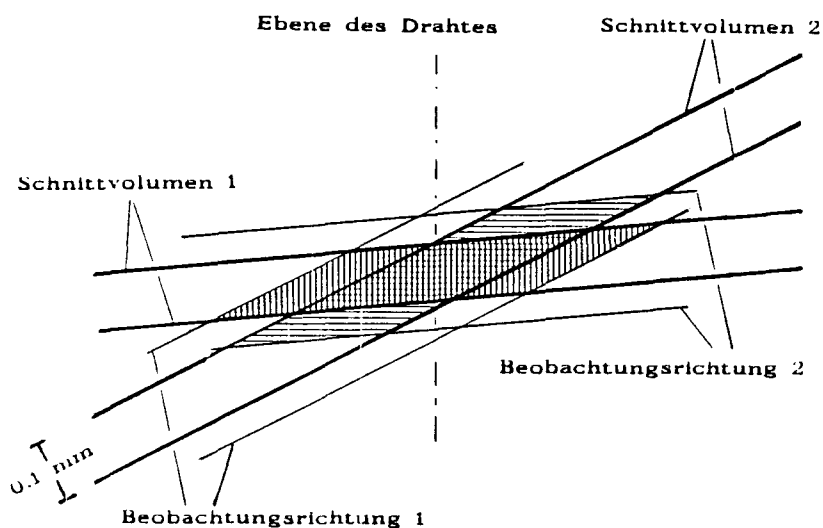


Abb. 23 a gemeinsames Messvolumen
(justiert)

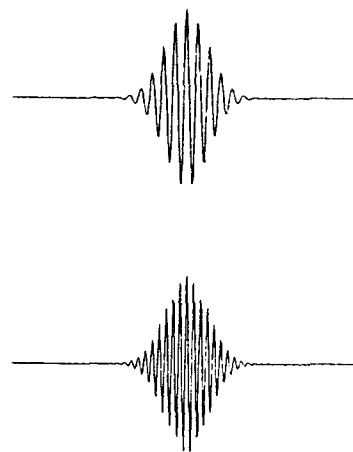


Abb. 23 b Bursts (zeitgleich)

Die Justierung der Beobachtungsrichtungen, um ein gemeinsames Messvolumen zu erhalten, ist durch konventionelle Methoden – wie der Einsatz von Streuteilchen und die Justierung der Beobachtungsrichtung nach maximaler Streulichtintensität – nicht möglich, da trotz einer Verschiebung der Beobachtungsrichtung entlang der Schnittvolumina von $\pm 0,5$ mm (vgl. z. B. Abb. 24 a) keine wesentliche Veränderung der Streulichtintensität zur Folge hat.

Unsere Art der "Koinzidenzjustierung", wie wir es nannten, ist in Abb. 23 und 24 dargestellt.

Als "Streuteilchen" benutzen wir einen Draht, der in einer Ebene senkrecht durch die Messvolumina bewegt wird. Sind die Messvolumina so justiert, daß sie sich mit dem gemeinsamen Schnittvolumen aller sechs Strahlen überdecken (Abb. 23 a), ergeben sich als Signale des Drahtes, die z. B. auf einem Zweistrahloszilloskop dargestellt werden können, für die beiden Messrichtungen zeitgleiche Bursts (Abb. 23 b). Dies ist in idealer Form das gewünschte Ergebnis der Justierung.

Wird die Ebene, in der sich der Draht bewegt, entlang der Messvolumina verschoben (dies erfolgt in Stufen von 0,01 mm), und werden die Messvolumina nach maximaler Streulichtintensität auf die neue Ebene des Drahtes einjustiert (Abb. 24 a), so werden die Signale zeitlich gegeneinander verschoben (Abb. 24b).

