

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Teil I Grundlagen | 17 |
| 1 Allgemeines | 17 |
| 1.1 Begriffe, Einheiten, Abkürzungen | 17 |
| 1.1.1 Begriffe | 17 |
| 1.1.2 Einheiten | 18 |
| 1.1.3 Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen | 19 |
| 1.2 Aufgabe und Bedeutung | 23 |
| 1.3 Unterteilung | 26 |
| 1.4 Wirkungsweise | 29 |
| 1.4.1 Grundsätzliches | 29 |
| 1.4.2 Einzelschaufel (Flügel) | 29 |
| 1.4.3 Schaufelgitter (Schaufel) | 31 |
| 1.5 Bauarten | 35 |
| 1.5.1 Vorbemerkungen | 35 |
| 1.5.2 Hauptteile | 35 |
| 1.5.3 Bezeichnungen | 35 |
| 1.5.4 Aufteilung | 36 |
| 1.6 Vergleich mit Kolbenmaschinen | 36 |
| 1.6.1 Vorbemerkungen | 36 |
| 1.6.2 Übereinstimmende Kennzeichen | 37 |
| 1.6.3 Unterschiede | 37 |
| 2 Strömungsverhältnisse | 39 |
| 2.1 Zusammengesetzte Strömungen | 39 |
| 2.1.1 Grundsätzliches | 39 |
| 2.1.2 Radialrotationshohlräume | 39 |
| 2.1.2.1 Vorbemerkungen | 39 |
| 2.1.2.2 Reibungsfreie Strömungen | 39 |
| 2.1.2.3 Reibungsbehaftete Strömungen | 40 |
| 2.1.3 Beliebige rotationssymmetrische Kanäle | 41 |
| 2.1.4 Axialrotationshohlräume | 42 |
| 2.2 Relativbewegung | 42 |
| 2.3 Energiegleichung der Relativströmung | 42 |
| 2.4 Instationäre Strömung | 44 |
| 2.4.1 Grundsätzliches | 44 |
| 2.4.2 Energiegleichung der instationären Strömung | 44 |
| 2.4.3 Druckstoß | 46 |
| 2.4.3.1 Vorbetrachtungen | 46 |
| 2.4.3.2 Physikalischer Ablauf | 46 |
| 2.4.3.3 Rohrleitung mit konstantem Querschnitt | 47 |
| 2.4.3.4 Rohrsystem mit veränderlichem Durchmesser | 53 |
| 2.5 Laufradströmungen | 54 |
| 2.5.1 Bezeichnungen und Grundsätzliches | 54 |
| 2.5.2 Radial-, Halbaxial- und Diagonalräder | 56 |
| 2.5.2.1 Strömungsverhältnisse | 56 |
| 2.5.2.2 Nabenvorengung | 58 |
| 2.5.2.3 Radquerschnittsverengung | 58 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2.5.2.4 | Laufschaufelzahl | 60 |
| 2.5.2.5 | Schaufeldicke | 62 |
| 2.5.2.6 | Umfangsgeschwindigkeit | 62 |
| 2.5.2.7 | Geschwindigkeitsverhältnisse | 63 |
| 2.5.3 | Axialräder | 64 |
| 2.5.3.1 | Vorbemerkungen | 64 |
| 2.5.3.2 | Axialräder mit vielen Schaufeln | 64 |
| 2.5.3.3 | Axialräder mit wenigen Schaufeln | 68 |
| 3 | Energieumsatz | 73 |
| 3.1 | Berechnungsverfahren | 73 |
| 3.2 | Stromfadentheorie | 74 |
| 3.2.1 | Hauptgleichung der Kreiselradtheorie (EULER-Gleichung) | 74 |
| 3.2.1.1 | Spezifische theoretische Schaufelarbeit Y_{Schoo} bei unendlicher Schaufelzahl | 74 |
