

HANSER



Leseprobe

zu

„Strömungsmaschinen“ Grundlagen und Anwendungen von Herbert Sigloch

ISBN (Buch): 978-3-446-45498-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-45557-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de>

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.

Die dem Buch beigelegte CD-ROM enthält 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. Besonderer Dank richtet sich in diesem Sinn an Herrn Dr.-Ing. Volker Middelman von der Firma VOITH. Dem Carl Hanser Verlag und Herrn *Jochen Horn* gebühren großer Dank für die gute Ausstattung des Buches und die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Benutzungshinweise

Gleichungen, Tabellen und Bilder sind in diesem Werk kapitelweise nummeriert. Die Bezeichnung **Tafel** wird nur auf der beigefügten CD-ROM verwendet und umfasst sowohl Tabellen als auch Hinweise, Ergänzungen und Diagramme für die Lösung von Turbomaschinenproblemen. Näherungsbeziehungen werden auch als **Formeln** bezeichnet.

Verwendete Abkürzungen:

AM Arbeitsmaschinen

KM Kraftmaschinen

StM Strömungsmaschinen (Turbomaschinen **TuM**)

P Pumpen

KP Kreiselpumpen

KV Kreiselerdichter

T Turbinen

DT Dampfturbinen

GT Gasturbinen

LT Luft-(Wind-)Turbinen

WT Wasserturbinen

HyM Hydraulische Strömungsmaschinen

ThM Thermische Strömungsmaschinen

KoM Kolbenmaschinen (KoP Kolbenpumpen, M Motore → Otto, Diesel)

OW Oberwasserspiegel

UW Unterwasserspiegel

Beispiele im Text werden mit **B**, **Übungsaufgaben** mit **Ü** gekennzeichnet. Die Beispiele sind zur Veranschaulichung in den Text eingefügt und sofort gelöst. Die Übungsaufgaben sollen dem Leser das selbstständige Bearbeiten von Strömungsmaschinen-Berechnungen ermöglichen.

Zur besseren Übersicht werden im Text und in den Bildern sowie bei den Lösungen der Beispiele und Übungsaufgaben folgende **Abkürzungen** verwendet:

D für Durchflussbeziehung, Druckstutzen

DP für Drehpunkt

DS für Drallsatz, Druckseite

EE für Energiegleichung realer Strömungen (sog. Erweiterte Energiegleichung)

ER für Energiegleichung der Relativströmung idealer Fluide

ES für Energiesatz und allgemein **E** für Energie

HK für Hauptgleichung der Kreiseleradtheorie (EULER-Kreiseleradgleichung)

HT für Hauptgleichung der Tragflügeltheorie (KUTTA-JOUKOWSKY-Gleichung)

IS für Impulssatz

K für Kontinuitätsgleichung

KR für Kontrollraum

S für Saugstutzen

SS für Saugseite

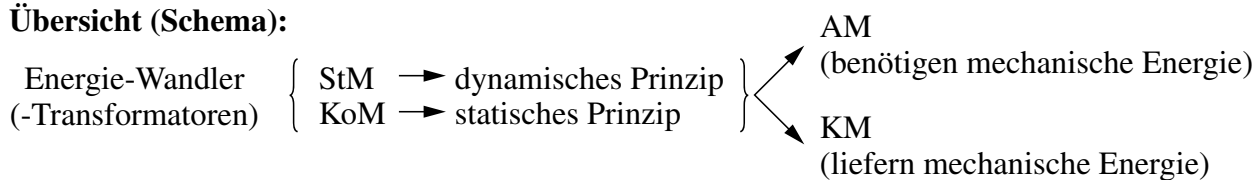
Bezugsstellen, die zur sinnvollen Anwendung der Gleichungen erforderlich sind, werden oft durch in **Kreise gesetzte Ziffern** gekennzeichnet und nach dem Abkürzungssymbol der betreffenden Gleichung aufgeführt. Es wurde versucht, möglichst viele Richtwerte anzugeben, die nach den Erfahrungen und Experimenten zu guten, d. h. energie- und abmessungsgünstigen Ergebnissen führen. Dabei sind in Klammern gesetzte Richtwertbereiche nur in Sonderfällen erreichbar, also einerseits einfache (niedrige Werte) und andererseits aufwendige (hohe Werte) Maschinenausführungen.

Übungsbeispiele (Übungsaufgaben):

Die Aufgabenstellungen zu den Übungsbeispielen sind kapitelweise auf der CD-ROM enthalten.

Die vollständigen Lösungen der 70 Übungsbeispiele sind auf der beigefügten CD-ROM als Skripten in Form von PDF-Dateien enthalten. Sie finden sie nach dem Start der CD-ROM im Hauptmenü unter dem Button „Lösungen der Übungsbeispiele“. Diese Lösungen beruhen immer nur auf dem Kenntnisstand, der bis zu der betreffenden Aufgabe vom Buch vermittelt worden ist. Fehlt bei den Texten der Beispiele die Angabe des Mediums, so ist bei Kreiselpumpen *Wasser* und bei Kreiselerdichtern *Luft* zugrunde zu legen. Bei nicht angegebenen Umgebungs- und Anfangswerten in den Aufgaben sind für den Umgebungs-, d. h. Barometerdruck, 1 bar und für die Umgebungs- bzw. Mediumtemperatur 20 °C zu setzen.

Berechnungen sollten nur so genau ausgeführt werden, wie es den Ausgangs-/Tabellen-/Diagrammwerten sowie dem Bekanntsein aller Einflussgrößen entspricht. Die Genauigkeit der Ergebnisse sollte somit der Genauigkeit der Vorgaben angepasst werden, wobei durch Überschlags- und Vergleichsrechnungen die Richtigkeit der Berechnungsergebnisse geprüft werden sollte.

