

# Inhalt

## Vorwort — V

- 1 Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen — 1**
  - LE 1.1 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 1) — 1
  - LE 1.2 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 2) — 4
  - LE 1.3 Fluide — 7
  - LE 1.4 Extensive und intensive Größen — 11
  - LE 1.5 Der Druck — 17
  - LE 1.6 Die thermische Zustandsgleichung — 20
  - LE 1.7 Die Zähigkeit — 23
  - LE 1.8 Nicht-newtonsche Fluide — 27
  - LE 1.9 Die Grenzflächenspannung (Teil 1) — 34
  - LE 1.10 Die Grenzflächenspannung (Teil 2) — 37
  
- 2 Hydrostatik — 41**
  - LE 2.1 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik — 41
  - LE 2.2 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik bei barotroper Schichtung — 46
  - LE 2.3 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik für inkompressible Fluide — 50
  - LE 2.4 Kräfte auf Behälterwände — 55
  - LE 2.5 Die Vertikalkraft — 57
  - LE 2.6 Die Horizontalkraft — 59
  - LE 2.7 Der hydrostatische Auftrieb — 63
  
- 3 Kinematik — 67**
  - LE 3.1 Lagrangesche und Eulersche Darstellung — 67
  - LE 3.2 Transporttheorem, Geschwindigkeit, Beschleunigung — 70
  - LE 3.3 Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien — 73
  - LE 3.4 Die Kontinuitätsgleichung (Teil 1) — 78
  - LE 3.5 Die Kontinuitätsgleichung (Teil 2) — 83
  
- 4 Eulersche und Bernoullische Gleichung — 89**
  - LE 4.1 Der Impulssatz — 89
  - LE 4.2 Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten. Die radiale Druckgleichung — 94

- LE 4.3 Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 1) — 97
- LE 4.4 Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 2) — 106

**5 Rohrhydraulik und numerische Simulationen — 113**

- LE 5.1 Die Rohrströmung — 113
- LE 5.2 Die Bernoullische Gleichung mit Strömungsverlusten und Energiezufuhr — 118
- LE 5.3 Druckverluste durch Reibung — 120
- LE 5.4 Druckverluste durch Einbauten (Teil 1) — 124
- LE 5.5 Druckverluste durch Einbauten (Teil 2) — 128
- LE 5.6 Rohrleitungsberechnung — 132
- LE 5.7 Strömungslehre lernen mittels CFD — 136

**6 Impulssatz und Drehimpulssatz — 143**

- LE 6.1 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 1) — 143
- LE 6.2 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 2) — 149
- LE 6.3 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 3) — 155
- LE 6.4 Der Drehimpulssatz — 161
- LE 6.5 Die Eulersche Strömungsmaschinenhauptgleichung — 164

**7 Gasdynamik — 175**

- LE 7.1 Der Energiesatz für ein materielles Volumen — 175
- LE 7.2 Der Energiesatz für einen Stromfaden — 178
- LE 7.3 Gibbssche Gleichung und Entropieungleichung — 183
- LE 7.4 Ideale Gase. Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase — 189
- LE 7.5 Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung — 194
- LE 7.6 Die Bernoullische Gleichung für ein ideales Gas — 198
- LE 7.7 Isentrope stationäre Stromfadentheorie — 202
- LE 7.8 Die Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung — 205
- LE 7.9 Die Durchflussfunktion — 208
- LE 7.10 Der senkrechte Verdichtungsstoß — 210
- LE 7.11 Der schiefe Verdichtungsstoß — 215
- LE 7.12 Die Lavaldüse — 219
- LE 7.13 Thermodynamische Wirkungsgrade — 221

**8 Die Navier-Stokessche Gleichung — 226**

- LE 8.1 Der Spannungstensor — 226
- LE 8.2 Der allgemeine Newtonsche Schubspannungsansatz — 230

