

---

# Inhaltsverzeichnis

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Das methodische Konzept dieses Buches</b> . . . . .                     | <b>1</b>  |
| <br><b>Teil I Einführung in wichtige Aspekte und Phänomene der Strömungsmechanik</b> |  |           |
| <b>2</b>   | <b>Anschauliche Beispiele aus Natur und Technik</b> . . . . .              | <b>5</b>  |
| 2.1  | Strömungen im Alltag . . . . .   | 6         |
| 2.2  | Strömungen in Natur und Technik . . . . .                                  | 7         |
| <b>3</b>   | <b>Strömungsaspekte und -phänomene</b> . . . . .                           | <b>11</b> |
| 3.1  | Aspekte zur Charakterisierung von Strömungen . . . . .                     | 11        |
| 3.1.1  | Strömungsaspekt: Fluidverhalten . . . . .                                  | 12        |
| 3.1.2  | Strömungsaspekt: Umströmung oder Durchströmung . . . . .                   | 13        |
| 3.1.3  | Strömungsaspekt: Erzwungene oder natürliche Konvektion . . . . .           | 15        |
| 3.1.4  | Strömungsaspekt: Laminare oder turbulente Strömungen . . . . .             | 15        |
| 3.1.5  | Strömungsaspekt: Stationäre oder instationäre Strömungen . . . . .         | 16        |
| 3.1.6  | Strömungsaspekt: Kompressible oder inkompressible Strömungen . . . . .     | 17        |
| 3.1.7  | Strömungsaspekt: Reibungsbehaftete oder reibungsfreie Strömungen . . . . . | 17        |
| 3.1.8  | Strömungsaspekt: Drei-, zwei- oder eindimensionale Strömungen . . . . .    | 18        |
| 3.2  | Kinematische Beschreibung von Strömungen . . . . .                         | 19        |
| 3.2.1  | Kinematische Beschreibung turbulenter Strömungen . . . . .                 | 20        |
| 3.2.2  | Stromlinien . . . . .  | 21        |
| 3.2.3  | Bahnlinien . . . . .   | 23        |
| 3.2.4  | Streichlinien . . . . .  | 23        |
| 3.3  | Strömungsphänomene . . . . .   | 24        |
| 3.3.1  | Strömungsphänomen: Wandeinfluss . . . . .                                  | 24        |
| 3.3.2  | Strömungsphänomen: Grenzschichten . . . . .                                | 25        |
| 3.3.3  | Strömungsphänomen: Ablösung . . . . .                                      | 27        |
| 3.3.4  | Strömungsphänomen: Drehung . . . . .                                       | 27        |
| 3.3.5  | Strömungsphänomen: Verdichtungsstoß . . . . .                              | 28        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 3.4   | Anwendungsbeispiele AB-1, AB-2 . . . . .   | 31        |
| 3.5   | Illustrierende Beispiele IB-1 bis IB-3 . . . . .                                   | 33        |
| <b>4</b>  | <b>Quasi-Strömungsmechanik: Hydro- und Aerostatik</b> . . . . .                    | <b>37</b> |
| 4.1   | Hydrostatische Druckverteilung . . . . .   | 37        |
| 4.1.1   | Bestimmung der Druckkraft auf eine Wand . . . . .                                  | 39        |
| 4.1.2   | Hydrostatischer Auftrieb . . . . .   | 41        |
| 4.1.3   | Druckverteilung in einem gleichmäßig rotierenden Fluid . . . . .                   | 43        |
| 4.2   | Aerostatische Druckverteilung . . . . .  | 44        |
| 4.3   | Anwendungsbeispiele AB-3, AB-4 . . . . .   | 46        |
| 4.4   | Illustrierende Beispiele IB-4, IB-5 . . . . .                                      | 49        |
| <br>  |  |           |
| <b>Teil II Methodisches Vorgehen in der Strömungsmechanik</b> |  |           |
| <b>5</b>  | <b>Berechnung, Simulation und Messung von Strömungsgrößen</b> . . . . .            | <b>55</b> |
| 5.1   | Physikalisch/mathematische Modellbildung . . . . .                                 | 55        |
| 5.2   | Messen von Strömungsgrößen . . . . .   | 58        |
| 5.2.1   | Geschwindigkeitsmessungen . . . . .  | 59        |
| 5.2.2   | Druckmessungen . . . . .   | 60        |
| <b>6</b>  | <b>Dimensionsanalyse</b> . . . . .   | <b>63</b> |
| 6.1   | Das Pi-Theorem der Dimensionsanalyse . . . . .                                     | 64        |
| 6.2   | Auswahl der Einflussgrößen (Modellbildung) . . . . .                               | 66        |
| 6.3   | Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen . . . . .                                | 68        |
| 6.4   | Anwendungsbeispiele AB-5, AB-6 . . . . .   | 69        |
| 6.5   | Illustrierendes Beispiel IB-6 . . . . .  | 74        |
| <b>7</b>  | <b>Untersuchungen im Modellmaßstab</b> . . . . .                                   | <b>77</b> |
| 7.1   | Physikalische Ähnlichkeit . . . . .  | 78        |
| 7.2   | Probleme bei Modelluntersuchungen . . . . .  | 78        |
| 7.3   | Anwendungsbeispiele AB-7, AB-8 . . . . .   | 81        |
| 7.4   | Illustrierende Beispiele IB-7 bis IB-9 . . . . .                                   | 84        |
| <b>8</b>  | <b>Berücksichtigung des Turbulenzeinflusses</b> . . . . .                          | <b>89</b> |
| 8.1   | Zur Physik turbulenter Strömungen . . . . .  | 90        |
| 8.2   | Simulation, Modellierung und pauschale Erfassung des Turbulenzeinflusses . . . . . | 93        |
| 8.2.1   | Simulation des Turbulenzeinflusses (DNS) . . . . .                                 | 94        |
| 8.2.2   | Modellierung des Turbulenzeinflusses (RANS) . . . . .                              | 94        |
| 8.2.3   | Pauschale Erfassung des Turbulenzeinflusses . . . . .                              | 95        |
| 8.3   | Anwendungsbeispiel AB-9 . . . . .  | 96        |
| 8.4   | Illustrierendes Beispiel IB-10 . . . . .   | 97        |

