

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Bezeichnungen, Dimensionen, Einheiten . . . . .</b>  | <b>XIII</b> |
| <b>4 Elementare Strömungsvorgänge dichteveränderlicher Fluide . . . . .</b>                           | <b>1</b>    |
| <b>4.1. Überblick . . . . .</b>   | <b>1</b>    |
| <b>4.2 Dichteveränderliche Fluide im Ruhezustand (Aerostatik) . . . . .</b>                           | <b>2</b>    |
| <b>4.2.1 Ausgangsgleichungen . . . . .</b>  | <b>2</b>    |
| <b>4.2.2 Gasdruck auf feste Begrenzungsflächen . . . . .</b>  | <b>5</b>    |
| <b>4.2.2.1 Druck in einem abgeschlossenen Behälter . . . . .</b>                                      | <b>5</b>    |
| <b>4.2.2.2 Schwebende Körper . . . . .</b>  | <b>6</b>    |
| <b>4.2.3 Beispiele zur Mechanik und Thermodynamik ruhender Gase . . . . .</b>                         | <b>6</b>    |
| <b>4.2.3.1 Ruhende Atmosphäre . . . . .</b>   | <b>6</b>    |
| <b>4.2.3.2 Quasistatische Arbeitsprozesse bei Gasen . . . . .</b>                                     | <b>9</b>    |
| <b>4.3 Stromfadentheorie dichteveränderlicher Fluide . . . . .</b>                                    | <b>10</b>   |
| <b>4.3.1 Einführung . . . . .</b>   | <b>10</b>   |
| <b>4.3.2 Stationäre Fadenströmung eines dichteveränderlichen Fluids . . . . .</b>                     | <b>11</b>   |
| <b>4.3.2.1 Voraussetzungen und Annahmen . . . . .</b>   | <b>11</b>   |
| <b>4.3.2.2 Ausgangsgleichungen der stationären Fadenströmung . . . . .</b>                            | <b>11</b>   |
| <b>4.3.2.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit schwacher Druckstörungen (Schallgeschwindigkeit) . . . . .</b> | <b>13</b>   |
| <b>4.3.2.4 Kennzahlen und Druckbeiwert der Strömung dichteveränderlicher Fluide . . . . .</b>         | <b>16</b>   |
| <b>4.3.2.5 Bei konstanter Entropie stetig verlaufende stationäre Strömung . . . . .</b>               | <b>20</b>   |
| <b>4.3.2.6 Mit normalem Verdichtungsstoß unstetig verlaufende stationäre Strömung . . . . .</b>       | <b>24</b>   |
| <b>4.3.2.7 Anwendungen zur stationären Fadenströmung dichteveränderlicher Fluide . . . . .</b>        | <b>30</b>   |
| <b>4.3.3 Instationäre Fadenströmung eines dichteveränderlichen Fluids . . . . .</b>                   | <b>43</b>   |
| <b>4.3.3.1 Voraussetzungen und Annahmen . . . . .</b>   | <b>43</b>   |
| <b>4.3.3.2 Lineare Theorie der instationären Fadenströmung . . . . .</b>                              | <b>44</b>   |
| <b>4.3.3.3 Anwendungen zur instationären Fadenströmung dichteveränderlicher Fluide . . . . .</b>      | <b>51</b>   |
| <b>4.4 Strömung dichteveränderlicher Fluide (Gase) in Rohrleitungen . . . . .</b>                     | <b>61</b>   |
| <b>4.4.1 Einführung . . . . .</b>   | <b>61</b>   |
| <b>4.4.2 Gasströmung in geradlinig verlaufenden Rohren . . . . .</b>                                  | <b>62</b>   |
| <b>4.4.2.1 Voraussetzungen und Annahmen . . . . .</b>   | <b>62</b>   |
| <b>4.4.2.2 Grundlagen zur Berechnung der Gasströmung in Rohrleitungen . . . . .</b>                   | <b>64</b>   |
| <b>4.4.2.3 Reibungslose Rohrströmung mit Wärmeaustausch (Rayleigh) . . . . .</b>                      | <b>67</b>   |
| <b>4.4.2.4 Reibungsbehaftete Rohrströmung ohne Wärmeaustausch (Fanno) . . . . .</b>                   | <b>73</b>   |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4.2.5 Reibungsbehaftete Rohrströmung bei konstanter Temperatur . . . . .  | 78  |
