

Einsatz der LDA-Meßtechnik bei hydrodynamischen Untersuchungen am Kavitationstunnel der SVA Potsdam

Wolf-Bernd Böer, Wolfgang Selke und Andreas Junglewitz, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Inhalt

Der LDA-Meßplatz am Kavitationstunnel wird in seiner Entwicklung, mit seiner Gerätestruktur und in seiner Funktionsweise mit einigen Anwendungsbeispielen aus der Praxis vorgestellt. Als Beispiele dienen Messungen des Geschwindigkeitsprofils hinter:

- einem vordrallerzeugenden Leitgitter
- Propellern, die mit und ohne Gegendrall im Zustrom arbeiten
- Propellern, die unterschiedlich geformte Nabenaufbauten besitzen.

Außerdem werden Hinweise zur Weiterverarbeitung der Meßwerte gegeben.

Abstract

The LDA placed at the cavitation tunnel of the Schiffbau-Versuchsanstalt in Potsdam is introduced with its development, its structure of implements and working possibilities. Some examples are given including measurement of velocity profiles behind:

- a cascade, generating a rotating onset flow to a propeller
- propellers, working with and without a rotating onset flow
- propellers with various forms of boss caps

Some aspects of subsequent treatment of the measurement results are mentioned additionally.

1. Entwicklung des LDA-Meßplatzes

Schon frühzeitig wuchsen die Forderungen zur Aufmessung der Geschwindigkeitskomponenten im Kavitationstunnel über die Möglichkeiten, die die üblichen Sonden boten, hinaus. Dies betraf nicht nur die Genauigkeit und Flexibilität, jeden beliebigen Punkt innerhalb des Meßbereichs anzusteuern, sondern auch berührungslos und ökonomisch ganze Geschwindigkeitsfelder aufmessen zu können. Aus diesen Gründen wurde im Auftrag des VEB Kombinat Schiffbau durch die Universität Rostock, Sektion Technische Elektronik, ein 1-Komponenten-LDA speziell für einen Kavitationstunnel entwickelt und Ende 1984 der SVA Potsdam zur Nutzung übergeben [1].

Da sofort auf eine vollautomatische Vermessung von Geschwindigkeitsfeldern orientiert wurde, montierte man zum Verfahren des Meßvolumens eine 3-Komponenten-Verstell-einheit, die von einer CNC-Steuerung bewegt wird, und setzte einen Mikrorechner aus K 1510 Baugruppen (Prozessor U808) zur on-line-Auswertung der Meßsignale vom LDA ein.

Damit konnten aber noch nicht die Anforderungen befriedigt werden, die sich aus feldtheoretischer Sicht und den dazugehörigen Rechnungen ergaben. Daher wurde das System 1985/86 durch eine kommerzielle 2-Komponenten-Optik LADO II, einen schnelleren LDA-Mikrorechner aus K 1520 Baugruppen (Prozessor U 880) ersetzt, und es wurde die CNC-Steuerung mit dem LDA-Rechner gekoppelt. Damit wurde die Steuerung, Messung, Aufzeichnung und Auswertung von einem Meßplatz aus möglich [2].

Die Anwendung des LDA bezog sich anfangs nur auf die Bestimmung zeitlicher Mittelwerte in simulierten Nachstromfeldern. Später wurden die Untersuchungen feiner, und das Anwendungsspektrum erweiterte sich z. B. auch auf Messungen im Propellerstrahl, hinter Düsenpropellern, Profilen, Wellenböcken usw.

Zur Verbesserung der schnellen Meßwertauswertung und damit weiteren Anpassung an den Routinebetrieb wurde eine Trennung in Meßrechner und LDA-Computer vorgenommen. Der LDA-Computer, z. Z. ein MC80.30, wird zur Bedienung des Meßrechners, der Filterbank, der CNC-Steuerung und zur Auswertung der Meßwerte und deren Ausgabe genutzt. Mit dieser Trennung ist das System jederzeit schnell erweiterungsfähig, wobei der LDA-Computer als Bedien- und Auswertecomputer die Verarbeitungsgeschwindigkeit bestimmt. Somit ist die SVA Potsdam vorbereitet, neuen und damit sicherlich höheren Anforderungen an die Meßtechnik gerecht zu werden.

2. Der LDA-Meßplatz

Im Bild 1 ist die Hardware-Konfiguration des Meßplatzes einschließlich der zur Weiterverarbeitung der Meßergebnisse notwendigen Peripherie dargestellt.

Die wesentlichen technischen Parameter sind folgende:

15 mW He-Ne-Laser LG 79/1

3-Strahl-2-Komponenten-Optik LADO II

Meßverfahren: Vorwärtsstreuung

Sendeoptik: Brennweite 500 mm

Strahlabstand 20 mm 40 mm 80 mm

Meßvolumen: Durchmesser 0,24 mm 0,12 mm 0,06 mm

Länge 15,80 mm 3,95 mm 0,99 mm

Empfangsoptik: Brennweite 840 mm

Meßbare Komponenten:

- in Strömungsrichtung (v_x)
- senkrecht (vertikal) zur Strömungsrichtung (v_z)

Meßrechner: MC80.SE/MC80.30

- Assemblerprogrammierung
- spezielles MC80-BASIC
- Kassettenmagnetband
- IFSS-Interface
- grafikfähiger Bildschirm

CNC-642 H-Steuerung

Bild 2 zeigt das Schema zur Bedienung des Meßplatzes. Die zur Bedienung fast ausschließlich in BASIC geschriebene Software bietet folgende Möglichkeiten:

