

H. Sigloch

# Strömungsmaschinen

## Grundlagen und Anwendungen

mit 70 Übungsbeispielen,  
379 Bilder, 39 Tabellen

2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



Carl Hanser Verlag München Wien

# Inhaltsverzeichnis

## TEIL I: Grundlagen

<b>1 Allgemeines</b>	1
1.1 Begriffe, Dimensionen, Abkürzungen	1
1.1.1 Begriffe	1
1.1.2 Dimensionen (Einheiten)	2
1.1.3 Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen	3
1.2 Aufgabe und Bedeutung	7
1.3 Unterteilung	10
1.4 Wirkungsweise	12
1.4.1 Grundsätzliches	12
1.4.2 Einzelschaufel (Flügel)	12
1.4.3 Schaufelgitter (Schaufel)	14
1.5 Bauarten	17
1.5.1 Vorbemerkungen	17
1.5.2 Hauptteile	17
1.5.3 Bezeichnungen	18
1.5.4 Aufteilung	18
1.6 Vergleich mit Kolbenmaschinen	19
1.6.1 Vorbemerkungen	19
1.6.2 Übereinstimmende Kennzeichen	19
1.6.3 Unterschiede	20
<b>2 Strömungsverhältnisse</b>	21
2.1 Zusammengesetzte Strömungen	21
2.1.1 Grundsätzliches	21
2.1.2 Radialrotationshohlräume	21
2.1.2.1 Vorbemerkungen	21
2.1.2.2 Reibungsfreie Strömung	21
2.1.2.3 Reibungsbehaftete Strömung	22
2.1.3 Beliebige rotationssymmetrische Kanäle	23
2.1.4 Axialrotationshohlräume	24
2.2 Besonderheiten bei kompressiblen Diffusorströmungen	24
2.2.1 Grundsätzliches	24
2.2.2 Ableitung	24
2.2.3 Kreis- und Quadratquerschnitte	25
2.2.4 Rechteckquerschnitte	26
2.2.5 Ergebnis	26
2.3 Relativbewegung	26
2.4 Energiegleichung der Relativströmung	27
2.5 Instationäre Strömung	28
2.5.1 Grundsätzliches	28
2.5.2 Energiegleichung der instationären Strömung	28
2.5.3 Druckstoß	30
2.5.3.1 Vorberachtungen	30

2.5.3.2 Physikalischer Ablauf . . . . .	31
2.5.3.3 Rohrsystem mit konstantem Querschnitt . . . . .	32
2.5.3.4 Rohrsystem mit veränderlichem Durchmesser . . . . .	38
2.5.3.5 Übungsbeispiele . . . . .	39
<b>2.6 Laufradströmungen . . . . .</b>	<b>39</b>
2.6.1 Bezeichnungen und Grundsätzliches . . . . .	39
2.6.2 Radial- und Diagonalräder . . . . .	42
2.6.2.1 Strömungsverhältnisse . . . . .	42
2.6.2.2 Nabenvorverengung . . . . .	44
2.6.2.3 Radquerschnittsverengung . . . . .	44
2.6.2.4 Laufschaufelzahl . . . . .	45
2.6.2.5 Schaufeldicke . . . . .	48
2.6.2.6 Umfangsgeschwindigkeit . . . . .	48
2.6.2.7 Geschwindigkeitsverhältnisse . . . . .	48
2.6.3 Axialräder . . . . .	49
2.6.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	49
2.6.3.2 Axialräder mit vielen Schaufeln . . . . .	49
2.6.3.3 Axialräder mit wenigen Schaufeln . . . . .	54
<b>3 Energieumsatz . . . . .</b>	<b>58</b>
3.1 Berechnungsverfahren . . . . .	58
3.2 Stromfadentheorie . . . . .	59
3.2.1 Hauptgleichung der Kreiselradtheorie (EULER-Gleichung) . . . . .	59
3.2.1.1 Spezifische theoretische Schaufelarbeit $Y_{\text{Sch}\infty}$ bei unendlicher Schaufelzahl . . . . .	59
3.2.1.2 Spezifische theoretische Schaufelarbeit $Y_{\text{Sch}}$ bei endlicher Schaufelzahl . . . . .	63
3.2.1.3 Spezifische Stufenarbeit $\Delta Y$ und spezifische Stufenarbeit $Y$ . . . . .	69
3.2.1.4 Spaltdruckarbeit . . . . .	71
3.2.1.5 Gleich- und Überdruckwirkung . . . . .	72
3.3 Tragflügeltheorie . . . . .	74
3.3.1 Ideale Strömung (KUTTA-JOUKOWSKY-Gesetz) . . . . .	74
3.3.2 Reale Strömung . . . . .	76
3.4 Zirkulation am Radialrad . . . . .	82
3.5 Übungsbeispiele . . . . .	83
<b>4 Affinitätsgesetze und Kennzahlen . . . . .</b>	<b>84</b>
4.1 Grundsätzliches . . . . .	84
4.2 Ähnlichkeitstheorie . . . . .	84
4.2.1 Vorbemerkungen . . . . .	84
4.2.2 Ähnlichkeitsbedingungen . . . . .	84
4.2.3 Affinitätsgesetze . . . . .	85
4.2.3.1 Maßstabsfaktoren . . . . .	85
4.2.3.2 Proportionalitäten . . . . .	85
4.2.3.3 Ähnlichkeitsbeziehungen . . . . .	85
4.2.3.4 Wirkungsgradumrechnung . . . . .	87
4.2.3.5 Radanpassung . . . . .	88
4.2.3.6 Werkstoffmechanische Ähnlichkeit . . . . .	90
4.3 Kennzahlen . . . . .	90
4.3.1 Grundsätzliches . . . . .	90
4.3.2 Methoden zur Aufstellung von Kennzahlen . . . . .	91
4.3.3 Dimensionsanalyse . . . . .	91

