
Teil A Grundlagen

1	Überblick über verschiedene Strömungen und ihre physikalischen Merkmale	3
1.1	Vorüberlegungen	3
1.1.1	Gegenstand der Strömungsmechanik	3
1.1.2	Strömungsmechanik als Kontinuumstheorie	3
1.2	Verschiedene Aspekte zur Charakterisierung von Strömungen	5
1.2.1	Aspekte des Strömungsverhaltens	5
1.2.2	Aspekte des Fluidverhaltens	8
	<i>Anmerkung 1.1: Teilgebiete der Strömungsmechanik</i>	11
2	Physikalisch/mathematische Modellbildung in der Strömungsmechanik	13
2.1	Vorüberlegungen	13
2.2	Bildung physikalisch/mathematischer Modelle	14
2.3	Dimensionsanalyse	16
2.3.1	Vorbemerkung	16
2.3.2	Das Pi-Theorem	17
2.3.3	Modellbildung durch Aufstellen der Relevanzliste	21
	<i>Anmerkung 2.1: Vorteil dimensionsloser Darstellung</i>	24
2.3.4	Kennzahlen und Modell-Theorie	25
2.3.5	Systematische Einordnung dimensionsanalytischer Aspekte	25
3	Spezielle Phänomene	33
3.1	Haftbedingung/Grenzschichten	33

	<i>Anmerkung 3.1: Physikalisch/mathematische Modelle ohne Haftbedingung</i>	36
3.2	Strömungsablösung	36
3.2.1	Stromlinien	36
3.2.2	Stromlinienverlauf bei Strömungsablösung	37
3.3	Turbulenz	38
3.3.1	Entstehung turbulenter Strömungen (Transition)	38
3.3.2	Erscheinungsbild turbulenter Strömungen	38
	<i>Anmerkung 3.2: Charakteristische Zeiten turbulenter Strömungen</i>	41
3.3.3	Eigenschaften turbulenter Strömungen	41
3.4	Drehung und Zirkulation	42
3.4.1	Vorbemerkung	42
3.4.2	Drehung	43
	<i>Anmerkung 3.3: Definition der Drehung in einer allgemeinen dreidimensionalen Strömung</i>	44
3.4.3	Zirkulation	45
3.5	Kompressibilität und Druckwellen	45
3.5.1	Vorbemerkungen	45
3.5.2	Ausbreitung von schwachen Druckwellen, Schallgeschwindigkeit	47
3.5.3	Ausbreitung von starken Druckwellen, Verdichtungsstöße, Verdünnungswellen	50
4	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	53
4.1	Erhaltungsgrößen, Bilanzgleichungen	53
	<i>Anmerkung 4.1: Bilanzen in Bezug auf endliche Kontrollräume</i>	54
	<i>Anmerkung 4.2: Relativistische Mechanik</i>	54
4.2	Teilchenfeste/ortsfeste Betrachtungsweise	54
4.3	Übergang von der teilchenfesten auf die ortsfeste Betrachtungsweise	56
4.4	Allgemeine Bilanzgleichungen, dimensionsbehaftet	57
4.5	Erläuterungen zu den allgemeinen Bilanzgleichungen	58
4.5.1	Erläuterungen zur Kontinuitätsgleichung (K^*)	58

