

THEORIE UND PRAXIS DER LASER-DOPPLER-ANEMOMETRIE

von

FRANZ DURST

Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Universität Erlangen-Nürnberg
Erlangen, FRG.

ADRIAN MELLING

School of Mechanical Engineering
Institute of Technology
Cranfield, UK.

JAMES H. WHITELAW

Mechanical Engineering Department
Imperial College of
Science and Technology
London, UK.

Deutsche Übersetzung des Buches:

“Principles and practice of Laser-Doppler-Anemometry“

von

FRANZ DURST

Ordentlicher Professor
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Universität Erlangen-Nürnberg
Egerlandstraße 13, D-8520 Erlangen

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Durst, Franz

Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie /
Franz Durst ; Adrian Melling ; James H. Whitelaw.
|Dt. Übers. von Franz Durst|. - Karlsruhe : Braun, 1987
(Wissenschaft und Technik : Taschenausgaben)
Einheitssacht.: Principles and practice of laser doppler
anemometry (dt.)

NE: Melling, Adrian: Whitelaw, James H.:

ISBN 978-3-7650-2022-3 ISBN 978-3-642-52132-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-52132-4

(c) 1987 by G. Braun (vormals G. Braunsche Hofbuchdruckerei und Verlag)
GmbH, Karl-Friedrich-Straße 14-18, 7500 Karlsruhe 1
Verlag und Gesamtherstellung: G. Braun, Karlsruhe

VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich die Laser-Doppler-Anemometrie zu einem modernen, einsatzfähigen Meßverfahren der experimentellen Strömungsmechanik entwickelt. Sie hat neue Möglichkeiten eröffnet, um Strömungsformationen in vielen Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaften zu erhalten sowie in Bereichen der Industrie Strömungsuntersuchungen durchzuführen, die ohne Laser-Doppler-Anemometrie nur sehr bedingt möglich wären. Insbesondere wurden die Voraussetzungen für Untersuchungen komplexer, turbulenter Strömungen mit Ablösung geschaffen, die in der Vergangenheit mangels geeigneter Meßverfahren, experimentell nicht untersucht werden konnten. Damit fehlten jedoch, zumindest in einigen Bereichen der Strömungsmechanik, die Grundlagen für theoretische Untersuchungen und es kann somit behauptet werden, daß mit der Entwicklung der Laser-Doppler-Anemometrie auch die Voraussetzungen für neue Ansätze zur theoretischen Lösung strömungsmechanischer Probleme geschaffen wurden. Laser-Doppler-Anemometrie ist somit zu einer wichtigen Teildisziplin der Strömungsmechanik geworden. Es ist diese Bedeutung, die dazu geführt hat, die vorliegende deutsche Übersetzung des Buches:

"Principles and Practise of Laser-Doppler Anemometry"

herauszubringen und zwar als Übersetzung der zweiten englischen Ausgabe. Die Entwicklung des Fachgebietes und die Anwendung der Meßtechnik soll so im deutschsprachigen Raum unterstützt werden.

Die deutsche Ausgabe umfaßt 13 Kapitel, wie die beiden englischen Ausgaben. Die ersten zwölf Kapitel sind direkte Übersetzungen des englischen Textes der zweiten Ausgabe, während das 13. Kapitel neu geschrieben wurde, um neue Anwendungen der Laser-Doppler-Anemometrie aufzuzeigen, an denen gegenwärtig gearbeitet wird und die am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen durchgeführt werden. Diese Darstellungen sind durch Hinweise auf Arbeiten in anderen Laboratorien ergänzt, so daß ein Gesamteindruck über den gegenwärtigen Stand der Entwicklungen und Anwendungen der Laser-Doppler-Anemometrie vermittelt wird. So werden die in den Kapiteln 1 bis 12 zusammengestellten Grundlagen durch die Darstellungen in Kapitel 13 dahingehend ergänzt, daß ein aktueller Gesamtüberblick über das Fachgebiet und seinen Entwicklungsstand entsteht.

