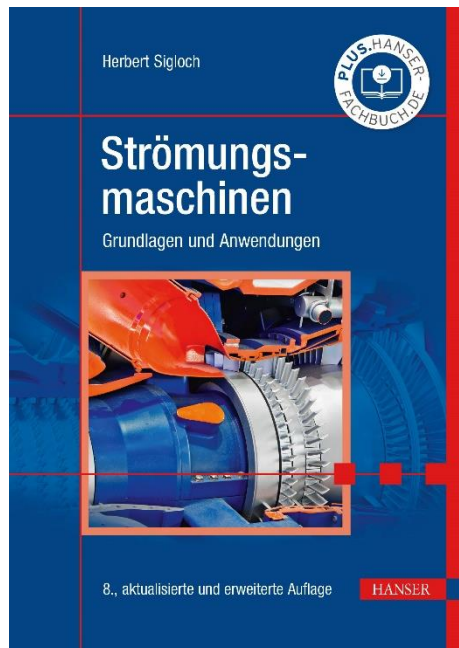


HANSER



Leseprobe

zu

Strömungsmaschinen

von Herbert Sigloch

Print-ISBN: 978-3-446-47677-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47696-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476776>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Dieses Buch richtet sich an Studierende des Maschinenbaues sowie Ingenieure, die im Strömungsmaschinenbau in Konstruktion und Fertigung tätig sind. Der Schwerpunkt ist deshalb auf die Gemeinsamkeiten aller Strömungsmaschinen in ihrer Wirkung und Berechnung gelegt, die im Teil I des Buches zusammengefasst sind. Auf den Aufbau und die Anwendung der einzelnen Strömungsmaschinen, die **Turbo-Arbeitsmaschinen** (Kreiselpumpen und -verdichter) und **Turbo-Kraftmaschinen** (Wasser-, Dampf-, Gas- und Windturbinen) sowie die **Antriebspropeller** und **Aggregate** (Strömungskupplungen und -wandler) wird in stark begrenztem Maße im Teil II des Buches eingegangen. Die Kreiselpumpen, mit denen fast jeder Ingenieur in seinem Berufsleben als Hersteller oder vor allem als Anwender in Kontakt kommt, werden schwerpunktmäßig betrachtet.

Das digitale Zusatzmaterial zu diesem Buch auf plus.hanser-fachbuch.de umfasst Arbeitstabellen (Stoffgrößen, Richtwerte, Diagramme), Ergänzungen, 70 Übungsbeispiele mit vollständigen Lösungen, Darstellungen ausgeführter Turbomaschinen verschiedener Hersteller und zugehörige Animationen.

Die Methode, die verschiedenen Strömungsmaschinentypen möglichst gemeinsam zu behandeln, rechtfertigt sich durch die Tatsache, dass alle Ausführungen auf dem gleichen Prinzip, der Anwendung des **Drallsatzes**, beruhen. Erst wenn die den Energiefluss mindernden, durch Reibung bedingten mechanischen Verluste, die immer der Bewegungsrichtung entgegen – also hemmend – wirken, in die Betrachtung einbezogen werden, was bei der technischen Anwendung immer notwendig ist, erfolgt eine Trennung in die Hauptgruppen **Arbeitsmaschinen** (Pumpen) und **Kraftmaschinen** (Turbinen). Um die fluidspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen, wird dann innerhalb der Hauptgruppen jeweils weiter in Strömungsmaschinen für inkompressible Fluide (Flüssigkeiten), die sog. **hydraulischen Strömungsmaschinen**, und Strömungsmaschinen für kompressible Fluide (Gase, Dämpfe), die sog. **thermischen Strömungsmaschinen**, unterschieden. Im Text werden ausschließlich genormte Formelzeichen, Symbole und Maßeinheiten verwendet und, wo immer möglich, vom Maßsystem unabhängige Größengleichungen.

Die Bezeichnungen, Kennzeichen und Kenngrößen bei den Strömungsmaschinen werden in der Fachwelt nicht einheitlich angewendet. Wie jeweils an der betreffenden Textstelle im Buch begründet wird, ist deshalb teilweise ein Abweichen von den Bezeichnungen des einschlägigen Fachschrifttums notwendig, um Durchgängigkeit der Terminologie und Einheitlichkeit der Bezeichnungen zu erreichen, was insbesondere für den Lernenden wichtig ist. Die Abweichungen wurden jedoch so gering wie möglich gehalten und irritieren den erfahrenen Ingenieur sicher nicht. Vor allem bei den Turbomaschinentypen ist die Nummerierung nicht der Strömung, sondern dem Druckniveau folgend vorgenommen.

Der Verfasser bemühte sich, Bilder von Maschinen moderner Konzeption gemäß dem neuesten Stand der Technik zu verwenden, und erweiterte entsprechend den Abschnitt Windturbinen. Da ältere, einfachere Konstruktionen die Charakteristika jedoch oft deutlicher zeigen und deshalb für eine erste Betrachtung übersichtlicher sind, wurde verschiedentlich bewusst auf solche Ausführungen zurückgegriffen.

Obwohl das Manuskript mit höchster Sorgfalt abgefasst und der Satz peinlich genau geprüft wurde, sind Fehler letztlich nicht gänzlich auszuschließen. Deshalb werden Hinweise, Anregungen sowie Verbesserungsvorschläge aller Art immer dankbar angenommen.

Dank gilt allen an den zugehörigen Stellen erwähnten Unternehmen, die Bildmaterial und/oder Informationen zur Verfügung stellten. Dem Carl Hanser Verlag und Frau Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg mit Team gebühren großer Dank für die gute Ausstattung des Buches und die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

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 | 27 |
| 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 Radialrotations Hohlräume | 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 Axialrotations Hohlräume | 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 Diagonlräder | 56 |
| 2.5.2.1 Strömungsverhältnisse | 56 |
| 2.5.2.2 Nabenverengung | 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 $Y_{Sch\infty}$ 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 | Affinitätsregeln und Kennziffern | 99 |
| 4.1 | Grundsätzliches | 99 |
| 4.2 | Ähnlichkeitstheorie | 99 |
| 4.2.1 | Vorbemerkungen | 99 |
| 4.2.2 | Ähnlichkeitsbedingungen | 99 |
| 4.2.3 | Affinitätsregeln | 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 (Laufgradkennzahlen) | 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 | <i>THOMA</i> -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 | Rückführeinrichtungen | 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 | Schaufungsverluste 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 (Strömungsabreißen) | 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 | Laufwerkformen 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 | Geräuschentwicklung | 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 | Gebälse | 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-, Freistrah- 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 | Wärmerückgewinn | 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 | 424 |
| 11.5.3.1 | Einführung | 424 |
| 11.5.3.2 | Windenergie und Windleistung | 424 |
| 11.5.3.3 | Windturbinenleistung | 424 |
| 11.5.4 | Axialkraft | 425 |
| 11.5.5 | Kennwerte | 425 |
| 11.5.6 | Ausführungshinweise | 425 |
| 12 | Antriebspropeller | 427 |
| 12.1 | Vorbemerkungen | 427 |
| 12.2 | Strömung, Geschwindigkeiten und Kräfte am Propellerblatt | 427 |
| 12.3 | Vereinfachte Propellertheorie | 428 |
| 12.4 | Kennzahlen | 430 |
| 12.5 | Anwendungsbedingte Besonderheiten | 430 |
| 12.5.1 | Flugzeugpropeller | 430 |
| 12.5.2 | Schiffsschrauben | 431 |
| 12.5.3 | Sonderbauarten | 431 |
| 13 | Aggregate | 433 |
| 13.1 | Vorbemerkung | 433 |
| 13.2 | Funktionsweise | 433 |
| 13.3 | Strömungskupplungen | 434 |
| 13.3.1 | Aufbau und Arbeitsweise | 434 |
| 13.3.2 | Kenngrößen und Eigenschaften | 434 |
| 13.3.3 | Ausführungen und Anwendungen | 436 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|------------|
| 13.4 | Strömungsgetriebe | 437 |
| 13.4.1 | Unterschied Kupplung – Getriebe | 437 |
| 13.4.2 | Wirkungsweise | 437 |
| 13.4.3 | Kenngößen | 439 |
| 13.4.4 | Kennlinien | 439 |
| 13.4.5 | Anwendungsbereiche | 440 |
| 13.4.6 | Ausführungsbeispiele | 440 |
| 14 | Literaturverzeichnis | 442 |
| 14.1 | Lehrbücher | 442 |
| 14.2 | Spezialwerke | 442 |
| 14.3 | Handbücher und Sonstige | 444 |
| 15 | Sachwortverzeichnis | 445 |

Teil I Grundlagen

1 Allgemeines

1.1 Begriffe, Einheiten, Abkürzungen

Jeder Zweig der Wissenschaft und Technik prägt seine eigene Sprache. So auch die Strömungsmaschinen. Die wichtigsten Begriffe, Einheiten und Formelzeichen sind genormt. Die Normen, die das Gebiet der Strömungsmaschinen betreffen und berühren, sind in Tafel 4 (digitales Zusatzmaterial) gelistet.

1.1.1 Begriffe

Häufig verwendete Begriffe und deren Definition sind:

Absolutgeschwindigkeit ... Strömungsgeschwindigkeit im Absolutströmungsfeld, also in Bezug auf den ruhenden Beobachter.

Absolutströmung ... Auf das ruhende Koordinatensystem bezogenes, also vom ruhenden Beobachter gesehenes Strömungsfeld.

Anströmgeschwindigkeit (ungestörte) ... Zuströmgeschwindigkeit in so weitem (theoretisch unendlichem) Abstand vor dem Schaufelgitter, dass sie von diesem noch nicht beeinflusst wird.

Außenkranz ... Axialsymmetrische Schale (Kreising), an der die Schaufeln außen enden.

Austrittskante ... Schaufelkante, an der die Strömung die Schaufel (den Schaufelkanal) verlässt.

Axialschnitt ... Spur (Zirkularprojektion) der Schaufeloberfläche in einer Axialebene.

Breite ... Lichte Weite zwischen Außen- und Innenkranz des Rades.

Brettschnitt (Schreinerschnitt, Achsnormalschnitt) ... Spur der Schaufeloberfläche in einer Ebene senkrecht zur Maschinenachse.

Deckscheibe ... seitliche Abdeckscheibe der Laufschaufeln und somit des Laufrades.

Druckseite (-kante) ... Schaufelseite (-kante), an welcher der höhere statische Druck herrscht.

Durchflussströmung ... Relativ-Strömung durch das Laufrad, die den Durchsatz (Volumenstrom) bewirkt.

Eintrittsseite (-kante) ... Schaufelseite (-kante), an der das Fluid einströmt.

Fluid ... Sammelbegriff für inkompressible Medien (Flüssigkeiten) sowie kompressible Medien (Gase, Dämpfe), auf welche die Gesetze der Fluidmechanik und Thermodynamik anwendbar sind. Diese volumenbeständigen (tropfbaren) und nichtvolumenbeständigen (nichttropfbaren) Fluide werden auch als NEWTON'sche Fluide bezeichnet, da sie dem NEWTON'schen Fluidreibungsgesetz folgen.

Flussfläche ... Zusammenfassung jeweils aller Flusslinien, die in einer zur Schaufelfläche parallelen Fläche liegen. Die Schaufelfläche ist daher ebenfalls eine Flussfläche.

Flusslinie ... Relativstrombahn jedes Fluidteilchens durch das Rad, d. h. die Fluidteilchenbahn, welche ein sich mit dem Rad mitbewegend angenommener Beobachter sieht. Daher auch Spur der Schaufelfläche.

