

361 | November 1978

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

J. Kux, Th. Niemeier

**Erste Messungen mit dem großen
Laser-Velocimeter des IfS im Labor
und an Bord**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Erste Messungen mit dem großen Laser-Velocimeter des IfS im Labor und an Bord

J. Kux, Th. Niemeier, 1. Auflage, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1978

© Technische Universität Hamburg-Harburg

Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 361

Erste Messungen mit dem großen Laser-Velocimeter
des IfS im Labor und an Bord

J. Kux, Th. Niemeier

November 1978

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung	1
2. Meßprinzip	2
2.1. Theoretische Grundlagen	2
2.2. Signalverarbeitung	5
2.2.1. Counter	5
2.2.2. Transienten-Recorder	5
2.2.3. Correlator	6
3. Labormessungen	7
3.1. Optik	8
3.1.1. Farbtrennung	8
3.1.2. Schnittvolumen	9
3.2. Signalverarbeitung	9
4. Vorbereitungen für die Meßfahrt	12
5. Meßfahrt	14
5.1. Teilnehmer	14
5.2. Fahrtroute	14
5.3. Aufbau der Apparatur	15
5.4. Signalverarbeitung	16
5.5. Messungen	18
5.6. Ergebnisse	22
5.6.1. Geschwindigkeit	23
5.6.2. Turbulenz	29
5.6.3. Entfernung im Wasser	30
5.7. Fehlerbetrachtung	32
5.7.1. Geschwindigkeit	32
5.7.2. Turbulenz	33
5.7.3. Entfernung im Wasser	33
6. Zusammenfassung	35
7. Geräteübersicht	36
8. Literatur	37

1. Einleitung

Das für Schiffsmessungen ausgelegte Laser-Doppler-Anemometer wurde im Rahmen eines Forschungsauftrages des Bundesministeriums der Verteidigung erstellt. Die Optik, hergestellt von der Firma DISA Elektronik, wurde Ende 1976 geliefert. Im Rahmen eines weiteren Forschungsauftrages des Bundesministeriums der Verteidigung wurde es durch elektronische Komponenten und eine Datenverarbeitungsanlage ergänzt. Für 1977 war es das Ziel, die gesamte Apparatur nach Labortests und -vorbereitungen in einem ersten Einsatz auf einem Schiff zu erproben. Dabei sollte an einem Ort des Schiffes ein Grenzschichtprofil ausgemessen werden.

Dieser Bericht soll die Labormessungen behandeln, die zur Verbesserung der Optik, Anpassung der Elektronik und Vorbereitung der Meßreise notwendig waren, um dann die Erfahrungen und Ergebnisse der Meßfahrt zu diskutieren.

Dabei ist zu beachten, daß es sich um einen ersten Einsatz der Apparatur auf einem Schiff handelt. Die Hauptziele waren der Beweis, daß mit dem entwickelten Konzept das Strömungsfeld eines Schiffes von Bord aus gemessen werden kann, und Erfahrungen zur Anpassung der Apparatur an das eigentliche Ziel des Projektes zu gewinnen, nämlich den Nachstrom eines großen Schiffes zu vermessen. Die vorliegenden Ergebnisse erheben daher bezüglich der Grenzschicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2. Meßprinzip

2.1. Theoretische Grundlagen

Für die Grundlagen der seit 1964 entwickelten Laser-Doppler-Anemometrie sei auf die Literatur verwiesen (z.B. Yeh, Cummins [1]; Goldstein [2]; Durst, Whitelaw [3] u.a.); sie werden als bekannt vorausgesetzt. Hier sollen nur die Grundzüge der gewählten Meßanordnung wiederholt werden.

Bei dem hier verwendeten Zweistrahl-(Differential-Doppler-)Verfahren wird ein Laserstrahl in zwei parallele Strahlen gleicher Intensität aufgeteilt. Diese werden dann durch eine Linse im Brennpunkt zum Schnitt gebracht (s. Abb. 1).

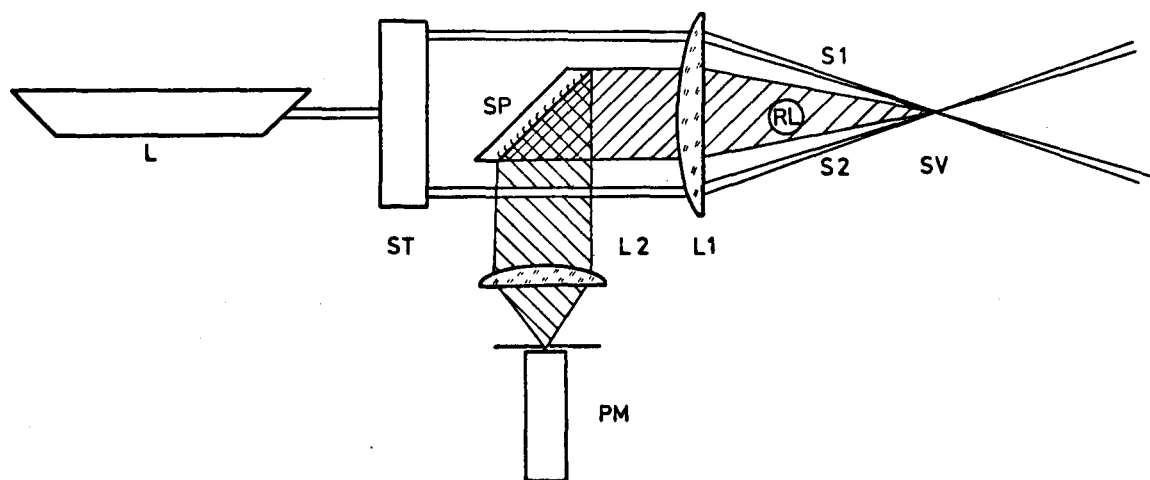


Abb. 1 Prinzipskizze des verwendeten Verfahrens

L	Laser
L1, L2	Linsen
PM	Photomultiplier
RL	rückgestreutes Licht
S1, S2	Laser-Strahlen
SP	Spiegel
ST	Strahlteiler
SV	Schnittvolumen

Durchläuft ein Teilchen geeigneter Größe das Schnittvolumen, so streut es Licht aus beiden Teilstrahlen. Aufgrund des Dopplereffektes ist die Frequenz des gestreuten Lichtes gegenüber der der einfallenden Strahlen verschoben. Die Frequenzen des Streu-

lichtes der beiden Teilstrahlen sind im allgemeinen verschieden; durch Überlagerung beider Streuteile auf einem Photodetektor erhält man ein elektrisches Signal, dessen Frequenz gleich der Differenz der Frequenzen der beiden Streuteile ist.

Abb. 2 zeigt den Schnittbereich der Strahlen genauer und definiert

- α Winkel zwischen den Teilstrahlen
- \vec{v} Geschwindigkeit des Streuteilchens
- v_x Komponente von \vec{v} in der Strahlenebene senkrecht zur Winkelhalbierenden von α

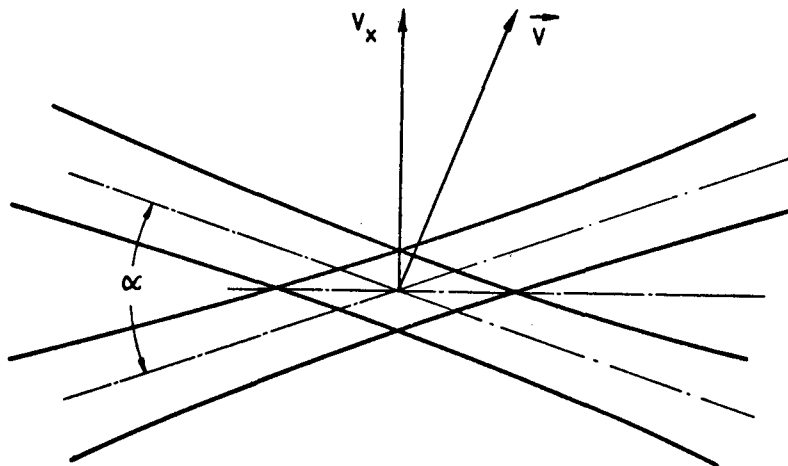


Abb. 2 Schnittvolumen

Mit λ als der Wellenlänge der Laserstrahlen läßt sich zeigen, daß (bis auf hier vernachlässigbare Korrekturen) für die Signalfrequenz (= "Dopplerfrequenz") gilt

$$v_D = \frac{2|v_x| \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (1)$$

Gleichung (1) ist zweierlei zu entnehmen:

1. Es läßt sich nur der Betrag einer Geschwindigkeitskomponente messen; will man auch das Vorzeichen bestimmen, so sind zusätzliche Hilfsmittel erforderlich (z.B. eine Bragg-Zelle zur Erzeugung von Teilstrahlen unterschiedlicher Lichtfrequenz).

2. Die Dopplerfrequenz ist von der Beobachtungsrichtung und damit von der Größe der Apertur der Beobachtungsoptik unabhängig. Daher läßt sich das Streulicht aus einem relativ großen Raumwinkel verwenden; das ist aus Intensitätsgründen wünschenswert.

Durch geeignete Anordnung mehrerer Strahlenpaare lassen sich alle drei Geschwindigkeitskomponenten im Prinzip ermitteln.

Das von einem Teilchen hervorgerufene Signal wird bei hinreichend großer Streuintensität "Burst" genannt. Abb. 3 zeigt einen Burst unter idealen Bedingungen.

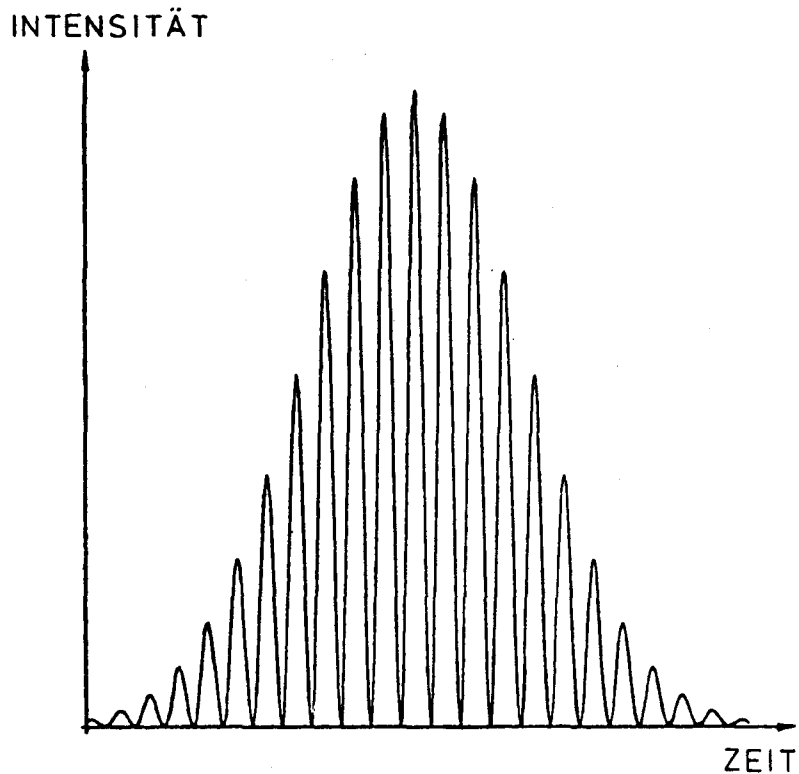


Abb. 3 Burst eines Streuteilchens

Der niederfrequente Signalanteil (die "Einhüllende") folgt aus dem Gaußschen Intensitätsprofil des Laserstrahles in radialer Richtung (wenn der Laser in der Grundmode TEM_{00} schwingt), der hochfrequente (die "Modulation") ist die Signalfrequenz ν_D . Die Entstehung eines Bursts kann man auch dadurch erklären, daß die beiden Teilstrahlen in dem Schnittvolumen interferieren und

ein stationäres System heller und dunkler Ebenen (= Ebenen konstanter Phasendifferenz der Laserstrahlen) bilden. Durchläuft ein Teilchen dieses Streifen- oder Fringe-System, so wird es periodisch beleuchtet und mit der sich aus Streifen-Abstand und seiner Geschwindigkeit ergebenden Frequenz Licht streuen. Im Ergebnis gelangt man ebenfalls zu Gleichung (1), nur ist die oben angestellte Betrachtung physikalisch besser begründet.