### Teil III Technische Strömungen – Eindimensionale physikalisch/mathematische Modelle

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>9</b>  | <b>Grundgleichungen der eindimensionalen Modellierung</b> . . . . .                  | 101 |
| 9.1       | Erläuterungen zur Kontinuitätsgleichung . . . . .                                    | 104 |
| 9.2       | Erläuterungen zur Gesamtenergiegleichung . . . . .                                   | 104 |
| 9.3       | Ungleichverteilung der Strömungsgrößen im Querschnitt . . . . .                      | 107 |
| <b>10</b> | <b>Inkompressible eindimensionale Stromröhrentheorie</b> . . . . .                   | 111 |
| 10.1      | Bestimmung der spezifischen Dissipation $\varphi$ . . . . .                          | 112 |
| 10.2      | Berücksichtigung der spezifischen technischen Arbeit $w_t$ . . . . .                 | 115 |
| 10.3      | Einsatz der thermischen Energiegleichung . . . . .                                   | 116 |
| 10.4      | Druck- und Geschwindigkeitsmessungen auf der Basis der Bernoulli-Gleichung . . . . . | 117 |
| 10.5      | Strömungskräfte auf die Berandung von Stromröhren . . . . .                          | 120 |
| 10.6      | Anwendungsbeispiele AB-10 bis AB-12 . . . . .  | 122 |
| 10.7      | Illustrierende Beispiele IB-11 bis IB-14 . . . . .                                   | 129 |
| <b>11</b> | <b>Kompressible eindimensionale Stromröhrentheorie</b> . . . . .                     | 137 |
| 11.1      | Lösungsstrategie . . . . .   | 138 |
| 11.2      | Strömungsformen . . . . .  | 142 |
| 11.3      | Anwendungsbeispiele AB-13, AB-14 . . . . .   | 144 |
| 11.4      | Illustrierende Beispiele IB-15, IB-16 . . . . .                                      | 147 |

### Teil IV Technische Strömungen – Mehrdimensionale physikalisch/mathematische Modelle

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>12</b> | <b>Physikalisch/mathematische Modelle mit und ohne Gebietszerlegung</b> . . . | 153 |
| 12.1      | Grenzschichttheorie: Eine hierarchische Gebietszerlegung . . . . .            | 155 |
| <b>13</b> | <b>Reibungsfreie Umströmung von Körperoberflächen</b> . . . . .               | 159 |
| 13.1      | Grundgleichungen für reibungsfreie Strömungen (Euler-Gleichungen) . .         | 159 |
| 13.1.1    | Das ortsfeste Koordinatensystem (Eulersche Betrachtungsweise) .               | 160 |
| 13.1.2    | Euler-Gleichungen (2D) . . . . .  | 161 |
| 13.2      | Einführung der Stromfunktion . . . . .  | 164 |
| 13.3      | Drehungsfreie Strömungen (Potenzialströmungen) . . . . .                      | 166 |
| 13.3.1    | Bestimmungsgleichungen für Potenzialströmungen . . . . .                      | 166 |
| 13.3.2    | Elementare und zusammengesetzte Potenzialströmungslösungen .                  | 168 |
| 13.4      | Anwendungsbeispiele AB-15, AB-16 . . . . .                                    | 173 |
| 13.5      | Illustrierende Beispiele IB-17, IB-18 . . . . .                               | 176 |

