
Technische Strömungsmechanik

Dominik Surek · Silke Stempin

Technische Strömungsmechanik

Für Studium, Examen und Praxis

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit ausführlichen Beispielen, zahlreichen Aufgaben +
Lösungen und Musterklausuren

 Springer Vieweg

Dominik Surek
An-Institut Fluid- und Pumpentechnik
Hochschule Merseburg
Merseburg, Deutschland

Silke Stempin
Hydraulische Entwicklung
KSB AG
Frankenthal, Deutschland

ISBN 978-3-658-18756-9

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-18757-6>

ISBN 978-3-658-18757-6 (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 GmbH 2007, 2014, 2017

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Zum Gedenken an Prof. Dr.-Ing. habil. Dominik Surek

Der langjährige Hochschulangehörige und sehr geschätzte Prof. Dominik Surek ist am 12. August 2016 im Alter von 83 Jahren gestorben. Dominik Surek war von 1993 bis 1998 Professor für Strömungsmaschinen an der Hochschule Merseburg. Er war maßgeblich an der Gründung des An-Instituts für Fluid- und Pumpentechnik der Hochschule beteiligt und war selbst viele Jahre Institutsdirektor.

Auch deutschlandweit und international ist der Name Surek eng mit angewandter Forschung und Wissenstransfer verknüpft. Prof. Dominik Surek pflegte eine enge Kooperation mit der mittelständischen Wirtschaft und anderen Forschungseinrichtungen. Sein Wissen und seine Erfahrungen waren oft gefragt und geschätzt, wenn es um die Auslegung, die Erhöhung des Wirkungsgrades bei Verdichtern, Pumpen und Turbinen, die Anwendung der Vakuum- und Ultraschalltechnik, um die Ortung und Bewertung von Maschinenfehlern ging. Sein Wissens- und Erfahrungsschatz wird noch weiterhin zur Verfügung stehen, er hat über 250 Fachartikel und 12 Fachbücher verfasst.

Die Hochschule Merseburg verliert mit seinem Tod einen herausragenden Wissenschaftler, Hochschullehrer und Forscher, der bis ins hohe Alter aktiv an der Hochschule tätig war und Projekte entwickelt und vorangetrieben hat. Die vorliegende 3. Auflage hat Herr Prof. Surek noch tatkräftig unterstützt. Auch der Verlag dankt ihm für die langjährige immerzu gute und konstruktive Zusammenarbeit.

Vorwort zur dritten Auflage

In der zweiten Auflage des Buches Technische Strömungsmechanik sind mit Rücksicht auf den Umfang des Buches die ersten Kap. 1 und 2 herausgenommen worden. Nun zeigte sich aber, dass die fehlenden Grundlagen der Fluideigenschaften (Kap. 1) sowie der Hydrostatik (Kap. 2) einen Mangel darstellten, weil diesbezüglich auf andere Fachliteratur verwiesen werden musste. Deshalb entschlossen sich die Autoren in Abstimmung mit dem Verlag, diese zwei Kapitel wieder in das Buch aufzunehmen. Dadurch wird die Vollständigkeit der elementaren Strömungstechnik und der Hydro- und Aerostatik einschließlich dem statischen Auftrieb, dem Schwimmen, sowie der Stabilität von Schwimmkörpern wieder hergestellt. Die Hydrostatik liefert die Grundlagen für die Hydraulik in den unterschiedlichen Bereichen, der Pressen und Umformtechnik z. B. von Bauteilen des Automobilbaus, des Flugzeugbaus, der Verstärkertechnik für Lenk- und Bremsanlagen.

Auch in den Beispielen und Aufgaben zur Anwendung des Stoffgebietes finden sich teilweise auch Elemente der Hydro- und Aerostatik.

Aufrichtigen Dank sagen die Autoren dem Springer Vieweg Verlag, insbesondere dem Lektoratsleiter Technik Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner und Frau Ellen Klabunde für das große Verständnis zum Buch mit dem umfangreichen Übungsteil.

Herrn B.Eng. Michael Richter danken die Autoren für die aktive Hilfe beim Durchsehen der Beispiele und Aufgaben.