Das etwas ungewöhnliche Format des Buches wurde von den englischen Ausgaben übernommen, da es sich bei der Einführung von Studenten und von Interessenten aus der Forschung und Industrie in das Fachgebiet bewährt hat. Abgesehen von Kapitel 1 ist der Text so abgefaßt, daß er Betrachtungen zu einem Teilgebiet bzw. zu Ableitungen angibt, die in einer als Dia-Vorlage vorgesehenen Zusammenfassung dem entsprechenden Textteil vorangehen. In den Vor-

worten zu den englischen Ausgaben wird auf die Gründe und Vorteile dieser Darstellungen hingewiesen.

Die vorliegende Übersetzung wurde wesentlich durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Strömungsmechanik in Erlangen unterstützt, insbesondere durch die Herren: Dipl.-Phys. F. Ernst, Dipl.-Ing. O. Haidn, Dipl.-Ing. J. Dominick, Dipl.-Ing. K. Schmitt, Dipl.-Ing. J. Holweg, Dipl.-Ing. G. Dimaczek, Dipl.-Ing. H. Krebs, Dipl.-Ing. G. Jakob, Dipl.-Phys. W. Schierholz und Dipl.-Ing. R. Müller; die redaktionelle Enddurchsicht von den Herren Dr. H. Raszillier, Dipl.-Ing. J. Sender, F. Bischof sowie meinem Sohn B. Durst. Die Schreibarbeiten oblagen Frau H. Kastner und die Zeichenarbeiten Herrn F. Kaschak. Fr. A. Messner trug durch vielerlei Arbeiten zum Abschluß des Buches bei.

Die in Kapitel 13 des vorliegenden Buches beschriebenen Entwicklungs- und Forschungsarbeiten wurden durch die großzügige Unterstützung von Forschungsarbeiten durch folgende Organisationen und Firmen ermöglicht:

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Stiftung Volkswagenwerk, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, Commissions of European Communities, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, BMW AG in München, VW-Wolfsburg, Sulzer-Winterthur, HOECHST AG in Frankfurt, etc..

Allen Förderern unserer Arbeiten auf dem Gebiete der Laser-Doppler-Anemometrie sei an dieser Stelle noch einmal recht herzlich gedankt.

VORWORT ZUR 1. ENGLISCHEN AUFLAGE

Dieses Buch ist das Ergebnis detaillierter theoretischer und experimenteller Untersuchungen der Laser-Doppler-Anemometrie, die von den Autoren während der letzten sechs Jahre durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen hatten zum Ziel, das Fachgebiet zu entwickeln und so die Grundlage für eine allgemein anwendbare Meßtechnik für Strömungsuntersuchungen zu legen. Das Buch wurde mit einer festen Absicht geschrieben, nämlich als Lehrbuch für Forscher im Bereich der Strömungsmechanik, Ingenieure in der Industrie und für Studenten in den letzten Jahren ihrer Universitätsausbildung zu dienen und es ist deshalb so abgefaßt, daß es keine Vorkenntnisse erfordert, außer Grundlagenkenntnisse in den Bereichen Optik, Elektronik, Strömungsmechanik und den dazugehörigen mathematischen Grundlagen. Der Inhalt des Buches wurde so gewählt, daß er eine solide Grundlage für all jene bildet, die weiterführende Forschungsarbeiten im Bereich der Laser-Doppler-Anemometrie anzustellen wünschen. Gleichzeitig stellt das Buch eine adequate Zusammenfassung des Wissens für all jene dar, die nur in einer Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie für spezielle Strömungsprobleme interessiert sind.

Laser-Doppler-Anemometrie basiert auf physikalischen Phänomenen, die exakten mathematischen Behandlungen zugänglich sind. Jenen Lesern, die an umfassende mathematische Ableitungen gewöhnt sind, mögen die im Buch gegebenen Darlegungen mathematisch nicht straff genug erscheinen, da keine großen Bemühungen unternommen wurden, eine rigorose Nachprüfung jedes physikalischen Prinzips zu geben, das in den Darstellungen Anwendung findet. Dieser Mangel an mathematischer Strenge wird durch eine größere Gewichtung der physikalischen Grundlagen kompensiert und durch detaillierte Erläuterungen wie diese Grundlagen Anwendung finden, um Geschwindigkeitsmessungen und Messungen von Geschwindigkeitskorrelationen durchzuführen.

