

Wolfgang Kümmel

# Technische Strömungsmechanik

## Theorie und Praxis

3., überarbeitete und ergänzte Auflage

Mit 174 Abbildungen, 36 Tabellen, 93. Praxishinweisen  
und 57 durchgerechneten Beispielen



Teubner

# Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen und Eigenschaften der Fluide	1
1.1	Thermische Zustandsgrößen	1
1.1.1	Dichte	1
1.1.2	Druck	3
1.1.3	Temperatur	5
1.2	Wärmekapazitäten und weitere thermodynamische Grundlagen	6
1.2.1	Wärmekapazitäten und Enthalpie	6
1.2.2	Weitere thermodynamische Grundlagen	7
1.3	Viskosität	11
1.4	Grenzflächen und Kapillarität	12
1.4.1	Grenzflächen	12
1.4.2	Kapillarität	14
2	Ruhende Fluide	i
2.1	Ruhende Flüssigkeiten	17
2.1.1	Hydrostatische Grundgleichung	17
2.1.2	Verbundene Gefäße und hydraulische Presse	18
2.1.3	Druckkräfte auf Begrenzungsflächen	21
2.1.3.1	Druckkräfte auf ebene Begrenzungsflächen	21
2.1.3.2	Druckkräfte auf gekrümmte Begrenzungsflächen	25
2.1.4	Niveauflächen	29
2.1.5	Statischer und thermischer Auftrieb	31
2.2	Ruhende Gase	36
2.2.1	Druckkräfte auf Begrenzungsflächen	36
2.2.2	Statischer und thermischer Auftrieb	37
2.2.3	Zustandsgrößen der Atmosphäre	39
3	Grundlagen der Fluidodynamik	44
3.1	Allgemeine Grundbegriffe	44
3.1.1	Beschreibung von Strömungsvorgängen	44
3.1.2	Reibungseffekte	47
3.1.3	Strömungsmechanische Ähnlichkeit und Kennzahlen	49
3.1.4	Strömungsformen	54
3.2	Bewegungsgleichungen für das Fluidelement	57
3.3	Die Erhaltungssätze der stationären Stromfadentheorie	61
3.3.1	Kontrollraum	61

3.3.2	Kontinuitätsgleichung.....	62
3.3.3	Energiesatz für inkompressible Fluide.....	64
3.3.3.1	Reibungsfreie Strömungsprozesse.....	64
3.3.3.2	Reibungsbehaftete Strömungsprozesse.....	67
3.3.3.3	Strömungsprozesse mit Austausch von Arbeit und Wärme.....	70
3.3.3.4	Anwendung des Energiesatzes bei Strömungsprozessen.....	72
3.3.4	Impulssatz.....	78
3.3.5	Drallsatz.....	88
3.4	Erweiterung der stationären Fadenströmung durch Mittelwerte.....	92
4	Stationäre Strömung inkompressibler Fluide.....	94
4.1	Vorbemerkungen.....	94
4.2	Kavitation.....	94
4.3	Strömung in Rohrleitungssystemen.....	95
4.3.1	Laminare Rohrströmung.....	95
4.3.2	Turbulente Rohrströmung.....	99
4.3.3	Strömungsverluste in geraden Rohrstücken.....	101
4.3.3.1	Grundlagen.....	101
4.3.3.2	Vollausgebildete laminare Rohrströmung.....	102
4.3.3.3	Vollausgebildete turbulente Rohrströmung.....	103
4.3.3.4	Rohreinlaufströmung.....	107
4.3.4	Strömungsverluste in Formstücken.....	110
4.3.4.1	Grundlagen.....	110
4.3.4.2	Querschnittsänderungen.....	110
4.3.4.3	Richtungsänderungen.....	118
4.3.4.4	Füllkörperschichten.....	119
4.3.5	Verluste in einsträngigen Leitungssystemen.....	120
4.3.6	Verluste in mehrsträngigen Leitungssystemen.....	124
4.4	Ausflußvorgänge.....	130
4.4.1	Ausfluß aus kleinen Öffnungen.....	130
4.4.2	Große seitliche Öffnungen.....	134
4.5	Spaltströmungen.....	135
4.5.1	Strömungsverhältnisse im Spalt.....	135
4.5.2	Verluste bei Spaltströmungen.....	140
4.6	Strömung in Ventilen.....	142
4.7	Strömung in Gerinnen.....	146
4.7.1	Erscheinungsformen der Gerinneströmung.....	146
4.7.2	Gleichförmige Gerinneströmung.....	149
5	Stationäre Strömung kompressibler Fluide.....	154
5.1	Energiesatz und ergänzende thermodynamische Grundlagen.....	154
5.2	Gasdynamik.....	160
5.2.1	Schallgeschwindigkeit, Mach- und Laval-Zahl.....	160

