

Heinz Schade · Ewald Kunz

# Strömungslehre

3., neu bearbeitete Auflage

Bearbeitet von

Frank Kameier und Christian Oliver Paschereit



Walter de Gruyter  
Berlin · New York

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.</b> . . . . .	v
<b>Kapitel 1 Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen</b> . . . . .	1
LE 1.1 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 1) . . . . .	1
Die klassischen Aggregatzustände 1 • Intermolekulare Kräfte 2 • Feste Körper und Flüssigkeiten 2 • Schmelzen und Erstarren 3	
LE 1.2 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 2) . . . . .	3
Gase 3 • Verdampfen und Kondensieren 4	
LE 1.3 Fluide . . . . .	6
Die Kontinuumshypothese 6 • Die Grenzen der Kontinuumshypothese 7 • Die Schubspannungsfreiheit in der Ruhe 9	
LE 1.4 Extensive und intensive Größen. . . . .	10
Kontinuumshypothese und Infinitesimalrechnung 10 • Dichte und spezifisches Volumen 11 • Volumenkräfte und Oberflächenkräfte 11 • Kraftdichte und Spannungsvektor 12 • Extensive und intensive Größen 13	
LE 1.5 Der Druck. . . . .	14
LE 1.6 Die thermische Zustandsgleichung . . . . .	17
Ideale Gase 17 • Flüssigkeiten 17 • Inkompressible Fluide 18	
LE 1.7 Die Zähigkeit . . . . .	19
Elastizität und Zähigkeit 19 • Die physikalischen Ursachen der Zähigkeit 21	
LE 1.8 Nicht-newtonsche Fluide . . . . .	23
Viskose Fluide 23 • Elastoviskose Fluide 24 • Zusammenstellung der Einteilung von Medien nach ihrem mechanischen Verhalten 26 • Normalspannungseffekte 27	
LE 1.9 Die Grenzflächenspannung (Teil 1) . . . . .	28
Die physikalischen Ursachen der Grenzflächenspannung 28 • Die Grenzflächenspannung oder spezifische Grenzflächenenergie 29	
LE 1.10 Die Grenzflächenspannung (Teil 2) . . . . .	30
Randwinkel und Haftspannung 30 • Krümmungsdruck 32	
<b>Kapitel 2 Hydrostatik</b> . . . . .	34
LE 2.1 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik . . . . .	34
Grundgleichungen 34 • Die Herleitung des Eulerschen Grundgesetzes 35 • Die Grundbedingung der Hydrostatik 37	
LE 2.2 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik bei barotroper Schichtung . . . . .	38
Der Spezialfall rotorfreier Kraftdichte 38 • Barotrope Schichtung 39	

