

Joseph H. Spurk
Nuri Aksel

Strömungslehre

Einführung in die Theorie der Strömungen

Sechste erweiterte Auflage

Mit Aufgaben und Übungsbeispielen auf CD-ROM
und 231 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Joseph H. Spurk (em.)
TH Darmstadt
Institut für Technische Stömungslehre
Petersenstr. 30
64287 Darmstadt
Deutschland

Prof. Dr. rer. nat. Nuri Aksel
Universität Beyreuth
Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften
Lehrstuhl für Technische Mechanik und Strömungsmechanik
95440 Beyreuth
Deutschland

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.

ISBN-10 3-540-26293-8 6. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-26293-0 6. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-40166-0 5. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987, 1989, 1993, 1996, 2004, 2006
Printed in Germany

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz: DA-TeX Gerd Blumenstein, Leipzig
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 7/3100/YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Vorwort zur 6. Auflage

Die fünfte Auflage war rasch vergriffen, so daß der Verleger mit dem Wunsch nach einer neuen Auflage an mich heran getreten ist. So erfreulich die gute Aufnahme des Buches für mich auch ist, so bereitet eine Neuauflage doch einen erheblichen Aufwand ohne die Unterstützung, die mir vorher als Lehrstuhlinhaber in rein technischer Hinsicht gewährt wurde. Mehr Sorge hat mir die gewünschte Erweiterung bereitet: In den Rezensionen der vorhergehenden Auflagen wurde der Stoffumfang überwiegend als angemessen für ein einführendes Lehrbuch an wissenschaftlichen Hochschulen bezeichnet, und im persönlichen Gespräch mit Kollegen wurde von einer Kürzung des bisherigen Stoffes abgeraten. Auf der anderen Seite wurde mir von einigen Rezensenten auch die Aufnahme neuer Kapitel empfohlen und besonders eine Darstellung „Schleichender Strömungen“. Den Ausschlag, ein Kapitel über dieses Thema einzufügen, hat aber Herr Prof. Dr. rer. nat. Nuri Aksel gegeben, der auf diesem Gebiet aktiv forscht, und der mich schon bei den früheren Auflagen unterstützt hat. Das Kapitel „Hydrodynamische Schmierung“ ist auf sein Anraten ebenfalls um lokale Schichtenströmungen erweitert worden und enthält ein Beispiel, das von ihm beigesteuert wurde. Hier erscheint auch eine bisher unveröffentlichte Arbeit über Partikelfilter, die aus meiner Beratertätigkeit entstanden ist.

In einigen Rezensionen wurde Klage geführt, daß das Lehrbuch keine Übungsaufgaben enthielte. In der Tat: aus Gründen der Übersichtlichkeit und des Stoffumfangs wurde darauf verzichtet. Statt dessen hatte ich eine dem Stoff des Lehrbuches zugeordnete Aufgabensammlung verfaßt, die im selben Verlag bereits 1993 erschienen ist. Offensichtlich ist der Aufgabenband in weiten Leserkreisen unbekannt geblieben. Der Verleger hat sich nun entschieden, die zweite Auflage dieser Aufgabensammlung in Form einer CD dem vorliegenden Band beizufügen. Ich habe diesen Schritt begrüßt, weil damit unmittelbar die Möglichkeit gegeben ist, den Stoff des Lehrbuches durch Übungsbeispiele zu vertiefen. Viele Übungsaufgaben wurden durch Industriekontakte angeregt und ich hoffe, daß die Sammlung auch nach dem Studium noch nützliche Anregungen für die Praxis geben möge.

Herr Prof. Aksel hat sich bereit erklärt, eventuelle zukünftige Auflagen des Lehrbuches zu besorgen, wofür ich ihm sehr dankbar bin. Aus diesem Grund

VI Vorwort

erscheint auch sein Name als Autor ab dieser Auflage. Für alle Fehler und Unterlassungen in der vorliegenden Auflage bin ich aber allein verantwortlich.