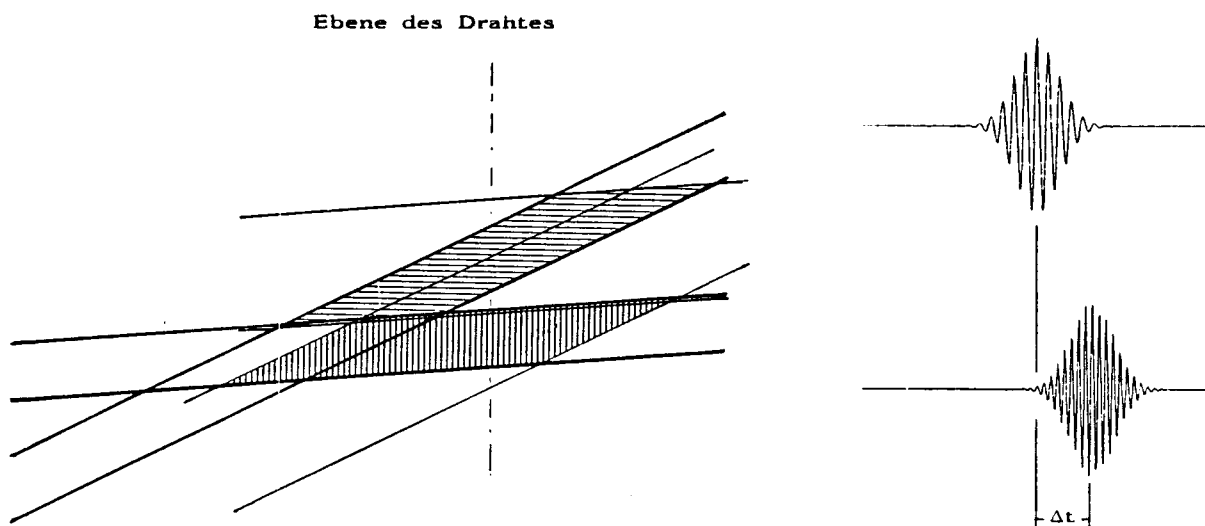


Abb. 24 a verschobene Messvolumina
(dejustiert)

Abb. 24 b Bursts (zeitversetzt)

Bei der Justierung wird die Ebene, in der sich der Draht bewegt, festgehalten und die mechanische Verschiebung des Messkopfes modifiziert, um Schritte von 0,01 mm zu ermöglichen. In Iterationsschritten wird der Zeitversatz Δt minimiert. Um trotz derart feiner räumlicher Schritte die Justierung in annehmbarer Zeit durchführen und bei Bedarf prüfen zu können, erfolgt die Justierung rechnergestützt.

Ein sinnvolles Zeitintervall Δt_k (auch "Koinzidenzintervall" genannt), in dem zwei Signale in obigem Sinn als zeitgleich betrachtet werden, läßt sich durch zwei Grenzen berechnen.

Liegen zwei Signale für zwei Messrichtungen zeitlich dicht beieinander, so muß im Sinne der "Koinzidenz" ausgeschlossen werden, daß diese Signale von zwei verschiedenen Teilchen herrühren. Die Anzahl von Teilchen, welche für die jeweilige Messrichtung pro Sekunde detektiert werden, liegt für das beschriebene Experiment bei maximal 300. Der mittlere zeitliche Abstand zweier Teilchen ergibt sich daraus als 3.3 ms. Dies ist eine obere Grenze für das Koinzidenzintervall Δt_k .

Andererseits beträgt bei einer Teilchengeschwindigkeit von 1 m/s die Aufenthaltsdauer der Teilchen im Messvolumen ca. 100 μ s. Diese Aufenthaltsdauer wird als untere Grenze des Zeitintervalls für koinzidente Messungen angesehen.

In einer Kontrollelektronik (vgl. Anhang IV) kann das Koinzidenzintervall den jeweiligen Strömungs- und Teilchendichteverhältnissen angepaßt werden. Signale, deren zeitlicher Abstand für die verschiedenen Messrichtungen Δt größer ist als die Länge des Koinzidenzintervalls Δt_k , werden von der Kontrollelektronik verworfen.

Anhang III Der Einfluß von Messungenauigkeiten auf den Reynoldstensor

Die Bestimmung der Komponenten des Reynoldstensors aus Daten einer LDV-Messung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen.

