

Leopold Böswirth | Sabine Bschorer

Technische Strömungslehre

Lehr- und Übungsbuch

9. Auflage

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

Leopold Böswirth | Sabine Bschorer

Technische Strömungslehre

Leopold Böswirth | Sabine Bschorer

Technische Strömungslehre

Lehr- und Übungsbuch

9., überarbeitete Auflage

Mit 300 Abbildungen und 43 Tabellen

Unter Mitarbeit von Thomas Buck

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 1993
- 2., verbesserte Auflage 1995
- 3., verbesserte Auflage 2000
- 4., durchgesehene und erweiterte Auflage 2001
- 5., korrigierte und erweiterte Auflage 2004
- 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2005
- 7., überarbeitete und erweiterte Auflage 2007
- 8., überarbeitete und erweiterte Auflage 2010
- 9., überarbeitete Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Fromm MediaDesign GmbH, Selters i.Ts.

Bilder: Graphik & Text Studio, Dr. Wolfgang Zettlmeier, Barbing

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1718-1

Vorwort zur 9. Auflage

Dieses Buch wendet sich an Studierende und Dozenten des Faches Strömungslehre in praxisorientierten Studiengängen. Es handelt sich um ein einführendes Lehrbuch. 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 zum Selbststudium, etwa für Ingenieure, die in ein neues Berufsfeld mit Strömungslehrekomponente wechseln.

Wir waren 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 Anhangs gegeben. Die Aufgaben sollen dem Studierenden reichlich Gelegenheit geben, sich in die Anwendung der Grundgesetze einzüben.

Die gute Aufnahme der ersten acht Auflagen und zahlreiche Stellungnahmen von Fachkollegen, denen wir auf diesem Wege danken möchten, weisen daraufhin, dass ein Werk dieses Zuschnitts fehlte.

Besonders danken möchten wir auch für die eingegangenen Verbesserungsvorschläge, die zum größten Teil berücksichtigt werden konnten. So wurden z. B. einige Aufgaben inklusive Lösungsweg ergänzt und das aktuelle Thema Windkraftanlagen in Kapitel 3 um den Bereich Offshore erweitert.

Wie bereits in der 8. Auflage befasst sich ein Abschnitt (13.2) mit eindimensionaler Strömungssimulation. Er erläutert die Theorie anhand von drei Beispielen, gerechnet mit der Software Flowmaster®. Anstatt auf einer CD-ROM sind jedoch nun unter <http://www.flowmaster.com/de/testinstallation.html> weiterführende Erläuterungen zu den Beispielen sowie Informationen zum Programm zu finden.

Schließlich möchten wir noch dem Vieweg+Teubner Verlag unseren besonderen Dank für die jederzeit gute konstruktive Zusammenarbeit aussprechen, insbesondere Herrn Thomas Zipsner und Frau Imke Zander sowie Herrn Stefan Kreickenbaum.

Wien und Ingolstadt, im September 2011

L. Böswirth und 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 Meeressniveau (15 °C/1,0132 bar) gemäß Tabelle 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 Tabelle 3 berechnet.
 - Die Angabe „Wasser“ ohne weiteren Hinweis steht für Wasser von 20 °C/0,981 bar mit Viskositätswerten gemäß Tabelle 2 im Anhang. Die Dichte ρ wurde in den Aufgaben gerundet mit 1000 kg/m³ 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 allzuleicht verführt, übertriebene Genauigkeit in die Ergebnisse hineinzuzinterpretieren. – Bei manchen Aufgaben sind die Ergebnisse infolge verschiedener Umstände wie:
 - ungenaue Kenntnisse von Eingangsdaten,
 - zugrundegelegte 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 m/s² 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 (mmQS)
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	Knudsenzahl
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	Strouhalzahl
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 Staegeräten (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 ν , 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