Übersicht (Schema):**Hochvakuum:**

Die Wissenschaft benötigt weitgehend vollkommenes Vakuum für Experimente. Der Wirkungsgrad dieser dazu notwendigen Superturboverdichter steht dabei nicht im Vordergrund, sondern die Möglichkeit des Verwirklichens solcher extremer Hochvakuuma. Spezielle vielstufige Überschall-Turboverdichter erreichen bei mehrfacher Schallgeschwindigkeit mit Drehzahlen der Rotoren bis 100 000 Umdrehungen je Minute, bei bestmöglicher Kühlung, in ca. 5 Betriebsstunden in Hochvakuumkammern einen Druck von absolut etwa 0,000 001 bar (10^{-6}). Das entspricht dem Druck im Weltraum in 200 km Höhe über der Erde. Solche mehrstufigen, überschallschnell drehenden, in Magnetlagern geführten, hintereinander angeordneten Rotoren aus höchstwertigem Werkstoff, können sogar absolute Vakuumdrücke von 0,001 Milliardstel Bar ($10^{-4} \cdot 10^{-6} = 10^{-13}$) erreichen. Bei diesen Drücken befinden sich nur noch weniger als ca. 1000 Luftteilchen in einem Kubikzentimeter Volumen. Beim Umgebungsdruck (1 bar; 20 °C), dem mittleren Normalzustand, sind dies am Erdboden ca. 30 Trillionen ($30 \cdot 10^{18}$) Luftteilchen je Kubikzentimeter Volumen (cm^3), also etwa das 30-Billiardfache ($30 \cdot 10^{15}$ -fache).

Grundsätzliches:

Die Wirkung und damit Berechnung von Strömungsmaschinen erfolgt gemäß den Erkenntnissen der Fluidmechanik. Diese fußt auf den Gleichgewichtsbedingungen der NEWTONschen Axiome (Grundsätze) – Trägheit, Wechselwirkung, Aktion – und den Erhaltungsbedingungen von Masse sowie Energie. Hinzu kommt die Thermodynamik bei thermischen Turbomaschinen (KV, DT, GT). Auch Werkstoff- und Festigkeitstechnik sind zu beachten.

Alles, was nicht berechnet werden kann, was oft letztlich unmöglich oder zu kompliziert ist, wird gemessen. Das führt dann zu Mess-, Erfahrungs- und Richtwerten. Diese Näherungswerte fließen in die Berechnung ein. Kontrollversuche an der ausgeführten Maschine sind zur Sicherheit oft unerlässlich.

Erfahrungstatsachen sind letztlich nicht erklärbar, sondern nur erkennbar an deren Wirkung. Das sind statistische Globalaussagen gemäß der Atom- und Quantentheorie.

Maschinen- und Apparatechnik:

Um technische und wirtschaftliche sowie umweltschonende Produkte vorteilhaft zu verwirklichen, sind die geometrischen und physikalischen Bedingungen zu erfüllen, die zudem meist gekoppelt sind. Werkstoffe, Fertigung, Montage und Steuerung sind dabei ebenfalls zu beachten, also die gesamten Technischen Wissenschaften.

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 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 Diagonlräder	56
2.5.2.1 Strömungsverhältnisse	56
2.5.2.2 Naberverengung	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 (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	Lauftradgrößeneinfluss	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	Lauftradformen	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	Laufgradformen 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	Geräusentwicklung	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 II Turbomaschinenarten

Vorbemerkungen

Da der Schwerpunkt bewusst auf die entsprechend ausführlich behandelten Grundlagen (Teil I) gelegt wurde, muss, um den Umfang des Buches zu begrenzen, das Darstellen der verschiedenen Turbomaschinen-Ausführungen zwangsläufig etwas kurz ausfallen. Auf maschinentechnische Einzelheiten, wie die Konstruktion (Berechnen und Gestalten) von Wellen, Läufer, Radscheiben, Naben-Wellen-Verbindungen, Lager, Dichtungen, Gehäuse, wird, wenn überhaupt, nur stichwortartig eingegangen. Das Auslegen und Gestalten dieser Maschinenteile ist dem Studenten und Ingenieur, der sich mit Strömungsmaschinen befasst, weitgehend bekannt. Genaueres Beschreiben besonderer Probleme muss der Spezialliteratur und der praktischen Erfahrung vorbehalten bleiben.

Des Weiteren wird die Technik des Steuerns und Regels sowie Überwachens von Strömungsmaschinen, was heute meist hydraulisch-elektrisch über Prozessrechner mit entsprechender Software erfolgt, nicht behandelt. Das Lösen solcher Probleme ist Aufgabe der Steuerungs- und Regelungstechnik.

Um die Darstellung der unterschiedlichen Strömungsmaschinen nicht zu sehr abflachen zu lassen, wird auch hier der Schwerpunkt wieder auf die am häufigsten angewendeten Kreiselpumpen gelegt, mit denen fast jeder Maschinenbauer in Berührung kommt. Ausgeführte Maschinen auch auf CD-ROM.

10 Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen)

10.1 Grundsätzliches

Die vielfältigen Bedingungen hinsichtlich

- Fördermedium, physikalische und chemische Beschaffenheit
 - Dichte

- Raumbeständigkeit (Aggregatzustand), inkompressibel (flüssig), kompressibel (gasförmig)
- Viskosität
- Temperatur, Druck
- Zusammensetzung (rein, verunreinigt)
- Aggressivität (Säuren, Laugen etc.)
- Förderdruck
- Durchsatz
- Drehzahl, Antrieb
- Einbau, Saugverhalten

erfordern je nach Anwendungsfall unterschiedliche Ausführungsformen hinsichtlich Aufbau (Konstruktion) und Werkstoff sowie Betriebsweise. Pumpen sind deshalb außerordentlich vielgestaltig und wesentlich vielseitiger als Turbinen. Die folgende Übersicht beschränkt sich daher auf das Behandeln der wichtigsten Bauarten.