4.3.4 Wichtige Kennziffern für Turbomaschinen . . . . .	93
4.3.4.1 Reaktionsgrad . . . . .	93
4.3.4.2 Druckziffer . . . . .	95
4.3.4.3 Lieferziffer . . . . .	97
4.3.4.4 Durchmesserziffer . . . . .	98
4.3.4.5 Leistungsziffer . . . . .	99
4.3.4.6 Drosselziffer . . . . .	99
4.3.4.7 Radform-Kennziffern (Laufradkennzahlen) . . . . .	100
4.3.4.8 Einheitswerte . . . . .	108
4.3.4.9 Relative Drallziffer . . . . .	108
4.3.4.10 Einlaufziffer und Abströmwert . . . . .	109
4.4 Übungsbeispiele . . . . .	111
<b>5 Kavitation und Überschall</b> . . . . .	<b>113</b>
5.1 Vorbemerkungen . . . . .	113
5.2 Kavitation . . . . .	113
5.2.1 Ablauf, Wirkung, Werkstoffe, Einflüsse . . . . .	113
5.2.1.1 Grundsätzliches . . . . .	113
5.2.1.2 Kavitationsablauf . . . . .	115
5.2.1.3 Werkstoffe . . . . .	115
5.2.1.4 Laufradgrößeneinfluß . . . . .	117
5.2.1.5 Kavitationsstufen . . . . .	118
5.2.1.6 Kavitationsformen . . . . .	118
5.2.1.7 Zusammenfassung . . . . .	119
5.2.2 Saughöhe von Flüssigkeitsmaschinen . . . . .	120
5.2.3 Halteenergie . . . . .	121
5.2.4 Saugzahl . . . . .	124
5.2.5 NPSH-Wert . . . . .	125
5.2.6 THOMA-Zahl . . . . .	126
5.2.7 Sonstige Einflüsse und Festlegungen . . . . .	127
5.2.7.1 Einfluß der Maschinengröße auf die Kavitation . . . . .	127
5.2.7.2 Einfluß des Maschinenbetriebszustandes auf die Kavitation . . . . .	128
5.2.7.3 Festlegen des Kavitationszustandes . . . . .	129
5.3 Überschall . . . . .	130
5.3.1 Grundsätzliches, Bedeutung . . . . .	130
5.3.2 Dichteänderung im Saugstutzen . . . . .	132
5.3.3 Überschallgrenze, Schallziffer . . . . .	133
5.4 Übungsbeispiele . . . . .	137
<b>6 Laufradformen</b> . . . . .	<b>138</b>
6.1 Radialmaschinen . . . . .	138
6.1.1 Grundsätzliches . . . . .	138
6.1.2 Wirkungsfreie Radialschaufel . . . . .	138
6.1.3 Einfluß der Saugkante . . . . .	141
6.1.4 Einfluß der Druckkante . . . . .	143
6.1.4.1 Grundsätzliches . . . . .	143
6.1.4.2 Unterscheidung . . . . .	143
6.1.4.3 Vergleich . . . . .	143
6.1.4.4 Anwendung . . . . .	144
6.1.5 Schaufelarten . . . . .	145
6.1.5.1 Grundsätzliches . . . . .	145

