
Technische Strömungslehre

Sabine Bschorer

Technische Strömungslehre

Lehr- und Übungsbuch

11., überarbeitete und erweiterte Auflage

Weiterentwickelt aus dem Lehrbuch
von Leopold Böswirth

Unter Mitarbeit von Thomas Buck



Springer Vieweg

Sabine Bschorer
Fak. Maschinenbau
Technische Hochschule Ingolstadt
Ingolstadt, Deutschland

ISBN 978-3-658-20036-7

ISBN 978-3-658-20037-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20037-4>

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

Bis zur 8. Auflage erschien das Buch unter alleinigen Autorenschaft von Leopold Böswirth beim gleichen Verlag, in der 8. Auflage kam die Autorin Sabine Bschorer als Mitarbeiterin hinzu; die 9. und 10. Auflage erschienen mit Sabine Bschorer als zweiter Autorin.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1993, 1995, 2000, 2001, 2004, 2005, 2007, 2010, 2012, 2014, 2018
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

Vorwort zur 11. Auflage

Dieses Lehrbuch wendet sich an Studierende und Dozenten des Faches Strömungslehre in praxisorientierten Studiengängen. Die Stoffauswahl orientiert sich an den Fachbereichen Maschinenbau sowie Verfahrenstechnik/Chemie-Ingenieurwesen. Wegen der Art der Darstellung und der zahlreichen Fragen und Aufgaben eignet sich das Buch auch sehr gut zum Selbststudium, z. B. für Ingenieure, die in ein neues Berufsfeld mit Strömungslehrekomponente wechseln.

Die Autorenschaft war um eine praxisorientierte und leichtverständliche Darstellung unter sparsamer Verwendung höherer Mathematik bemüht. Einfache Ingenieur Anwendungen der Strömungslehre bilden den Hintergrund der mehr als 250 Fragen, vorgerechneten Beispielen und Aufgaben. Die Darstellung betont die physikalischen Grundlagen.

Jedes Kapitel beginnt mit einer Darstellung der begrifflichen, theoretischen und experimentellen Grundlagen. Daran schließen sich Abschnitte mit vorgerechneten Beispielen und Aufgabenstellungen an, deren Ergebnisse im Anhang zusammengestellt sind. Für einen Teil der Aufgaben (gekennzeichnet) werden auch Lösungshinweise in einem Abschnitt des Anhanges gegeben. Die Aufgaben sollen dem Studierenden reichlich Gelegenheit geben, sich in die Anwendung der Grundgesetze einzuüben.

Die gute Aufnahme der vorangegangenen zehn Auflagen und zahlreiche Stellungnahmen von Fachkollegen, denen ich auf diesem Wege danken möchte, weisen darauf hin, dass ein Werk dieses Zuschnitts fehlte.

Leider verstarb Professor Böswirth am 2. März 2016. Seit der 8. Auflage durfte ich an seinem Lehrbuch mitarbeiten, was mir eine besondere Ehre war und ist. Bei unseren Begegnungen, Telefonaten und Schriftverkehr lernte ich ihn als herausragende Persönlichkeit und großes Vorbild kennen. Ich werde mich dafür einsetzen, sein Werk gebührend fortzuführen.

In dieser Auflage wurde schwerpunktmäßig das Kap. 9 „Widerstand umströmter Körper“ überarbeitet. Besonders möchte ich mich bei meinem Kollegen Prof. Dr. Konrad Költzsch sowie Herrn Dr. Jörg Müller bedanken, die mich bei der Aktualisierung vom Abschn. 9.4 „Automobil-Aerodynamik“ unterstützt haben. Des Weiteren wurde auch in dieser Auflage für einige bestehenden Aufgaben der ausführliche Lösungsweg ergänzt.

Wie bereits in der 10. Auflage befasst sich ein Abschnitt (13.2) mit eindimensionaler Strömungssimulation. Dieser Abschnitt wurde dankenswerterweise wieder von Herrn Buck (Mentor Graphics (Deutschland) GmbH) übernommen.