2.2. Signalverarbeitung

Von den zahlreichen elektronischen Signalverarbeitungsmöglichkeiten (Tracker, Counter, Frequenz-Analysator, Correlator, Transienten-Recorder etc.) wird hier näher nur auf die während der Labor- und Schiffsmessungen intensiver benutzten Verfahren eingegangen.

2.2.1. Counter

Der Counter mißt die Zeit, in der eine bestimmte Anzahl von Intensitätsmaxima innerhalb eines Bursts auftritt; dabei wird nur der Teil des Bursts herangezogen, in dem die Signalspannung größer als ein vorgegebener Schwellwert ist, um den Einfluß des Rauschens zu unterdrücken. Um weitere Fehlermöglichkeiten auszuschalten (z.B. 2 Teilchen gleichzeitig im Schnittvolumen \Rightarrow 2 sich überlappende Bursts), werden die Zeiten für zwei verschiedene Anzahlen von Intensitätsmaxima gemessen. Verhalten sich diese Zeiten zueinander wie die Anzahlen der Maxima, so wird das Signal als Burst erkannt und die Signalfrequenz berechnet. Mit einem geeigneten Interface lassen sich die Frequenzen der einzelnen Bursts auf einen Computer übertragen und dann sofort oder später nach Zwischenspeicherung auswerten.

2.2.2. Transienten-Recorder

Der Transienten-Recorder speichert ein analoges Signal (z.B. einen Burst) nach schneller Umformung digital in eine Anzahl von Kanälen (hier: 2048). Der zeitliche Abstand zwischen den

Kanälen ist einstellbar. Da - wahlweise - jeder Kanal zur Triggerung des Gesamtsignals verwendet werden kann, läßt sich ein einzelner Burst erst bei höheren Intensitäten, d.h. relativ spät in seiner Signalentwicklung, triggern und trotzdem in voller Länge abspeichern.

Das so digital gespeicherte Signal läßt sich über ein Interface auf einen Computer übertragen und dort auswerten. Außer der Signalfrequenz ν_s lassen sich noch Aussagen über z.B. das Signal-Rausch-Verhältnis gewinnen.

2.2.3. Correlator

Im Gegensatz zu Counter und Transienten-Recorder, die eine relativ hohe Signalamplitude benötigen, arbeitet der Correlator mit sehr geringer Streulichtintensität, wenn also nur noch einzelne Photonen registriert werden. Aus einem Signal eines einzelnen Teilchens mit der Intensität $I(t)$ als Funktion der Zeit errechnet der Correlator die Autocorrelationsfunktion

$$g(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \cdot I(t+\tau) dt \quad (2)$$

Durch Integration über viele Teilchen wird über alle vorkommenden Teilchenbahnen und -geschwindigkeiten summiert:

$$G(\tau) = \sum_{\text{Teilchen-} \\ \text{bahnen}} \sum_{\text{Teilchen-} \\ \text{geschw.}} g(\tau) \quad (3)$$

Als Ergebnis erhält man ein Correlogramm (= Darstellung der Autocorrelationsfunktion) gemäß Abb. 4.

Aus der Periode des AC-Anteils von $G(\tau)$ wird der Mittelwert des Betrages der Geschwindigkeitskomponente v_x berechnet. Die Turbulenzintensität (= Quotient aus dem rms-Wert und dem Mittelwert der Geschwindigkeit) läßt sich aus der Abnahme der Amplitude des AC-Anteils bestimmen. Dazu werden die im Correlator digital gespeicherten Punkte $(\tau, G(\tau))$ auf einen Computer übertragen und die theoretische Kurve $G_{\text{theor.}}(\tau)$ dem gemessenen Correlogramm mit einem Fit-Programm angepaßt; die gesuchten Größen sind dabei die Anpassungsparameter. Auf die Herleitung von $G_{\text{theor.}}(\tau)$ sei hier nicht eingegangen, sondern auf die Literatur verwiesen (z.B. Abbiss [4]; Birch, Brown, Thomas [5]).

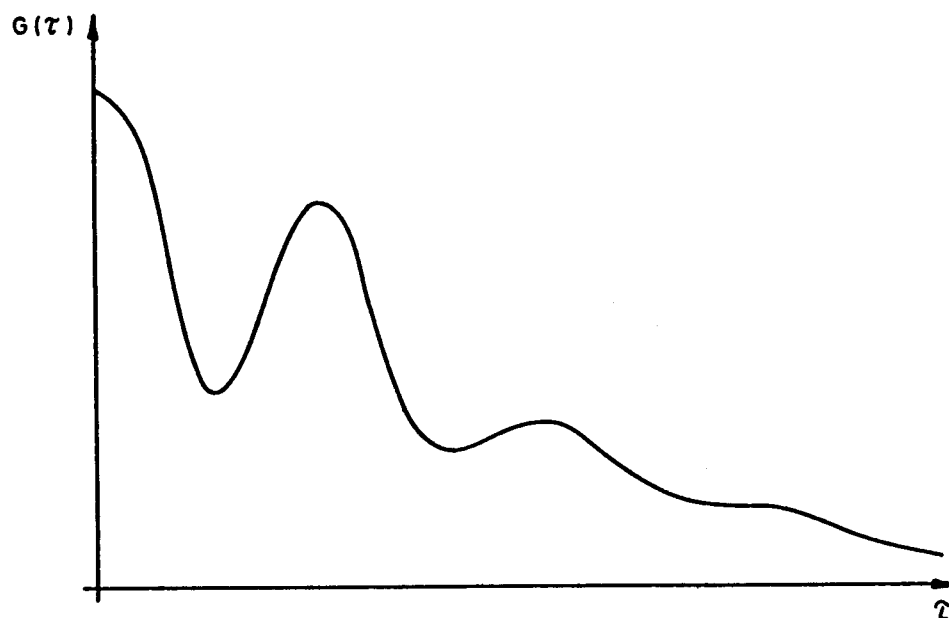


Abb. 4 Typisches Correlogramm einer nicht-laminaren Strömung

Bei dieser Herleitung wird für die Turbulenzintensität von einer Gaußschen Geschwindigkeitsverteilung ausgegangen; d.h. die Wahrscheinlichkeit einer Geschwindigkeit zwischen v und $v+dv$ ist $w(v)dv$, wobei

$$w(v) \sim \exp\left[-\frac{(v-v_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

mit v_m als Mittelwert und σ als Wurzel aus dem mittleren Schwankungsquadrat. Diese zu v_m symmetrische Verteilung liegt - speziell in einer Grenzschicht - nicht unbedingt vor, wurde aber zur Vereinfachung des Fit-Programms (als vernünftige Näherung) angenommen.

3. Labormessungen

Auf eine ausführliche Beschreibung der vorhandenen Optik wird hier verzichtet; hier seien nur die wesentlichen Komponenten kurz beschrieben.

Während der Labor- und Schiffsmessungen stand ein 2 W-Argon-Ionen-Laser (Spectra Physics: Modell 165 mit Netzteil 265) als Leihgabe des SFB 98 zur Verfügung. Für die Teilung des Laserstrahls in zwei Strahlenpaare (blau und grün) und die Abbildung des Streulichtes auf zwei Photomultiplier (blaues und grünes Streulicht werden durch geeignete Filter getrennt) wurde die DISA 55x00 Zwei-Farben-Optik gewählt. Die Fokussierung der Laserstrahlen erfolgt durch eine Zoom-Optik (ebenfalls DISA). Damit steht ein System mit folgenden Eigenschaften zur Verfügung:

1. integrierte Optik für Rückwärtsstreuung bedingt erhöhte Steifigkeit des Aufbaus und macht nur ein Fenster im Schiffsrumpf erforderlich;
2. Zwei-Farben-Optik zum gleichzeitigen Messen von zwei Geschwindigkeitskomponenten;
3. Rotation der Zwei-Farben-Optik um die optische Achse zur optimalen Anpassung der Meßrichtungen an die Strömungsverhältnisse;
4. variabler Schnittwinkel: ca. 0.5° bis 1.6° (in Luft);
5. einfaches Verschieben des Meßpunktes entlang der Achse der Anordnung zwischen ca. 1 m und 6 m Entfernung (in Luft) in Schritten von ca. 7 mm mit einem Schrittmotor;
6. Konstanz des Schnittwinkels bei Brennweitenänderung.

Vor einem sinnvollen Einsatz der Apparatur war diese im Labor auf ihre Eigenschaften hin zu überprüfen.

3.1. Optik

3.1.1. Farbtrennung

Der Laser kann auf maximal acht Wellenlängen betrieben werden. Für die gleichzeitige Messung von zwei Geschwindigkeitskomponenten werden die beiden stärksten Linien benutzt (blau: $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$;

grün: $\lambda_2 = 514.5$ nm). Die Wellenlängenselektion in einen blauen und einen grünen Kanal erfolgt durch dielektrische Strahlteiler. Da diese keine 100%ige Farbreinheit der Teilstrahlen gewährleisten, wurden nachträglich Interferenzfilter eingebaut. Danach war der Anteil von Licht unerwünschter Wellenlängen vernachlässigbar.

Die Farbtrennung des Streulichts erfolgt über dielektrische Interferenzspiegel und -filter. Messungen ergaben, daß der Fremdlichtanteil in beiden Kanälen kleiner als 1 ‰ und somit ebenfalls vernachlässigbar ist.

3.1.2. Schnittvolumen

Messungen der Schnittwinkel der blauen und der grünen Strahlen ergaben in Luft 1.64° bzw. 1.63° . Das Schnittvolumen hat annähernd die Form eines Ellipsoids, dessen Querschnitt nahezu kreisförmig ist. Der Unterschied in den Abmessungen ist hinsichtlich der Wellenlänge zu vernachlässigen. Der Durchmesser des Schnittvolumens beträgt 0.3 mm, seine Länge in Luft 21 mm und in Wasser 28 mm. Als Streifenabstände ergeben sich in Luft und Wasser $17.1 \mu\text{m}$ ($\lambda_1 = 488.0$ nm) und $18.1 \mu\text{m}$ ($\lambda_2 = 514.5$ nm).

3.2. Signalverarbeitung

Zum Test der Signalverarbeitung wurden Strömungen sowohl in Luft als auch in Wasser erzeugt. Als erstes wurde jedoch die Geschwindigkeit an einem bestimmten Punkt einer rotierenden Scheibe gemessen (s. Abb. 5), die sich sehr genau aus Umdrehungsgeschwindigkeit und Radius bestimmen läßt. Die gemessene Signalfrequenz stimmte innerhalb der Meßgenauigkeit mit der nach Gleichung (1) erwarteten überein.

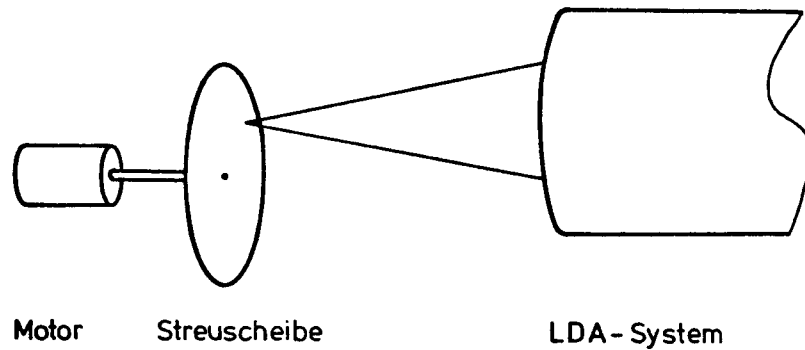


Abb. 5 Messung an rotierender Scheibe

Die untersuchten Luftströmungen wurden mit verschiedenen Ventilatoren erzeugt, wobei als Streuteilchen in der Luft enthaltene Partikel (z.B. Staub) oder künstlich hinzugefügte Silikonöltröpfchen ("Seeding") dienten.

Zur Erzeugung von Wasserströmungen wurde vor der Optik ein Plastikrohr von 30 cm Durchmesser installiert (s. Abb. 6).