6.1.5.2 Pumpenschaufeln . . . . .	145
6.1.5.3 Turbinenschaufeln . . . . .	152
6.2 Axialmaschinen . . . . .	153
6.2.1 Vorbemerkungen . . . . .	153
6.2.2 Wirkungsfreie Axialschaufel . . . . .	153
6.2.3 Einfluß der Saugkante . . . . .	154
6.2.4 Einfluß der Druckkante . . . . .	154
6.2.4.1 Grundsätzliches . . . . .	154
6.2.4.2 Unterscheidung . . . . .	154
6.2.4.3 Vergleich . . . . .	155
6.2.4.4 Anwendung . . . . .	155
6.2.5 Schaufelformen . . . . .	156
6.2.5.1 Axialpumpen . . . . .	156
6.2.5.2 Wasserturbinen . . . . .	156
6.2.5.3 Dampf- und Gasturbinen . . . . .	158
6.3 Übungsbeispiele . . . . .	161
<b>7 Leitvorrichtungen . . . . .</b>	<b>162</b>
7.1 Grundsätzliches . . . . .	162
7.2 Pumpenleitvorrichtungen . . . . .	162
7.2.1 Radialmaschinen . . . . .	163
7.2.1.1 Einführung . . . . .	163
7.2.1.2 Ringspalt, Leitkanaleintrittsbreite . . . . .	164
7.2.1.3 Leitrad (beschaufelt) . . . . .	165
7.2.1.4 Leitring (schaufellos) . . . . .	173
7.2.1.5 Spiralgehäuse . . . . .	174
7.2.1.6 Rückführeinrichtungen . . . . .	182
7.2.1.7 Saugseitenleiträder . . . . .	184
7.2.2 Axialmaschinen . . . . .	185
7.2.2.1 Grundsätzliches . . . . .	185
7.2.2.2 Spalt zwischen Lauf- und Leitrad . . . . .	186
7.2.2.3 Leitschaufeldicke . . . . .	186
7.2.2.4 Leitschaufelzahl . . . . .	186
7.2.2.5 Leitschaufelkontur . . . . .	186
7.3 Turbinenleitvorrichtungen . . . . .	188
7.3.1 Grundsätzliches . . . . .	188
7.3.2 Wasserturbinen . . . . .	188
7.3.2.1 Gleichdruck-Turbinen . . . . .	188
7.3.2.2 Überdruck-Turbinen . . . . .	192
7.3.3 Dampf- und Gasturbinen . . . . .	197
7.3.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	197
7.3.3.2 Gleichdruck-Turbinen . . . . .	199
7.3.3.3 Überdruck-Turbinen . . . . .	206
7.4 Übungsbeispiele . . . . .	207
<b>8 Spezifische Stutzenarbeit, Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade . . . . .</b>	<b>208</b>
8.1 Vorbemerkungen . . . . .	208
8.2 Spezifische Stutzenarbeit . . . . .	208
8.3 Verluste . . . . .	216
8.3.1 Grundsätzliches . . . . .	216
8.3.2 Innere Verluste . . . . .	216
8.3.2.1 Schauflungsverluste . . . . .	217

