

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>	.....	<b>v</b>
<b>Kapitel 1</b>	<b>Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen</b>	<b>1</b>
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</b>	<b>Hydrostatik</b>	<b>34</b>
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 . . . . . Gradient, lokale und substantielle Ableitung 57	56
LE 3.2	Transporttheorem, Geschwindigkeit, Beschleunigung . . . . . Die Geschwindigkeit 58 • Das Transporttheorem 59 • Die Beschleunigung 60	58
LE 3.3	Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien . . . . . Die Stromlinien 61 • Bahnlinien und Streichlinien 61 • Sichtbarmachung von Stromlinien, Bahnlinien und Streichlinien 62 • Richtungsstationäre und stationäre Strömungen 62	61
LE 3.4	Die Kontinuitätsgleichung (Teil 1) . . . . . Bilanzgleichungen 65 • Die Kontinuitätsgleichung für ein materielles Volumen 66 • Die Kontinuitätsgleichung für ein raumfestes Volumen 67 • Die Kontinuitätsgleichung in differentieller Form 68	65
LE 3.5	Die Kontinuitätsgleichung (Teil 2) . . . . . Stromröhre und Stromfaden 70 • Die Kontinuitätsgleichung für einen Stromfaden 70 • Stationäre Strömungen 72 • Inkompressible Fluide 73	70
<b>Kapitel 4</b>	<b>Eulersche und Bernoullische Gleichung . . . . .</b>	<b>75</b>
LE 4.1	Der Impulssatz . . . . . 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	75
LE 4.2	Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten. Die radiale Druckgleichung . . . . . Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten 79 • Die Eulersche Bewegungsgleichung in Stromlinienkoordinaten 81 • Die radiale Druckgleichung 81	79
LE 4.3	Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 1). . . . . Stationäre Strömungen 84 • Kavitation 85 • Die Strömungsberechnung für reibungsfreie inkompressible Fluide 85	82
LE 4.4	Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 2). . . . . Instationäre Strömungen durch einen ruhenden Stromfaden 90 • Quasi-	90

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 Gibbssche Gleichung mit der Enthalpie 155 • Die Gibbssche Gleichung für inkompressible Fluide 156 • Die Entropiegleichung 157	
LE 7.4	Ideale Gase. Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase . . . . .	158
	Die thermische und die kalorische Zustandsgleichung für ein ideales Gas 158 • Die Isentropengleichung 160 • Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase 161	
LE 7.5	Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung . . . . .	162
	Die Schallgeschwindigkeit 163 • Die Schallausbreitung in ruhenden Medien 164 • Die Schallausbreitung in bewegten Medien 165	
LE 7.6	Die Bernoullische Gleichung für ein ideales Gas . . . . .	166
	Ruhegrößen und kritische Größen 167 • Das c, a-Diagramm 168	
LE 7.7	Isentrope stationäre Stromfadentheorie . . . . .	170
	Die Ausgangsgleichungen 170	
LE 7.8	Die Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung . . . . .	172
LE 7.9	Die Durchflussfunktion . . . . .	175
LE 7.10	Der senkrechte Verdichtungsstoß . . . . .	177
	Die Bilanzgleichungen 177 • Die Stoßrelationen 178 • Das Stoßrohr 179	
LE 7.11	Der schiefe Verdichtungsstoß . . . . .	181
	Die Bilanzgleichungen 182 • Die Umströmung von Körpern 183	
LE 7.12	Die Lavaldüse. . . . .	184
LE 7.13	Thermodynamische Wirkungsgrade . . . . .	186
<b>Kapitel 8</b>	<b>Die Navier-Stokessche Gleichung. . . . .</b>	<b>191</b>
LE 8.1	Der Spannungstensor . . . . .	191
LE 8.2	Der allgemeine Newtonsche Schubspannungsansatz . . . . .	194
LE 8.3	Die Navier-Stokessche Gleichung . . . . .	198
	Der Impulssatz bei Berücksichtigung des Cauchyschen Axioms 198 • Der Impulssatz für inkompressible newtonsche Fluide 198 • Die Strömungsberechnung für inkompressible newtonsche Fluide 199	
LE 8.4	Lösungen der Navier-Stokesschen Gleichung. . . . .	202
LE 8.5	Näherungsgleichungen . . . . .	208
	Schleichströmungen 208 • Grenzschichtströmungen 209	
LE 8.6	Schleichströmungen . . . . .	209
	Die Kugelumströmung 210 • Das ebene Gleitlager 211	
<b>Kapitel 9</b>	<b>Ebene und wirbelfreie Strömungen. . . . .</b>	<b>215</b>
LE 9.1	Wirbelstärke und Zirkulation . . . . .	215
LE 9.2	Ebene Strömungen . . . . .	219
	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 • Joukowski-Profil 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</b>	<b>Wirbelströmungen. . . . . 257</b>	
LE 10.1	Das Biot-Savartsche Gesetz. . . . . 257	
LE 10.2	Die ebene Wirbelschicht . . . . . 264 Die einfache Diskontinuitätsfläche 265 • Der ebene Freistrahle 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</b>	<b>Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitslehre . . . . . 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 Rohrreibungszahl 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</b>	<b>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</b>	<b>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 Prandtl'sche 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 indu- strielle 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>