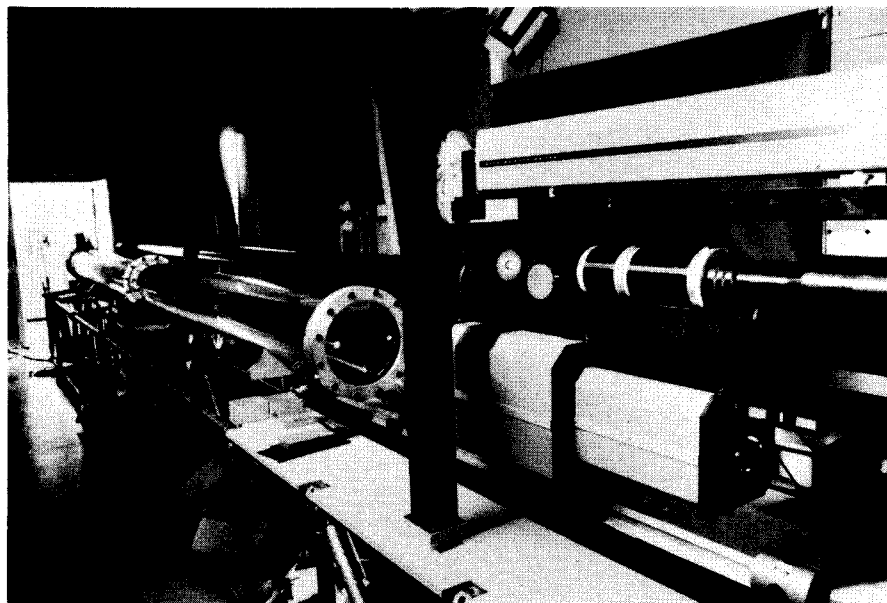


Abb. 6 Versuchsaufbau im Labor

Mit einer Umwälzpumpe konnte innerhalb des Rohres eine Wasserströmung in radialer Richtung im Bereich des Schnittvolumens erzeugt werden.

In Luft wurden Bursts ohne Seeding bis zur maximal möglichen Entfernung von knapp 6 m von der Frontlinse beobachtet. Messungen mit dem Correlator (Malvern K 7023) ergaben - ebenfalls ohne Seeding - sehr gute Correlogramme bis zur maximalen Schnittweite.

In Wasser wurden Bursts bis zur aufgebauten Rohrlänge von ca. 5 m beobachtet, dabei war eine Abnahme der Signalqualität mit zunehmender Entfernung im Wasser festzustellen. Mit dem Correlator wurden bis zu 3.5 m Entfernung gute bis sehr gute Correlogramme aufgenommen (s. Abb. 7). Weitere Untersuchungen konnten nicht

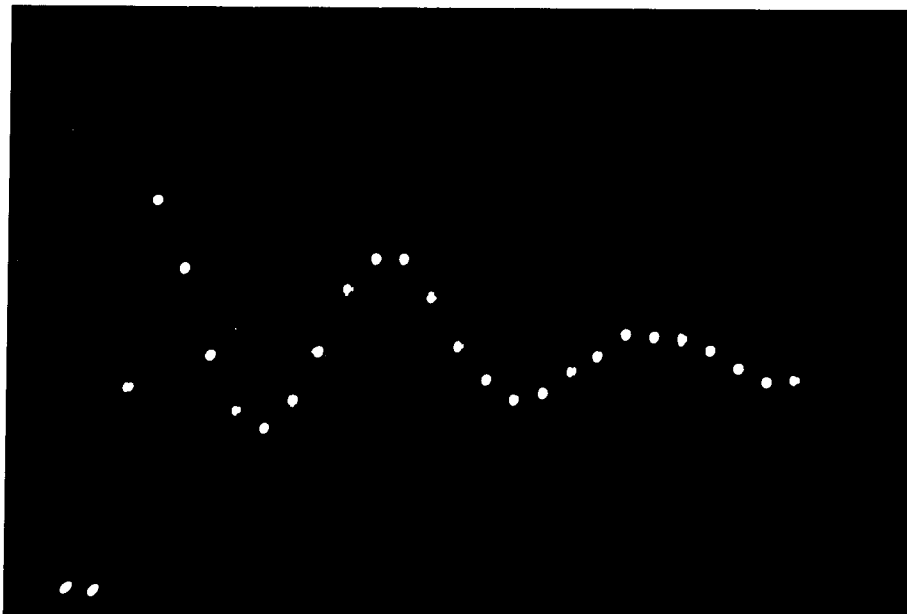


Abb. 7 Correlogramm einer Versuchsströmung

vorgenommen werden, da der Correlator längere Zeit defekt war. Die erzielten Ergebnisse lassen aber vermuten, daß auch bei größeren Schnittweiten im Wasser gute, wenigstens aber doch auswertbare Correlogramme erreicht werden können.

Aus der Signalamplitude der Bursts ist zu schließen, daß bei geeigneter Verstärkung und Filterung ein Counter einsetzbar gewesen wäre; da dieser jedoch als Leihgerät nur kurzzeitig zur Verfügung stand, wurden diese Versuche nicht durchgeführt.

Durch Zusammenarbeit mit dem Sonderforschungsbereich 80 der Universität Karlsruhe konnte während der Labortests gezeigt werden, daß der Transienten-Recorder (Biomation 8100) mit der vorhandenen LDA-Optik sowohl bei Messungen in Luft als auch in Wasser eingesetzt werden kann.

4. Vorbereitungen für die Meßfahrt

Für das eigentliche Projektziel - Geschwindigkeitsmessungen im Nachstrom - stand kein Schiff mit geeignet angebrachtem Fenster zur Verfügung. Durch die Zusammenarbeit mit der "Cooperative Research Programme" ergab sich die Möglichkeit, die gesamte Apparatur auf einer Fahrt der "Methane Progress" der Shell Marine International zu erproben. Auf diesem Schiff war schon in früheren Jahren für Experimente ein Fenster im Maschinenraum installiert worden. Die Lage des Fensters erlaubte aber nur, die Grenzschicht zu vermessen. Dies bedeutete, als Meßobjekt ein gegenüber dem Nachstrom wesentlich einfacheres Strömungsfeld vorzufinden; gerade deshalb erschien dieses Schiff für einen ersten Test besonders geeignet. Die Daten des Schiffes sind [6] entnommen und in Tab. 1 zusammengefaßt, der Meßort ist in Abb. 8 gekennzeichnet.

Name	T/T Methane Progress
Typ	Flüssiggastanker
Baujahr	1964
Länge ü.a.	188.36 m
L_{pp}	175.26 m
Breite	24.84 m
Höhe	17.83 m
Tiefgang (bel.)	7.92 m
BRT	21875.5
Antrieb	107 min ⁻¹ Turbine
v (Dienst)	17.25 kn

Tab. 1 Die wichtigsten Daten der "Methane Progress"

Das vorhandene Gestell der Optik mußte nur geringfügig geändert werden; so wurde es erforderlich, die Strahlen über einen Spiegel auf das Fenster umzulenken. Durch Lage und Größe von Spiegel (Durchmesser 150 mm) und Fenster (Durchmesser 90 mm) wurde die maximale Entfernung des Meßpunktes vom Fenster bei dem größten Strahlwinkel (1.6°) auf ca. 1.5 m begrenzt. Dieser Bereich entspricht ungefähr der erwarteten Dicke der Grenzschicht. Es ließ

sich bei dem kleinsten Strahlwinkel (0.5°) eine Entfernung von ca. 4.5 m erreichen.

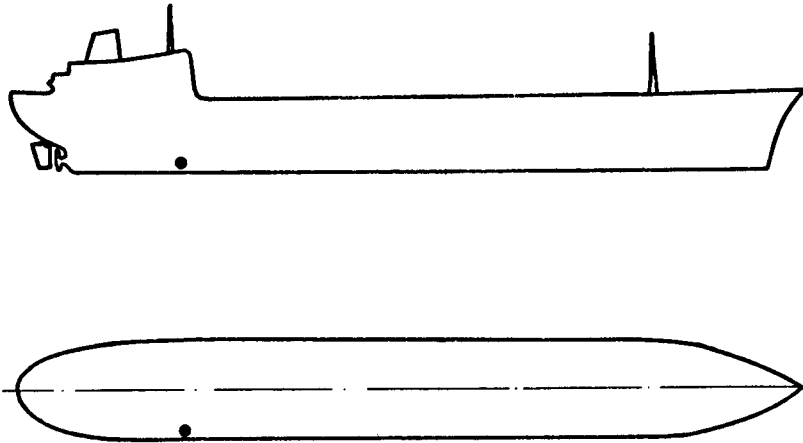


Abb. 8 Lage des Meßortes

Ein Duplikat des Fensters stand zu Labortests zur Verfügung. Entscheidend war die Frage der optischen Qualität des aus Quarz gefertigten Fensters. Interferometrisch wurde festgestellt, daß die Phasenfronten von Laserstrahlen nach Durchlaufen des Fensters und einer 3 m langen Wasserschicht nicht meßbar verzerrt wurden. Da auch für den Spiegel eine sehr gute optische Qualität nachzuweisen war, ist eine Verschlechterung der Signalqualität durch Spiegel, Fenster und eine größere Wasserstrecke nicht zu erwarten.

Wenn die optische Achse des Zoom-Systems nicht senkrecht auf dem Fenster steht, überlappen sich die beiden Laserstrahlen im allgemeinen nicht mehr vollständig. Rechnungen für die vorhandene Optik zeigten, daß bis zu einem Winkel von ca. 5° zwischen der optischen Achse und der Fensternormalen keine wesentliche Signalbeeinflussung zu erwarten ist. Dieses konnte in Laborversuchen bestätigt werden; dadurch ergab sich für den Aufbau im Schiff ein größerer Justierspielraum.

5. Meßfahrt

5.1. Teilnehmer

Die Fahrt wurde gemeinsam mit der "Cooperative Research Programme" vorbereitet und durchgeführt. Die Mitglieder des Meßteams waren:

Hermod Liland,	Det norske Veritas
Vidar Vindøy,	Det norske Veritas
Hamilton Woods,	Shell International Marine Ltd.
Thomas Niemeier,	Institut für Schiffbau

5.2. Fahrtroute

Das Schiff fuhr von Canvey Island in der Themse, Großbritannien, nach Arzew, Algerien, und zurück nach Le Havre, Frankreich (Abb. 9). In die Karte sind außerdem die Positionen für die



Abb. 9 Fahrtroute mit den Nummern der Grenzschichtprofile (s.a. 6.6.)

Messungen der Grenzschichtprofile eingetragen, die alle auf der Rückfahrt Arzew - Le Havre aufgenommen wurden.

5.3. Aufbau der Apparatur

Der Meßort befand sich im Maschinenraum auf der Steuerbordseite ungefähr 148 m vom Bug entfernt und ca. 7 m unterhalb der Wasseroberfläche. Das mit der Schiffsaußenhaut abschließende Fenster war 38° gegen die Vertikale geneigt. Durch das sich verjüngende Hinterschiff ergab sich zwischen der y-Achse (s. Abb. 10) und der Fahrtrichtung ein Winkel von 14° . Das verwendete Koordinatensystem, dessen Ursprung auf der äußeren Fensterfläche liegt, ist Abb. 10 zu entnehmen.