8.3.2.2 Mengenstromverluste . . . . .	220
8.3.2.3 Radreibungs- und Ventilationsverluste . . . . .	227
8.3.2.4 Austauschverlust . . . . .	233
8.3.2.5 Stoßverlust . . . . .	233
8.3.2.6 Zusammenfassung . . . . .	235
8.3.3 Äußere Verluste . . . . .	236
8.3.4 Gesamtverluste . . . . .	236
8.4 Leistungen . . . . .	236
8.4.1 Grundsätzliches . . . . .	236
8.4.2 Theoretische Leistung . . . . .	237
8.4.3 Innere Leistung . . . . .	237
8.4.4 Äußere, effektive oder Kupplungs-Leistung . . . . .	237
8.5 Wirkungsgrade . . . . .	238
8.5.1 Grundsätzliches . . . . .	238
8.5.2 Liefergrad . . . . .	238
8.5.3 Schauflungswirkungsgrad . . . . .	238
8.5.4 Innerer Wirkungsgrad . . . . .	238
8.5.5 Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	239
8.5.6 Effektiver Wirkungsgrad . . . . .	239
8.5.7 Weitere Wirkungsgrade bei thermischen Turboarbeitsmaschinen . . . . .	240
8.5.8 Weitere Wirkungsgrade bei Turbokraftanlagen . . . . .	240
8.5.9 Anlagenwirkungsgrad . . . . .	242
8.5.10 Spezielle Wirkungsgrade . . . . .	242
8.6 Übungsbeispiele . . . . .	242
<b>9 Betriebliches Verhalten (Kennlinien, Kennfelder)</b> . . . . .	243
9.1 Grundsätzliches . . . . .	243
9.2 Betriebliches Verhalten von Strömungsarbeitsmaschinen . . . . .	243
9.2.1 Kreiselpumpen . . . . .	243
9.2.1.1 Drosselkurven . . . . .	243
9.2.1.2 Auslegungs- und Betriebspunkt . . . . .	248
9.2.1.3 Stabiler und labiler Betriebszustand . . . . .	249
9.2.1.4 Affinität der Drosselkurven . . . . .	252
9.2.1.5 Vergleich mit dem Kennverhalten der Kolbenpumpen . . . . .	254
9.2.1.6 Muscheldiagramm . . . . .	255
9.2.1.7 Kennlinien für Leistung, Wirkungsgrad und Haltedruckhöhe . . . . .	255
9.2.1.8 Besonderheiten schnellläufiger Strömungspumpen . . . . .	257
9.2.1.9 Kombination von Strömungspumpen . . . . .	260
9.2.1.10 Regelung von Strömungspumpen . . . . .	261
9.2.2 Kreiselverdichter . . . . .	262
9.2.2.1 Grundsätzliches . . . . .	262
9.2.2.2 Einfluß der Ansaugverhältnisse . . . . .	263
9.2.2.3 Instabilitäten (Strömungsabreißern) . . . . .	265
9.2.2.4 Kennlinien mehrstufiger Kreiselverdichter . . . . .	267
9.3 Betriebsverhalten von Strömungskraftmaschinen . . . . .	268
9.3.1 Grundsätzliches . . . . .	268
9.3.2 Wasserturbinen . . . . .	269
9.3.3 Dampf- und Gasturbinen . . . . .	270
9.3.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	270
9.3.3.2 Kegelgesetz . . . . .	270
9.4 Übungsbeispiele . . . . .	273