Vorwort zur 9. Auflage	V
Hinweise zu den Aufgaben	VI
Die wichtigsten Formelzeichen	VII
1 Grundbegriffe	1
1.1 Einführung	1
1.2 Erörterung einiger wichtiger Begriffe	2
Fluid. Stationäre und instationäre Strömungen. Stromlinien und Bahnkurven. Kontinuitätsgleichung. Ideales Fluid. Reale Fluide. Ablösung und Totwassergebiet. Laminare und turbulente Strömungen	
1.3 Wiederholung wichtiger Gesetze der Fluidstatik	8
Druck. Hydrostatisches Grundgesetz. Pascal'sches Gesetz	
1.4 Anwendung des Newton'schen Grundgesetzes auf strömende Fluide	12
Krümmungsdruckformel	
1.5 Einteilung der Fluidmechanik	15
1.6 Beispiele	16
1.7 Kontrollfragen und Übungsaufgaben	21
2 Bernoulli'sche Gleichung für stationäre Strömung	25
2.1 Herleitung	25
Herleitung aus dem Satz der Erhaltung der Energie. Herleitung aus dem Newton'schen Grundgesetz	
2.2 Druckbegriffe bei strömenden Fluiden	31
Der statische Druck. Gesamtdruck. Staudruck	
2.3 Regeln für die Anwendung der Bernoulli'schen Gleichung	35
2.4 Verschiedene Formen der Bernoulli'schen Gleichung	37
2.5 Einfache Beispiele	38
Ausfluss von Flüssigkeiten aus Gefäßen und Behältern. Besonderheiten bei Ausfluss aus scharfkantigen Öffnungen	
2.6 Bernoulli'sche Gleichung, erweitert durch Arbeits- und Verlustglied	43
Besonderheiten bei Pumpen und Ventilatoren. Austrittsverlust	
2.7 Beispiel 2.5	47
2.8 Übungsaufgaben	49
3 Impulssatz und Drallsatz für stationäre Strömung	59
3.1 Formulierung des Impulssatzes und Erörterung von Anwendungen	59
3.2 Herleitung des Impulssatzes aus dem Newton'schen Grundgesetz	61
3.3 Drallsatz, Begriff der Strömungsmaschine	64
3.4 Vereinfachte Propellertheorie. Windkraftanlagen	69
3.5 Beispiele	85
3.6 Übungsaufgaben	95
4 Räumliche reibungsfreie Strömungen	104
4.1 Allgemeines	104
4.2 Einfache räumliche reibungsfreie Strömungen	108
Quell- und Senkenströmung. Potentialwirbel. Wirbel- und Quellsenke	

4.3	Umströmte Körper	114
	Zylinder. Kugel.	
4.4	Potentialströmungen	116
4.5	Beispiele	117
4.6	Übungsaufgaben	121
5	Reibungsgesetz für Fluide. Strömung in Spalten und Lagern	124
5.1	Haftbedingung	124
5.2	Reibungsgesetz	127
5.3	Viskosität	129
5.4	Weitere Erörterung der Reibungserscheinungen.....	130
5.5	Relative Bedeutung von Druck- und Reibungskräften.....	133
5.6	Strömung in Spalten und Lagern	135
5.7	Beispiele	137
5.8	Übungsaufgaben	140
6	Ähnlichkeit von Strömungen	146
6.1	Reynolds'sche Ähnlichkeit.....	146
6.2	Herleitung des Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetzes	148
6.3	Weitere Ähnlichkeitsgesetze	149
6.4	Das Π -Theorem von Buckingham	151
6.5	Beispiel	152
6.6	Übungsaufgaben	153
7	Die Grenzschicht	156
7.1	Übersicht über grundlegende Forschungsergebnisse	156
	Die längsangeströmte Platte. Grenzschichten an umströmten Körpern. Grenzschichten in Düsen	
7.2	Wirbelbildung und Turbulenz	163
7.3	Widerstandsverminderung durch Längsrillen	167
7.4	Beispiele	170
7.5	Übungsaufgaben	172
8	Rohrströmung und Druckverlust	175
8.1	Strömungscharakter der Rohrströmungen	175
	Laminare Rohrströmung. Turbulente Rohrströmung	
8.2	Druckverlust und Druckabfall	178
8.3	Durchflussmessung in Rohren	186
8.4	Anwendungen in der Verfahrenstechnik	189
8.5	Beispiele	202
8.6	Übungsaufgaben	205
9	Widerstand umströmter Körper	215
9.1	Allgemeines	215
9.2	Der Strömungswiderstand der Kugel	217
9.3	Entstehung der Ablösung.....	218
9.4	Diskussion von Widerstandsbeiwerten.....	220
9.5	Strömungsgünstige Gestaltung stumpfer, angeströmter Körper	223
9.6	Automobil-Aerodynamik.....	228
9.7	Freier Fall mit Strömungswiderstand	235
9.8	Beispiele	237
9.9	Übungsaufgaben	239

