

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Allgemeine strömungstechnische Grundlagen . . . . .</b>             | <b>1</b>  |
| 1.1 Absolute und relative Strömung . . . . .                             | 1         |
| 1.2 Erhaltungssätze . . . . .  | 2         |
| 1.2.1 Erhaltung der Masse . . . . .                                      | 2         |
| 1.2.2 Erhaltung der Energie . . . . .                                    | 3         |
| 1.2.3 Erhaltung der Bewegungsgröße . . . . .                             | 5         |
| 1.3 Grenzschichten, Grenzschichtbeeinflussung . . . . .                  | 7         |
| 1.4 Strömung auf gekrümmten Bahnen . . . . .                             | 11        |
| 1.4.1 Kräftegleichgewicht . . . . .                                      | 11        |
| 1.4.2 Erzwungene und freie Wirbel . . . . .                              | 15        |
| 1.4.3 Strömung in gekrümmten Kanälen . . . . .                           | 17        |
| 1.5 Strömungsverluste . . . . .  | 19        |
| 1.5.1 Berechnung von Reibungsverlusten . . . . .                         | 19        |
| 1.5.2 Rauheitseinfluss auf die Reibungsverluste . . . . .                | 22        |
| 1.5.3 Verwirbelungsverluste . . . . .                                    | 26        |
| 1.6 Diffusoren . . . . .   | 28        |
| 1.7 Fluidstrahlen . . . . .  | 34        |
| 1.8 Ausgleich ungleichförmiger Geschwindigkeitsprofile . . . . .         | 35        |
| 1.9 Strömungsverteilung in Parallelsträngen. Rohrleitungsnetze . . . . . | 38        |
| Literatur . . . . .  | 42        |
| <b>2 Bauarten und Leistungsdaten . . . . .</b>                           | <b>43</b> |
| 2.1 Wirkungsweise und Aufbau . . . . .                                   | 43        |
| 2.2 Leistungsdaten . . . . .   | 47        |
| 2.2.1 Spezifische Förderarbeit, Förderhöhe . . . . .                     | 47        |
| 2.2.2 Netto-Energiehöhe im Saugstutzen, NPSH . . . . .                   | 48        |
| 2.2.3 Leistung und Wirkungsgrad . . . . .                                | 50        |
| 2.2.4 Kennlinien . . . . .   | 51        |
| 2.3 Pumpentypen und ihre Anwendung . . . . .                             | 51        |
| 2.3.1 Übersicht . . . . .  | 51        |
| 2.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten und Einsatzgebiete . . . . .         | 54        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.3.3 Bauarten . . . . .   | 56         |
| 2.3.4 Sonderbauarten . . . . .   | 72         |
| Literatur . . . . .  | 77         |
| <b>3 Grundlagen der hydraulischen Berechnung . . . . .</b>                                   | <b>79</b>  |
| 3.1 Berechnung nach Stromfadentheorie . . . . .  | 79         |
| 3.2 Energieübertragung im Laufrad: Spezifische Förderarbeit, Förderhöhe . . . . .            | 83         |
| 3.3 Die Strömungsumlenkung durch die Schaufeln, Abströmbeiwert und Minderumlenkung . . . . . | 86         |
| 3.4 Dimensionslose Kennzahlen, Ähnlichkeitsgesetze, Spezifische Drehzahl . . . . .           | 90         |
| 3.5 Leistungsbilanz und Wirkungsgrade . . . . .  | 94         |
| 3.6 Berechnung der Nebenverluste . . . . .   | 95         |
| 3.6.1 Radreibungsverluste . . . . .  | 96         |
| 3.6.2 Leckverluste axial durchströmter Dichtspalte . . . . .                                 | 100        |
| 3.6.3 Leistungsverlust der Zwischenstufendichtung . . . . .                                  | 108        |
| 3.6.4 Leckverluste radial oder diagonal durchströmter Dichtspalte . . . . .                  | 109        |
| 3.6.5 Spaltverluste an offenen Laufrädern . . . . .  | 109        |
| 3.6.6 Mechanische Verlustleistung . . . . .  | 111        |
| 3.7 Grundsätzliches zur Berechnung der Leitvorrichtung . . . . .                             | 112        |
| 3.8 Hydraulische Verluste . . . . .  | 118        |
| 3.9 Statistische Angaben über Druckzahlen, Wirkungsgrade und Verluste . . . . .              | 125        |
| 3.10 Einfluß der Rauheit und der Reynolds-Zahl . . . . .                                     | 133        |
| 3.10.1 Übersicht . . . . .   | 133        |