Bei unserer Vorgehensweise werden 1000 Einzelmessungen von zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponenten $M_i(t)$ für die jeweilige Messrichtung aufgenommen. Sind die Einzelmessungen in den verschiedenen Messrichtungen zeitgleich (koinzident), so bildet sich daraus nach der Transformation (A1 - A3) im orthogonalen Koordinatensystem eine dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung. In erster Näherung wird die dreidimensionale Gaußverteilung

$$G(\vec{v}) = A * e^{-\left(\frac{1}{2} (\bar{v}_i - v_i) \sigma_{ij}^{-1} (\bar{v}_j - v_j)\right)} \quad (A4)$$

mit A dem Maximum der Gaußverteilung (nicht normiert) und dem Korrelationstensor σ_{ij} , an die gemessene Geschwindigkeitsverteilung angepaßt. Auf die Anpassung von Funktionen höherer Ordnung - z.B. einer Korrektur der Gaußfunktion durch eine Gram-Chalier Entwicklung - an die Geschwindigkeitsverteilung gehe ich in einem späteren Bericht ein. Unter Vernachlässigung von Messungenauigkeiten entspricht der Korrelationstensor σ_{ij} dem Reynoldstensor R_{ij} .

Für eine Analyse der Einflüsse von Messungenauigkeiten auf den Korrelationstensor werden die Ungenauigkeiten zunächst pro Messrichtung - also eindimensional - betrachtet. (Die Gaußfunktion, deren Amplitude und der Korrelationstensor sind im Meßsystem mit dem Index M gekennzeichnet.)

Die experimentelle Ermittlung einer zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponente in eine Messrichtung $M(t)$ erfolgt durch Bestimmung der Dopplerfrequenz ν_D . (Ausführliche Beschreibungen der Bestimmung einer Geschwindigkeit mit einem LDV System finden sich in /8/.) Die Dopplerfrequenz ergibt sich unter Verwendung einer Braggzelle, die mit der Shiftfrequenz ν_S betrieben wird, aus der Messfrequenz ν_M nach

$$\nu_M = \nu_S + \nu_D \quad (A5)$$

Die Messfrequenz ν_M ist mit der verwendeten Elektronik (Counter) i. a. mit 1% Genauigkeit zu bestimmen. Bei der Aufmessung mancher Strömungsfelder, z.B. mit einem hohen Betrag des Geschwindigkeitsvektors, aber einer kleinen Geschwindigkeitskomponente in Messrichtung, ist die Shiftfrequenz erheblich größer als die Dopplerfrequenz. In derartigen Fällen wird die Ungenauigkeit in der Dopplerfrequenz - also auch die Ungenauigkeiten der zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponente in Messrichtung $\sqrt{M_C^2}$ - wesentlich größer sein als 1%.

In die exakte Berechnung der Ungenauigkeiten der Frequenzbestimmung gehen zudem die Güte der Signale (Signal-/Rauschverhältnis) und die Art der Signalverarbeitung ein. Zunächst sei die Auswirkung der nicht näher spezifizierten Ungenauigkeit auf die Bestimmung des Reynoldstensors betrachtet.

Komponenten der Geschwindigkeit $M(t)$ des Strömungsfeldes aus einer eindimensionalen Geschwindigkeitsverteilung

$$G_M(M) = A_M * e^{-\left(\frac{\bar{M} - M}{2 * \overline{M'^2}}\right)} \quad (\text{A6})$$

mit der strömungsbedingten Schwankungsbreite $\sqrt{\overline{M'^2}}$ werden in der Messung nicht exakt bestimmt, sondern durch die Ungenauigkeit der Frequenzbestimmung mit der Schwankungsbreite $\sqrt{\overline{M'_C{}^2}}$ um den wahren Wert verteilt sein. In Abb. 25 ist dies für das Geschwindigkeitsintervall $[M_1, M_2]$ durch die Funktion $G_C(M)$ gezeigt.

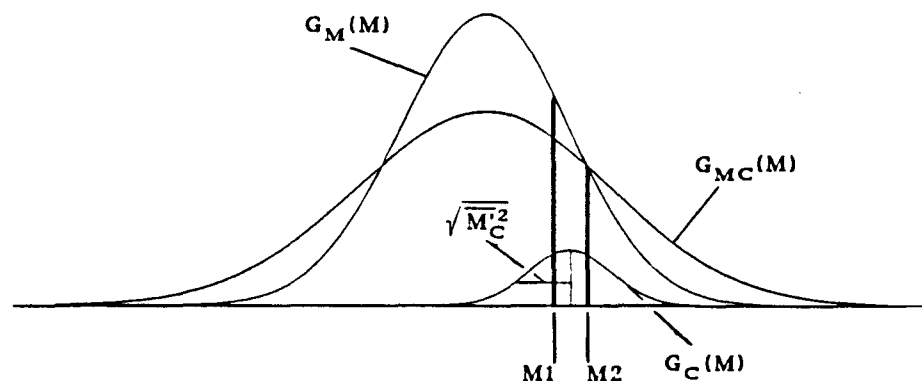


Abb. 25 Verbreiterung der Geschwindigkeitsverteilung durch die Ungenauigkeit $\sqrt{\overline{M'_C{}^2}}$