Es ist der Hauptzweck des vorliegenden Buches, Wissen weiterzugeben, das für Messungen der lokalen Momentangeschwindigkeit mittels Laser-Doppler-Meßmethoden wichtig ist. Genauer gesagt, das Buch vermittelt dem Leser das Verständnis der Grundlagen und der Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie. Es erläutert die Möglichkeiten dieser Meßtechnik, seine Präzision und die Leichtigkeit seiner Anwendung. Ferner gibt es Aufschluß über Kosten und erläutert die Relevanz der Meßtechnik für das spezielle Meßproblem des Lesers. Die obige zusammenfassende Angabe über den Zweck des Buches ist umfassend, erfordert aber weitere Hinweise. Diese werden in der Einleitung gegeben, zusammen mit Hinweisen, warum das Fachgebiet so wichtig ist. Dadurch wird deutlich, warum die Autoren die Mühe auf sich genommen haben, das Buch zu schreiben.

Die Form des Buches ist unüblich und erfordert einige Bemerkungen. Mit Ausnahme des ersten Kapitels basiert der Text des Buches auf Vorlesungen, die im Rahmen von Kurzlehrgängen am Imperial College in London, der Universität

Karlsruhe und der Purdue University in Indiana, U.S.A., gehalten wurden. Diese Vorlesungen wurden mit Hilfe von Dia-Positiven gehalten, die - reproduziert in Form eines Buches - den Kursteilnehmern ausgehändigt wurden. Kapitel 2 bis 13 basieren auf diesen Dia-Vorlagen, stellen aber zum Teil verbesserte und erweiterte Versionen der bei den Kurzlehrgängen verwendeten Vorlagen dar. Der Text, der jeder Dia-Vorlage folgt, gibt Erläuterungen und Erweiterungen des durch die Dia-Vorlage vermittelten Wissens. Das einführende Kapitel wurde dem herkömmlichen Stil von Textbüchern angepaßt, da sich sein Inhalt nicht für dieselbe Darstellung anbot. Wir hoffen, daß der Leser das Format des Buches nützlich und hilfreich findet. Dia-Vorlagen geben, zumindest die meisten von ihnen, eine schnelle und umfassende Übersicht über das Wissen, das auf jeder Seite des Buches behandelt wird. Dies sollte dem Leser helfen, auf spezielle Fragen die vorhandenen Antworten zu finden. Der Leser, der beabsichtigt, ein ganzes Kapitel oder das gesamte Buch vom Anfang bis zum Ende zu lesen, wird feststellen, daß das in den Dia-Vorlagen behandelte Material seine Gedanken auf die detaillierteren Darstellungen auf dem Rest der Seite vorbereitet. Die Anordnung der einzelnen Kapitel ist so gewählt, daß sie für eine Einführung in die Materie nützlich ist. Die einzelnen Kapitel sind nachfolgend noch erläutert.

Die einführenden Bemerkungen in Kapitel 1 des Buches klären das Thema des Buches und zeigen die Verbindung der Laser-Doppler-Anemometrie zu anderen optischen Meßtechniken. Die praktische Relevanz wird aufgezeigt und ein historischer Rückblick über die Entwicklung des Fachgebietes wird gegeben.