LE 2.3	Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik für inkompressible Fluide . . . . .	41
LE 2.4	Kräfte auf Behälterwände . . . . .	45
LE 2.5	Die Vertikalkraft . . . . .	47
LE 2.6	Die Horizontalkraft . . . . .	49
LE 2.7	Der hydrostatische Auftrieb . . . . .	53
<b>Kapitel 3</b>	<b>Kinematik . . . . .</b>	<b>56</b>
LE 3.1	Lagrangesche und Eulersche Darstellung . . . . .	56
	Gradient, lokale und substantielle Ableitung 57	
LE 3.2	Transporttheorem, Geschwindigkeit, Beschleunigung . . . . .	58
	Die Geschwindigkeit 58 • Das Transporttheorem 59 • Die Beschleunigung 60	
LE 3.3	Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien . . . . .	61
	Die Stromlinien 61 • Bahnlinien und Streichlinien 61 • Sichtbarmachung von Stromlinien, Bahnlinien und Streichlinien 62 • Richtungsstationäre und stationäre Strömungen 62	
LE 3.4	Die Kontinuitätsgleichung (Teil 1) . . . . .	65
	Bilanzgleichungen 65 • Die Kontinuitätsgleichung für ein materielles Volumen 66 • Die Kontinuitätsgleichung für ein raumfestes Volumen 67 • Die Kontinuitätsgleichung in differentieller Form 68	
LE 3.5	Die Kontinuitätsgleichung (Teil 2) . . . . .	70
	Stromröhre und Stromfaden 70 • Die Kontinuitätsgleichung für einen Stromfaden 70 • Stationäre Strömungen 72 • Inkompressible Fluide 73	
<b>Kapitel 4</b>	<b>Eulersche und Bernoullische Gleichung . . . . .</b>	<b>75</b>
LE 4.1	Der Impulssatz . . . . .	75
	Der Impulssatz für ein materielles Volumen 75 • Das Transporttheorem für den Impulssatz 76 • Der Impulssatz für ein raumfestes Volumen 78 • Der Impulssatz in differentieller Form (die Eulersche Bewegungsgleichung) 78	
LE 4.2	Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten. Die radiale Druckgleichung . . . . .	79
	Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten 79 • Die Eulersche Bewegungsgleichung in Stromlinienkoordinaten 81 • Die radiale Druckgleichung 81	
LE 4.3	Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 1) . . . . .	82
	Stationäre Strömungen 84 • Kavitation 85 • Die Strömungsberechnung für reibungsfreie inkompressible Fluide 85	
LE 4.4	Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 2) . . . . .	90
	Instationäre Strömungen durch einen ruhenden Stromfaden 90 • Quasi-	

	stationäre Behandlung instationärer Probleme	95
<b>Kapitel 5</b>	<b>Rohrhydraulik . . . . .</b>	<b>96</b>
LE 5.1	Die Rohrströmung . . . . .	96
	Die Hagen-Poiseuille-Strömung 96 • Die laminare und die turbulente Rohrströmung 98	
LE 5.2	Die Bernoullische Gleichung mit Strömungsverlusten und Energiezufuhr . . . . .	100
LE 5.3	Druckverluste durch Reibung . . . . .	102
	Rohre mit kreisförmigem Querschnitt 102 • Rohre mit nicht-kreisförmigem Querschnitt 104	
LE 5.4	Druckverluste durch Einbauten (Teil 1) . . . . .	106
	Ablösung 107	
LE 5.5	Druckverluste durch Einbauten (Teil 2) . . . . .	109
	Sekundärströmung infolge gekrümmter Stromlinien 109 • Die Bernoullische Gleichung für sich vereinigende Stromfäden 111	
LE 5.6	Rohrleitungsberechnung . . . . .	113
	Kennlinien von Strömungsmaschinen 113 • Rohrleitungs- oder Anlagenkennlinien 114	
<b>Kapitel 6</b>	<b>Impulssatz und Drehimpulssatz . . . . .</b>	<b>117</b>
LE 6.1	Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 1) . . . . .	117
	Stationäre Strömungen 119	
LE 6.2	Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 2) . . . . .	123
	Stationäre Strömungen durch sich verzweigende Stromfäden 123	
LE 6.3	Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 3) . . . . .	128
	Die instationäre Strömung eines inkompressiblen Fluids durch einen ruhenden Stromfaden 128 • Die Umströmung von Körpern 130	
LE 6.4	Der Drehimpulssatz . . . . .	133
	Der Drehimpulssatz für ein materielles Volumen 133 • Der Drehimpulssatz für einen Stromfaden 134	
LE 6.5	Die Eulersche Strömungsmaschinenhauptgleichung . . . . .	136
	Betrachtungsweise von Bewegungen 136 • Herleitung der Strömungsmaschinenhauptgleichung 138 • Der Zusammenhang von Drehimpuls, Arbeit und Leistung 138	
<b>Kapitel 7</b>	<b>Gasdynamik . . . . .</b>	<b>146</b>
LE 7.1	Der Energiesatz für ein materielles Volumen . . . . .	146
	Der Spezialfall rotorfreier Kraftdichte 148	
LE 7.2	Der Energiesatz für einen Stromfaden . . . . .	149
	Die Bernoullische Gleichung der Gasdynamik 151	
LE 7.3	Gibbssche Gleichung und Entropieungleichung . . . . .	153
	Die Gibbssche Gleichung mit der inneren Energie 153 • Zustandsgrößen,	