Die Autoren wünschen den Lesern des Buches Erfolg und Freude.

Für Verbesserungsvorschläge und Anregungen zur Weiterentwicklung des Buches danken die Autoren den Lesern.

Für Rückäußerungen und Vorschläge steht Ihnen die E-Mail-Adresse dominik.surek@hs-merseburg.de oder die Postadresse Institut für Fluid- und Pumpentechnik, Eberhard-Leibnitz-Straße 2, 06217 Merseburg oder Silke Stempin, Turmstraße 100, 06108 Halle zur Verfügung.

Merseburg, im Mai 2016

Dominik Surek und Silke Stempin

Vorwort zur zweiten Auflage

Das Buch „Technische Strömungsmechanik“ ist offensichtlich von den praktisch tätigen Fachleuten als Nachschlagewerk gut angenommen worden. Die Studierenden der technischen Disziplinen – vorrangig die Studierenden des Maschinenbaus, der Verfahrenstechnik und des Wirtschaftsingenieurwesens benötigen und suchen Beispiele und Aufgaben der Strömungsmechanik und ihre Lösungen, um den Stoff einzuüben. In der ersten Auflage des Buches waren nur 30 durchgerechnete Beispiele enthalten. Das Anliegen der Studierenden ist verständlicherweise das Rechnen und Nachvollziehen von Übungsbeispielen. Diesem Anliegen sind die Autoren des Buches in der zweiten Auflage nachgekommen, in dem der praktische Übungsteil des Buches in folgender Form stark erweitert worden ist.

Die durchgerechneten Übungsbeispiele sind auf 44 erweitert worden. In das Buch sind außerdem 67 Aufgaben aufgenommen worden und die Lösungen sind im Anhang angegeben für den Fall, dass der Leser bei der Lösung selbst nicht vorankommt. Um den Studierenden auch ein vertretbares Zeitgefühl für die Lösung einfacher Aufgaben zu vermitteln, sind 31 Modellklausuren mit den Lösungen der Rechenaufgaben im Anhang aufgenommen worden. Der zeitliche Aufwand beträgt dafür 60 min und 120 min für die Lösungen der Modellklausuren. Für diese Übungsteile mit den Lösungen wurden im Buch ca. 100 Seiten eingeräumt.

Um jedoch den Umfang des Buches nicht wesentlich zu erweitern, wurden die Einleitung und die beiden ersten Kapitel, 2. Eigenschaften der Fluide und 3. Hydrostatik und Aerostatik, herausgenommen. Diesbezüglich wird auf andere Werke verwiesen.

Alle verbliebenen zwölf Kapitel des Buches wurden überarbeitet und teilweise um die neueren Erkenntnisse der Strömungsmechanik erweitert. Das betrifft hauptsächlich die Kap. 4, 9 und 12.

Schließlich noch ein Wort zum Verstehen und Anwenden der Angewandten Strömungsmechanik. Das vorliegende Buch ist mit den elementaren mathematischen Mitteln abgefasst und leicht verständlich. Vektoren und Tensoren bleiben ebenso ungenutzt wie Matrizen. Dadurch wird gewährleistet, dass das Buch gewissenhaft und flüssig gelesen werden kann. Wer das Buch als Nachschlagewerk benutzen will, kann das mit Gewinn tun, da es ein breites Wissensspektrum von den Grundlagen der Strömungsmechanik über die Potentialtheorie, die Grenzschichttheorie, die instationäre Strömung und die Strömungs-

maschinen als konkrete Anwendung bis zur Mehrphasenströmung und der strömungstechnischen Messtechnik enthält.

Schließlich danken die Autoren Herrn B. Eng. Michael Richter für das Durchrechnen einiger Beispiele und Aufgaben. Dem Springer-Verlag und in besonderer Weise dem Cheflaktor des Verlages Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner und Frau Ellen Klabunde danken die Autoren für die vorzügliche und konstruktive Zusammenarbeit bei der Gestaltung des Buches.

Allen Lesern des Buches wünschen die Autoren eine unterhaltsame Lektüre und interessante Berechnungsübungen.

