

# 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	26
1.4 Wirkungsweise	29
1.4.1 Grundsätzliches	29
1.4.2 Einzelschaufel (Flügel)	29
1.4.3 Schaufelgitter (Schaufel)	31
1.5 Bauarten	35
1.5.1 Vorbemerkungen	35
1.5.2 Hauptteile	35
1.5.3 Bezeichnungen	35
1.5.4 Aufteilung	36
1.6 Vergleich mit Kolbenmaschinen	36
1.6.1 Vorbemerkungen	36
1.6.2 Übereinstimmende Kennzeichen	37
1.6.3 Unterschiede	37
<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 Diagonallräder	56
2.5.2.1 Strömungsverhältnisse	56
2.5.2.2 Nabenvorengung	58
2.5.2.3 Radquerschnittsverengung	58

2.5.2.4	Laufschaufelzahl . . . . .	60
2.5.2.5	Schaufeldicke . . . . .	62
2.5.2.6	Umfangsgeschwindigkeit . . . . .	62
2.5.2.7	Geschwindigkeitsverhältnisse . . . . .	63
2.5.3	Axialräder . . . . .	64
2.5.3.1	Vorbemerkungen . . . . .	64
2.5.3.2	Axialräder mit vielen Schaufeln . . . . .	64
2.5.3.3	Axialräder mit wenigen Schaufeln . . . . .	68
<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 $Y_{\text{Schoo}}$ bei unendlicher Schaufelzahl . . . . .	74
3.2.1.2	Spezifische theoretische Schaufelarbeit $Y_{\text{Sch}}$ 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	Laufradgrößeneinfluss . . . . .	129
5.2.1.5	Kavitationsstufen . . . . .	129
5.2.1.6	Kavitationsformen . . . . .	130
5.2.1.7	Zusammenfassung . . . . .	131
5.2.2	Saughöhe von Flüssigkeitsmaschinen . . . . .	131
5.2.3	Halteenergie . . . . .	133
5.2.4	Saugzahl $S_y$ . . . . .	136
5.2.5	$NPSH$ -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>Laufradformen . . . . .</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	Schauflungsverluste $Z_{Sch}$ . . . . .	224
8.3.2.2	Mengenstromverluste . . . . .	228
8.3.2.3	Radreibungs- und Ventilationsverluste . . . . .	235
8.3.2.4	Austauschverlust . . . . .	241
8.3.2.5	Stoßverluste . . . . .	241
8.3.2.6	Zusammenfassung . . . . .	243
8.3.3	Äußere Verluste . . . . .	244
8.3.4	Gesamtverlust $Z_{ges}$ . . . . .	245
8.4	Leistungen . . . . .	245
8.4.1	Grundsätzliches . . . . .	245
8.4.2	Theoretische Leistung . . . . .	246
8.4.3	Innere Leistungen . . . . .	246
8.4.4	Äußere, effektive oder Kupplungs-Leistung . . . . .	246
8.5	Wirkungsgrade . . . . .	247
8.5.1	Grundsätzliches . . . . .	247
8.5.2	Liefergrad $\lambda_L$ . . . . .	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>	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 (Strömungsabreißern)	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

<b>10</b>	<b>Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen)</b>	285
10.1	Grundsätzliches	285
10.2	Kreiselpumpen	285
10.2.1	Vorbemerkungen	285
10.2.2	Laufradformen und Kenngrößen	286
10.2.3	Wirkungsgrad	288
10.2.4	Läuferkräfte	290
10.2.4.1	Achsschub (Axialkraft)	290
10.2.4.2	Radialkräfte	295
10.2.5	Saugverhalten	295
10.2.6	Ausführungsbeispiele	296
10.2.6.1	Radial- und Halbaxialpumpen (Radform I und II)	297
10.2.6.2	Diagonal- oder Schraubenpumpen (Radform III)	300
10.2.6.3	Axial- oder Propellerpumpen (Radform IV)	302
10.2.6.4	Mehrstufige Radialpumpen (Radform I und II)	303
10.2.6.5	Sonder-Kreiselpumpen	305
10.3	Kreiselverdichter	319
10.3.1	Vorbemerkungen	319
10.3.2	Besonderheiten	320
10.3.2.1	Drehzahl	320
10.3.2.2	Aufbau	320
10.3.2.3	Geräuschenwicklung	322
10.3.2.4	Thermodynamik der Verdichtung	323

10.3.3	Unterteilung	329
10.3.4	Druckstufung	329
10.3.5	Laufräder-Abstufung	330
10.3.6	Ausführungsbeispiele	330
10.3.6.1	Ventilatoren	331
10.3.6.2	Gebläse	337
10.3.6.3	Kompressoren	340
10.4	Hinweise für das Berechnen von Strömungspumpen	348
10.4.1	Grundsätzliches	348
10.4.2	Wellendurchmesser $D_{We}$	351
10.4.3	Radialrad-Abmessungen ( $n_y \leq 0,12$ )	353
10.4.3.1	Nabendurchmesser $D_N$	353
10.4.3.2	Saugmund	353
10.4.3.3	Überschlägiges Festlegen der Laufradkanäle	354
10.4.3.4	Stufenzahl $i$	355
10.4.3.5	Laufschaufelzahl $z_{La}$	355
10.4.3.6	Nachrechnen der Schaufelkanten	355
10.4.4	Diagonalrad-Abmessungen ( $n_y = 0,12 \dots 0,48$ )	355
10.4.5	Axialrad-Abmessungen ( $n_y > 0,3$ )	355
<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-, Freistrahlg- oder Tangential-Turbinen	359
11.2.2.2	MICHELL-OSSBERGER- oder Durchströmturbine	363
11.2.3	Überdruck- oder Reaktionsturbinen	364
11.2.3.1	Gemeinsames	364
11.2.3.2	FRANCIS-Turbinen	365
11.2.3.3	Propeller- und KAPLAN-Turbinen	368
11.2.4	Berechnungshinweise	372
11.3	Dampfturbinen	372
11.3.1	Grundsätzliches	372
11.3.1.1	Dampfkraftprozess	372
11.3.1.2	Einteilung	375
11.3.1.3	Optimaler Energieumsatz	375
11.3.1.4	Stufungsarten	377
11.3.1.5	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
<b>11.4 Gasturbinen . . . . .</b>	<b>401</b>
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
<b>11.5 Windturbinen . . . . .</b>	<b>422</b>
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 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 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

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