

Inhalt

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>	10
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>	23
2.3.4	Kennzahlen und Modell-Theorie	23
3	Spezielle Phänomene	27
3.1	Haftbedingung/Grenzschichten	27
	<i>Anmerkung 3.1: Physikalisch/mathematische Modelle ohne Haftbedingung</i>	30
3.2	Strömungsablösung	30

3.2.1	Stromlinien	30
3.2.2	Stromlinienverlauf bei Strömungsablösung	31
3.3	Turbulenz	32
3.3.1	Entstehung turbulenter Strömungen (Transition) .	32
3.3.2	Erscheinungsbild turbulenter Strömungen	32
	<i>Anmerkung 3.2: Charakteristische Zeiten turbulenter Strömungen</i>	35
3.3.3	Eigenschaften turbulenter Strömungen	35
3.4	Drehung und Zirkulation	36
3.4.1	Vorbemerkung	36
3.4.2	Drehung	37
	<i>Anmerkung 3.3: Definition der Drehung in einer allgemeinen dreidimensionalen Strömung</i>	38
3.4.3	Zirkulation	39
3.5	Kompressibilität und Druckwellen	39
3.5.1	Vorbemerkungen	39
3.5.2	Ausbreitung von schwachen Druckwellen, Schallgeschwindigkeit	41
3.5.3	Ausbreitung von starken Druckwellen, Verdichtungsstöße, Verdünnungswellen	44
4	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	47
4.1	Erhaltungsgrößen, Bilanzgleichungen	47
	<i>Anmerkung 4.1: Bilanzen in bezug auf endliche Kontrollräume</i>	48
	<i>Anmerkung 4.2: Relativistische Mechanik</i>	48
4.2	Teilchenfeste/ortsfeste Betrachtungsweise	48
4.3	Übergang von der teilchenfesten auf die ortsfeste Betrachtungsweise	49
4.4	Allgemeine Bilanzgleichungen, dimensionsbehaftet . . .	51
4.5	Erläuterungen zu den allgemeinen Bilanzgleichungen . .	52
4.5.1	Erläuterungen zur Kontinuitätsgleichung (K^*) . . .	52
	<i>Anmerkung 4.3: Bilanzgleichungen in konservativer Form; Interpretation der Kontinuitätsgleichung in der Eulerschen (ortsfesten) Betrachtungsweise</i>	54
	<i>Anmerkung 4.4: Spezialfälle der allgemeinen Kontinuitätsgleichung</i>	56

4.5.2	Erläuterungen zu den Impulsgleichungen (XI*), (YI*) und (ZI*)	56
<i>Anmerkung 4.5: Druck in strömenden Fluiden, Stokessche Hypothese, mechanischer Druck, modifizierter Druck</i>		58
4.5.3	Erläuterungen zu den Energiegleichungen (E*), (ME*) und (TE*)	59
<i>Anmerkung 4.6: Potentielle Energie als Teil der Gesamtenergie bzw. -enthalpie</i>		61
4.6	Spezielle konstitutive Gleichungen, dimensionsbehaftet .	61
4.6.1	Konstitutive Gleichungen für τ_{ij}^* in den Impulsgleichungen / Newtonsche Fluide	62
4.6.2	Konstitutive Gleichungen für q_i^* in den Energiegleichungen / Fouriersches Wärmeleitungsverhalten	64
4.7	Navier-Stokes-Gleichungen, dimensionsbehaftet . . .	65
4.8	Entdimensionierung der Grundgleichungen	68
<i>Anmerkung 4.7: Index-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen</i>		70
<i>Anmerkung 4.8: Vektor-Schreibweise der Grundgleichungen, hier: Navier-Stokes-Gleichungen</i>		72
<i>Anmerkung 4.9: Wirbeltransportgleichung als spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichungen</i>		73
<i>Anmerkung 4.10: Einführung einer Stromfunktion</i>		75
<i>Anmerkung 4.11: Bilanzen in endlichen Kontrollräumen</i>		76
<i>Anmerkung 4.12: Impulsmomentengleichungen als weitere Bilanzgleichungen</i>		78
<i>Anmerkung 4.13: Natürliche Konvektionsströmungen</i>		78
5	Das Turbulenzproblem	81
5.1	Der Energiehaushalt turbulenter Strömungen	81
<i>Anmerkung 5.1: Kaskadenprozeß in „Gedichtform“</i>		84
<i>Anmerkung 5.2: Korrelationen zwischen zwei turbulenten Schwankungsgrößen</i>		84
5.2	Direkte numerische Simulation (DNS)	86
5.3	Grundgleichungen für zeitgemittelte Größen	89
5.3.1	Zeitmittelung der Strömungsgrößen	89

