

Herbert Oertel jr.
Martin Böhle
Ulrich Dohrmann

Übungsbuch
Strömungsmechanik

Aus dem Programm
Strömungsmechanik

Introduction to Fluid Mechanics

von H. Oertel jr.

Strömungsmechanik

von H. Oertel jr. und M. Böhle

Numerische Strömungsmechanik

von H. Oertel jr. und E. Laurien

PRANDTL - Führer durch die Strömungslehre

von H. Oertel jr. (Hrsg.) unter Mitarbeit von M. Böhle,
D. Etling, U. Müller, U. Riedel, K. R Sreenivasen, J. Warnatz

Übungsbuch Strömungsmechanik

von H. Oertel jr., M. Böhle und U. Dohrmann

Technische Strömungslehre

von L. Böswirth

Ohne Panik Strömungsmechanik

von J. Strybny und O. Romberg

Herbert Oertel jr.
Martin Böhle
Ulrich Dohrmann

Übungsbuch

Strömungsmechanik

Analytische und Numerische Lösungsmethoden,
Softwarebeispiele

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 161 Abbildungen



Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. Herbert Oertel jr., Ordinarius

Dr.-Ing. Ulrich Dohrmann, Akademischer Oberrat

Institut für Strömungslehre, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, Universitätsprofessor

Bergische Universität Wuppertal, Gaußstr. 20, 42097 Wuppertal

Die 1. Auflage des Buches erschien unter demselben Titel im Springer Verlag.

2., überarbeitete und erweiterte Auflage 1998

3., überarbeitete und erweiterte Auflage 2001

4. überarbeitete und erweiterte Auflage Mai 2003

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2003

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.

www.vieweg.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-528-27435-1

ISBN 978-3-322-94265-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-94265-4

Vorwort

Mit den Übungsaufgaben zur Strömungsmechanik *H. Oertel jr., M. Böhle* 1992 sind wir einem oft geäußerten Wunsch unserer Studenten nachgekommen, neben den Vorlesungen und Übungen im Hörsaal, eine Grundlage für die eigenständige Prüfungsvorbereitung zu schaffen. Die Übungsaufgaben wurden neu bearbeitet und den Vorlesungen *Strömungslehre* und *Mathematische Methoden der Strömungslehre* angepasst, die an der Universität Karlsruhe im fünften und sechsten Semester für Studenten des Maschinenbaus, des Chemieingenieurwesens, der Physik und der Technomathematik gelesen werden. Es werden zunächst die Grundbegriffe der Strömungsmechanik, die eindimensionale Stromfadentheorie und die vereinfachte Berechnung technischer Strömungen vermittelt. Es folgen Übungsaufgaben zu den Grundgleichungen der Strömungsmechanik und zu den daraus abgeleiteten Modellgleichungen für laminare und turbulente, inkompressible und kompressible Strömungen. In den darauf folgenden Kapiteln werden deren analytische und numerische Lösungsmethoden in einem ersten Ansatz behandelt. Diesen Kapiteln kommt im Übungsbuch absichtlich eine besondere Bedeutung zu, da der Ingenieur in der Praxis zunehmend numerische Methoden und strömungsmechanische Software auf vernetzten Großrechenanlagen für die Produktentwicklung nutzt. Um den Studenten ein erstes Üben mit Lösungssoftware zu ermöglichen, werden die analytischen Lösungswege von Software-Beispielen begleitet.

Die Übungsaufgaben zur Strömungsmechanik ergänzen das Lehrbuch Strömungsmechanik *H. Oertel jr., M. Böhle* 1995, 1999, 2002, das als Leitfaden der Strömungslehre Vorlesungen an der Universität Karlsruhe dient. Dabei ist es für den Studenten auch im Zeitalter der Software-Nutzung unerlässlich, den Lehrstoff, angeleitet von den Übungsaufgaben und detailliert beschriebenen Lösungswegen, selbst nachzuvollziehen. Das Erlernen der Fähigkeit, strömungsmechanische Probleme mathematisch zu formulieren und für ausgewählte Anwendungsbeispiele analytisch und numerisch zu lösen, ist ein wesentliches Ausbildungsziel, das die aktive Mitarbeit der Studenten erfordert. Dafür soll das Übungsbuch Anregungen geben.