Flutfläche ... Zirkularprojektion der Flussfläche und deshalb auch der Schaufelfläche.

Flutlinie ... Zirkularprojektion der Flusslinie und damit der Spur der Schaufelfläche.

Gerades (ebenes) Gitter ... Theoretisch unendlich viele, in einer Reihe angeordnete, kongruente Profile, die in Richtung der Gitterachse parallel zueinander verschoben sind und in konstantem Abstand (Teilung) zueinander stehen.

Geschwindigkeitsdreieck (-plan) ... Geometrische Darstellung der vektoriellen Zusammenfassung der Geschwindigkeiten in einem Laufrad, insbesondere an den Schaufelkanten (Saugkante und Druckkante).

Gitterachse ... Gerade Verbindungslinie durch die Mittelpunkte der Profilschnen eines geraden Gitters.

homolog ... gleichliegend, gleichlaufend, übereinstimmend, entsprechend.

Inducer ... Vorsatzlaufrad zur Verbesserung des Saugverhaltens von Pumpen.

Innenkranz ... Axial-, d. h. rotationssymmetrische Schale, an der die Schaufeln eines Schaufelrades innen enden.

Kanalwirbel (Relativwirbel) ... Sekundäre Zirkulationsströmung in den Schaufelkanälen, ausgelöst durch unterschiedliche Drücke in den Schaufelzwischenräumen, d. h. zwischen Schaufelvorder- und -rückseiten.

koaxial ... auf gleicher Achse.

kohärent ... zusammenhängend.

Kreisbogenprojektion ... Zirkularprojektion.

Kreisgitter ... Reihe von *theoretisch unendlich vielen*, unendlich dünnen und *praktisch von endlich vielen* kongruenten Profilen, die durch Drehung um die Maschinenachse (Teilung) auseinander entstanden gedacht werden können.

Lauftrad ... Das auf der Welle befestigte und sich mit der Umfangsgeschwindigkeit drehende Schaufelrad.

Leitrad (Leitvorrichtung) ... die fast immer ruhende und deshalb im Maschinen-Gehäuse befestigte, beschaufelte oder schaufellose Vorrichtung zur Fluidstromführung und -druckumsetzung.

Lichte Weite eines Schaufelkanals ... Abstand zwischen Vorder- und Rückseite zweier benachbarter Schaufeln.

Meridianschnitt (Hauptschnitt) ... Radschnitt durch die Achse in Achsrichtung und deshalb in der Aufrissebene dargestellt.

Palisade ... Hindernisse dicht hintereinander.

Rad-Aufriss ... Radansicht senkrecht zur Achse (Quersicht).

Rad-Grundriss ... Radansicht in Achsrichtung (Axialsicht), wenn unterhalb des Aufrisses dargestellt. Meist bei Maschine mit senkrechter Welle verwendet.

Rad-Seitenriss ... Radansicht in Achsrichtung (Axialsicht), wenn seitlich vom Aufriss dargestellt. Hauptsächlich bei waagrechter Wellenlage verwendet.

Relativströmung ... Strömungsfeld in den Schaufelkanälen, bezogen auf das sich drehende Lauftrad, also das Strömungsbild, welches von einem gedachten Beobachter gesehen wird, der sich mit dem Lauftrad dreht.

Relativwirbel ... Kanalwirbel.

Schaufel-Rückseite ... Schaufelseite, auf welcher der niedrigere Druck herrscht.

Schaufel-Vorderseite ... Schaufelseite, auf welcher der höhere Druck herrscht.

Saugkante ... Laufschaufelkante im Gebiet geringeren Druckes, d. h. der Saugseite.

Saugseite ... Schaufelaußenbereich im Gebiet mit dem niedrigeren statischen Druck.

Schallgeschwindigkeit, charakteristische ...

Durch Elastizität von Fluid und Materialwänden (Rohrwände usw.) innerhalb einer Rohrleitung bedingte Geschwindigkeit der Fortpflanzung von zeitlichen Druckänderungen.

Spezifische Energie ... Energie je Masseneinheit, d. h. die in der Strömungsmaschine umgesetzte Energie, bezogen auf die Masse des Fluids.

Spezifische Größen ... Größen, welche auf die Massen- bzw. Massenstromeinheit bezogen sind, also Quotient von Größe und Masse bzw. Massenstrom.

Spezifische Leistung ... Leistung je Massenstromeinheit, d. h. der Quotient aus der in der Maschine umgesetzten Leistung und dem durchfließenden Fluid-Massenstrom.

Spezifischer Drallstrom ... Drallstrom bezogen auf die Masseneinheit, d. h. Quotient von Drallstrom und Masse.

Stufe ... Kombination von einem Lauftrad mit einem Leitrad (Leitvorrichtung).

Teilung ... Abstand zweier benachbarter Profilschnitte (Schaufelschnitte) auf gleichem Radius; bei geraden Gittern somit der konstante Abstand entsprechender, aufeinander folgender Profile.

Teilungsverhältnis ... Quotient aus Gitterteilung und Profillänge (-tiefe).

Umlenkdreieck ... Geschwindigkeitsdreieck.

Verdrängungsströmung ... Drehströmung des Kanalwirbels, verursacht durch den Druckunterschied in jedem Lauftradkanal. Liefert keinen Beitrag zur Durchsatzströmung.

Wirbel ... Örtliche Drehströmung (Fluidrotation).

Zirkularprojektion (Kreisbogenprojektion) ... zeichnerisches Darstellungsverfahren, bei dem alle Punkte im Rad-Seitenriss um die Achse in die Aufrissebene (senkrechte Ebene) gedreht und dann orthogonal projiziert werden, ergibt den Meridianschnitt oder Aufriss des Rades.

Weitere Begriffe werden an jeweils günstiger Stelle eingeführt und definiert bzw. erklärt.

1.1.2 Einheiten

Alle im Strömungsmaschinenbau verwendeten dimensionsbehafteten Größen (Länge, Zeit, Masse,

Kraft, Impuls, Drall, Energie, Leistung u. dgl.) lassen sich nach dem *Internationalen Einheitensystem* (SI ... *Système International d'Unités*) ausdrücken – sog. mks-System – durch

| die SI-Basiseinheiten | für die Grundgrößen |
|----------------------------|---------------------|
| Meter m | Länge L |
| Kilogramm kg ¹⁾ | Masse m |
| Sekunde s | Zeit t |
| Kelvin K | Temperatur T |

¹⁾ bzw. Gramm g

Alle anderen SI-Einheiten sind von den *Basiseinheiten* abgeleitet (DIN 1301 und DIN 58 122).

Außer Geschwindigkeit, Beschleunigung und Leistung werden alle *auf die Zeit bezogenen*, d. h. nach der Zeit differenzierten Größen mit dem *Wortzusatz*

„Strom“ versehen und durch einen hoch gestellten Punkt gekennzeichnet. Zum Beispiel:

V Volumen L Drall
 \dot{V} Volumenstrom \dot{L} Drallstrom

Wichtige Größen mit von den Basiseinheiten abgeleiteten SI-Einheiten sind im Strömungsmaschinenbau:

| Größe | SI-Einheit |
|------------------------|--|
| Kraft | Newton $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ |
| Druck | Pascal $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ Bar $\text{bar} = 10 \text{ N}/\text{cm}^2$ |
| Energie, Arbeit, Wärme | Joule $J = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ |
| Leistung | Watt $W = \text{J}/\text{s} = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$ |
| Spez. Drallstrom | $\text{m} \cdot \text{m}/\text{s} = \text{m}^2/\text{s}$ |
| Spez. Energie | $\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} = \text{m}^2/\text{s}^2$ |
| Spez. Leistung | $\frac{W}{\text{kg}/\text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ |

1.1.3 Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Zusammenstellung der wichtigsten verwendeten Formelzeichen und Symbole nach DIN 1304 Teil 1 und Teil 5:

Geometrische Größen und Mengen

| Symbol | Größe |
|-----------------|---|
| x, y, z | Rechtwinklige Koordinaten |
| r, φ | Polarkoordinaten |
| r, φ, z | Zylinder-Koordinaten |
| s, x | Weg bzw. Koordinate längs Strömungsrichtung, Schaufeldicke, Wanddicke |
| z | Ortshöhe |
| a | Schaufelkanalweite |
| A | Fläche, Querschnitt |
| B, b | Breite, lichte Weite, Schaufellänge |
| D, d | Durchmesser |
| H | Höhe, geodätischer Höhenunterschied, Fallhöhe, Förderhöhe |
| I_p | Polares Flächenträgheitsmoment |
| L, l | Länge, Profillänge |
| m | Menge, Masse |
| R, r, ϱ | Radius, Halbmesser |
| s | Schaufeldicke |
| S | Statisches Moment (1. Ordnung) der mittleren Flutlinie |
| U | Umfang |

| Symbol | Größe |
|----------|---|
| V | Volumen |
| W_p | Polares Widerstandsmoment |
| α | Leitschaufelwinkel, Absolutströmungsrichtung, d. h. Winkel der Absolutgeschwindigkeit c gegenüber der positiven Umfangsrichtung (Umfangsgeschwindigkeit u), also Winkel zwischen \vec{c} und \vec{u} . |
| β | Laufschaukelwinkel, Relativströmungsrichtung, d. h. Winkel der Relativgeschwindigkeit w gegenüber der negativen Umfangsrichtung (u -Richtung), also Winkel zwischen \vec{w} und $-\vec{u}$. |
| δ | Anstellung, d. h. Anstellwinkel |
| σ | Schaufelerstreckung am Umfang bzw. längs des Parallelkreises |
| v_N | Nabenverhältnis v_N ; $D_{(i)}/D_{(a)}$; D_N/D_{SM} |
| i | Stufenzahl |
| j | Flutzahl |
| p | Polpaarzahl von elektrischen Maschinen |
| z | Schaufelzahl |

Thermische und JOULE'sche Größen

| Symbol | Größe |
|--------------------------|------------------|
| t, T | Temperatur |
| h, H | Enthalpie |
| $\Delta h_v, \Delta H_v$ | Verlustenthalpie |
| q, Q | Wärme |
| s, S | Entropie |

| Symbol | Größe |
|------------|-----------------------------|
| u, U | Innere Energie |
| w_G, W_G | Gasarbeit |
| w_t, W_t | technische Arbeit des Gases |
| x | Dampfgehalt |

Bemerkung: Kleinbuchstaben kennzeichnen spezifische Werte, d. h. auf die Masseneinheit bezogene Größen.