* Optimierung des Meßvorganges

– Wahl der Betriebsart

1. Zeitäquidistant – zur Bestimmung des zeitlichen Mittelwertes der Geschwindigkeit

1.1. Zeitäquidistant – Aussetzend – zur Bestimmung des zeitlichen Mittelwertes der Geschwindigkeit bei schwankenden Geschwindigkeiten

1.2. Zeitäquidistant – Akkumulation – zur Bestimmung des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufes bei periodisch schwankenden Geschwindigkeiten und hieraus Berechnung des zeitlichen Mittelwertes

2. Burst – zur Bestimmung des zeitlichen Mittelwertes der Geschwindigkeit bei extrem niedriger Streuteilchendichte

– Vorgabe von 15 Parametern zur Realisierung der Steuerung folgender Meßprogramme:

- Aufmessung in Zylinderkoordinaten
- Aufmessung in karthesischen Koordinaten
- Aufmessung als Einzelpunkt

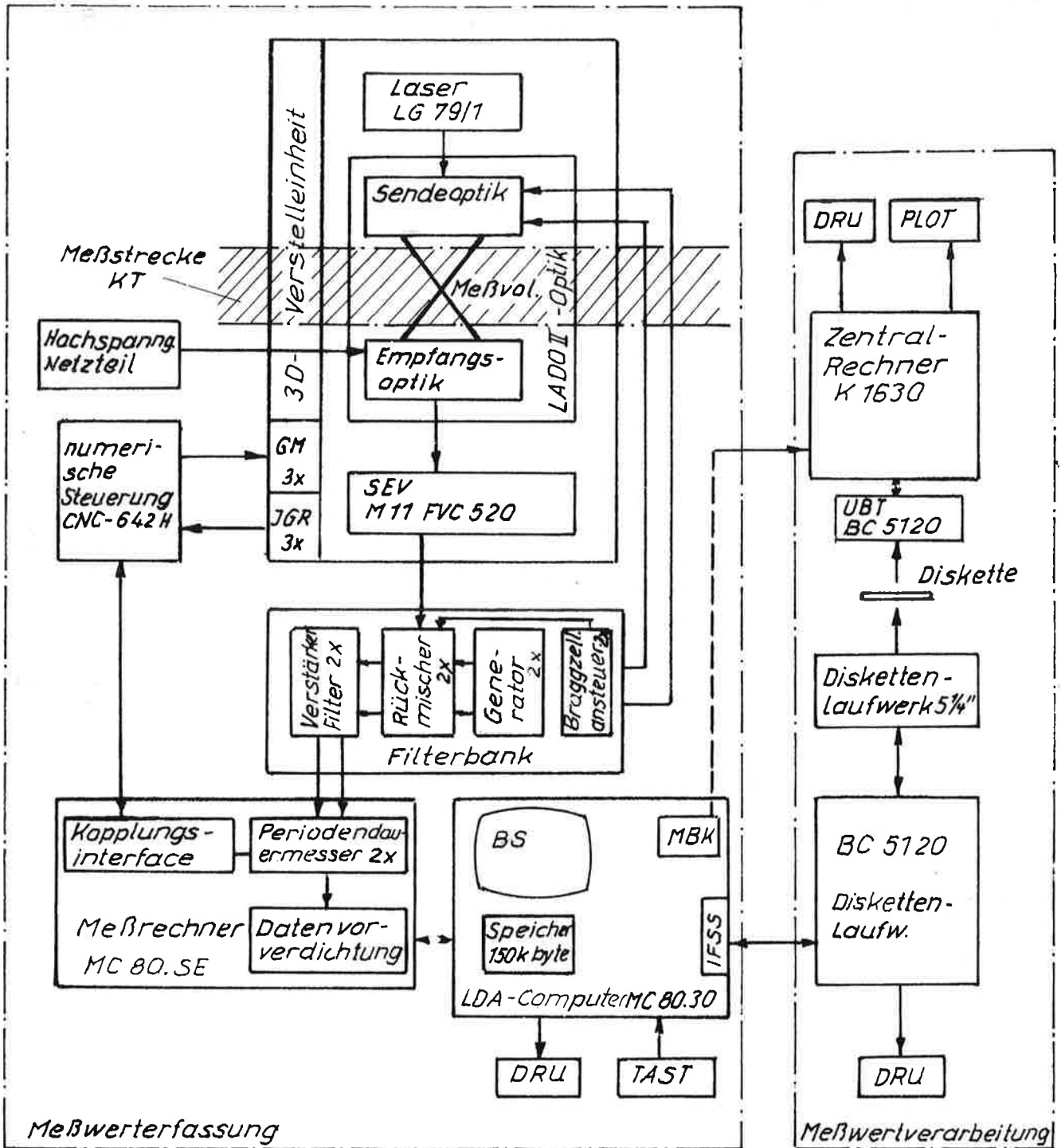


Bild 1. LDA-Meßplatz SVA Potsdam Meßwertaufnahme – Meßwertverarbeitung Stand 08/89

- * Start einer Messung und Anzeige des zeitlichen Mittelwertes (interne Überwachung der Datenrate, der Dopplerfrequenz und der maximalen und minimalen Frequenz auf Lage innerhalb der durch Hoch- und Tiefpaß vorgegebenen Grenzen)
- * Wahl der Ausgabe
 1. grafische Darstellung des Geschwindigkeits-Zeitverlaufs oder der statistischen Verteilung der Geschwindigkeit auf dem Bildschirm oder als Hardcopy auf einem Nadeldrucker
 2. Ausdruck der zeitlichen Mittelwerte der Geschwindigkeiten als Tabelle
 3. Übertragung der einzelnen Meßwerte oder der zeitlichen Mittelwerte der Geschwindigkeit zu einem anderen Rechner

3. Meßtechnische Möglichkeiten

Auf Grund der Meßstreckenscheibengröße des K 15A und der Brennweite der Sende- bzw. der Empfangsoptik ist die Geschwindigkeitsaufmessung in dem im Bild 3 dargestellten Bereich möglich. Durch das Grundprinzip „Vorwärtsstreuung“ ergibt sich zwangsläufig:

- die Aussparung des Wellen- oder Nabenbereichs in unmittelbarer Nähe des Propellers
- bei Einbauten läßt sich ein kleinerer Abstand von der Kontur als etwa 8 mm nicht realisieren.

