

Herbert Sigloch

Technische Fluidmechanik

Siebte, neu bearbeitete Auflage

 Springer

Professor Dipl.-Ing. Herbert Sigloch
Konradin-Kreutzer-Str. 10
72800 Eningen u. A.

Ursprünglich erschienen beim VDI-Verlag

ISBN 978-3-642-03089-5

e-ISBN 978-3-642-03090-1

DOI 10.1007/978-3-642-03090-1

Springer Dordrecht Heidelberg London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2004, 2006, 2008, 2009

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.

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 und Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Einbandentwurf: eStudio Calamar, Figueres/Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.de)

Vorwort zur siebten Auflage

Gegenüber der vorhergehenden Auflage waren keine prinzipiellen Änderungen notwendig. Früher noch vorhandene Unschärfen und Unzulänglichkeiten wurden beseitigt sowie geringe Erweiterungen durchgeführt. Zudem sind bisher leider übersehene Fehler eliminiert.

Auch zukünftig sind Verbesserungsvorschläge und Anregungen erwünscht. Für die bisher erhaltenen wird vielmals gedankt.

Der Springer-Verlag unterzog sich freundlicherweise wieder erheblicher Mühe und Verantwortung für die Herausgabe des Buches. Dafür gebührt ihm großer Dank. Das gilt auch für die gute Zusammenarbeit und das Verwirklichen der Änderungswünsche sowie die hervorragende Ausstattung des Buches.

Eningen, Herbst 2009

Herbert Sigloch

Vorwort zur ersten Auflage

Das Buch ist aus der Vorlesung „Technische Fluidmechanik für Maschinenbauingenieure“ an der Hochschule Reutlingen – Fachhochschule für Technik und Wirtschaft – hervorgegangen. Der Verfasser hat den Stoff so ausgewählt und dargestellt, wie er nach seiner Meinung für ein praxisbezogenes Hochschulstudium notwendig ist. Weitgreifende theoretische Erörterungen und Ableitungen wurden nur insoweit aufgenommen, wie es zum Einblick in die Zusammenhänge des Wissensgebietes und damit zum Verständnis notwendig erscheint. Außer den im Text eingefügten 37 Beispielen sollen 77 vollständig durchgerechnete Übungsbeispiele die Anwendung der Strömungsgleichungen veranschaulichen.

Das Werk soll nicht nur dem Studenten an Berufsakademien, Fachhochschulen und Technischen Universitäten das weitgehende Eindringen in den ebenso umfangreichen wie interessanten Wissenszweig Fluidmechanik ermöglichen, sondern ebenso dem praktisch tätigen Ingenieur als Gedächtnisstütze und Arbeitsgrundlage für strömungstechnische Berechnungen dienen. Hierbei wird insbesondere der Anhang des Buches vorteilhafte Hilfestellungen leisten können. Zudem sind Hinweise für die moderne computergestützte Strömungsberechnung (-mechanik), die sog. Computational Fluid-Dynamics (CFD) enthalten.

Die Inhaltsgliederung ist eng ausgeführt, um durch Auswahl entsprechender Abschnitte Schwerpunkte setzen zu können.

Wichtige Begriffe, Phänomene und Zusammenhänge der Fluidphysik werden nur soweit angedeutet, wie diese zum Verständnis des behandelten Stoffes notwendig sind. Zudem sollten die Mathematik bis einschließlich Vektor-, Differential- und Integralrechnung sowie die technische Mechanik der festen Körper und die Grundlagen der Thermodynamik bekannt sein.

Das Buch ist modern ausgestattet und verwendet ausschließlich genormte Formelzeichen und Dimensionen. Möge es alle Ansprüche und Erwartungen erfüllen. Verbesserungsvorschläge aller Art sind immer willkommen und werden dankbar entgegengenommen.

Dem Verlag gebührt Dank für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die gute Ausstattung des Buches. Den zahlreichen Erweiterungen, Ergänzungen sowie Änderungswünschen in Bezug auf Inhalt und Gestaltung brachte er großes Verständnis entgegen.

Reutlingen, Sommer 1980

Herbert Sigloch

Benutzer-Hinweise

Kursiv gedruckte Wörter sind häufig Stichwörter, **halbfett** gedruckte sind es in der Regel. Das umfangreiche **Sachwortverzeichnis** erleichtert den Zugang zu Einzelfragen. Es sollte jedoch auch genutzt werden, um die unter demselben oder ähnlichen Sachwörtern an verschiedenen Stellen des Buches zu findenden Informationen zu verknüpfen.