| 3.2.1.2 | Spezifische theoretische Schaufelarbeit Y_{Sch} bei endlicher Schaufelzahl | 78 |
| 3.2.1.3 | Spezifische Stufenarbeit ΔY und spezifische Stutzenarbeit Y | 85 |
| 3.2.1.4 | Spaltdruckarbeit | 87 |
| 3.2.1.5 | Gleich- und Überdruckwirkung | 88 |
| 3.3 | Tragflügeltheorie | 90 |
| 3.3.1 | Ideale Strömung (KUTTA-JOUKOWSKY-Gesetz) | 90 |
| 3.3.2 | Reale Strömung | 93 |
| 4 | Affinitätsgesetze und Kennziffern | 99 |
| 4.1 | Grundsätzliches | 99 |
| 4.2 | Ähnlichkeitstheorie | 99 |
| 4.2.1 | Vorbemerkungen | 99 |
| 4.2.2 | Ähnlichkeitsbedingungen | 99 |
| 4.2.3 | Affinitätsgesetze | 100 |
| 4.2.3.1 | Maßstabsfaktoren | 100 |
| 4.2.3.2 | Proportionalitäten | 100 |
| 4.2.3.3 | Ähnlichkeitsbeziehungen | 101 |
| 4.2.3.4 | Wirkungsgradumrechnung | 102 |
| 4.2.3.5 | Radanpassung | 103 |
| 4.3 | Kennziffern | 105 |
| 4.3.1 | Grundsätzliches | 105 |
| 4.3.2 | Methoden zur Aufstellung von Kennziffern | 106 |
| 4.3.3 | Wichtige Kennziffern für Turbomaschinen | 106 |
| 4.3.3.1 | Reaktionsgrad | 106 |
| 4.3.3.2 | Druckziffer | 108 |
| 4.3.3.3 | Lieferziffer | 109 |
| 4.3.3.4 | Durchmesserziffer | 111 |
| 4.3.3.5 | Radformkennziffern (Laufradkennzahlen) | 111 |
| 4.3.3.6 | Relative Drallziffer | 120 |
| 4.3.3.7 | Einlaufziffer und Abströmwert | 121 |
| 5 | Kavitation und Überschall | 124 |
| 5.1 | Vorbemerkungen | 124 |
| 5.2 | Kavitation | 124 |
| 5.2.1 | Ablauf, Wirkung, Werkstoffe, Einflüsse | 124 |
| 5.2.1.1 | Grundsätzliches | 124 |
| 5.2.1.2 | Kavitationsablauf | 126 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|------------|
| 5.2.1.3 | Werkstoffe | 127 |
| 5.2.1.4 | Laufradgrößeneinfluss | 129 |
| 5.2.1.5 | Kavitationsstufen | 129 |
| 5.2.1.6 | Kavitationsformen | 130 |
| 5.2.1.7 | Zusammenfassung | 131 |
| 5.2.2 | Saughöhe von Flüssigkeitsmaschinen | 131 |
| 5.2.3 | Halteenergie | 133 |
| 5.2.4 | Saugzahl S_y | 136 |
| 5.2.5 | <i>NPSH</i> -Wert | 137 |
| 5.2.6 | THOMA-Zahl Th | 138 |
| 5.2.7 | Festlegen des Kavitationszustandes | 139 |
| 5.3 | Überschall | 140 |
| 5.3.1 | Grundsätzliches, Bedeutung | 140 |
| 5.3.2 | Dichteänderung im Saugstutzen | 141 |
| 5.3.3 | Überschallgrenze, Schallziffer | 143 |
| 6 | Laufradformen | 147 |
| 6.1 | Radialmaschinen | 147 |
| 6.1.1 | Grundsätzliches | 147 |
| 6.1.2 | Wirkungsfreie Radialschaufel | 147 |
| 6.1.3 | Einfluss der Saugkante | 151 |
| 6.1.4 | Einfluss der Druckkante | 152 |
| 6.1.4.1 | Grundsätzliches | 152 |
| 6.1.4.2 | Unterscheidung | 153 |
| 6.1.4.3 | Vergleich | 153 |