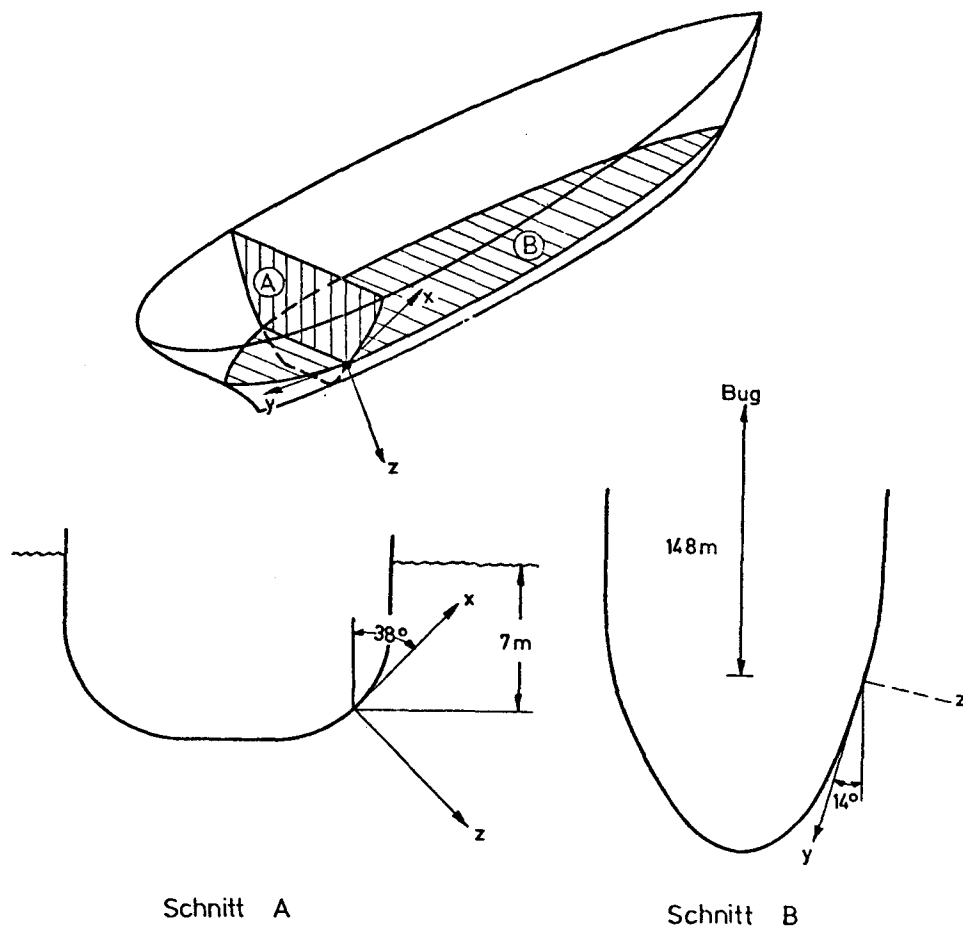


Abb. 10 Definition des Koordinatensystems

Die gesamte Optik war in dem bisher verwendeten Gestell montiert, das über Schwingungsisolatoren auf einem am Schiff angeschweißten Rahmen befestigt war. Über den vor der Frontlinse montierten Spiegel wurden die Laserstrahlen durch das Fenster in das Wasser oder zu Test- und Justierzwecken in den Maschinenraum gelenkt (s. Abb. 11).

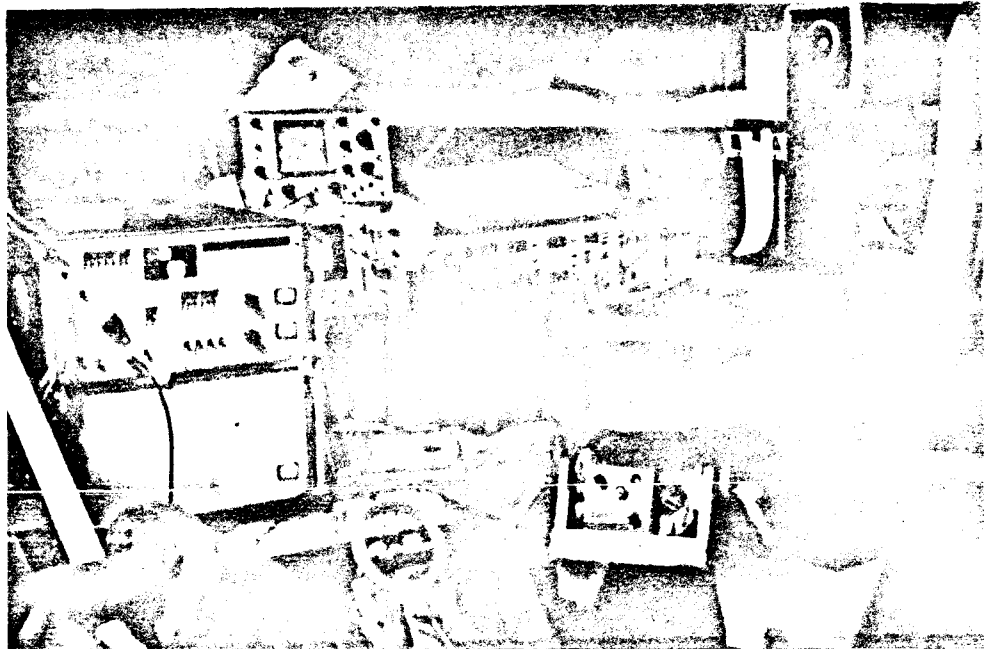


Abb. 11 Aufbau an Bord

Die Elektronik für die Signalverarbeitung wurde auf Versteifungsblechen befestigt, die sich zwischen den Spanten befanden.

5.4. Signalverarbeitung

Zwei verschiedene Möglichkeiten der Signalverarbeitung wurden eingesetzt:

1. Einerseits wurden von den Bursts das Rauschen und die niederfrequente gaußförmige Einhüllende durch einen Bandpaßfilter (Krohn-Hite 3100) abgetrennt und das verstärkte (Verstärker: Levell TA 605) hochfrequente Doppler-Signal in einem Transienten-Recorder (Biomation

8100) gespeichert. Dieses Signal, das über einen Oszillographen zu beobachten war, konnte auf Wunsch von einem Tisch-Computer (Hewlett-Packard 9825 A) übernommen und zur späteren Auswertung auf einer Datencassette (Magnetbandeinheit: Hewlett-Packard 9877 A) abgespeichert werden (s. Abb. 12). Diese Ausrüstung stammt im wesentlichen von "Det norske Veritas", die

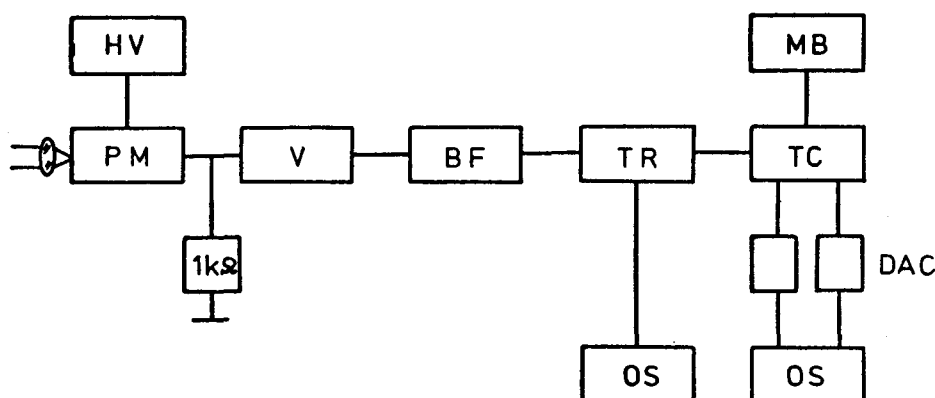


Abb. 12 Signalverarbeitung mit dem Transienten-Recorder

BF	Bandpaßfilter
DAC	Digital-Analog-Converter
HV	Hochspannungsnetzgerät
MB	Magnetbandeinheit
OS	Oszillograph
PM	Photomultiplier
TC	Tisch-Computer
TR	Transienten-Recorder
V	Verstärker

auch die Computerprogramme für Datenübernahme und Frequenzberechnung erstellte.

2. Andererseits wurde bei wesentlich geringerer Streulichtintensität mit dem Correlator gearbeitet. Der dem Multiplier (ITT FW 130) folgende Verstärker dient der Anpassung der Impulse bezüglich Pulshöhe und -form an den Correlator. Diese Impulse entsprechen einzelnen Photonen. Das aktuell vorhandene Correlogramm konnte über einen Oszillographen kontrolliert werden (s. Abb. 13). Die Auswertung erfolgte mit einem anderen Computer (Hewlett-Packard 21 MXE, Typ 2113 A) im Institut. Die Datenübertragung erfolgte

"per Hand", andere Möglichkeiten (z.B. Cassette) konnten aus Zeitgründen nicht vorbereitet werden.

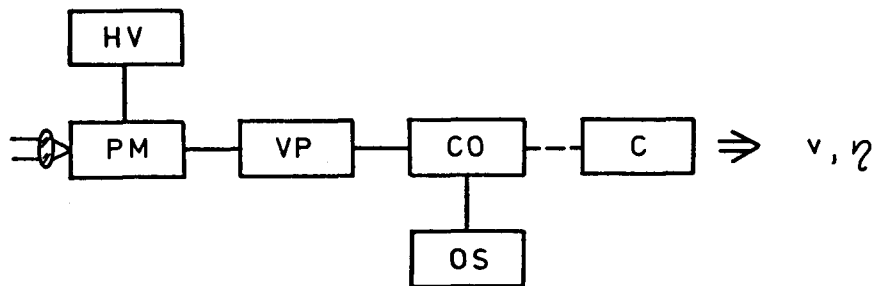


Abb. 13 Signalverarbeitung mit dem Correlator

C	Computer
CO	Correlator
HV	Hochspannungsnetzgerät
OS	Oszillograph
PM	Photomultiplier
VP	Verstärker und Pulsformer

Neben diesen Signalverarbeitungsmethoden wurden auch die Modulationsfrequenzen der Bursts direkt mit einem Speicher- oszillographen aufgenommen und die Frequenz durch "Handaus- zählung" bestimmt. Der Aufbau läßt sich aus Abb. 12 dadurch ableiten, daß der Transienten-Recorder durch den Speicher- oszillographen ersetzt und auf die folgenden Geräte verzichtet wird. Die Auswertung ist zwar nicht so genau wie die mit Tran- sienten-Recorder und Computer, dafür aber wesentlich schneller, da die benutzten Programme hinsichtlich Datenübernahme und Frequenzberechnung relativ langsam waren.

5.5. Messungen

Das Ziel war die gleichzeitige Bestimmung von zwei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in einer Ebene parallel zur Tangen- tialebene an die Schiffsaußenhaut am Ort des Fensters. Dazu waren die beiden stärksten Linien des Lasers bestimmt, die zu- einander senkrechte Interferenzsysteme im Meßvolumen erzeugen. Wegen technischer Schwierigkeiten mit der blauen Linie konnte bei beiden Signalverarbeitungsmöglichkeiten jedoch nur mit der grünen Laserlinie gearbeitet werden.

Die Geschwindigkeit in der Ebene senkrecht zur optischen Achse konnte durch Drehen der Zwei-Farben-Optik um diese Achse bestimmt werden, wenn auch nicht durch simultane Erfassung von zwei Komponenten. Da der Correlator-Multiplier auf dem Gestell für die gesamte Optik befestigt war, konnte er nicht mit der Zwei-Farben-Optik gedreht werden.

Daher konnte mit dem Correlator nur die Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf die Meßrichtung M1 bestimmt werden (s. Abb.14). Die Lage der Meßrichtungen in dem unter 5.3., Abb. 10, definierten Koordinatensystem ist Abb. 14 zu entnehmen.

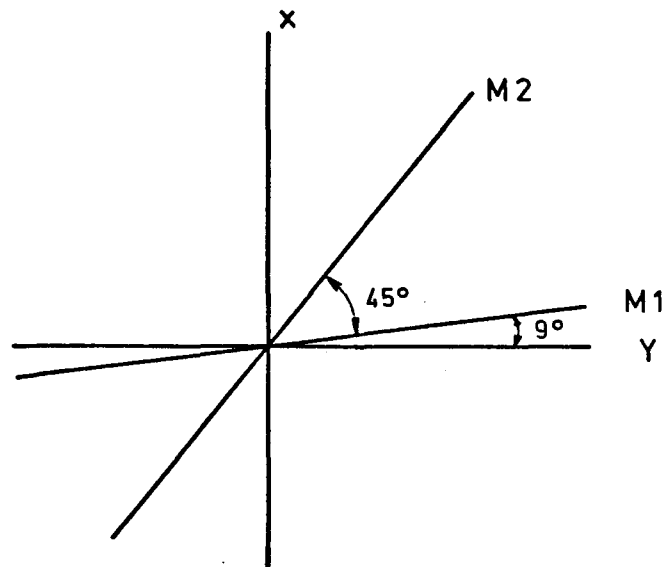


Abb. 14 Lage der Meßrichtungen

Nach einem Funktionstest der Optik in Luft (1. mit einer rotierenden Scheibe, 2. mit durch Preßluft erzeugter Strömung), Abb. 15 zeigt das Signal eines Teilchens, wurden die Messungen im Wasser vorgenommen. Dabei ergaben sich Signale, wie sie die Abbildungen 16 (direkt vom Photomultiplier) und 17 (verstärkt und bandpaßgefiltert) zeigen.