| 3.10.2 Wirkungsgradaufwertung . . . . .  | 134        |
| 3.10.3 Wirkungsgradberechnung aus Verlustanalysen . . . . .                                  | 136        |
| 3.11 Hinweise zur Verlustminimierung . . . . .   | 142        |
| 3.12 Berechnungstafeln . . . . .   | 143        |
| Literatur . . . . .  | 158        |
| <b>4 Kennlinien . . . . .</b>  | <b>161</b> |
| 4.1 Drosselkurve und Leistungsaufnahme . . . . .   | 162        |
| 4.1.1 Die theoretische Kennlinie (ohne Strömungsverluste) . . . . .                          | 162        |
| 4.1.2 Die reale Kennlinie mit Strömungsverlusten . . . . .                                   | 164        |
| 4.1.3 Komponentenkennlinien . . . . .  | 167        |
| 4.1.4 Förderhöhe und Leistungsaufnahme beim Betrieb gegen geschlossenen Schieber . . . . .   | 175        |
| 4.1.5 Einfluß der Pumpengröße und der Drehzahl . . . . .                                     | 178        |
| 4.1.6 Einfluß der spezifischen Drehzahl auf die Kennlinienform . . . . .                     | 178        |
| 4.2 Bestpunktllage . . . . .   | 179        |
| 4.3 Vorausbestimmung der Kennlinie . . . . .   | 184        |
| 4.4 Kennfelder . . . . .   | 185        |
| 4.5 Anpassen der Kennlinie . . . . .   | 188        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.5.1    | Abdrehen des Laufrades . . . . .   | 189        |
| 4.5.2    | Zuschärfung der Schaufeln am Laufradaustritt . . . . .   | 195        |
| 4.5.3    | Änderungen am Leitapparat . . . . .  | 196        |
| 4.6      | Analyse von Kennlinienabweichungen und Leistungsdefiziten . . . . .                                      | 197        |
| 4.7      | Berechnung von Kennlinienänderungen . . . . .  | 203        |
|          | Literatur . . . . .  | 205        |
| <b>5</b> | <b>Teillastverhalten. 3-dimensionale Strömungsvorgänge und ihre Wirkung auf die Kennlinien . . . . .</b> | <b>207</b> |
| 5.1      | Grundsätzliche Überlegungen . . . . .  | 208        |
| 5.2      | Die Strömung im Laufrad . . . . .  | 211        |
| 5.2.1    | Übersicht . . . . .  | 211        |
| 5.2.2    | Physikalische Mechanismen . . . . .  | 213        |
| 5.2.3    | Zusammenwirken der verschiedenen Mechanismen . . . . .   | 219        |
| 5.2.4    | Rückströmung am Laufradeintritt . . . . .  | 221        |
| 5.2.5    | Die Strömung am Laufradaustritt . . . . .  | 228        |
| 5.2.6    | Meßtechnische Erkennung des Rückströmbeginns . . . . .   | 229        |
| 5.3      | Die Strömung in der Leitvorrichtung . . . . .  | 231        |
| 5.3.1    | Strömungsablösung im Leitrad . . . . .   | 231        |
| 5.3.2    | Der Druckrückgewinn im Leitrad . . . . .   | 234        |
| 5.3.3    | Einfluß der Anströmung auf Druckrückgewinn und Ablösung . . . . .  | 235        |
| 5.3.4    | Die Strömung in Spiralgehäusen . . . . .   | 237        |
| 5.3.5    | Die Strömung in Ringgehäusen und Leitringen . . . . .  | 238        |
| 5.4      | Auswirkungen der Rückströmung . . . . .  | 239        |
| 5.4.1    | Auswirkung der Rückströmung am Laufradeintritt . . . . .   | 239        |
| 5.4.2    | Auswirkung der Rückströmung am Laufradaustritt . . . . .   | 244        |
| 5.4.3    | Auswirkung auf Radseitenraumströmung und Axialschub . . . . .  | 251        |
| 5.4.4    | Schädliche Auswirkungen der Teillastrezirkulation . . . . .  | 253        |
| 5.5      | Einfluß von Ablösung und Rezirkulation auf die Kennlinie . . . . .                                       | 254        |
| 5.5.1    | Arten von Kennlinieninstabilität . . . . .   | 254        |
| 5.5.2    | Kennlinien mit Sattel (Instabilitäten vom Typ S) . . . . .   | 255        |
| 5.5.3    | Instabilitäten vom Typ F . . . . .   | 264        |
| 5.6      | Maßnahmen zur Beeinflussung der Kennlinienform . . . . .   | 264        |
| 5.6.1    | Einführung . . . . .   | 264        |
| 5.6.2    | Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradeintritt . . . . .                                     | 265        |
| 5.6.3    | Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradaustritt . . . . .                                     | 266        |
| 5.6.4    | Beseitigung einer Instabilität vom Typ F . . . . .   | 266        |