| 6.1.4.4 | Anwendung | 153 |
| 6.1.5 | Schaufelformen | 155 |
| 6.1.5.1 | Grundsätzliches | 155 |
| 6.1.5.2 | Pumpenschaufeln | 155 |
| 6.1.5.3 | Turbinenschaufeln | 160 |
| 6.2 | Axialmaschinen | 161 |
| 6.2.1 | Vorbemerkungen | 161 |
| 6.2.2 | Wirkungsfreie Axialschaufel | 162 |
| 6.2.3 | Einfluss der Saugkante | 163 |
| 6.2.4 | Einfluss der Druckkante | 163 |
| 6.2.4.1 | Grundsätzliches | 163 |
| 6.2.4.2 | Unterscheidung | 163 |
| 6.2.4.3 | Vergleich | 164 |
| 6.2.4.4 | Anwendung | 164 |
| 6.2.5 | Schaufelformen | 165 |
| 6.2.5.1 | Axialpumpen | 165 |
| 6.2.5.2 | Wasserturbinen | 165 |
| 6.2.5.3 | Dampf- und Gasturbinen | 167 |
| 7 | Leitvorrichtungen | 171 |
| 7.1 | Grundsätzliches | 171 |
| 7.2 | Pumpenleitvorrichtungen | 171 |
| 7.2.1 | Radialmaschinen | 172 |
| 7.2.1.1 | Einführung | 172 |
| 7.2.1.2 | Ringspalt, Leitkanaleintrittsbreite | 173 |
| 7.2.1.3 | Leitrad (beschaufelt) | 174 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.2.1.4 | Leitring (schaufellos) | 182 |
| 7.2.1.5 | Spiralgehäuse | 183 |
| 7.2.1.6 | Rückführleinrichtungen | 192 |
| 7.2.1.7 | Saugseitenleitvorrichtungen | 194 |
| 7.2.2 | Axialmaschinen | 195 |
| 7.2.2.1 | Grundsätzliches | 195 |
| 7.2.2.2 | Spalt zwischen Lauf- und Leitrad | 197 |
| 7.2.2.3 | Leitschaufeldicke s_{Le} | 197 |
| 7.2.2.4 | Leitschaufelzahl z_{Le} | 197 |
| 7.2.2.5 | Leitschaufelkontur | 197 |
| 7.3 | Turbinenleitvorrichtungen | 199 |
| 7.3.1 | Grundsätzliches | 199 |
| 7.3.2 | Wasserturbinen | 200 |
| 7.3.2.1 | Gleichdruckturbinen (Aktionswirkung) | 200 |
| 7.3.2.2 | Überdruckturbinen (Reaktionswirkung) | 203 |
| 7.3.3 | Dampf- und Gasturbinen | 209 |
| 7.3.3.1 | Vorbemerkungen | 209 |
| 7.3.3.2 | Gleichdruckturbinen (Aktionswirkung) | 211 |
| 7.3.3.3 | Überdruckturbinen (Reaktionsprinzip) | 217 |
| 8 | Spezifische Stutzenarbeit, Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade | 219 |
| 8.1 | Vorbemerkung | 219 |
| 8.2 | Spezifische Stutzenarbeit | 219 |
| 8.3 | Verluste | 224 |
| 8.3.1 | Grundsätzliches | 224 |
| 8.3.2 | Innere Verluste | 224 |
| 8.3.2.1 | Schauflungsverluste Z_{Sch} | 224 |
| 8.3.2.2 | Mengenstromverluste | 228 |
| 8.3.2.3 | Radreibungs- und Ventilationsverluste | 235 |
| 8.3.2.4 | Austauschverlust | 241 |
| 8.3.2.5 | Stoßverluste | 241 |
| 8.3.2.6 | Zusammenfassung | 243 |
| 8.3.3 | Äußere Verluste | 244 |
| 8.3.4 | Gesamtverlust Z_{ges} | 245 |
| 8.4 | Leistungen | 245 |
| 8.4.1 | Grundsätzliches | 245 |
