

# 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.

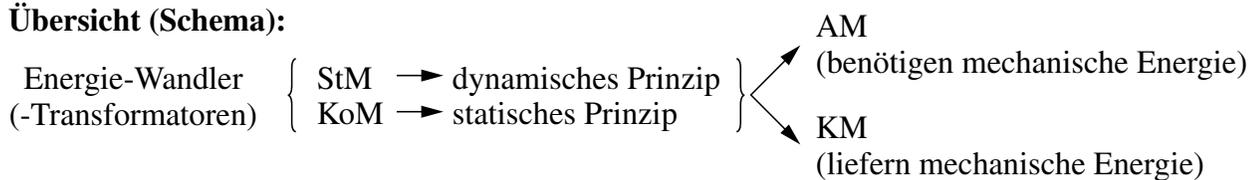
### Übungsbeispiele (Übungsaufgaben):

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 ( $\text{cm}^3$ ), 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

<b>Teil I Grundlagen</b> .....	17
<b>1 Allgemeines</b> .....	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
<b>2 Strömungsverhältnisse</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Energieumsatz</b>	<b>73</b>
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 $\Delta Y$ 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
<b>4</b>	<b>Affinitätsregeln und Kennziffern</b>	<b>99</b>
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
<b>5</b>	<b>Kavitation und Überschall</b>	<b>124</b>
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
<b>6</b>	<b>Lauftradformen</b>	<b>147</b>
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
<b>7</b>	<b>Leitvorrichtungen</b>	<b>171</b>
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
<b>8</b>	<b>Spezifische Stutzenarbeit, Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade</b>	<b>219</b>
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 $\lambda_L$	247
8.5.3	Schauflungswirkungsgrad $\eta_{Sch}$	247
8.5.4	Innerer Wirkungsgrad $\eta_i$	247
8.5.5	Mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m$	248
8.5.6	Effektiver Wirkungsgrad $\eta_e$	248
8.5.7	Weitere Wirkungsgrade bei thermischen Turboarbeitsmaschinen	249
8.5.8	Weitere Wirkungsgrade bei Turbokraftanlagen	249
8.5.9	Anlagenwirkungsgrad $\eta_A$	251
8.5.10	Spezielle Wirkungsgrade	251

<b>9</b>	<b>Betriebliches Verhalten (Kennlinien, Kennfelder)</b>	<b>252</b>
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

<b>10</b>	<b>Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen)</b>	<b>285</b>
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
<b>11</b>	<b>Übersicht über die Turbinen (Turbokraftmaschinen)</b>	<b>356</b>
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
<b>12</b>	<b>Antriebspropeller</b>	<b>427</b>
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
<b>13</b>	<b>Aggregate</b>	<b>433</b>
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
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>442</b>
14.1	Lehrbücher	442
14.2	Spezialwerke	442
14.3	Handbücher und Sonstige	444
<b>15</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>445</b>

# 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

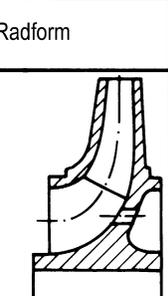
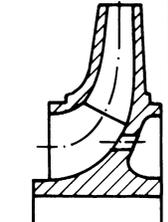
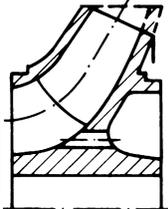
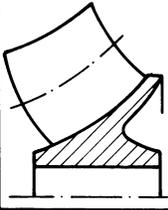
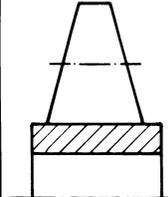
Tabelle 10-1 enthält die verschiedenen Laufradformen in prinzipieller Form sowie die zugehörigen Kennwerte und Tendenzen. Die Grenzen der Kennzahlenbereiche verlaufen fließend, weshalb diese verschiedene Forscher unterschiedlich festlegen. Bei den aufgeführten Stufenförderhöhen handelt es sich um grobe 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  $H_{\text{ges}}$ :