10 Strömung um Tragflächen	244
10.1 Entstehung des Auftriebes.....	244
10.2 Geometrische Bezeichnungen und dimensionslose Beiwerte für Kräfte und Momente an Tragflächen.....	247
10.3 Einfache Ergebnisse der Potentialtheorie.....	249
10.4 Darstellung von Messwerten.....	251
10.5 Endlich breite Tragflächen.....	254
10.6 Kräfte und Momente am Flugzeug.....	256
10.7 Schema der Anwendung der Tragflügelströmung auf Axial-Strömungsmaschinen.....	258
10.8 Beispiel.....	259
10.9 Übungsaufgaben.....	261
11 Strömung kompressibler Fluide	266
11.1 Einführung.....	266
11.2 Stationäre Strömung längs Stromröhre. Grundgleichungen.....	268
11.3 Schallgeschwindigkeit. Machzahl. Verdichtungsstoß.....	272
11.4 Die Lavaldüse.....	278
11.5 Überschallströmungen.....	285
11.6 Kontrollfragen und Übungsaufgaben.....	291
12 Instationäre Strömung in Rohrleitungen	293
12.1 Allgemeines.....	293
12.2 Bernoulli'sche Gleichung für instationäre Strömung.....	293
12.3 Der Druckstoß in einer flüssigkeitsführenden Rohrleitung.....	297
12.4 Kontrollfragen und Übungsaufgaben.....	303
13 Numerische Lösung von Strömungsproblemen (CFD, Computational Fluid Dynamics)	305
13.1 Allgemeines.....	305
13.2 Eindimensionale Verfahren.....	307
13.3 Zwei- und dreidimensionale Verfahren.....	315
13.4 Grundsätzliche Vorgehensweise.....	322
Anhang	323
A.1 Diagramme und Tabellen.....	323
Tabelle 1 Eigenschaften der ICAO-Atmosphäre.....	323
Tabelle 2 Stoffwerte für Wasser.....	324
Tabelle 3 Stoffwerte für trockene Luft.....	324
Tabelle 4 Stoffwerte von Flüssigkeiten.....	325
Tabelle 5 Stoffwerte von Gasen.....	325
Diagramm 1 Widerstandbeiwert c_f für die sandraue Platte.....	325
Diagramm 2 Widerstandbeiwert für den querangeströmten Zylinder.....	326
Tabelle 6 Durchflusskoeffizient C für Normblenden.....	326
Diagramm 3 Tragflügelpolaren.....	327
A.2 Lösungsanhang.....	328
A.2.1 Ergebnisse für die Übungsaufgaben.....	328
A.2.2 Lösungshinweise für *-Aufgaben.....	335
Literatur	346
Sachwortverzeichnis	348

1 Grundbegriffe

1.1 Einführung

Die Strömungslehre befasst sich mit der Beschreibung und Vorausberechnung der Bewegung der Fluide. Sie wird daher auch mit dem Namen „Fluiddynamik“ bezeichnet. *Fluid* ist der in den letzten Jahrzehnten gebräuchlich gewordene Oberbegriff für *Flüssigkeiten und Gase*.

Verglichen mit der Massenpunktdynamik, die oft schon gute Einblicke in reale Vorgänge gibt, ist die Strömungslehre außerordentlich kompliziert. Das Momentanbild einer Planetenbewegung etwa wird durch die Koordinaten des Schwerpunktes S , dessen Geschwindigkeit w und Beschleunigung a erfasst, Bild 1-1. Das Momentanbild der Umströmung eines Körpers erfordert die Kenntnis der Geschwindigkeiten und Drücke in unendlich vielen Raumpunkten (Druck- und Geschwindigkeitsfeld)!