Gleichungen, Bilder und Tabellen sind durch Nummern gekennzeichnet, deren erste Zahl (vor dem Bindestrich) jeweils die Nummer des Hauptabschnittes angibt, zu welchem sie gehören. Die zweite Zahl (nach dem Strich) ergibt sich aus der fortlaufenden Nummerierung, jeweils getrennt für Gleichungen, Bilder und Tabellen. Die Führungszahl 6 verweist dabei immer auf den Anhang. Näherungsbeziehungen werden auch als **Formeln** bezeichnet.

Bezugssysteme sind immer so angeordnet, dass die z -Achse beim (x, y, z) -Koordinatensystem vertikal verläuft mit der Plusrichtung nach oben (Höhe) und der Minusrichtung (Tiefe) nach unten. Die (x, y) -Fläche liegt deshalb in der waagrechten Ebene gemäß dem mathematischen Rechtssystem (Gegenuhrzeigerdrehung) mit x -Achse nach rechts und y -Achse nach hinten. Verschiedentlich werden auch verwendet: h für Höhenkoordinate (positive z -Achse) und t für Tiefenrichtung (negative z -Achse).

Das **Symbol Δ** (großes griechisches Delta) für Differenz wird in zweifacher Weise verwendet: Einerseits als Unterschied von End- und Anfangswert, andererseits für den Abstand von oberem und unterem Wert, d. h. von Größt- und Kleinstwert. Weitere Bedeutungen von Δ sind LAPLACE-Operator und BOOLE-Matrix.

Unvermeidlich ist, dass fast alle **Abkürzungssymbole** mehrere Bedeutungen haben. In jedem Einzelfall empfiehlt sich daher genaues Prüfen und Zuordnen.

Bild-Nummern mit nach einem Komma ohne Leerstelle angehängtem Buchstaben bedeuten den Teil des betreffenden Bildes, der aber auch durch den direkt angefügten Buchstaben gekennzeichnet sein kann, z. B. Bild 2.14a. Hier ist Bildteil a von Bild 2-14 gemeint.

Beispiele im Text werden verschiedentlich mit **[B]**, **Übungsbeispiele** immer mit **[Ü]** bezeichnet. Die Beispiele sind zur Veranschaulichung eingefügt und sofort gelöst. Die Übungsbeispiele sollen dem Leser das selbständige Bearbeiten von Strömungsproblemen ermöglichen.

Zur Übersichtlichkeit wurden bei den Lösungen der Beispiele und Übungsbeispiele folgende kennzeichnende **Abkürzungen** verwendet:

- D für **D**urchflussbeziehung
- K für **K**ontinuitätsbedingung
- E für **E**nergiegleichung idealer Strömung
- EB für **E**nergiebilanz
- EE für Energiegleichung realer Strömung, sog. **E**rweiterte Energiegleichung
- ER für Energiegleichung der **R**elativbewegung idealer Strömung
- IS für **I**mpulssatz
- DS für **D**rallsatz
- KR für **K**ontrollraum
- DP für **D**rehpunkt

Bezugsstellen, die zur sinnvollen Anwendung der zuvor aufgelisteten Fluidmechanikgesetze erforderlich sind, werden durch in Kreise gesetzte Ziffern gekennzeichnet.

Bei **Mittelwerten** sind exakt zu unterscheiden [120]:

- durchsatzgemittelte Geschwindigkeit → lineares Mittel
- energiegemittelte Geschwindigkeit } → quadratisches Mittel
- impulsgemittelte Geschwindigkeit }

Oft jedoch nicht unterschieden und überwiegend überall die durchsatzgemittelte Geschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert) verwendet, da meist turbulente Strömung, weshalb geringer – vernachlässigbarer – Unterschied. Besondere Kennzeichnung daher in der Regel nicht notwendig.

Eckige Klammern mit Zahlen kennzeichnen **Literaturstellen**, die dem Schrifttumverzeichnis im Abschnitt 8 entnehmbar sind.

Bemerkungen:

Wenn die Werte verschiedener Tabellen und Diagramme für den gleichen Stoff bzw. den gleichen Fall nicht übereinstimmen, liegt dies an den Rand-, d. h. Versuchsbedingungen, die bei der experimentellen Werte-Ermittlung zugrunde gelegt wurden und an Aufbau- sowie Messungenauigkeiten.