Kinematische Größen

| Symbol | Größe |
|--------|---|
| a | Schallgeschwindigkeit, Beschleunigung |
| c | Strömungsgeschwindigkeit, Absolutgeschwindigkeit des strömenden Fluids, d. h. Strömungsgeschwindigkeit gegenüber der ruhenden Umgebung |
| c_m | Meridiankomponente (Durchsatzkomponente) der Absolutgeschwindigkeit, also der Absolutströmung |
| c_u | Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit |
| c_L | LAVAL-Geschwindigkeit |
| f | Frequenz |
| n | Drehzahl |
| u | Umfangsgeschwindigkeit (Führungsgeschwindigkeit) |
| w | Relativgeschwindigkeit, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids in Bezug auf das sich drehende Rad (Lauftrad), also Fluidgeschwindigkeit, die von einem |

| Symbol | Größe |
|-----------|--|
| | mit dem Rad umlaufenden Beobachter gesehen würde |
| w_m | Meridiankomponente der Relativgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeitskomponente des Relativströmungsfeldes in der Meridianebene |
| w_u | Umfangskomponente der Relativgeschwindigkeit, d. h. Geschwindigkeitskomponente der Relativströmung in Umfangsrichtung, also tangential |
| Γ | Zirkulation |
| \dot{V} | Volumenstrom, Volumen-Durchsatz, -Durchfluss, Förderstrom |
| \dot{m} | Mengenstrom, Massenstrom, Mengen-, Massen-Durchsatz, Mengen-, Massen-Durchfluss |
| δ | Grenzschichtdicke |
| t | Zeit |
| ω | Winkelgeschwindigkeit |

Bemerkungen: Vektoren werden mit Vektorpfeil auf dem Symbolbuchstaben gekennzeichnet, z. B. \vec{c} , \vec{u} , \vec{w} usw. Das Symbol ohne Vektorpfeil bedeutet grundsätzlich den Betrag der Größe, also $c = |\vec{c}|$, $u = |\vec{u}|$, $w = |\vec{w}|$ usw. Dies gilt auch für die Vektoren bei kinetischen Größen wie Impuls, Drall usw. Mittelwerte werden durch einen Querstrich auf dem Symbol gekennzeichnet, z. B. \bar{c} , \bar{w} , \bar{r} usw.

Kinetische Größen

| Symbol | Größe |
|--------|--|
| E | Elastizitätsmodul |
| F | Kraft (allgemein) |
| F_A | Dynamische Auftriebskraft (kurz Auftrieb), Querkraft |
| F_a | Axialkraft, Achskraft |
| F_G | Gewichtskraft |
| F_n | Normalkraft |
| F_t | Tangentialkraft |
| F_u | Umfangskraft |
| F_W | Widerstandskraft (kurz Widerstand) |
| K | Festigkeitskennwert |
| M | Moment (allgemein) |
| M_b | Biegemoment |
| T | Drehmoment, Torsionsmoment |

| Symbol | Größe |
|-----------|---|
| $NPSH$ | $NPSH$ -Wert (Net Positive Suction Head) |
| I | Impuls |
| \dot{I} | Impulsstrom |
| L | Drall, Impulsmoment |
| \dot{L} | Drallstrom, Impulsmomentstrom |
| E | Energie |
| \dot{E} | Energiestrom \equiv Leistung |
| p | Leistung |
| W | Arbeit ($W = m \cdot w$) |
| w | spezifische Arbeit ($w \equiv Y$) |
| Y | Spezifische Energie, (Arbeit), Spezifische Leistung (allgemein) |
| | Spezifische Stützenarbeit |

| Symbol | Größe |
|-------------------------------|---|
| ΔY | Spezifische Stufenarbeit |
| ΔY_{Sch} | Spezifische Schaufelararbeit bei endlicher Schaufelzahl |
| $\Delta Y_{\text{Sch}\infty}$ | Spezifische Schaufelararbeit bei unendlicher Schaufelzahl |
| ΔY_{Sp} | Spezifische Spaltdruckarbeit |
| ΔY_p | Spezifische Druckarbeit, die in einer verlustfreien (theoretischen) Maschine für eine bestimmte Druckerhöhung aufgewendet werden muss bzw. bei einer bestimmten Druckabsenkung frei wird. Sie ist deshalb identisch der isentropen Arbeit, der isentropen Enthalpiedifferenz, also $\Delta Y_p \equiv \Delta h_s$ |
| Y_H | Spezifische Halteenergie |
| Z | Spezifische Verlustenergie (allgemein), kurz spezifische Verluste |
| p | Druck (allgemein), Flächenpressung |
| p_b | Barometerdruck (Atmosphärendruck) |
| p_D | Druckseiten(-stutzen)-Druck |
| p_{Da} | Dampfdruck, Siededruck |
| p_E | Polpaarzahl von Elektromaschinen |
| p_S | Saugdruck, Saugseiten(-stutzen)-Druck |
| p_{Stat} | Statischer Druck |
| p_{dyn}, q | Dynamischer Druck, Staudruck |
| p_{ges} | Gesamtdruck |
| $p_{\text{ü}}$ | Überdruck |
| p_{u} | Unterdruck |

| Symbol | Größe |
|------------------------|------------------------------|
| H | Druckhöhe, Höhe |
| H_H | Halteedruckhöhe |
| σ | Normalspannung (allgemein) |
| σ_b | Biegespannung |
| σ_z | Zugspannung |
| τ | Schubspannung, Scherspannung |
| τ_t | Torsionsspannung |
| η | Wirkungsgrad (allgemein) |
| η_A | Anlagenwirkungsgrad |
| η_C | CARNOT-Wirkungsgrad |
| η_e | Effektiver Wirkungsgrad |
| η_G | Generatorwirkungsgrad |
| η_g | Gütegrad |
| η_{ges} | Gesamtwirkungsgrad |
| η_h | Hydraulischer Wirkungsgrad |
| η_i | Innerer Wirkungsgrad |
| η_m | Mechanischer Wirkungsgrad |
| η_M | Motorwirkungsgrad |
| $\eta_P, \eta_{e,P}$ | Pumpenwirkungsgrad |
| η_{RL} | Rohrleitungswirkungsgrad |
| η_{Sch} | Schaufelwirkungsgrad |
| $\eta_{\text{Sch,La}}$ | Laufschaufelwirkungsgrad |
| $\eta_{\text{Sch,Le}}$ | Leitschaufelwirkungsgrad |
| $\eta_T, \eta_{e,T}$ | Turbinenwirkungsgrad |
| η_{therm} | thermischer Wirkungsgrad |
| λ_L | Liefergrad |

Bemerkung: Bei den Größen Y , ΔY und Z handelt es sich immer um spezifische Energien bzw. spezifische Leistungen (die gleichwertig sind), auch wenn dies nicht besonders erwähnt wird.

Verhältnisgrößen (Beiwerte und Kenngrößen)

| Symbol | Größe |
|------------------|---|
| k | Beiwert |
| k_N | Nabenverengungsfaktor |
| k_M | Arbeitsminderungszahl |
| K_{Sch} | Schaufelfaktor |
| n_y, n_q | Schnellläufigkeit, spezifische Drehzahl (Radformkennzahl) |
| p | Arbeitsminderungszahl |
| r | Reaktionsgrad |
| s | Schlupf |
| S | Schallkennzahl (Schallzahl) |
| S_y | Saugkennzahl |
| δ | Durchmesserziffer |
| δ_r | Relative Drallzahl |
| ε | Gleitzahl, Beaufschlagungsgrad |
| ε | Einlaufziffer, Durchflusszahl |
| ε^2 | Auslasswert |
| ζ | Widerstandsbeiwert (für Innenströmungen) |
| ζ_A | (dynamischer) Auftriebsbeiwert |
| ζ_M | Momentenbeiwert |

| Symbol | Größe |
|-----------------------|---|
| ζ_w | Widerstandsbeiwert (für Außenströmungen) |
| λ | Leistungszahl |
| λ | Verlustbeiwert, Rohrreibungsbeiwert |
| ν | Durchmesser-, Drehzahlverhältnis |
| Π | Druckverhältnis |
| σ | Schnelllaufzahl (nach KELLER) |
| τ | Drosselzahl |
| τ | Schaufelverengungsfaktor |
| φ | Lieferziffer |
| φ_{La} | Laufschaufelbeiwert (Geschwindigkeitsbeiwert) |
| φ_{Le} | Leitschaufelbeiwert (Geschwindigkeitsbeiwert) |
| ψ | Druckziffer |
| ψ' | Schaufelwinkelbeiwert |
| Lz | Laufzahl |
| Ma | MACH-Zahl |
| Re | REYNOLDS-Zahl |
| Th | THOMA-Zahl |
| X | PARSONS-Zahl |

Bemerkung: Für den Wortzusatz „Beiwert“ sind auch die Bezeichnungen Zahl oder Koeffizient üblich, z. B. Laufschaufelbeiwert, Laufschaufelzahl oder Laufschaufelkoeffizient.

Stoffwerte

| Symbol | Größe |
|--------|--|
| c_p | Spezifische Wärme bei konstantem Druck |
| c_v | Spezifische Wärme bei konstantem Volumen |
| M | Molmasse |
| R | Gaskonstante |
| Z | Realgasfaktor |

| Symbol | Größe |
|----------|-------------------------|
| f | Freiheitsgrade |
| κ | Isentropenexponent |
| ρ | Dichte |
| η | Dynamische Viskosität |
| ν | Kinematische Viskosität |

Indizes, Abkürzungen

| Index | Bedeutung |
|-----------------|--|
| 0 | Stelle kurz außerhalb der Saugseite (-kante) des Laufrades, an der die Strömung als ungestört betrachtet wird |
| 1 | Stelle kurz innerhalb der Laufrad-Saugseite (-kante) |
| 2 | Stelle kurz innerhalb der Laufrad-Druckseite (-kante) |
| 3 | Stelle kurz außerhalb der Druckseite (-kante) des Laufrades, also im Spalt zwischen Lauf- und Leitrad, wo die Strömung als unbeeinflusst (von Schaufeln) betrachtet wird |
| 4 | Stelle kurz außerhalb des Leitradendes mit dem niedrigen Druckniveau |
| 5 | Stelle kurz innerhalb des Leitradendes mit dem niedrigeren Druck |
| 6 | Stelle kurz innerhalb des Leitradendes, an welcher der höhere Druck herrscht |
| 7 | Stelle kurz außerhalb des Leitradendes, an welcher der höhere Druck herrscht, wobei ungestörte Strömung angenommen |
| I, II, III usw. | Stufenummerierung, I., II., III. Stufe usw., z. B. $c_{2u,II}$ Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit kurz innerhalb der Druckkante der II. Stufe Bemerkung: Bei einstufigen Maschinen entfällt die Stufenbezeichnung |
| ∞ | Unendliche Schaufelzahl, d. h. unendlich viele, unendlich dünne Schaufeln und deshalb schaufelkongruente Strömung |
| ∞ | Ungestörte Strömung, d. h. in sehr großem, theoretisch unendlich großem Abstand von Körper oder Profil |
| \sim | Kopf-Zeiger, Tilde |
| A | Arbeit, dynamischer Auftrieb, Anlage |
| As | Austritt |
| At | Austausch |
| C | CARNOT |
| D | Druckstutzen |
| Da | Dampf |
| DL | Druckleitung |
| DS | Druckseite, Druckbereich |
| Dü | Düse |

| Index | Bedeutung |
|-------|---|
| E | Entspannung |
| F | Fließgrenze, Fluid, Flüssigkeit |
| Fl | Flüssigkeit |
| G | Gas, Generator |
| K | Kanal, Kompressor (Verdichtet) |
| Ke | Kessel (Dampferzeuger) |
| L | LAVAL, Leitung |
| La | Laufrad |
| Le | Leitrad |
| Lu | Luft |
| M | Maschine, Minder, Mittel, Mitten |
| N | Nabe, Nutz |
| P | Pumpe, Propeller |
| R | Rohrwand, Rohrmaterial, Reibung |
| RL | Rohrleitung |
| S | Saugstutzen |
| SL | Saugleitung |
| SS | Saugseite, Saugbereich |
| Sch | Schaufel, Schaufelungs- |
| SM | Saugmund |
| Sp | Spalt |
| Spir | Spirale |
| St | Stoß, Stafflungs-, Stufe |
| Str | Strahl |
| T | Turbine, isotherm ($T = \text{konst}$) |
| V | Verlust, Ventilation, Verdichtet, Vergleich |
| W | Widerstand |
| Wa | Wasser |
| Wd | Wand |
| We | Welle |
| WP | Wendepunkt |
| Za | Zapfen, Lagerzapfen |
| a | Austritt, außen, aus, ab, Anfang |
| ax | axial |
| b | Barometer |
| c | kompressibel, charakteristisch |
| dyn | dynamisch |
| e | Eintritt, effektiv, ein, Ende |
| ges | gesamt |

| Index | Bedeutung |
|-------|---|
| i | indiziert, innerer, innen |
| ic | inkompressibel |
| id | ideal |
| kin | kinetisch |
| kr | kritisch |
| m | Meridian, Meridian-, Axialrichtung, Meridian-, Axialebene, mechanisch |
| n | normal, Normalrichtung |
| p | bei konstantem Druck |
| pol | polytrop |
| pot | potenziell |
| r | Reibung, radial |
| rel | relativ |
| s | isentrop ($s = \text{konst}$) |

| Index | Bedeutung |
|-------|--|
| stat | statisch |
| t | tangential, Tangentialrichtung, Tangentialebene; Teilung, auf Teilung bezogen. |
| th | theoretisch |
| therm | thermisch |
| tot | total |
| u | Umfangs-, Tangentialrichtung, -ebene |
| v | bei konstantem Volumen |
| vorh | vorhanden |
| verf | verfügbar |
| x | beliebige Stelle, variable Stelle |
| Z, z | Schaufeln, Zug, Zunge, bei der Zunge, zu |
| zul | zulässig |