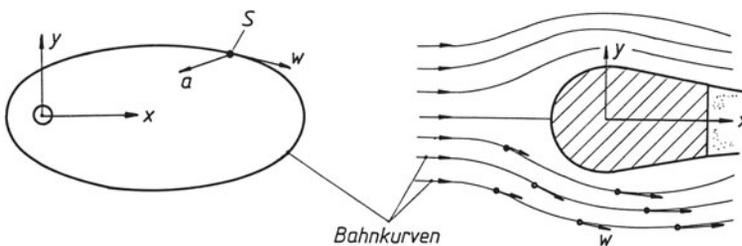


Bild 1-1 Zum Vergleich Massenpunktdynamik – Strömungslehre

In Anbetracht dieser Sachlage ist es nicht verwunderlich, dass das **Versuchswesen** in der Strömungslehre eine weit wichtigere Rolle einnimmt als in der Festkörpermechanik.

In der **Technischen Strömungslehre** sind meist nicht so sehr die bewegten Teilchen als vielmehr die ruhenden (oder gleichförmig bewegten) umströmten und durchströmten Körper im Mittelpunkt des Interesses (Auto, Rohrleitung usw.).

Im Gegensatz zum Wissenschaftler ist der Ingenieur meist schon zufrieden, wenn er die Druckverteilung an der Oberfläche des umströmten Körpers oder gar nur die daraus resultierende Strömungskraft kennt.

Die Bedeutung der Strömungslehre für das Ingenieurwesen sei stichwortartig und stellvertretend für viele andere Gebiete durch folgende Problemkreise umrissen:

- Vorausberechnung der Antriebsleistung für Fahrzeuge mit erheblichem Strömungswiderstand (z. B. Auto, Schiff, Flugzeug)
- Vorausberechnung von Pumpen- und Kompressorleistungen für in Rohrleitungen transportierte Fluide im Maschinenbau und in der Verfahrenstechnik
- Bereitstellung der Grundlagen für den Entwurf von Gleitlagern, Strömungsmaschinen (Kreiselpumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Dampf-, Gas- und Wasserturbinen) u. a.

1.2 Erörterung einiger wichtiger Begriffe

Fluid

Im Gegensatz zu einem Festkörper ist ein Fluid dadurch definiert, dass ein Fluidelement, auf das Schubspannungen τ wirken, sich immerzu verformt und nicht zur Ruhe kommt, Bild 1-2. Ein Festkörperelement kann sehr wohl unter der Einwirkung von Schubspannungen zur Ruhe und somit ins Gleichgewicht kommen.

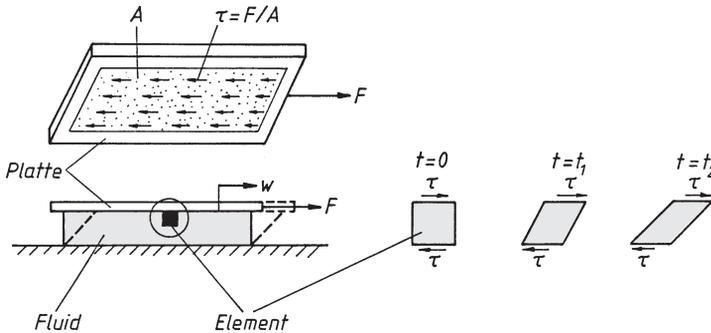


Bild 1-2 Zur Definition des Fluids; F Kraft zum Ziehen der Platte, w deren Geschwindigkeit. Die mechanische Leistung $F \cdot w$ fließt von der Platte ins Fluid (Reibungswärme).

In der Technischen Strömungslehre kann man – von wenigen Ausnahmen abgesehen – davon absehen, dass Fluide aus Molekülen bestehen. Man benutzt vielmehr die sog. **Kontinuums-hypothese**, die besagt, dass die Masse stetig über das Volumen verteilt ist. Nur so sind Limesbildungen möglich, bei denen das Volumenelement ΔV auf null zusammengezogen wird. Die Dichte ρ ist z. B. wie folgt definiert (Δm : Masse in ΔV)

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

Stationäre und instationäre Strömungen

Strömungen können u. a. in *stationäre* und *instationäre Strömungen* eingeteilt werden, je nach dem, ob an im Raume fixierten Punkten im Strömungsfeld die Geschwindigkeit gleich bleibt (stationär ist) oder sich zeitlich ändert (instationär ist). Bei technischen Anwendungen kommt man meist mit den einfacheren stationären Strömungen aus.