| 5.6.5    | Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q < 50$ . . . . .                           | 268        |
| 5.6.6    | Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q > 50$ . . . . .                           | 272        |
| 5.6.7    | Beeinflussung der Instabilität der Halbaxial- und Axialräder . . . . .                                   | 272        |
| 5.6.8    | Reduktion von Förderhöhe und Leistung bei Nullförderung . . . . .  | 274        |
| 5.7      | Zur Strömung in offenen Axialrädern . . . . .  | 275        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.8      | Strömungsinstabilitäten bei doppelflutigen Laufrädern und Doppelspiralen .....                                | 283        |
|          | Literatur .....   | 286        |
| <b>6</b> | <b>Saugverhalten und Kavitation .....</b>   | <b>291</b> |
| 6.1      | Physikalische Grundlagen .....  | 291        |
| 6.1.1    | Entstehung und Implosion von Dampfblasen in einer Strömung ..   | 291        |
| 6.1.2    | Blasendynamik .....   | 294        |
| 6.2      | Kavitation in Laufrad und Leitrad .....   | 297        |
| 6.2.1    | Druckverteilung und Blasenfeld .....  | 297        |
| 6.2.2    | Erforderlicher NPSH-Wert. Ausmaß der Kavitation.<br>Kavitationskriterien .....                                | 299        |
| 6.2.3    | Modellgesetze für Kavitationsströmungen .....   | 300        |
| 6.2.4    | Die Saugzahl .....  | 304        |
| 6.2.5    | Experimentelle Bestimmung des erforderlichen $NPSH_R$ -Wertes ..  | 306        |
| 6.2.6    | Spaltkavitation .....   | 316        |
| 6.3      | Bestimmung des $NPSH_R$ -Wertes .....   | 317        |
| 6.3.1    | Einflußparameter auf den $NPSH_R$ -Wert .....   | 317        |
| 6.3.2    | Berechnung des $NPSH_R$ -Wertes .....   | 320        |
| 6.3.3    | Abschätzung des $NPSH_3$ -Wertes als Funktion des Förderstromes ..  | 324        |
| 6.4      | Einfluß der Fluideigenschaften .....  | 328        |
| 6.4.1    | Thermodynamische Einflüsse .....  | 328        |
| 6.4.2    | Nichtkondensierbare Gase .....  | 331        |
| 6.4.3    | Keimgehalt und Zugspannungen in der Flüssigkeit .....   | 332        |
| 6.5      | Kavitationsbedingte Schwingungen und Geräusche .....  | 334        |
| 6.5.1    | Erregermechanismen .....  | 334        |
| 6.5.2    | Kavitationsschallmessungen zur Quantifizierung<br>der hydrodynamischen Kavitationsintensität .....            | 335        |
| 6.5.3    | Frequenzverhalten des Kavitationsschalls .....  | 339        |
| 6.6      | Kavitationserosion .....  | 340        |
| 6.6.1    | Untersuchungsmethoden .....   | 341        |
| 6.6.2    | Kavitationswiderstand .....   | 343        |
| 6.6.3    | Vorausberechnung von Kavitationsschäden aufgrund der<br>Blasenfeldlänge .....                                 | 346        |
| 6.6.4    | Abschätzung der Erosion aufgrund des Flüssigkeitsschalls .....  | 349        |
| 6.6.5    | Körperschallmessungen zur Kavitationsdiagnose .....   | 351        |
| 6.6.6    | Farberosionsversuche zur Bestimmung des Implosionsortes .....   | 351        |
| 6.6.7    | Erosionsschwellwert und Materialverhalten bei verschiedenen<br>hydrodynamischen Kavitationsintensitäten ..... | 353        |
| 6.6.8    | Zusammenfassende Beurteilung .....  | 357        |
| 6.7      | Die Wahl des Zulaufdruckes in der Anlage ( $NPSH_A$ ) .....   | 360        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.8   | Kavitationsschäden: Analyse und Abhilfe . . . . .                     | 364 |
| 6.8.1 | Aufnahme des Schadens und der Betriebsparameter . . . . .             | 364 |
| 6.8.2 | Kavitationsformen und typische Arten von Kavitationsschäden . . . . . | 365 |
| 6.8.3 | Behebung von Kavitationsschäden . . . . .                             | 375 |
| 6.9   | Ungenügende Saugfähigkeit: Analyse und Abhilfe . . . . .              | 376 |
|       | Literatur . . . . .   | 378 |
| 7     | <b>Berechnung und Entwurf der hydraulischen Komponenten</b> . . . . . | 381 |
| 7.1   | Methoden und Randbedingungen . . . . .                                | 381 |