Als Geschwindigkeitsverteilung des Experiments ergibt sich die mit der Frequenzungenauigkeit behaftete Verteilung

$$G_{MC}(M) = A_{MC} * e^{-\left(\frac{\bar{M} - M}{2 * (\overline{M' + M'_C{}^2})}\right)} \quad (\text{A7})$$

mit der Schwankungsbreite $\sqrt{\overline{(M' + M'_C{}^2)^2}}$. (Hierbei ist angenommen, daß alle Verteilungsfunktionen als Gaußverteilungen anzusehen sind.)

Die Verteilung $G_{MC}(M)$ ist experimentell für die einzelnen Messrichtungen bestimmbar. Beim Übergang zur dreidimensionalen Betrachtung der Funktion $G_{MC}(\vec{M})$ sind zusätzlich die gemischten Terme der Schwankungsgrößen zu

beachten. Die Frequenzungenauigkeiten M'_{C_i} der verschiedenen Messrichtungen sind untereinander und bezogen auf die turbulenten Schwankungen M'_j nicht korreliert:

$$\overline{M'_i M'_{C_j}} = 0, \text{ für alle } i, j \quad (\text{A8.1})$$

$$\overline{M'_{C_i} M'_{C_j}} = 0, \text{ für alle } i \neq j \quad (\text{A8.2})$$

Der Korrelationstensor σ_{MCij} der Funktion $G_{MC}(\vec{M})$ läßt sich wegen (A8.1) in die Summe zweier Tensoren zerlegen

$$\begin{aligned} \sigma_{MCij} &= \overline{(M'_i + M'_{C_i})(M'_j + M'_{C_j})} \\ &= \overline{M'_i M'_j} + C_{ij} \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

Der erste Tensor entspricht dem Korrelationstensor der Verteilung der turbulenten Geschwindigkeiten im Messrichtungssystem (vgl. A3). Der zweite Tensor C , der im folgenden als Frequenzfehlertensor bezeichnet wird, beinhaltet die Einflüsse der Frequenzungenauigkeit und ist unter Berücksichtigung von A8.2 diagonal. C bildet sich aus den Elementen

$$C_{ij} = \overline{M'_{C_i} M'_{C_j}} \quad (\text{A10})$$

Die Transformation der Schwankungsgrößen in das orthogonale Koordinatensystem nach (A1-A3) mit (A8) und (A9) liefert für eine Gaußanpassung nach (A4) den Korrelationstensor

$$\begin{aligned} \sigma_{Cij} &= E_{ik}^{-1} E_{jl}^{-1} \overline{(M'_k + M'_{C_k})(M'_l + M'_{C_l})} \\ &= E_{ik}^{-1} E_{jl}^{-1} (\overline{M'_k M'_l} + C_{kl}) \end{aligned} \quad (\text{A11.1})$$

σ_{Cij} wird durch die Messung bestimmt,

$$\sigma_{Cij} = R_{ij} + E_{ik}^{-1} E_{jl}^{-1} C_{kl} \quad (\text{A11.2})$$

ist aber gegenüber dem Reynoldstensor R_{ij} durch den Frequenzfehlertensor C_{ij} verfälscht.

Wie oben erwähnt, wird der Fehler durch C_{ij} bei der Bestimmung des Reynoldstensors häufig vernachlässigt. Eine Untersuchung von (A11.2) zeigt aber Verfälschungen des Reynoldstensors, die insbesondere bei einer Eigenwertbetrachtung deutlich werden.

Eine anschauliche Betrachtungsweise des Reynoldstensors wird durch eine begriffliche Anlehnung an die klassische Mechanik geliefert. Dort werden die Trägheitsmomente eines starren Körpers durch das sog. Poinsoische-Trägheitsellipsoid beschrieben [19], dessen Hauptachsen den Hauptträgheitsachsen entsprechen. Die Hauptachsen des Reynoldstensors können als "Hauptschwankungsachsen" eines Schwankungsellipsoids bezeichnet werden.