Schließlich möchte ich noch dem Springer Vieweg Verlag meinen besonderen Dank für die jederzeit hervorragende konstruktive Zusammenarbeit aussprechen, insbesondere Herrn Thomas Zipsner und Frau Imke Zander.

Ingolstadt, im Sommer 2017

S. Bschorer

Hinweise zu den Aufgaben

- Ergebnisse zu den Aufgaben finden sich im Lösungsanhang A.2.1.
- Für mit * gekennzeichnete Aufgaben finden sich stichwortartige Lösungshinweise im Anhang A.2.2.
- Unter den Aufgaben finden sich auch Fragen allgemeiner Natur und Fragen mit Mehrfachwahlantworten. Sie dienen vor allem für Leser, die sich den Stoff im Selbststudium aneignen wollen. Wenn nicht alle diese Fragen eines Kapitels vom Leser richtig beantwortet werden können, wird empfohlen, das entsprechende Theoriekapitel nochmals durchzustudieren, bevor an das Lösen von Aufgaben geschritten wird.
- Sehr viele Aufgaben beziehen sich auf Luft und Wasser bei Umgebungsbedingungen. Um bei den zahlreichen einschlägigen Aufgaben nicht immer Zustand und Eigenschaften des Fluids angeben zu müssen, legen wir hier fest:
 - Die Angabe „Luft“ ohne weiteren Hinweis bezieht sich auf ICAO-Atmosphäre von Meeresniveau ($15\text{ °C}/1,0132\text{ bar}$) gemäß Tab. A.1 im Anhang. Bei zusätzlichen Höhenangaben ist ebenfalls die ICAO-Atmosphäre zu Grunde zu legen.
 - Enthält die Aufgabenstellung außer der Angabe „Luft“ noch deren Druck und Temperatur, so sind die Lösungen mit Stoffwerten nach Tab. A.3 berechnet.
 - Die Angabe „Wasser“ ohne weiteren Hinweis steht für Wasser von $20\text{ °C}/0,981\text{ bar}$ mit Viskositätswerten gemäß Tab. A.2 im Anhang. Die Dichte ρ wurde in den Aufgaben gerundet mit 1000 kg/m^3 eingesetzt.
- Zur Lösung zahlreicher Aufgaben sind Zahlenwerte aus Diagrammen abzulesen. Hierbei sind Streuungen durch individuelles Ablesen unvermeidbar. Um hier eine Kontrollmöglichkeit mit dem Lösungsanhang besser zu ermöglichen, sind in letzterem bei einschlägigen Aufgaben die aus Diagrammen abgelesenen Werte zusätzlich (in Klammern) angegeben.

- Die Ergebnisse im Lösungsanhang geben wir i. Allg. mit drei relevanten Ziffern (gerundet). Der Lernende wird durch den Taschenrechner nur allzu leicht verführt, übertriebene Genauigkeit in die Ergebnisse hineinzuzinterpretieren. – Bei manchen Aufgaben sind die Ergebnisse infolge verschiedener Umstände wie:
 - ungenaue Kenntnisse von Eingangsdaten,
 - zugrunde gelegte Theorie entspricht nur ungenau den Bedingungen der Aufgabe mit entsprechender Vorsicht aufzunehmen. Um darauf in knapper Form hinzuweisen, gebrauchen wir bei den Aufgabenstellungen das Wort „Abschätzung“.In Aufgaben, wo Zwischen- und Endresultate angegeben sind, ist zu beachten, dass vom Taschenrechner das Zwischenresultat i. Allg. mit drei Ziffern abgelesen wurde. Für das Weiterrechnen verwendet der Taschenrechner aber natürlich mehr Ziffern. Kleine Abweichungen bei den Lösungen können darin begründet sein.
- Für die Fallbeschleunigung g wurde in den Aufgaben der Wert $9,81 \text{ m/s}^2$ verwendet. Manche Aufgaben – besonders solche, die Druckverlustberechnung in Rohren oder freien Fall mit Luftwiderstand einschließen, erfordern eine iterative Berechnung. Der Fortgeschrittene wird mit zwei Iterationsschritten zufrieden sein, wenn sich die Ergebnisse dem im Lösungsanhang angegebenen angemessen annähern.