5.3.2	Zeitmittelung der Grundgleichungen (RANS)	91
	<i>Anmerkung 5.3: Die Kontinuitätsgleichung bei konventioneller Mittelung</i>	94
5.3.3	Allgemeine Grundgleichungen für die zeitgemittelten Strömungsgrößen/spezielle konstitutive Gleichungen	94
5.4	Turbulenzmodellierung	100
	<i>Anmerkung 5.4: Modellierung weiterer turbulenter Zusatzterme</i>	107
5.4.1	Turbulenzmodelle I: Wirbelviskositäts-Modelle	107
5.4.2	Turbulenzmodelle II: Reynolds-Spannungs-Modelle	113
	<i>Anmerkung 5.5: „Zweite Momente“</i>	115
	<i>Anmerkung 5.6: Schließung durch zusätzliche Gleichungen</i>	115
	<i>Anmerkung 5.7: Homogene Turbulenz</i>	116
	<i>Anmerkung 5.8: Isotrope Turbulenz</i>	116
	<i>Anmerkung 5.9: Modellierung der Reynoldsschen Wärmestromdichte λ_t^*</i>	117
	<i>Anmerkung 5.10: Grobstruktur-Simulation (LES)</i>	118
	<i>Anmerkung 5.11: Entstehung der Turbulenz/Strömungsstabilität bzw. -instabilität</i>	118

Teil B Die physikalisch/mathematische Modellierung spezieller Strömungen

B1 Eindimensionale Näherung

6	Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für inkompressible Strömungen	125
6.1	Stromfaden, Stromröhre	125
6.2	Mechanische Energiegleichung	125
6.2.1	Bernoulli-Gleichung	125
	<i>Anmerkung 6.1: Hydrostatisches Grundgesetz als Grenzfall der Bernoulli-Gleichung für $u_{Si}^* = 0$ / Kräfte auf feste Wände</i>	129

	Inhalt	xiii
<i>Anmerkung 6.2: Druckverteilung in gleichförmig rotierenden Fluiden</i>		133
<i>Anmerkung 6.3: Auswertung der Bernoulli-Gleichung bei endlichen Querschnitten</i>		133
<i>Anmerkung 6.4: Instationäre Bernoulli-Gleichung</i>		134
6.2.2 Erweiterte Bernoulli-Gleichung		135
<i>Anmerkung 6.5: Andere Formen der (erweiterten) Bernoulli-Gleichung</i>		139
<i>Anmerkung 6.6: Dynamischer Druck, Gesamtdruck</i>		140
6.3 Thermische Energiegleichung		142
<i>Anmerkung 6.7: Gesamt-Energiegleichung der Stromfadentheorie</i>		143
6.4 Impulsgleichungen		143
7 Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für kompressible Strömungen		153
7.1 Vorbemerkung		153
7.2 Grundgleichungen für isentrope Strömungen		153
7.3 Besondere Entdimensionierung des Gleichungssystems; Erzeugung von Überschallströmungen in einer Stromröhre		155
7.4 Berechnung der kompressiblen isentropen Strömung durch eine Stromröhre		161
<i>Anmerkung 7.1: Die inkompressible Strömung als Grenzfall der kompressiblen Strömung</i>		164
7.5 Senkrechter Verdichtungsstoß		166
<i>Anmerkung 7.2: Schiefer Verdichtungsstoß</i>		171

B2 Zweidimensionale Näherung

8 Reibungsfreie Umströmungen		177
8.1 Euler-Gleichungen		177
8.2 Potentialströmungen		180
8.2.1 Vorbemerkung		180
8.2.2 Drehungsfreie Strömungen (Potentialströmungen)		181