Hinweise

- Generell gilt für das Anordnen von Indizes: Alle Indizes stehen in gleicher Höhe und sind durch Komma – bei Mehrfachindizes – getrennt.
- Der Indexzusatz m für Meridianrichtung und u für Umfangsrichtung werden entgegen der Generalregelung nicht durch Komma getrennt.

Beispiele: c_{2u} , c_{2m} , w_{2m} , w_{2u} , w_{1m} , w_{1u} , c_{0u} , c_{0m} .

- Zweitindizes (a), (m), (i) kennzeichnen die Fluss- und Flutlinien, z. B. $u_{2,(a)}$, $\beta_{2,(m)}$, $c_{2m,(i)}$, $c_{1m,(m)}$, $w_{2m,(m)}$, $c_{0u,(i)}$, $D_{1,(m)}$ usw.

Dabei bedeuten:

- (a) äußere Fluss- und Flutlinie
- (m) mittlere Fluss- und Flutlinie
- (i) innere Fluss- und Flutlinie

- Im Allgemeinen wird der Zweitindex (m) weggelassen, da folgende Vereinbarung gilt: Alle nicht besonders gekennzeichneten Größen betreffen die mittlere Fluss- bzw. Flutlinie, z. B. $c_{2m} \equiv c_{2m,(m)}$, $w_{1u} \equiv w_{1u,(m)}$, $\beta_2 \equiv \beta_{2,(m)}$ usw.

Dagegen sind alle Werte, welche sich auf die innere oder äußere Fluss- und Flutlinie beziehen, stets, wie zuvor aufgeführt, zu kennzeichnen, also $u_{2,(a)}$, $w_{2m,(a)}$, $c_{1u,(i)}$ usw.

- Wichtige Unterscheidungen:
Index m bedeutet Meridianschnitt
Index (m) bezieht sich auf mittlere Flutlinie
Index M bedeutet Mitte, z. B. Kanalmitte.
- Bei Axialrädern, jedoch auch bei Radialrädern, beziehen sich Größen ohne Fußzahl immer auf den äußeren Laufradumfang, d. h. den mittleren Außendurchmesser des Laufrades.

Bei Radialrädern ist dies die Fußzahl 2, bzw. exakter 2,(m), die verschiedentlich weggelassen wird.

Bei Axialrädern wird, falls eindeutig hervorgeht, um was es sich handelt, der Zweitindex (a) weggelassen. Dann ist somit bei Radialrädern z. B. $D \equiv D_2 \equiv D_{2,(m)}$, $u \equiv u_2 \equiv u_{2,(m)}$, bei Axialrädern $D \equiv D_{(a)}$, $u \equiv u_{(a)}$.

Um jede Verwechslung auszuschließen, muss jedoch bei Axialrädern eindeutig hervorgehen, dass es sich bei den indexlosen Größen tatsächlich um solche am Laufrad-Außenumfang handelt. Meist erhalten nämlich auch bei Axialrädern die Größen D und u am mittleren Flügelradius (Flutlinie (m)) keine Indizes. Notwendig ist deshalb, bei Axialrädern eindeutig zu klären, auf welche Flutlinie sich die Größen beziehen.

1.2 Aufgabe und Bedeutung

Strömungsmaschinen sind Maschinen zur Energieumwandlung. Sie formen entweder kinetische Energie in potenzielle (Pumpen) oder potenzielle bzw. thermische in kinetische (Turbinen) um.

Bei der einen Hauptgruppe, den **Arbeitsmaschinen** oder **Pumpen**, wird die von der Antriebsmaschine über die Welle eingeleitete *Drehenergie* innerhalb der Maschine auf das durchströmende Fluid übertragen und von diesem als *Druckenergie* bei Gasen oder *Lagenenergie* bei Flüssigkeiten gespeichert. Das Fluid wird somit durch die Pumpe auf ein höheres Energieniveau gebracht, d. h. von einem Gebiet niedrigeren Druckes oder Ortshöhe in ein Gebiet höheren Druckes und/oder Ortshöhe; oft beides.

Bei der anderen Gruppe, den sog. **Kraftmaschinen** oder **Turbinen**, wird dem durch die Maschine kontinuierlich strömenden Fluid von der Natur bereitgestellte Energie teilweise entzogen und über die Welle nach außen als Drehenergie abgeführt, die dann meist ein Generator in Elektrizität umsetzt. Bei den Wasserturbinen kommt dabei die zugeführte Energie aus der Lagenenergie, einer Form der potenziellen Energie. Bei den Dampf- und Gasturbinen wird die Energie des Brennstoffes, also chemische oder Atomkern-Energie, nach der Freisetzung (Verbrennung bzw. Kernspaltung) sowie Übertragung der frei gewordenen Wärme auf ein Fluid über einen thermodynamischen Prozess teilweise in mechanische Energie umgewandelt. Danach wird sie auf den Maschinenläufer übertragen und wieder meist einem Elektrogenerator zugeführt, der nach einem weiteren Transformationsvorgang elektrische Energie abgibt.

Das Medium kann bei Turbinen entweder im „Kreis“ zirkulieren, dem sog. **geschlossenen Prozess**, oder von der Umgebung an der einen Seite in die Maschine ein- und an der anderen Seite wieder ausströmen, d. h. in einem **offenen Prozess** arbeiten. Beim geschlossenen Prozess arbeitet daher immer das gleiche Medium, während es beim offenen ständig neues ist. Der geschlossene Prozess wird meist bei Dampfturbinen, der offene bei Gas- und Wasserturbinen angewendet.

Die Energieumwandlungen sind alle mit mehr oder weniger großen Verlusten verbunden, sodass am Ende der **Energiekette** selten mehr als 50 % der Ausgangsenergie, der sog. **Primärenergie**, noch technisch nutzbar zur Verfügung stehen. Der Hauptverlust entsteht beim thermodynamischen Kreisprozess, der durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik physikalisch festgelegt ist. Energieumwandlungsverfahren, die keinen thermodynamischen Kreisprozess erfordern, bei denen die Primärenergie also schon in mechanischer Form vorliegt, wie dies bei Wasserkraftanlagen der Fall ist, erreichen deshalb Wirkungsgrade um etwa 90 %.

Die Energietechnik kann in ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung nicht überschätzt werden. Sie ist Voraussetzung für jedes wirtschaftliche Handeln und Produzieren der Industriegesellschaft. Ohne Energie ist in einer modernen Volkswirtschaft keine industrielle und landwirtschaftliche Produktion und somit auch kein Verkehrswesen möglich.

Die Grundlage der elektrischen Energieversorgung in Deutschland sind **Wärmeleistungswerke** mit einem Anteil von noch ca. 60 % fallend an der öffentlichen Elektrizitätsbereitstellung. In solchen Wärmeleistungswerken wird, wie erwähnt, die thermische Energie des in einem **fossil** (Kohle, Erdöl, Erdgas) oder **fissil** (Kernspaltung, später, falls technisch möglich, auch Kernfusion) beheizten „Kessel“ erzeugten Wasserdampfes zu meist etwas mehr als einem Drittel (bis ca. 50 %) in elektrischen Strom umgesetzt.

Die sog. **Wasserkraft**, die von topographischen Gegebenheiten abhängt, hat in Deutschland an der öffentlichen Stromversorgung nur einen Anteil von unter 8 %, in der Schweiz etwa 60 %, Österreich $\approx 70\%$ und Norwegen fast 100 %. Das weltweit vorhandene hydraulische Potenzial ist bisher jedoch nur zu etwa 16 % genutzt, USA $\approx 20\%$, Europa insgesamt $\approx 30\%$, Österreich $\approx 40\%$, Schweiz und Deutschland $\approx 70\%$. Begründet ist die relativ geringe weltweite Nutzung zum einen in den enormen Investitionen, die für die Erstellung von Wasserkraftanlagen notwendig sind, und zum anderen durch die geographisch bedingten, meist vorhandenen verbraucherfernen Standorte der Anlagen sowie den meist erheblichen Eingriff in die Natur.

Die sonstigen sog. erneuerbaren oder Umwelt-Energien (Wind, Solar, Meereswellen, Gezeiten) werden als Substitution der konventionellen (fissil, fossil) immer wichtiger. In Deutschland trägt allein die Windenergie schon bald über ein Drittel zur Elektrizitätserzeugung bei mit steigender Tendenz.

Immer wieder wurde versucht, den maschinenaufwendigen und durch den CARNOT-Prozess wirkungsgradmäßig nach oben abgegrenzten Vorgang der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische und erst dann in elektrische Energie zu vermeiden. Für die direkte Umwandlung von thermischer in elektrische Energie, die den Turbinenprozess umgeht, bestehen zwei Möglichkeiten:

- Der **Thermoeffekt** wird in der Messtechnik bei den sog. Thermoelementen mit großem Erfolg praktiziert. Zwei Drähte aus günstig gewählten Metallen sind an den Enden durch Löten miteinander verbunden. Danach wird der eine Draht aufgetrennt. An der Trennstelle entsteht eine elektrische Spannung und damit Strom, sobald an den Drahtverbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen herrschen. Die elektrische Spannung wird umso höher, desto größer die Anzahl solcher hintereinander geschalteter Thermoele-

mente und desto größer die Temperaturdifferenz an den Drahtverbindungsstellen ist.

- Der **Hydrodynamikeffekt**, der bisher großtechnisch noch nicht genutzt wird. Nach dem Induktionsgesetz entsteht in einem metallischen Leiter, der in einem Magnetfeld unter Kraftaufwand bewegt wird, elektrische Spannung. Nach diesem Prinzip sind Elektrogeneratoren gebaut.

Der gleiche Effekt, die Induktion, nämlich die Entstehung elektrischer Spannung und Stromfluss, tritt auch ein, wenn statt eines metallischen Drahtes ein elektrisch leitendes Medium, das sog. **Plasma**, entgegen der wirkenden Kraft durch das Magnetfeld fließt. An den Wänden des Fluidströmungskanales kann dann elektrischer Strom abgeleitet werden. Nach diesem Prinzip arbeiten die sog. Magnetohydrogeneratoren.