Eine zweidimensionale Darstellung dieser Schwankungsellipse ist in Abb. 26 gezeigt. (Die Ellipse ist durch das $1/e^2$ Niveau der Gaußverteilung dargestellt.) Ohne Frequenzungenauigkeiten ergibt sich aus den Schwankungsbreiten $\sqrt{M_1'^2}$ in die Messrichtungen (\vec{e}_1, \vec{e}_2) die Lage der Schwankungsellipse mit den Hauptachsen (ER_1, ER_2) in Abb. 26 a. Betrachten wir eine Vergrößerung der Schwankungsbreiten durch Frequenzungenauigkeiten nach (A7) um 10% für jede Messrichtung, so ergibt sich nach (A11.1) die in Abb. 26 b gezeigte Schwankungsellipse.

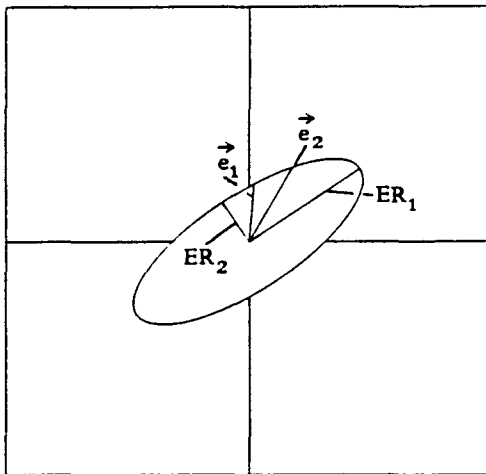


Abb. 26 a Schwankungsellipse ohne
Frequenzungenauigkeit

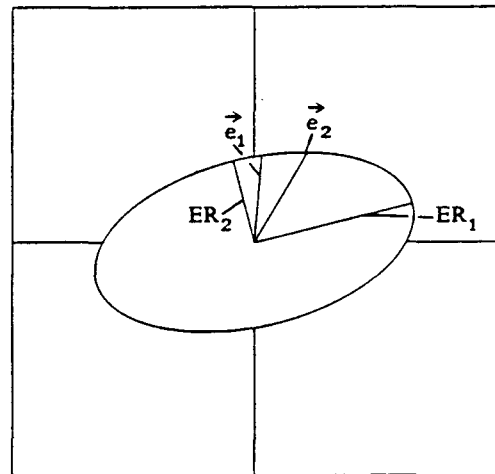


Abb.26 b Schwankungsellipse mit
Frequenzungenauigkeit

Die Veränderung des gemessenen Schwankungsellipsoids durch den Frequenzfehlertensor zeigt eine deutliche räumliche Struktur. Durch eine vergrößerte Frequenzungenauigkeit richtet sich die große Achse des Ellipsoids - also die Eigenrichtung mit dem größeren zugehörigen Eigenwert - senkrecht zur Winkelhalbierenden zwischen den Messrichtungen aus. Die bekannte Vergrößerung der Schwankungsbreite in der Koordinatenrichtung des orthogonalen Systems, welche den größten Winkel mit den Messrichtungen bildet, wird hierdurch bestätigt.

Vernachlässigt man den Einfluß des Frequenzfehlersensors, so zeigt eine Eigenwertbetrachtung von Messergebnissen turbulenter Schwankungen, denen Frequenzungenauigkeiten gleicher Größenordnung (vgl. (A7)) überlagert sind, nicht die räumliche Struktur des Reynoldstensors, sondern vielmehr das räumlich unterschiedliche Auflösungsvermögen des Meßsystems für Schwankungsgrößen in verschiedenen Messrichtungen. Selbst bei kleineren Frequenzungenauigkeiten wird das Messergebnis für den Reynoldstensor verfälscht.

Ausgangspunkt für eine Korrektur der Einflüsse ist die Bestimmung des Frequenzfehlersensors \mathbf{C} aus den Daten eines Experiments (vgl. (A9)). Die Durchführung der Korrektur wird in einem späteren Bericht ausgeführt werden. Hier sind abschließend die beiden wichtigsten Ansätze aufgezeigt.