Anmerkung 4.3: Bilanzgleichungen in konservativer Form; Interpretation der Kontinuitätsgleichung in der Eulerschen (ortsfesten) Betrachtungsweise . . .	60
Anmerkung 4.4: Spezialfälle der allgemeinen Kontinuitätsgleichung	62
4.5.2 Erläuterungen zu den Impulsgleichungen (XI*), (YI*) und (ZI*)	62
Anmerkung 4.5: Druck in strömenden Fluiden, Stokessche Hypothese, mechanischer Druck, modifizierter Druck	64
4.5.3 Erläuterungen zu den Energiegleichungen (E*), (ME*) und (TE*)	65
Anmerkung 4.6: Potentielle Energie als Teil der Gesamtenergie bzw. -enthalpie	67
4.6 Spezielle konstitutive Gleichungen, dimensionsbehaftet . . .	67
4.6.1 Konstitutive Gleichungen für τ_{ij}^* in den Impulsgleichungen / Newtonsche Fluide	68
4.6.2 Konstitutive Gleichungen für q_i^* in den Energiegleichungen / Fouriersches Wärmeleitungsverhalten	70
4.7 Navier-Stokes-Gleichungen, dimensionsbehaftet	71
4.8 Entdimensionierung der Grundgleichungen	74
Anmerkung 4.7: Index-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen	76
Anmerkung 4.8: Vektor-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen	78
Anmerkung 4.9: Wirbeltransportgleichung als spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichungen	79
Anmerkung 4.10: Einführung einer Stromfunktion	81
Anmerkung 4.11: Bilanzen in endlichen Kontrollräumen	82
Anmerkung 4.12: Impulsmomentengleichungen als weitere Bilanzgleichungen	84
Anmerkung 4.13: Natürliche Konvektionsströmungen	84
5 Das Turbulenzproblem	87
5.1 Der Energiehaushalt turbulenter Strömungen	87
Anmerkung 5.1: Kaskadenprozess in „Gedichtform“	90
Anmerkung 5.2: Korrelationen zwischen zwei turbulenten Schwankungsgrößen	90

5.2	Direkte numerische Simulation (DNS)	92
5.3	Grundgleichungen für zeitgemittelte Größen	94
5.3.1	Zeitmittelung der Strömungsgrößen	95
5.3.2	Zeitmittelung der Grundgleichungen (RANS)	96
	<i>Anmerkung 5.3: Die Kontinuitätsgleichung bei konventioneller Mittelung</i>	101
5.3.3	Allgemeine Grundgleichungen für die zeitgemittelten Strömungsgrößen/spezielle konstitutive Gleichungen	101
5.4	Turbulenzmodellierung	105
	<i>Anmerkung 5.4: Modellierung weiterer turbulenter Zusatzterme</i>	113
5.4.1	Turbulenzmodelle I: Wirbelviskositäts-Modelle	114
5.4.2	Turbulenzmodelle II: Reynolds-Spannungs-Modelle	120
	<i>Anmerkung 5.5: „Zweite Momente“</i>	122
	<i>Anmerkung 5.6: Schließung durch zusätzliche Gleichungen</i>	122
	<i>Anmerkung 5.7: Homogene Turbulenz</i>	123
	<i>Anmerkung 5.8: Isotrope Turbulenz</i>	123
	<i>Anmerkung 5.9: Modellierung der Reynoldsschen Wärmestromdichte λ_t^*</i>	124
	<i>Anmerkung 5.10: Grobstruktur-Simulation (LES)</i>	125
	<i>Anmerkung 5.11: Entstehung der Turbulenz/Strömungsstabilität bzw. -instabilität</i>	125

Teil B Die physikalisch/mathematische Modellierung spezieller Strömungen

B1 Eindimensionale Näherung

6	Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für inkompressible Strömungen	133
6.1	Stromfaden, Stromröhre	133
6.2	Mechanische Energiegleichung	133
6.2.1	Bernoulli-Gleichung	133

Anmerkung 6.1: <i>Hydrostatisches Grundgesetz als Grenzfall der Bernoulli-Gleichung für $u_{S_i}^* = 0$ / Kräfte auf feste Wände</i>	137
Anmerkung 6.2: <i>Druckverteilung in gleichförmig rotierenden Fluiden</i>	141
Anmerkung 6.3: <i>Auswertung der Bernoulli-Gleichung bei endlichen Querschnitten</i>	141
Anmerkung 6.4: <i>Instationäre Bernoulli-Gleichung</i>	142
6.2.2 <i>Erweiterte Bernoulli-Gleichung</i>	143
Anmerkung 6.5: <i>Andere Formen der (erweiterten) Bernoulli-Gleichung</i>	148
Anmerkung 6.6: <i>Dynamischer Druck, Gesamtdruck</i>	148
6.3 <i>Thermische Energiegleichung</i>	150
Anmerkung 6.7: <i>Gesamt-Energiegleichung der Stromfadentheorie</i>	151
6.4 <i>Impulsgleichungen</i>	152
7 Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für kompressible Strömungen	161
7.1 <i>Vorbemerkung</i>	161
7.2 <i>Grundgleichungen für isentrope Strömungen</i>	161
7.3 <i>Besondere Entdimensionierung des Gleichungssystems; Erzeugung von Überschallströmungen in einer Stromröhre</i>	163
7.4 <i>Berechnung der kompressiblen isentropen Strömung durch eine Stromröhre</i>	169
Anmerkung 7.1: <i>Die inkompressible Strömung als Grenzfall der kompressiblen Strömung</i>	172
7.5 <i>Senkrechter Verdichtungsstoß</i>	174
Anmerkung 7.2: <i>Schiefer Verdichtungsstoß</i>	179