Realisiert werden:

- * Simultane 2-Komponentenmessung mit Richtungsbestimmung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeitskomponenten

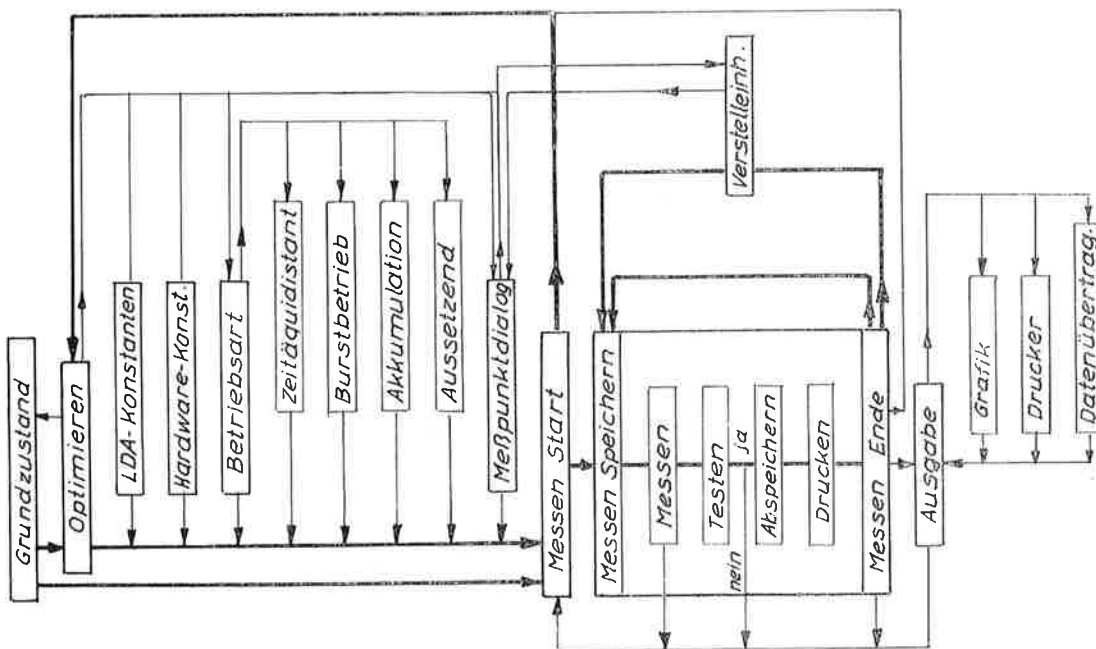
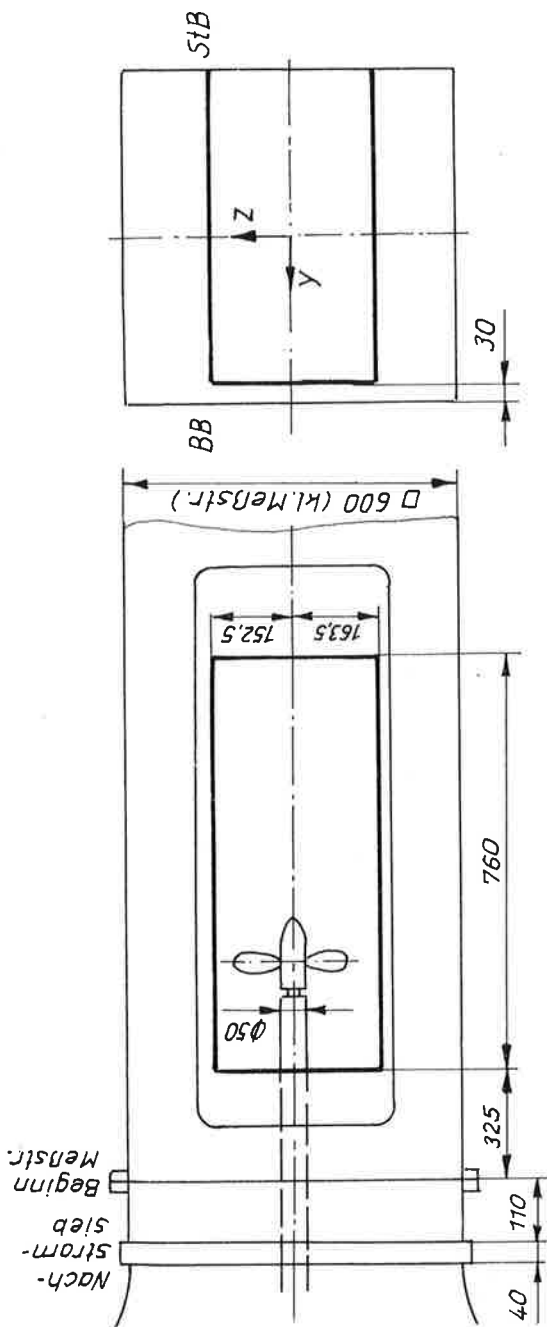