Das Zusammenwirken von strömendem Medium, elektrischem Strom und magnetischem Feld wird als **Magnetohydrodynamik (MHD)** und die zugehörige Technologie als **MHD-Technik** bezeichnet. Plasma ist ein so hoch erhitztes Fluid (meist über 1 500 °C), dass die Gasatome nicht mehr stabil bleiben können, sondern ionisieren, d. h. durch Abgabe von Elektronen zerfallen. Dadurch entstehen, wie in Metall, elektrisch positive Atomreste, die Ionen, und freibewegliche Elektronen. Plasmen haben deshalb ähnliche Elektrizitätsleitereigenschaften wie metallische Leiter. Bei 2 500 °C Arbeitstemperatur $\eta \approx 20 \dots 40 \%$.

Auf beiden Verfahren zur direkten Umsetzung von thermischer in elektrische Energie, dem Thermo- und dem Hydrodynamik-Konverter, lastet jedoch gemeinsam neben technologischen Schwierigkeiten der wesentlich schlechtere Wirkungsgrad (ca. 10 bis 20 %) gegenüber dem thermodynamischen Turbinenprozess. Außerdem sind, insbesondere beim MHD-Generator, bedeutend höhere Temperaturen notwendig. Deshalb erfolgte bisher zur Elektrizitätserzeugung noch keine großtechnische Anwendung dieser Technologien.

Eine weitere Möglichkeit der direkten Umwandlung von chemischer Oxidationsenergie in elektrische Energie ist die sog. kalte Verbrennung in **Brennstoffelementen(-zellen)** [88]:

Brennstoffzellen sind im Prinzip galvanische Elemente. Sie wandeln wie Batterien chemische Energie direkt in elektrische um. Dies geschieht durch sog. kalte, flammenlose Verbrennung (elektrochemische Oxidation) des Brennstoffes mit Sauerstoff. Der zwi-

schenden den zwei Elektroden in einem Elektrolyten – meist Schwefel- oder Phosphorsäure – ablaufende elektrochemische Prozess vollzieht sich durch Elektronenaustausch der Reaktionsmedien. Dazu wird unter geringem Druck an den Minuspol (Katode) des Brennstoffelementes Brenngas (meist Wasserstoff) und an dem Pluspol (Anode) Sauerstoff geblasen. Der Wasserstoff gibt dabei je Atom ein Elektron ab und wird dadurch zum positiv geladenen Wasserstoff-Ion, während sich die Katode negativ auflädt. An der Anode andererseits nimmt der Sauerstoff je Atom zwei Elektronen auf und dadurch in zweifach negativ geladene Sauerstoff-Ionen umgewandelt, während die Anode infolge der Elektronenabgabe positiv wird. Zwischen den beiden Elektroden der Brennstoffzelle entsteht somit eine elektrische Spannung. Zudem vereinigen sich im Elektrolyten (Katalysator) die Wasserstoff- und Sauerstoff-Ionen zu Wassermolekülen. Entsprechend der Arbeitstemperatur, bedingt durch die Art des Elektrolyten, wird zwischen Niedertemperatur- oder alkalischen Zellen (ca. 100 °C), Mitteltemperatur- oder phosphorsauren Zellen (ca. 200 °C) und Hochtemperaturzellen vom Karbonschmelztyp (ca. 650 °C) sowie Oxidkeramikttyp (ca. 1 000 °C) unterschieden. Brennstoffzellen können für Leistungen von Kilowatt bis mehrere hundert Megawatt je Einheit gebaut werden. Wirkungsgrade bis über 70 % scheinen erreichbar. Der maximale theoretische Wirkungsgrad liegt bei ca. 90 %, begründet dadurch, dass chemisch gebundene Energie weitgehend aus Exergie besteht und deshalb kein „CARNOT-Prozess“ notwendig ist. Die Werkstoff- und Betriebsprobleme sind jedoch erheblich. Die Stromgestehungskosten liegen daher noch deutlich über denen von thermischen Kraftwerken.

Die natürlichen Vorräte zur thermischen Energieerzeugung, die fossilen (Kohle, Erdöl, Erdgas) und fissilen (Atomkerne) Brennstoffe – in urgeschichtlichen Zeiträumen entstanden – sind gemäß dem Grundsatz der Physik nach R. MAYER (Benutzerhinweise), dem Energieerhaltungssatz, nicht vermehrbar. Deshalb besteht die Notwendigkeit, äußerst sorgsam mit den Energievorräten umzugehen. Das bedeutet, Energie, wo immer sinnvoll möglich, einzusparen. Dies kann durch Wirkungsgradverbesserungen aller „Energie erzeugenden“ sowie „verbrauchenden“ Maschinen, Apparaten, Geräte und Anlagen sowie die Anwendung von Verbundprozessen als auch Wärmedämm-Maßnahmen im Heizungsbereich und Widerstandsminderung im

Fahrzeugsektor (Autos, Züge, Schiffe, Flugzeuge) erfolgen.

Kombi- oder Verbundprozesse sind z. B. die sog. *Kraft-Wärme-Kopplung* und die Kombination von Gas- mit Dampfturbinenprozessen (bis $\eta \approx 60\%$), jedoch auch die sog. *Mehrstoffprozesse*. Beim Kraft-Wärme-Verbund wird die Wärmeenergie des Dampfturbinen-Abdampfes Niedertemperatur-Wärmeprozessen, z. B. der Gebäudeheizung, zugeführt und so weiter genützt. Dadurch sind *Energienutzungsgrade* (nicht Wirkungsgrade!) von insgesamt über ca. 80% verwirklichtbar. Die eingesetzte, den natürlichen Vorräten entnommene Primärenergie wird somit zu über 80% genützt.

Beim kombinierten Gas-Dampfturbinenprozess (Abschnitt 11.4.6.1) wird das heiße, noch ausreichend sauerstoffhaltige Gasturbinenabgas (GT) dem Dampferzeuger zugeführt und dadurch weiter genützt, entweder direkt zur Dampferzeugung (GuD) oder als Verbrennungsluft. Dadurch reduziert sich dann die notwendige Aufheizung der sonst erforderlichen, aus der Umgebung zu entnehmenden Verbrennungsluft. Oder GT-Abhitzekessel und konventioneller Fossil-Kessel zur Dampferzeugung sind parallel geschaltet. Entsprechende Energieeinsparung ist die Folge.

Bei den Mehrstoffprozessen sind, dem Temperaturniveau angepasst bzw. abgestimmt, thermodynamische Energieumwandlungsprozesse zur Elektrizitätserzeugung hintereinander geschaltet. Dabei wird so lange fortlaufend, wie möglich, die Abwärme (durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik bedingt) des vorhergehenden Prozesses im jeweils folgenden Prozess weiter zur Elektrizitätserzeugung genützt. Die Restwärme, welche der letzte Prozess abgibt, könnte dann, falls noch temperaturmäßig möglich und sinnvoll, wieder Heizzwecken zugeführt werden. Ein MHD-Generator oder eine entsprechende Brennstoffzelle könnte das erste Glied (Höchsttemperaturkreis) eines Mehrstoffprozesses sein. Mit einer solchen Kombinationsanlage wären Energieumwandlungs-Wirkungsgrade für das Umsetzen von Wärme in Elektrizität insgesamt bis etwa 80% erreichbar, also fast doppelt so hoch wie bei heutigen thermischen Kraftwerken. Heute schon verwirklichte GuD-Anlagen erreichen 52% bis 60% Wirkungsgrad. Bei Abwärmenutzung würde dann der gesamte Energienutzungsgrad (nicht Wirkungsgrad!) ca. 90% betragen.

Problematisch bei Mehrstoffprozessen sind der große Investitionsaufwand, die Komplexität der Gesamtanlage, die teilweise nicht ungefährlichen Arbeitsmedien sowie infolge der Koppelprozesse nicht mögliche anlageunabhängige Regelung der Systemkomponenten, also der einzelnen Energieumwandlungsprozesse.

Um die hochwertigen natürlichen Energiereserven der Welt, vor allem Erdöl, zu schonen und den Treibhauseffekt zu vermindern, wird es notwendig sein:

- Alle Energiequellen der Natur zu erforschen und, wo immer technisch möglich sowie volkswirtschaftlich zweckmäßig, zu nutzen.
- Hochwertige Primärenergie nur dort einzusetzen, wo unbedingt notwendig, und wenn immer möglich niederwertige Energie zu nützen. Der wertvollste Energieträger Erdöl sollte dem Verkehrssektor und als Rohstoff der *nichtenergetischen* Nutzung in der Chemie, wie Pharmazie, vorbehalten bleiben.
- Energie einsparen wo immer möglich.
- Die Energieausnutzung erhöhen, durch Verbundprozesse, Wärmedämmung, Verlustereduktion.
- Die regenerierenden Energiequellen weltweit, wo immer möglich, weitgehendst zu nützen, also Sonnen- sowie Umweltenergien (Wasser, Wind, Wärme, Strahlung) und dadurch die bisherigen fossilen sowie fossilen möglichst bald weitgehendst zu ersetzen bei Abfallvermeidung.

Bei einem realistischen Gesamtkonzept (eine große Ingenieuraufgabe), das alle Energieträger erschließt und nützt, sollte es möglich sein, den tatsächlich notwendigen Energiebedarf der Menschheit zu decken. Enorme Anstrengungen sind jedoch in Forschung, Entwicklung und Anwendung notwendig. Wo immer vertretbar, muss Energie durch Kapital, d. h. durch hochwertige, wenig Energie verbrauchende Einrichtungen bei Umweltschutz ersetzt werden.

Obwohl diese Energie-Problematik etwas abseits von Strömungsmaschinen liegt, ist es berechtigt, in einem Buch, das sich mit Maschinen der Energietechnik befasst, wozu besonders Turbinen gehören, darauf hinzuweisen. Im Allgemeinen wird der Ingenieur, gleichgültig in welchem Bereich und welcher Position er tätig ist, in Zukunft verstärkt mit Energieproblemen konfrontiert werden. Besonders der Strömungsmaschinenbauer wird angesichts dieser Tatsachen genötigt sein, die Wirkungsgrade seiner Produkte immer weiter zu verbessern.