| 8.4.2 | Theoretische Leistung | 246 |
| 8.4.3 | Innere Leistungen | 246 |
| 8.4.4 | Äußere, effektive oder Kupplungs-Leistung | 246 |
| 8.5 | Wirkungsgrade | 247 |
| 8.5.1 | Grundsätzliches | 247 |
| 8.5.2 | Liefergrad λ_L | 247 |
| 8.5.3 | Schauflungswirkungsgrad η_{Sch} | 247 |
| 8.5.4 | Innerer Wirkungsgrad η_i | 247 |
| 8.5.5 | Mechanischer Wirkungsgrad η_m | 248 |
| 8.5.6 | Effektiver Wirkungsgrad η_e | 248 |
| 8.5.7 | Weitere Wirkungsgrade bei thermischen Turboarbeitsmaschinen | 249 |
| 8.5.8 | Weitere Wirkungsgrade bei Turbokraftanlagen | 249 |
| 8.5.9 | Anlagenwirkungsgrad η_A | 251 |
| 8.5.10 | Spezielle Wirkungsgrade | 251 |

| | |
|---|-----|
| 9 Betriebliches Verhalten (Kennlinien, Kennfelder) | 252 |
| 9.1 Grundsätzliches | 252 |
| 9.2 Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen | 252 |
| 9.2.1 Kreiselpumpen | 252 |
| 9.2.1.1 Drosselkurven | 252 |
| 9.2.1.2 Auslegungs- und Betriebspunkt | 257 |
| 9.2.1.3 Stabiler und labiler Betriebszustand | 258 |
| 9.2.1.4 Affinität der Drosselkurven | 261 |
| 9.2.1.5 Vergleich mit dem Kennverhalten der Kolbenpumpen | 264 |
| 9.2.1.6 Muscheldiagramm | 264 |
| 9.2.1.7 Kennlinien für Leistungen, Wirkungsgrad und Haltedruckhöhe bzw. <i>NPSA</i> | 265 |
| 9.2.1.8 Besonderheiten schnellläufiger Strömungspumpen | 267 |
| 9.2.1.9 Kombination von Strömungspumpen | 270 |
| 9.2.1.10 Regelung von Strömungspumpen | 271 |
| 9.2.2 Kreiselverdichter | 272 |
| 9.2.2.1 Grundsätzliches | 272 |
| 9.2.2.2 Einfluss der Ansaugverhältnisse | 273 |
| 9.2.2.3 Instabilitäten (Strömungsabreißeln) | 275 |
| 9.2.2.4 Kennlinien mehrstufiger Verdichter | 278 |
| 9.3 Betriebsverhalten der Strömungskraftmaschinen | 278 |
| 9.3.1 Grundsätzliches | 278 |
| 9.3.2 Wasserturbinen | 279 |
| 9.3.3 Dampf- und Gasturbinen | 281 |
| 9.3.3.1 Vorbemerkungen | 281 |
| 9.3.3.2 Kegelgesetz | 281 |
| Teil II Turbomaschinenarten | 285 |
| 10 Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen) | 285 |
| 10.1 Grundsätzliches | 285 |
| 10.2 Kreiselpumpen | 285 |
| 10.2.1 Vorbemerkungen | 285 |
| 10.2.2 Laufradformen und Kenngrößen | 286 |
| 10.2.3 Wirkungsgrad | 288 |
| 10.2.4 Läuferkräfte | 290 |
| 10.2.4.1 Achsschub (Axialkraft) | 290 |
| 10.2.4.2 Radialkräfte | 295 |
| 10.2.5 Saugverhalten | 295 |
| 10.2.6 Ausführungsbeispiele | 296 |
| 10.2.6.1 Radial- und Halbaxialpumpen (Radform I und II) | 297 |
| 10.2.6.2 Diagonal- oder Schraubenpumpen (Radform III) | 300 |
