

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Verzeichnis der Tabellen | XVI |
| Bezeichnungen, Dimensionen, Einheiten | XVII |
| 1 Einführung in die Fluidmechanik | 1 |
| 1.1 Überblick | 1 |
| 1.2 Physikalische Eigenschaften und Stoffgrößen der Fluide | 3 |
| 1.2.1 Einführung | 3 |
| 1.2.2 Dichteänderung | 5 |
| 1.2.2.1 Grundsätzliches | 5 |
| 1.2.2.2 Dichte von Fluiden | 6 |
| 1.2.2.3 Schallgeschwindigkeit von Fluiden | 11 |
| 1.2.3 Reibungseinfluß | 12 |
| 1.2.3.1 Grundsätzliches | 12 |
| 1.2.3.2 Normalviskose Fluide (newtonsche Fluide) | 13 |
| 1.2.3.3 Anomalviskose Fluide (nicht-newtonsche Fluide) | 16 |
| 1.2.3.4 Turbulenter Impulstransport (Wirbelviskosität) | 17 |
| 1.2.4 Schwereinfluß | 18 |
| 1.2.4.1 Grundsätzliches | 18 |
| 1.2.4.2 Fallbeschleunigung | 18 |
| 1.2.4.3 Wichte von Fluiden | 18 |
| 1.2.5 Thermodynamisches Verhalten | 19 |
| 1.2.5.1 Grundsätzliches | 19 |
| 1.2.5.2 Wärmekapazität | 19 |
| 1.2.5.3 Energetische Zustandseigenschaften | 20 |
| 1.2.5.4 Wärmeleitung | 24 |
| 1.2.6 Zusammenwirken mehrerer Stoffe und Aggregatzustände | 26 |
| 1.2.6.1 Grundsätzliches | 26 |
| 1.2.6.2 Grenzflächen (Kapillarität) | 26 |
| 1.2.6.3 Hohlraumbildung (Kavitation) | 30 |
| 1.3 Physikalisches Verhalten von Strömungsvorgängen | 30 |
| 1.3.1 Einführung | 30 |
| 1.3.2 Darstellungsmethoden strömender Fluide | 31 |
| 1.3.2.1 Beschreibung von Strömungsvorgängen | 31 |
| 1.3.2.2 Kennzahlen der Fluid- und Thermofluidmechanik | 34 |
| 1.3.2.3 Ähnlichkeitsgesetze der Fluid- und Thermofluidmechanik | 38 |
| 1.3.3 Erscheinungsformen strömender Fluide | 41 |
| 1.3.3.1 Allgemeines | 41 |
| 1.3.3.2 Laminare und turbulente Strömung (Reibungseinfluß) | 41 |
| 1.3.3.3 Strömende und schießende Flüssigkeitsbewegung (Schwereinfluß) | 44 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.3.3.4 | Gasströmung mit Unter- und Überschallgeschwindigkeit (Dichte- einfluß) | 45 |
| | Literatur zu Kapitel 1 | 48 |
| 2 | Grundgesetze der Fluid- und Thermofluidmechanik | 50 |
| 2.1 | Überblick | 50 |
| 2.2 | Ruhende und gleichförmig bewegte Fluide (Statik) | 51 |
| 2.2.1 | Einführung | 51 |
| 2.2.2 | Kräfte im Ruhezustand | 51 |
| 2.2.2.1 | Druckkraft (Oberflächenkraft) | 51 |
| 2.2.2.2 | Massenkraft (Volumenkraft) | 57 |
| 2.2.2.3 | Kräftegleichgewicht ruhender Fluide | 57 |
| 2.2.3 | Mechanik ruhender Fluide | 58 |
| 2.2.3.1 | Statische Energiegleichung der Fluidmechanik | 58 |
| 2.2.3.2 | Hydrostatische Grundgleichung (Euler) | 59 |
| 2.2.3.3 | Niveauflächen | 60 |
| 2.2.3.4 | Statischer und thermischer Auftrieb (Archimedes) | 62 |
| 2.3 | Bewegungszustand (Kinematik) | 64 |
| 2.3.1 | Einführung | 64 |
| 2.3.2 | Größen der Bewegung | 64 |
| 2.3.2.1 | Geschwindigkeitsfeld | 64 |
| 2.3.2.2 | Kinematische Begriffe zur Beschreibung des Strömungsverlaufs .. | 67 |
| 2.3.2.3 | Beschleunigungsfeld | 71 |
| 2.3.3 | Kinematisches Verhalten eines Fluidelements | 76 |
| 2.3.3.1 | Gradiententensor des Geschwindigkeitsfelds | 76 |
| 2.3.3.2 | Drehung eines Fluidelements | 77 |
| 2.3.3.3 | Verformung eines Fluidelements | 79 |
| 2.3.3.4 | Anwendungen | 81 |
| 2.3.4 | Transportgleichungen der Fluid- und Thermofluidmechanik | 82 |
| 2.3.4.1 | Physikalische Größen und Eigenschaften | 82 |
| 2.3.4.2 | Transportgleichung für die Feldgröße | 83 |
| 2.3.4.3 | Transportgleichung für die Volumeneigenschaft | 84 |
| 2.4 | Massenerhaltungssatz (Kontinuität) | 87 |
| 2.4.1 | Einführung | 87 |
| 2.4.2 | Kontinuitätsgleichungen | 88 |
| 2.4.2.1 | Kontinuitätsgleichung für den Kontrollraum | 88 |
| 2.4.2.2 | Kontinuitätsgleichung für den Kontrollfaden | 90 |