- LE 8.3 Die Navier-Stokessche Gleichung — 234
- LE 8.4 Lösungen der Navier-Stokesschen Gleichung — 238
- LE 8.5 Näherungsgleichungen — 245
- LE 8.6 Schleichströmungen — 248
- 9 Ebene und wirbelfreie Strömungen — 254**
- LE 9.1 Wirbelstärke und Zirkulation — 254
- LE 9.2 Ebene Strömungen — 258
- LE 9.3 Wirbelfreie Strömungen (Potentialströmungen) — 262
- LE 9.4 Die Grundgleichungen für ebene Potentialströmungen — 267
- LE 9.5 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 1) — 268
- LE 9.6 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 2) — 274
- LE 9.7 Die Umströmung eines Kreiszyinders — 279
- LE 9.8 Die Methode der konformen Abbildung — 285
- LE 9.9 Kräfte auf umströmte Körper — 290
- LE 9.10 Rotationssymmetrische Potentialströmungen — 294
- LE 9.11 Die Singularitätenmethode — 298
- 10 Wirbelströmungen — 302**
- LE 10.1 Das Biot-Savartsche Gesetz — 302
- LE 10.2 Die ebene Wirbelschicht — 310
- LE 10.3 Der Thomsonsche Satz — 314
- LE 10.4 Die Helmholtzschen Wirbelsätze — 317
- LE 10.5 Rankinewirbel und Hamel-Oseen-Wirbel — 320
- LE 10.6 Die Umströmung eines Tragflügels endlicher Spannweite — 323
- 11 Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitslehre — 331**
- LE 11.1 Dimensionsanalyse — 332
- LE 11.2 Ähnlichkeitslehre — 340
- 12 Grenzschichttheorie — 349**
- LE 12.1 Grenzschichten — 350
- LE 12.2 Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 1) — 354
- LE 12.3 Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 2) — 363
- LE 12.4 Grenzschichtdicken — 369
- LE 12.5 Wandschubspannung und Reibungswiderstand — 375
- LE 12.6 Die Plattenströmung — 378
- 13 Turbulente Strömungen — 383**
- LE 13.1 Laminare, periodische und turbulente Strömungen — 383

- LE 13.2 Die Reynoldssche Gleichung — **386**
- LE 13.3 Wirbelzähigkeit, Mischungswegansatz, Ähnlichkeitshypothese — **393**
- LE 13.4 Turbulente Wandgrenzschichten — **396**
- LE 13.5 Die turbulente Rohrströmung — **403**
- LE 13.6 Die turbulente Plattenströmung — **410**
- LE 13.7 Turbulenzmodelle für die numerische Simulation — **415**

**14 Umströmung von Körpern — 420**

- LE 14.1 Kräfte auf umströmte Körper — **420**
- LE 14.2 Der Widerstandsbeiwert von Kreisscheibe, Kugel und Zylinder — **424**
- LE 14.3 Körper geringsten Widerstandes — **430**
- LE 14.4 Der hydrodynamische Auftrieb eines Tragflügels — **431**
- LE 14.5 Bauwerksaerodynamik — **432**
- LE 14.6 Windkanaleinbauten — **434**

**15 Strömungsmesstechnik — 439**

- LE 15.1 Das Pitotrohr — **439**
- LE 15.2 Die (statische) Drucksonde — **442**
- LE 15.3 Das Prandtl'sche Staurohr — **444**
- LE 15.4 Hitzdrahtanemometrie — **445**
- LE 15.5 Laser-Doppler-Anemometry — **447**
- LE 15.6 Particle-Image-Velocimetry — **449**
- LE 15.7 Volumenstrommessung — **449**
- LE 15.8 Viskosimetrie — **459**

**Feedback — 463**

- FB 1.1 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 1) — **463**
- FB 1.2 Feste Körper, Flüssigkeiten, Gase (Teil 2) — **463**
- FB 1.3 Fluide — **464**
- FB 1.4 Extensive und intensive Größen — **464**
- FB 1.5 Der Druck — **465**
- FB 1.6 Die thermische Zustandsgleichung — **466**
- FB 1.7 Die Zähigkeit — **466**
- FB 1.8 Nicht-newtonsche Fluide — **468**
- FB 1.9 Die Grenzflächenspannung (Teil 1) — **470**
- FB 1.10 Die Grenzflächenspannung (Teil 2) — **470**
- FB 2.1 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik — **471**