Für Anregungen zur Verbesserung des Inhaltes des Buches sind die Autoren allen Lesern dankbar. Für diese Vorschläge stehen Ihnen die E-Mail-Adresse dominik.surek@hs-merseburg.de und die Postadresse „Institut Fluid- und Pumpentechnik“ zur Verfügung.

Merseburg, im Februar 2014

Dominik Surek und Silke Stempin

Vorwort zur ersten Auflage

Die Entwicklung der Strömungsmechanik nahm im vorigen Jahrhundert einen beeindruckenden Verlauf, wobei sich zwei Perioden besonders herausheben. Das ist das Wirken Ludwig Prandtls (1875 bis 1953) am Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung in Göttingen (heute Institut für Luft- und Raumfahrt), das zu einer wissenschaftlichen Systematisierung der theoretischen und experimentellen Strömungsmechanik führte, und das ist zum anderen die Periode für die Entwicklung der Fluggeräte und der Flugtechnik einschließlich der Raketen und der Weltraumshuttles mit dem Überschallflug und den Grenzbedingungen von der freien Molekularströmung im Weltraum in den Übergangsbereich der viskosen Strömung bei sehr hohen Machzahlen. Diese erfolgreiche Forschung wirkte sich besonders auch auf die Entwicklung der Strömungsmaschinen und der Vakuumtechnik aus. Bei den Strömungsmaschinen sind insbesondere die Axialverdichter, die Gasturbinen und die Brennkammern zu erwähnen, die schließlich zu den hocheffektiven Strahltriebwerken moderner Flugzeuge führten mit Leistungen bis zu 30 MW. Für die Vakuumtechnik werden Axialverdichter mit Antriebsdrehzahlen bis 90.000 min^{-1} gefertigt, die ebenfalls im Bereich der freien Molekularströmung arbeiten und die in der Terminologie der Vakuumtechnik als Turbomolekularpumpen bezeichnet werden.

In ähnlicher Weise strahlte die Entwicklung der Strömungsmechanik in den Bereich der Verfahrenstechnik und der Biotechnologie aus, wodurch sie stark befruchtet wurden.

Die Entwicklung der Strömungsmaschinen für die Flugtechnik verlief auf den Gebieten der Strömungstechnik, der Thermodynamik und der Werkstofftechnik so erfolgreich, dass heute bereits ganze Flugzeugtriebwerke oder wesentliche Komponenten davon auch für stationäre Kraftwerksanlagen erfolgreich eingesetzt werden.

Das Buch wendet sich vorrangig an die praktisch tätigen Strömungsingenieure und Freunde der Strömungsmechanik, denen ein systematisierter Stoff in fünfzehn Kapiteln dargeboten wird.

Das Buch soll zur Vermittlung bei der Lösung praktischer Strömungsaufgaben dienen. Deshalb wurde auch die Lösung einfacher praktischer Aufgabenbeispiele aufgenommen. In gleicher Weise soll das Buch auch ein Begleiter im Studium der angewandten Strömungsmechanik für die Studierenden der Hochschulen und Universitäten sein. Dabei soll es vorrangig die Gedankengänge und die Arbeitsmethoden bei der Lösung strömungstech-

nischer Aufgaben im Bereich des Maschinenbaus, des Anlagenbaus und der Verfahrenstechnik vermitteln.

Die mathematischen Anforderungen werden bewusst auf einem niedrigen Niveau gehalten, um das Buch einem großen Leserkreis zugänglich zu machen. Das Verständnis für die Methoden und Lösungsverfahren der Strömungsmechanik soll dabei entwickelt werden.

So wird die Strömung des Kontinuums z. B. in den Gesamtrahmen der Strömungsläufe, insbesondere jene im Vakuum und im Hochvakuum gestellt. Es werden auch die Grundlagen der Strömungsakustik, die instationären Strömungen, die Strömung in Turbomaschinen, die Grundlagen der Mehrphasenströmung und das wichtige Gebiet der strömungstechnischen Messtechnik behandelt, um dem experimentell tätigen Ingenieur Einblick in die modernen Messverfahren wie z. B. in die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), die Particle-Image-Velocimetry (PIV) und in die instationäre Druckmesstechnik zu gewähren. Die Strömungsvorgänge, die in Verbindung mit chemischen Reaktionen ablaufen, wie z. B. Verbrennungsströmungen, Explosionsvorgänge, Dissoziationsvorgänge und auch die Ionisationsvorgänge sind von der Betrachtung ausgeschlossen. Sie werden heute vorwiegend mit dem CFD-Programm Fluent berechnet.

