
Grundzüge der Strömungslehre

Jürgen Zierep · Karl Bühler

Grundzüge der Strömungslehre

Grundlagen, Statik und Dynamik der
Fluide

10., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 201 Abbildungen und zahlreichen
Übungen



Springer Vieweg

Jürgen Zierep
Karlsruhe, Deutschland

Karl Bühler
Offenburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-11796-2
DOI 10.1007/978-3-658-11797-9

ISBN 978-3-658-11797-9 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2008, 2010, 2013, 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur 10. Auflage

Die „Grundzüge der Strömungslehre“ haben sich in den vergangenen 40 Jahren durch ihre 9 Auflagen bei Lehrenden und Lernenden sehr bewährt.

Das konnten wir anhand von Vorlesungen und Diskussionen im In- und Ausland immer wieder feststellen. Die Aussagen des Vorwortes der 1. Auflage – ganz besonders was die Anwendung des wichtigen Impulssatzes angeht – gelten nach wie vor.

Die Reihenfolge: „Erstens: an Beispielen der Strömungslehre Kenntnisse zu sammeln und dann zweitens: den Kontrollraum und die Strömungsdaten auf dem Rand berücksichtigen“ sind wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung des Impulssatzes.

Im Lauf der Zeit entstand der Wunsch, z. B. bei Vorlesungen an der TH-Budapest, nach weiteren aktuellen Übungsaufgaben der Strömungsmechanik. Bevorzugt werden hier Fragestellungen mit folgender Alternative: Ein- oder Ausströmen aus Behältern, ohne oder mit Reibung, stationär oder instationär, inkompressibel oder kompressibel. Die Umsetzung der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie anhand der Anfangs- und Randbedingungen bei konkreten Problemen ist nach wie vor oft schwierig.

Der Energiesatz steht heute für viele Strömungsprobleme im Mittelpunkt. Anhand von Beispielen wird dies im Folgenden veranschaulicht. Der Energiesatz wird in vielerlei Form hergeleitet und angewandt. Interessant und typisch sind die Werte beim Rayleigh-Stokes Problem, wo die zeitliche Änderung der kinetischen Energie, die Dissipation und die Wandschubspannungsleistung gleichzeitig auftreten. Diese Aussagen spielen heute eine immer größere Rolle, wo es um den Energiehaushalt geht. Sie sind in den Lehrbüchern der Strömungsmechanik bisher nur wenig vertreten.

Das Buch wendet sich an Studierende technischer und physikalischer Fachrichtungen an Universitäten und Hochschulen zur Begleitung und Vertiefung der Vorlesungen über Strömungslehre sowie zum Selbststudium. Auch für die in der

Praxis tätigen Ingenieure ist dieses Buch zum Einstieg und zur Vertiefung strömungsmechanischer Grundlagen nützlich.

Wir haben am Schluss des Buches einige einschlägige Probleme dieser Art ausführlich behandelt und ergänzt. Wieder ist es so, dass der Leser des öfteren zu Papier und Bleistift greifen muss, um dem von uns vorgeschlagenen Lösungsweg folgen zu können.

Dem Lektorat Maschinenbau des Springer Vieweg Verlags sagen wir Dank für die tatkräftige Unterstützung und für das große Vertrauen bei der Herausgabe dieses Buches und für die überaus erfreuliche Zusammenarbeit.

Karlsruhe, September 2015

Jürgen Zierep und Karl Bühler

Aus dem Vorwort der 1. Auflage

Das vorliegende Buch „Grundzüge der Strömungslehre“ ist aus einführenden Vorlesungen hervorgegangen, die ich seit etwa 20 Jahren an der Universität Karlsruhe (TH) halte. Es stellte sich mir hier die interessante Aufgabe, in einer vierstündigen einsemestrigen Vorlesung Studenten nach dem Vorexamen die Strömungslehre nahe zu bringen. Das Spektrum der Hörer war breit gestreut. Es reichte von Maschinenbauern und Chemieingenieuren bis zu Physikern, Meteorologen und Mathematikern. Diese Tatsache sowie die zur Verfügung stehende Zeit bestimmten Inhalt und Umfang des vorgetragenen Stoffes. Es ging also nicht darum, **alles** darzustellen (das kann man in Spezialvorlesungen tun), sondern eine möglichst interessante, für die Studenten leicht fassliche und anwendbare Darstellung zu wählen.