- FB 2.2 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik bei barotroper Schichtung — **473**
- FB 2.3 Das Eulersche Grundgesetz der Hydrostatik für inkompressible Fluide — **475**
- FB 2.4 Kräfte auf Behälterwände — **476**
- FB 2.5 Die Vertikalkraft — **477**
- FB 2.6 Die Horizontalkraft — **478**
- FB 2.7 Der hydrostatische Auftrieb — **480**
- FB 3.1 Lagrangesche und Eulersche Darstellung — **482**
- FB 3.2 Transportgleichung, Geschwindigkeit, Beschleunigung — **483**
- FB 3.3 Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien — **483**
- FB 3.4 Die Kontinuitätsgleichung (Teil 1) — **488**
- FB 3.5 Die Kontinuitätsgleichung (Teil 2) — **489**
- FB 4.1 Der Impulssatz — **489**
- FB 4.2 Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnlinienkoordinaten. Die radiale Druckgleichung — **490**
- FB 4.3 Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 1) — **491**
- FB 4.4 Die Bernoullische Gleichung für inkompressible Fluide (Teil 2) — **495**
- FB 5.1 Die Rohrströmung — **497**
- FB 5.2 Die Bernoullische Gleichung mit Strömungsverlusten und Energiezufuhr — **497**
- FB 5.3 Druckverluste durch Reibung — **498**
- FB 5.4 Druckverluste durch Einbauten (Teil 1) — **499**
- FB 5.5 Druckverluste durch Einbauten (Teil 2) — **501**
- FB 5.6 Rohrleitungsberechnung — **501**
- FB 6.1 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 1) — **502**
- FB 6.2 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 2) — **504**
- FB 6.3 Der Impulssatz für einen Stromfaden (Teil 3) — **506**
- FB 6.4 Der Drehimpulssatz — **507**
- FB 6.5 Die Eulersche Strömungsmaschinenhauptgleichung — **509**
- FB 7.1 Der Energiesatz für ein materielles Volumen — **511**
- FB 7.2 Der Energiesatz für einen Stromfaden — **512**
- FB 7.3 Gibbssche Gleichung und Entropieungleichung — **513**
- FB 7.4 Ideale Gase. Die Strömungsberechnung für reibungsfreie ideale Gase — **515**
- FB 7.5 Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung — **516**
- FB 7.6 Die Bernoullische Gleichung für ein ideales Gas — **517**
- FB 7.7 Isentrope stationäre Stromfadentheorie — **518**