Anmerkung 8.1: Konstante Drehung bzw. Drehungsfreiheit als Bedingung für eine reibungsfreie Strömung . . .	182
8.2.3 Direkte Lösungen für Potentialströmungen . . .	183
8.2.4 Indirekte Lösungen für Potentialströmungen . . .	184
8.2.5 Singularitätenmethoden	189
9 Reibungsbehaftete Umströmungen	191
9.1 Vorbemerkung	191
9.2 Die Entstehung und Physik von Strömungsgrenzschichten	192
9.3 Die Grenzschichttheorie als asymptotische Theorie für $Re \rightarrow \infty$	197
9.4 Grenzschichttheorie für laminare Strömungen	199
9.4.1 Grenzschichteffekt: Widerstand	208
9.4.2 Grenzschicht-Effekt: Verdrängung	214
Anmerkung 9.1: Selbstähnliche Grenzschichten (laminar) . . .	216
Anmerkung 9.2: Grenzschichtablösung (laminar)	217
9.5 Grenzschichttheorie für turbulente Strömungen	219
9.5.1 Die Entstehung und Physik der Wandschicht . . .	222
9.5.2 Der Übergang in den vollturbulenten Bereich . . .	228
Anmerkung 9.3: Logarithmisches „Wand“gesetz als asymptotische Anpassungsbedingung	232
9.5.3 Der vollturbulente Bereich (Defekt-Schicht) . . .	233
Anmerkung 9.4: Indirekte Turbulenzmodellierung zur Bestimmung des Geschwindigkeits-Defektes	235
9.5.4 Ergebnisse für turbulente Grenzschichten	236
Anmerkung 9.5: Grenzschichtablösung (turbulent)	244
Anmerkung 9.6: Turbulenzgrad der Außenströmung	245
Anmerkung 9.7: Temperaturgrenzschichten	246
Anmerkung 9.8: Der Transitionsprozeß bei ebenen Grenzschichten/ Strömungsstabilität bzw. -instabilität	246
10 Durchströmungen	249
10.1 Ausgebildete Durchströmungen	249
10.1.1 Das Konzept des hydraulischen Durchmessers . . .	250
10.1.2 Laminare Strömungen im ebenen Kanal	253

	Inhalt	xv
<i>Anmerkung 10.1: Ausgebildete laminare Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	258
10.1.3 Turbulente Strömungen im ebenen Kanal	. . .	258
<i>Anmerkung 10.2: Ausgebildete turbulente Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	263
10.2 Nichtausgebildete Durchströmungen	263
10.2.1 Laminare Einlaufströmungen im ebenen Kanal	. .	266
<i>Anmerkung 10.3: Laminare Einlaufströmungen im Rohr (Kreisquerschnitt)</i>	267
10.2.2 Turbulente Einlaufströmungen	267
<i>Anmerkung 10.4: Kräfte- und Energiebilanzen bei Durchströmungen</i>		269

B3 Dreidimensionale Näherung

11 Vereinfachte Gleichungen für dreidimensionale Strömungen	. . . . .	273
11.1 Dreidimensionale Körperumströmungen	. . . . .	273
11.1.1 Reibungsfreie Umströmungen und Potentialströmungen	. . . . .	273
<i>Anmerkung 11.1: Das d'Alembertsche Paradoxon bei räumlichen Strömungen</i>	. . . . .	276
11.1.2 Strömungsgrenzschichten	. . . . .	277
11.2 Dreidimensionale Durchströmungen	. . . . .	288
11.2.1 Vorbemerkung	. . . . .	288
11.2.2 Parabolisierte, teilparabolisierte Navier-Stokes-Gleichungen	. . . . .	288
12 Spezielle Aspekte bei der numerischen Lösung komplexer Strömungsprobleme	. . . . .	291
12.1 Numerische Lösung dimensionsloser Gleichungen	. . .	291
12.1.1 Bestimmung dimensionsloser Ergebnisse aus dimensionsbehafteten Gleichungen	. . . . .	293
12.1.2 Bestimmung weiterer dimensionsbehafteter Ergebnisse aus einer dimensionsbehafteten Lösung		297

12.2 Numerische Lösungen bei turbulenten Strömungen	. . .	299
12.3 Numerische Lösungen kritisch gesehen	. . . . .	304

Teil C Übungsaufgaben

Aufgaben	. . . . .	311
Lösungswege und -Hinweise zu den Aufgaben	. . .	329

Anhang 1	Vektoroperatoren und ihre Bedeutung in kartesischen Koordinaten	355
Anhang 2	Andere Koordinatensysteme/Grundgleichungen in Zylinderkoordinaten	357
Häufig verwendete Indizes und Kennungen		361
Symbole und Formelzeichen		363
Literatur		369
Index		371

Strömungsmechanik

Eine Einführung in die Physik und die mathematische
Modellierung von Strömungen

Herwig, H.

2006, XVI, 373 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-32441-6