| 2.4.2.3 | Kontinuitätsgleichung für das Fluidelement | 91 |
| 2.4.3 | Einführen der Stromfunktion | 93 |
| 2.4.3.1 | Vektorielle Stromfunktion | 93 |
| 2.4.3.2 | Zweidimensionale Strömung | 93 |
| 2.4.3.3 | Volumen- und Massenstrom | 95 |
| 2.5 | Impulssatz (Kinetik) | 95 |
| 2.5.1 | Einführung | 95 |
| 2.5.2 | Impulsleichungen | 97 |
| 2.5.2.1 | Impulsleichung für den Kontrollraum | 97 |
| 2.5.2.2 | Impulsleichung für den Kontrollfaden | 104 |
| 2.5.2.3 | Impulsmomentengleichung | 106 |
| 2.5.3 | Bewegungsgleichungen (Impulsleichung für das Fluidelement) | 109 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 2.5.3.1 | Ausgangsgleichung | 109 |
| 2.5.3.2 | Bewegungsgleichung der reibungslosen Strömung (Euler, Bernoulli) | 110 |
| 2.5.3.3 | Bewegungsgleichung der laminaren Strömung normalviskoser Fluide (Navier, Stokes) | 119 |
| 2.5.3.4 | Bewegungsgleichung der schleichenden Strömung normalviskoser Fluide (Stokes, Oseen) | 133 |
| 2.5.3.5 | Bewegungsgleichung der turbulenten Strömung normalviskoser Fluide (Reynolds) | 134 |
| 2.5.3.6 | Über die Entstehung der Turbulenz | 147 |
| 2.6 | Energiesatz (Energetik) | 150 |
| 2.6.1 | Einführung | 150 |
| 2.6.2 | Energiegleichungen der Fluid- und Thermofluidmechanik | 154 |
| 2.6.2.1 | Energiegleichungen für das mitbewegte Systemvolumen | 154 |
| 2.6.2.2 | Energiegleichungen für den Kontrollraum | 155 |
| 2.6.2.3 | Energiegleichungen für den Kontrollfaden | 161 |
| 2.6.2.4 | Energiegleichungen für das Fluidelement | 163 |
| 2.6.3 | Wärmetransportgleichung | 165 |
| 2.6.3.1 | Energieumwandlung | 165 |
| 2.6.3.2 | Energien und Arbeiten | 166 |
| 2.6.3.3 | Wärmetransportgleichung bei laminarer Strömung | 170 |
| 2.6.4 | Entropiegleichung | 172 |
| 2.6.4.1 | Reversible und irreversible Prozesse | 172 |
| 2.6.4.2 | Entropiegleichung für den Kontrollraum | 175 |
| 2.6.4.3 | Entropiegleichung für das Fluidelement | 177 |
| 2.6.5 | Energiegleichungen bei turbulenter Strömung | 179 |
| 2.6.5.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 179 |
| 2.6.5.2 | Energiegleichung der Fluidmechanik bei turbulenter Strömung | 179 |
| 2.6.5.3 | Wärmetransportgleichung bei turbulenter Strömung | 182 |
| | Literatur zu Kapitel 2 | 183 |
| 3 | Elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide | 186 |
| 3.1 | Überblick | 186 |
| 3.2 | Dichtebeständige Fluide im Ruhezustand (Hydrostatik) | 186 |
| 3.2.1 | Ausgangsgleichungen | 186 |
| 3.2.2 | Flüssigkeitsdruck auf feste Begrenzungsfläche | 187 |
| 3.2.2.1 | Druckkraft auf ebene Fläche | 187 |
| 3.2.2.2 | Druckkraft auf gekrümmte Fläche | 189 |
| 3.2.2.3 | Schwimmender Körper | 190 |
| 3.2.3 | Druck auf freie Oberfläche | 193 |
| 3.2.3.1 | Kommunizierendes Gefäß | 193 |
| 3.2.3.2 | Flüssigkeitsmanometer | 193 |
| 3.2.3.3 | Kapillarrohr | 194 |
| 3.3 | Stromfadentheorie dichtebeständiger Fluide | 195 |
| 3.3.1 | Einführung | 195 |
| 3.3.2 | Stationäre Fadenströmung eines dichtebeständigen Fluids | 195 |
| 3.3.2.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 195 |
| 3.3.2.2 | Ausgangsgleichungen der stationären Fadenströmung | 196 |
| 3.3.2.3 | Anwendungen zur stationären Fadenströmung | 200 |
| 3.3.3 | Instationäre Fadenströmung eines dichtebeständigen Fluids | 208 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.3.3.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 208 |
| 3.3.3.2 | Ausgangsgleichungen der instationären Fadenströmung | 208 |
| 3.3.3.3 | Anwendungen zur instationären Fadenströmung | 210 |
| 3.4 | Strömung dichtebeständiger Fluide in Rohrleitungen (Rohrhydraulik) | 217 |