Bad König, im Frühjahr 2005

J. H. Spurk

Vorwort zur ersten Auflage

Zweck dieses Lehrbuches ist es, eine systematische Einführung in die Strömungslehre für Studenten und Ingenieure des Maschinenbaus und verwandter Fachgebiete sowie Physikern und Mathematikern zu geben. Das Buch ist zum Gebrauch neben der Vorlesung bestimmt, ist aber auch gut für das Selbststudium geeignet, da keine Vorkenntnisse auf strömungsmechanischem Gebiet vorausgesetzt werden.

Von vielen Lehrbüchern derselben Zielsetzung unterscheidet es sich insofern, als die Grundlagen der Kontinuumsmechanik einen großen Teil der Darstellung ausmachen und an den Anfang der Betrachtungen gestellt werden. Spezielle Zweige der Strömungslehre, die ja immer eine Folge vereinfachender Annahmen sind, werden dann aus den allgemeinen Bilanzsätzen nach dem Grundsatz „vom Allgemeinen zum Besonderen“ entwickelt. Die insbesondere von Ingenieuren bevorzugte Darstellungsweise, die vom Einfachen (beispielsweise der Hydrostatik und der Stromfadentheorie) ausgehend zum Schwierigeren fortschreitet, stellt zwar u. U. geringere Anforderungen an das Abstraktionsvermögen des Lernenden, dieser Vorteil wird aber durch einen größeren Zeitaufwand erkauft, da Wiederholungen dann unvermeidbar sind. Wichtiger ist, daß eine solche Darstellungsweise den Gesamtüberblick versperrt und die Strömungslehre als eine Vielzahl kaum zusammenhängender Einzeldisziplinen erscheinen läßt. Diesem Eindruck soll das Buch entgegenwirken, indem es die Strömungslehre als eine einheitliche Wissenschaft darstellt und die all ihren Zweigen gemeinsamen Prinzipien betont.

Aber auch der wachsenden Bedeutung numerischer Methoden, die eine Integration der Bewegungsgleichungen unter möglichst allgemeinen Voraussetzungen ohne die früher notwendigen Einschränkungen anstreben, wird man nur gerecht werden, wenn man ein gesundes Verständnis der Grundlagen und sicheren Umgang mit den allgemeinen Gleichungen fördert. Die Beherrschung etwa der Stromfadentheorie, die traditionell und zu Recht ein Schwerpunkt der Ingenieurausbildung ist, ist in Anbetracht dieser Entwicklung allein nicht mehr ausreichend.

Eine inhaltliche Aufteilung in einen Grundlagenteil und in einen Teil, der die Anwendung der Grundlagen auf spezielle Gebiete zum Gegenstand hat, erschien angebracht. Im ersten Kapitel wird die Kinematik der Flüssigkeiten soweit dargestellt, wie sie für die späteren Kapitel gebraucht wird und wie es notwendig ist, um dem Leser den Zugang zu weiterführenden Lehrbüchern zu erleichtern. Das zweite Kapitel hat die Kontinuumsmechanische Formulierung der Mechanik und der Thermodynamik in differentieller und integraler Form zum Ziel. Es beinhaltet auch die Erweiterung der Thermodynamik auf irreversible Prozesse. Dabei wird die begriffliche Verarbeitung der Bilanzsätze in den Vordergrund gestellt und durch typische Anwendungsbeispiele aus dem Maschinenbau ergänzt. Diese beiden Kapitel fassen die grundlegenden Prinzipien über das allen Körpern gemeinsame Verhalten zusammen. Im dritten Kapitel werden die Materialgleichungen besprochen, wobei in der Hauptsache

che Newtonsche und reibungsfreie Flüssigkeiten Beachtung finden. Wegen der zunehmenden Bedeutung Nicht-Newtonscher Flüssigkeiten in der Technik ist aber auch eine einführende Diskussion der Materialgesetze für die wichtigsten Klassen dieser Flüssigkeiten aufgenommen worden. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit den allgemeinen Eigenschaften der Navier-Stokesschen und Eulerschen Gleichungen und führt ihre Ersten Integrale, d. h. die Bernoullische Gleichung und die Wirbelsätze ein.