Ein herzlicher Dank gilt dem Teubner-Verlag und dem Leiter des Lehrstuhls Technik, Herrn Dr.-Ing. Martin Feuchte, der von Anfang dieses Projekt förderte und für die wohlgestaltete Ausstattung des Buches sorgte. Ebenso danken die Autoren Herrn Dipl.-Ing. Mario Reinsdorf für die sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen und Tabellen. Herrn Prof. Dr. Roland Adler danken die Verfasser für die Durchsicht des Manuskripts.

Die Autoren sind den aufmerksamen Lesern für Verbesserungsvorschläge und für Hinweise auf Druckfehler dankbar. Dafür steht Ihnen die E-mail dominik.surek@hsm-merseburg.de zur Verfügung.

Halle, im Januar 2007

Dominik Surek

Beispiele, Aufgaben und Modellklausuren

Kapitel	Beispiele		Aufgaben		Modellklausuren	
	Zahl	Abschnitt	Zahl	Abschnitt	Zahl	Abschnitt
1	0		0		0	
2	7	2.11	0		0	
3	4	3.4	6	Aufgaben: 3.5 Lösungen: 15.1	0	
4	3	4.5	0		0	
5	8	5.12	22	Aufgaben: 5.13 Lösungen: 15.2	10	Aufgaben: 5.14 Lösungen: 15.3
6	11	6.10	17	Aufgaben: 6.11 Lösungen: 15.4	8	Aufgaben: 6.12 Lösungen: 15.5
7	2	7.6	0		0	
8	2	8.9	0		3	Aufgaben: 8.10 Lösungen: 15.6
9	1	9.6	0		0	
10	3	10.6	3	Aufgaben: 10.7 Lösungen: 15.7	0	
11	0		7	Aufgaben: 11.11 Lösungen: 15.8	0	
12	6	12.13	11	Aufgaben: 12.14 Lösungen: 15.9	9	Aufgaben: 12.15 Lösungen: 15.10
13	0		0		0	
14	4	14.5	3	Aufgaben: 14.6 Lösungen: 15.11	1	Aufgabe 14.7 Lösung: 15.12
Σ	51		69		31	mit Einzelaufgaben

Summe der Beispiele, Aufgaben und Modellklausuren 151 Aufgaben

Inhaltsverzeichnis

1	Eigenschaften der Fluide	1
1.1	Physikalische Zustandsgrößen von Fluiden	4
1.1.1	Dichte	4
1.1.2	Dichte von Gasen	5
1.1.3	Kompressibilitätskoeffizient und Elastizitätsmodul	6
1.1.4	Druck	8
1.1.5	Temperatur	9
1.1.6	Viskosität als molekülbedingter Impulstransport	10
1.1.7	Grenzflächenspannung und Kapillarität	15
1.2	Thermische Zustandsgrößen	19
	Literatur	21
2	Hydrostatik und Aerostatik	23
2.1	Hydrostatische Grundgleichung	23
2.2	Anwendung der hydrostatischen Grundgleichung	26
2.2.1	Statische Saughöhe von Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Fluidtemperatur und dem barometrischen Druck	26
2.2.2	Dichtemessung von Flüssigkeiten	27
2.3	Überlagerung von zwei Potentialfeldern	29
2.4	Hydrostatischer Druck und kommunizierende Gefäße	33
2.5	Grundlagen der Hydraulik	34
2.6	Druckkraft auf Behälterwand mit Flüssigkeitsfüllung	36
2.7	Druckkraft auf Behälterwand mit konstanter Breite	36
2.8	Druckkraft auf eine gekrümmte Behälterwand	40
2.9	Statischer Auftrieb und Schwimmen (Prinzip von Archimedes)	41
2.9.1	Statischer Auftrieb	41
2.9.2	Schwimmen	42
2.9.3	Stabilität von Schwimmkörpern	44
2.10	Aerostatik und thermischer Auftrieb	46
2.11	Beispiele	48
	Literatur	54