Die wichtigsten Formelzeichen

a	Beschleunigung, Distanz, Schallgeschwindigkeit
A	Fläche, Querschnitt, Flügelfläche, Schattenfläche
b	Breite, Barometer (mm QS)
c, C	Geschwindigkeit, Konstante, Durchflusskoeffizient (Blende)
c_a	Auftriebsbeiwert
c_f	Widerstandsbeiwert der längsangeströmten Platte
c_m	Momentenbeiwert
c_p	Dimensionsloser Druckbeiwert, Leistungsbeiwert für Windkraftanlagen
c_w	Widerstandsbeiwert
d	Durchmesser, Flügeldicke
D	Drall, Rohrdurchmesser
\dot{D}	Drallstrom
d_h	Hydraulischer Durchmesser
e	Spezifische Energiezufuhr oder -abfuhr pro kg Stoffmasse
E	Energie, Ergiebigkeit
\dot{E}	Energiestrom
F	Kraft
F_A	Auftriebskraft
F_G	Gewichtskraft
F_p	Resultierende Kraft aus dem Oberflächendruck
F_R	Resultierende Kraft aus den Schubspannungen an der Oberfläche
F_{res}	Resultierende Kraft auf eine Fluidpartie
F_{RR}	Kraft der Rollreibung
F_{sch}	Schubkraft
F_W	Gesamtwiderstandskraft ($F_p + F_R$)
Fr	Froude'sche Kennzahl
g	Fallbeschleunigung
h	Höhe (einer Flüssigkeitssäule), Spalthöhe, Enthalpie
H	Förderhöhe, Fallhöhe
I	Impuls
\dot{I}	Impulsstrom

k	Konstante, Faktor, Rauigkeit, Isentropenexponent
k_s	Äquivalente Sandrauigkeit
k_v	Dimensionsbehafteter Armaturenverlustbeiwert
Kn	Knudsen-Zahl
l, L	Länge
L_{ein}	Einlaufstrecke
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
M	Moment, Masse einer Fluidpartie
Ma	Machzahl
m Mh	Meter Meereshöhe
n	Drehzahl, Koordinate normal zur Stromlinie, Exponent
O	Oberfläche
p	Druck, p Gesamtdruck, p_d dynamischer Druck (Staudruck), p_{stat} statischer Druck
P	Leistung, Druck
r	Radius, Polarkoordinate
R	Zylinder- oder Kreisradius, Gaskonstante, Rohrleitungswiderstand
Re	Reynolds'sche Zahl
Str	Strouhal-Zahl
s	Längenkoordinate längs Kurve
t	Zeit, Flügeltiefe
T	Fallzeit, Laufzeit, Kelvintemperatur
U	Benetzter Umfang bei nicht-kreisförmigen Kanal-Querschnitten
u	Umfangsgeschwindigkeit
v	Spezifisches Volumen (nicht zu verwechseln mit v , siehe unten)
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
w	Geschwindigkeit, w_x, w_y, w_z deren Komponenten in kartesischen Koordinaten
w_m	Mittlere Geschwindigkeit im Rohr (\dot{V}/A), auch w
w_y	Sinkgeschwindigkeit eines Flugzeuges
w_∞	Anströmgeschwindigkeit weit vor dem Objekt; stationäre Endgeschwindigkeit beim freien Fall
W	Arbeit
Y	Spezifische Stutzenarbeit
x, y, z	Kartesische Koordinaten
x_i	Variable
y^+	Dimensionsloser Wandabstand
α	Ausflussziffer, Anstellwinkel, Machwinkel, Winkel allgemein, Exponent, Winkelbeschleunigung
β	Winkel, Schaufelwinkel, Durchmesser Verhältnis bei Staugeräten (d/D)
γ	Spezifisches Gewicht, Gleitwinkel bei Tragflächen, Exponent
δ	Grenzschichtdicke