Berechnungen nur so genau, wie es den Ausgangs- und Tabellen-, bzw. Diagrammwerten entspricht. Die Genauigkeit von Berechnungsergebnissen ist daher der Genauigkeit der Vorgaben anzupassen.

Durch Überschlags- und Vergleichsrechnungen sollte die Richtigkeit von Berechnungen geprüft werden. Solche Abschätzrechnungen sind notwendig, da elektronische Rechner den von ihnen durchgeführten Rechnungsprozess nicht auf Richtigkeit überprüfen können. Nur wenn zufällig eine Nulldivision auftritt, steigt der Rechner aus, d. h. er beendet den Berechnungslauf und gibt eine Fehlermeldung aus.

Allgemein ist eine Dimension eine physikalische Größe (Zahlenwert mit Einheit), die der menschlichen Wahrnehmung zugänglich ist. Meist können physikalische Größen nicht direkt, sondern nur indirekt wahrgenommen werden, d. h. durch ihre Wirkungen, z. B. Kräfte, Energien usw.

Die Physik beruht letztlich auf Axiomen und Erfahrungssätzen: Axiom... Grundsatz, der keines Beweises bedarf. Naturgesetze sind Erfahrungssätze, also Erkenntnisse, die auf Erfahrung und Messungen beruhen.

Der **Anhang** (Abschnitt 6) enthält Hinweise, Tabellen und Diagramme für die Lösung technischer Strömungsprobleme.

Die vollständigen Lösungen der 77 Übungsbeispiele sind im Abschnitt 7 zusammengefasst und beruhen immer nur jeweils auf dem Kenntnisstand, der bis zum betreffenden Beispiel vom Buch vermittelt wird.

Fehlt bei Übungsbeispielen die **Angabe des Mediums** und/oder dessen Zustandswerte, ist bei Flüssigkeiten Wasser von 20 °C mit der Dichte von rund 1000 kg/m³, bei Gasen Luft von 20 °C und 1 bar zugrunde zu legen. Bei nicht angegebenem Atmosphärendruck gilt $p_b = 1$ bar.

Empfohlen wird, für die Übungsbeispiele **Computer-Programme** zu erstellen.

Hinweise:

zum physikalischen Kennzeichen von Stoffen dienen die drei Größen Masse, Volumen, Form:

- Festkörper sind masse-, volumen- und in der Regel, d. h. ohne Kräfteinfluss, formstabil.
- Flüssigkeiten sind masse- und in der Regel, d. h. meist volumenstabil.
- Gase/Dämpfe sind nur noch massestabil, also massekonstant (-unveränderlich).

Deshalb steigt wegen der wachsenden Anzahl von Freiheitsgrade der mathematische Aufwand zum physikalischen Beschreiben entsprechend von Festkörpern über Flüssigkeiten zu Gasen und Dämpfen.

Die Fluidmechanik fußt auf den Gleichgewichtsbedingungen der drei NEWTONSchen Axiomen – Trägheit, Wechselwirkung, Aktion – und den Erhaltungsbedingungen von Masse sowie Energie. Axiome sind Fundamentalsätze, die auf Erfahrung beruhen und letztlich nicht beweisbar, bzw. berechenbar sind.

Es gilt der Grundsatz: Alles was nicht berechnet werden kann, da oft zu komplex, wird gemessen. Das führt dann zu Erfahrungs- und Richtwerten.

Was exakt berechenbar, wird daher durchgeführt. Falls das jedoch nicht möglich, was oft der Fall, ist mit Meß- oder Näherungswerten (Richt- bzw. Erfahrungswerten) zu arbeiten (rechnen).

Feststellungen von deutschen Physikern, die Nobelpreisträger waren (auch Seite XI):

Albert EINSTEIN (1879 ... 1955)

- Materie und Masse sind zweierlei. Jede Materie hat Masse, aber nicht jede Masse hat Materie.
- Beide „Medien“ aus denen das Weltall besteht, Materie und Strahlung, besitzen Energie. Gemäß Relativitätstheorie besitzt alles was Energie hat auch Masse in dem Sinne, dass es der Gravitation unterliegt.
- Masse und Energie sind gleichwertig. Ihr Gesamtwert besteht dabei jeweils immer aus der Summe von Ruhe- und Bewegungsanteil.

Werner HEISENBERG (1901 ... 1976)

Am Ende seines Lebens hatte er noch zwei wichtige Fragen, die er Gott stellen wollte: warum Relativität und warum Turbulenz? Er glaubte, dass Gott nur eine Antwort auf die erste Frage – die Relativität – geben könne.