| 7.1.1 | Methoden zur Entwicklung hydraulischer Komponenten . . . . .          | 381 |
| 7.1.2 | Hydraulische Anforderungen . . . . .                                  | 383 |
| 7.1.3 | Rechenmodelle . . . . .   | 384 |
| 7.2   | Radiale Laufräder . . . . .   | 386 |
| 7.2.1 | Bestimmung der Hauptabmessungen . . . . .                             | 386 |
| 7.2.2 | Der Laufradentwurf . . . . .  | 396 |
| 7.2.3 | Kriterien für die Schaufelgestaltung . . . . .                        | 402 |
| 7.2.4 | Gestaltungskriterien für Sauglaufräder . . . . .                      | 404 |
| 7.2.5 | Ausnutzung dreidimensionaler Effekte . . . . .                        | 407 |
| 7.3   | Radiale Laufräder für kleine spezifische Drehzahlen . . . . .         | 408 |
| 7.3.1 | Einfach gekrümmte Schaufeln (Zylinderschaufeln) . . . . .             | 408 |
| 7.3.2 | Lochscheiben . . . . .  | 409 |
| 7.3.3 | Radialer Schaufelstern . . . . .                                      | 412 |
| 7.3.4 | Doppeltwirkende Laufräder mit radialen Schaufeln . . . . .            | 413 |
| 7.4   | Radiale Laufräder für Pumpen mit Verstopfungsgefahr . . . . .         | 414 |
| 7.5   | Halbaxiale Laufräder . . . . .  | 424 |
| 7.6   | Axiale Laufräder und Leitapparate . . . . .                           | 429 |
| 7.6.1 | Eigenschaften . . . . .   | 429 |
| 7.6.2 | Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen . . . . .                    | 430 |
| 7.6.3 | Einige Eigenschaften von Tragflügeln . . . . .                        | 435 |
| 7.6.4 | Schaufelauslegung . . . . .   | 441 |
| 7.6.5 | Profilauswahl . . . . .   | 449 |
| 7.6.6 | Leitadauslegung . . . . .   | 451 |
| 7.7   | Vorsatzläufer . . . . .   | 453 |
| 7.7.1 | Berechnung der Vorsatzläufer . . . . .                                | 454 |
| 7.7.2 | Entwurf und Gestaltung der Vorsatzläufer . . . . .                    | 460 |
| 7.7.3 | Abstimmung von Vorsatzläufer und Laufrad . . . . .                    | 461 |
| 7.7.4 | Hinweise für die Anwendung der Vorsatzläufer . . . . .                | 462 |
| 7.8   | Spiralgehäuse . . . . .   | 464 |
| 7.8.1 | Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen . . . . .                    | 464 |
| 7.8.2 | Entwurf und Gestaltung der Spiralgehäuse . . . . .                    | 470 |
| 7.8.3 | Einfluß der Gestaltung auf das hydraulische Verhalten . . . . .       | 474 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 7.9    | Radiale Leiträder mit und ohne Rückführung .....               | 476 |
| 7.9.1  | Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen.....                  | 476 |
| 7.9.2  | Entwurf und Gestaltung radialer Leiträder.....                 | 482 |
| 7.10   | Halbaxiale Leiträder .....                                     | 484 |
| 7.11   | Spirale mit Leitrad oder Stützschaufelring .....               | 486 |
| 7.12   | Ringräume und Letringe.....                                    | 487 |
| 7.13   | Einlaufgehäuse für Pumpen mit durchgehender Welle.....         | 487 |
| 7.14   | Analytische Verfahren für den Laufradentwurf .....             | 492 |
| 7.14.1 | Veranlassung, Umfang und Ziele .....                           | 492 |
| 7.14.2 | Meridianschnitt .....  | 494 |
| 7.14.3 | Schaufelentwurf .....  | 499 |
| 7.14.4 | Vorgehen bei der Entwicklung einer Entwurfssystematik .....    | 499 |
| 7.14.5 | Einige Resultate.....  | 504 |
|        | Literatur .....  | 505 |
| 8      | Numerische Strömungsberechnungen .....                         | 509 |
| 8.1    | Übersicht .....  | 509 |
| 8.2    | Quasi-3D-Verfahren und 3D-Euler-Rechnungen .....               | 512 |
| 8.2.1  | Quasi-3D-Verfahren .....                                       | 512 |
| 8.2.2  | Dreidimensionale Euler-Verfahren .....                         | 513 |
| 8.3    | Grundlagen für Navier-Stokes-Berechnungen .....                | 513 |
| 8.3.1  | Navier-Stokes-Gleichungen.....                                 | 513 |
| 8.3.2  | Turbulenzmodellierung.....                                     | 515 |
| 8.3.3  | Behandlung der Strömung in Wandnähe .....                      | 520 |
| 8.3.4  | Netzerzeugung .....  | 522 |