Das Studium der ersten vier Kapitel setzt gewisse Kenntnisse in der Tensorrechnung voraus. Da aber alle Gleichungen in kartesischen Koordinatensystemen entwickelt werden, genügen die wenigen Rechenregeln kartesischer Tensoren, für die im Anhang eine Einführung gegeben wird.

Bei der Stoffauswahl des zweiten Teils des Buches habe ich mich hauptsächlich an den Bedürfnissen des Maschinenbaustudiums orientiert. Dieser Teil kann bei entsprechenden Vorkenntnissen natürlich ohne Studium des Grundlagenteils gelesen werden. Da die einzelnen Gebiete dem Aufbau des Buches entsprechend aus den Grundlagen entwickelt werden, ergibt sich auch hier und da eine Darstellung, die vom Gewöhnlichen abweicht, und selbst für den erfahrenen Leser wird das ein oder andere neu sein.

Der Stoff des zweiten Teils ist vom Einfacheren zum Schwierigeren hin geordnet und wird oft anhand von Beispielen vorgetragen, mit dem Ziel, dem Leser die Umsetzung der Theorie in lösbare Problemstellungen näherzubringen.

Das Buch ist aus meinen Vorlesungen entstanden, die durch Übungen ergänzt werden. Aus Kostengründen war es nicht möglich, Aufgaben mit den notwendigen Anleitungen in dieses Buch mit aufzunehmen. Da aber die Durchdringung des Stoffes vom Studierenden auch das Lösen von Übungsaufgaben erfordert, wird dringend geraten, die im Buch enthaltenen zahlreichen Beispiele von Anfang bis Ende durchzurechnen, um diesem Mangel abzuhelpfen. Dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend habe ich keinerlei Referenzen aufgenommen. Im Anhang sind aber Bücher aufgeführt, die ich beim Schreiben benutzt habe. Hervorheben möchte ich hier die gesammelten Werke von L. Prandtl, aus denen viele Abbildungen entnommen wurden, da sie an Klarheit und Anschaulichkeit kaum zu verbessern sind.

Grundlage dieses Buches bildet das Skriptum der Vorlesung, die ich während der Jahre 1971 bis 1985 gehalten habe. Als im Zusammenhang mit der Neufassung der Lehrpläne für das Maschinenbaustudium an der Technischen Hochschule Darmstadt die Stundenzahl für die Pflichtvorlesung Technische Strömungslehre gekürzt wurde, war es nötig, den Stoff neu zu gliedern, was eine vollständige Neubearbeitung des ursprünglichen Manuskriptes zu Folge hatte. Einen guten Teil dieser Arbeit habe ich während eines Gastaufenthaltes am Trinity College in Dublin getan, und Herrn Prof. L. Crane möchte ich an dieser Stelle für seine Gastfreundschaft danken. Das vorliegende Buch ist direkt aus diesem neuen Vorlesungsumdruck entstanden, bei dessen Abfassung mich meine Mitarbeiter unterstützt haben. Besonders aber

muß ich Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Depp danken, der die große Mühe auf sich genommen hat, die druckreife Vorlage anzufertigen, und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Sauerwein, der sehr kritisch alle Ableitungen und Beispiele nachgerechnet und viele Kürzungen und Verbesserungen vorgeschlagen hat. Es wäre vermessen anzunehmen, daß trotz der Unterstützung, die ich hatte, alle Fehler ausgemerzt wurden. Für alle verbleibenden Unzulänglichkeiten bin ich alleine verantwortlich.

