

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 | 50 |
| 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, Stokesche 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 „Gedichtsform“</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> | 116 |
| <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 | 127 |
| 6.1 Stromfaden, Stromröhre | 127 |
| 6.2 Mechanische Energiegleichung | 127 |
| 6.2.1 Bernoulli-Gleichung | 127 |
| <i>Anmerkung 6.1: Hydrostatisches Grundgesetz als Grenzfall der Bernoulli-Gleichung für $u_{Si}^* = 0$ / Kräfte auf feste Wände</i> | 131 |

| | |
|--|-----|
| <i>Anmerkung 6.2: Druckverteilung in gleichförmig rotierenden Fluiden</i> | 135 |
| <i>Anmerkung 6.3: Auswertung der Bernoulli-Gleichung bei endlichen Querschnitten</i> | 135 |
| <i>Anmerkung 6.4: Instationäre Bernoulli-Gleichung</i> | 136 |
| 6.2.2 Erweiterte Bernoulli-Gleichung | 137 |
| <i>Anmerkung 6.5: Andere Formen der (erweiterten) Bernoulli-Gleichung</i> | 142 |
| <i>Anmerkung 6.6: Dynamischer Druck, Gesamtdruck</i> | 142 |
| 6.3 Thermische Energiegleichung | 144 |
| <i>Anmerkung 6.7: Gesamt-Energiegleichung der Stromfadentheorie</i> | 145 |
| 6.4 Impulsgleichungen | 146 |
| 7 Stromfadentheorie bei endlichen Querschnitten für kompressible Strömungen | 155 |
| 7.1 Vorbemerkung | 155 |
| 7.2 Grundgleichungen für isentrope Strömungen | 155 |
| 7.3 Besondere Entdimensionierung des Gleichungssystems; Erzeugung von Überschallströmungen in einer Stromröhre | 157 |
| 7.4 Berechnung der kompressiblen isentropen Strömung durch eine Stromröhre | 163 |
| <i>Anmerkung 7.1: Die inkompressible Strömung als Grenzfall der kompressiblen Strömung</i> | 166 |
| 7.5 Senkrechter Verdichtungsstoß | 168 |
| <i>Anmerkung 7.2: Schiefer Verdichtungsstoß</i> | 173 |

B2 Zweidimensionale Näherung

| | |
|--|-----|
| 8 Reibungsfreie Umströmungen | 179 |
| 8.1 Euler-Gleichungen | 179 |
| 8.2 Potentialströmungen | 182 |
| 8.2.1 Vorbemerkung | 182 |
| 8.2.2 Drehungsfreie Strömungen (Potentialströmungen) | 183 |

| | |
|--|------------|
| Anmerkung 8.1: Konstante Drehung bzw. Drehungsfreiheit als Bedingung für eine reibungsfreie Strömung | 184 |
| 8.2.3 Direkte Lösungen für Potentialströmungen | 185 |
| 8.2.4 Indirekte Lösungen für Potentialströmungen | 186 |
| 8.2.5 Singularitätenmethoden | 191 |
| 9 Reibungsbehaftete Umströmungen | 193 |
| 9.1 Vorbemerkung | 193 |
| 9.2 Die Entstehung und Physik von Strömungsgrenzschichten | 194 |
| 9.3 Die Grenzschichttheorie als asymptotische Theorie für $Re \rightarrow \infty$ | 199 |
| 9.4 Grenzschichttheorie für laminare Strömungen | 201 |
| 9.4.1 Grenzschicht-Effekt: Widerstand | 210 |
| 9.4.2 Grenzschicht-Effekt: Verdrängung | 215 |
| Anmerkung 9.1: Selbstähnliche Grenzschichten (laminar) | 219 |
| Anmerkung 9.2: Grenzschichtablösung (laminar) | 219 |
| 9.5 Grenzschichttheorie für turbulente Strömungen | 221 |
| 9.5.1 Die Entstehung und Physik der Wandschicht | 224 |
| 9.5.2 Der Übergang in den vollturbulenten Bereich | 231 |
| Anmerkung 9.3: Logarithmisches „Wand“gesetz als asymptotische Anpassungsbedingung | 233 |
| 9.5.3 Der vollturbulente Bereich (Defekt-Schicht) | 235 |
| Anmerkung 9.4: Indirekte Turbulenzmodellierung zur Bestimmung des Geschwindigkeits-Defektes | 237 |
| 9.5.4 Ergebnisse für turbulente Grenzschichten | 238 |
| Anmerkung 9.5: Grenzschichtablösung (turbulent) | 247 |
| Anmerkung 9.6: Turbulenzgrad der Außenströmung | 247 |
| Anmerkung 9.7: Temperaturgrenzschichten | 248 |
| Anmerkung 9.8: Der Transitionsprozess bei ebenen Grenzschichten/ Strömungsstabilität bzw. -instabilität | 249 |
| 10 Durchströmungen | 253 |
| 10.1 Ausgebildete Durchströmungen | 253 |
| 10.1.1 Das Konzept des hydraulischen Durchmessers | 254 |
| 10.1.2 Laminare Strömungen im ebenen Kanal | 257 |