Bild 2. LDA-Meßplatz SVA Potsdam
Programmstruktur Stand 08/89



Strahlabstand = 40 mm
Dpüse = 250 mm
X min ≈ 8 mm

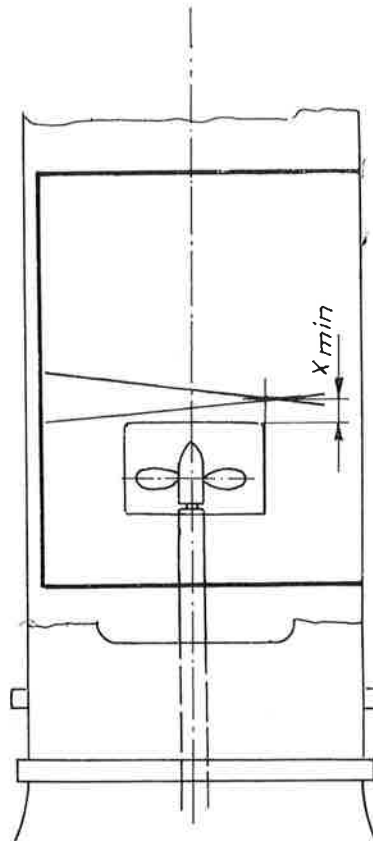


Bild 3. Räumlicher LDA-Meßbereich

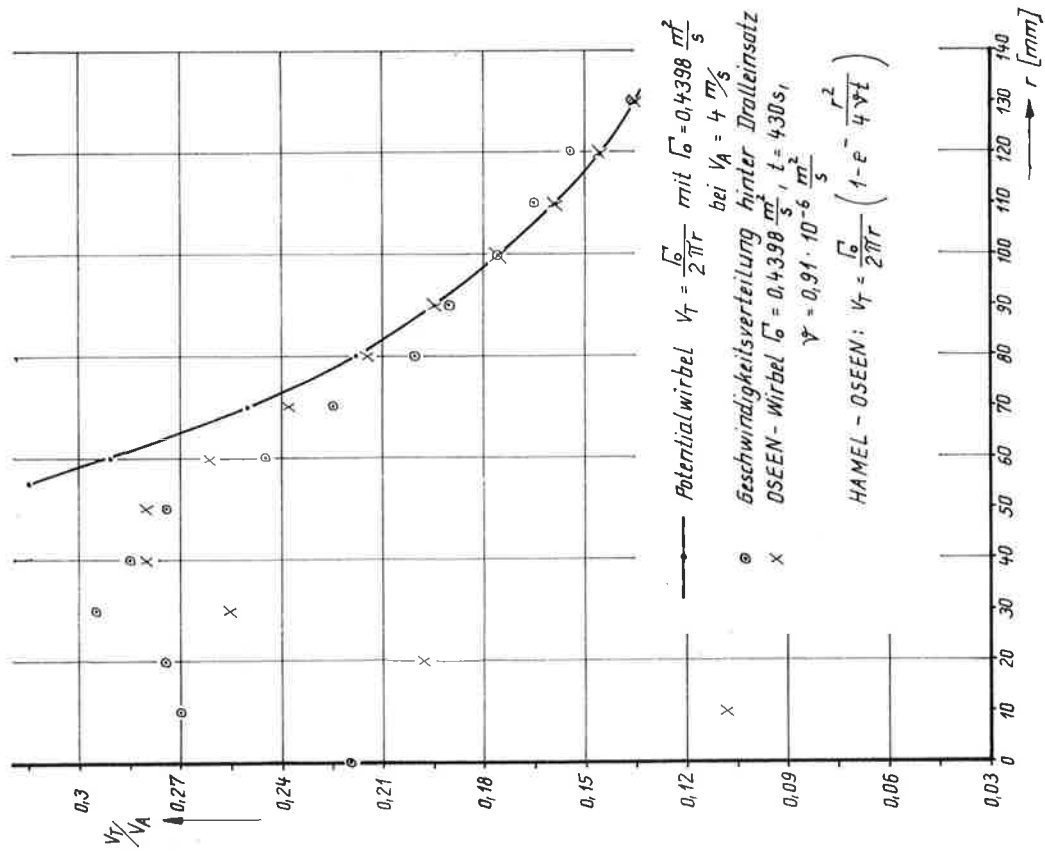


Bild 4. Umfangsgeschwindigkeitsverlauf des Potentialwirbels, des real erzeugten Wirbels hinter dem Draalleinsatz und nach Hamel-Oseen