Darmstadt, im Juni 1987

J. H. Spurk

Inhaltsverzeichnis

1	Kontinuumsbegriff und Kinematik	1
1.1	Eigenschaften der Flüssigkeiten, Kontinuumshypothese	1
1.2	Kinematik der Flüssigkeiten	8
1.2.1	Materielle und Feldbeschreibungweise	8
1.2.2	Bahnlinie, Stromlinie, Streichlinie	10
1.2.3	Zeitableitungen	15
1.2.4	Bewegungszustand, Änderung materieller Linien-, Flächen- und Volumenelemente	19
1.2.5	Zeitliche Änderung materieller Integrale	31
2	Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik	37
2.1	Erhaltungssatz der Masse	37
2.2	Impulssatz	39
2.3	Drallsatz oder Drehimpulssatz	47
2.4	Impuls- und Drallsatz im beschleunigten Bezugssystem	49
2.5	Anwendungsbeispiele aus dem Turbomaschinenbau	58
2.6	Bilanz der Energie	69
2.7	Bilanz der Entropie	73
2.8	Thermodynamische Zustandsgleichungen	76
3	Materialgleichungen	81
4	Bewegungsgleichungen für spezielle Materialgesetze	103
4.1	Newtonsche Flüssigkeiten	103
4.1.1	Navier-Stokessche Gleichungen	103
4.1.2	Wirbeltransportgleichung	106
4.1.3	Einfluß der Reynoldsschen Zahl	109
4.2	Reibungsfreie Flüssigkeiten	115
4.2.1	Eulersche Gleichungen	115
4.2.2	Bernoullische Gleichung	116
4.2.3	Wirbelsätze	122
4.2.4	Integration der Energiegleichung	149
4.3	Anfangs- und Randbedingungen	152
4.4	Vereinfachung der Bewegungsgleichungen	156

5	Hydrostatik	163
5.1	Hydrostatische Druckverteilung	163
5.2	Hydrostatischer Auftrieb, Kraft auf Wände	169
5.3	Freie Oberflächen	174
6	Laminare Schichtenströmungen	181
6.1	Stationäre Schichtenströmungen	182
6.1.1	Couette-Strömung	182
6.1.2	Couette-Poiseuille-Strömung	183
6.1.3	Filmströmung	186
6.1.4	Strömung zwischen zwei konzentrisch rotierenden Zylindern	188
6.1.5	Hagen-Poiseuille-Strömung	190
6.1.6	Strömung durch nichtkreisförmige Rohre	194
6.2	Instationäre Schichtenströmungen	198
6.2.1	Die periodisch in ihrer Ebene bewegte Wand	198
6.2.2	Die plötzlich in Gang gesetzte Wand	201
6.3	Schichtenströmungen Nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	203
6.3.1	Stationäre Strömung durch ein gerades Kreisrohr	203
6.3.2	Stationäre Schichtenströmung zwischen einer rotierenden Scheibe und einer festen Wand	205
6.3.3	Instationäre Schichtenströmung einer Flüssigkeit zweiter Ordnung	207
6.4	Schichtenströmungen bei Bingham-Verhalten	213
6.4.1	Druck-Schlepp-Strömung eines Bingham-Materials	213
6.4.2	Rohrströmung eines Bingham-Materials	218
7	Grundzüge turbulenter Strömungen	221
7.1	Stabilität und Entstehung der Turbulenz	221
7.2	Reynoldssche Gleichungen	224
7.3	Turbulente Scherströmung in der Nähe einer Wand	230
7.4	Turbulente Strömung in glatten Rohren und Kanälen	240
7.5	Turbulente Strömung in rauen Rohren	243
8	Hydrodynamische Schmierung	247
8.1	Reynoldssche Gleichung der Schmiertheorie	247
8.2	Statisch belastete Gleitlager	250
8.2.1	Unendlich langes Radiallager	250
8.2.2	Unendlich kurzes Radiallager	257
8.2.3	Endlich langes Radiallager	257
8.3	Dynamisch belastete Gleitlager	258
8.3.1	Unendlich langes Radiallager	259
8.3.2	Gleitstempel	260
8.3.3	Quetschströmung eines Bingham-Materials	265
8.4	Filmströmung über halbunendliche Wand	267