| 8.3.5  | Numerische Verfahren und Steuerparameter.....                  | 525 |
| 8.3.6  | Randbedingungen .....  | 527 |
| 8.3.7  | Anfangswerte .....   | 529 |
| 8.3.8  | Möglichkeiten von 3D-Navier-Stokes-Berechnungen.....           | 530 |
| 8.4    | Mittelwertbildung und Datenaufbereitung .....                  | 532 |
| 8.5    | Laufradberechnung .....  | 540 |
| 8.5.1  | Globalwerte im Bestpunkt.....                                  | 540 |
| 8.5.2  | Geschwindigkeitsprofile .....                                  | 546 |
| 8.5.3  | Einflußparameter .....   | 546 |
| 8.5.4  | Berechnungsbeispiel.....                                       | 547 |
| 8.6    | Berechnung von Leitvorrichtungen und Stufen .....              | 550 |
| 8.6.1  | Getrennte Berechnung der Leitvorrichtung.....                  | 550 |
| 8.6.2  | Stationäre Berechnung von Stufen oder kompletten Maschinen.... | 551 |
| 8.6.3  | Instationäre Berechnungen .....                                | 553 |
| 8.7    | Zwei-Phasen- und Kavitationsströmungen .....                   | 554 |
| 8.8    | Berechnungsstrategien, Unsicherheiten, Qualität .....          | 559 |
| 8.8.1  | Unsicherheiten, Fehlerquellen, Fehlerreduktion .....           | 560 |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 8.8.2     | Qualitätssicherung bei CFD-Rechnungen .....                    | 564        |
| 8.8.3     | Vergleich zwischen Rechnung und Messung .....                  | 574        |
| 8.9       | Kriterien für die Beurteilung numerischer Berechnungen .....   | 576        |
| 8.9.1     | Allgemeine Hinweise .....                                      | 576        |
| 8.9.2     | Konsistenz und Plausibilität der Rechnung .....                | 577        |
| 8.9.3     | Werden die verlangten Leistungsdaten erreicht? .....           | 578        |
| 8.9.4     | Maximierung des hydraulischen Wirkungsgrades .....             | 578        |
| 8.9.5     | Kennlinienstabilität .....                                     | 580        |
| 8.9.6     | Instationäre Kräfte .....                                      | 581        |
| 8.10      | Grundsätzliches zu CFD-Rechnungen .....                        | 581        |
|           | Literatur .....  | 584        |
| <b>9</b>  | <b>Hydraulische Kräfte .....</b>                               | <b>589</b> |
| 9.1       | Die Strömung im Radseitenraum .....                            | 589        |
| 9.2       | Axialkräfte .....  | 607        |
| 9.2.1     | Axialkraftberechnung allgemein .....                           | 607        |
| 9.2.2     | Einstufige Pumpen mit einflutigem, überhängendem Laufrad ..... | 609        |
| 9.2.3     | Mehrstufige Pumpen .....                                       | 614        |
| 9.2.4     | Doppelflutige Laufräder .....                                  | 618        |
| 9.2.5     | Halbaxiale Laufräder .....                                     | 619        |
| 9.2.6     | Axialpumpen .....  | 620        |
| 9.2.7     | Rückenschaufeln .....  | 620        |
| 9.2.8     | Halboffene Laufräder .....                                     | 623        |
| 9.2.9     | Instationäre Axialkräfte .....                                 | 623        |
| 9.2.10    | Axialschubberechnungen im Überblick .....                      | 624        |
| 9.3       | Radialkräfte .....   | 627        |
| 9.3.1     | Definition und Abgrenzung .....                                | 627        |
| 9.3.2     | Messung von Radialkräften .....                                | 629        |
| 9.3.3     | Pumpen mit Einfachspirale .....                                | 631        |
| 9.3.4     | Pumpen mit Doppelspirale .....                                 | 637        |
| 9.3.5     | Pumpen mit Ringraum .....                                      | 639        |
| 9.3.6     | Leitradpumpen .....  | 639        |
| 9.3.7     | Radialkraft infolge ungleichförmiger Zuströmung .....          | 639        |
| 9.3.8     | Axialpumpen .....  | 641        |
| 9.3.9     | Radialkräfte in Pumpen mit Einkanalrad .....                   | 642        |
| 9.3.10    | Radialkraftausgleich .....                                     | 656        |