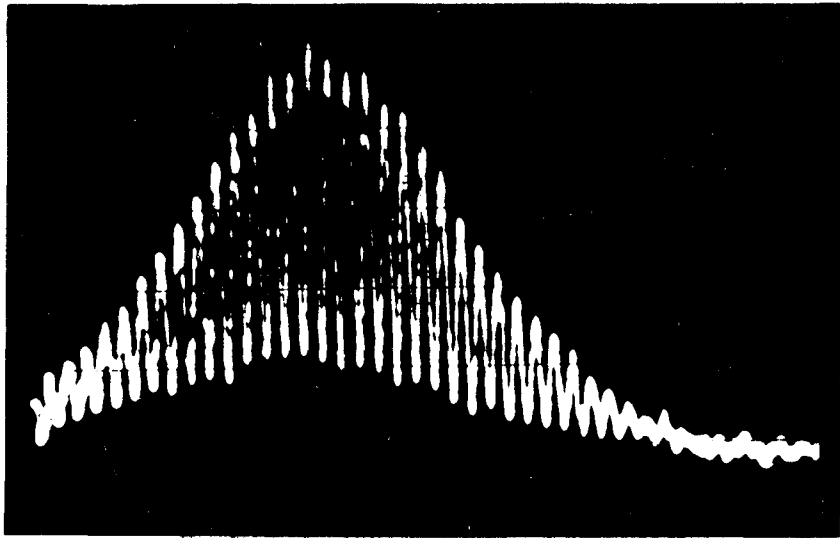


Abb. 15 Burst eines Teilchens
Horizontal: $20 \mu\text{s}/\text{div}$ vertikal: $20 \text{ mV}/\text{div}$

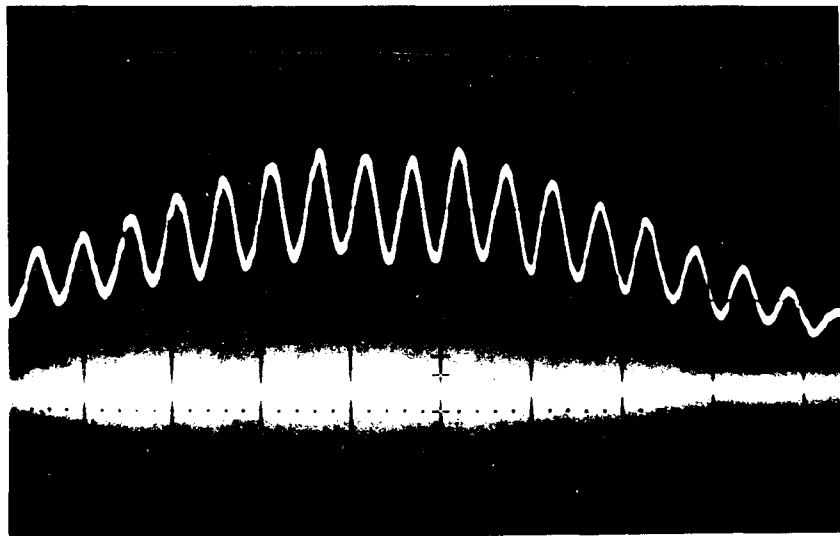


Abb. 16 Signal direkt am Photomultiplier
Horizontal: $5 \mu\text{s}/\text{div}$ vertikal: $20 \text{ mV}/\text{div}$

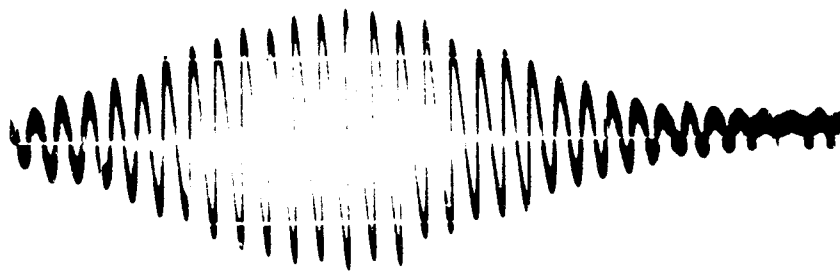


Abb. 17 Gefiltertes Signal
Horizontal: $10 \mu\text{s}/\text{div}$ vertikal: $10 \text{ mV}/\text{div}$

Die Signalhäufigkeit ist Abb. 18 zu entnehmen, wobei jeder Peak einem Teilchen entspricht. Dabei ist ein erheblicher Anteil der Bursts unmoduliert, da das entsprechende Teilchen nur einen Laserstrahl durchkreuzt hat. Ein auf ca. 100 Teilchen basierender Vergleich der Anzahlen modulierter und unmodulierter Bursts

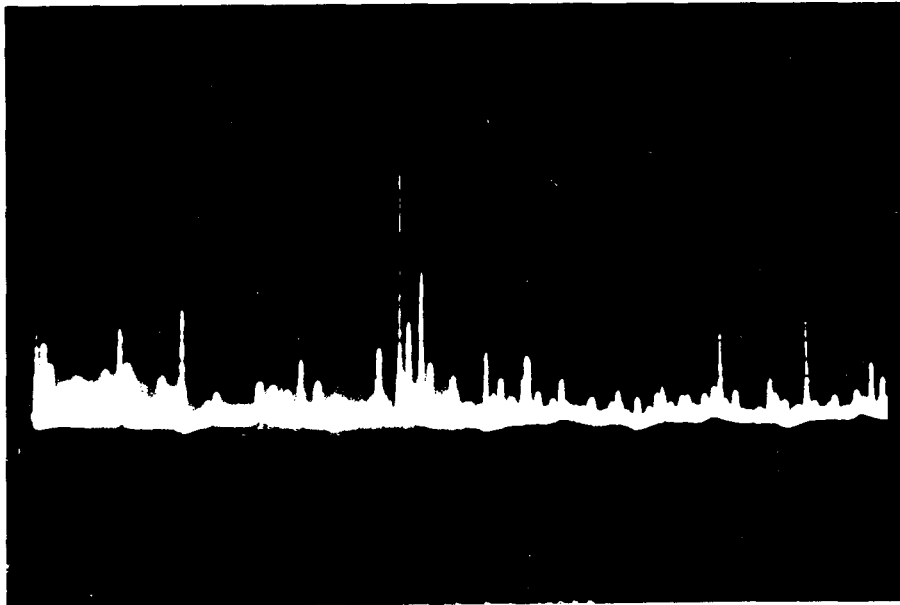


Abb. 18 Häufigkeit der Signale
Horizontal: 10 ms/div vertikal: 20 mV/div

mittels Speicheroszillograph ergab, daß weniger als 10 % der Bursts moduliert waren. Damit lag eine Teilchenfrequenz - je nach Verstärkung und Triggerlevel - von einigen 10 Hz vor. Diese scheint nach Untersuchungen von "Det norske Veritas" überproportional von der Schiffsgeschwindigkeit abzuhängen.

Die Integrationszeiten für ein einzelnes Correlogramm lagen zwischen 10 sec und 9 min, als typischer Wert ist 1 min anzusetzen. Für die Auswertung der Correlogramme konnte ein von M. Scheinpflug [9] entwickeltes Programm verwendet werden. Abb. 19 zeigt ein gemessenes Correlogramm mit der angepaßten Kurve $G_{\text{theor.}}(\tau)$. An jedem Meßpunkt wurden mehrere Correlogramme mit verschiedenen Sample-Zeiten (zeitlicher Abstand zweier aufeinanderfolgender Punkte (τ , $G(\tau)$)) im Correlo-

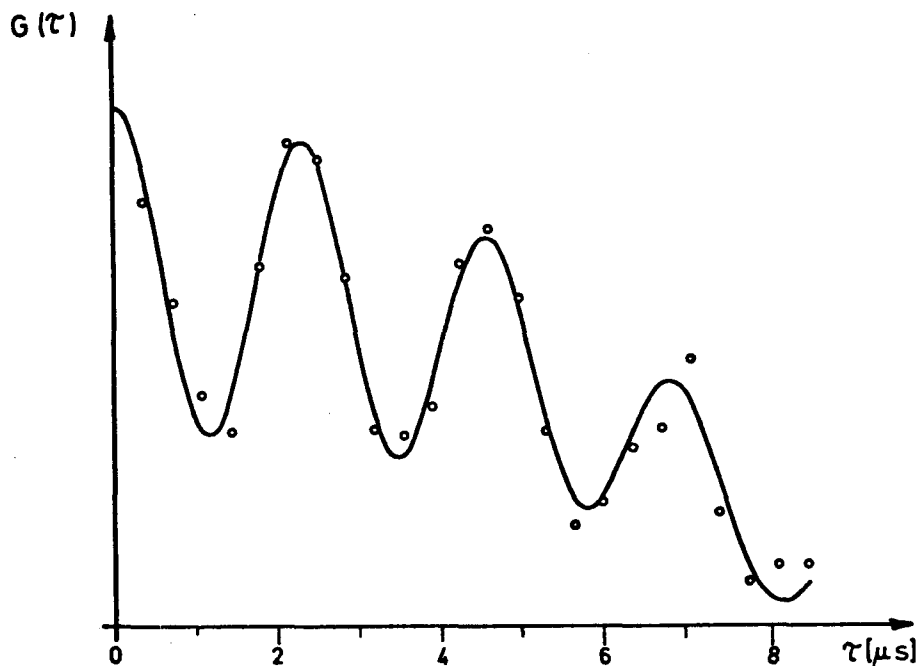


Abb. 19 Gemessenes Correlogramm

gramm) aufgenommen. Wegen der umständlichen "Datenübernahme" per Hand dauerte das Messen eines Grenzsichtprofils ca. 7 Stunden.

5.6. Ergebnisse

Im Rahmen dieses Berichtes wird nur auf die mit Correlator und Speicheroszillograph erzielten Ergebnisse eingegangen. Die mit dem Transienten-Recorder gewonnenen Daten werden von "Det norske Veritas" verwertet.

Es wurden drei Grenzsichtprofile im Abstand 7 cm bis 140 cm von der Schiffsaußenhaut bei drei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten aufgenommen. Die Daten dieser Profile sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Profil-Nr.	Datum	Meßbereich		Schiffsgeschwindigkeit		Propellerumdrehungen [$\frac{1}{\text{min}}$]	Abb.	Meßverfahren
		von [cm]	bis	[kn]	[$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]			
1	30.9.	24	140	16.5	8.5	99	20,21,27,28	Correlator
2	1./2.10.	14	138	13.0	6.7	84	22,23,27,28	Correlator
3	3.10.	7	80	14.5	7.5	88	24,26,27	Speicheroszillograph

Tab. 2 Zusammenfassung der Grenzschichtdaten

Kleinere Abstände zum Fenster waren bei den jeweiligen Messungen nicht möglich, da der Streulichtanteil der inneren und äußeren Fensterfläche die Photomultiplier überlastet hätte. Größere Abstände ließ der vor der Zoom-Optik montierte Spiegel nicht zu (s.a. 4.).

Die Profile der mittleren Geschwindigkeiten (Komponente in Richtung M1 gemäß Abb. 14) und die dazugehörigen Turbulenzintensitäten, bezogen auf die lokale mittlere Geschwindigkeit, sind in den Abbildungen 20 bis 24 dargestellt.

5.6.1. Geschwindigkeit

Die mit verschiedenen Sample-Zeiten gewonnenen mittleren Geschwindigkeiten stimmen sehr gut überein, zumal kurzzeitige Schwankungen der Schiffsgeschwindigkeit angenommen werden müssen und die Bordmeßgeräte nicht kontinuierlich abgelesen wurden.