δ^*	Verdrängungsdicke der Grenzschicht
ε	Gleitzahl bei Tragflächen, scheinbare Viskosität für turbulente Strömungen
ζ	Verlustbeiwert
η	Dynamische Viskosität, Wirkungsgrad
ϑ	Celsiustemperatur
λ	Widerstandsbeiwert beim Rohr, Seitenverhältnis von Tragflächen, Schnelllaufzahl bei Windturbinen
ν	Kinematische Viskosität (nicht zu verwechseln mit v , siehe oben)
ρ	Dichte
τ	Schubspannung
φ	Winkel allgemein, Polarkoordinate
ω	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz einer Drehbewegung
Γ	Zirkulation
Δ	Differenz, Laplace-Operator
Π	Dimensionslose Variable, allgemein
ϕ	Potentialfunktion
Ψ	Stromfunktion, Ψ -Funktion für die Lavaldüse

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	1
1.1	Einführung	1
1.2	Erörterung einiger wichtiger Begriffe	2
1.3	Wichtige Gesetze der Fluidstatik	9
1.4	Anwendung des Newton'schen Grundgesetzes auf strömende Fluide	15
1.5	Einteilung der Fluidmechanik	18
1.6	Beispiele	19
1.7	Kontrollfragen und Übungsaufgaben	26
2	Bernoulli'sche Gleichung für stationäre Strömung	33
2.1	Herleitung	33
2.2	Druckbegriffe bei strömenden Fluiden	40
2.3	Regeln für die Anwendung der Bernoulli'schen Gleichung	44
2.4	Verschiedene Formen der Bernoulli'schen Gleichung	46
2.5	Einfache Beispiele	48
2.6	Bernoulli'sche Gleichung, erweitert durch Arbeits- und Verlustglied	52
2.7	Beispiel 2.5	57
2.8	Übungsaufgaben	59
3	Impulssatz und Drallsatz für stationäre Strömung	73
3.1	Formulierung des Impulssatzes und Erörterung von Anwendungen	73
3.2	Herleitung des Impulssatzes aus dem Newton'schen Grundgesetz	76
3.3	Drallsatz (Impulsmomentensatz), Begriff der Strömungsmaschine	79
3.4	Vereinfachte Propellertheorie. Windkraftanlagen	84
3.4.1	Vereinfachte Propellertheorie	85
3.4.2	Windkraftanlagen	88
3.5	Beispiele	102
3.6	Übungsaufgaben	115
4	Räumliche reibungsfreie Strömungen	127
4.1	Allgemeines	127
4.2	Einfache räumliche reibungsfreie Strömungen	131

4.3	Umströmte Körper	139
4.4	Potentialströmungen	140
4.4.1	Allgemeines	140
4.4.2	Ebene Potentialströmungen	141
4.4.3	Räumliche Potentialströmungen	142
4.5	Beispiele	142
4.6	Übungsaufgaben	146
5	Reibungsgesetz für Fluide. Strömung in Spalten und Lagern	151
5.1	Haftbedingung	151
5.2	Reibungsgesetz	154
5.3	Viskosität (auch Zähigkeit genannt)	156
5.4	Weitere Erörterung der Reibungserscheinungen	157
5.5	Relative Bedeutung von Druck- und Reibungskräften	161
5.6	Strömung in Spalten und Lagern	163
5.7	Beispiele	166
5.8	Übungsaufgaben	170
6	Ähnlichkeit von Strömungen	177
6.1	Reynolds'sche Ähnlichkeit	177
6.2	Herleitung des Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetzes	179
6.3	Weitere Ähnlichkeitsgesetze	181
6.4	Das Π -Theorem von Buckingham	183
6.5	Beispiel	184
6.6	Übungsaufgaben	185
7	Die Grenzschicht	189
7.1	Übersicht über grundlegende Forschungsergebnisse	189
7.2	Wirbelbildung und Turbulenz	197
7.3	Widerstandsverminderung durch Längsrillen	202
7.3.1	Allgemeines	202
7.3.2	Experimentelle Befunde und Erörterung der Ursachen der Widerstandsverminderung	202
7.3.3	Mögliche Anwendungen	204
7.4	Beispiele	204
7.5	Übungsaufgaben	207
8	Rohrströmung und Druckverlust	211
8.1	Strömungscharakter der Rohrströmungen	211
8.2	Druckverlust und Druckabfall	215
8.2.1	Druckverlust gerader Rohrleitungsteile	215
8.2.2	Druckverlust von Rohrleitungseinbauten und in Querschnittsübergängen	220