| 4.4.2.6 Reibungsbedingtes Druckverhalten bei Rohrströmungen eines dichteveränderlichen Fluids . . . . .                       | 80  |
| <b>4.5 Umlenkung stationärer ebener Überschallströmungen durch Wellen und Stöße</b> . . . . .                                 | 81  |
| 4.5.1 Einführung . . . . .  | 81  |
| 4.5.2 Schiefe Störfront . . . . .   | 84  |
| 4.5.2.1 Voraussetzungen und Annahmen . . . . .  | 84  |
| 4.5.2.2 Analogie zum normalen Verdichtungsstoß . . . . .  | 84  |
| 4.5.2.3 Einfluß des Umlenk- und Frontwinkels . . . . .  | 87  |
| 4.5.3 Elementare Strömungsumlenkung bei Überschallanströmung . . . . .  | 88  |
| 4.5.3.1 Schwache Umlenkung bei supersonischer Strömung (lineare Theorie) . . . . .  | 88  |
| 4.5.3.2 Starke stetige Umlenkung (konstante Entropie) . . . . .   | 91  |
| 4.5.3.3 Starke unstetige Umlenkung (schiefer Verdichtungsstoß) . . . . .  | 97  |
| 4.5.3.4 Hypersonische Strömung . . . . .  | 108 |
| Literatur zu Kapitel 4 . . . . .  | 115 |
| <b>5 Drehungsfreie und drehungsbehaftete Strömungen</b> . . . . .   | 119 |
| <b>5.1 Überblick</b> . . . . .  | 119 |
| <b>5.2 Begriffe und Gesetze drehungsfreier und drehungsbehafteter Strömungen</b> . . . . .                                    | 120 |
| 5.2.1 Einführung . . . . .  | 120 |
| 5.2.2 Größen der Wirbelbewegung (Drehbewegung) . . . . .  | 120 |
| 5.2.2.1 Kinematische Begriffe . . . . .   | 120 |
| 5.2.2.2 Zusammenhang von Drehung und Zirkulation (Stokes) . . . . .   | 123 |
| 5.2.2.3 Zusammenhang von Drehung und Entropie (Crocco) . . . . .  | 125 |
| 5.2.3 Wirbelgleichungen der Fluidmechanik . . . . .   | 126 |
| 5.2.3.1 Räumlicher Wirbelerhaltungssatz . . . . .   | 126 |
| 5.2.3.2 Zeitliche Änderung der Drehung . . . . .  | 127 |
| 5.2.3.3 Zeitliche Änderung der Zirkulation . . . . .  | 129 |
| <b>5.3 Drehungsfreie reibungslose Strömungen (Potentialströmungen)</b> . . . . .  | 132 |
| 5.3.1 Voraussetzungen und grundlegende Beziehungen . . . . .  | 132 |
| 5.3.2 Stationäre Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide ohne freie Oberfläche . . . . .                                 | 136 |
| 5.3.2.1 Ausgangsgleichungen . . . . .   | 136 |
| 5.3.2.2 Grundlagen der ebenen Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .  | 137 |
| 5.3.2.3 Lösungsansätze ebener Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .  | 140 |
| 5.3.2.4 Beispiele ebener Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .   | 148 |
| 5.3.2.5 Grundlagen der räumlichen Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .                                      | 165 |
| 5.3.2.6 Beispiele räumlicher Potentialströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .   | 166 |
| 5.3.3 Stationäre Potentialströmungen dichteveränderlicher Fluide . . . . .  | 171 |
| 5.3.3.1 Ausgangsgleichungen . . . . .   | 171 |
| 5.3.3.2 Exakte Lösungen ebener Potentialströmungen dichteveränderlicher Fluide . . . . .                                      | 174 |
| 5.3.3.3 Ebene Potentialströmungen dichteveränderlicher Fluide bei kleiner Störung . . . . .                                   | 177 |
| 5.3.3.4 Lösungsansätze und Ähnlichkeitsregeln ebener linearisierter Potentialströmungen dichteveränderlicher Fluide . . . . . | 181 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.3.5 Räumliche Potentialströmungen dichteveränderlicher Fluide . . . . .                | 196 |