B2 Zweidimensionale Näherung

8 Reibungsfreie Umströmungen	185
8.1 <i>Euler-Gleichungen</i>	185
8.2 <i>Potentialströmungen</i>	188

8.2.1	Vorbemerkung	188
8.2.2	Drehungsfreie Strömungen (Potentialströmungen)	189
	<i>Anmerkung 8.1: Konstante Drehung bzw. Drehungsfreiheit als Bedingung für eine reibungsfreie Strömung</i>	190
8.2.3	Direkte Lösungen für Potentialströmungen	191
8.2.4	Indirekte Lösungen für Potentialströmungen	192
8.2.5	Singularitätenmethoden	197
9	Reibungsbehaftete Umströmungen	201
9.1	Vorbemerkung	201
9.2	Die Entstehung und Physik von Strömungsgrenzschichten	202
9.3	Die Grenzschichttheorie als asymptotische Theorie für $Re \rightarrow \infty$	207
9.4	Grenzschichttheorie für laminare Strömungen	209
9.4.1	Grenzschicht-Effekt: Widerstand	218
9.4.2	Grenzschicht-Effekt: Verdrängung	223
	<i>Anmerkung 9.1: Selbstähnliche Grenzschichten (laminar)</i>	227
	<i>Anmerkung 9.2: Grenzschichtablösung (laminar)</i>	227
9.5	Grenzschichttheorie für turbulente Strömungen	229
9.5.1	Die Entstehung und Physik der Wandschicht	232
9.5.2	Der Übergang in den vollturbulenten Bereich	239
	<i>Anmerkung 9.3: Logarithmisches „Wand“gesetz als asymptotische Anpassungsbedingung</i>	241
9.5.3	Der vollturbulente Bereich (Defekt-Schicht)	243
	<i>Anmerkung 9.4: Indirekte Turbulenzmodellierung zur Bestimmung des Geschwindigkeits-Defektes</i>	245
9.5.4	Ergebnisse für turbulente Grenzschichten	246
	<i>Anmerkung 9.5: Grenzschichtablösung (turbulent)</i>	255
	<i>Anmerkung 9.6: Turbulenzgrad der Außenströmung</i>	255
	<i>Anmerkung 9.7: Temperaturgrenzschichten</i>	256
	<i>Anmerkung 9.8: Der Transitionsprozess bei ebenen Grenzschichten/ Strömungsstabilität bzw. -instabilität</i>	257
10	Durchströmungen	261
10.1	Ausgebildete Durchströmungen	261

10.1.1 Das Konzept des hydraulischen Durchmessers . . .	262
10.1.2 Laminare Strömungen im ebenen Kanal . . .	265
<i>Anmerkung 10.1: Ausgebildete laminare Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	<i>270</i>
10.1.3 Turbulente Strömungen im ebenen Kanal . . .	270
<i>Anmerkung 10.2: Ausgebildete turbulente Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	<i>275</i>
10.2 Nichtausgebildete Durchströmungen	277
10.2.1 Laminare Einlaufströmungen im ebenen Kanal . .	278
<i>Anmerkung 10.3: Laminare Einlaufströmungen im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	<i>279</i>
10.2.2 Turbulente Einlaufströmungen	279
<i>Anmerkung 10.4: Kräfte- und Energiebilanzen bei Durchströmungen</i>	<i>280</i>