|                             |  |     |
|-----------------------------|--|-----|
| <b>14</b>                   | <b>Strömung in Grenzschichten</b> . . . . .                          | 179 |
| 14.1                        | Zwölf Grenzschichteigenschaften . . . . .                            | 179 |
| 14.2                        | Laminare Grenzschichten . . . . .                                    | 183 |
| 14.2.1                      | Grenzschichtgleichungen . . . . .                                    | 183 |
| 14.2.2                      | Grenzschichttransformation . . . . .                                 | 184 |
| 14.3                        | Turbulente Grenzschichten . . . . .                                  | 186 |
| 14.3.1                      | Grenzschichtgleichungen . . . . .                                    | 187 |
| 14.3.2                      | Turbulenzmodellierung . . . . .                                      | 189 |
| 14.3.3                      | Grenzschichttransformation, Zweischichtenstruktur . . . . .          | 192 |
| 14.4                        | Anwendungsbeispiele AB-17, AB-18 . . . . .                           | 195 |
| 14.5                        | Illustrierende Beispiele IB-19 bis IB-21 . . . . .                   | 198 |
| <b>15</b>                   | <b>Durchströmung schlanker Kanäle</b> . . . . .                      | 203 |
| 15.1                        | Begriffsbestimmung . . . . .   | 204 |
| 15.2                        | Ebener Kanal, Rohr, hydraulischer Durchmesser . . . . .              | 204 |
| 15.2.1                      | Hydrodynamische Einlaufänge . . . . .                                | 205 |
| 15.2.2                      | Ausgebildete Strömungen . . . . .                                    | 205 |
| 15.2.3                      | Das Konzept des hydraulischen Durchmessers . . . . .                 | 208 |
| 15.3                        | Schlankkanalgleichungen . . . . .                                    | 210 |
| 15.4                        | Anwendungsbeispiele AB-19, AB-20 . . . . .                           | 211 |
| 15.5                        | Illustrierende Beispiele IB-22, IB-23 . . . . .                      | 214 |
| <b>16</b>                   | <b>Grundgleichungen für Newtonsche Fluide</b> . . . . .              | 217 |
| 16.1                        | Grundgleichungen . . . . .   | 218 |
| 16.2                        | Grundgleichungen für turbulente, inkompressible Strömungen . . . . . | 219 |
| 16.3                        | Anwendungsbeispiel AB-21 . . . . .                                   | 221 |
| 16.4                        | Illustrierende Beispiele IB-24, IB-25 . . . . .                      | 222 |
| <b>Teil V Sonderkapitel</b> |  |     |
| <b>17</b>                   | <b>Widerstand und Auftrieb</b> . . . . .                             | 231 |
| 17.1                        | Widerstand und Auftrieb bei umströmten Körpern . . . . .             | 231 |
| 17.1.1                      | Widerstand umströmter Körper . . . . .                               | 232 |
| 17.1.2                      | Auftrieb umströmter Körper . . . . .                                 | 234 |
| 17.2                        | Verluste bei Durchströmungen . . . . .                               | 236 |
| 17.3                        | Illustrierende Beispiele IB-26 bis IB-28 . . . . .                   | 236 |
| <b>18</b>                   | <b>Spezielle Strömungssituationen</b> . . . . .                      | 243 |
| 18.1                        | Natürliche Konvektion . . . . .                                      | 243 |
| 18.1.1                      | Charakteristische Geschwindigkeit $u_c$ . . . . .                    | 244 |
| 18.1.2                      | Boussinesq-Approximation . . . . .                                   | 245 |
| 18.2                        | Schleichende Strömungen . . . . .                                    | 247 |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 18.3      | Strömung in porösen Medien . . . . .                             | 250        |
| 18.4      | Strömung in offenen Kanälen (Gerinnen) . . . . .                 | 254        |
| 18.5      | Oberflächenwellen . . . . .                                      | 257        |
| 18.6      | Einfluss der Oberflächenspannung . . . . .                       | 259        |
| 18.6.1    | Spezifische Oberflächenenergie $\sigma$ . . . . .                | 260        |
| 18.6.2    | Oberflächenspannung $\sigma$ . . . . .                           | 260        |
| 18.6.3    | Kapillarität . . . . .   | 262        |
| 18.7      | Anwendungsbeispiele AB-22, AB-23 . . . . .                       | 264        |
| 18.8      | Illustrierende Beispiele IB-29, IB-30 . . . . .                  | 266        |
| <b>19</b> | <b>Zwölf mal warum ...?</b> . . . . .                            | <b>269</b> |
|           | <b>Verzeichnis der Anwendungsbeispiele</b> . . . . .             | <b>275</b> |
|           | <b>Verzeichnis der illustrierenden Beispiele</b> . . . . .       | <b>277</b> |
|           | <b>Verzeichnis wichtiger Symbole und Formelzeichen</b> . . . . . | <b>279</b> |
|           | <b>Häufig verwendete Indizes und Kennzeichnungen</b> . . . . .   | <b>283</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis/Monographien</b> . . . . .               | <b>285</b> |
|           | <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .                                 | <b>289</b> |