| 10.2.6.3 Axial- oder Propellerpumpen (Radform IV) | 302 |
| 10.2.6.4 Mehrstufige Radialpumpen (Radform I und II) | 303 |
| 10.2.6.5 Sonder-Kreiselpumpen | 305 |
| 10.3 Kreiselverdichter | 319 |
| 10.3.1 Vorbemerkungen | 319 |
| 10.3.2 Besonderheiten | 320 |
| 10.3.2.1 Drehzahl | 320 |
| 10.3.2.2 Aufbau | 320 |
| 10.3.2.3 Geräuschenwicklung | 322 |
| 10.3.2.4 Thermodynamik der Verdichtung | 323 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 10.3.3 | Unterteilung | 329 |
| 10.3.4 | Druckstufung | 329 |
| 10.3.5 | Laufräder-Abstufung | 330 |
| 10.3.6 | Ausführungsbeispiele | 330 |
| 10.3.6.1 | Ventilatoren | 331 |
| 10.3.6.2 | Gebläse | 337 |
| 10.3.6.3 | Kompressoren | 340 |
| 10.4 | Hinweise für das Berechnen von Strömungspumpen | 348 |
| 10.4.1 | Grundsätzliches | 348 |
| 10.4.2 | Wellendurchmesser D_{We} | 351 |
| 10.4.3 | Radialrad-Abmessungen ($n_y \leq 0,12$) | 353 |
| 10.4.3.1 | Nabendurchmesser D_N | 353 |
| 10.4.3.2 | Saugmund | 353 |
| 10.4.3.3 | Überschlägiges Festlegen der Laufradkanäle | 354 |
| 10.4.3.4 | Stufenzahl i | 355 |
| 10.4.3.5 | Laufschaufelzahl z_{La} | 355 |
| 10.4.3.6 | Nachrechnen der Schaufelkanten | 355 |
| 10.4.4 | Diagonalrad-Abmessungen ($n_y = 0,12 \dots 0,48$) | 355 |
| 10.4.5 | Axialrad-Abmessungen ($n_y > 0,3$) | 355 |
| 11 | Übersicht über die Turbinen (Turbokraftmaschinen) | 356 |
| 11.1 | Grundsätzliches | 356 |
| 11.2 | Wasserturbinen | 356 |
| 11.2.1 | Vorbemerkungen | 356 |
| 11.2.2 | Gleichdruck- oder Aktionsturbinen | 359 |
| 11.2.2.1 | PELTON-, Becher-, Freistrahlg- oder Tangential-Turbinen | 359 |
| 11.2.2.2 | MICHELL-OSSBERGER- oder Durchströmturbine | 363 |
| 11.2.3 | Überdruck- oder Reaktionsturbinen | 364 |
| 11.2.3.1 | Gemeinsames | 364 |
| 11.2.3.2 | FRANCIS-Turbinen | 365 |
| 11.2.3.3 | Propeller- und KAPLAN-Turbinen | 368 |
| 11.2.4 | Berechnungshinweise | 372 |
| 11.3 | Dampfturbinen | 372 |
| 11.3.1 | Grundsätzliches | 372 |
| 11.3.1.1 | Dampfkraftprozess | 372 |
| 11.3.1.2 | Einteilung | 375 |
| 11.3.1.3 | Optimaler Energieumsatz | 375 |
| 11.3.1.4 | Stufungsarten | 377 |
| 11.3.1.5 | Wärmertickgewinn | 380 |
| 11.3.1.6 | Kennwerte | 381 |
| 11.3.1.7 | Betriebsgrößen | 381 |
| 11.3.1.8 | Grenzen | 385 |
| 11.3.1.9 | Vergleich mit anderen Turbomaschinen | 386 |
| 11.3.1.10 | Konstruktive Besonderheiten | 386 |
| 11.3.2 | Betriebsverhalten | 390 |
| 11.3.2.1 | Anfahren, Betrieb, Abstellen | 390 |
| 11.3.2.2 | Regelung | 390 |