B3 Dreidimensionale Näherung

11 Vereinfachte Gleichungen für dreidimensionale Strömungen	285
11.1 Dreidimensionale Körperumströmungen	285
11.1.1 Reibungsfreie Umströmungen und Potentialströmungen	285
<i>Anmerkung 11.1: Das d'Alembertsche Paradoxon bei räumlichen Strömungen</i>	<i>288</i>
11.1.2 Strömungsgrenzschichten	289
11.2 Dreidimensionale Durchströmungen	300
11.2.1 Vorbemerkung	300
11.2.2 Parabolisierte, teilparabolisierte Navier-Stokes-Gleichungen	300
12 Spezielle Aspekte bei der numerischen Lösung komplexer Strömungsprobleme	303
12.1 Numerische Lösung dimensionsloser Gleichungen	303
12.1.1 Bestimmung dimensionsloser Ergebnisse aus dimensionsbehafteten Gleichungen	305

12.1.2 Bestimmung weiterer dimensionsbehafteter Ergebnisse aus einer dimensionsbehafteten Lösung	309
12.2 Numerische Lösungen bei turbulenten Strömungen . . .	311
12.3 Numerische Lösungen kritisch gesehen	315
12.4 Validierung und Verifikation	319

Teil C Strömungen aus thermodynamischer Sicht

13 Thermodynamische Aspekte von Strömungen . . .	325
13.1 Vorbemerkungen	325
13.2 Thermodynamische Grundbegriffe und die dahinter stehenden Konzepte	325
13.2.1 Thermodynamische Gesamtenergie und Teilenergiegleichungen	326
13.2.2 Entropie und Entropieproduktion	326
<i>Anmerkung 13.1: Entropie als Postprocessing-Größe</i>	<i>330</i>
13.2.3 Exergie und Anergie	331
13.2.4 Entropisches Potential	333
<i>Anmerkung 13.2: Entropieproduktion durch Wärmeleitung</i>	<i>335</i>
14 Strömungsverluste aus thermodynamischer Sicht . . .	337
14.1 Vorbemerkungen	337
14.2 Alternative, einheitliche Definition von Widerstandszahlen und -beiwerten	338
<i>Anmerkung 14.1: Motivation und Vorteil der alternativen Definition von $\hat{\zeta}$ und \hat{c}_W</i>	<i>339</i>
14.3 Exergieverluste durch Strömungen	339
14.4 Anwendung der alternativen Widerstandszahlen und -beiwerte	340
14.4.1 Widerstandszahlen durchströmter Bauteile	341
14.4.2 Widerstandsbeiwerte umströmter Körper	348
14.4.3 Weitere, spezielle Anwendungsfälle	351

15 Konvektive Wärmeübertragung und ihre Bewertung	359
--	------------

Teil D Übungsaufgaben

16 Das SMART-Konzept in der Strömungsmechanik	365
16.1 Das SMART-Konzept	365
16.1.1 Vorbemerkung	365
16.1.2 Aufgabenstellung und Lösung	366
16.2 SMART-EVE: Ein Konzept in drei Schritten	367
17 Ausgewählte Übungsaufgaben und Lösungen	369
17.1 Zu Kap. 2: Physikalisch/mathematische Modellbildung in der Strömungsmechanik	369
17.2 Zu Kap. 4: Grundgleichungen der Strömungsmechanik	376
17.3 Zu Kap. 6: Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für inkompressible Strömungen	384
17.4 Zu Kap. 7: Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für kompressible Strömungen	400
17.5 Zu Kap. 8: Reibungsfreie Umströmungen	409
17.6 Zu Kap. 9: Reibungsbehaftete Umströmungen	416
17.7 Zu Kap. 10: Durchströmungen	423
17.8 Zu Kap. 14: Strömungsverluste aus thermodynamischer Sicht	425

Anhang 1 Vektoroperatoren und ihre Bedeutung in kartesischen Koordinaten	433
---	------------

Anhang 2 Andere Koordinatensysteme/Grundgleichungen in Zylinderkoordinaten	435
---	------------

Häufig verwendete Indizes und Kennungen	439
--	------------

Symbole und Formelzeichen	441
Index	449