3	Grundlagen der Strömungsmechanik	55
3.1	Stromlinie, Bahnlinie (Trajektorie), Stromfaden und Stromröhre	56
3.2	Erhaltungssätze der Strömungsmechanik	57
3.2.1	Bewegungsgleichung für ein Fluidelement	58
3.2.2	Euler'sche Bewegungsgleichung in Strömungsrichtung	59
3.2.3	Euler'sche Bewegungsgleichung normal zur Strömungsrichtung	61
3.2.4	Bernoulligleichung	65
3.2.5	Ausflussgleichung von Torricelli	68
3.2.6	Kontinuitätsgleichung	70
3.2.7	Impulssatz und Impulskraft für stationäre Strömungen	71
3.2.8	Drallsatz	75
3.2.9	Starrkörperwirbel	78
3.3	Fluid-Struktur-Wechselwirkung	78
3.4	Beispiele	80
3.5	Aufgaben	82
	Literatur	84
4	Ähnlichkeitsgesetze der Strömungsmechanik	85
4.1	Modellgesetz	85
4.2	Reynoldsähnlichkeit	86
4.3	Knudsenzahl als Ähnlichkeitskennzahl der Gasdynamik	88
4.4	Ähnlichkeitskennzahlen	89
4.5	Beispiele	91
	Literatur	94
5	Stationäre inkompressible Strömung; Hydrodynamik	95
5.1	Stationäre Einlaufströmung in Rohrleitungen	95
5.2	Stationäre inkompressible reibungsbehaftete Strömung	97
5.2.1	Hydraulischer Radius und hydraulischer Durchmesser	98
5.3	Reibungsbehaftete Rohrströmung	99
5.3.1	Hagen-Poiseuille'sche Strömung	100
5.3.2	Strömungsformen in Rohrleitungen	103
5.3.3	Laminare Rohrströmung	104
5.3.4	Turbulente Rohrströmung	106
5.3.5	Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes	111
5.3.6	Geschwindigkeitsverteilung im zylindrischen Rohr	114
5.3.7	Technisch zulässige Rauigkeiten von umströmten Oberflächen	116
5.4	Druckverluste in Formstücken und Rohrbögen	118
5.5	Druckverluste in Armaturen	126
5.6	Strömung im ebenen Spalt mit geringer Reynoldszahl	131
5.7	Strömung in keilförmigen Axial- und Radialspalten von Lagern	134

5.7.1	Strömung im keilförmigen Axiallagerspalt	134
5.7.2	Strömung im radialen Gleitlager	140
5.8	Düsen- und Diffusorströmung	144
5.8.1	Düsenströmung	144
5.8.2	Kegeldiffusoren	146
5.8.3	Verluste und Wirkungsgrad von Diffusoren	147
5.8.4	Radiale Diffusoren	150
5.9	Freistrahle	153
5.10	Strömung in Kanälen mit freier Oberfläche	158
5.10.1	Reibungsbeiwerte für die Gerinneströmung	166
5.10.2	Strömung in offenen Saugbecken mit freier Oberfläche	166
5.11	Rohrverzweigungen und Rohrnetzberechnung	172
5.11.1	Reihenschaltung von Rohrleitungen	176
5.11.2	Laminare Strömung	177
5.11.3	Turbulente Strömung im hydraulisch glatten Rohr	177
5.11.4	Turbulente Strömung bei ausgebildeter Rauigkeitsströmung mit $\lambda = f(d/k)$	178
5.11.5	Parallelschaltung von Rohrleitungen	178
5.12	Beispiele	180
5.13	Aufgaben	190
5.14	Modellklausuren	196
	Literatur	210
6	Stationäre kompressible Strömung; Gasdynamik	213
6.1	Einführung	213
6.2	Thermodynamische Grundlagen	215
6.2.1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	215
6.2.2	Kalorische Zustandsgleichungen	217
6.2.3	Isentropengleichung	220
6.3	Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung	222
6.3.1	Schallgeschwindigkeit	222
6.3.2	Schallausbreitung und Machzahl	224
6.4	Energiegleichung der kompressiblen eindimensionalen Strömung	227
6.4.1	Formen der Energiegleichung der Gasdynamik	229
6.5	Ruhegrößen und kritischer Zustand	232
6.5.1	Definition der Ruhegrößen	232
6.5.2	Kritischer Zustand	233
6.6	Geschwindigkeitsdiagramm der Energiegleichung	235
6.7	Beschleunigte kompressible Strömung	237
6.7.1	Reibungsbehaftete kompressible Rohrströmung	238
6.7.2	Reibungsbehaftete isotherme kompressible Rohrströmung	240
6.7.3	Reibungsbehaftete adiabate kompressible Rohrströmung	243