Weitreichende Feststellungen (auch Seite XI): Erkenntnisse von Dr. Robert MAYER (1848 bis 1878), deutscher Arzt und Physiker:

- Wärme ist eine Form von Energie.
- Nichts wird aus nichts und nichts wird zu nichts.

Das sind in Kurzform die Erhaltungssätze für Energie und Masse.

Aussage von Prof. Dr. Max BORN (1882 bis 1970), Nobelpreis 1954, deutscher Physiker:

Anschaulichkeit ist Gewöhnung; Vertrautheit entsteht nicht beim ersten Kontakt.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	1
1.1	Begriffe, Dimensionen, Formelzeichen	1
1.2	Aufgabe und Bedeutung	4
1.3	Wichtige Eigenschaften der Fluide	6
1.3.1	Kompressibilität	6
1.3.2	Stoffarten und -kombinationen	9
1.3.3	Teilchenkräfte, Kapillarität	11
1.3.3.1	Teilchenkräfte	11
1.3.3.2	Kapillarität	13
1.3.3.3	Krümmungsdruck	14
1.3.4	Mittlere freie Teilchenweglänge	15
1.3.5	Viskosität	15
1.3.5.1	Definition	15
1.3.5.2	Fluidreibungsgesetz nach Newton	16
1.3.5.3	Dynamische Viskosität η	21
1.3.5.4	Kinematische Viskosität ν	22
1.3.5.5	Viskositätseinheiten	23
1.3.6	Schallgeschwindigkeit	24
1.4	Fluidkräfte, reale und ideale Fluide	27
2	Fluid-Statik (Hydro- und Aerostatik)	31
2.1	Grenzflächen (Trennflächen, freie Oberflächen)	31
2.1.1	Grundsätzliches	31
2.1.2	Fluid in Ruhe oder konstanter Translationsbewegung	31
2.1.3	Fluid in beschleunigter Translationsbewegung	31
2.1.4	Fluid in Rotationsbewegung	32
2.1.5	Übungsbeispiele	34
2.2	Fluid-Druck	34
2.2.1	Druck-Definition (Druckspannung)	34
2.2.2	Richtungsabhängigkeit des Druckes	35
2.2.3	Druck-Fortpflanzung	36
2.2.4	Technische Anwendung der Druck-Fortpflanzung	37
2.2.5	Druckenergie	38
2.2.6	Druckkraft auf gekrümmte Flächen	39
2.2.7	Gleichgewichtszustand	40
2.2.8	Druck-Ausbildung durch Schwerewirkung (Schweredruck)	42
2.2.8.1	Inkompressible Fluide (Hydrostatisches Grundgesetz)	42
2.2.8.2	Kompressible Fluide (Luft- oder Barometerdruck)	44
2.3	Kommunizierende Gefäße	47
2.4	Saugwirkung	48
2.5	Fluidkräfte auf Wandungen	50
2.5.1	Grundsätzliches	50
2.5.2	Fluidkräfte gegen ebene Wandungen	50

2.5.2.1	Bodenkraft	50
2.5.2.2	Seitenkraft	51
2.5.2.3	Aufkraft	54
2.5.3	Fluidkräfte gegen gekrümmte Wandungen	54
2.5.4	Übungsbeispiele	56
2.6	Auftrieb und Schwimmen	58
2.6.1	Auftrieb	58
2.6.2	Schwimmen	59
2.6.2.1	Gleichgewicht	59
2.6.2.2	Stabilität	59
2.6.3	Übungsbeispiele	61
3	Fluid-Dynamik, Grundlagen	63
3.1	Strömungseinteilung und Begriffe	63
3.1.1	Strömungseinteilung	63
3.1.2	Begriffe	63
3.2	Fluid-Kinematik	66
3.2.1	Grundsätzliches	66
3.2.2	Eindimensionale Strömungen	67
3.2.2.1	Bewegungszustand	67
3.2.2.2	Grundgleichungen	68
3.2.2.3	Übungsbeispiele	70
3.2.3	Mehrdimensionale Strömungen	71
3.2.3.1	Bewegungszustand	71
3.2.3.2	Grundgleichung (Kontinuität)	76
3.2.3.3	GAUSSscher Integralsatz	78
3.3	Fluid-Kinetik	78
3.3.1	Ähnlichkeitstheorie	78
3.3.1.1	Grundlagen	78
3.3.1.2	Strömungskennzahlen aus Dimensionsanalyse	80
3.3.1.3	Bedeutung der Ähnlichkeitsgesetze	85
3.3.1.4	Anwendung der Kennzahlen	86
3.3.1.5	Herleitung der Kennzahlen durch Vergleichen gleichartiger Größen	86
3.3.2	Strömungsformen	89
3.3.2.1	Laminare Strömung	89
3.3.2.2	Turbulente Strömung	89
3.3.3	Grenzschichttheorie	95
3.3.3.1	Grundsätzliches	95
3.3.3.2	Grenzschichtdicke δ	96
3.3.3.3	Verdrängungsdicke δ_1	96
3.3.3.4	Grenzschichtströmung	96
3.3.3.5	Kompressible Grenzschichten	100
3.3.4	Strömungs-Ablösungen	100
3.3.5	Unstetigkeitsflächen	105
3.3.6	Eindimensionale Strömung idealer Fluide	108
3.3.6.1	EULERSCHE Bewegungsgleichung der Absolutströmung	108
3.3.6.2	EULERSche Bewegungsgleichung der Relativströmung in waagrechter Ebene	112