Bei Pumpen wird bekanntlich nach der Art des zu fördernden Mediums unterschieden:

- **Kreiselpumpen.** Strömungspumpen für inkompressible Fluide ($\rho \approx \text{konst} \rightarrow$ Flüssigkeiten).
- **Kreiseldichter.** Strömungspumpen für kompressible Fluide ($\rho \neq \text{konst} \rightarrow$ Gase).

10.2 Kreiselpumpen

10.2.1 Vorbemerkungen

Kreiselpumpen lassen sich klassifizieren

- nach der Bauform \rightarrow Form des Laufrades
 - Radialpumpen
 - Diagonal- oder Halbaxialpumpen
 - Axial- oder Propellerpumpen ohne oder mit Spiralgehäuse und dann auch als **Spiralgehäusepumpen** bezeichnet.
- nach der Bauart
 - einstufig, mehrstufig
 - einflutig, mehrflutig
 - kombiniert \rightarrow mehrstufig-mehrflutig

- nach der Bauweise → Maschinenaufbau
 - fliegende Laufrad-Anordnung (einseitige Lagerung). Vor allem bei ein- und wenigstufigen Pumpen in
 - Lagerstuhl- oder Lagerbügelausführung
 - Blockbauweise. Laufrad direkt auf der Motorwelle angeordnet, mit Gleitringdichtung oder hermetisch gekapselt (Spaltrahmotor)
 - beidseitig gelagerter Läufer. Vor allem bei mehrstufigen und mehrflutigen Pumpen.
 - Ausgeführt als
 - Gehäusertyp, ein Gehäuse
 - Ringtyp, Gehäuse aus einzelnen Ringen, sog. Gliederpumpe
 - Mantelgehäusertyp, Außen- und Innengehäuse.
- nach dem Fördermedium → Reinheit, Aggressivität.

Pumpen für

 - reine und gering verschmutzte neutrale Flüssigkeiten
 - verschmutzte Flüssigkeiten und Dickstoffe
 - aggressive Flüssigkeiten
 - erosive Flüssigkeiten
 - leicht gasende Flüssigkeiten und Flüssigkeit-Gas-Gemische (Mehrstoffgemische)
 - Flüssigkeit-Feststoff-Gemische
 - flüssige Metalle
- nach der Anwendung
 - normale Bauarten, vor allem Wasserpumpen
 - Sonderbauarten
 - Chemiepumpen
 - Bohrlochpumpen (Unterwasserpumpen)
 - Dickstoffpumpen
 - Kraftwerkspumpen → Kesselspeise-, Kondensat-, Reaktor- und Pumpspeicherungspumpen
 - Schiffspumpen
 - Heizungs- oder Heißwasserumwälzpumpen
 - Spezialpumpen
- nach der Betriebsweise
 - normalsaugende, d. h. nicht selbstsaugende Pumpen
 - selbstsaugende Pumpen

Strömungspumpen werden, weil darin Druckumsetzung, d. h. verzögerte Strömung herrscht, in der Regel mit Überdruckwirkung (Reaktion) ausgeführt, also Reaktionsgrad $r > 0$. Grund: Wie bereits in Ab-

schnitt 6.1.4.4 erläutert, ist im rotierenden Laufrad infolge Fliehkraftwirkung die Strömungsablösungsgefahr geringer als in der ruhenden Leitvorrichtung. Grenzschichtanhäufungen werden im Laufrad abgeschleudert. Trotzdem liegen die von Pumpen erreichten Wirkungsgrade meist niedriger als bei Turbinen (beschleunigte Strömung, Abschnitt 1.5.1).

10.2.2 Laufradformen und Kenngrößen

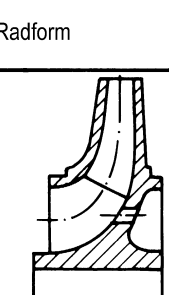
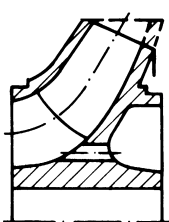
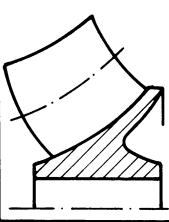
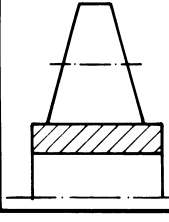
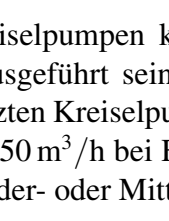
Tabelle 10-1 enthält die verschiedenen Laufradformen in prinzipieller Form sowie die zugehörigen Kennwerte und Tendenzen. Die Grenzen der Kennzahlenbereiche verlaufen fließend, weshalb diese verschiedene Forscher unterschiedlich festlegen. Bei den aufgeführten Stufenförderhöhen handelt es sich um grobe Richtwerte für Pumpen normaler, d. h. technisch üblicher Ausführung und Größe (Laufraddurchmesser). Hochwertige Konstruktionen erreichen oft wesentlich höhere Werte.