6.7.4	Kompressible reibungsfreie Rohrströmung mit Wärmeaustausch	249
6.7.5	Aus- und Durchflussfunktion für Gase	251
6.7.6	Berechnung der Durchflussfunktion	253
6.7.7	Isentrope Strömung in Düsen und Blenden	255
6.7.8	Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung	256
6.7.9	Betriebsverhalten von Überschalldüsen	268
6.8	Verdichtungsstoß	270
6.8.1	Senkrechter Verdichtungsstoß	272
6.8.2	Schiefer Verdichtungsstoß	279
6.8.3	Schiefer Verdichtungsstoß in der Hodographenebene	285
6.8.4	Expansion von Überschallströmungen und Prandtl- Meyer-Strömung	288
6.9	Zweidimensionale kompressible Potentialströmung	290
6.9.1	Potentialgleichung der zweidimensionalen Strömung	292
6.9.2	Linearisierung der zweidimensionalen kompressiblen Potentialströmung	294
6.9.3	Zweidimensionale Überschallströmung um schlanke Profile	295
6.9.4	Zweidimensionale Unterschallströmung um schlanke Profile	297
6.10	Beispiele	299
6.11	Aufgaben	309
6.12	Modellklausuren	313
	Literatur	321
7	Zweidimensionale Potentialströmung	323
7.1	Differentialgleichung von Laplace	328
7.1.1	Potentialfunktion	328
7.1.2	Stromfunktion	329
7.2	Potentialströmung um Kreiszyylinder	331
7.2.1	Geschwindigkeits- und Druckverteilung um den Kreiszyylinder	333
7.3	Singularitätenverfahren	335
7.3.1	Quell- und Senkenströmung	336
7.3.2	Überlagerung von Parallel- und Quellströmung	338
7.3.3	Überlagerung von Parallel- und Senkenströmung	339
7.3.4	Gestaltung umströmter Körper mittels Singularitäten	341
7.3.5	Potentialwirbel	342
7.3.6	Wirbelsenke	345
7.3.7	Dipolströmung	346
7.4	Strömungskraft auf einen Körper	347

7.5	Wellenbewegung	350
7.5.1	Hydraulischer Sprung	351
7.5.2	Oberflächenwellen	352
7.6	Beispiele	356
	Literatur	359
8	Grenzschichtströmung	361
8.1	Begriffe der Grenzschichtströmung	363
8.1.1	Grenzschichtdicke	363
8.1.2	Verdrängungsdicke	364
8.1.3	Impulsverlustdicke	365
8.2	Grenzschichtgleichungen	367
8.3	Eigenschaften der Grenzschichten	370
8.3.1	Ablösung der Grenzschicht	371
8.3.2	Tangentialspannung an der Wand und Reibungswiderstand	373
8.4	Strömungen mit großer Reynoldszahl	375
8.5	Plattengrenzschicht	377
8.6	Umschlag der Strömung laminar–turbulent	379
8.7	Turbulente Grenzschicht	381
8.7.1	Prandtl’scher Mischungsweg	382
8.8	Turbulenz und Turbulenzgrad	386
8.8.1	Turbulenzgrad	387
8.8.2	Energietransport in turbulenten Strömungen	390
8.9	Beispiele	391
8.10	Modellklausuren	392
	Literatur	395
9	Stationäre Umströmung von Körpern und Profilen	397
9.1	Widerstand umströmter Körper	397
9.1.1	Entstehung und Berechnung von Widerstand	400
9.1.2	Änderung von Druck- und Reibungswiderstand an Körpern	403
9.1.3	Kugelumströmung und Auftrieb	404
9.2	Tragflügelprofile und Auftrieb	406
9.2.1	Tragflügel unendlicher Spannweite	407
9.2.2	Auftrieb und Profilwiderstand	409
9.2.3	Tragflügel endlicher Spannweite	411
9.2.4	Induzierter Widerstand an Tragflächen und Axialschaufeln	412
9.3	Profilpolare für Tragflügel und Schaufelprofile	414
9.4	Einfluss der Reynoldszahl auf die Tragflügelumströmung	417
9.5	Tragflügelumströmung bei hoher Anströmmachzahl	419
9.6	Beispiele	422
	Literatur	424