| <b>5.3.4 Instationäre Potentialströmungen mit freier Flüssigkeitsoberfläche</b>            |     |
| (Oberflächenwellen) . . . . .  | 198 |
| 5.3.4.1 Grundlagen und Bestimmungsgleichungen . . . . .                                    | 198 |
| 5.3.4.2 Gerade fortschreitende Oberflächenwellen . . . . .                                 | 202 |
| 5.3.4.3 Überlagerte Oberflächenwellen . . . . .  | 206 |
| 5.3.4.4 Schiffswellen . . . . .  | 207 |
| <b>5.4 Drehungsbehaftete reibungslose Strömungen (Potentialwirbelströmungen)</b> . . . . . | 208 |
| 5.4.1 Voraussetzungen und grundlegende Beziehungen . . . . .                               | 208 |
| 5.4.2 Stationäre Potentialwirbelströmungen dichtebeständiger Fluide . . . . .              | 210 |
| 5.4.2.1 Ausgangsgleichungen (Biot, Savart) . . . . .                                       | 210 |
| 5.4.2.2 Einzelter ebener Potentialwirbel (Stabwirbel) . . . . .                            | 212 |
| 5.4.2.3 Mehrere parallel verlaufende ebene Potentialwirbel<br>(Wirbelsysteme) . . . . .    | 216 |
| 5.4.2.4 Potentialwirbelschichten . . . . .   | 223 |
| 5.4.3 Tragflügeltheorie dichtebeständiger Fluide . . . . .                                 | 228 |
| 5.4.3.1 Grundlagen der Theorie des Auftriebs . . . . .                                     | 228 |
| 5.4.3.2 Tragflügel unendlicher Spannweite (Profiltheorie) . . . . .                        | 231 |
| 5.4.3.3 Tragflügel endlicher Spannweite (räumliche Tragflügeltheorie) .                    | 238 |
| 5.4.3.4 Tragflügelsysteme . . . . .  | 246 |
| 5.4.4 Stationäre Wirbelströmungen dichteveränderlicher Fluide . . . . .                    | 252 |
| 5.4.4.1 Ebener Potentialwirbel . . . . .   | 252 |
| 5.4.4.2 Freie Wirbelschicht . . . . .  | 253 |
| 5.4.4.3 Wirbelfeld hinter einem gekrümmten Verdichtungsstoß . . . . .                      | 254 |
| <b>5.5 Verwandte Probleme der Potentialtheorie</b> . . . . .                               | 256 |
| 5.5.1 Einführung . . . . .   | 256 |
| 5.5.2 Grundsätzliche Erkenntnisse der erweiterten Potentialtheorie . . . . .               | 256 |
| 5.5.2.1 Potentialströmung mit freier Stromlinie . . . . .                                  | 256 |
| 5.5.2.2 Schleichende Potentialströmung (Hele-Shaw) . . . . .                               | 263 |
| 5.5.2.3 Instationäre Wirbelausbreitung in einem viskosen Fluid . . . . .                   | 265 |
| 5.5.3 Sickerströmung durch poröses Medium . . . . .  | 270 |
| 5.5.3.1 Filtergesetz (Darcy) . . . . .   | 270 |
| 5.5.3.2 Sickerströmung als potentialtheoretische Aufgabe . . . . .                         | 272 |
| 5.5.3.3 Grundwasserströmung . . . . .  | 273 |
| Literatur zu Kapitel 5 . . . . .   | 275 |
| <b>6 Grenzschichtströmungen</b> . . . . .  | 281 |
| <b>6.1 Überblick</b> . . . . .   | 281 |
| <b>6.2 Grundzüge der Grenzschicht-Theorie</b> . . . . .                                    | 282 |
| 6.2.1 Einführung . . . . .   | 282 |
| 6.2.2 Begriff der Grenzschicht und ihr grundsätzliches Verhalten . . . . .                 | 283 |
| 6.2.2.1 Strömungsgrenzschicht . . . . .  | 283 |
| 6.2.2.2 Temperaturgrenzschicht . . . . .   | 289 |
| 6.2.2.3 Diffusionsgrenzschicht . . . . .   | 291 |
| 6.2.3 Ausgangsgleichungen der Grenzschicht-Theorie (Prandtl) . . . . .                     | 291 |