5.2.2	Allgemeine Betrachtungen zur beschleunigten und verzögerten Strömung ohne Entropieänderung.....	164
5.2.3	Verdichtungsstöße und Verdünnungswellen.....	166
5.2.3.1	Senkrechter Verdichtungsstoß bei Fadenströmungen.....	166
5.2.3.2	Schiefer Verdichtungsstoß bei ebener Strömung.....	171
5.2.3.3	Verdünnungswellen.....	176
5.2.3.4	Überschallströmungsmuster, Wellenwiderstand.....	178
5.2.4	Beschleunigte Strömungsvorgänge.....	180
i	5.2.4.1 Reibungsfreie Strömung.....	180
	5.2.4.2 Reibungsbehaftete Strömung.....	195
5.2.5	Verzögerte Strömungsvorgänge.....	198
5.3	Rohrströmung kompressibler Fluide.....	200
5.3.1	Differentialgleichung der kompressiblen Rohrströmung.....	200
5.3.2	Isotherme Rohrströmung ( $T = \text{konst.}$ ).....	201
5.3.3	Adiabate Rohrströmung ( $q = 0$ ).....	203
a		
6	Stationäre Umströmung von Körpern.....	208
6.1	Körper in reibungsfreier Parallelströmung.....	208
6.2	Grenzschicht.....	210
6.3	Widerstand umströmter Körper.....	218
6.3.1	Entstehung des Widerstandes.....	218
6.3.2	Ermittlung des Widerstandes.....	220
6.4	Tragflügel.....	236
6.4.1	Tragflügel mit unendlicher Spannweite.....	236
6.4.1.1	Entstehung des Auftriebs.....	236
6.4.1.2	Kräfte, Momente und aerodynamische Beiwerte am Tragflügel.....	239
6.4.2	Tragflügel endlicher Spannweite, Gesamtpolare.....	244
6.4.3	Tragflügel bei hohen (Interschall-Anström-Mach-Zahlen).....	250
7	Freistrahlen.....	253
8	Ausgewählte Beispiele instationärer Strömungen.....	256
8.1	Energiesatz der instationären Fadenströmung von Flüssigkeiten.....	256
\	8.2 Druckstoß bei plötzlicher Betätigung einer flüssigkeitsdurchströmte Armatur.....	264
\	8.3 Entleerung gasgefüllter Druckbehälter.....	269
	8.4 Instationäre Umströmungsvorgänge.....	274
	8.4.1 Periodische Wirbelablösung hinter stumpfen Zylindern.....	274
1	8.4.2 Beschleunigte Körperbewegung in viskosem ruhendem Fluid.....	276
i		
£>	Hinweise zur strömungsgerechten Konstruktion.....	281
\	9.1 Grundregeln strömungsgerechter Konstruktion.....	281
\	9.2 Konstruktion von durchströmten Kanälen und Gehäusen.....	283

9.3 Bauelemente zur Geschwindigkeitsänderung.....	286
9.3.1 Bauelemente zur Verzögerung (Diffusoren).....	286
9.3.2 Bauelemente zur Beschleunigung (Düsen).....	288
9.4 Abbau von Strömungsungleichförmigkeiten.....	290
9.5 Widerstandsverminderung umströmter Körper.....	293
9.6 Vermeidung strömungsinduzierter Schwingungen.....	296
9.7 Verminderung von Strömungsgeräuschen.....	298
<b>10 Ausblick auf die Möglichkeiten der numerischen Strömungssimulation.....</b>	<b>302</b>
10.1 Ausgangsgleichungen.....	302
10.2 Ausgangsgleichungen bei turbulenter Strömung.....	303
10.2.1 Struktur der Turbulenz.....	303
10.2.2 Reynolds-gemittelte Navier-Stokes Gleichungen (RANS).....	304
10.2.3 Grobstruktursimulation.....	307
10.2.4 Direkte numerische Simulation.....	309
10.3 Numerische Verfahren.....	310
10.4 Methodologie der CFD-Anwendung.....	311
<b>11 Anhang.....</b>	<b>313</b>
11.1 Einheiten.....	313
11.2 Fluiddaten.....	314
11.2.1 Flüssigkeiten.....	314
11.2.1.1 Wasser.....	314
11.2.1.2 Übrige Flüssigkeiten.....	315
11.2.2 Gase und Dämpfe.....	315
11.2.2.1 Wasserdampf.....	315
11.2.2.2 Gase.....	321
11.3 Tabellen, Diagramme, Daten.....	328
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>340</b>
<b>Namen- und Sachverzeichnis.....</b>	<b>343</b>