Einige Worte zum Aufbau. Im Unterschied zu den meisten Darstellungen der Strömungslehre wird der Impulssatz erst spät behandelt. Das hat gute Gründe. Trotz seiner einfachen Formulierung ist und bleibt er der schwerste Satz der Strömungslehre. Die Schwierigkeit liegt in der zweckmäßigen Wahl des Kontrollraumes **und** der benutzten Strömungsdaten auf dem Rand. Hier gehen viele Kenntnisse ein, die man **vorher** bei der Beschäftigung mit Beispielen der Strömungslehre sammeln muss. Diese Erfahrung haben wir immer wieder gemacht.

Ich habe mich um einen systematischen Aufbau bemüht. Dabei wird mit dem Einfachsten begonnen und bis zu den Fragen vorgedrungen, die in den zahlreichen Anwendungen auftreten und heute von großem Interesse sind. Es ist dabei z. B. wichtig, dass man von Anfang an weiß, welche und wie viele Gleichungen für die Strömungsgrößen zur Verfügung stehen. Bei einigen behandelten Fragen wird man eine gewisse Liebe zum Detail spüren. Dies scheint mir dort gerechtfertigt, wo die Studenten aus anderen Vorlesungen wenig Information mitbringen. Andererseits ist es notwendig, dass der Anfänger die wichtigsten Hilfsmittel gründlich und ausführlich vorgeführt bekommt. Dass sich dabei Kompromisse ergeben, ist jedem Vortragenden klar.

Parallel zu den Vorlesungen werden zweistündige Übungen veranstaltet. Ohne dieses eigene Engagement der Hörer kann man den Stoff nicht bewältigen. Einige der Aufgaben sind im Text berücksichtigt. Hier wie auch beim Vorlesungsgegenstand wird der Leser zu Papier und Bleistift greifen müssen, um den Inhalt aufzunehmen, zu verarbeiten und anschließend anwenden zu können. Diese Mühe lohnt sich! Ich wäre mit dem Erfolg meiner langjährigen Tätigkeit zufrieden, wenn der Leser dies bestätigen könnte.

Jürgen Zierep

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Überblick und Grundlagen	1
1.1	Theoretische, vorwiegend mathematische Strömungslehre	3
1.2	Technische Strömungslehre oder Hydraulik	3
2	Eigenschaften von Fluiden	5
2.1	Molekularer Aufbau – Mikrostruktur	5
2.2	Widerstand gegen Formänderungen (Elastizität, Viskosität)	7
2.3	Gaskinetische Erklärung der inneren Reibung	12
2.4	Volumenänderung und Zustandsgleichung für Gase	15
2.5	Oberflächen- oder Grenzflächenspannung und Kapillarität	17
3	Hydro- und Aerostatik	31
3.1	Flüssigkeitsdruck p	31
3.2	Flüssigkeitsdruck in Kraftfeldern	32
3.3	Druckkraft auf ebene Behälterwände	39
3.4	Hydrostatischer Auftrieb. Druckkraft auf gekrümmte Flächen	42
4	Hydro- und Aerodynamik	45
4.1	Stromfadentheorie	45
4.1.1	Grundbegriffe	45
4.1.2	Grundgleichungen der Stromfadentheorie	50
4.1.3	Stromfadentheorie in Einzelausführungen	57
4.1.3.1	Bewegung auf konzentrischen Kreisbahnen (Wirbel)	57
4.1.3.2	Wirbelquell- oder Wirbelsenkenströmung	59
4.1.3.3	Drehbewegung unter Berücksichtigung der Schwere	60
4.1.3.4	Verschiedene Druckbegriffe und deren Messung	63