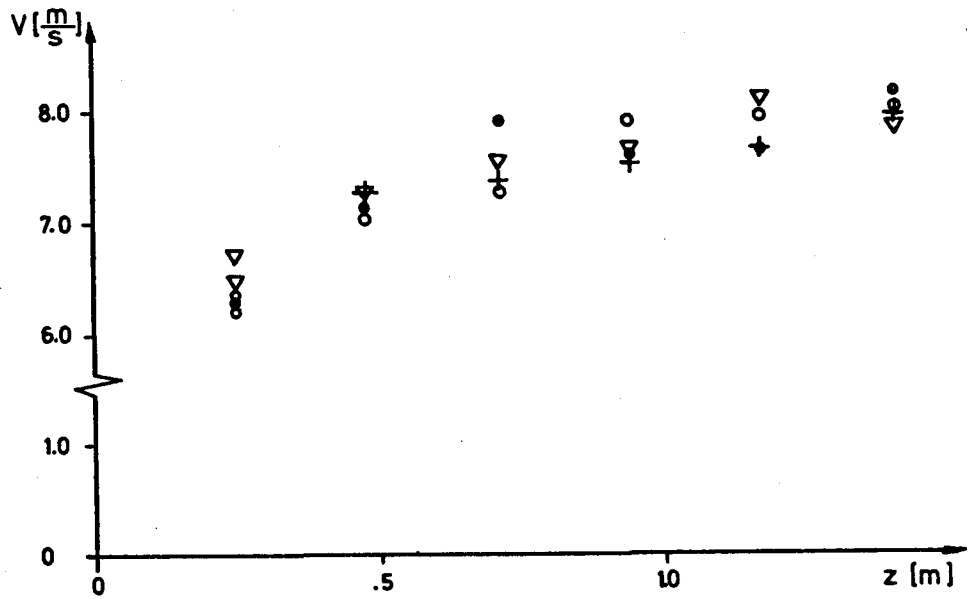


Abb. 20 Mittlere Geschwindigkeit v, Profil 1

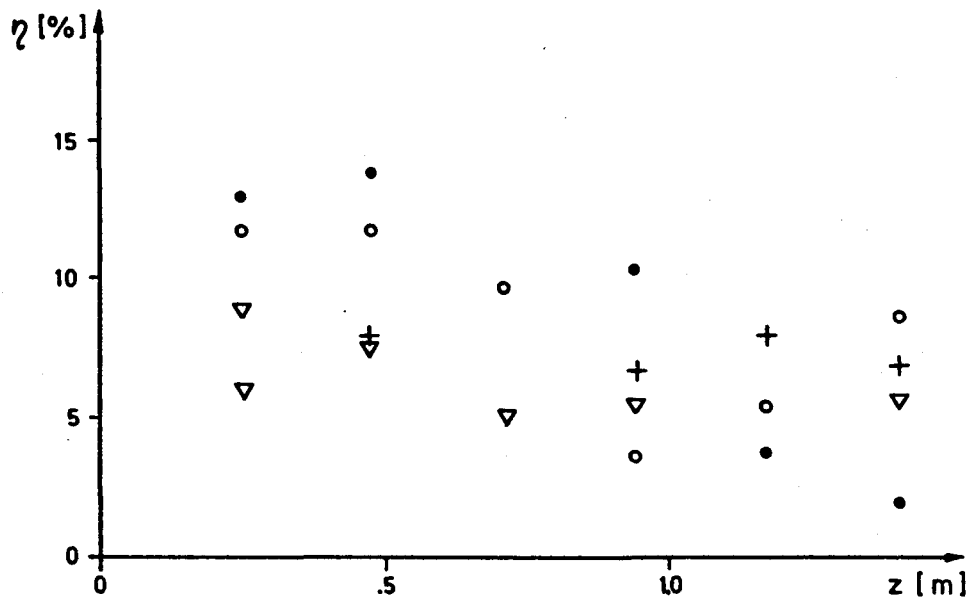


Abb. 21 Turbulenzintensität η , Profil 1

Für die verwendeten Sample-Zeiten gilt in beiden Abbildungen

- .20 μ s
- .25 μ s
- ▽ .30 μ s
- + .40 μ s

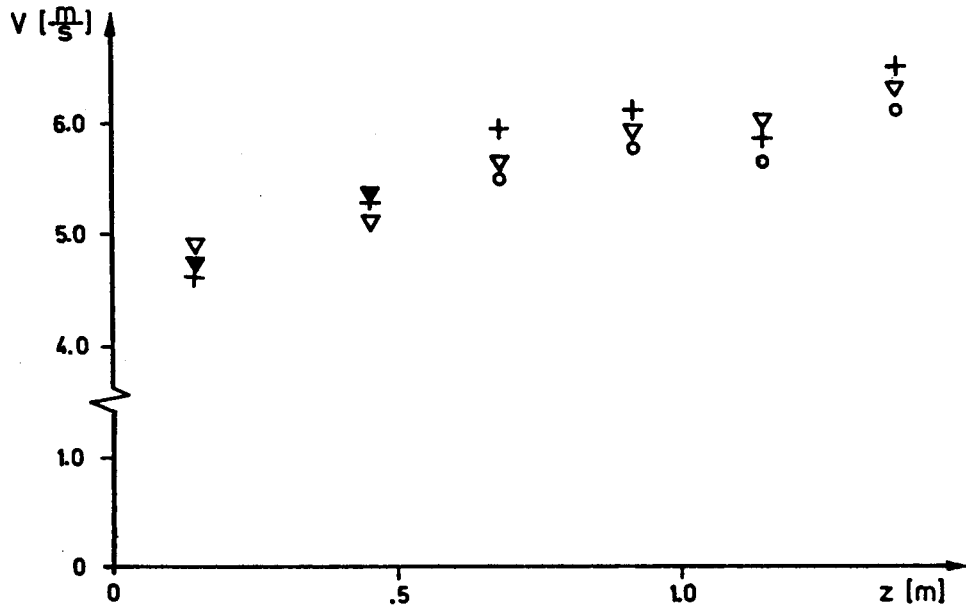


Abb. 22 Mittlere Geschwindigkeit v , Profil 2

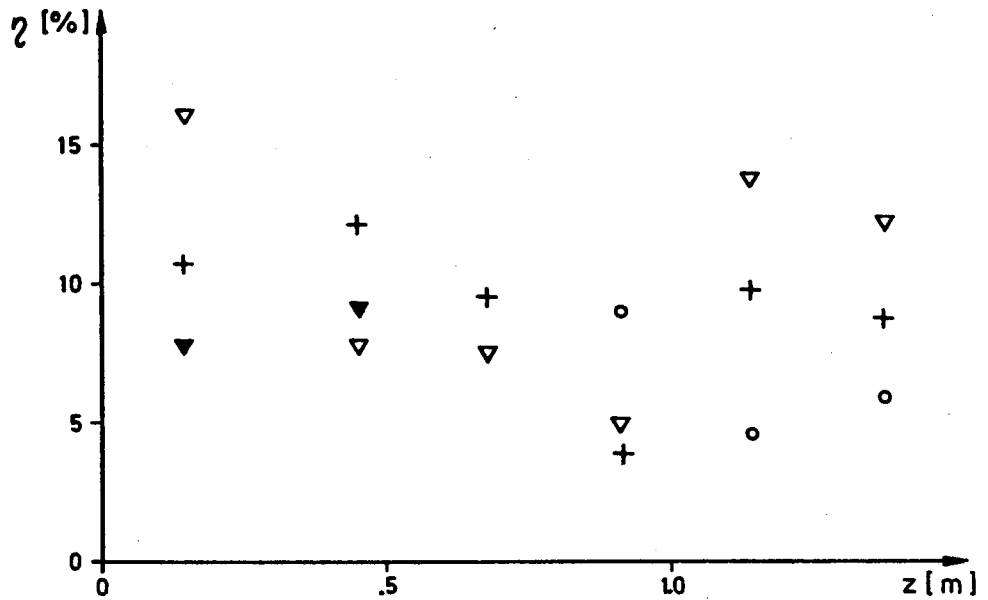


Abb. 23 Turbulenzintensität η , Profil 2

Für die verwendeten Sample-Zeiten gilt in beiden Abbildungen

- .25 μ s
- ▽ .30 μ s
- +
- ▼ .50 μ s

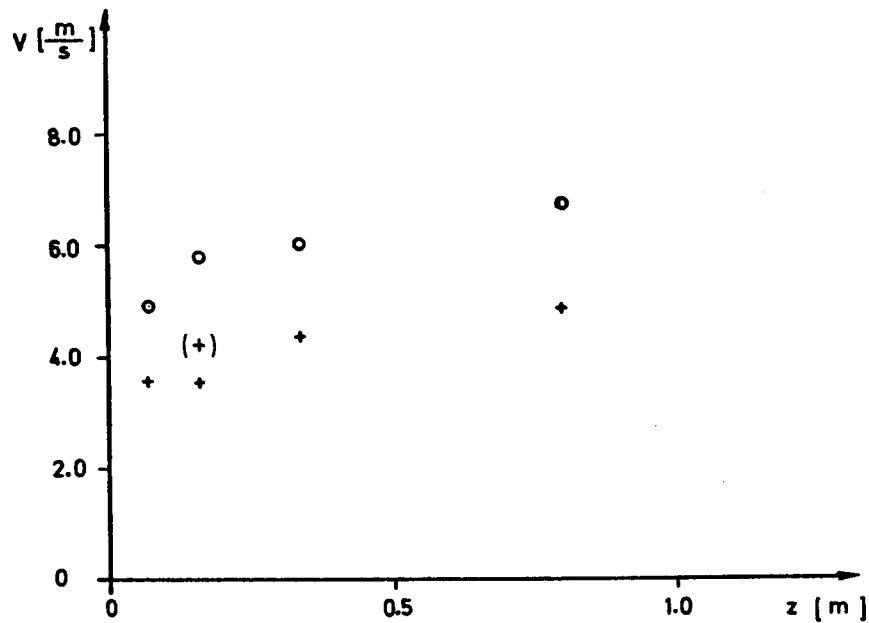


Abb. 24 Mittlere Geschwindigkeit v , Profil 3
o Komponente in Meßrichtung M1
+ Komponente in Meßrichtung M2

Die mit dem Speicheroszillographen ermittelten Geschwindigkeitskomponenten in den Richtungen M1 und M2 (s. Abb. 24) basieren auf nur 20 Bursts pro Meßpunkt; daher erscheint die Angabe einer Turbulenz wenig sinnvoll. Trotz der mit größerer Ungenauigkeit behafteten Messungen kann aus den Mittelwerten der Komponenten Richtung und Größe der Resultierenden (in der x-y-Ebene, also nicht die wirkliche Geschwindigkeit v) bestimmt werden.

Das Vorzeichen der Strömung wurde nicht ermittelt (z.B. mit der vorhandenen Bragg-Zelle), da es in der Grenzschicht unproblematisch ist, welches Vorzeichen gilt. Theoretisch ergeben sich nun vier Möglichkeiten für die Resultierende (s. Abb. 25). Unter Berücksichtigung der Lage der Resultierenden \vec{v}_1 bis \vec{v}_4 im Koordinatensystem x-y-z (s.a. Abb. 11) ist nur \vec{v}_1 sinnvoll.