- FB 7.8 Die Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung — 519
- FB 7.9 Die Durchflussfunktion — 521
- FB 7.10 Der senkrechte Verdichtungsstoß — 521
- FB 7.11 Der schiefe Verdichtungsstoß — 524
- FB 7.12 Die Lavaldüse — 524
- FB 7.13 Thermodynamische Wirkungsgrade — 526
- FB 8.1 Der Spannungstensor — 527
- FB 8.2 Der allgemeine Newtonsche Schubspannungsansatz — 528
- FB 8.3 Die Navier-Stokessche Gleichung — 529
- FB 8.4 Lösungen der Navier-Stokesschen Gleichung — 532
- FB 8.5 Näherungsgleichungen — 538
- FB 8.6 Schleichströmungen — 539
- FB 9.1 Wirbelstärke und Zirkulation — 539
- FB 9.2 Ebene Strömungen — 541
- FB 9.3 Wirbelfreie Strömungen (Potentialströmungen) — 542
- FB 9.4 Die Grundgleichungen für ebene Potentialströmungen — 544
- FB 9.5 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 1) — 545
- FB 9.6 Anwendung der Funktionentheorie (Teil 2) — 549
- FB 9.7 Die Umströmung eines Kreiszyinders — 550
- FB 9.8 Die Methode der konformen Abbildung — 552
- FB 9.9 Kräfte auf umströmte Körper — 555
- FB 9.10 Rotationssymmetrische Potentialströmungen — 556
- FB 9.11 Die Singularitätenmethode — 558
- FB 10.1 Das Biot-Savartsche Gesetz — 559
- FB 10.2 Die ebene Wirbelschicht — 565
- FB 10.3 Der Thomsonsche Satz — 565
- FB 10.4 Die Helmholtzschen Wirbelsätze — 566
- FB 10.5 Rankinewirbel und Hamel-Oseen-Wirbel — 566
- FB 10.6 Die Umströmung eines Tragflügels endlicher Spannweite — 567
- FB 11.1 Dimensionsanalyse — 568
- FB 11.2 Ähnlichkeitslehre — 571
- FB 12.1 Grenzschichten — 572
- FB 12.2 Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 1) — 573
- FB 12.3 Die Prandtlschen Grenzschichtgleichungen (Teil 2) — 574
- FB 12.4 Grenzschichtdicken — 575
- FB 12.5 Wandschubspannung und Reibungswiderstand — 576
- FB 12.6 Die Plattenströmung — 576
- FB 13.1 Laminare, periodische und turbulente Strömungen — 578
- FB 13.2 Die Reynoldssche Gleichung — 578

- FB 13.3 Wirbelzähigkeitsansatz, Mischungswegansatz, Ähnlichkeitshypothese — 579
- FB 13.4 Turbulente Wandgrenzschichten — 580
- FB 13.5 Die turbulente Rohrströmung — 581
- FB 13.6 Die turbulente Plattenströmung — 582
- FB 14.1 Kräfte auf umströmte Körper — 584
- FB 14.2 Der Widerstandsbeiwert von Kreisscheibe, Kugel und Zylinder — 585
- FB 14.3 Körper geringsten Widerstandes — 586
- FB 14.4 Bauwerksaerodynamik — 586
- FB 14.5 Windkanaleinbauten — 587
- FB 15.1 Das Pitotrohr — 588
- FB 15.2 Die (statische) Drucksonde — 589
- FB 15.3 Das Prandtl'sche Staurohr — 589
- FB 15.4 Hitzdrahtanemometrie — 590
- FB 15.5 Laser-Doppler-Anemometry — 590
- FB 15.6 Particle-Image-Velocimetry — 591
- FB 15.7 Volumenstrommessung — 591
- FB 15.8 Viskosimetrie — 592

## Anhang — 593

- 1 Zum Rechnen mit Tensoren — 593
- 1.1 Die Einsteinsche Summationskonvention — 593
- 1.2 Punkte, Vektoren, Tensoren — 594
- 1.3 Symbolische und Koordinatenschreibweise — 596
- 1.4 Gleichheit, Addition und Subtraktion von Tensoren. Transponierte, symmetrische und antimetrische Tensoren — 596
- 1.5  $\delta$ -Tensor und  $\epsilon$ -Tensor. Isotrope Tensoren — 598
- 1.6 Die tensorielle Multiplikation von Tensoren — 599
- 1.7 Die skalare Multiplikation von Tensoren — 601
- 1.8 Die vektorielle Multiplikation von Tensoren — 604
- 1.9 Gradient, vollständiges Differential — 604
- 1.10 Divergenz, Rotation, Laplace-Operator — 606
- 1.11 Normalenvektor und Flächenvektor eines Flächenelements — 609
- 1.12 Integrale von Tensorfeldern — 610
- 1.13 Gaußscher und Stokesscher Satz — 611
- 1.14 Zylinderkoordinaten — 613
- 2 Kurven im Raum — 616
- 3 Wiederholungen aus der Funktionentheorie — 617
- 4 Tabellen und Diagramme — 620

**XIV — Inhalt**

**Literaturverzeichnis zu den Tabellen — 630**

5           **Weiterführende Literatur — 631**

6           **Symbolverzeichnis — 635**

**Namen- und Sachverzeichnis — 641**