	4.1.3.5	Ausströmen aus einem Behälter	67
	4.1.3.6	Gasdynamische Betrachtungen. Die Strömung in der Laval-Düse. Der senkrechte Verdichtungsstoß	70
4.2		Reibungsfreie, ebene und räumliche Strömungen	86
	4.2.1	Kontinuität (= Massenerhaltung)	86
	4.2.2	Eulersche Bewegungsgleichungen	87
	4.2.3	Ebene, stationäre, inkompressible Potentialströmung . .	88
	4.2.4	Beispiele für elementare und zusammengesetzte Potentialströmungen	94
	4.2.5	Potentialströmungen um vorgegebene Körper	103
4.3		Strömung mit Reibung	109
	4.3.1	Impulssatz mit Anwendungen	109
	4.3.1.1	Durchströmen eines Krümmers	111
	4.3.1.2	Düse und Diffusor frei ausblasend	114
	4.3.1.3	Carnotscher Stoßdiffusor	116
	4.3.1.4	Borda-Mündung	117
	4.3.1.5	Schub eines luftatmenden Triebwerkes	119
	4.3.1.6	Widerstand eines Halbkörpers im Kanal	120
	4.3.2	Drehimpulssatz mit Anwendung	122
	4.3.2.1	Durchströmen eines radialen Laufrades	123
	4.3.3	Grundsätzliches zum Reibungseinfluss – Kennzahlen . .	125
	4.3.4	Laminare und turbulente Strömung	128
	4.3.5	Geschwindigkeitsverteilung und Druckabfall in Kreisrohren bei laminarer und turbulenter Strömung .	130
	4.3.6	Laminare und turbulente Strömung durch raue Rohre (Nikuradse-Diagramm)	137
	4.3.7	Strömung in der Einlaufstrecke	140
	4.3.8	Geschwindigkeitsschwankungen und scheinbare Schubspannungen	143
	4.3.9	Prandtlscher Mischungswegansatz für die Schwankungsgeschwindigkeiten	146
	4.3.10	Allgemeine Form der Navier-Stokes-Gleichungen	149
	4.3.11	Spezielle Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen . . .	152
	4.3.12	Einführung in die Grenzschichttheorie	157
	4.3.13	Energiesatz	167
	4.3.14	Widerstand und Druckverlust	169
	4.3.15	Ähnlichkeitsbetrachtungen	175

5	Vertiefende Übungsaufgaben	179
5.1	Aufgabe: Einströmen in einen Tauchbehälter (Sinkendes Schiff)	179
5.2	Aufgabe: Schwingende Flüssigkeitssäule (U-Rohrmanometer)	181
5.3	Aufgabe: Zeitabhängige Ausströmung aus einem Behälter (Anlaufströmung)	183
5.4	Aufgabe: Allgemeines Ausflussproblem	185
5.5	Aufgabe: Verallgemeinertes Überströmproblem	186
5.6	Aufgabe: Windenergieanlage	189
5.7	Aufgabe: Reibungswiderstand bei der Umströmung einer ebenen Platte	193
5.8	Aufgabe: Plötzlich beschleunigte Platte (Rayleigh-Stokes-Problem)	194
5.9	Aufgabe: Kompressibles Ein- und Ausströmen	196
5.10	Aufgabe: Lavaldüsenströmung	199
5.11	Aufgabe: Geschwindigkeit beim freien Fall (Fallschirmspringer)	201
5.12	Aufgabe: Auftriebsbeiwerte von Flugzeugen (Start und Reiseflug)	202
5.13	Aufgabe: Wasserstrahlpumpe	203
5.14	Aufgabe: Windmesser	204
5.15	Aufgabe: Wirbelströmung im Zylinderspalt	207
	Dimensionen und Einheiten der wichtigsten auftretenden Größen	211
	Die Autoren	213
	Literatur	215
	Sachverzeichnis	217