15 Sachwortverzeichnis

A

Abdampfgeschwindigkeit 383
 Abdampfzustand 382
 Abdrehkurve 103, 263
 Abgasturbolader 38, 421
 Abkürzung 19, 22
 Ablösung, rotierende 269
 Abreißen, rotierendes 209, 276
 –, tiefes 277
 Abreißgrenze 275
 Abschnappen 261
 Absolutgeschwindigkeit 17, 31, 42, 54
 Absolutstrombahn 57
 Absolutströmung 17
 Absolutströmungswinkel 54
 Absorptionsgesetz von HENRY 125
 Abström-Diffusor 218
 Abströmdrall 120
 Abströmleiteinrichtung 206
 Abströmverlust 226
 Abströmwert 121, 381
 Achsschub 290
 Achsschubausgleich 293
 Achsschubausgleichskolben 229, 389
 Achsschubentlastungskolben 294
 Achsschubfaktor 292
 ACKERET, Aufwertformel 103
 aerodynamische Belastung 277
 Affinitätsregel 100
 Aggregat 433
 Ähnlichkeitsregeln, NEWTON'sche 102
 Ähnlichkeitstheorie 99
 Aktionsrad 392
 Aktionsturbine 359, 392
 Anfahren 390
 Anfahrhöhe 253
 Anfahrkupplung 436
 Anfahrmoment 435, 440
 Anfahrwandler 440
 Anlage, hydraulische 278
 Anlagenhalteenergie 133
 Anlagenwirkungsgrad 251, 384
 Ansaugdrosselung 274
 Ansaugkühler 402
 Anstellwinkel 68
 Anströmgeschwindigkeit 17
 Antriebspropeller 427
 Anwendungsfall 36
 Anwendungsfeld 252
 A-Rad 378
 Arbeitsmaschine 23, 27

Arbeitsminderungszahl 82
 A-Regelstufe 396
 ARGUS-SCHMIDT-Rohr 421
 Auftrieb 90
 Auftriebsbeiwert 94
 Aufwertformel 102
 – von ACKERET 103
 – von PFLEIDERER 103
 Ausblasventil 276
 Außenkranz 17
 Außenkranz-Rohrturbine 372
 Außenkühlung 342
 Außenregelung 367
 äußerer Verlust 244
 Ausfluss, kritischer 282
 –, überkritischer 282
 –, unterkritischer 281
 Ausflussfunktion 281
 Ausgleichsfläche 294
 Auslegungspunkt 257
 Ausströmverlustleistung 226
 Austauschströmung 175
 Austauschverlust 241
 Austrittskante 17
 Austrittsverlust 226
 Axialbeschaukelung 79
 Axialgebläse 338
 Axialgitter 32
 Axialkompressor 341
 Axialkraft 290
 Axiallabyrinth 232
 Axiallüfter 333
 –, meridianbeschleunigter 335
 Axialmaschine 36, 161, 195
 Axialpumpe 165
 Axialrad 64, 68, 292
 Axialrad-Abmessung 355
 Axial-Radial-Turbokompressor 346
 Axialrotationshohlraum 42
 Axialschnitt 17
 Axialschub 290
 Axialsplatt 231
 Axialturbine 407
 Axialturbokompressor 344
 Axialventilator 115, 333
 Axialverdichter 406

B

Barometerdruck 132
 Basiseinheit 19
 Bauart 35
 Bauform-Kennzahl 120
 Beaufschlagung 375
 Beaufschlagungsgrad 204, 358
 Becherzahl 166

Belastung, aerodynamische 277
 Belastungsgrad 96, 198, 429
 BENDEMANN'sche Gleichung 281
 Beschauflung 400
 Beschleunigungsgitter 33
 Betrieb 390
 Betriebsbereich 440
 Betriebsdaten-Kennwert 120
 Betriebsgrenze 270
 Betriebsgröße 252
 Betriebspunkt 257
 Betriebsschnellläufigkeit 262
 Betriebsverhalten 252, 390
 Betriebszustand 258
 BETZ-Effizienz 425
 Bezugslinie 97
 Bläser 419
 Bläser-Triebwerk 404
 Blockanlage 392
 Blockbauweise 297, 375
 Blockpumpe 299
 Bohrlochpumpe 306
 Boosterpumpe 308
 Breite 17
 Bremskurve 258
 Bremsmoment 434
 Brennkammer 409
 Brennstoff 412
 Brennstoffbedarf 385
 Brennstoffelement 25
 Brennstoffzelle 25
 Brettschnitt 17
 Bugstrahlruder 432
 Bürstendichtung 230
 Bypass 276
 Bypass-Regelung 272
 Bypass-Triebwerk 404

C

CARNOT-Prozess 24
 CARNOT-Wirkungsgrad 250
 CFD 169
 Chemiepumpe 305
 CLAUDIUS-RANKINE-Kreisprozess 373
 CORDIER-Diagramm 116
 CURTIS-Prinzip 378
 CURTIS-Rad 391
 CURTIS-Turbine 211, 393

D

DALTON, Gesetz 273
 Dampfdruckabstand 133
 Dampfdruckkurve 125
 Dampfdurchsatz 399

- Dampfkegel 283
 Dampfkraftprozess 372
 Dampfnäse 382
 Dampfturbine 209, 281, 356, 372
 –, Einteilung 375
 Dampfzustand 381
 Deckscheibe 17, 57
 Diagonalmaschine 36
 Diagonalspumpe 301
 Diagonalrad 62
 Diagonalrad-Abmessung 355
 Dichteänderung 273
 Dichtspalt 294
 Dichtspaltdruck 234
 Dichtung 389
 Dickstoffpumpe 308
 Diffusor 35
 Doppelregelung 203, 369
 Doppelregler 202
 Drallstrom, spezifischer 18
 Drallziffer, relative 120
 Drehenergie 27
 Drehmomentübertrager 433
 Drehmomentwandler 433, 437
 Drehschaufel 203
 –, FINK'sche 203
 Drehzahl, spezifische 111, 430
 Drehzahlkurve 103, 263
 Drehzahlregelung 272
 Drehzahlverhältnis 434, 439
 Drehzahl-Wandler 437
 Drosselkurve 241, 252, 256
 Drosselregelung 271
 Drosselspalt 294
 Drosselvorgang 390
 Druckausgleich 293
 Druckkante 17, 55, 152, 163, 354 f.
 Drucklager 310, 366, 368
 Druckseite 17, 55
 Druckstoß 44, 46
 Druckstoßgesetz 47
 Druckstufung 329, 379, 382
 Druckstutzen 186
 Druckverhältnis 386
 Druckverhältnisfaktor 273
 Druckwellengeschwindigkeit 48, 51 f.
 Druckziffer 320, 378, 381
 Durchflusströmung 17
 Durchgangsbetrieb 438
 Durchgangsdrehzahl 279, 359
 Durchhang 229
 Durchmesserziffer 111
 Durchsatz 101
 Durchströmrichtung 36
 Durchströmturbine 200, 203, 363
 Düse 35
 Düsenfaktor 200
 Düsengestaltung 201
 Düsengruppenregelung 391
 dynamische Energie 74
- E**
 effektiver Wirkungsgrad 248
 Effizienz, *siehe* Wirkungsgrad 247
 Effusionskühlung 408
 Einbogenschaufel 155
 Einheit 18
 Einheitsleistung 386
 Einlaufzahl 121
 Einstromtriebwerk 404
 Eintrittskante 17
 Eintrittsleitrad 194
 Eintrittsseite 17
 Eintrittswinkel 175
 Einzelbrennkammer 410
 Einzelschaufel 29
 Elastizität 412
 Energie, Dreh- 27
 –, dynamische 74
 –, hydraulische 27
 –, Rotations- 27
 –, spezifische 18
 –, statische 74
 Energiegefälle 386
 Energiegleichung 44
 Energiekette 24
 Energieumsatz 73
 –, optimaler 375
 Energieziffer 108
 Entlastungsscheibe 294
 Entwässerungskanal 388
 Ermüdung 411
 erweiterter Flächensatz 40
 EULER-Gleichung 74, 77
- F**
 Festbremsmoment 435
 Festdruckregelung 390
 Feststoffrakete 422
 Feuchteinfluss 273
 Feuchtigkeit, relative 273
 Feuerlöschpumpe 318
 Filmkühlung 408
 FINK'sche Drehschaufel 203
 fissil 24
 Fixkosten 385
 Flächenkavitation 130
 Flächensatz 39, 147
 –, erweiterter 40
 Flammenhalter 409
 Flammrohr 410
 Fliehkraftdruck 280
 Fluchtgeschwindigkeit 422
 Flügel 29, 90
 Flügelgitter 29, 91
- Flugzeug-Gasturbintriebwerk 403
 Flugzeugpropeller 430
 Fluid 17
 Fluidenergiemaschine 28
 Fluid-Schallgeschwindigkeit 53
 Flussfläche 17
 Flüssigkeitskupplung 434
 Flüssigrakete 422
 Flusslinie 17
 Flutfläche 17
 Flutlinie 17, 58
 Formelzeichen 19
 Fortschrittsgrad 430
 fossil 24
 Fossilkraftwerk 381
 FÖTTINGER-Aggregat 433
 FÖTTINGER-Getriebe 437
 FÖTTINGER-Kupplung 434
 FRANCIS-Spiralturbine 367
 FRANCIS-Turbine 161, 280, 357, 365
 Freistrahler 200
 Freistrahlturbine 359
 Frischdampfgeschwindigkeit 383
 Frischdampfzustand 381
 Frischwasserkühlung 382
 Füllungsgrad 204
 Füllungsregelung 280, 391
 Fußventil 296
- G**
 Gasabsorption 125
 Gasturbine 209, 281, 356, 401
 Gebläse 29, 337
 Gegenlaufpropeller 432
 Gegenlauf-Radialturbine 398
 gekühlte Verdichtung 320
 geometrische Größe 19
 gerades (ebenes) Gitter 17
 Geräuscentwicklung 322
 Gesamtverlust 245
 geschlossener Prozess 24
 Geschwindigkeitsabminderungszahl 425
 Geschwindigkeitsdreieck 17
 Geschwindigkeitsmoment 40
 Geschwindigkeitsplan 17
 Geschwindigkeitsstufung 377
 Geschwindigkeitsverhältnis 63
 Gesetz von DALTON 273
 Gesetz von JOUKOWSKY 48
 Gesetz von KUTTA-JOUKOWSKY 90, 92
 Gitter 29, 31 f.
 –, gerades (ebenes) 17
 Gitterachse 17
 Gitterkorrektur 95

Gleichdruck-Beschaufelung 64
 Gleichdruckgitter 33
 Gleichdruckmaschine 241
 Gleichdruckturbine 200, 211, 392
 Gleichdruck-Wasserturbine 357
 Gleichdruckwirkung 36, 89, 375
 gleichwertiges Rohr 53
 Gleitdruckbetrieb 283
 Gleitdruckregelung 392
 Gleitflächenverlust 244
 Gleitringdichtung 229, 297
 Gleitwinkel 93
 Gleitzahl 68, 93 f.
 Gliederbauweise 304, 309
 Gliederpumpe 309
 Göttinger Profilsystematik 70
 Grenzdrehzahl 261
 Grenzleistungsturbine 386
 Größe, geometrische 19
 –, JOULE'sche 20
 –, kinematische 20
 –, kinetische 20
 –, spezifische 18
 –, thermische 20
 Großgasturbine 416
 Grundkennlinie 252
 Grundlastkraftwerk 359
 Grundlaufzahl 381
 Gütegrad 250
 Gütezah 381

H

Haarriss 411
 Hakenschaukel 89
 Halbaxialmaschine 36
 Halbperiode 50
 Haltedruck 133
 Haltedruckhöhe 265
 Halteenergie 133
 Hauptbetriebsgröße 350
 Hauptschnitt 18
 Hauptteil 35
 Hauptumwälzpumpe 310
 Heberturbine 370
 Heizkraftwerk 374
 Heizungsumwälzpumpe 317
 HENRY, Absorptionsgesetz 125
 Hermetikpumpe 316
 Hintereinanderschaltung 270
 Hohlkehlenkavitation 130
 Hohlsogwirkung 124
 homolog 17
 Hosenrohr 200
 hydraulische Anlage 278
 hydraulische Energie 27
 hydraulische Maschine 27, 222
 hydraulischer Verlust 224
 hydraulischer Wirkungsgrad 86

Hydrodynamikeffekt 25
 hydrodynamische Kupplung 434

I

Impulssatz 30
 Index 22
 Inducer 17
 induzierter Widerstand 95
 Injektor 296
 Inline-Bauart 299
 Inline-Bauweise 306
 Innen-Außenkühlung 342
 Innengehäuse 387
 Innenkranz 18
 Innenkühlung 341
 Innenregelung 366
 innere Leistung 246
 innerer Verlust 224
 innerer Wirkungsgrad 247
 Instabilität 271, 275
 instationäre Strömung 44
 Investitionskosten 385
 Isogyre-Pumpenturbine 315
 Isothermverdichter 342