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.  $n_y, n_q, \sigma$  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 <sup>-1</sup> ]	$\sigma$	$H_{max}$ [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 Halbbaxialrad)		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 m<sup>3</sup>/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<sup>-1</sup> 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 ... 0,2
$D_{1,(i)}/D_{2,(a)}$	0,25	0,4	0,5	0,4 ... 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 m<sup>3</sup>/h (untere Grenze) bis ca. 100 000 m<sup>3</sup>/h, bei Pumpspeicherpumpen (Abschnitt 10.2.6.5) sogar bis 500 000 m<sup>3</sup>/h. Der Bereich der notwendigen Antriebsleistung erstreckt sich dabei von wenigen Watt bis etwa 300 MW.

Bei den üblichen Drehzahlen (1 440 min<sup>-1</sup> oder 2 880 min<sup>-1</sup>) 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  $\nu$  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 KRISAM<sup>1)</sup> 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.

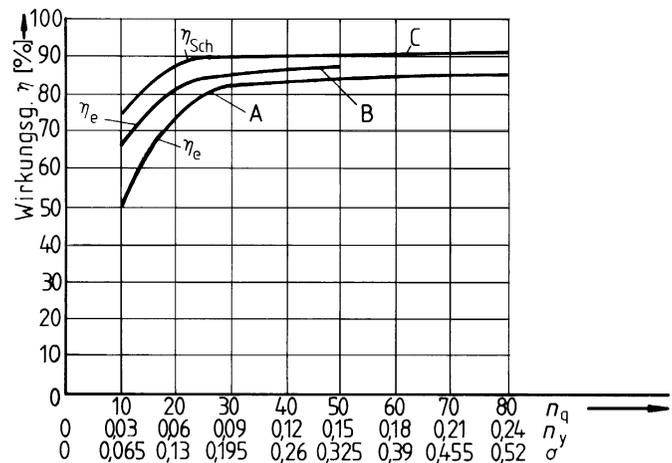


Bild 10-1 Pumpenwirkungsgrade (effektiver Wirkungsgrad  $\eta_e$  und Schaflungswirkungsgrad  $\eta_{Sch}$ ), abhängig von der spezifischen Drehzahl  $n_y$  (KRISAM, KSB).  
 Kurve A: Kreiselpumpe mit Spiralgehäuse.  
 Kurve B: Kreiselpumpe mit Leitrad und Spiralgehäuse.  
 Kurve C: Schaflungswirkungsgrad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

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

<sup>1)</sup> 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.

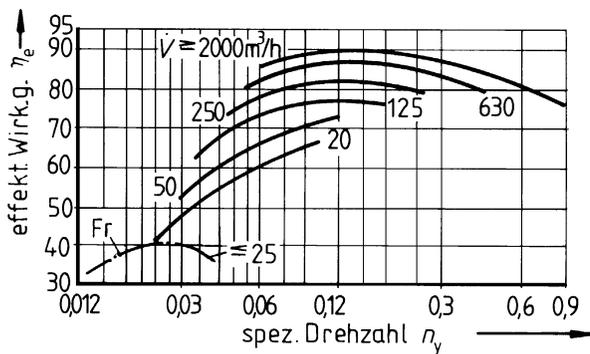


Bild 10-2 Effektiver Wirkungsgrad von Kreiselpumpen, abhängig von spezifischer Drehzahl  $n_y$  und Baugröße, gekennzeichnet durch Förderstrom  $\dot{V}$  als Parameter [37]