| 3.4.1 | Einführung | 217 |
| 3.4.2 | Grundlagen der Rohrhydraulik | 219 |
| 3.4.2.1 | Über Strömungsquerschnitt gemittelte Strömungsgrößen | 219 |
| 3.4.2.2 | Fluidmechanischer Energieverlust | 221 |
| 3.4.2.3 | Ausgangsgleichungen der Rohrhydraulik | 222 |
| 3.4.3 | Strömung dichtebeständiger Fluide in geradlinig verlaufenden langen Rohren | 226 |
| 3.4.3.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 226 |
| 3.4.3.2 | Vollausgebildete Rohrströmung | 227 |
| 3.4.3.3 | Vollausgebildete laminare Rohrströmung | 233 |
| 3.4.3.4 | Vollausgebildete turbulente Strömung durch glattes Rohr | 236 |
| 3.4.3.5 | Vollausgebildete turbulente Strömung durch rauhes Rohr | 244 |
| 3.4.3.6 | Rohreinlaufströmung | 251 |
| 3.4.4 | Strömung durch Rohrverbindungen und Rohrleitungselemente | 256 |
| 3.4.4.1 | Allgemeines | 256 |
| 3.4.4.2 | Rohrquerschnittsänderung (Erweiterung, Verengung) | 257 |
| 3.4.4.3 | Rohrrichtungsänderung (Stromumlenkung) | 267 |
| 3.4.4.4 | Rohrverzweigung (Trennung, Vereinigung) | 272 |
| 3.4.4.5 | Einbau einer Strömungsmaschine (Turbine, Pumpe) | 279 |
| 3.4.5 | Aufgaben der Rohrhydraulik | 280 |
| 3.4.5.1 | Ausgangsgleichungen | 280 |
| 3.4.5.2 | Stationäre Rohrströmung dichtebeständiger Fluide | 281 |
| 3.4.5.3 | Instationäre Rohrströmung dichtebeständiger Fluide | 283 |
| 3.5 | Strömung in offenen Gerinnen (Gerinnehydraulik) | 291 |
| 3.5.1 | Einführung | 291 |
| 3.5.2 | Grundlegende Erkenntnisse | 293 |
| 3.5.2.1 | Begriffe der Gerinnehydraulik | 293 |
| 3.5.2.2 | Fließzustand und Grenzverhalten | 296 |
| 3.5.2.3 | Druckverteilung in einem Gerinnequerschnitt | 300 |
| 3.5.3 | Gleichförmige Strömung in geradlinig verlaufenden Gerinnen | 302 |
| 3.5.3.1 | Voraussetzungen und Ausgangsgleichungen | 302 |
| 3.5.3.2 | Gleichförmige laminare Gerinneströmung | 304 |
| 3.5.3.3 | Gleichförmige turbulente Gerinneströmung | 306 |
| 3.5.4 | Ungleichförmige Strömung in geradlinig verlaufenden Gerinnen | 308 |
| 3.5.4.1 | Voraussetzungen und Ausgangsgleichungen | 308 |
| 3.5.4.2 | Lage des Flüssigkeitsspiegels (Wasserspiegel) | 309 |
| 3.5.4.3 | Wechselsprung (Wassersprung) | 313 |
| 3.5.5 | Sonstige Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen | 316 |
| 3.5.5.1 | Überfallströmung und Abfluß unter einer Schütze | 316 |
| 3.5.5.2 | Gerinneströmung bei Querschnitts- und Richtungsänderung | 320 |
| 3.5.5.3 | Instationäre Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen | 320 |
| 3.6 | Mehrdimensionale stationäre Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide | 321 |
| 3.6.1 | Voraussetzungen und Ausgangsgleichungen | 321 |
| 3.6.2 | Reibungslose zweidimensionale Strömung dichtebeständiger Fluide | 324 |
| 3.6.2.1 | Theorie des Auftriebs angeströmter ebener Körper | 324 |
| 3.6.2.2 | Strahlkraft auf angeströmte und durchströmte Körper | 330 |
| 3.6.2.3 | Quellströmung eines dichtebeständigen Fluids | 339 |
| 3.6.3 | Reibungsbehaftete mehrdimensionale Strömungen dichtebeständiger Fluide | 341 |

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | XV |
| 3.6.3.1 Ermittlung des Reibungswiderstands eines Körpers aus dem Impulsverlust hinter dem Körper (Nachlauf) | 341 |
| 3.6.3.2 Theorie der hydromechanischen Schmiermittelreibung | 347 |
| Literatur zu Kapitel 3 | 349 |
| Sachverzeichnis | 355 |

Band II
Elementare Strömungsvorgänge dichteänderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen

| | |
|---|--|
| 4 Elementare Strömungsvorgänge dichteänderlicher Fluide | |
| 5 Drehungsfreie und drehungsbehaftete Strömungen | |
| 6 Grenzschichtströmungen | |
| Bibliographie | |
| Sachverzeichnis | |