| 9.3.11    | Radialkraftberechnung .....                                    | 657        |
|           | Literatur .....  | 662        |
| <b>10</b> | <b>Schwingungen und Geräusche .....</b>                        | <b>665</b> |
| 10.1      | Instationäre Strömungsvorgänge am Laufradaustritt .....        | 666        |
| 10.2      | Druckpulsationen .....   | 670        |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 10.2.1  | Entstehung von Druckpulsationen . . . . .                                   | 670 |
| 10.2.2  | Strömung und Schallerzeugung . . . . .                                      | 671 |
| 10.2.3  | Einflußparameter der Pumpe . . . . .  | 671 |
| 10.2.4  | Einfluß des Systems . . . . .   | 674 |
| 10.2.5  | Modellgesetze . . . . .   | 676 |
| 10.2.6  | Messung und Auswertung . . . . .  | 677 |
| 10.2.7  | Druckpulsationen ausgeführter Pumpen . . . . .                              | 679 |
| 10.2.8  | Auswirkungen von Druckpulsationen . . . . .                                 | 681 |
| 10.2.9  | Auslegungsrichtlinien . . . . .   | 681 |
| 10.3    | Bauteilbeanspruchung durch instationäre Strömungsvorgänge . . . . .         | 684 |
| 10.4    | Schallabstrahlung . . . . .   | 685 |
| 10.4.1  | Körperschall . . . . .  | 685 |
| 10.4.2  | Luftschall . . . . .  | 687 |
| 10.5    | Übersicht über mechanische Schwingungen bei Kreiselpumpen . . . . .         | 690 |
| 10.6    | Rotordynamik . . . . .  | 692 |
| 10.6.1  | Übersicht . . . . .   | 692 |
| 10.6.2  | Kräfte in Spaltdichtungen . . . . .   | 693 |
| 10.6.3  | Hydraulische Laufradwechselwirkung . . . . .                                | 700 |
| 10.6.4  | Lagerreaktionen . . . . .   | 702 |
| 10.6.5  | Eigenwerte und kritische Drehzahlen . . . . .                               | 703 |
| 10.6.6  | Rotor-Instabilitäten . . . . .  | 706 |
| 10.7    | Hydraulische Schwingungsanregung . . . . .                                  | 709 |
| 10.7.1  | Wechselwirkung zwischen Laufrad- und Statorströmung . . . . .               | 709 |
| 10.7.2  | Umlaufende Ablösungen . . . . .   | 722 |
| 10.7.3  | Übrige Erregermechanismen . . . . .   | 725 |
| 10.8    | Richtlinien für die Konstruktion schwingungssarmer Pumpen . . . . .         | 738 |
| 10.9    | Zulässige Schwingungen . . . . .  | 741 |
| 10.10   | Allgemeine Schwingungsdiagnose . . . . .                                    | 743 |
| 10.10.1 | Überblick . . . . .   | 743 |
| 10.10.2 | Schwingungsmessungen . . . . .  | 745 |
| 10.10.3 | Schwingungsdiagnose . . . . .   | 748 |
| 10.11   | Lagergehäuseschwingungen: Mechanismus, Diagnose, Abhilfe . . . . .          | 755 |
| 10.11.1 | Hydraulische Erregermechanismen . . . . .                                   | 756 |
| 10.11.2 | Mechanische Auswirkungen hydraulischer Anregung . . . . .                   | 761 |
| 10.11.3 | Hydraulische und mechanische Abhilfe . . . . .                              | 764 |
| 10.11.4 | Diagnose von Lagergehäuseschwingungen . . . . .                             | 765 |
| 10.12   | Hydraulische und akustische Anregung von Rohrleitungsschwingungen . . . . . | 778 |
| 10.12.1 | Anregung von Rohrleitungsschwingungen durch Pumpen . . . . .                | 779 |
| 10.12.2 | Anregung von Rohrschwingungen durch Komponenten . . . . .                   | 781 |
| 10.12.3 | Akustische Resonanzen in Rohrleitungen . . . . .                            | 782 |
| 10.12.4 | Hydraulische Anregung durch Wirbelstraßen . . . . .                         | 786 |

---

|  |            |
|--|------------|
| 10.12.5 Kopplung zwischen Strömung und Schallwellen . . . . .                                      | 790        |
| 10.12.6 Zum Mechanismus von Rohrleitungsschwingungen . . . . .                                     | 796        |
| 10.13 Torsionsschwingungen . . . . .   | 800        |
| Literatur . . . . .  | 804        |
| <b>11 Verhalten der Kreiselpumpen in Anlagen . . . . .</b>   | <b>809</b> |
| 11.1 Anlagenkennlinien und Arbeitspunkt. Einzelbetrieb, Parallel- und<br>Reihenschaltung . . . . . | 809        |
| 11.2 Regelung . . . . .  | 815        |
| 11.3 Statische und dynamische Stabilität . . . . .   | 822        |