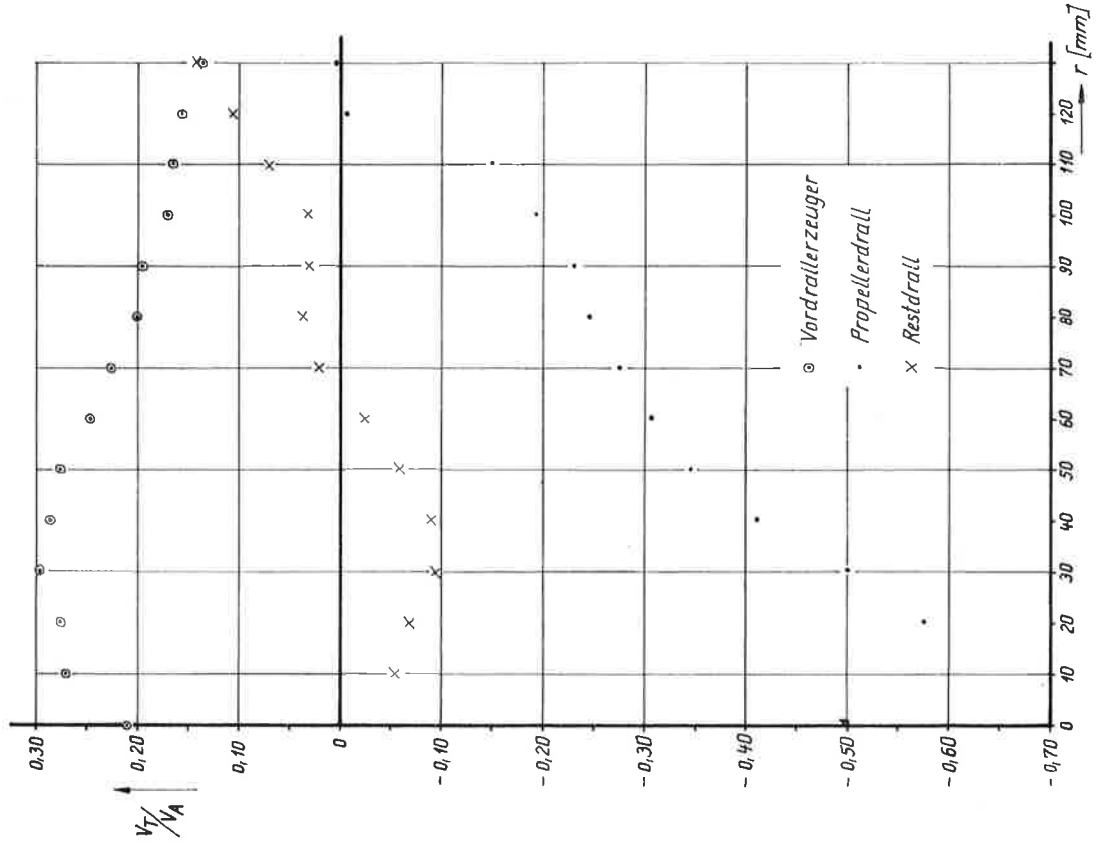


Bild 5. Erzeugter Vordrall, Propellerdrall und Restdrall

- * Automatische Aufmessung von Geschwindigkeitsfeldern durch Kopplung der CNC-Steuerung an den LDA-Rechner
- * Speicherung der Meßwerte und der zeitlichen Mittelwerte der Geschwindigkeit im internen Speicher des Meßrechners
- * Meßwertdarstellung auf
 - dem Bildschirm des LDA-Computers
 - einem Drucker als Tabelle oder grafisch als Hard-copy
 - einem Plotter als Diagramm
- * Datenübertragung der Meßwerte auf
 - Drucker
 - Magnetbandkassette
 - anderen PC über IFSS-Interface zur Speicherung oder Weiterverarbeitung

4. Einige Bemerkungen zu speziellen Untersuchungen

International werden große Anstrengungen unternommen, die Propulsionsverhältnisse von Schiffen energetisch günstiger zu gestalten, z. B. unter Zuhilfenahme von den Zu- und Abström beeinflussenden Leiteinrichtungen. Das in der DDR entwickelte Leitflossensystem sorgt für eine Umlenkung der am Heck aufwärtsgerichteten Strömung derart, daß der Propeller eine genderrallbehaftete Zuströmung erhält.

Zur Klärung des Vordralleinflusses auf die Propellercharakteristik wurde durch die Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam ein Dralleinsatz für den Kavitationstunnel entworfen und gebaut. Dieser erzeugt einen linksdrehenden Drall mit einer Stärke von $VT = 0,2 * VA$ auf dem Radius $0,7 * R$

für einen gewöhnlichen Modellpropeller mit einem Durchmesser von $D = 250$ mm.

Die Umfangsgeschwindigkeitsverteilung, die der nach einem Potentialwirbel konzipierte Dralleinsatz erzeugt, wurde mit dem LDA im leeren Querschnitt verfeinert aufgemessen. Der durch technologische Einschränkungen realisierte lineare Anstieg des Anstellwinkels der Profile führt zu einer immer größer werdenden Abweichung zum Potentialwirbel mit kleiner werdendem Radius.

Allgemein kann gesagt werden, daß das aufgemessene Profil vom Verlauf her dem eines Oseen-Wirbels ähnelt (Bild 4).

Wird ein Potentialwirbel in einem viskosen Medium sich selbst überlassen, so entstehen Geschwindigkeitsprofile, die nach Hamel-Oseen mathematisch beschreibbar sind:

$$VT = GAMMA / (2 * PI * r) * (1 - \exp(-r * r / (4 * NUE * t)))$$

Als Unbekannte treten hierin auf:

- die Zirkulation des Wirbels zum Zeitpunkt $t = 0$ (Potentialwirbel) GAMMA
- die Zeit t , die seit Zerfallsbeginn des Potentialwirbels vergangen ist
- die kinematische Viskosität NUE, die nach (6) nicht mehr eine nur von der Temperatur abhängige Stoffgröße ist.

Ohne näher darauf einzugehen, sei hier die Wahl der einzelnen Parameter nur angegeben (siehe Bild 4).

Eine Approximation des realen Wirbels gelingt mit den berechneten Profilen in den Innenschnitten nicht und etwa ab VT_{max} befriedigend. Im letztgenannten Bereich liegen die Abweichungen etwa zwischen 1% und 7,5%.