Zu den instationären Strömungen gehören insbesondere auch Start- und Anfahrvorgänge. Technisch wichtige instationäre Strömungen treten auch bei raschem Absperrn durchströmter Rohrleitungen auf.

Ein aktuelles Forschungsgebiet im Bereich instationärer Strömungen ist die sog. Biostromungsmechanik [45], welche sich mit den Fortbewegungsmechanismen von Tieren in Luft und Wasser (Fliegen, Schwimmen) sowie mit den Vorgängen im Blutkreislauf befasst.

Ein Umstand, der die Biostromungsmechanik im Vergleich zur üblichen Technischen Strömungslehre weit komplexer macht, ist in der Tatsache begründet, dass sich die Oberfläche der betroffenen Lebewesen (Fische, Vögel usw.) zeitlich veränderlich verformt in Wechselwirkung mit der Strömung. Auch haben die betroffenen Tierarten im Laufe der Evolution spezifi-

sche Oberflächenstrukturen in Hinblick auf Strömungsbeeinflussung entwickelt (Federn, Flossen u. a.).

Des Weiteren lässt sich eine große Klasse instationärer Strömungen durch geeignete Wahl des Beobachtungssystems in stationäre Strömungen überführen:

Bewegt sich ein Körper gleichförmig geradlinig durch ein ruhendes Fluid, so ist die Ausweichströmung für einen Beobachter, der in größerer Entfernung vom Körper im Fluid (oder an einem Ufer) ruht, eine instationäre Strömung. Ein mit dem Körper mitbewegter Beobachter sieht aber die Strömung stationär. Da eine stationäre Strömung erheblich einfacher zu behandeln ist, wird man in solchen Fällen zweckmäßigerweise ein mit dem Körper mitbewegtes Beobachtungssystem verwenden (z. B. flugzeugfestes Koordinatensystem).

Als Systeme zur Beschreibung von Strömungen eignen sich i. Allg. nur Inertialsysteme. Auch verändern sich viele Strömungen so langsam, dass man sie als **quasistationär**, d. h. „wie stationär“ behandeln kann.

Die Tatsache, dass eine Strömung stationär ist, bedeutet nicht, dass keine Beschleunigungen auftreten: ein Teilchen gelangt auf seiner Bahnkurve bald in Zonen höherer, bald in Zonen niedrigerer Geschwindigkeit und erleidet dazwischen Beschleunigungen und Verzögerungen.

Stromlinien und Bahnkurven

Zur Beschreibung von Strömungen ist das Konzept der Stromlinie sehr nützlich. Bei einer stationären Strömung sind Stromlinien einfach die *Bahnkurven* von Fluidteilchen. Die Geschwindigkeit ist in jedem Punkt tangential an diese Kurven gerichtet (vgl. auch Bild 1-1). Bei instationären Strömungen muss man zwischen Bahnkurve und Stromlinie unterscheiden. Die Definition der Bahnkurve eines Teilchens ist offensichtlich unproblematisch. Als Stromlinien bezeichnet man jene Kurven, die sich aus dem Tangentenrichtungsfeld der Strömung zu einem bestimmten Zeitpunkt ergeben. Wichtige Folgerungen aus dem Stromlinienkonzept sind:

- Bei stationären Strömungen können sich Stromlinien nicht überschneiden, sie laufen schlicht nebeneinander. Bei instationären Strömungen gilt das nur für die Stromlinien zu einem festen Zeitpunkt.
- Legt man bei stationärer Strömung Stromlinien durch eine geschlossene Kurve, so bilden diese eine Röhre, die sog. **Stromröhre**. Ähnlich wie bei einem materiellen Rohr dringt kein Fluid durch die Wand der Stromröhre, Bild 1-3.