| 6.2.3.1 Grundgesetze der Strömung mit Reibungs- und<br>Temperatureinfluß . . . . .         | 291 |
| 6.2.3.2 Formulierung der Grenzschicht-Theorie . . . . .                                    | 293 |
| 6.2.3.3 Stoffgesetze innerhalb der Grenzschicht . . . . .                                  | 296 |
| <b>6.3 Grenzschichtströmung an festen Wänden</b> . . . . .                                 | 297 |
| 6.3.1 Einführung . . . . .   | 297 |

|   |            |
|---|------------|
| 6.3.2 Laminare Grenzschichten an festen Wänden . . . . .  | 297        |
| 6.3.2.1 Grenzschichtgleichungen der laminaren ebenen Scherströmung . . . . .                            | 297        |
| 6.3.2.2 Folgerungen aus den Grenzschichtgleichungen . . . . .   | 303        |
| 6.3.2.3 Laminare Grenzschicht an der längsangeströmten ebenen Platte . . . . .                          | 309        |
| 6.3.2.4 Laminare ebene Grenzschicht mit Druckgradient der Außenströmung . . . . .                       | 323        |
| 6.3.2.5 Laminare Grenzschicht an Körpern mit gekrümmter Oberfläche . . . . .                            | 330        |
| 6.3.3 Turbulente Grenzschichten an festen Wänden . . . . .  | 333        |
| 6.3.3.1 Grenzschichtgleichungen der turbulenten ebenen Scherströmung . . . . .                          | 333        |
| 6.3.3.2 Turbulente Grenzschicht an der längsangeströmten ebenen Platte . . . . .                        | 337        |
| 6.3.3.3 Turbulente ebene Grenzschicht mit Druckgradient der Außenströmung . . . . .                     | 349        |
| 6.3.4 Integralverfahren der Grenzschicht-Theorie . . . . .  | 355        |
| 6.3.4.1 Allgemeines . . . . .   | 355        |
| 6.3.4.2 Integralbeziehungen der Strömungsgrenzschicht . . . . .   | 356        |
| 6.3.4.3 Quadraturverfahren zur Berechnung der Strömungsgrenzschicht bei einem homogenen Fluid . . . . . | 367        |
| 6.3.5 Abgelöste Grenzschicht bei umströmten Körpern . . . . .   | 374        |
| 6.3.5.1 Grundsätzliche Erkenntnisse . . . . .   | 374        |
| 6.3.5.2 Abgelöste Kreiszylinder- und Kugelströmung . . . . .  | 377        |
| 6.3.5.3 Abgelöste Strömung um ein Tragflügelprofil bei großem Anstellwinkel . . . . .                   | 380        |
| 6.3.5.4 Abgelöste Strömung um Körper mit scharfen Kanten . . . . .                                      | 382        |
| <b>6.4 Grenzschichtströmung ohne feste Begrenzung . . . . .</b>   | <b>384</b> |
| 6.4.1 Einführung . . . . .  | 384        |
| 6.4.2 Freie Strömungsgrenzschicht . . . . .   | 385        |
| 6.4.2.1 Reibungsbehaftete Trennungsschicht (ebener Halbstrahl) . . . . .                                | 385        |
| 6.4.2.2 Reibungsbehafteter Freistrahl . . . . .   | 387        |
| 6.4.2.3 Reibungsbehaftete Nachlaufströmung . . . . .  | 390        |
| 6.4.3 Besondere turbulente Scherströmungen . . . . .  | 391        |
| 6.4.3.1 Intermittenz bei turbulenter Strömung . . . . .   | 391        |
| 6.4.3.2 Strahlablenkung durch feste Wand (Coanda-Effekt) . . . . .                                      | 392        |
| <b>Literatur zu Kapitel 6 . . . . .</b>   | <b>394</b> |
| <b>Bibliographie . . . . .</b>  | <b>401</b> |
| <b>Namenverzeichnis . . . . .</b>   | <b>416</b> |
| <b>Sachverzeichnis . . . . .</b>  | <b>419</b> |
| <b>Berichtigungen zu Band 1 . . . . .</b>   | <b>426</b> |