Zustandsgleichungen 154 • Thermodynamisches Gleichgewicht, lokales thermodynamisches Gleichgewicht 155 • Die Gibbsche Gleichung mit der Enthalpie 155 • Die Gibbsche Gleichung für inkompressible Fluide 156 • Die Entropiegleichung 157	
<b>LE 7.4 Ideale Gase. Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase . . . . .</b>	<b>158</b>
Die thermische und die kalorische Zustandsgleichung für ein ideales Gas 158	
• Die Isentropengleichung 160 • Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase 161	
<b>LE 7.5 Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung . . . . .</b>	<b>162</b>
Die Schallgeschwindigkeit 163 • Die Schallausbreitung in ruhenden Medien 164 • Die Schallausbreitung in bewegten Medien 165	
<b>LE 7.6 Die Bernoullische Gleichung für ein ideales Gas . . . . .</b>	<b>166</b>
Ruhegrößen und kritische Größen 167 • Das c, a-Diagramm 168	
<b>LE 7.7 Isentrope stationäre Stromfadentheorie . . . . .</b>	<b>170</b>
Die Ausgangsgleichungen 170	
<b>LE 7.8 Die Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>LE 7.9 Die Durchflussfunktion . . . . .</b>	<b>175</b>
<b>LE 7.10 Der senkrechte Verdichtungsstoß . . . . .</b>	<b>177</b>
Die Bilanzgleichungen 177 • Die Stoßrelationen 178 • Das Stoßrohr 179	
<b>LE 7.11 Der schiefe Verdichtungsstoß . . . . .</b>	<b>181</b>
Die Bilanzgleichungen 182 • Die Umströmung von Körpern 183	
<b>LE 7.12 Die Lavaldüse. . . . .</b>	<b>184</b>
<b>LE 7.13 Thermodynamische Wirkungsgrade . . . . .</b>	<b>186</b>
<b>Kapitel 8 Die Navier-Stokesche Gleichung . . . . .</b>	<b>191</b>
<b>LE 8.1 Der Spannungstensor . . . . .</b>	<b>191</b>
<b>LE 8.2 Der allgemeine Newtonsche Schubspannungsansatz . . . . .</b>	<b>194</b>
<b>LE 8.3 Die Navier-Stokesche Gleichung . . . . .</b>	<b>198</b>
Der Impulssatz bei Berücksichtigung des Cauchyschen Axioms 198 • Der Impulssatz für inkompressible newtonsche Fluide 198 • Die Strömungsberechnung für inkompressible newtonsche Fluide 199	
<b>LE 8.4 Lösungen der Navier-Stokeschen Gleichung . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>LE 8.5 Näherungsgleichungen . . . . .</b>	<b>208</b>
Schleichströmungen 208 • Grenzschichtströmungen 209	
<b>LE 8.6 Schleichströmungen . . . . .</b>	<b>209</b>
Die Kugelumströmung 210 • Das ebene Gleitlager 211	
<b>Kapitel 9 Ebene und wirbelfreie Strömungen . . . . .</b>	<b>215</b>
<b>LE 9.1 Wirbelstärke und Zirkulation . . . . .</b>	<b>215</b>
<b>LE 9.2 Ebene Strömungen . . . . .</b>	<b>219</b>
Die Stromlinien 219 • Der Geschwindigkeitsbetrag 219 • Der Volumen-	