| | |
|--|-----|
| <i>Anmerkung 10.1: Ausgebildete laminare Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i> | 262 |
| 10.1.3 Turbulente Strömungen im ebenen Kanal | 262 |
| <i>Anmerkung 10.2: Ausgebildete turbulente Strömung im Rohr (Kreisquerschnitt)</i> | 267 |
| 10.2 Nichtausgebildete Durchströmungen | 267 |
| 10.2.1 Laminare Einlaufströmungen im ebenen Kanal | 270 |
| <i>Anmerkung 10.3: Laminare Einlaufströmungen im Rohr (Kreisquerschnitt)</i> | 271 |
| 10.2.2 Turbulente Einlaufströmungen | 271 |
| <i>Anmerkung 10.4: Kräfte- und Energiebilanzen bei Durchströmungen</i> | 273 |

B3 Dreidimensionale Näherung

| | |
|--|------------|
| 11 Vereinfachte Gleichungen für dreidimensionale Strömungen | 277 |
| 11.1 Dreidimensionale Körperumströmungen | 277 |
| 11.1.1 Reibungsfreie Umströmungen und Potentialströmungen | 277 |
| <i>Anmerkung 11.1: Das d'Alembertsche Paradoxon bei räumlichen Strömungen</i> | 280 |
| 11.1.2 Strömungsgrenzschichten | 281 |
| 11.2 Dreidimensionale Durchströmungen | 292 |
| 11.2.1 Vorbemerkung | 292 |
| 11.2.2 Parabolisierte, teilparabolisierte Navier-Stokes-Gleichungen | 292 |
| 12 Spezielle Aspekte bei der numerischen Lösung komplexer Strömungsprobleme | 295 |
| 12.1 Numerische Lösung dimensionsloser Gleichungen | 295 |
| 12.1.1 Bestimmung dimensionsloser Ergebnisse aus dimensionsbehafteten Gleichungen | 297 |
| 12.1.2 Bestimmung weiterer dimensionsbehafteter Ergebnisse aus einer dimensionsbehafteten Lösung | 301 |

| | |
|---|------------|
| 12.2 Numerische Lösungen bei turbulenten Strömungen | 303 |
| 12.3 Numerische Lösungen kritisch gesehen | 308 |
| <i>Anmerkung 12.1: Validierung und Verifikation</i> | 311 |
| <hr/> | |
| Teil C Strömungen aus thermodynamischer Sicht | |
| <hr/> | |
| 13 Thermodynamische Aspekte von Strömungen | 317 |
| 13.1 Vorbemerkungen | 317 |
| 13.2 Thermodynamische Grundbegriffe und die dahinter stehenden Konzepte | 317 |
| 13.2.1 Thermodynamische Gesamtenergie und Teilenergiegleichungen | 317 |
| 13.2.2 Entropie und Entropieproduktion | 318 |
| <i>Anmerkung 13.1: Entropie als Postprocessing-Größe</i> | 322 |
| 13.2.3 Exergie und Anergie | 322 |
| <i>Anmerkung 13.2: Entropieproduktion durch Wärmeleitung</i> | 325 |
| 14 Strömungsverluste aus thermodynamischer Sicht | 327 |
| 14.1 Vorbemerkungen | 327 |
| 14.2 Alternative, einheitliche Definition von Widerstandszahlen und -beiwerten | 328 |
| <i>Anmerkung 14.1: Motivation und Vorteil der alternativen Definition von $\hat{\zeta}$ und \hat{c}_w</i> | 329 |
| 14.3 Exergieverluste durch Strömungen | 329 |
| 14.4 Anwendung der alternativen Widerstandszahlen und -beiwerte | 330 |
| 14.4.1 Widerstandszahlen durchströmter Bauteile | 331 |
| <i>Anmerkung 14.2: Genauigkeit der $\hat{\zeta}$-Werte</i> | 336 |
| 14.4.2 Widerstandsbeiwerte umströmter Körper | 337 |
| 15 Konvektive Wärmeübertragung und ihre Bewertung | 341 |

Teil D Übungsaufgaben

| | |
|---|------------|
| Aufgaben | 347 |
| Lösungswege und -Hinweise zu den Aufgaben | 365 |
| <hr/> | |
| Anhang 1 Vektoroperatoren und ihre Bedeutung in kartesischen Koordinaten | 391 |
| Anhang 2 Andere Koordinatensysteme/Grundgleichungen in Zylinderkoordinaten | 393 |
| Häufig verwendete Indizes und Kennungen | 397 |
| Symbole und Formelzeichen | 399 |
| Index | 406 |