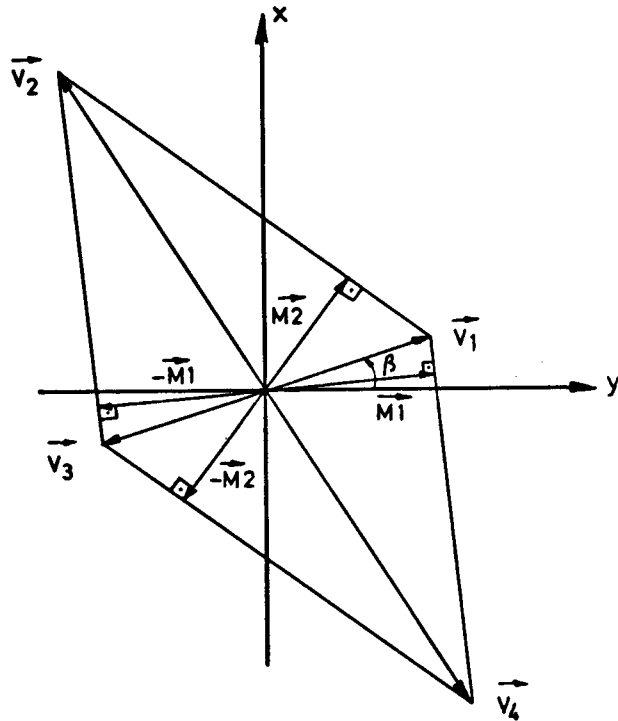


Abb. 25 Möglichkeiten für die Resultierende

In Abb. 26 ist der Winkel β zwischen der y-Achse und \vec{v}_1 aufgetragen. Der Wert für $z = 16$ cm ist auf die relativ kleine

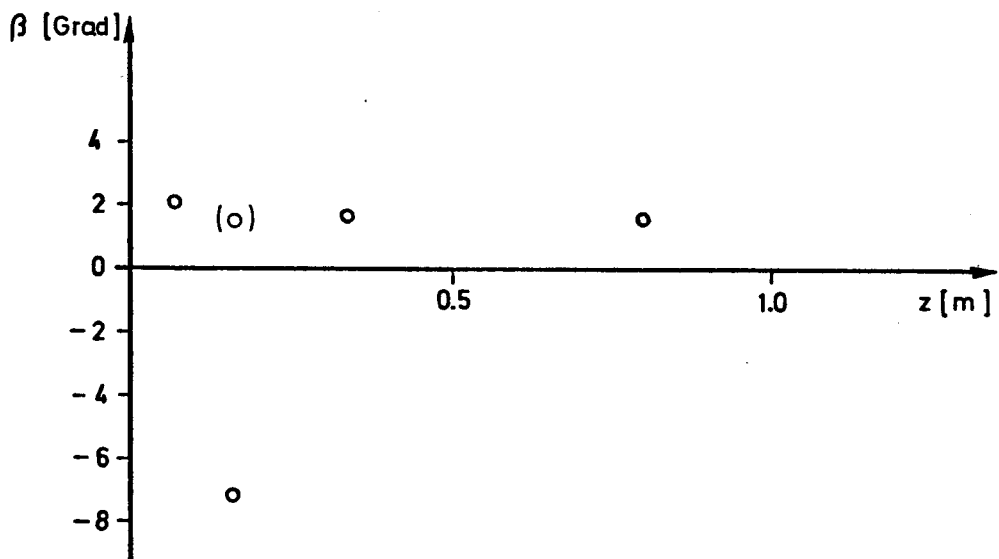


Abb. 26 Winkel zwischen der Resultierenden und der y-Achse

Komponente in Richtung M1 zurückzuführen; bei einer größeren Komponente, dem erwarteten Profil angepaßt, ergibt sich ein den anderen Winkeln gleicher Wert. Wegen der höheren Meßgenauigkeit und der geringen Statistik sind diese Ergebnisse insgesamt weniger verläßlich als die mit dem Correlator gemessenen Geschwindigkeiten.

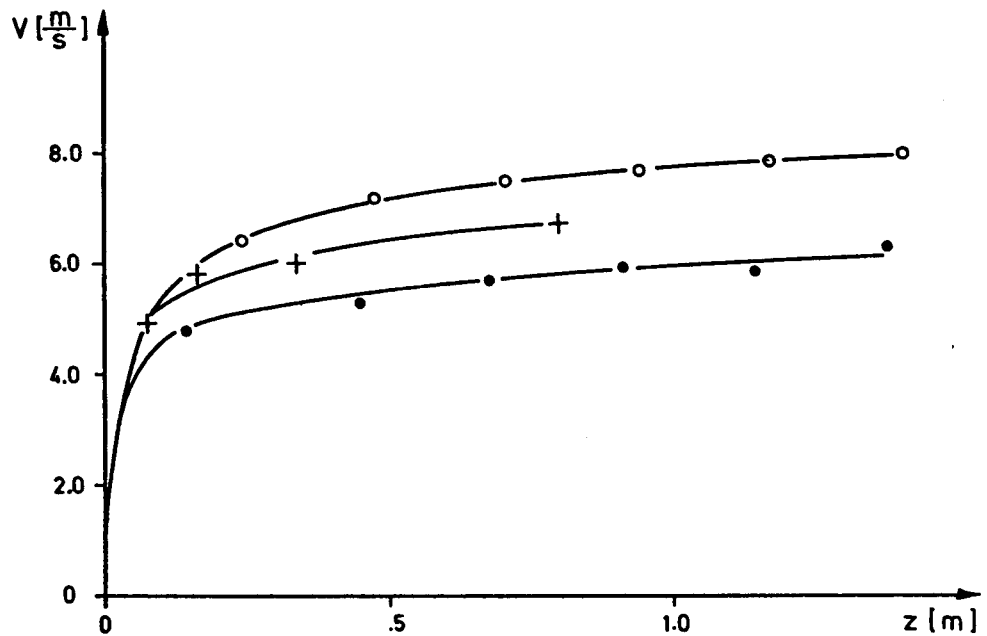


Abb. 27 Mittelwerte der mittleren Geschwindigkeiten

- Profil 1
- Profil 2
- + Profil 3

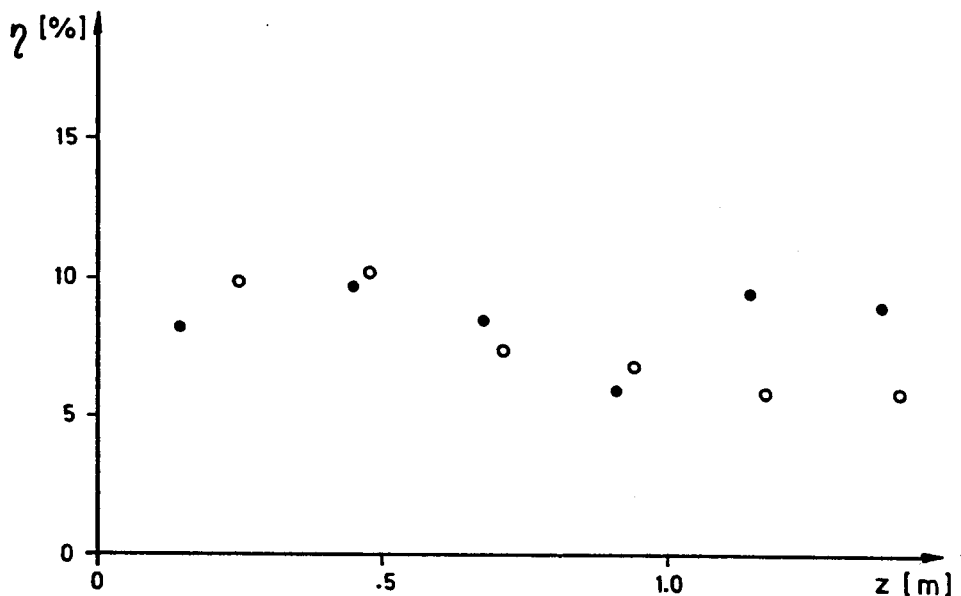


Abb. 28 Mittelwerte der Turbulenzintensitäten

- Profil 1
- Profil 2

Als Überblick sind in den Abbildungen 27 und 28 die Mittelwerte der mittleren Geschwindigkeiten (Komponente in Richtung M1, bei Profil 3 die Resultierende, die mit M1 fast zusammenfällt) und die Turbulenzintensitäten dargestellt.

Geht man aus von der vernünftigen Annahme, daß $v(z = 0) = 0$ gilt, und der Abschätzung, das Geschwindigkeitsmaximum eines einzelnen Profils liege bei ca. 1.6 m, so folgt, daß der Anstieg von $v = 0$ auf $v = \frac{1}{2} v_{\max}$ innerhalb der ersten 5 cm erfolgt. Da für $z < 7$ cm und $z > 140$ cm keine Meßdaten vorliegen, kann hier nur geschlossen werden, daß dieser Bereich kleiner als 10 cm ist.

5.6.2. Turbulenz

Die Turbulenzintensität nimmt mit wachsendem z ab; das ist typisch für Grenzschichten. Jedoch scheint der bei ca. 5 % liegende Grenzwert recht hoch. Gründe dafür könnten sein:

1. Grundturbulenz der See, dann wäre der Effekt echt.
- oder: 2. Schlingerbewegungen des Schiffes
3. optische Justierung (nicht-parallele Interferenzstreifen)
4. Vibrationen, die den Effekt vortäuschen können.

Abb. 29 zeigt, daß wegen nicht-paralleler Interferenzstreifen im Meßvolumen (Grund 3) zwei Teilchen gleicher Geschwindigkeit

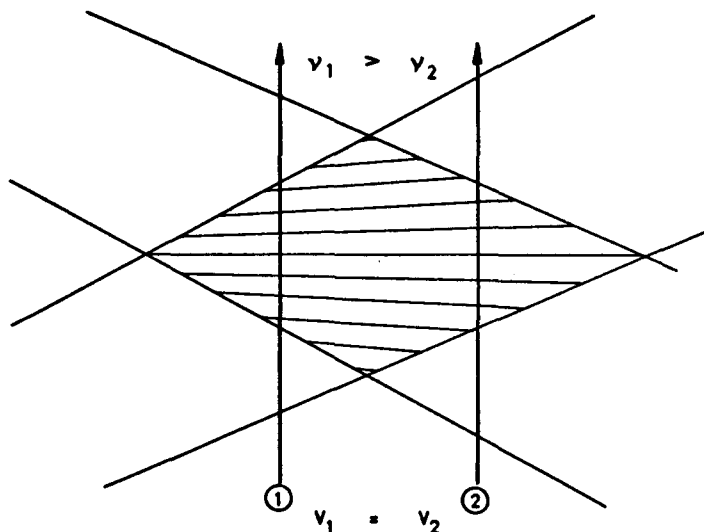


Abb. 29 Nicht-parallele Interferenzstreifen

auf verschiedenen Bahnen (① und ②) unterschiedliche Signalfrequenzen (hier: $\nu_1 > \nu_2$) hervorrufen. Die Ursache für dieses divergente Streifensystem ist, daß die Strahltaillen (= minimale Strahldurchmesser) der beiden Laserstrahlen nicht im Schnittbereich liegen (hier: links vom Schnittvolumen (s.a. Hanson [7])). Durch ein geeignetes Linsensystem vor der Zweifarben-Optik lassen sich die Strahltaillen in das Schnittvolumen abbilden. In Laborversuchen wurde die Justierung des mitgelieferten Linsensystems optimiert und eine scheinbare Turbulenzintensität von weniger als 2 % erreicht.

Die Schiffsvibration überträgt sich trotz der Schwingungsdämpfung auf die gesamte Optik, daher bewegt sich das Interferenzsystem relativ zum Schiffskoordinatensystem. Zwar ändert sich die Frequenz innerhalb eines Bursts nicht, aber aufeinanderfolgende Teilchen gleicher Geschwindigkeit (relativ zum Schiff) rufen verschiedene Signalfrequenzen hervor. Aus Messungen der Schwingungsfrequenzen am Gestell der Optik (höchste noch auflösbare Frequenz: 30 Hz) und der Schwingungsamplitude (± 0.5 mrad) folgt eine scheinbare Turbulenzintensität von weniger als 1 %.

Weiterhin kann ein Geschwindigkeitsgradient innerhalb des Schnittvolumens eine scheinbare Turbulenzintensität bewirken. Die Profile zeigen jedoch, daß dieser Effekt vernachlässigt werden kann.

5.6.3. Entfernung im Wasser

Bei dem 3-linsigen Zoom-System bewirkt die lineare Bewegung der ersten Linse ("Zoom-Linse") eine lineare Bewegung des Schnittvolumens in derselben Richtung, der Schnittwinkel ändert sich dabei nicht. Die Bewegung dieser Linse erfolgt über Schrittmotor und Getriebe. Eine bestimmte Stellung der Zoom-Linse entspricht daher einer definierten Brennweite. Experimentell wurde bestätigt, daß eine gewünschte Brennweite auch nach mehreren Stunden und mehrfacher Änderung der Brennweite spielfrei reproduziert werden kann.

Allerdings können unterschiedliche Justierungen der Optik Brennweitenänderungen von ± 5 cm bewirken. Rechnungen mit dem Ray-Tracing-Programm und Messungen konnten zeigen, daß die relative

Änderung der Brennweite als Funktion der relativen Änderung der Zoom-Linsen-Position praktisch nicht auf verschiedene Justierungen reagiert. Verschiedene Messungen ergaben eine Änderung der Brennweite von (6.90 ± 0.05) mm pro Schritteinheit der Zoom-Linse. Damit läßt sich die Entfernung des Schnittvolumens von einem gegebenen Startpunkt angeben. Beim Übergang der Strahlen in ein anderes optisches Medium ist zusätzlich die Änderung der Schnittweite durch den Brechungsindexsprung zu berücksichtigen. Hier ist es ein Übergang von Luft über Quarz (Fenster) ins Wasser, Abb. 30 zeigt den Strahlengang.