Bei Strömungspumpen ist wegen Überdruckwirkung ($r > 0$) und konstruktiven Gründen Teilbeaufschlagung nicht möglich, weshalb die spezifische Drehzahl nicht beliebig weit gesenkt werden kann. Zudem fällt der Pumpenwirkungsgrad mit abnehmender Schnellläufigkeit (Abschnitt 10.2.3). Deshalb sollen Pumpenlaufräder mit spezifischer Drehzahl unter 0,03 ($n_y < 0,03$) nicht mehr ausgeführt werden. Einstufige Spiralgehäusepumpen mit $n_y = 0,03$ erreichen nur noch einen effektiven Wirkungsgrad von etwa 50 % (Bild 10-1). Um zu große Abmessungen und extreme Kavitationsgefahr zu vermeiden, soll andererseits bei Propellerpumpen die spezifische Drehzahl von 1,5 nicht überschritten werden. Die Schnellläufigkeitsgrenzen für die Maschine – untere Grenze $n_y = 0,03$, obere Grenze $n_y = 1,5$ – sind jedoch durch entsprechende Laufradkombinationen ausweitbar. Ergibt sich bei den geforderten (Maschinen-)Ausgangswerten \dot{V} , $Y = g \cdot H_{\text{ges}}$ und n für die gesamte Kreiselpumpe (Index M → Maschine) eine spezifische Drehzahl von $n_{y,M} < 0,03$, ist Übergang auf mehrstufige Radialausführung notwendig, also $i > 1$. $n_{y,M} > 1,5$, ist Übergang auf mehrflutige Anordnung erforderlich, d. h. $j > 1$.

TROSKOLAŃSKI [32] unterscheidet nach der Gesamtförderhöhe H_{ges} :

Niederdruckpumpen	$H_{\text{ges}} < 50 \text{ m}$
Mitteldruckpumpen	$H_{\text{ges}} = 50 \dots 100 \text{ m}$
Hochdruckpumpen	$H_{\text{ges}} > 100 \text{ m}$

Tabelle 10-1 Laufradformen, Kenngrößen und Bezeichnungen. n_y, n_q, σ Radformkennzahlen. H_{max} maximale Stufenförderhöhe (Richtwerte) bei üblichen Radverhältnissen (Größe und Drehzahl). Punkte ... bedeutet bis. Hinweis auf Tabelle 4-2.

Radform		n_y	n_q [min ⁻¹]	σ	H_{max} [m]	Bemerkungen	
						\dot{V}	H
I (Radialrad)		0,03 ... 0,12	10 ... 40	0,064 ... 0,26	~200	klein ↑ groß	Hochdruckrad, Langsamläufer
II (FRANCIS- oder Halbaxialrad)		0,12 ... 0,24	40 ... 80	0,26 ... 0,52	~60	↑	Mitteldruckrad, Mittelläufer
III (Schrauben- oder Diagonalrad)		0,24 ... 0,48	80 ... 160	0,52 ... 1,04	~30	↑	Niederdruckrad, Schnellläufer
IV (Propeller oder Axialrad)		0,3 ... 1,5	100 ... 500	0,64 ... 3,2	~15	↓ groß ↑ klein	Schnellstläufer

Die Kreiselpumpen können dabei durchaus mehrstufig ausgeführt sein. Über 50 % aller betrieblich eingesetzten Kreiselpumpen arbeiten mit Förderströmen bis 50 m³/h bei Förderhöhen unter 100 m, sind also Nieder- oder Mitteldruckpumpen.

Der Regelbereich hinsichtlich der Fördermenge \dot{V}_x liegt zwischen:

$$\dot{V}_{min} = (0,1 \dots 0,2) \cdot \dot{V} \quad \text{und}$$

$$\dot{V}_{max} = (1,5 \dots 1,8) \cdot \dot{V}$$

Die höchste erreichbare Stufenförderhöhe beträgt üblicherweise etwa 400 m, beispielsweise bei Pumpspeicherpumpen. Nach anderen Quellen erreichen insbesondere Prozess- und Kesselspeisepumpen bei der Drehzahl von etwa 6 000 min⁻¹ Stufenförderhöhen bis 650 m, in Grenzfällen sogar bis ca. 1000 m. Der Antrieb solcher Maschinen erfolgt meist direkt durch Dampfturbinen. Wegen der hohen

Drehzahl muss das Fördermedium der Pumpe wegen Kavitationsgefahr (Abschnitt 5.2) mit ausreichendem Zuströmdruck mittels **Vorpumpe** zugeführt werden. Eine amerikanische Spezial-Prozesspumpe erreichte bei der Drehzahl $n = 24\,000 \text{ min}^{-1}$ und dem Vordruck von $p = 10 \dots 20 \text{ bar}$ sogar eine Stufenförderhöhe von fast 1800 m.

B 5 Übliche Radial-Kreiselpumpen werden dagegen selten mit Stufenförderhöhen größer als 200 m gebaut. Die Stufenförderhöhe 200 m benötigt bei $n = 2880 \text{ min}^{-1} = 48 \text{ s}^{-1}$ (Lastdrehzahl von 2-poligem Elektromotor) und der Druckziffer $\psi = 1$ (Abschnitt 4.3.3.2) einen Laufraddurchmesser von:

$$u_2^2 = 2 \cdot \Delta Y / \psi = 2 \cdot g \cdot H_{ges} / \psi$$

$$= 2 \cdot 9,81 \cdot 200 / 1 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 3\,924 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$u_2 = 62,64 \text{ m/s}$$

Hierzu nach $u_2 = D_2 \cdot \pi \cdot n$

$$D_2 = \frac{u_2}{\pi \cdot n} = \frac{62,64 \text{ m/s}}{\pi \cdot 48 \text{ 1/s}} = 0,415 \text{ m} \approx 400 \text{ mm}$$

Tabelle 10-2 Richtwerte für die Abmessungsverhältnisse von Pumpenlaufrädern

n_y	0,03	0,15	0,30	0,45
Radform	I	II	III	IV
$D_S/D_{2,(a)}$	0,28	0,65	0,84	1,0
$b_2/D_{2,(a)}$	0,02	0,11	0,18	0,3 \dots 0,2
$D_{1,(i)}/D_{2,(a)}$	0,25	0,4	0,5	0,4 \dots 0,6

Richtwerte für das Gestalten von Pumpen-Laufrädern, kurz auch als Läufer, Rad oder Kreisel bezeichnet, gehen aus Tabelle 10-2 hervor.

