

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil I Grundlagen</b>	<b>17</b>
<b>1 Allgemeines</b>	<b>17</b>
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>	<b>39</b>
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 Diagonalaräder	56
2.5.2.1 Strömungsverhältnisse	56
2.5.2.2 Nabenverengung	58
2.5.2.3 Radquerschnittsverengung	58

2.5.2.4	Laufschaufelzahl	60
2.5.2.5	Schaufeldicke	62
2.5.2.6	Umfangsgeschwindigkeit	62
2.5.2.7	Geschwindigkeitsverhältnisse	63
2.5.3	Axialräder	64
2.5.3.1	Vorbemerkungen	64
2.5.3.2	Axialräder mit vielen Schaufeln	64
2.5.3.3	Axialräder mit wenigen Schaufeln	68
<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 Schaufelararbeit $Y_{Schoc}$ bei unendlicher Schaufelzahl	74
3.2.1.2	Spezifische theoretische Schaufelararbeit $Y_{Sch}$ 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>Affinitätsgesetze 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	Affinitätsgesetze	100
4.2.3.1	Maßstabsfaktoren	100
4.2.3.2	Proportionalitäten	100
4.2.3.3	Ähnlichkeitsbeziehungen	101
4.2.3.4	Wirkungsgradumrechnung	102
4.2.3.5	Radanpassung	103
4.3	Kennziffern	105
4.3.1	Grundsätzliches	105
4.3.2	Methoden zur Aufstellung von Kennziffern	106
4.3.3	Wichtige Kennziffern für Turbomaschinen	106
4.3.3.1	Reaktionsgrad	106
4.3.3.2	Druckziffer	108
4.3.3.3	Lieferziffer	109
4.3.3.4	Durchmesserziffer	111
4.3.3.5	Radformkennziffern (Lauftradkennzahlen)	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	$NPSH$ -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>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	Kreiselveichter	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 Verichter	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 Halbbaxialpumpen (Radform I und II)	297
10.2.6.2	Diagonal- oder Schraubepumpen (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	Kreiselveichter	319
10.3.1	Vorbemerkungen	319
10.3.2	Besonderheiten	320
10.3.2.1	Drehzahl	320
10.3.2.2	Aufbau	320
10.3.2.3	Geräuschentwicklung	322
10.3.2.4	Thermodynamik der Verdichtung	323

10.3.3	Unterteilung	329
10.3.4	Druckstufung	329
10.3.5	Laufräder-Abstufung	330
10.3.6	Ausführungsbeispiele	330
10.3.6.1	Ventilatoren	331
10.3.6.2	Gebläse	337
10.3.6.3	Kompressoren	340
10.4	Hinweise für das Berechnen von Strömungspumpen	348
10.4.1	Grundsätzliches	348
10.4.2	Wellendurchmesser $D_{We}$	351
10.4.3	Radialrad-Abmessungen ( $n_y \leq 0,12$ )	353
10.4.3.1	Nabendurchmesser $D_N$	353
10.4.3.2	Saugmund	353
10.4.3.3	Überschlägiges Festlegen der Laufradkanäle	354
10.4.3.4	Stufenzahl $i$	355
10.4.3.5	Laufschaufelzahl $z_{La}$	355
10.4.3.6	Nachrechnen der Schaufelkanten	355
10.4.4	Diagonalrad-Abmessungen ( $n_y = 0,12 \dots 0,48$ )	355
10.4.5	Axialrad-Abmessungen ( $n_y > 0,3$ )	355
11	<b>Übersicht über die Turbinen (Turbokraftmaschinen)</b>	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	423
11.5.3.1	Einführung	423
11.5.3.2	Windenergie und Windleistung	423
11.5.3.3	Windturbinenleistung	423
11.5.4	Axialkraft	424
11.5.5	Kennwerte	424
11.5.6	Ausführungshinweise	425
<b>12</b>	<b>Antriebspropeller</b>	<b>426</b>
12.1	Vorbemerkungen	426
12.2	Strömung, Geschwindigkeiten und Kräfte am Propellerblatt	426
12.3	Vereinfachte Propellertheorie	427
12.4	Kennzahlen	429
12.5	Anwendungsbedingte Besonderheiten	429
12.5.1	Flugzeugpropeller	429
12.5.2	Schiffsschrauben	430
12.5.3	Sonderbauarten	430
<b>13</b>	<b>Aggregate</b>	<b>432</b>
13.1	Vorbemerkung	432
13.2	Funktionsweise	432
13.3	Strömungskupplungen	433
13.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	433
13.3.2	Kenngrößen und Eigenschaften	433
13.3.3	Ausführungen und Anwendungen	435

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