---

strom 220 • Die Wirbelstärke 220 • Die Wirbeltransportgleichung 221 • Reduktion des Differentialgleichungssystems auf eine einzige Differentialgleichung 221	
LE 9.3 Wirbelfreie Strömungen (Potentialströmungen) . . . . .	223
Die Kontinuitätsgleichung 223 • Die Bewegungsgleichung 223	
LE 9.4 Die Grundgleichungen für ebene Potentialströmungen . . . . .	227
LE 9.5 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 1) . . . . .	228
Komplexes Potential und Geschwindigkeit 228 • Die Parallelströmung 229 • Der Potentialwirbel 230	
LE 9.6 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 2) . . . . .	233
Die Quell- oder Senkenströmung 233 • Die Dipolströmung 234	
LE 9.7 Die Umströmung eines Kreiszylinders . . . . .	237
Die Umströmung eines Kreiszylinders ohne Zirkulation 238 • Die Umströmung eines Kreiszylinders mit Zirkulation 240 • Die allgemeinste Umströmung eines Kreiszylinders 241	
LE 9.8 Die Methode der konformen Abbildung . . . . .	242
Die Methode der konformen Abbildung 242 • Die ebene Platte 243 • Joukowsky-Profile 245	
LE 9.9 Kräfte auf umströmte Körper . . . . .	246
LE 9.10 Rotationssymmetrische Potentialströmungen . . . . .	250
Die Parallelströmung 252 • Die Punktquelle 252	
LE 9.11 Die Singularitätenmethode . . . . .	254
<b>Kapitel 10 Wirbelströmungen.</b> . . . . .	<b>257</b>
LE 10.1 Das Biot-Savartsche Gesetz. . . . .	257
LE 10.2 Die ebene Wirbelschicht . . . . .	264
Die einfache Diskontinuitätsfläche 265 • Der ebene Freistrahrl 266	
LE 10.3 Der Thomsonsche Satz . . . . .	267
Der allgemeine Thomsonsche Satz 267 • Der spezielle Thomsonsche Satz 269	
LE 10.4 Die Helmholtzschen Wirbelsätze . . . . .	271
Der 1. Helmholtzsche Wirbelsatz 271 • Die beiden anderen Helmholtzschen Wirbelsätze 272	
LE 10.5 Rankinewirbel und Hamel-Oseen-Wirbel. . . . .	273
LE 10.6 Die Umströmung eines Tragflügels endlicher Spannweite . . . . .	276
Das Wirbelsystem 276 • Die Entstehung des Wirbelsystems 277 • Der induzierte Widerstand 278	
<b>Kapitel 11 Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitslehre . . . . .</b>	<b>282</b>
LE 11.1 Dimensionsanalyse . . . . .	283
Die Aufgabe 283 • Der dimensionsanalytische Algorithmus 284 • Zusammenfassung 287 • Die anschauliche Interpretation von dimensionslosen	