Gebaut werden Kreiselpumpen für Förderhöhen von wenigen Zentimetern bis etwa 5000 m, was ungefähr 500 bar Förderdruck entspricht. Der je Rad bzw. Flut verarbeitete Volumenstrom reicht von 0,1 m³/h (untere Grenze) bis ca. 100 000 m³/h, bei Pumpspeicherpumpen (Abschnitt 10.2.6.5) sogar bis 500 000 m³/h. Der Bereich der notwendigen Antriebsleistung erstreckt sich dabei von wenigen Watt bis etwa 300 MW.

Bei den üblichen Drehzahlen (1 440 min⁻¹ oder 2 880 min⁻¹) werden Stufenzahlen bis etwa 20 ausgeführt, in Sonderfällen (senkrechte Anordnung) bis 40, also $i \leq 20 (\dots 40)$.

Gemäß der EULER-Gleichung bzw. den Affinitätsgesetzen (Abschnitt 4.2.3) steigt die Stufenförderhöhe etwa quadratisch mit der Maschinendrehzahl. Deshalb geht bei höheren Drehzahlen die erforderliche Stufenzahl entsprechend zurück. Beispielsweise ist

in Ländern mit 60 Hz Netzfrequenz (USA) die Stufenförderhöhe der gleichen Pumpe um $(60/50)^2 = 1,44$, also 44 % größer als bei 50 Hz Netzfrequenz (Europa).

Bei Axial-Kreiselpumpen ist die erreichbare Förderhöhe bei festliegender Umfangsgeschwindigkeit vom Quotienten Innen- zu Außendurchmesser, dem Nabenverhältnis $\nu = D_{(i)}/D_{(a)}$, abhängig. Die Förderhöhe geht umso mehr zurück, je kleiner ν wird. Propellerpumpen mit kleinem Durchmesser Verhältnis ($\nu \approx 0,3 \dots 0,35$) erreichen nur Förderhöhen von 1 ... 3 m, jedoch sehr große Fördermengen. Mit zunehmendem Nabenverhältnis wächst die Förderhöhe und erreicht bei $\nu \approx 0,65 \dots 0,7$ Werte bis ca. 25 m (einstufig). Die Förderströme variierten dabei in weiten Grenzen von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ bis herab auf $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Zusammenhang zwischen Förderhöhe, Flügelzahl des Propellers und Schnellläufigkeit geht aus Tabelle 10-3 hervor.

Tabelle 10-3 Flügelzahl z_{La} und etwaige maximale Förderhöhe H_{max} von Axialpumpen, abhängig von der spezifischen Drehzahl n_y (Richtgrößen)

n_y	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5
z_{La}	6	5	4	3	2
H_{max} in m	22	15	10	6	3

10.2.3 Wirkungsgrad

In Abschnitt 8.3 wurden die Strömungsmaschinen-Verluste analysiert. Abschnitt 8.5 zeigt, wie die Verluste in die Wirkungsgrade einfließen. Die relativ weit gesteckten Richtwertbereiche von Abschnitt 8.5 gelten für alle Strömungsmaschinen. Sie sollen hier speziell für Pumpen aufgrund von Versuchswerten eingengt und ergänzt werden. Festzuhalten ist nochmals, dass Wirkungsgrade letztlich immer nur experimentell ermittelbar sind. Angegebene Werte gelten deshalb nur exakt für die untersuchte Maschine. Dies ist beim Übertragen auf andere Verhältnisse, z. B. als Auslegungsgrundlage, zu beachten. Je besser die Einflüsse erkannt und beim Festlegen (Schätzen) des Wirkungsgrades berücksichtigt werden, desto genauer verwirklicht die ausgeführte Maschine ihre energetischen Berechnungswerte.

Der Wirkungsgrad von Kreiselpumpen wird hauptsächlich durch die Schaflungs- und Radreibungsverluste bestimmt. Bei Pumpen niedriger Schnellläufigkeit (Radialräder) überwiegen infolge verhältnis-

mäßig großer radialer Laufraderstreckung (Durchmesser) die Radreibungsverluste (Abschnitt 8.3.2.3) und wegen der meist hohen Strömungsgeschwindigkeit die Strömungsverluste in der Leitvorrichtung. Bei Pumpen großer spezifischer Drehzahl (Diagonal- und Axialräder) treten die Strömungsverluste im Laufrad (Laufschaufelverluste) in den Vordergrund. Bei spezifisch langsamläufigen Pumpen ist daher besondere Aufmerksamkeit den Laufradaußenflächen (geringe Rauheit) und der strömungstechnisch günstigen Ausbildung der Leitvorrichtung zu widmen. Bei Pumpen großer spezifischer Drehzahl muss dagegen angestrebt werden, die Reibungsflächen innerhalb des Laufrades zu verringern, und zwar durch Vermindern der Schaufelzahl und Weglassen der vorderen, d. h. äußeren Deckwand (Schrauben- und Axialpumpen).

