



Herbert Sigloch

# Technische Fluidmechanik

10., aktualisierte Auflage

 Springer Vieweg

Herbert Sigloch  
Eningen, Deutschland

ISBN 978-3-662-54466-2  
DOI 10.1007/978-3-662-54467-9

ISBN 978-3-662-54467-9 (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

Ursprünglich erschienen beim VDI-Verlag

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2011, 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

## Vorwort zur zehnten Auflage

Gegenüber der vorhergehenden Auflage waren entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik keine prinzipiellen Änderungen notwendig. Verschiedene, früher noch vorhandene Unschärfen und Unzulänglichkeiten wurden beseitigt sowie einige Erweiterungen durchgeführt. Zudem sind bisher leider übersehene sowie neu eingeschlichene Fehler eliminiert. Dies auch in der Hoffnung, dass jetzt keine mehr vorhanden sind.

Auch zukünftig sind Verbesserungsvorschläge und Anregungen erwünscht, werden dankbar entgegengenommen und bei den weiteren Auflagen eingearbeitet. 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, Sommer 2017

*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  $\Delta$**  (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  $\Delta$  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 **E**nergiegleichung 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.

Bei **Energie** (Abkürzung  $E$ ) werden unterschieden:

- gespeicherte  $E$ , das sind potentielle, kinetische und innere thermische (latente)
- transportierte  $E$ , das sind Arbeit und Wärme (äußere thermische, sog. fühlbare) des Systems.

Jede Materie besitzt Masse, aber nicht jede Masse ist Materie. Masse ist, was Beschleunigungen Widerstand entgegensetzt.

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  $20\text{ }^\circ\text{C}$  mit der Dichte von rund  $1000\text{ kg/m}^3$ , bei Gasen Luft von  $20\text{ }^\circ\text{C}$  und 1 bar zugrunde zu legen. Bei nicht angegebenem Atmosphärendruck gilt  $p_b = 1\text{ bar}$ .

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 Krafteinfluss, 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).

**Konstruktion** ist die Verbindung (Symbiose) von *Berechnung* und *Gestaltung* zum Erreichen optimaler Verhältnisse. Nur durch deren sinnvolles Zusammenwirken sind günstige Vorgaben für die Fertigung effektiver Produkte möglich.

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

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Allgemeines</b>                                       | 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 $\eta$                             | 21 |
| 1.3.5.4  | Kinematische Viskosität $\nu$                            | 22 |
| 1.3.5.5  | Viskositätseinheiten                                     | 23 |
| 1.3.6    | Schallgeschwindigkeit                                    | 24 |
| 1.4      | Fluidkräfte, reale und ideale Fluide                     | 27 |
| <b>2</b> | <b>Fluid-Statik (Hydro- und Aerostatik)</b>              | 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 Schwerkraftwirkung (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        |
| <b>3</b> | <b>Fluid-Dynamik, Grundlagen</b>                                      | <b>63</b> |
| 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 $\delta$  | 96        |
| 3.3.3.3  | Verdrängungsdicke $\delta_1$  | 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        |
| <b>4</b> | <b>Strömungen ohne Dichteänderung</b>                                    | <b>131</b> |
| 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 Kreiselradtheorie                                     | 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 $\Lambda$   | 227        |
| 4.2.2.2  | Zirkulation $\Gamma$   | 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        |
| <b>5</b> | <b>Strömungen mit Dichteänderung</b>                        | <b>355</b> |
| 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 $\lambda$   | 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        |
| <b>6</b> | <b>Anhang</b>  | <b>451</b> |
| 6.1      | Übersicht  | 451        |
| 6.2      | Tabellen und Bilder  | 452        |
| <b>7</b> | <b>Lösungen der Übungsbeispiele</b>  | <b>489</b> |

|          |                                |     |
|----------|--------------------------------|-----|
| <b>8</b> | <b>Schrifttum</b> .....        | 567 |
| 8.1      | Lehrbücher .....               | 567 |
| 8.2      | Übungsbücher .....             | 567 |
| 8.3      | Weiterführende Literatur ..... | 568 |
| 8.4      | Handbücher .....               | 569 |
|          | <b>Sachverzeichnis</b> .....   | 571 |