Die Übungsaufgaben sind von meinen langjährigen Assistenten und Mitautoren M. Böhle und U. Dohrmann entsprechend der Vorlesungskapitel zusammengestellt worden. Sie sind in unterschiedliche Schwierigkeitsgrade eingeteilt, so dass der Student sich entsprechend seines Wissensstandes den Lehrstoff an meist praktischen strömungsmechanischen Übungsbeispielen erarbeiten kann. Die Übungsaufgaben sind mehrfach in den Übungen im Hörsaal vorgerechnet und die Lösungswege mit den Studenten überarbeitet worden. Die Auswahl der Übungsaufgaben ist zwangsläufig ein Kompromiss und orientiert sich an den Studienplänen der Universität Karlsruhe. Es werden aber auch Studenten höherer Semester an anderen deutschsprachigen

Universitäten zahlreiche Anregungen finden und die schwierigen Übungsaufgaben als Prüfstein ihres strömungsmechanischen Wissens empfinden können.

Das Manuskript wurde in bewährter Weise von meinem Assistenten U. Dohrmann angefertigt. Unserer Mitarbeiterin L. Huber gilt besonderer Dank für die Überarbeitung der Abbildungen. Wir danken dem Vieweg Verlag für die Übernahme des Übungsbuches und für die erfreulich gute Zusammenarbeit.

Karlsruhe, August 1998

Herbert Oertel jr.

Vorwort zur 4. Auflage

Nachdem nach kurzer Zeit die 3. Auflage des Übungsbuches vergriffen war, wurde eine Neuauflage erforderlich. Das Übungsbuch Strömungsmechanik hat sich zur Prüfungsvorbereitung und Vorlesungsbegleitung der Vorlesungen Strömungslehre und Mathematische Methoden der Strömungslehre inzwischen etabliert und bewährt. Die Übungsaufgaben wurden bezüglich der jüngsten Prüfungsaufgaben aktualisiert und Aufgaben zur Turbulenzmodellierung sowie das neue Kapitel Strömungsmaschinen ergänzt.

Der Zugang zur vorlesungsbegleitenden Strömungsmechanik Software erfolgt über die Homepage des Instituts für Strömungslehre der Universität Karlsruhe www-isl.mach.uni-karlsruhe.de.

Die Abbildungen wurden von L. Huber in bewährter Weise überarbeitet. Dem Vieweg Verlag danken wir für die Fortführung der erfreulich guten Zusammenarbeit.

Karlsruhe, Februar 2003

Herbert Oertel jr.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen der Strömungsmechanik	3
2.1	Strömungsbereiche	3
2.2	Hydro- und Aerostatik	11
2.2.1	Hydrostatik	11
2.2.2	Aerostatik	24
2.3	Hydro- und Aerodynamik, Stromfadentheorie	32
2.3.1	Kinematische Grundbegriffe	32
2.3.2	Inkompressible Strömungen	43
2.3.3	Kompressible Strömungen	65
2.4	Berechnung von technischen Strömungen	80
2.4.1	Turbulente Strömungen	80
2.4.2	Impulssatz	94
2.4.3	Drehimpulssatz	114
2.4.4	Rohrhydraulik	123
2.4.5	Umströmungen	143
2.4.6	Strömungsmaschinen	151
3	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	155
3.1	Kontinuitätsgleichung	155
3.2	Navier-Stokes-Gleichungen	159
3.2.1	Laminare Strömungen	159
3.2.2	Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen	176
3.2.3	Turbulenzmodelle	186
3.3	Energiegleichungen	192
3.3.1	Laminare Strömungen	192
3.3.2	Turbulente Strömungen	195
3.4	Grenzschichtgleichungen	198
3.4.1	Inkompressible Strömungen	198
3.4.2	Kompressible Strömungen	206
3.5	Potentialgleichungen	209
3.5.1	Potentialgleichung für kompressible Strömungen	209
3.5.2	Potentialgleichung für inkompressible Strömungen	217
3.6	Grundgleichungen in Erhaltungsform	234

4	Numerische Lösungsmethoden	237
4.1	Analytische Vorbereitung	237
4.1.1	Dimensionsanalyse	237
4.1.2	Linearisierung	245
4.1.3	Stabilitätsanalyse	254
4.1.4	Strukturanalyse	257
4.2	Diskretisierung	262
4.2.1	Galerkin-Methode	262
4.2.2	Finite-Elemente-Methode	271
4.2.3	Finite-Differenzen-Methode	276
4.2.4	Finite-Volumen-Methode	288
5	Anhang	301
5.1	Übersicht über die Aufgaben	301
5.2	Strömungsmechanik Software	306
	Bezeichnungen	310
	Ausgewählte Literatur	313
	Sachwortverzeichnis	314