Der Pumpenwirkungsgrad hängt somit von der spezifischen Laufraddrehzahl ab. Erfahrungen und Versuche von KRISAM¹⁾ bestätigen diese Zusammenhänge. Die Ergebnisse der Messungen, welche KRISAM an serienmäßig hergestellten, einstufigen Kreiselpumpen kleiner und mittlerer Leistung durchführte, sind in Bild 10-1 dargestellt. Um den Einfluss der Wandrauigkeit auszuschalten, wurden nur Laufräder gleicher Größenordnung und Qualität untersucht.

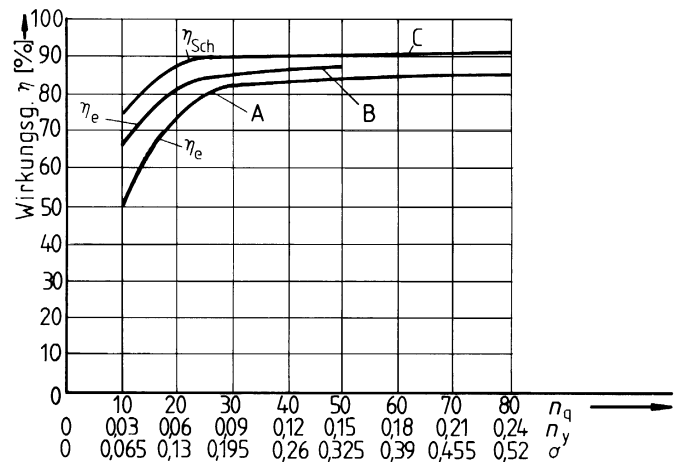


Bild 10-1 Pumpenwirkungsgrade (effektiver Wirkungsgrad η_e und Schaflungswirkungsgrad η_{Sch}), abhängig von der spezifischen Drehzahl n_y (KRISAM, KSB).
 Kurve A: Kreiselpumpe mit Spiralgehäuse.
 Kurve B: Kreiselpumpe mit Leitrad und Spiralgehäuse.
 Kurve C: Schaflungswirkungsgrad zu Kurve B

Die Kurven in Bild 10-1 zeigen, dass der Wirkungsgrad mit wachsender Schnellläufigkeit anfänglich rasch steigt, dann langsamer zunimmt und sich

¹⁾ KRISAM, F.: Die Grenzen der Verwendbarkeit der Kreiselpumpen, Technik 3, S. 305 ff.

schließlich in beiden Fällen einem Grenzwert nähert. Das Diagramm lässt außerdem erkennen:

- Bei kleiner spezifischer Drehzahl ist es hinsichtlich guten Wirkungsgrades vorteilhaft, ein Leitrad zwischen Laufrad (Kreisel) und Spiralgehäuse anzuordnen.
- Im Bereich $n_y < 0,03$ ist der Wirkungsgrad sehr niedrig und fällt zudem steil ab. Deshalb gilt $n_y = 0,03$ als sinnvolle untere Grenze für den Bau einstufiger Kreiselpumpen (Bild 8-13).

Zu beachten ist jedoch, dass der jeweils erreichbare Wirkungsgrad nicht nur von der Schnellläufigkeit, sondern auch von der Größe der Pumpe sowie der Güte der Konstruktion (Schaufelwinkel, Schaufelform, Kanalquerschnitt, Meridianschnittform) und der Qualität der Ausführung (Wandrauigkeit, Spaltweiten, Radien) abhängt.

Dem Verbessern des Pumpenwirkungsgrades mit zunehmender Schnellläufigkeit steht andererseits ein Verschlechtern der Saugfähigkeit infolge wachsender Kavitationsgefahr gegenüber.

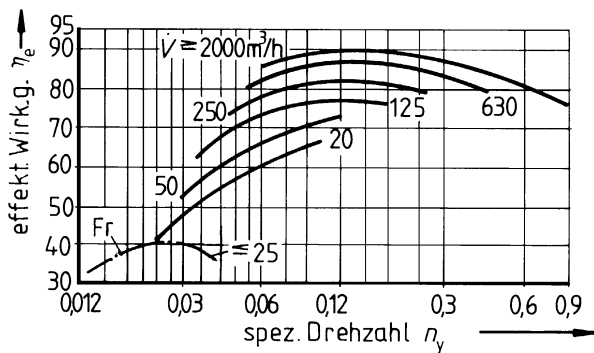


Bild 10-2 Effektiver Wirkungsgrad von Kreiselpumpen, abhängig von spezifischer Drehzahl n_y und Baugröße, gekennzeichnet durch Förderstrom \dot{V} als Parameter [37]

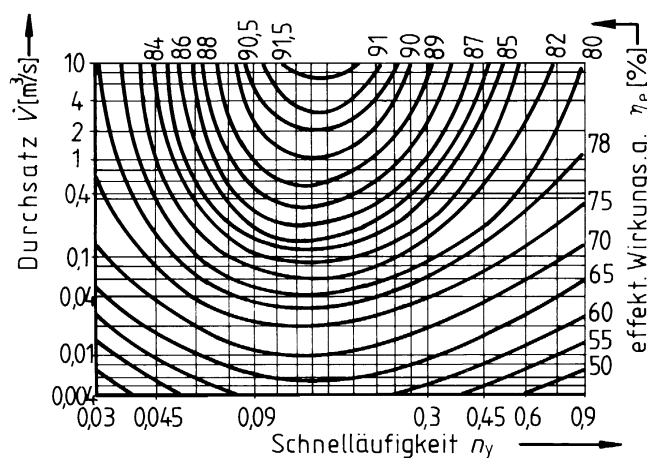


Bild 10-3 Effektiver Wirkungsgrad η_e (Gesamtwirkungsgrad) einstufiger Kreiselpumpen, abhängig von Schnellläufigkeiten n_y und Durchsatz \dot{V} [35]

Der Größeneinfluss, d. h. die Baugröße der Kreiselpumpe, gekennzeichnet durch den Volumenstrom \dot{V} , geht aus Bild 10-2 und 10-3 hervor. Zum Vergleich sind zwei unterschiedliche, in der Praxis verwendete Diagramme dargestellt. In Bild 10-2 ist ergänzend auch der Wirkungsgradverlauf von **Flügelrädern**, gekennzeichnet mit Fr ($n_y = 0,012 \dots 0,036$), der sog. **Seitenkanalpumpen**, eingetragen.