J

JOUKOWSKY-Gesetz 48
 JOULE'sche Größe 20

K

Kammerstufe 387
 Kammerturbine 211, 394
 Kanal 41
 Kanalwirbel 18
 KAPLAN-Rohrturbine 371
 KAPLAN-Turbine 280, 357, 368
 Kaskadendichtung 310
 Kavitation 124, 126
 Kavitationskennlinie 139
 Kavitationsoptimalität 135
 Kavitationsstufe 129
 Kavitationsverschleiß 127
 kavitierende Wirbel 130
 Kegelgesetz 281, 283
 Kegelrad-Rohrturbine 372
 Kennfeld 252, 439
 Kennfläche 252
 Kennlinie 252, 439
 Kennlinienblatt 265
 Kennlinienfeld 105
 Kennverhalten 252
 Kennzahl 99
 Kennziffer 105
 Kernkraftwerk 381
 Kesselformel 52
 Kesselspeisepumpe 308
 Kesselwirkungsgrad 250
 kinematische Größe 20

kinetische Größe 20
 Kleingasturbine 414
 koaxial 18
 kohärent 18
 Kohlegleitring 389
 Kolbenmaschine 36
 Kolbenpumpe 264
 Kombination von Strömungspumpen 270
 Kombiprozess 26
 Kompression, ungekühlte 320
 Kompressor 29, 340
 Kondensationsturbine 395
 Kondensatpumpe 309
 Kongruenzgesetz 262
 Konstantdruckbetrieb 283
 Kontraktionszahl 233
 Kontrollraum 30
 Konvektionskühlung 408
 Korrosionsbeständigkeit 411
 KORT-Düse 432
 Kosten, variable 385
 Kraftanlage 356
 Kraftmaschine 24, 27
 Kraft-Wärme-Verbund 374
 Kraftwerkspumpe 308
 Kraftwerkswirkungsgrad 384
 Kreisbogenprojektion 18
 Kreisbogenschaukel 67, 155
 Kreiselpumpe 27, 252, 285
 –, normalsaugende 296
 –, selbstsaugende 296, 317
 Kreiselradhauptgleichung 74
 Kreiselverdichter 27, 272, 319
 Kreisgitter 18
 kritischer Ausfluss 282
 Krümmergehäusepumpe 302
 Kühlverfahren 341, 407
 Kühlwirksamkeit 408
 Kupplung 434
 –, hydrodynamische 434
 Kupplungsarbeit 245
 Kupplungsleistung 246
 Kupplungsmoment 435
 KUTTA-JOUKOWSKY-Gesetz 90, 92

L

Labyrinth 232
 Labyrinth-Dichtung 230
 Lager 310, 389
 Lagerbügel 297
 Lagerstuhl 297
 Lagerträger 297
 Laminarprofil 93 f.
 Langsamläufer 89
 Läuferkraft 290
 Laufrad 18, 29, 35, 326

- Laufradararbeit 85
 Laufradausführung 28
 Laufradberechnung 325
 Laufradbereich 326
 Laufraddruckkante 173
 Laufräder-Abstufung 330
 Laufradform 118, 147
 Laufradgruppe 330
 Laufradkennzahl 111
 Laufradspaltdruck 87
 Laufradströmung 54
 Laufschaufelkoeffizient 65
 Laufschaufelverstellung 272
 Laufschaufelwinkel 55
 Laufschaufelzahl 60, 355
 Laufwasserkraftwerk 359
 Laufzahl 115, 214, 360, 381
 LAVAL-Druck 211
 LAVAL-Druckverhältnis 211
 LAVAL-Düse 211, 215
 LAVAL-Geschwindigkeit 211
 LAVAL-Rad 391
 LAVAL-Turbine 392 f.
 Lebensdauer 390, 413
 Leckverlust 228
 Leerlaufwasserstrom 280
 Leistung 102, 245
 –, innere 246
 –, Kupplungs- 246
 –, spezifische 18
 –, Stufen- 246
 –, Stutzen- 246
 Leistungsberechnung 325
 Leistungskurve 252
 Leistungszahl 425, 435, 439
 Leitapparat 35
 Leitkanalbreite 174
 Leitkanaleintrittsbreite 173
 Leitkanalzahl 214
 Leitrad 18, 29, 35, 174, 437
 Leitring 182
 Leitschaufeldicke 197
 Leitschaufelkontur 197
 Leitschaufelträger 340, 387
 Leitschaufelverstellung 272
 Leitschaufelwinkel 54
 Leitschaufelzahl 177 f., 197
 Leitvorrichtung 35, 171, 326
 lichte Weite eines Schaufelkanals 18
 Liefergrad 120, 247
 Lieferziffer 109
 LJUNGSTRÖM-Turbine 397
 logarithmische Spirale 40
 LOMAKIN-Effekt 234
 LORIN-Antrieb 421
 Luftbedarf 405
 Lüfter 29, 329, 333, 336
 Luftturbine 422
 Luftturbinenleistung 424
 Luftwirbelzopf 430
- M**
 Magnetohydrodynamik 25
 MAGNUS-Effekt 80
 Mantelschraube 431
 Maschine, hydraulische 27, 222
 –, thermische 27, 86, 222
 Maschinenhalteenergie 133
 Maschinenschnellläufigkeit 114
 Maschinenwirkungsgrad 325
 Maßstabsfaktor 100
 mechanischer Verlust 244
 mechanischer Wirkungsgrad 248
 Mehrarbeit 327
 Mehrarbeitsbeiwert 328
 Mehrarbeitsfaktor 328
 Mehrflutigkeit 35
 Mehrstufenwandler 440
 mehrstufige Pumpe 193
 Mehrstufigkeit 35
 Mengenregelung 391
 Mengenstromverlust 228
 meridianbeschleunigter Axiallüfter 335
 Meridianschnitt 18
 MHD-Technik 25
 MICHELL-BANKI-Turbine 363
 MICHELL-Drucklager 310, 366, 368
 MICHELL-OSSBERGER-Turbine 357, 363
 Mikrostrahl 127
 Minderarbeitsfaktor 82
 Minderleistung 82
 Mittelschraube 432
 Modellmaschine 102
 Modellregel 99
 Momentenbeiwert 94
 Monoblock-Bauart 372
 Muscheldiagramm 263 f.
 Muschelkurve 263
- N**
 Nabendurchmesser 353
 Nabenscheibe 57
 Nabenverengung 58
 Nabenverengungsfaktor 98
 NACA-Profilierung 333
 NACA-Profilsystematik 70
 Nachbrenner 404, 420
 Nachexpansion 216
 Nachlauf 93
 Nachlaufdelle 210
 Nachleitrad 196
 Nachverbrennung 420
- Nadeldüse 200
 Nenndurchsatz 56
 NEWTON'sche Ähnlichkeitsregeln 102
 Niederdruckgebläse 338
 Niederdruckventilator 335
 Normalenthalpie 250
 normalsaugende Kreiselpumpe 296
 Normprofil 400
 NPSA 265
 NPSH-Wert 137
 Nullförderung 253
 Nutzgefälle 208
 Nutzmoment 434
- O**
 offener Prozess 24
 optimaler Energieumsatz 375
 OSSBERGER-Turbine 363
- P**
 Palisade 18
 Parallelschaltung 271
 PARSONS-Turbine 217, 396
 PARSONS-Zahl 381
 PELTON-Becher 359
 PELTON-Schaufel 165
 PELTON-Turbine 165, 200, 280, 357, 361
 Peripheralpumpe 318
 PFLEIDERER, Aufwerteformel 103
 Plasma 25
 Polarendiagramm 69
 Potenzialwirbel 39
 PRANDTL-Regel 93
 PRANDTL'sche Formeln 95
 Primärenergie 24
 Primärgrößen 319
 Profil-Bezeichnung 69
 Profilsystematik 69
 –, Göttinger 70
 –, NACA- 70
 Profilverwinkel 71
 Propeller, VOITH-SCHNEIDER- 432
 Propellerblatt 427
 Propellerpumpe 302
 Propellertheorie 428
 Propellertriebwerk 404, 418
 Propellerturbine 368
 Propeller-Turbinen-
 Luftstrahltriebwerk 404
 Propeller-Wirkungsgrad 430
 Proportionalität 100
 Propulsionswirkungsgrad 430
 Prozess, geschlossener 24
 –, offener 24
 Prozesspumpe 306

- Prozessverdichter 343
 PTL 404
 Pumpe 23, 220 ff., 247 f.
 –, mehrstufige 193
 Pumpenbetriebspunkt 258
 Pumpenleitvorrichtung 171 f.
 Pumpenschaufel 70, 155
 Pumpenturbine 311, 314
 Pumpenwirkungsgrad 288
 Pumpgrenze 261
 Pumpschwingungen 261, 271
 Pumpspeicherpumpe 311
 Pumpspeicherturbinen-Anlage 368
- Q**
- Quellenströmung 39 f.
 Querkraft 90
 Querschnittsregelung 391
 Querstromlüfter 334
- R**
- Radanpassung 103
 Rad-Aufriss 18
 Radformkennziffer 111
 Rad-Grundriss 18
 Radialbeschaufelung 80
 Radialgebläse 338
 Radialgitter 32
 Radialkompressor 341
 Radialkraft 185, 295
 Radialläufer 321
 Radiallüfter 331
 Radialmaschine 36, 147, 172
 Radialrad 61, 291
 Radialrad-Abmessung 353
 Radialrotationshohlraum 39
 Radialschaufel 147, 150
 Radialturbine 398, 407
 Radialturbokompressor 341, 343
 –, Topfbauweise 343
 Radialventilator 331 f.
 Radialverdichter 406
 Radquerschnittsverengung 58
 Radreibungsfaktor 236
 Radreibungsleistung 236
 Radreibungsverlust 235
 Radschnellläufigkeit 114
 Rad-Seitenriss 18
 Raketentriebwerk 422
 Randumströmung 91
 Reaktionsglied 437
 Reaktionsgrad 106
 Reaktionsturbine 364, 395
 Reaktorpumpe 310
 reale Strömung 93
 Reflexionszeit 50
 Regelfall 78
 Regelkammer 212
 Regelrad 391
 Regelstufe 209
 Regelung 390
 – von Strömungspumpen 271
 Reibungsdruckverlust 40
 Relativbewegung 42
 relative Drallziffer 120
 relative Feuchtigkeit 273
 Relativgeschwindigkeit 31, 42, 54
 Relativströmung 18, 42
 Relativströmungswinkel 55
 Relativwirbel 18
 REYNOLDS-Zahl 68, 70
 Ringbrennkammer 410
 Ringraum 35, 182
 Ringspalt 173 f.
 Ringtyp 303
 Rohr, gleichwertiges 53
 Rohrgehäusepumpe 302
 Rohrleitungskennlinie 257 f.
 Rohrleitungswirkungsgrad 201
 Rohrschraubenradpumpe 301
 Rohrturbine 371
 Rotationsenergie 27
 rotierende Ablösung 269
 rotierendes Abreißen 209, 276
 Rückenschaufel 294
 Rückfahrturbine 394
 Rückföhreinrichtung 192
 Rückföhrraum 193
 Rückföhrraum 192
 Rückföhrschaufel-Kranz 35
 Rückgewinnungsfaktor 208
 Rückkühlturm 341, 374
 Rumorgrenze 270
- S**
- Sammler 172
 Saughöhe 131
 Saugkante 18, 55, 151, 163, 354 f.
 Saugkennlinie 252
 Saugmund 353
 Saugmunddurchmesser 353
 Saugmundgeschwindigkeit 353
 Saugmundradius 353
 Saugrohr 206 f.
 Saugseite 18, 55
 Saugseitenabsperrung 276
 Saugseitenleitvorrichtung 194
 Saugseitenströmung 78
 Saugstutzen 141
 Saugverhalten 295
 Saugzahl 136
 Schachtturbine 205, 357, 366
 Schallgeschwindigkeit 18, 53
 Schallkennzahl 144
 Schalloptimalität 146
 Schallzahl 144
 Schallziffer 143
 Schaufel 29, 388
 Schaufelarbeit 74, 85
 Schaufelbeiwert 68
 Schaufeldicke 62
 Schaufelfaktor 61
 Schaufelform 155, 165
 Schaufelform-Berechnung 157
 Schaufelgitter 29, 31
 Schaufelkanal, lichte Weite 18
 Schaufel-Rückseite 18
 Schaufelschloss 388
 Schaufelskelettlinie 66
 Schaufelverengungsfaktor 59
 Schaufelversperrung 58
 Schaufel-Vorderseite 18
 Schaufelwinkelbeiwert 84
 Schaufelzahl 68
 Schaufungsverlust 85, 224
 Schaufelwirkungsgrad 86, 247, 381
 Scheibenläufer 388
 Scheibenreibungsleistung 235
 SCHICHT-Lüfter 336
 Schiffspumpe 316
 Schiffsschraube 431
 Schleuderprobe 388
 Schlupf 434
 Schlupfwärme 436
 Schnellläufigkeit 111, 381
 Schnellaufzahl 114, 381, 425
 Schnellschluss 281
 Schräganschnitt 176
 Schraube 427
 Schraubenpropeller 427
 Schraubenpumpe 300
 Schub 417, 427
 Schubbelastungsgrad 429
 Schubdüse 402
 Schubgütegrad 430
 Schubkraft 417, 427
 Schubleistung 418, 427
 Schubwirkungsgrad 418, 430
 Schwingungskavitation 130
 Schwitzkühlung 408
 Seitenkanalpumpe 289, 317
 Seitenkanal-Verdichter 325
 selbstsaugende Kreiselpumpe 296, 317
 Senkenströmung 40
 Siedeverzug 125
 SI-Einheit 19
 Sinnbilder, STENDER'sche 373
 SIROCCO-Lüfter 333
 Spaltart 228
 Spaltbeiwert 229
 Spaltdichtung 230
 Spaltdruck 87