**TEIL II: Turbomaschinenarten**

<b>10 Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen)</b> . . . . .	274
10.1 Grundsätzliches . . . . .	274
10.2 Kreiselpumpen . . . . .	274
10.2.1 Vorbemerkungen . . . . .	274
10.2.2 Laufradformen und Kenngrößen . . . . .	275
10.2.3 Wirkungsgrad . . . . .	277
10.2.4 Läuferkräfte . . . . .	279
10.2.4.1 Achsschub (Axialkraft) . . . . .	279
10.2.4.2 Radialkräfte . . . . .	283
10.2.5 Saugverhalten . . . . .	283
10.2.6 Ausführungsbeispiele . . . . .	284
10.2.6.1 Radialpumpen (Radform I und II) . . . . .	284
10.2.6.2 Diagonal- oder Schraubenpumpen (Radform III) . . . . .	288
10.2.6.3 Axial- oder Propellerpumpen (Radform IV) . . . . .	290
10.2.6.4 Mehrstufige Radialpumpen (Radform I und II) . . . . .	291
10.2.6.5 Sonder-Kreiselpumpen . . . . .	293
10.3 Kreiselverdichter . . . . .	307
10.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	307
10.3.2 Besonderheiten . . . . .	308
10.3.2.1 Drehzahl . . . . .	308
10.3.2.2 Aufbau . . . . .	308
10.3.2.3 Geräuschenwicklung . . . . .	309
10.3.2.4 Thermodynamik der Verdichtung . . . . .	310
10.3.3 Unterteilung . . . . .	316
10.3.4 Druckstufung . . . . .	316
10.3.5 Laufräder-Abstufung . . . . .	316
10.3.6 Ausführungsbeispiele . . . . .	317
10.3.6.1 Ventilatoren . . . . .	317
10.3.6.2 Gebläse . . . . .	323
10.3.6.3 Kompressoren . . . . .	327
10.4 Hinweise für das Berechnen von Strömungspumpen . . . . .	334
10.4.1 Grundsätzliches . . . . .	334
10.4.2 Wellendurchmesser $D_{w_e}$ . . . . .	336
10.4.3 Radialrad-Abmessungen ( $n_y \leq 0,12$ ) . . . . .	337
10.4.3.1 Nabendurchmesser $D_N$ . . . . .	337
10.4.3.2 Saugmund . . . . .	337
10.4.3.3 Überschlägiges Festlegen der Laufradkanäle . . . . .	338
10.4.3.4 Stufenzahl $i$ . . . . .	339
10.4.3.5 Laufschaufelzahl $z_{La}$ . . . . .	339
10.4.3.6 Nachrechnen der Schaufelkanten . . . . .	339
10.4.4 Diagonalrad-Abmessungen ( $n_y = 0,12 \dots 0,48$ ) . . . . .	339
10.4.5 Axialrad-Abmessungen ( $n_y > 0,30$ ) . . . . .	339
10.5 Übungsbeispiele . . . . .	340
<b>11 Übersicht über die Turbinen (Turbokraftmaschinen)</b> . . . . .	341
11.1 Grundsätzliches . . . . .	341
11.2 Wasserturbinen . . . . .	341
11.2.1 Vorbemerkungen . . . . .	341
11.2.2 Gleichdruckturbinen . . . . .	344

11.2.2.1 PELTON-, Becher-, Freistrahl- oder Tangential-Turbinen . . . . .	344
11.2.2.2 MICHELL-ÖSSBERGER- oder Durchströmturbinen . . . . .	348
11.2.3 Überdruckturbinen . . . . .	349
11.2.3.1 Gemeinsames . . . . .	349
11.2.3.2 FRANCIS-Turbinen . . . . .	349
11.2.3.3 Propeller- und KAPLAN-Turbinen . . . . .	352
11.2.4 Berechnungshinweise . . . . .	356
11.2.5 Übungsbeispiele . . . . .	356
11.3 Dampfturbinen . . . . .	357
11.3.1 Grundsätzliches . . . . .	357
11.3.1.1 Dampfkraftprozeß . . . . .	357
11.3.1.2 Einteilung . . . . .	359
11.3.1.3 Optimaler Energieumsatz . . . . .	360
11.3.1.4 Stufungsarten . . . . .	362
11.3.1.5 Wärmerückgewinn . . . . .	364
11.3.1.6 Kennwerte . . . . .	365
11.3.1.7 Betriebsgrößen . . . . .	365
11.3.1.8 Grenzen . . . . .	369
11.3.1.9 Vergleich mit anderen Turbomaschinen . . . . .	371
11.3.1.10 Konstruktive Besonderheiten . . . . .	372
11.3.2 Betriebsverhalten . . . . .	374
11.3.2.1 Anfahren, Betrieb, Abstellen . . . . .	374
11.3.2.2 Regelung . . . . .	375
11.3.3 Ausführungsbeispiele . . . . .	377
11.3.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	377
11.3.3.2 Gleichdruckturbinen . . . . .	377
11.3.3.3 Überdruckturbinen . . . . .	380
11.3.4 Vergleich Gleichdruck – Überdruck . . . . .	383
11.3.5 Berechnungshinweise . . . . .	383
11.3.6 Übungsbeispiele . . . . .	385
11.4 Gasturbinen . . . . .	386
11.4.1 Grundsätzliches . . . . .	386
11.4.1.1 Bezeichnungen . . . . .	386
11.4.1.2 Wirkungsweise . . . . .	386
11.4.1.3 Geschichtliches und Bedeutung . . . . .	387
11.4.2 Vergleich mit Dampfturbinen . . . . .	387
11.4.3 Aufbau . . . . .	387
11.4.3.1 Bestandteile . . . . .	387
11.4.3.2 Unterteilung . . . . .	388
11.4.4 Thermodynamik . . . . .	390
11.4.4.1 Kreisprozesse . . . . .	390
11.4.4.2 Wirkungsgrade, Arbeitsvermögen . . . . .	391
11.4.4.3 Arbeitsfluide und Stoffwerte . . . . .	394
11.4.5 Besonderheiten . . . . .	396
11.4.5.1 Bauteile . . . . .	396
11.4.5.2 Werkstoffe . . . . .	400
11.4.5.3 Brennstoffe . . . . .	401
11.4.5.4 Lebensdauer . . . . .	402
11.4.6 Eigenschaften, Anwendung, Ausführungsbeispiele . . . . .	403
11.4.6.1 Vorbemerkungen . . . . .	403
11.4.6.2 Stationäre Anlagen . . . . .	403
11.4.6.3 Bewegliche Anlagen . . . . .	406
11.4.6.4 Sonderausführungen . . . . .	409