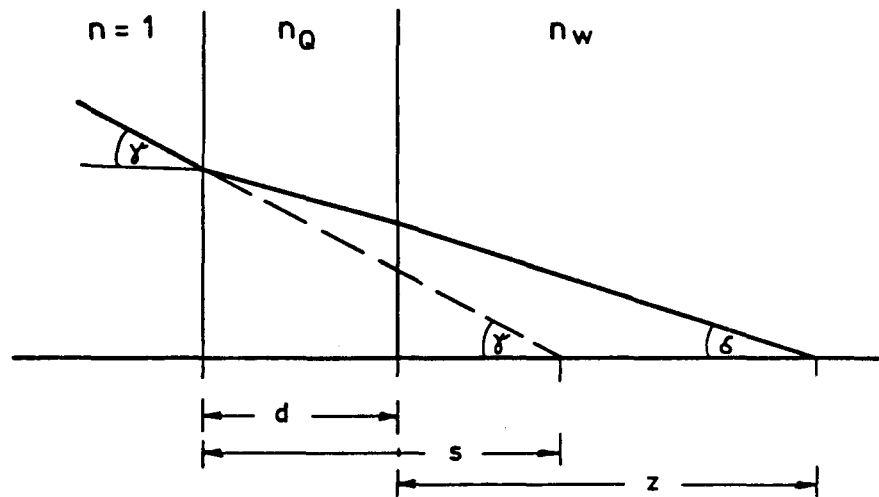


Abb. 30 Brechung beim Durchtritt durch das Fenster

Für die z-Koordinate des Meßpunktes (= Schnittweite im Wasser) folgt, da $\gamma \approx 1^\circ$

$$z = n_W \cdot s - \frac{n_W}{n_Q} \cdot d \quad (5)$$

Mit $n_W = 1.343$ ([10], s.a. 5.7.3.), $n_Q = 1.548$ [9] und $d = 28$ mm läßt sich dann nach

$$z = 1.343 \cdot s - 24 \text{ mm}$$

die Schnittweite im Wasser bestimmen.

Zusammenfassend gilt: Die Grenzschicht hatte eine Dicke von ca. 1.6 m; 50 % der maximalen Geschwindigkeit werden innerhalb der ersten 10 cm, wahrscheinlich sogar innerhalb der ersten 5 cm erreicht; die Turbulenz nimmt mit wachsender Entfernung vom Schiff ab, genauere Aussagen hierzu lassen sich wegen der großen Streubreite der Einzelwerte nicht machen.

5.7. Fehlerbetrachtung

Als Meßgrößen sind in den Grenzschichtprofilen die Geschwindigkeit v , die Turbulenzintensität η und die Entfernung des Meßpunktes von der Schiffsaußenhaut z angegeben; deren Genauigkeit ist zu diskutieren. Da diese Daten sich nur auf die Streuteilchen im Wasser beziehen, kann auf die Wasserströmung nur geschlossen werden, wenn die Teilchen ihr genau folgen. Dieses wird hier vorausgesetzt, weil Aussagen über Art und Größe der Streuteilchen nicht gemacht werden konnten.

5.7.1. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit v ergibt sich nach Gl. (1) aus der Frequenz ν_D , der Laserwellenlänge λ und dem halben Strahlschnittwinkel $\frac{\alpha}{2}$.

Der Fehler der Frequenz ν_D hängt von dem verwendeten Ausschnitt des Correlogramms, d.h. der Zahl der Perioden, dem Fit-Programm und der Correlator-Genauigkeit ab. Computer-Simulationen von M. Scheinpflug [8] ergeben einen relativen Fehler von 1 - 2 % für die vorliegenden Correlogramme; die Correlator-Genauigkeit wird vom Hersteller mit besser als 1 % angegeben. Damit kann auf einen relativen Fehler der Frequenz $\frac{\Delta \nu_D}{\nu_D}$ von ca. 2 % bei der Einzelmessung geschlossen werden.

Von dem Fehler der Einzelmessung, der auf dem Meß- und Auswerteverfahren beruht, ist der des Mittelwertes dieser einzelnen Werte zu unterscheiden, da eine Konstanz der Schiffsgeschwindigkeit über die gesamte Meßzeit nicht gewährleistet ist; er wird auf 4 - 5 % geschätzt. In dieser Größe wird auch der Fehler des Mittelwertes angenommen, der auf der ungenaueren und nur auf 20 Bursts basierenden Auswertung mit dem Speicheroszillographen beruht.

Die Laserwellenlänge ist sehr genau bekannt, der Fehler $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ ist kleiner als 10^{-4} .

Der Schnittwinkel der Laserstrahlen läßt sich mit einem vorhandenen Ray-Tracing-Programm berechnen. Nach Umbauten oder transportbedingter Demontage der Apparatur muß die gesamte Optik neu justiert werden; dabei können sich der Abstand der Strahlen voneinander und die Parallelität ändern (Abstand: ca. 0.5 mm, Parallelität: ca. 0.5 mrad). Messungen bei verschiedenen Justierungen ergaben eine Schwankung des Schnittwinkels von ca. 2 %. Durch die Brechung bei dem Übergang in ein anderes optisches Medium wird der Schnittwinkel geändert; da aber in Gl. (1) sowohl λ als auch $\sin\frac{\alpha}{2}$ durch $\frac{\lambda}{n}$ bzw. $\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{n}$ zu ersetzen sind, ändert sich die Signalfrequenz nicht. Insgesamt ergibt sich für die Mittelwerte der mittleren Geschwindigkeiten ein Fehler von ca. 5 %.

5.7.2. Turbulenz

Die oben erwähnten Computer-Simulationen ergeben für die vorliegenden Correlogramme relative Fehler in der Turbulenzintensität von 30 - 40 %. Zur Klärung der Grenzen in der Anwendung der Simulationsergebnisse sei auf den zitierten Bericht verwiesen. Da keine anderen Aussagen über die Fehler von η vorliegen, wird vorausgesetzt, daß die Simulationsergebnisse auf die vorliegenden Correlogramme anwendbar sind. Trotz des dann recht hohen Fehlers in η ist dieser doch durch die große Streubreite der Einzelmessungen gerechtfertigt.

5.7.3. Entfernung im Wasser

Die Schnittweite im Wasser hängt von der eingestellten Brennweite und dem Brechungsindex des Wassers ab. Die Brennweite ist nach 5.6.3. mit einem Fehler von ca. 1 % behaftet.

Der Brechungsindex wurde nicht direkt gemessen, läßt sich jedoch über Temperatur- und Dichtebestimmung ermitteln; dazu wurden während der Meßreise Wasserproben entnommen. Setzt man voraus, daß der Salzgehalt des Meerwassers vornehmlich auf NaCl zurückzuführen ist, so folgt aus den Dichtemessungen ein Salzgehalt von ca. 3.3 % (nach [9]). Aus Messungen bei 3.5 % Salzgehalt [10] läßt sich der Brechungsindex n_w für die Profile 1 und 2 zu $n_w = 1.3428$ und für Profil 3 zu $n_w = 1.3431$ bestimmen (Wassertemperatur bei Profil 3 kleiner). Die Genauigkeit dieser Angaben zeigt, daß der Fehler durch den Brechungsindex zu vernachlässigen ist.

Insgesamt ist von einem Fehler der Ortsbestimmung (z-Achse) von 1 % auszugehen.

6. Zusammenfassung

Nach einer Darstellung des Meßprinzips wurde auf die im Labor vorgenommenen Untersuchungen eingegangen. Entscheidend war der anschließende erste Versuch auf hoher See.

Während der Meßreise auf dem Flüssiggas-Tanker T/T Methane Progress konnten mit der erstellten Laser-Doppler-Apparatur erstmalig Messungen auf einem großen Schiff durchgeführt werden. Die Lage des Meßplatzes im Schiff erlaubte das Ausmessen von Grenzschichtprofilen. Neben den gewonnenen Profilen lassen sich als Ergebnisse festhalten:

1. Das gewählte Meßverfahren und die Apparatur sind grundsätzlich geeignet, Strömungsfelder um einen Schiffsrumpf auszumessen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, daß die Schwierigkeiten bei Bordmessungen (hoher Vibrationspegel, keine Laborbedingungen) überwunden werden können. Durch Umkonstruktion ist die Apparatur den beengten Raumverhältnissen im Schiff anzupassen.
2. Die Signalqualität ist derart, daß sowohl mit dem Photonen-Correlator (geringe Streuintensität) als auch mit einem Counter (hohe Streuintensität) gearbeitet werden kann. Die bisherigen Erfahrungen lassen beide Arten der Signalverarbeitung gleich geeignet erscheinen; jedoch können Meßaufgabe (stationäre oder instationäre Messungen) und andere Parameter (z.B. Wasserqualität, Teilchenkonzentration) Schwerpunkte setzen.

Für die großzügige Förderung dieses und des vorhergehenden Vorhabens sei an dieser Stelle dem Bundesministerium der Verteidigung, insbesondere der zuständigen Abteilung, unser Dank ausgesprochen. Der Fraunhofer-Gesellschaft danken wir für die gewährte Verwaltungshilfe.

Die umfangreichen Vorbereitungen für die Meßfahrt und die Meßfahrt selbst ließen sich nur in Zusammenarbeit mit der "Cooperative Research Programme" bewältigen. Besonderer Dank sei dabei gerichtet an "Shell International Marine Ltd", London, als Reeder der "Methane Progress" und an "Det norske Veritas", Oslo. Ebenfalls zu danken ist den am Projekt mitwirkenden Mitgliedern des Instituts, wobei speziell M. Scheinpflug, J. Schulz und H. Stöhrmann zu erwähnen sind.

7. Geräteübersicht

Lasert	Argon-Ionen-Laser, Spectra-Physics Modell 165-06 mit Netzgerät 265
Optik	DISA 55x00 Zwei-Farben-Optik DISA Zoom-Optik
Photomultiplier	RCA 4526 für Transienten-Recorder ITT FW 130 für Correlator
Hochspannungs- netzgerät	Oltronix A 2.5 K 40 HR
Vorverstärker	Levell TA 605
Bandpass-Filter	Krohn-Hite 3100
Transienten-Recorder	Biomation 8100
Tisch-Computer	Hewlett-Packard 9825 A
Magnetband-Einheit	Hewlett-Packard 9877 A
Oszillographen	Hewlett-Packard 1201 A Hewlett-Packard 1741 A Malvern
Correlator	Malvern K 7023

8. Literatur

- [1] J. Yeh, H.Z. Cummins:
Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne-Laser
Spectrometer
Appl. Phys. Letters 4, 176 (1964)
- [2] R.J. Goldstein:
Measurement of Fluid Velocity by Laser-Doppler-Techniques
Appl. Mech. Reviews 27, 753 (1974)
- [3] F. Durst, J.H. Whitelaw:
Integrated Optical Units for Laser Anemometry
Journ. Phys. E 4, 804 (1971)
- [4] J.B. Abbiss:
Photon Correlation Velocimetry in Aerodynamics
in "Photon Correlation Spectroscopy and Velocimetry",
Herausgeb. H.Z. Cummins, E.R. Pike,
Plenum Press, New York 1977, S. 386
- [5] A.D. Birch, D.R. Brown, J.R. Thomas:
Photon Correlation Spectroscopy and its Application
to the Measurement of Turbulence Parameters in Fluid Flow
Journ. Phys. D 8, 483 (1975)
- [6] J. Isensee:
Gastanker
Hansa 6, 537 (1965)
- [7] S. Hanson:
Broadening of the measured Frequency Spectrum in a
Differential Laser Anemometer due to Interference
Plane Gradients
Journ. Phys. D 6, 164 (1973)
- [8] M. Scheinpflug:
Nachlaufuntersuchungen an einem Schiffsdoppelmodell
im Windkanal mit Hilfe eines Laser-Doppler-Anemometers
unter Verwendung eines Photonen-Correlators
IfS-Bericht Nr. 336

- [9] J. D'Ans, E. Lax:
Taschenbuch für Chemiker und Physiker.
Springer-Verlag, 2. Auflage, 1949, S. 794 u. 807
- [10] E.M. Stanley:
The Refractive Index of Seawater as a Function of
Temperature, Pressure, and two Wavelengths
Deep-Sea Research 18, 833 (1971)