Die Frequenzungenauigkeiten der verschiedenen Messrichtungen sind nicht korreliert (A8.2). In isotroper Turbulenz sind auch die turbulenten Schwankungen nicht korreliert, so daß sich in einer derartigen Strömung ein Schwankegellipsoid mit drei gleichen Eigenwerten - also als Kugel - zeigen sollte. Aus einer "Deformation" dieser Kugel zu einem Ellipsoid mit unterschiedlichen Eigenwerten ist \mathbf{C} zu berechnen, da die Deformation nur aus dem Einfluß von \mathbf{C} herrühren kann. Eine Berechnung von \mathbf{C} mit den vorliegenden experimentellen Daten bestätigt die Gültigkeit dieses Ansatzes. Wobei angenommen wird, daß die Strömung in einem Gebiet in großer Entfernung von einer Modellwand als isotrop anzusehen ist.

Die Berechnung liefert den Frequenzfehlersensor zunächst nur für ein Strömungsgebiet mit isotroper Turbulenz. Die Änderung des Frequenzfehlersensors beim Übergang zu anisotropen Strömungsgebieten ist von mehreren Größen - im wesentlichen der Dopplerfrequenz, der Shiftfrequenz und dem Signal-/Rauschverhältnis - abhängig. Wird in einem Experiment an einem Messpunkt bei Variation der Shiftfrequenz das Schwankegellipsoid mehrfach bestimmt, so kann \mathbf{C} unabhängig von der Isotropie der Strömung berechnet werden.

Sind diese weiterführenden Experimente zur Bestimmung von \mathbf{C} abgeschlossen, so ist der Korrelationstensor der Gaußverteilung nach (A11.2) zu korrigieren und der Reynoldstensor zu bestimmen.

Anhang IV Rechnergesteuerte Messwerterfassung und Auswertung

1986 wurde für den Bereich der Laser-Doppler-Velocimetrie im Windkanal des Instituts für Schiffbau mit der Ablösung des überalteten Prozessrechnersystems HP 1000 Serie 2100/21MX begonnen. Schon damals erreichte die Leistungsfähigkeit von PC's für einen einzelnen Prozess annähernd die Prozessorleistung der HP Systeme.

In den folgenden Jahren wurde das frühere Konzept eines zentralen (multi-user, multi-tasking) Rechnersystems zur Messwerterfassung in das eines Multiprozessorsystems (jeweils single user, one task) umgestaltet. Das zentrale Rechnersystem, an welches mehrere Messgeräte angeschlossen waren, wurde durch einzelne Prozessoren ersetzt, welche mit speziell angepaßten Bauteilen als Bestandteil der jeweiligen Messgeräte anzusehen sind. Folgende Messaufgaben werden von einzelnen Prozessoren bzw. intelligenten Interfaceschaltungen gesteuert:

- 1) Kontrolle des Windkanals
 - Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit des Windkanals aus Luftdruck, Temperatur und Vorkammerdruck; Mittelung der drei Messwerte während der Messung
- 2) Positionierung des Messpunktes
 - Steuerung der Schrittmotoren eines Verschiebegerätes
- 3) Prüfung der LDV Signale
 - Prüfung von Signalen verschiedener Messrichtungen auf Zeitgleichheit (für die vollständige Bestimmung des Reynoldstensor)
- 4) Kontrolle des Gesamtsystems
 - Koordination der verschiedenen Prozessoren; Kommunikation über verschiedene Schnittstellen
- 5) Übergabe der Messdaten für weiterführende Auswertungen an den zentralen Rechner des IfS VAX 11/780

Die Kontrolle des Gesamtsystems 4) reduziert sich bei diesem Konzept auf überwachende Funktionen sowie die Datenspeicherung und konnte mit einem PC realisiert werden.

Zur Kopplung und Steuerung der verschiedenen Prozessoren wurden im Rahmen dieser Arbeit Hard- und Softwareinterfaces aufgebaut. Es entstanden eine Vielzahl einzelner Module für die Anwendungen verschiedener Messgeräte. Mit zunehmendem Einsatz dieser Module konnte die Messwerterfassung von einer rechnergestützten Version auf eine voll rechnergesteuerte Version erweitert werden. Ab 1988 war das gesamte Steuerungssystem so weit automatisiert, daß für LDV Messungen nach Vorgabe eines Messpunktrasters die Messung rechnergesteuert abläuft. (Auf Probleme, bei denen die Grenzen eines LDV Systems erreicht werden - z.B. Wandreflexe -, gehe ich hier nicht ein)