3.3.6.3	Energiegleichungen der Absolutströmung	115
3.3.6.4	Energiegleichung der Relativströmung	128
4	Strömungen ohne Dichteänderung	131
4.1	Eindimensionale Strömungen realer inkompressibler Fluide (Flüssigkeiten)	131
4.1.1	Innenströmungen (Rohrströmungen)	131
4.1.1.1	Erweiterte Energiegleichung	131
4.1.1.2	Energieliniengefälle	132
4.1.1.3	Gerade Rohre mit Kreisquerschnitt	132
4.1.1.4	Gerade Rohre mit beliebigem Querschnitt	148
4.1.1.5	Rohreinbauten	150
4.1.1.6	Strömungen mit Energiezufuhr und/oder Energieabfuhr	165
4.1.1.7	Kennlinie von Rohrsystemen	167
4.1.1.8	Versuchswesen	167
4.1.1.9	Übungsbeispiele	168
4.1.2	Ausfluss aus Öffnungen	171
4.1.2.1	Grundsätzliches	171
4.1.2.2	Kleiner Ausflussquerschnitt	172
4.1.2.3	Großer Ausflussquerschnitt	172
4.1.2.4	Übungsbeispiele	174
4.1.3	Strömungen in Gerinnen	175
4.1.3.1	Grundsätzliches	175
4.1.3.2	Gleichförmige stationäre Gerinneströmung	176
4.1.3.3	Ungleichförmige stationäre Gerinneströmung	177
4.1.4	Plattenströmungen (eindimensionale Außenströmungen)	180
4.1.4.1	Grundsätzliches	180
4.1.4.2	Glatte Platte (technisch glatt)	180
4.1.4.3	Raue Platte	182
4.1.4.4	Zulässige Rauigkeit	184
4.1.4.5	Übungsbeispiele	186
4.1.5	Rotierende Scheibe	186
4.1.5.1	Grundsätzliches	186
4.1.5.2	Freie Scheibe	186
4.1.5.3	Umschlossene Scheibe	188
4.1.5.4	Übungsbeispiele	190
4.1.6	Strömungskräfte	190
4.1.6.1	Impulssatz	190
4.1.6.2	Drallsatz	214
4.1.6.3	Hauptgleichung der Kreisradtheorie	221
4.1.6.4	Übungsbeispiele	223
4.2	Mehrdimensionale Strömungen idealer Fluide	224
4.2.1	EULERSche Bewegungsgleichungen	224
4.2.2	Linienintegral und Zirkulation	227
4.2.2.1	Linienintegral Λ	227
4.2.2.2	Zirkulation Γ	229
4.2.2.3	Vergleich von Strömungsfeld mit elektromagnetischem Feld	230
4.2.3	Satz von THOMSON	232