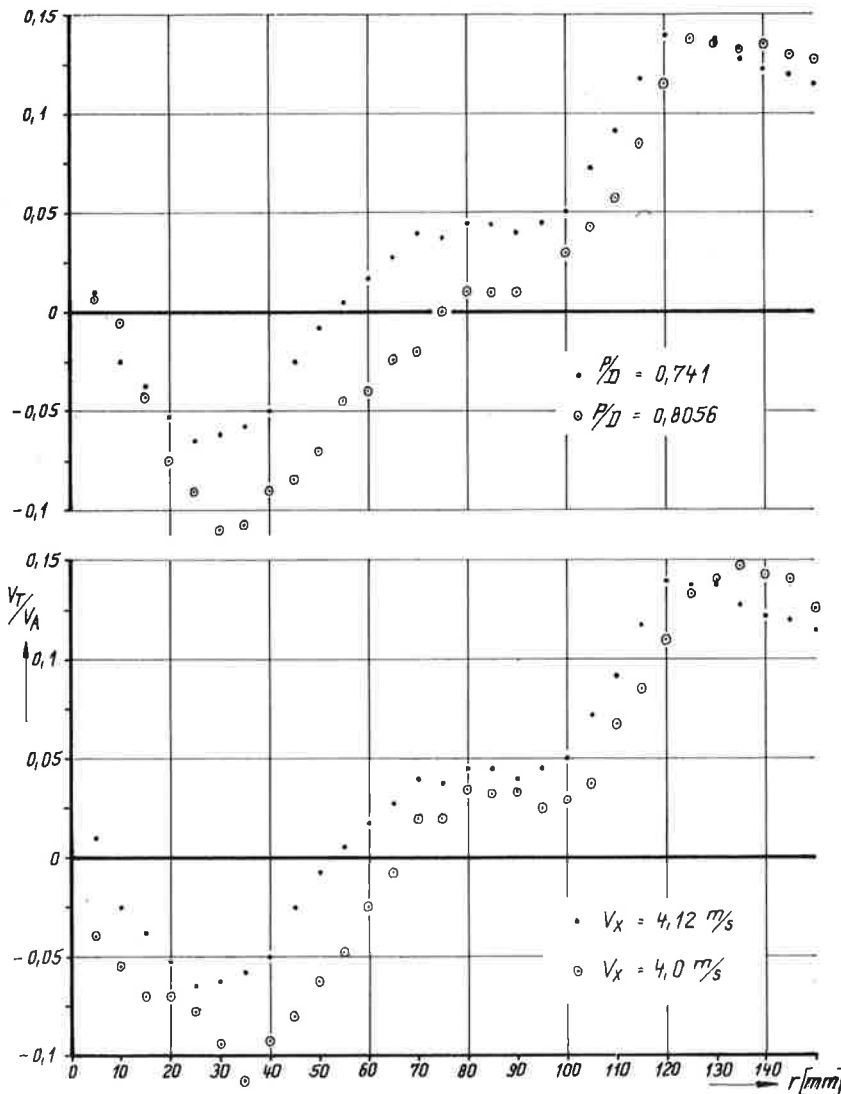


Bild 6. Einfluß von Anströmgeschwindigkeit und Steigung auf den Restdrall

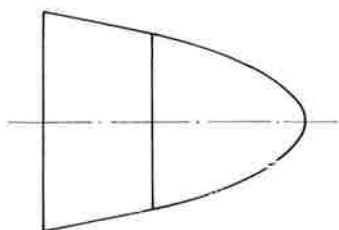
Als Fazit kann festgestellt werden, daß der durch den Dralleinsatz erzeugte Wirbel, abgesehen von den Innenschnitten, ausreichend gut durch die sehr einfache mathematische Beschreibung des *Oseen*-Wirbels dargestellt werden kann.

Der Einsatz eines LDA ist besonders hilfreich, wenn der Propellerzustrom nicht mehr homogen ist, wie beispielsweise bei der Anwendung des oben beschriebenen Dralleinsatzes. Wenn es sonst genügt, die Axialgeschwindigkeit für die Berechnung des Fortschrittsgrades oder für die begleitende Kennlinienberechnung zu bestimmen, so wird bei inhomogenem Zustrom die Berücksichtigung des räumlichen Geschwindigkeitsfeldes erforderlich. Beim Vergleich von Propellern unter Vordrall mit homogen angeströmten ist es nicht ausreichend, die mit der Axialgeschwindigkeit gebildete Fortschrittsziffer in Übereinstimmung zu bringen, sondern es muß auf eine energetische Äquivalenz des Zustroms geachtet werden. Aus der Notwendigkeit heraus, Vordrallerzeuger und Propeller exakt aufeinander abzustimmen, muß ein sensibles Kriterium benutzt werden, um die Güte der Abstimmung beurteilen zu können. Die globalen Größen Schub und Drehmoment allein sind hierfür nicht so geeignet wie die Verwendung der Geschwindigkeitsverteilung im Propellerstrahl.

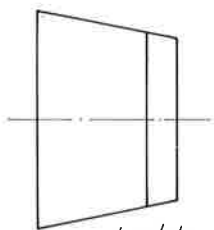
Auf den folgenden Bildern sind Umfangsgeschwindigkeitsverteilungen im Propellerstrahl dargestellt, wobei diese Propeller unter Gegendrall arbeiteten. Deutlich zu sehen ist, daß nicht der gesamte Drall kompensiert wird, was auch bezweckt wurde, denn eine vollständige Auslöschung des Dralls entspricht nicht dem energetischen Optimum (Bild 5).

Erkennbar ist hierbei, wie sensibel das System Vordrallerzeuger-Propeller auf Änderungen sowohl der Anströmgeschwindigkeit als auch der Steigung reagiert (Bild 6).