Bild 10-4 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades mit dem Volumendurchsatz \dot{V}_x und zwar für die verschiedenen Pumpentypen (Radform I bis IV). Um die unterschiedlichen Läuferformen besser vergleichen zu können, ist der jeweils erreichte effektive Wirkungsgrad $\eta_{e,x}$ im Verhältnis zum optimalen Effektivwirkungsgrad η_e (Auslegungswert, zugehörig Nenndurchsatz \dot{V}) über dem Belastungsgrad \dot{V}_x/\dot{V} aufgetragen. Das ergibt den Vorteil, dass die Wirkungsgradlinien der verschiedenen Radformen trotz unterschiedlichem optimalem effektivem Wirkungsgrad η_e im Auslegungswert alle durch den gleichen Punkt laufen. Der Auslegungspunkt ist durch den Belastungsgrad $\dot{V}_x/\dot{V} = 1$ und den bezogenen Effektivwirkungsgrad $\eta_{e,x}/\eta_e = 1$ gekennzeichnet.

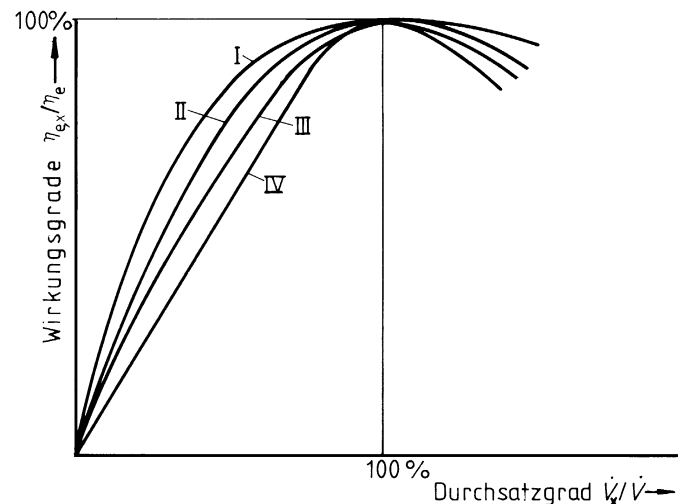


Bild 10-4 Wirkungsgradkurven. Verlauf der bezogenen Wirkungsgrade $\eta_{e,x}/\eta_e$ der Radformen I bis IV, abhängig vom Durchsatzgrad \dot{V}_x/\dot{V} (Prinzipdarstellung)

Das Diagramm zeigt, mit zunehmender Schnellläufigkeit verlaufen die Kurven steiler und weisen ein immer spitzeres Maximum auf. Der Wirkungsgradabfall ist daher beim Abweichen des Förderstromes vom Auslegungswert \dot{V} , also im Teil- und Überlastbereich, bei Radform II größer als bei Radform I und bei Radform IV am stärksten. Dies begründet sich durch die Teillastwirbel (Abschnitt 9.2.1.8). Spez. Schnellläufer zeigen somit ungünstigeres Regelver-

halten. Das ungünstige Teillastverhalten ist beim praktischen Einsatz von Pumpen höherer spezifischer Drehzahl zu beachten.

LOMAKIN nennt für den Schauflungswirkungsgrad η_{Sch} von Radial- und Diagonalpumpen (Radform I bis III) folgende Näherungsbeziehung:

$$\eta_{Sch} = 1 - 3,8 \cdot [8,6 - \lg(n/\dot{V})]^{-2} \quad (10-1)$$

mit Pumpendrehzahl n in s^{-1}
 Förderstrom \dot{V} in m^3/s

Die Formel beinhaltet über den Durchsatz \dot{V} und die Drehzahl n ebenfalls den Einfluss der Baugröße sowie der Schnellläufigkeit der Maschine.

Die mechanischen Verluste, welche in den mechanischen Wirkungsgrad eingehen, sind – ein Vorteil aller Strömungsmaschinen – bei Kreiselpumpen sehr niedrig. Sie setzen sich aus Reibungsverlusten in Dichtungen und Lagern der Maschinenwelle zusammen. Die Lagerreibungsverluste liegen meist nicht über etwa 1 % der Wellenleistung. Die Reibungsverluste in den Stopfbuchsen betragen normalerweise 0,3... 3 % der Wellenleistung. Bei kleinen Kreiselpumpen, die oft mit Weichpackungs-Stopfbuchsen ausgerüstet werden, können diese Verluste jedoch wesentlich höher sein.

Bei unsachgemäßer Wartung, d. h. zu starkem Anpressen der Stopfbuchse, wird die Stopfbuchsreibung zu groß (Energieverlust, Verschleiß, Temperatur), was bis zum Abbremsen des Antriebsmotors führen kann. Deshalb Stopfbuchsen nur bei laufender Maschine ein- bzw. nachstellen! Die verstärkt eingesetzten Gleitringdichtungen sind nicht nachstellbar sowie nur aufwendig auszutauschen, verursachen jedoch geringere Reibungsverluste und benötigen weniger Platz.

Die Anwendungsbereiche der verschiedenen Dichtungsarten werden vor allem durch die Umfangsgeschwindigkeit u und den abzudichtenden Druck p bestimmt: Richtwerte

- Packungen: $u \leq 40$ m/s, bis höchste Drücke p
- Gleitring: $u \leq 100$ m/s, $p \leq 50$ bar
- Schwimmringe bis höchste u - und p -Werte.