	Kennzahlen am Beispiel der Reynoldszahl	287
LE 11.2	Ähnlichkeitslehre . . . . .	289
	Die Modellgesetze 289 • Reynoldsähnlichkeit 290 • Mehrparametrische Probleme 291	
<b>Kapitel 12</b>	<b>Grenzschichttheorie . . . . .</b>	<b>297</b>
LE 12.1	Grenzschichten . . . . .	297
	Die Temperaturgrenzschicht 298 • Die Strömungsgrenzschicht 298	
LE 12.2	Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 1) . . . . .	301
	Herleitung der Grenzschichtgleichungen 301 • Das Randwertproblem 307	
LE 12.3	Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 2) . . . . .	308
	Der Einfluss der Wandkrümmung 309 • Der Zusammenhang zwischen dem Druckgradienten und der Form des Geschwindigkeitsprofils 311 • Die Mises-Transformation 312 • Instationäre Strömungen 313	
LE 12.4	Grenzschichtdicken . . . . .	314
	Die 99%-Dicke 314 • Die Verdrängungsdicke 314 • Die Impulsverlustdicke 316 • Der Formparameter 318	
LE 12.5	Wandschubspannung und Reibungswiderstand . . . . .	319
	Die Wandschubspannung 319 • Der Reibungswiderstand 319 • Der Impulssatz der Grenzschichttheorie 320	
LE 12.6	Die Plattenströmung . . . . .	322
<b>Kapitel 13</b>	<b>Turbulente Strömungen . . . . .</b>	<b>326</b>
LE 13.1	Laminare, periodische und turbulente Strömungen . . . . .	326
	Die Umströmung eines Kreiszylinders 327 • Einteilung der Strömungszustände 327 • Die hydrodynamische Stabilitätstheorie 328	
LE 13.2	Die Reynoldssche Gleichung . . . . .	328
	Mittelwert und Schwankungen 329 • Herleitung der Reynoldsschen Gleichung 330 • Zähigkeitsspannungstensor und Reynoldsspannungstensor 332 • Der Turbulenzgrad 332	
LE 13.3	Wirbelzähigkeit, Mischungswegansatz, Ähnlichkeitshypothese . . . . .	334
	Die Wirbelzähigkeit 334 • Der Mischungswegansatz 335	
LE 13.4	Turbulente Wandgrenzschichten . . . . .	336
	Die Grenzschichtgleichungen für turbulente Strömungen 336 • Das Dreischichtenmodell der Wandgrenzschicht 338 • Der Wandbereich 338 • Der Außenbereich 341 • Die Gesamtzähigkeit 342	
LE 13.5	Die turbulente Rohrströmung . . . . .	343
	Das logarithmische Gesetz 343 • Näherungsformeln für den Wandbereich 345 • Die Rohreibungszahl 346 • Das 1/7-Potenz-Gesetz 347	
LE 13.6	Die turbulente Plattenströmung . . . . .	349
	Instabilität und Umschlag 349 • Das 1/7-Potenz-Gesetz 349	

<b>Kapitel 14 Umströmung von Körpern . . . . .</b>	<b>353</b>
LE 14.1 Kräfte auf umströmte Körper . . . . .	353
LE 14.2 Der Widerstandsbeiwert von Kreisscheibe, Kugel und Zylinder . . . . .	357
Die Kreisscheibe 357 • Die Kugel 358 • Der unendlich lange Zylinder 359	
• Der Zylinder endlicher Länge 359	
LE 14.3 Körper geringsten Widerstandes . . . . .	361
LE 14.4 Bauwerksaerodynamik . . . . .	362
LE 14.5 Windkanaleinbauten . . . . .	364
Düse 364 • Siebe 366 • Gleichrichter 367	
<b>Kapitel 15 Strömungsmesstechnik . . . . .</b>	<b>368</b>
LE 15.1 Das Pitotrohr . . . . .	368
Methode 368 • Einflüsse auf die Messung 369	
LE 15.2 Die (statische) Drucksonde . . . . .	370
LE 15.3 Das Prandtlsche Staurohr . . . . .	372
LE 15.4 Hitzdrahtanemometrie . . . . .	373
LE 15.5 Laser-Doppler-Anemometry . . . . .	375
LE 15.6 Particle-Image-Velocimetry . . . . .	376
LE 15.7 Volumenstrommessung . . . . .	377
Messprinzipien 377 • Einlaufdüsen 378 • Messblenden 378 • Die industrielle Durchflussmessung nach DIN 380 • Venturirohre 382 • Coriolis-Massenstrommessung 383 • Schwebekörper, Rotameter 383	
LE 15.8 Viskosimetrie . . . . .	385
Das Ausflussviskosimeter 385 • Das Couette-Viskosimeter 386	
<b>Feedback . . . . .</b>	<b>387</b>
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>500</b>
1. Zum Rechnen mit Tensoren . . . . .	500
2. Kurven im Raum . . . . .	521
3. Wiederholungen aus der Funktionentheorie . . . . .	522
4. Tabellen und Diagramme . . . . .	525
5. Weiterführende Literatur . . . . .	539
6. Symbolverzeichnis . . . . .	543
<b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>548</b>