Erhaltung der Masse, Kontinuitätsgleichung

Da in einer derartigen Stromröhre bei stationärer Strömung keine Fluidmasse gespeichert (oder gar erzeugt) werden kann, führt der Satz von der Erhaltung der Masse auf die sog. *Kontinuitätsgleichung*, Bild 1-3.

$$A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2 = \dot{m} = \text{const} \quad (1.1)$$

A Querschnitt der Stromröhre

w mittlere Geschwindigkeit in einem Querschnitt der Strömungsröhre

ρ Dichte des Fluids

\dot{m} Massenstrom, SI-Einheit kg/s

$A_1 w_1$ kann als Zylinder mit der Grundfläche A_1 und einer Höhe vom Betrag von w_1 aufgefasst werden. Fluid mit dem Volumen dieses Zylinders dringt in einer Sekunde durch A_1 . Analoges gilt für A_2 .

Die Innenwand eines materiellen Rohres kann als spezielle Stromröhre angesehen werden.

Bei Flüssigkeiten – oft auch bei Gasen (siehe Kapitel 11.1) – kann mit sehr guter Näherung die Dichte ρ als konstant angesehen werden, sodass sich hier die Kontinuitätsgleichung vereinfacht zu

$$A w = \dot{V} = \text{const}$$

$$\dot{V} \text{ Volumenstrom, SI-Einheit m}^3/\text{s} \quad (1.2)$$

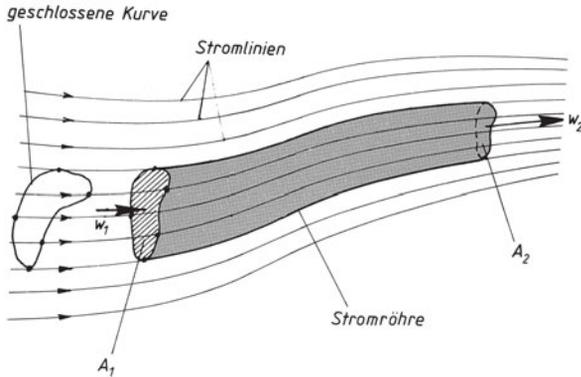


Bild 1-3

Zur Kontinuitätsgleichung bei stationärer Strömung

In typischen Anwendungen liegen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten w in Rohren im Auslegungszustand etwa bei folgenden Werten (vgl. Bild 8-14)

Flüssigkeiten 1 bis 3 m/s

Gase 10 bis 30 m/s

Ideales Fluid

Wie überall in der Wissenschaft erzielt man Erfolge zunächst nur, wenn vereinfachende Annahmen getroffen werden. Eine solche – allerdings sehr restriktive – Vereinfachung ist der Ersatz des wirklichen Fluids durch das sog. *Ideale Fluid*¹⁾. Diesem werden die Eigenschaften der *Inkompressibilität* (d. h. die Dichte ρ des Fluids ist im ganzen Strömungsfeld konstant) und der *Reibungsfreiheit* zugeordnet. Letzteres sowohl für das Innere des Fluids als auch für die Grenzflächen zu Körpern. Es wird also keine mechanische Energie durch Reibungserscheinungen in Wärme übergeführt. Daraus folgt auch, dass auf ein Teilchen eines Idealen Fluids nur Normalkräfte wirken können. Es sind dies praktisch immer Druckspannungen, in der Strömungslehre kurz Druck genannt. Fluide haben die Eigenschaft, Drücken beliebiger Größe standzuhalten. Bei Zugbeanspruchung zerreißen Flüssigkeiten (verlieren die Kontinuität); Gase erlauben durch ihre Eigenschaft beliebige Räume auszufüllen, Zugbeanspruchung überhaupt nicht.

Während ein aus einem Festkörper herausgeschnitten gedachtes quaderförmiges Massenelement in allen Raumrichtungen verschieden große Spannungen aufweisen kann, sind bei einem Element eines Idealen Fluids die Spannungen in allen Raumrichtungen gleich groß: *der Druck*, auch statischer Druck genannt (Herleitung in Abschn. 1.3).

¹⁾ Das Wort „Ideal“ wird hier nicht wie ein beliebiges Eigenschaftswort gebraucht. „Ideales Fluid“ ist eine wissenschaftliche Begriffsbildung. Deshalb benutzen wir die Großschreibung.