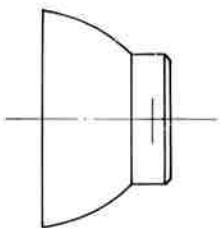
In früheren Jahren wurden Untersuchungen gemacht, um den Unterschied von verschiedenartig geformten Naben-



herkömmliche Ablaufkappe



kegelstumpfförmige Ablaufkappe



halbkugelförmige Ablaufkappe mit zyl. Mutter

Bild 7. Untersuchte Ablaufkappenformen

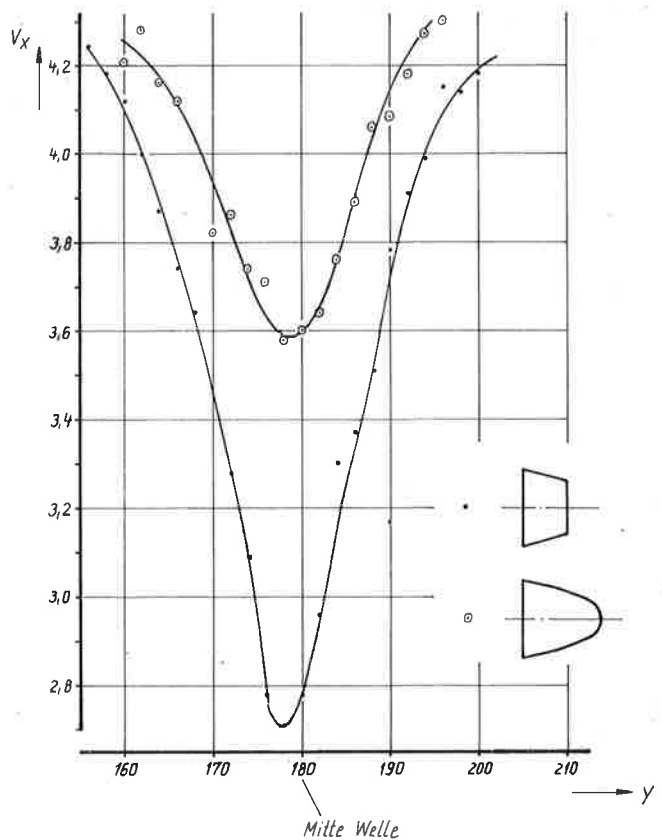


Bild 8. Nachlaufgebiete unterschiedlicher Nabenablaufkappenformen

ablaufkappen festzustellen. Damals kam man zu dem Ergebnis, daß diese keinen erkennbaren Einfluß auf die globalen Größen Schub und Drehmoment haben. Heute ist es möglich, durch Aufmessen der Axialgeschwindigkeitsverteilung im Nachstrom auch kleinere Schubunterschiede festzustellen.

Untersucht wurden drei verschiedene Ablaufkappenformen (Bild 7):

- eine herkömmliche (Rotationsparaboloid)
- eine kegelstumpfförmige
- eine halbkugelförmige mit anschließender zylindrischer Mutter

Den Erwartungen gemäß zeigten diese Formen beim Aufmessen der axialen Geschwindigkeit unterschiedlich stark ausgeprägte Nachlaufgebiete. Unter der Voraussetzung, daß sich die Schubänderung voll durch eine Geschwindigkeitsänderung äußert, zeigt es sich, daß die kegelstumpfförmige Ablaufkappe den größten Schubverlust liefert, während die herkömmliche Form die kleinsten Verluste verursacht (Bild 8). Die Differenz zwischen beiden ergibt einen Unterschied von etwa 0,24 kp, der innerhalb der Fehlergrenze der mechanischen Waage liegt und daher über Schubmessungen schwer quantifizierbar ist.

Derartige Messungen sind auf den gesamten Propellerstrahl erweiterbar. Aus der Geschwindigkeitsverteilung in axialer Richtung wäre alternativ der Propellerschub bestimmbar, wobei durch Wahl eines geeigneten Meßregimes sichergestellt werden muß, daß repräsentative Mittelwerte der Geschwindigkeit gemessen werden. Mittels dieser Messungen können nachstrombedingte Schubexzentrizitäten ermittelt oder aber zustrombeeinflussende Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit qualitativ und quantitativ bewertet werden.

Das Spektrum der Anwendung der Geschwindigkeitsmessung mit dem LDA reicht noch wesentlich weiter. Deutlich wurde bei dieser kleinen Auswahl von Anwendungen, daß es möglich ist, wesentlich genauere Informationen zu erhal-

ten und feinere Untersuchungen durchführen zu können. Da auch die kleinsten Einflüsse ihren Niederschlag im Geschwindigkeitsprofil finden, ist es oft nicht einfach, den Wirkungen die entsprechenden Ursachen zuzuordnen. So finden sich in axialen Geschwindigkeitsverteilungen nicht nur Nachlaufgebiete z. B. der Schaufeln des oben genannten Dralleinsatzes, sondern ganz schwach sogar die der Impellerflügel wieder.

Des weiteren wird sich der Nutzer frühzeitig mit der Frage der Meßwerterfassung und -verarbeitung auseinandersetzen müssen. Gerade bei der automatisierten Messung fällt eine Unmenge Datenmaterial an, das per Hand nicht mehr zu verarbeiten ist. Empfehlenswert ist hier eine on-line-Verarbeitung vom LDA über einen PC bis hin zum Plotter. Bei der Auswahl der Geräte sollte auch daran gedacht werden, daß es oft erforderlich ist, eine Messung gleich an Ort und Stelle schnell bewerten zu können. Ein Hilfsmittel dazu ist ein grafikfähiger PC, der parallel zur Messung diese gleich grafisch darstellt. Des weiteren sollte dieser PC so leistungsfähig sein, daß die gemessenen Werte vorausberechnet werden und als Grafik bereits auf dem Bildschirm vorhanden sind, wenn die Messung durchgeführt wird.

5. Ausblick

Die Weiterentwicklung der LDA-Meßtechnik für die SVA Potsdam wird durch die Sektion Technische Elektronik der Universität Rostock in folgender Weise betrieben:

- simultane 3D-Messung durch Variation der LADO II-Optik und Erweiterung der Signalauswertung
- Entwicklung eines LDA-Meßplatzes im Rückstreuerverfahren unter Nutzung der LADO II-Optik bei gleicher Laserleistung.