8.2.3	Gesamte Druckdifferenz zwischen zwei Punkten in einer Rohrleitung	223
8.3	Durchflussmessung in Rohren mit Norm-Drosselgeräten	224
8.4	Anwendungen in der Verfahrenstechnik	226
8.4.1	Allgemeines	226
8.4.2	Optimale Strömungsgeschwindigkeiten für die Planung von Rohrleitungen	227
8.4.3	Druckverlustberechnung bei längs Rohrleitung veränderlichen Werten T , η , ρ	229
8.4.4	Weitere ausgewählte Widerstandsbeiwerte von Rohrleitungselementen	230
8.4.5	Wärmetauscher	231
8.4.6	Zusammenwirken von Rohrleitungsanlage mit Pumpe bzw. Ventilator	234
8.4.7	Rohrnetze	238
8.4.8	Strömung in Festbetten, Schüttungen und Fließbetten	240
8.5	Beispiele	242
8.6	Übungsaufgaben	245
9	Widerstand umströmter Körper	257
9.1	Allgemeines	257
9.2	Strömungswiderstand einer Kugel	259
9.3	Entstehung der Ablösung	261
9.4	Diskussion von Widerstandsbeiwerten	263
9.5	Strömungsgünstige Gestaltung stumpfer, angeströmter Körper	266
9.6	Automobil-Aerodynamik	271
9.7	Freier Fall mit Strömungswiderstand	280
9.8	Beispiele	282
9.9	Übungsaufgaben	285
10	Strömung um Tragflächen	291
10.1	Entstehung des Auftriebes	291
10.2	Geometrische Bezeichnungen und dimensionslose Beiwerte für Kräfte und Momente an Tragflächen	294
10.3	Einfache Ergebnisse der Potentialtheorie	297
10.4	Darstellung von Messwerten	298
10.5	Endlich breite Tragflächen	303
10.6	Kräfte und Momente am Flugzeug	304
10.7	Schema der Anwendung der Tragflügelströmung auf Axial-Strömungsmaschinen	306
10.8	Beispiel	307
10.9	Übungsaufgaben	310

11	Strömung kompressibler Fluide	315
11.1	Einführung	315
11.2	Stationäre Strömung längs Stromröhre. Grundgleichungen	318
11.3	Schallgeschwindigkeit. Machzahl. Verdichtungsstoß	322
11.4	Die Lavaldüse	328
11.5	Überschallströmungen	336
11.6	Kontrollfragen und Übungsaufgaben	342
12	Instationäre Strömung in Rohrleitungen	345
12.1	Allgemeines	345
12.2	Bernoulli'sche Gleichung für instationäre Strömung	345
12.3	Der Druckstoß in einer flüssigkeitsführenden Rohrleitung	350
12.4	Kontrollfragen und Übungsaufgaben	357
13	Numerische Lösung von Strömungsproblemen (CFD, Computational Fluid Dynamics)	359
13.1	Allgemeines	359
13.2	Eindimensionale Verfahren	361
13.3	Zwei- und dreidimensionale Verfahren	370
13.4	Grundsätzliche Vorgehensweise	377
Anhang	379
A.1	Diagramme und Tabellen	379
A.2	Lösungsanhang	384
A.2.1	Ergebnisse für die Übungsaufgaben	384
A.2.2	Lösungshinweise für * Aufgaben	403
Literatur	419
Sachverzeichnis	423