| 11.4 Anfahren, Abschalten . . . . .  | 824        |
| 11.5 Ausfall des Antriebes, Druckstoß . . . . .  | 829        |
| 11.6 Zulässiger Betriebsbereich . . . . .  | 830        |
| 11.7 Der Pumpenzulauf . . . . .  | 833        |
| 11.7.1 Zulaufleitungen . . . . .   | 834        |
| 11.7.2 Transientes Absinken des Zulaufdruckes . . . . .  | 836        |
| 11.7.3 Einlaufbauwerke und Zulauf aus Behältern mit freiem<br>Fluidspiegel . . . . .               | 842        |
| 11.7.4 Topfpumpen . . . . .  | 857        |
| 11.8 Druckleitungen . . . . .  | 858        |
| Literatur . . . . .  | 861        |
| <b>12 Turbinenbetrieb. Allgemeines Kennfeld . . . . .</b>  | <b>863</b> |
| 12.1 Rückwärtslaufende Kreiselpumpen als Turbinen . . . . .  | 863        |
| 12.1.1 Theoretische und reale Kennlinien . . . . .   | 863        |
| 12.1.2 Leerlauf- und Widerstandskennlinien . . . . .   | 869        |
| 12.1.3 Berechnung der Kennlinien aufgrund empirischer<br>Korrelationen . . . . .                   | 870        |
| 12.1.4 Berechnung der Turbinenkennlinien aufgrund der<br>Verlustanalyse . . . . .                  | 875        |
| 12.1.5 Verhalten der Turbinen in Anlagen . . . . .   | 879        |
| 12.2 Allgemeines Kennfeld . . . . .  | 883        |
| Literatur . . . . .  | 889        |
| <b>13 Einfluß des Fördermediums . . . . .</b>  | <b>891</b> |
| 13.1 Förderung von Flüssigkeiten mit hoher Viskosität . . . . .                                    | 891        |
| 13.1.1 Wirkung der Viskosität auf Einzelverluste und Kennlinie . . . . .                           | 891        |
| 13.1.2 Umrechnung der Kennlinie von Wasser auf viskose Medien . . . . .                            | 903        |
| 13.1.3 Einfluß der Zähigkeit auf das Saugverhalten . . . . .                                       | 910        |
| 13.1.4 Anfahren der Pumpe mit einem viskosen Medium . . . . .                                      | 910        |
| 13.1.5 Hinweise für die Anwendung . . . . .  | 911        |

|  |         |
|--|---------|
| 13.2 Förderung von Gas-Flüssigkeits-Gemischen .....                            | 912     |
| 13.2.1 Phasenverteilung in der Rohrströmung .....                              | 913     |
| 13.2.2 Phasenverteilung in der Pumpenströmung, Einflußparameter .....          | 917     |
| 13.2.3 Empirische Behandlung von Zweiphasenströmungen .....                    | 927     |
| 13.2.4 Verhalten von Kreiselpumpen bei Gas-Flüssigkeits-Förderung ..           | 934     |
| 13.2.5 Helico-axiale Mehrphasenpumpen .....                                    | 940     |
| 13.2.6 Systemkennlinien .....  | 944     |
| 13.2.7 Flüssigkeits- und Gasansammlungen .....                                 | 946     |
| 13.2.8 Ungelöste und gelöste Gase und NPSH .....                               | 948     |
| 13.3 Entspannung von Zweiphasengemischen in Turbinen .....                     | 949     |
| 13.3.1 Berechnung des Arbeitsumsatzes .....                                    | 949     |
| 13.3.2 Vorausberechnung der Turbinenkennlinien bei<br>Zweiphasenströmung ..... | 951     |
| 13.4 Hydraulischer Feststofftransport .....                                    | 954     |
| 13.5 Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten .....                                     | 963     |
| Literatur .....  | 967     |
| <br><b>14 Werkstoffwahl für hohe Geschwindigkeiten .....</b>                   | <br>971 |
| 14.1 Ermüdungsbrüche an Laufrädern oder Leiträdern .....                       | 972     |
| 14.2 Korrosion .....   | 984     |
| 14.2.1 Grundsätzliches .....   | 984     |
| 14.2.2 Korrosionsmechanismen .....   | 986     |
| 14.2.3 Korrosion in Trinkwasser, Kühlwasser, Abwasser .....                    | 992     |
| 14.2.4 Korrosion in Meerwasser und Lagerstättenwasser .....                    | 995     |
| 14.3 Erosionskorrosion in vollentsalztem Wasser .....                          | 1000    |
| 14.4 Materialwahl und zulässige Geschwindigkeiten .....                        | 1008    |
| 14.4.1 Definition häufig vorkommender Fördermedien .....                       | 1008    |