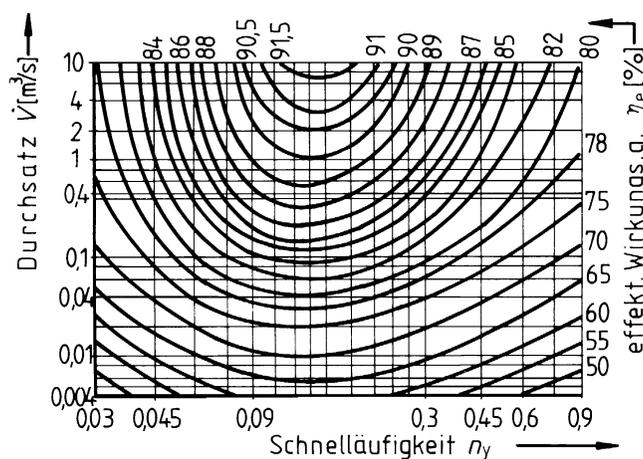


Bild 10-3 Effektiver Wirkungsgrad  $\eta_e$  (Gesamtwirkungsgrad) einstufiger Kreiselpumpen, abhängig von Schnellläufigkeiten  $n_y$  und Durchsatz  $\dot{V}$  [35]

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. **Seitenkanalumpen**, 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  $\eta_e$  (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  $\eta_e$  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.

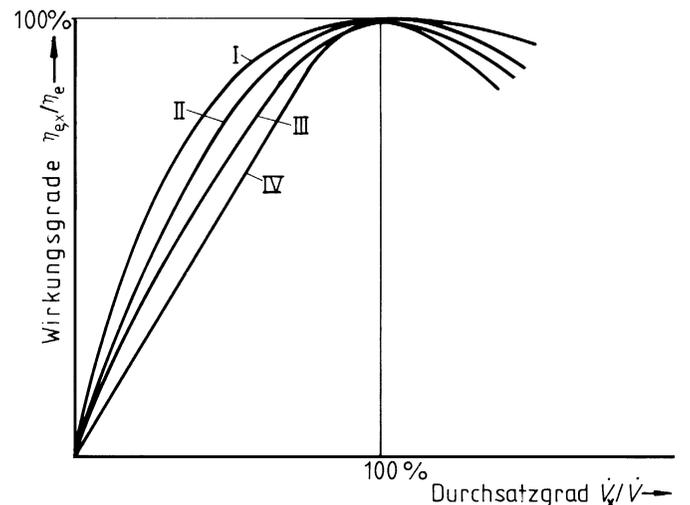


Bild 10-4 Wirkungsgradkurven. Verlauf der bezogenen Wirkungsgrade  $\eta_{e,x}/\eta_e$  der Radformen I bis IV, abhängig vom Durchsatzgrad  $\dot{V}_x/\dot{V}$  (Prinzipdarstellung)

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  $\eta_{Sch}$  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  $\eta_m$  und den Liefergrad  $\lambda_L$  einstufiger Kreiselpumpen, zugeordnet zur Baugröße, d. h. zum Nennförderstrom  $\dot{V}$ .

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

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

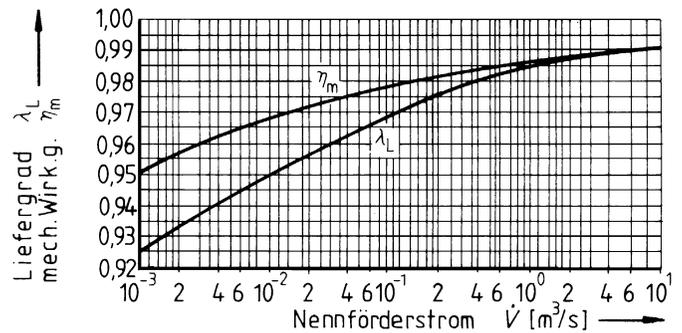


Bild 10-5 Mechanischer Wirkungsgrad  $\eta_m$  und Liefergrad  $\lambda_L$  von einstufigen Kreiselpumpen, abhängig vom Nennförderstrom  $\dot{V}$  [35]

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  
 Axialbeschauelung 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  
 Kreiseldradhauptgleichung 74  
 Kreiseldverdichter 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  
 Stopfbuchsdichtung 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  
 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  
 Umlenkkranz 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