10	Instationäre Strömung	427
10.1	Bewegungs- und Energiegleichung der eindimensionalen instationären Strömung	427
10.2	Instationärer Ausfluss aus einem Behälter mit variabler Spiegelhöhe .	429
10.3	Flüssigkeitsschwingungen	430
10.3.1	Schwingung der Flüssigkeit in einem U-Rohr	431
10.3.2	Periodische Behälterentleerung	433
10.4	Druckstoß in Rohrleitungen	436
10.4.1	Druckstoß in elastischen Leitungen unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Flüssigkeit	437
10.4.2	Druckstoß bei Ausfluss aus einem offenen Behälter	439
10.5	Wirbelablösung hinter umströmten Körpern	441
10.5.1	Kármán'sche Wirbelstraße	441
10.6	Beispiele	443
10.7	Aufgaben	447
	Literatur	449
11	Grundlagen der Akustik und Aeroakustik	451
11.1	Tonskala und Frequenzen von Tönen	451
11.2	Hörbereich und Schalldruck	453
11.3	Schallfeld und Schallfeldgrößen	454
11.3.1	Schalldruck und Schalldruckpegel	455
11.3.2	Schallschnelle und Schallschnellepegel	457
11.3.3	Schallintensität	458
11.3.4	Schalleistung und Schalleistungspegel	459
11.4	Schallquellen	459
11.4.1	Aeroakustische Schallquellen	460
11.4.2	Akustische Wellengleichung	461
11.4.3	Analogie von Lighthill	463
11.4.4	Inhomogene akustische Wellengleichung	464
11.5	Akustische Umsetzung von Strömungen	467
11.6	Schallmessung	468
11.6.1	Schallmessgrößen	470
11.6.2	Schalldruck- und Schalldruckpegelmessung	470
11.6.3	Schallintensitäts- und Schallgeschwindigkeitsmessung	474
11.6.4	Schalleistungs- und Schalleistungspegelmessung	476
11.7	Messauswertung, Frequenzanalyse und spektrale Leistungsdichte	478
11.7.1	Frequenzanalyse	479
11.7.2	Spektrale Schalleistungsdichte	484
11.8	Wavelets der Aeroakustik	485
11.9	Schallmessgeräte	488
11.9.1	Mikrofon	489