11.4.7 Übungsbeispiele . . . . .	411
11.5 Windturbinen . . . . .	413
11.5.1 Vorbemerkungen . . . . .	413
11.5.2 Windangebot . . . . .	413
11.5.3 Aerodynamische Grundlagen . . . . .	413
11.5.3.1 Einführung . . . . .	413
11.5.3.2 Windenergie und Windleistung . . . . .	414
11.5.3.3 Windturbinenleistung . . . . .	414
11.5.3.4 Axialkraft . . . . .	414
11.5.3.5 Kennwerte . . . . .	415
11.5.4 Ausführungshinweise . . . . .	415
11.5.5 Übungsbeispiele . . . . .	415
<b>12 Antriebspropeller . . . . .</b>	<b>416</b>
12.1 Vorbemerkungen . . . . .	416
12.2 Strömung, Geschwindigkeiten und Kräfte am Propellerblatt . . . . .	416
12.3 Vereinfachte Propellertheorie . . . . .	417
12.4 Kennzahlen . . . . .	419
12.5 Anwendungsbedingte Besonderheiten . . . . .	419
12.5.1 Flugzeugpropeller . . . . .	419
12.5.2 Schiffsschrauben . . . . .	419
12.5.3 Sonderbauarten . . . . .	420
<b>13 Aggregate . . . . .</b>	<b>421</b>
13.1 Vorbemerkungen . . . . .	421
13.2 Funktionsweise . . . . .	421
13.3 Strömungskupplungen . . . . .	422
13.3.1 Aufbau und Arbeitsweise . . . . .	422
13.3.2 Kenngrößen und Eigenschaften . . . . .	422
13.3.3 Ausführungen und Anwendungen . . . . .	424
13.4 Strömungsgetriebe . . . . .	425
13.4.1 Unterschied Kupplung – Getriebe . . . . .	425
13.4.2 Wirkungsweise . . . . .	425
13.4.3 Kenngrößen . . . . .	427
13.4.4 Kennlinien . . . . .	427
13.4.5 Anwendungsbeispiele . . . . .	428
13.4.6 Ausführungsbeispiele . . . . .	428
<b>TEIL III: Anhang</b>	
<b>14 Schrifttum-Verzeichnis . . . . .</b>	<b>430</b>
14.1 Lehrbücher . . . . .	430
14.2 Spezialwerke . . . . .	430
14.3 Handbücher und sonstige . . . . .	431
14.4 Fachzeitschriften . . . . .	432
<b>15 Arbeits-Tafeln (Berechnungshilfen) . . . . .</b>	<b>433</b>
15.1 Tafel-Verzeichnis . . . . .	433
15.2 Tafeln . . . . .	433
<b>16 Lösungen der Übungsbeispiele . . . . .</b>	<b>442</b>
<b>17 Ergänzungen . . . . .</b>	<b>539</b>
<b>18 Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>550</b>