- Spaltdruckarbeit 74, 87
 Spaltdurchflusszahl 232
 Spalteinfluss 210
 Spaltkavitation 130
 Spaltmengenstrom 232
 Spaltrohrmotor 316
 Spaltrohrmotorpumpe 306, 310, 316
 Spaltströmung 230
 Spaltverlust 228, 231
 Speicherefähigkeit 261
 Speicherpumpe 311, 314
 Speisewasserqualität 383
 Sperrdampf 389
 Sperrwasserring 297
 Spezialpumpe 316
 spezifische Drehzahl 111, 430
 spezifische Energie 18
 spezifische Größe 18
 spezifische Leistung 18
 spezifische Stufenarbeit 101
 spezifischer Drallstrom 18
 Spirale, logarithmische 40
 Spiralgehäuse 35, 183, 187
 Spiralgehäusepumpe 285, 299, 304, 316
 Spitzenlastkraftwerk 359
 Sporn 185
 Spurlager 366
 Staffelungswinkel 67, 198
 Stafflungs-Profilwinkel 70
 Standschub 417
 statische Energie 74
 statisches Prinzip 27
 Staustahltriebwerk 404, 421
 Stellwandler 440
 STENDER'sche Sinnbilder 373
 STOECKICHT-Bauart 372
 Stoffwert 22
 Stopfbuchsichtung 297
 Stopfbuchse 229, 389
 Stoßbeiwert 243
 Stoßfaktor 242
 Stoßkondensation 126
 Stoßparabel 262
 Stoßverlust 56, 241
 Stoßverlustleistung 242
 Stoßzustand 262
 Strahlabdrücker 203
 Strahlablenker 202
 Strahlabschneider 203
 Strahldurchmesser 165
 Strahlgeschwindigkeit 200
 Strahlverhältnis 165
 Strahlwirkungsgrad 430
 Stromfadentheorie 73 f., 199
 Stromstoß 44, 46
 Strömung 39
 –, instationäre 44
 –, reale 93
 –, transsonische 168
 Strömungsablösung 269
 Strömungsabreißen 275
 Strömungsgetriebe 437
 Strömungskraftmaschine 278
 Strömungskupplung 434
 Strömungsmaschine 28 f.
 Strömungsprinzip 37
 Strömungspumpe 285
 –, Berechnen 348
 –, Kombination 270
 –, Regelung 271
 Strömungsverhältnisse 39
 Stufe 18, 35
 Stufenanordnung 36
 Stufenarbeit 85
 –, spezifische 101
 Stufenbauart 387
 Stufengefälle 376, 400
 Stufenleistung 246
 Stufenverlust 224
 Stufenwirkungsgrad 324
 Stufenzahl 355, 400
 Stufungsart 377, 379
 Stützenarbeit 85, 87, 219
 Stützenleistung 246
 Stützschaufel 205
 Superkavitation 130, 431
 Symbol 19
- T**
 Tangential-Turbine 359
 Tauchmotorpumpe 307 f.
 Tauchpumpe 296, 306
 Teilbeaufschlagung 118
 Teillast 254
 Teillastverhalten 358
 Teillastwirbel 269
 Teilung 18
 Teilungsverhältnis 18
 Temperaturänderung 326
 thermische Anlage 279
 thermische Größe 20
 thermische Maschine 27, 86, 222
 thermischer Wirkungsgrad 249
 Thermodynamik 404
 Thermoeffekt 24
 Thermoschock 374
 THOMA-Zahl 138
 tiefes Abreißen 277
 TL 404
 Topfbauweise 309, 343
 Topfgehäuse 387
 TORRICELLI-Formel 115, 200
 Tragflügel 90
 Tragflügelfamilie 70
 Tragflügelserie 70
 Tragflügeltheorie 30, 73, 90, 197
 Tragscheibe 57
 Transpirationskühlung 408
 Transsonik-Verdichter 348
 transsonische Strömung 168
 Trilokwandler 440
 Trockenkühlung 382
 Trommelläufer 333, 363, 388
 Trommelstufe 387
 Tropfenerosion 382
 Turbine 24, 220 ff., 247 f., 356, 407
 Turbinen-Kennlinie 279
 Turbinenleitvorrichtung 199
 Turbinenluftstrahltriebwerk 404, 419
 Turbinenschaufel 70, 160
 Turbobremse 436
 Turbokraftmaschine 356
 Turbokupplung 434
 Turbolader 420
 Turbomaschine 28 f.
 Turbomaschinenarten 285
 Turbosatz 375
 Turbowandler 437
 Typenreihe 264
- U**
 Überdruck-Beschaufelung 66
 Überdruckgitter 33
 Überdruckmaschine 240
 Überdruckturbine 217, 364
 Überdruck-Wasserturbine 357
 Überdruckwirkung 36, 89, 377
 Übergeschwindigkeit 124
 überkritischer Ausfluss 282
 Überlast 254
 Überschall 124, 140
 Überschall-Beiwert 143
 Überschallgrenze 143
 Überschallverdichter 347
 Umfangsgeschwindigkeit 31, 54, 62, 384
 Umfangsverlust 224
 Umfangswirkungsgrad 86
 Umlenkdreieck 18
 Umlenkammer 393
 Umlenkkrans 378
 Umlenkraum 35, 192
 Umlenkschaufel 216
 ungekühlte Kompression 320
 unterkritischer Ausfluss 281
 Unwuchtkraft 295
- V**
 variable Kosten 385
 Ventilationsverlust 235, 238

- Ventilator 27, 331
Verbrennungsluftbedarf 385
Verbundprozess 26
Verdampfung 124
Verdampfungskeim 125
Verdichter 406
Verdichtung 323
–, gekühlte 320
Verdichtungsstoß 124
Verdrängerprinzip 37
Verdrängungsströmung 18
Verdunstungskühlung 382
Verengungsfaktor 58
Vergleichsrad 116
Vergleichswirkungsgrad 249
Verhältnisgröße 21
Verlust 224
–, äußerer 244
–, Austausch- 241
–, Gleitflächen- 244
–, hydraulischer 224
–, innerer 224
–, Leck- 228
–, mechanischer 244
–, Radreibungs- 235
–, Spalt- 228, 231
–, Stoß- 56, 241
–, Stufen- 224
–, Umfangs- 224
–, Ventilations- 235, 238
Verlustziffer 103
Verpuffungstriebwerk 421
Versprödung 411
Verzögerungsgitter 33
Viertelellipsengesetz 282
VOITH-SCHNEIDER-Propeller 432
Völligkeitsgrad 430
Volumenänderung 326
Volumenzahl 109
Vordrall 120
Vordrallregelung 272, 276
Vorleiteinrichtung 332
Vorleitrad 35, 195 f.
Vortrieb 417, 427
Vortriebserzeugung 417
Vortriebsleistung 418
Vortriebswirkungsgrad 430
- W**
Wandler 437
Wandlung 439
Wärmekraftwerk 24
Wärmerückgewinn 380
Wärmerückgewinnungsfaktor 225
Wärmetauscher 402
Wärmeübertragung 125
Wasserkraft 24
Wasserkraftanlage 356
Wasserringpumpe 318
Wasserschlag 46
Wasserturbine 165, 200, 279, 356 f.
Wasserwerkspumpe 304
Welle, weiche 388
Wellendichtung 332
Wellendichtungspumpe 310
Wellendurchmesser 351
Wellenfrontgeschwindigkeit 54
Wellenpumpe 306, 308
Wellenwiderstand 430
Werkstoff 411
Widerstand, induzierter 95
Widerstandsbeiwert 94
Widerstandsziffer 40
Windangebot 423
Windenergie 424
Windkonverter 422
Windleistung 424
Windrad 422
Windturbine 422
Windturbinenleistung 424 f.
Windturbinenwirkungsgrad 425
Wirbel 18
–, kavitierende 130
Wirbelquelle 39, 147
Wirbelsenke 40, 147
Wirkungsgrad 247, 288, 324, 358, 384, 435, 439 f.
–, Anlagen- 251, 384
–, CARNOT- 250
–, effektiver 248
–, hydraulischer 86
–, innerer 247
–, Kraftwerks- 384
–, Maschinen- 325
–, mechanischer 248
–, Propeller- 430
–, Pumpen- 288
–, Schauflungs- 86, 247, 381
–, Stufen- 324
–, thermischer 249
–, Vortriebs- 430
–, Windturbinen- 425
Wirkungsgradumrechnung 102
Wirkungslinie 252
- Z**
Zellrad 318
Zentripetalturbine 407, 414
Zirkularprojektion 18
ZOELLY-Düse 211
ZOELLY-Leitrad 213
ZOELLY-Turbine 211, 394
ZTL 404, 419
Zunge 185
Zungenkorrektur 190
Zungenquerschnitt 186
Zustromleitrad 171
Zuströmwinkel 175
Zweibogenschaufel 157
Zweikreis-Turbinenluftstrahltriebwerk 404, 419
Zwischenleitvorrichtung 186
Zwischenschaufel 59, 84
Zwischenüberhitzer 373
Zylindergitter 33
Zylinderschaufel 61, 152