4.2.4	Integralsatz von STOKES	233
4.2.5	Potenzial- und Stromfunktion	235
4.2.6	Komplexes Potenzial	237
4.2.7	Konforme Abbildung	240
4.2.8	Strömungsklassen	242
4.2.8.1	Potenzialströmungen	242
4.2.8.2	Wirbelströmungen	248
4.2.8.3	Zusammengesetzte Strömungen	249
4.2.9	Umströmung von Schaufeln und Profilen	254
4.2.9.1	MAGNUS-Effekt	254
4.2.9.2	Tragflügeltheorie	256
4.3	Mehrdimensionale Strömungen realer Fluide	259
4.3.1	Bewegungsgleichungen	259
4.3.1.1	Grundsätzliches	259
4.3.1.2	NAVIER-STOKES-Gleichungen	262
4.3.1.3	Wirbeltransportgleichung	265
4.3.1.4	Grenzschicht-Gleichung nach PRANDTL	266
4.3.1.5	Schmierschichttheorie	268
4.3.1.6	REYNOLDS-Gleichungen	271
4.3.1.7	Turbulenz-Modelle	274
4.3.1.8	Numerische Strömungsmechanik	280
4.3.2	Körper-Umströmung	314
4.3.2.1	Grundsätzliches	314
4.3.2.2	Flächenwiderstand	316
4.3.2.3	Formwiderstand	317
4.3.2.4	Gesamtwiderstand	322
4.3.2.5	STOKESSches Widerstandsgesetz	328
4.3.2.6	Übungsbeispiele	329
4.3.3	Kräfte an umströmten Tragflächen	330
4.3.3.1	Grundsätzliches	330
4.3.3.2	Bezeichnungen	331
4.3.3.3	Kräfte am unendlich breiten Tragflügel	333
4.3.3.4	Erzeugung der Zirkulation	335
4.3.3.5	Druckverteilung am Tragflügel	337
4.3.3.6	Tragflügeleigenschaften	338
4.3.3.7	Gleitflug	339
4.3.3.8	Polarendiagramm	340
4.3.3.9	Kräfte an endlich breiten Tragflügeln	348
4.3.3.10	Flugbedingungen	352
4.3.3.11	Übungsbeispiele	354
5	Strömungen mit Dichteänderung	355
5.1	Grundsätzliches	355
5.2	Kleine Druckstörungen (Schall)	356
5.2.1	Schallgeschwindigkeit	356
5.2.2	Schallausbreitung	360
5.3	Eindimensionale kompressible Strömungen (Stromfadentheorie)	362

5.3.1	Grundgleichungen	362
5.3.1.1	Durchfluss und Kontinuität	362
5.3.1.2	Energiesatz	362
5.3.1.3	Impuls und Drall	371
5.3.2	Unterschall-Rohrströmungen	372
5.3.2.1	Grundsätzliches	372
5.3.2.2	Polytrope Rohrströmung	372
5.3.2.3	Isotherme Rohrströmung	375
5.3.2.4	Adiabate Rohrströmung	376
5.3.2.5	Rohrreibungszahl λ	377
5.3.2.6	Drosselung	377
5.3.2.7	Übungsbeispiele	379
5.3.3	Ausströmungen (Expansionsströmungen)	379
5.3.3.1	Grundsätzliches	379
5.3.3.2	Mündung (einfache Düse)	380
5.3.3.3	LAVAL-Düse (erweiterte Düse)	389
5.3.4	Einströmungen (Verdichtungsströmungen)	400
5.3.4.1	Grundsätzliches	400
5.3.4.2	Unterschalldiffusor	400
5.3.4.3	Überschalldiffusor	404
5.3.4.4	Stoßdiffusor	405
5.3.5	Transsonische Rohrströmung	405
5.3.6	Übungsbeispiele	406
5.4	Große Druckstörungen (Stoß, Welle)	408
5.4.1	Grundsätzliches	408
5.4.2	Verdichtungsstöße	412
5.4.2.1	Senkrechter Verdichtungsstoß	413
5.4.2.2	Schräger Verdichtungsstoß	420
5.4.3	Verdünnungswellen	428
5.4.4	Zusammenstellung der Beeinflussungen von Überschallströmungen durch Wellen und Stöße	430
5.4.5	Übungsbeispiele	433
5.5	Mehrdimensionale kompressible Strömungen	433
5.5.1	Vorbemerkung	433
5.5.2	Umströmung mit (reinem) Unterschall	433
5.5.3	Umströmung mit Überschall	434
5.5.3.1	Örtlicher Überschall	435
5.5.3.2	Reiner Überschall	437
5.5.4	Blockierung (Choking) überschallschnell angeströmter Öffnungen	447
5.5.5	Übungsbeispiele	448
6	Anhang	449
6.1	Übersicht	449
6.2	Tabellen und Bilder	450
7	Lösungen der Übungsbeispiele	487

8	Schrifttum	565
8.1	Lehrbücher	565
8.2	Übungsbücher	565
8.3	Weiterführende Literatur	566
8.4	Handbücher	567
	Sachverzeichnis	569