Der Windkanal des Instituts für Schiffbau verfügt nicht über einen schallgeschützten Kontrollraum, von dem aus die Messung zu überwachen wäre. Daher sollte die Messung in einer späteren Phase auch ohne die Kontrolle durch einen Experimentator ablaufen können. Hierzu wurden auf dem Kontroll-PC zusätzliche Überwachungsaufgaben implementiert, die nicht mehr der eigentlichen Messwerterfassung zuzurechnen sind. So werden heute z.B. diverse Schaltungen oder Prozessoren auf Fehlfunktionen - wie Fehler in der Kommunikation mit externen Geräten oder Logikfehler durch Netzstörungen - überprüft. Speziell im Bereich der LDV wird die Leistung des Lasers (damit auch die Funktion der Wasserkühlung) oder ein Ausfall der Datenrate überwacht.

Das Kontrollprogramm schaltet bei Bedarf die Messung ab und kann eine Fehlernachricht in das "Mail-" oder "Phone-System" der VAX stellen, um einen Experimentator außerhalb des Windkanals an einem beliebigen Terminal der VAX zu erreichen.

Die voll automatisierte Messung mit einem LDV System hat sich besonders für zeitaufwendige Messaufgaben bewährt und die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen konnte wesentlich erhöht werden.

Bei den Vorarbeiten zu einer LDV Messung z.B. der Justierung der optischen Komponenten werden heute die verschiedenen Interfacemodule als Hilfen eingesetzt. Durch eine rechnergestützte Justierung ist die Kontrolle der "Koinzidenzjustierung" (vgl. Anhang II) erst möglich geworden. Bei anderen Justieraufgaben ist eine rechnergestützte Optimierung schneller und reproduzierbar zu erreichen.

Nach der Messwerterfassung werden die Daten für weitere Auswertungen auf die VAX 11/780 (ab 1989 VAX 6210) des IfS übertragen. Dort werden aus den Rohdaten für jeden Messpunkt durch eine dreidimensionale Gaußanpassung an die Geschwindigkeitsverteilung die Komponenten der mittleren Geschwindigkeit und die sechs Komponenten des Reynoldstensors berechnet. In weiterführenden Auswertungen werden u.a. die räumlichen Ableitungen der mittleren Geschwindigkeiten sowie die Eigenrichtungen und Eigenwerte des Reynoldstensors \mathbf{R} und des Gradiententensors \mathbf{V} bestimmt.

Um bei der großen Zahl von Messpunkten von Seiten des Datenmanagements die Zuordnung der Größen verschiedener Auswertungsstufen zueinander flexibel und doch mit einfachen Zugriffswegen zu gestalten, wurde für die Messergebnisse im Rahmen dieser Arbeit eine Datenbank konzipiert und aufgebaut. Mit diesem Hilfsmittel sind Vergleiche von Messergebnissen verschiedener Experimente oder von Ergebnissen von numerischen Berechnungen, wie sie auch in unserer Arbeitsgruppe im IfS durchgeführt werden, sehr vereinfacht.

Abschließend sei noch bemerkt, daß das Konzept der Softwaremodule gerade bei der Entwicklung eines komplexen Programmsystems in einem gekoppelten Rechnersystem mit unterschiedlichen Prozessoren und Betriebssystemen große Vorteile bietet.

Obwohl die verwendeten PC's unterschiedliche Betriebssysteme, Schnittstellen und verschiedene binäre Zahlendarstellungen (alle Messdaten werden aus Spei-

cherplatzgründen binär gespeichert) aufweisen als die VAX, wurden die Softwaremodule so erstellt, daß bei festgelegter Funktion und Parameterübergabe eine Version jedes Moduls für jeden Rechner zur Verfügung steht. D.h. ein Programm, welches aus den entsprechenden Modulen besteht, kann auf jedem Rechner benutzt werden. Damit kann die Programmentwicklung - z.B. der Messprogramme - also auch auf der VAX erfolgen. Hierbei versteht sich, daß bei Messprogrammen, welche auf der VAX entwickelt werden, das Ansprechen der Messgeräte nicht real durchgeführt wird, sondern durch das Einbinden von Interfacerroutinen für Testzwecke simuliert wird. Änderungen von Programmen (im Sourcecode) bei der Übertragung von der VAX auf den PC - oder umgekehrt - sind nicht notwendig.