Literatur

- [1] Albrecht, H.-E., u. a.: Entwicklung, Erprobung und Anwendung eines Laser-Doppler-Anemometers für Strömungsmessungen im Kavitationskanal. Schiffbauforschung 22 (1983) 2
- [2] Fuhs, W.: Praxis von Geschwindigkeitsmessungen mittels Laser-Doppler-Anemometer im Kavitationskanal. Schiffbauforschung 26 (1987) 3
- [3] Peters, H.-E.: Propellerversuche in drallbehafteter Strömung. SVA-Bericht Nr. 1715, 1988
- [4] Peters, H.-E.: Dralleinsatz für den Kavitationstunnel. SVA-Bericht Nr. 1716, 1988
- [5] Junglewitz, A.: Vordrallangepaßter und herkömmlicher Propeller in drallbehafteter Zuströmung. SVA-Bericht Nr. 1763, 1988
- [6] Timme, A.: Über die Geschwindigkeitsverteilung in Wirbeln. Ingenieur-Archiv 25 (1957)

Erweiterung des Gültigkeitsbereiches linearer Differentialgleichungen zur Beschreibung der gesteuerten Schiffsbewegung

Dr.-Ing. Helmut Papenfuß, Universität Rostock, Sektion Schiffstechnik

1. Einleitung

Bezüglich der gesteuerten Bewegung ist das Schiff als nicht-lineares Mehrgrößensystem anzusehen. Der Ausgangsvektor $\bar{Y} \{y_1, \dots, y_m\}$ ist mit dem Eingangsvektor $\bar{X} \{x_1, \dots, x_n\}$ durch sogenannte Kennfunktionen verknüpft, die in ihrer Gesamtheit das Übertragungsverhalten des Systems beschreiben.

Die üblicherweise erhobene Forderung, daß keinerlei Rückwirkungen vom Ausgang auf den Eingang erfolgen sollen, erfüllen solche Komponenten wie ‚Ruderquerkraft‘, ‚Propellerschub‘ bzw. ‚Wirkung des Querstrahlruders‘ nicht. Deshalb werden als Eingangsgrößen

- Ruderwinkel δ_R
- Propellerdrehzahl n
- Steigungswinkel φ

gewählt, weil diese Komponenten des Eingangsvektors tatsächlich als Führungsgrößen vorgegeben werden können.

In den nachfolgenden Betrachtungen ist allein die steuernde Wirkung des Ruders von Interesse, n und φ werden als konstant angenommen.

Das Schiff kann Bewegungen in sechs Freiheitsgraden ausführen. Für die Untersuchung der Manövrierfähigkeit von Überwasserfahrzeugen beschränkt man sich im allgemeinen jedoch auf die horizontalen Freiheitsgrade Längs- und Querversetzen sowie Drehen des Schiffes um seine Hochachse. Dann ist es ausreichend, wenn ausgangseitig die drei Zustandsvariablen

- Schiffsgeschwindigkeit u
- Gierwinkel β
- dimensionslose Bahnkrümmung Ω

eingeführt werden, die die Systemreaktion bei Veränderung der Eingangsgröße δ_R für $t > t_0$ in eindeutiger Weise beschreiben.

Nachdem Eingangs- und Ausgangsgrößen festgelegt sind, muß ein mathematisches Modell gefunden werden, das

physikalisch plausibel ist und beide Vektoren in geeigneter Weise miteinander verknüpft.

Die Beschreibung der gesteuerten Schiffsbewegung erfolgt an umfassendsten durch die vollständigen Bewegungsgleichungen, ein System von drei nichtlinearen Differentialgleichungen [1]. Voraussetzung für ihre Lösung ist jedoch, daß die von außen auf das Schiff wirkenden hydrodynamischen Kräfte und Momente bekannt sind. Da die theoretischen Ergebnisse hierzu derzeit noch nicht befriedigen, wendet man empirische Methoden zu ihrer Bestimmung an bzw. führt entsprechende Messungen an gefesselten Schiffsmodellen durch. Der erforderliche Meßaufwand ist dann allerdings hoch.

Auch mit Hilfe der Systemidentifikation lassen sich die Steuereigenschaften des Schiffes ermitteln [2], [3]. Das Verfahren ist sowohl für das Schiffmodell als auch für das originalgroße Schiff einsetzbar und erlaubt damit Rückschlüsse auf den Maßstabeinfluß. Entsprechend den meßtechnischen Möglichkeiten sind dann zur Beschreibung des Systemverhaltens einfache mathematische Modellstrukturen mit nur wenigen signifikanten Parametern erwünscht. Der Gültigkeitsbereich einfacher Übertragungsmodelle ist auf den Nahbereich um den Arbeitspunkt (z. B. die Geradeausfahrt), für den die Modellparameter ermittelt wurden, begrenzt. Das ist vielfach ausreichend; beispielsweise, wenn es um die Bestimmung der Gierstabilität auf gerader Bahn oder die Einbindung des Schiffes in eine Festwertkursregelung geht.

Soll der Gültigkeitsbereich derartiger Modellstrukturen erweitert werden, so müssen arbeitspunktabhängige Koeffizienten eingeführt werden, d. h. die Parameter sind dann nicht mehr konstant, sondern aussteuerungsabhängig.

2. Lineare Modellstrukturen

Lineare Übertragungsmodelle sind gegenüber nichtlinearen wesentlich einfacher zu handhaben. Außerdem bietet die lineare Systemtheorie eine Reihe weitentwickelter Analyseverfahren an, die u. a. die Anwendung des Superpositionsprinzips gestatten. Das ermöglicht eine klare Trennung der