Kapitel 2 bis 5 betrachten solche Aspekte der Laser-Doppler-Anemometrie, die mit optischen Komponenten zusammenhängen. Kapitel 2 gibt eine zusammenfassende Darstellung der geometrischen, der physikalischen und der Quantenoptik. Verstärkt wurden solche Teile behandelt, die für die Interferenz, für die Beugung, für bewegte Lichtquellen, für den Doppler-Effekt und für Photodetektoren wichtig sind. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Lichtstreuung, einer physikalischen Erläuterung der optischen Messung der Teilchengeschwindigkeit, einer Einführung in die Grundlagen der Laser-Doppler-Anemometrie und betrachtet die Modulationstiefe des Signal-Rausch-Verhältnisses des optischen Signals. Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung optischer Anordnungen für die Geschwindigkeitsmessung, leitet die Grundgleichung für die Auswertung von Laser-Doppler-Anemometersignalen her und erläutert die Grundlagen, welche die Bestimmung des Meßvolumens ermöglichen. Praktische Hinweise, welche die optischen Komponenten zu spezifizieren erlauben, sind in Kapitel 5 angegeben, zusammen mit verschiedenen Methoden, um die Frequenz von Lichtstrahlen zu ändern und Methoden, um Hochfrequenz- und Niederfrequenzkomponenten des Signals zu trennen.

Kapitel 6 bis 9 befassen sich mit elektronischen Anordnungen, um Doppler-Signale zu verarbeiten. Sechs mögliche Signalverarbeitungsmethoden sind in Kapitel 6 diskutiert. Drei dieser Methoden (Frequenzanalyse, Frequenznach-

laufdemodulationen und Periodenzeitmeßverfahren) werden in den Kapiteln 7, 8 und 9 betrachtet.

Das Gebiet der Streupartikeln, ihre Eigenschaften sowie ihre Herstellung und Messung werden in den Kapiteln 10 und 11 diskutiert. Während sich vorausgegangene Kapitel mit der Geschwindigkeitsmessung von Teilchen beschäftigt haben, enthalten die Kapitel 9 und 10 Informationen darüber, wie sich das Verhältnis von Teilchengeschwindigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit ermitteln läßt. Die Gebiete, die in den Kapiteln 2 bis 11 behandelt sind, werden in Kapitel 12 zusammengeführt. Dieses Kapitel übermittelt spezifische Informationen, die der Leser benötigt, der sich mit der Erstellung eines eigenen Laser-Doppler-Anemometers beschäftigt. Kapitel 13 zeigt, weshalb die vorausgegangenen Betrachtungen der Laser-Doppler-Anemometrie wichtig sind. Es zeigt Anwendungen auf, die dem Leser eine Feststellung erleichtern sollen, ob seine eigenen Untersuchungen erfolgreich sein können.

Die Forschungsarbeiten, die das Wissen bereitstellten, das zu diesem Buch führte, wurden durch das Science Research Council, the Central Electricity Generating Board, the Atomic Energy Research Establishment at Harwell, the British Heart Foundation, NATO, the Department of Mechanical Engineering of Imperial College, Volkswagen Foundation und die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt. Die Autoren bedanken sich bei dieser Gelegenheit bei allen unterstützenden Organisationen. Unser Dank gilt auch den Kollegen des Imperial College aus Harwell und des Sonderforschungsbereiches 80 (Universität Karlsruhe), die durch viele gute Anregungen zum Verständnis des Fachgebietes und zum Gelingen des Buches beigetragen haben. Besonders zu erwähnen sind die Herren: Dr. R.J. Baker, Professor D.F.G. Durao und Dr. M. Zaré, die beachtliche Beiträge zu den Forschungsbemühungen geleistet haben. Nicht zuletzt freuen wir uns, die Beiträge erwähnen zu können, die Herr Oskar Vis durch die Konstruktion und Herstellung integrierter, optischer Einheiten zum Erfolg des experimentellen Programms der Autoren beitragen konnte.

November 1975

FD
AM
JHW

VORWORT ZUR 2. ENGLISCHEN AUFLAGE

In der zweiten (englischen) Ausgabe dieses Buches haben wir Änderungen angebracht, bei denen wir zwei Ziele verfolgten: Darstellungen bestimmter Seiten zu ändern, wo Leser der ersten Buchausgabe gezeigt hatten, daß Darstellungen nicht so klar gehalten wurden, wie dies erforderlich war. Einige Abschnitte wurden erneuert, und zwar an solchen Stellen, wo substantielle Änderungen des Wissens über Laser-Doppler-Anemometrie während der letzten fünf Jahre entstanden sind, also seit der Publikation der ersten Ausgabe.