| 11.3.3 | Ausführungsbeispiele | 392 |
| 11.3.3.1 | Vorbemerkungen | 392 |
| 11.3.3.2 | Gleichdruck- oder Aktionsturbinen | 392 |
| 11.3.3.3 | Überdruck- oder Reaktionsturbinen | 395 |

| | |
|---|------------|
| 11.3.4 Vergleich Gleichdruck – Überdruck | 398 |
| 11.3.5 Berechnungshinweise | 398 |
| 11.4 Gasturbinen | 401 |
| 11.4.1 Grundsätzliches | 401 |
| 11.4.1.1 Bezeichnungen | 401 |
| 11.4.1.2 Wirkungsweise | 401 |
| 11.4.1.3 Geschichtliches und Bedeutung | 401 |
| 11.4.2 Vergleich mit Dampfturbinen | 402 |
| 11.4.3 Aufbau | 402 |
| 11.4.3.1 Bestandteile | 402 |
| 11.4.3.2 Unterteilung | 402 |
| 11.4.4 Thermodynamik | 404 |
| 11.4.5 Besonderheiten | 406 |
| 11.4.5.1 Bauteile | 406 |
| 11.4.5.2 Werkstoffe | 411 |
| 11.4.5.3 Brennstoffe | 412 |
| 11.4.5.4 Lebensdauer | 413 |
| 11.4.6 Eigenschaften, Anwendung, Ausführungsbeispiele | 413 |
| 11.4.6.1 Vorbemerkungen | 413 |
| 11.4.6.2 Stationäre Anlagen | 414 |
| 11.4.6.3 Bewegliche Anlagen | 417 |
| 11.4.6.4 Sonderausführungen | 420 |
| 11.5 Windturbinen | 422 |
| 11.5.1 Vorbemerkungen | 422 |
| 11.5.2 Windangebot | 423 |
| 11.5.3 Aerodynamische Grundlagen | 423 |
| 11.5.3.1 Einführung | 423 |
| 11.5.3.2 Windenergie und Windleistung | 423 |
| 11.5.3.3 Windturbinenleistung | 423 |
| 11.5.4 Axialkraft | 424 |
| 11.5.5 Kennwerte | 424 |
| 11.5.6 Ausführungshinweise | 425 |
| 12 Antriebspropeller | 426 |
| 12.1 Vorbemerkungen | 426 |
| 12.2 Strömung, Geschwindigkeiten und Kräfte am Propellerblatt | 426 |
| 12.3 Vereinfachte Propellertheorie | 427 |
| 12.4 Kennzahlen | 429 |
| 12.5 Anwendungsbedingte Besonderheiten | 429 |
| 12.5.1 Flugzeugpropeller | 429 |
| 12.5.2 Schiffsschrauben | 430 |
| 12.5.3 Sonderbauarten | 430 |
| 13 Aggregate | 432 |
| 13.1 Vorbemerkung | 432 |
| 13.2 Funktionsweise | 432 |
| 13.3 Strömungskupplungen | 433 |
| 13.3.1 Aufbau und Arbeitsweise | 433 |
| 13.3.2 Kenngrößen und Eigenschaften | 433 |
| 13.3.3 Ausführungen und Anwendungen | 435 |

| | | |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 13.4 | Strömungsgetriebe | 436 |
| 13.4.1 | Unterschied Kupplung – Getriebe | 436 |
| 13.4.2 | Wirkungsweise | 436 |
| 13.4.3 | Kenngrößen | 438 |
| 13.4.4 | Kennlinien | 438 |
| 13.4.5 | Anwendungsbereiche | 439 |
| 13.4.6 | Ausführungsbeispiele | 439 |
| 14 | Literaturverzeichnis | 441 |
| 14.1 | Lehrbücher | 441 |
| 14.2 | Spezialwerke | 441 |
| 14.3 | Handbücher und Sonstige | 443 |
| 15 | Sachwortverzeichnis | 444 |