Bild 10-5 enthält den mechanischen Wirkungsgrad η_m und den Liefergrad λ_L einstufiger Kreiselpumpen, zugeordnet zur Baugröße, d. h. zum Nennförderstrom \dot{V} .

Nach LOMAKIN kann für das Festlegen des Liefergrades λ_L von Kreiselpumpen der Radformen I bis III auch folgende Näherungsformel verwendet werden:

$$1/\lambda_L \approx 1 + 0,01 \cdot n_y^{-2/3} \quad (10-2)$$

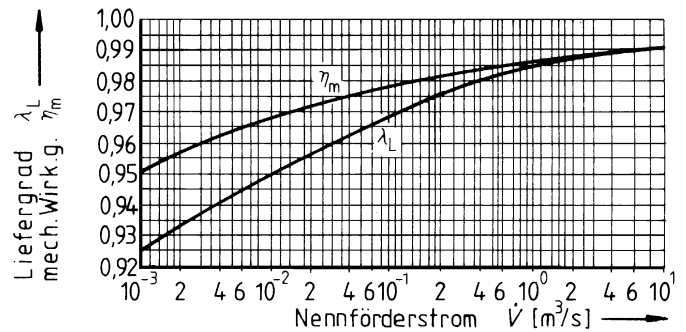


Bild 10-5 Mechanischer Wirkungsgrad η_m und Liefergrad λ_L von einstufigen Kreiselpumpen, abhängig vom Nennförderstrom \dot{V} [35]

Der niedrige innere und damit auch effektive Wirkungsgrad von Kreiselpumpen im Vergleich zu denen von Wasserturbinen folgt aus den höheren Radreibungsverlusten. In dem Bestreben, die Diffusorverluste (Hauptanteil der Schauflungsverluste) gering zu halten, wird der Laufraddurchmesser von radialen Kreiselpumpen etwa 1/3 größer ausgeführt als bei Wasserturbinen gleicher Schnellläufigkeit sowie gleichen Betriebswerten, was die höhere Radseitenreibung ergibt.

10.2.4 Läuferkräfte

10.2.4.1 Achsschub (Axialkraft)

Der **Achs- oder Axialschub** ergibt sich als Resultierende aller am Laufrad (einstufige Pumpe) bzw. Läufer (mehrstufige Maschine) wirkenden Axialkräfte. Der Achsschub kann beträchtliche Größenwerte erreichen und wirkt, wie noch begründet wird, immer in Richtung zum Saugstutzen der Maschine, d. h. entgegen der Zuströmrichtung. Der Axialschub setzt sich aus statischen (Druckkräften) und dynamischen Anteilen (Impulsänderungen, Staudruck) zusammen. Diese Wirkungen sind vom konstruktiven Aufbau sowie der Ausführung (Oberflächengüte, Maßgenauigkeit) der Maschine abhängig und ändern sich zudem mit deren Betriebszustand (Teil-, Normal-, Überlast). Infolge der vielen Einflüsse lassen sich für den Achsschub keine exakten Beziehungen herleiten, weshalb mit experimentell abgesicherten Näherungs- oder Überschlagsformeln gerechnet wird.

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, Aufwerteformel 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

Arbeitsminderungsanzahl 82
 A-Regelstufe 396
 ARGUS-SCHMIDT-Rohr 421
 Auftrieb 90
 Auftriebsbeiwert 94
 Aufwerteformel 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 282
 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
 Axialspalt 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
 Brettsschnitt 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
 Dampfnässe 382
 Dampfturbine 209, 281, 356, 372
 –, Einteilung 375
 Dampfzustand 381
 Deckscheibe 17, 57
 Diagonalmaschine 36
 Diagonalpumpe 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
 Druckverhältnissfaktor 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-Gasturbinentriebwerk 403
 Flugzeugpropeller 430
 Fluid 17
 Fluidenergiemaschine 28
 Fluid-Schallgeschwindigkeit 53
 Flussfläche 17
 Flüssigkeitskupplung 434
 Flüssigrakete 422
 Fluslinie 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 27, 337
 Gegenlaufpropeller 432
 Gegenlauf-Radialturbine 398
 gekühlte Verdichtung 320
 geometrische Größe 19
 gerades (ebenes) Gitter 17
 Geräuschentwicklung 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
 Hakenschaufel 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
 Hohlsgwirkung 124
 homolog 17
 Hosenrohr 200
 hydraulische Anlage 278
 hydraulische Energie 27
 hydraulische Maschine 27, 222
 hydraulischer Verlust 224
 hydraulischer Wirkungsgrad 86

Hydrodynamikeffekt 24
 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 25
 Kompression, ungekühlte 320
 Kompressor 27, 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
 Kreisradhauptgleichung 74
 Kreisverdichter 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

- Laufradarbeit 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 27, 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
 Profilwinkel 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
 Rückföhrrkanal 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
 Saugseitenabspernung 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
 Schnelllaufzahl 114, 381, 425
 Schnellschluss 281
 Schräganschnitt 176
 Schraube 427
 Schraubenpropeller 427
 Schraubepumpe 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
 Spaltemengenstrom 232
 Spaltrohrmotor 316
 Spaltrohrmotorpumpe 306, 310, 316
 Spaltströmung 230
 Spaltverlust 228, 231
 Speicherfähigkeit 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
 Stutzenarbeit 85, 87, 219
 Stutzenleistung 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
 Thermoerfekt 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 25
 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
 Vortriebsenerzeugung 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.
 Wasserwerkpumpe 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