Um Kapitel 13 auf den neuesten Stand zu bringen mußte es fast vollständig neu geschrieben werden. Drei andere Gebiete wurden einer gründlichen Revision unterzogen, nämlich die Gebiete Photonkorrelation, Teilchengrößenbestimmung von Doppler-Signalen und "Biasing", das durch Mittelung einzelner Doppler-Frequenzmessungen entsteht. Bis heute bleibt "Biasing" ein kontroverses Gebiet und wir hoffen, daß wir zur Klärung des Sachverhaltes beigetragen haben. Historisch gesehen wurde "Biasing" am intensivsten in Verbindung mit der Signalverarbeitung durch Counter studiert. Unser Beitrag ist aus diesem Grunde in dem entsprechenden Kapitel 9 des Buches aufgeführt. Die dort gegebenen Folgerungen gelten auch für andere Signalverarbeitungssysteme. Kleinere Änderungen sind auch im "Historischen Rückblick" des Kapitels 1 eingearbeitet worden. Wir haben jedoch nicht versucht, den Stand der Laser-Doppler-Anemometrie bis zum Jahre 1981 aufzuzeigen, da dies zu einer umfassenden Änderung des Inhaltes der nachfolgenden Kapitel geführt hätte.

Literaturhinweise, die während der Überarbeitung der zweiten Ausgabe des Buches aufgenommen wurden, sind separat von denen der ersten Ausgabe gekennzeichnet. Im Text sind Literaturhinweise der ersten Ausgabe durch runde () Klammern gekennzeichnet, während Literaturhinweise der zweiten Ausgabe durch eckige [] Klammern gekennzeichnet sind. Die Klammern enthalten das Jahr der Publikation.

Wir danken noch einmal den Forschungsfinanzierungsstellen, die bereits im Vorwort der ersten Auflage aufgeführt waren und die unsere Forschungsarbeiten weiter unterstützt haben. Zusätzliche Unterstützung wurde uns durch das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, das Bundesministerium für Forschung und Technologie, das NASA Lewis Research Center, durch Rolls-Royce Ltd., die U.S. Army und dem U.S. Department of Energy gewährt.

Mai 1981

FD
AM
JHW

INHALTSVERZEICHNIS

KAPITEL	TITEL	SEITE
	VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE	V
	VORWORT ZUR 1. ENGLISCHEN AUFLAGE	VII
	VORWORT ZUR 2. ENGLISCHEN AUFLAGE	XI
	INHALTSVERZEICHNIS	XIII
1	EINLEITENDE BEMERKUNGEN	1
2	GRUNDLAGEN DER OPTIK.. .. .	26
3	STREUERSCHEINUNGEN UND OPTISCHE SYSTEME	82
4	GRUNDLAGEN DER LASER-DOPPLER-ANEMOMETRIE	132
5	OPTISCHE KOMPONENTEN	181
6	EINFÜHRUNG IN DIE SIGNALVERARBEITUNG	213
7	SIGNALVERARBEITUNG DURCH FREQUENZANALYSE	243
8	SIGNALVERARBEITUNG MIT FREQUENZ-NACHFOLGE DEMODULATION ..	283
9	SIGNALVERARBEITUNG DURCH ZÄHLVERFAHREN	316
10	STREUTEILCHEN: ERFORDERLICHE EIGENSCHAFTEN	372
11	STREUTEILCHEN: ERZEUGUNG UND MESSUNG IHRER EIGENSCHAFTEN	400
12	AUSLEGUNGSÜBERLEGUNGEN FÜR SPEZIFISCHE MESSUNGEN	434
13	ANWENDUNGEN DER LASER-DOPPLER-ANEMOMETRIE AM LSTM-ERLANGEN	490
	LITERATURHINWEISE	547
	NOMENKLATUR	566
	VERZEICHNIS DER UNTERKAPITEL	573