11.10	Addition von Schallpegeln und Summenregel	489
11.11	Aufgaben	491
	Literatur	491
12	Grundlagen der Strömung in Turbomaschinen	493
12.1	Bauarten von Turbomaschinen	493
12.2	Strömung im rotierenden radialen Laufrad	496
12.2.1	Absolut- und Relativgeschwindigkeit	496
12.2.2	Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradein- und Austritt	497
12.3	Eulergleichung der Turbomaschinen	498
12.4	Drehmomentensatz für Turbomaschinen	499
12.5	Strömung in Axialmaschinen	500
12.5.1	Axiale ebene Schaufelgitter	500
12.5.2	Belastungszahl von Schaufelgittern	503
12.5.3	Belastungszahl und Widerstandsbeiwert unter Berücksichtigung der Reibung	504
12.6	Ähnlichkeitskennzahlen von Turbomaschinen	506
12.6.1	Lieferzahl	507
12.6.2	Energieübertragungszahl, Druckzahl	508
12.6.3	Spezifische Drehzahl und Schnelllaufzahl	510
12.6.4	Durchmesserzahl	511
12.6.5	Cordierdiagramm	511
12.6.6	Leistungszahl	514
12.7	Radseitenreibung	514
12.8	Verluste in inneren und äußeren Dichtspalten	519
12.9	Nutzleistung und Wirkungsgrad	521
12.10	Leiteinrichtungen (Diffusoren)	521
12.10.1	Radialdiffusor	521
12.10.2	Strömung im Spiralgehäuse	521
12.11	Kavitation	523
12.11.1	Blasendynamik in Kavitationsströmungen	523
12.12	Kennlinien von Strömungsmaschinen	525
12.13	Beispiele	528
12.14	Aufgaben	535
12.15	Modellklausuren	538
	Literatur	547
13	Grundlagen der Mehrphasenströmung	549
13.1	Charakterisierung von Mehrphasenströmungen	549
13.2	Partikelform, Sphärizität und Formfaktoren	551
13.3	Partikelgrößenverteilung und mittlere Partikelgröße	553
13.4	Schüttdichte und Gemischdichte	555

13.5	Bewegungsverhalten von Feststoffen in Fluiden	556
13.6	Kräfte in strömenden Gemischen	560
13.7	Sinkgeschwindigkeit eines kugelförmigen Einzelpartikels	563
13.8	Kritische Geschwindigkeit	564
13.9	Druckverluste in Rohrleitungen und Schüttungen	565
13.10	Strömung beim hydraulischen Transport	567
13.11	Strömung beim pneumatischen Transport	570
13.12	Massenkraftabscheidung von Staub	570
	13.12.1 Schwerkraftabscheidung	571
	13.12.2 Fliehkraftabscheidung (Zyklonabscheidung)	572
	Literatur	574
14	Strömungstechnische Messtechnik	577
14.1	Druckmesstechnik	577
	14.1.1 Hydraulische Druckmessgeräte	579
	14.1.2 Mechanische Druckmessgeräte	581
	14.1.3 Elektromechanische Drucksensoren	582
	14.1.4 Instationäre Druckmessung	583
14.2	Geschwindigkeitsmessung	587
	14.2.1 Staudrucksonden und Prandtlrohr	587
	14.2.2 Hitzdrahtsonden und Heißfolienanemometer	589
	14.2.3 Laser-Anemometer	590
	14.2.4 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	591
	14.2.5 Laser-2Fokus-Anemometrie (L2FA)	592
	14.2.6 Particle-Image Velocimetry (PIV)	594
	14.2.7 Laser-Speckle-Anemometrie	595
	14.2.8 Optische- und Schlierenmessverfahren	595
14.3	Temperaturmessung	598
	14.3.1 Widerstandsthermometer	598
	14.3.2 Thermoelement	600
	14.3.3 Strahlungsthermometer	602
14.4	Volumenstrom- und Massestrommessung	603
	14.4.1 Messprinzipien	603
	14.4.2 Volumenstrommessgeräte	604
	14.4.3 Massestrommessgeräte	606
14.5	Beispiele	607
14.6	Aufgaben	612
14.7	Modellklausur	613
	Literatur	614

15	Lösungen	615
15.1	Lösungen der Aufgaben im Kap. 3	615
15.2	Lösungen der Aufgaben im Kap. 5	618
15.3	Lösungen der Modellklausuren im Kap. 5	626
15.4	Lösungen der Aufgaben im Kap. 6	652
15.5	Lösungen der Modellklausuren im Kap. 6	668
15.6	Lösungen der Modellklausuren im Kap. 8	693
15.7	Lösungen der Aufgaben im Kap. 10	702
15.8	Lösungen der Aufgaben im Kap. 11	703
15.9	Lösungen der Aufgaben im Kap. 12	705
15.10	Lösungen der Modellklausuren im Kap. 12	713
15.11	Lösungen der Aufgaben im Kap. 14	743
15.12	Lösungen der Modellklausuren im Kap. 14	745
	Nomenklatur	747
	Anhang	753
	Sachverzeichnis	779