8.5 Strömung durch Partikelfilter 271

8.6 Strömung durch ein poröses Medium 274

8.7 Hele-Shaw-Strömung 278

9 Stromfadentheorie 281

9.1 Inkompressible Strömung 281

9.1.1 Die Kontinuitätsgleichung 282

9.1.2 Die reibungsfreie Strömung 283

9.1.3 Die reibungsbehaftete Strömung 286

9.1.4 Anwendung auf Strömungen durch Rohre
mit veränderlichem Querschnitt 291

9.1.5 Der viskose Strahl 296

9.2 Stationäre kompressible Strömung 299

9.2.1 Strömung durch Rohre mit veränderlichem Querschnitt 299

9.2.2 Strömung durch Rohre mit konstantem Querschnitt . . 312

9.2.3 Gleichungen des senkrechten Verdichtungsstoßes 316

9.3 Instationäre kompressible Strömung 322

10 Potentialströmungen 339

10.1 Eindimensionale Schallausbreitung 340

10.2 Stationäre kompressible Potentialströmung 347

10.3 Inkompressible Potentialströmung 348

10.3.1 Einfache Beispiele für Potentialströmungen 351

10.3.2 Virtuelle Massen 375

10.4 Ebene Potentialströmung 381

10.4.1 Beispiele für inkompressible, ebene Potentialströmungen 381

10.4.2 Komplexes Potential für ebene Strömungen 386

10.4.3 Blasius-Theorem 395

10.4.4 Kutta-Joukowski-Theorem 398

10.4.5 Konforme Abbildung 400

10.4.6 Schwarz-Christoffel-Transformation 402

10.4.7 Freistrahlen 404

10.4.8 Strömung um Profile 410

10.4.9 Näherungslösung für schlanke Profile
in inkompressibler Strömung 416

10.4.10 Schlanke Profile in kompressibler Strömung 424

11 Überschallströmungen 429

11.1 Schräger Verdichtungsstoß 430

11.2 Abgelöster Verdichtungsstoß 433

11.3 Reflexion schräger Stöße 433

11.4 Überschall-Potentialströmung um schlanke Profile 435

11.5 Prandtl-Meyer-Strömung 438

11.6 Stoß-Expansions-Theorie 444

12	Grenzschichttheorie	449
12.1	Lösungen der Grenzschichtgleichungen	453
12.1.1	Ebene Platte	454
12.1.2	Keilströmungen	458
12.1.3	Instationäre Staupunktströmung	461
12.1.4	Allgemeines Umströmungsproblem	462
12.2	Temperaturgrenzschicht bei erzwungener Konvektion	464
12.3	Temperaturgrenzschicht bei natürlicher Konvektion	470
12.4	Integralmethoden der Grenzschichttheorie	473
12.5	Turbulente Grenzschichten	477
13	Schleichende Strömungen	487
13.1	Ebene und rotationsymmetrische Strömungen	487
13.1.1	Beispiele ebener Strömungen	489
13.1.2	Das Umströmungsproblem in ebener schleichender Strömung (Stokessches Paradoxon)	502
13.1.3	Schleichende Strömung um eine Kugel	503
A	Einführung in die kartesische Tensorrechnung	509
A.1	Summationskonvention	509
A.2	Kartesische Tensoren	510
B	Krummlinige Koordinaten	521
B.1	Kartesische Koordinaten	528
B.2	Zylinderkoordinaten	530
B.3	Kugelkoordinaten	533
C	Tabellen und Diagramme für kompressible Strömung	537
D	Stoffwerte von Luft und Wasser	555
	Literatur	559
	Index	561