| 14.4.2 Metallische Pumpenwerkstoffe .....                                      | 1010    |
| 14.4.3 Laufräder, Leiträder und Gehäuse .....                                  | 1017    |
| 14.4.4 Spaltringwerkstoffe .....   | 1029    |
| 14.4.5 Werkstoffe für mediumberührte Wellen .....                              | 1032    |
| 14.4.6 Werkstoffe für Speisewasser- und Kondensatpumpen .....                  | 1033    |
| 14.4.7 Werkstoffe für REA-Pumpen .....   | 1034    |
| 14.4.8 Verbundwerkstoffe .....   | 1035    |
| 14.5 Hydroabrasiver Verschleiß .....   | 1037    |
| 14.5.1 Einflußparameter .....  | 1037    |
| 14.5.2 Quantitative Verschleißabschätzung .....                                | 1040    |
| 14.5.3 Materialverhalten und Feststoffeinfluß .....                            | 1047    |
| 14.5.4 Materialwahl .....  | 1050    |
| 14.5.5 Abrasionsverschleiß in Feststoffpumpen .....                            | 1052    |
| 14.5.6 Erosionsformen als Spiegelbild der Strömung .....                       | 1054    |
| Literatur .....  | 1060    |

|  |      |
|--|------|
| <b>15 Zur Auswahl und Qualität von Kreiselpumpen . . . . .</b>                                     | 1065 |
| 15.1 Die Pumpenspezifikation. . . . .  | 1066 |
| 15.2 Bestimmung von Pumpentyp und Baugröße . . . . .   | 1068 |
| 15.3 Technische Qualitätskriterien . . . . .   | 1074 |
| 15.3.1 Strömungstechnische Kriterien . . . . .   | 1075 |
| 15.3.2 Herstellungsqualität . . . . .  | 1078 |
| 15.4 Hochleistungspumpen . . . . .   | 1084 |
| Literatur . . . . .  | 1089 |
| <br>   |      |
| <b>16 Versuche an Kreiselpumpen . . . . .</b>  | 1091 |
| 16.1 Versuchsarten und zugehörige Messungen . . . . .  | 1091 |
| 16.2 Versuchskreisläufe . . . . .  | 1093 |
| 16.2.1 Geschlossene Versuchskreisläufe . . . . .   | 1095 |
| 16.2.2 Geschlossener Versuchskreislauf mit Druckhalter . . . . .                                   | 1095 |
| 16.2.3 Halboffener Versuchskreislauf . . . . .   | 1101 |
| 16.2.4 Geschlossener Kreislauf mit Strömung durch einen Tank<br>mit freiem Wasserspiegel . . . . . | 1102 |
| 16.2.5 Offene Versuchskreisläufe . . . . .   | 1103 |
| 16.3 Instrumentierung . . . . .  | 1106 |
| 16.3.1 Druckmessung . . . . .  | 1106 |
| 16.3.2 Durchflußmessung . . . . .  | 1107 |
| 16.3.3 Messung von Leistung, Drehmoment und Wirkungsgrad . . . . .                                 | 1112 |
| 16.4 Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung . . . . .                                       | 1113 |
| 16.4.1 Versuchsvorbereitung . . . . .  | 1113 |
| 16.4.2 Vorgehen bei Kennlinienmessungen . . . . .  | 1114 |
| 16.4.3 Vorgehen bei Kavitationsversuchen . . . . .   | 1115 |
| 16.5 Versuchsauswertung und Genauigkeit . . . . .  | 1115 |
| 16.6 Mögliche Probleme bei Versuchen und Abhilfe . . . . .   | 1117 |
| Literatur . . . . .  | 1117 |
| <br>   |      |
| <b>17 Allgemeine Daten und Formeln . . . . .</b>   | 1119 |
| Kapitel 17 liefert: . . . . .  | 1119 |
| 17.1 (1) Umrechnung von Maßeinheiten . . . . .   | 1120 |
| 17.2 (2) Umrechnung von Maßeinheiten . . . . .   | 1121 |
| 17.3 Eigenschaften von Wasser im Sättigungszustand . . . . .                                       | 1122 |
| 17.4 Lösung von Gasen in Wasser . . . . .  | 1125 |
| 17.5 Qualitätsanforderungen an Gußstücke (Tab. 17.1 und 17.2) . . . . .                            | 1128 |
| 17.6 Physikalische Größen . . . . .  | 1129 |
| 17.6.1 Atmosphärischer Luftdruck . . . . .   | 1129 |
| 17.6.2 Fallbeschleunigung . . . . .  | 1130 |
| 17.7 Schallgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit . . . . .  | 1130 |
| 17.8 Mechanische Schwingungen. Grundbegriffe . . . . .   | 1131 |
| 17.8.1 Freie Schwingungen mit viskoser Dämpfung . . . . .  | 1131 |

|   |          |
|---|----------|
| 17.8.2 Erzwungene Schwingungen .....              | 1133     |
| 17.8.3 Eigenfrequenzen einfacher Strukturen ..... | 1140     |
| 17.9 Hydraulische Spezifikation .....             | 1141     |
| Literatur .....                                   | 1147     |
| <br><b>Literaturverzeichnis .....</b>             | <br>1149 |
| <br><b>Sachverzeichnis .....</b>                  | <br>1153 |