

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

1 Allgemeines	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
2 Strömungsverhältnisse	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 Vorbetrachtungen	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
2.6	Lauftradströmungen	39
2.6.1	Bezeichnungen und Grundsätzliches	39
2.6.2	Radial- und Diagonalräder	42
2.6.2.1	Strömungsverhältnisse	42
2.6.2.2	Nabenverengung	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
3	Energieumsatz	58
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_{Sch} bei endlicher Schaufelzahl	63
3.2.1.3	Spezifische Stufenarbeit ΔY 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
4	Affinitätsgesetze und Kennzahlen	84
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 (Laufgradkennzahlen)	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
5	Kavitation und Überschall	113
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	Laufgradgrößeneinfluß	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
6	Laufgradformen	138
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	Schaufelformen	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
7	Leitvorrichtungen	162
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
8	Spezifische Stutzenarbeit, Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade	208
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
9	Betriebliches Verhalten (Kennlinien, Kennfelder)	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 (Strömungsabreißen)	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

10 Übersicht über die Strömungspumpen (Turboarbeitsmaschinen)	274
10.1 Grundsätzliches	274
10.2 Kreispumpen	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-Kreispumpen	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 Geräuschentwicklung	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_{we}	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 Überschlängiges 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
11 Übersicht über die Turbinen (Turbokraftmaschinen)	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-, Freistrah- oder Tangential-Turbinen	344
11.2.2.2	MICHELL-OSSBERGER- 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
12	Antriebspropeller	416
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
13	Aggregate	421
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

TEIL III: Anhang

14	Schrifttum-Verzeichnis	430
14.1	Lehrbücher	430
14.2	Spezialwerke	430
14.3	Handbücher und sonstige	431
14.4	Fachzeitschriften	432
15	Arbeits-Tafeln (Berechnungshilfen)	433
15.1	Tafel-Verzeichnis	433
15.2	Tafeln	433
16	Lösungen der Übungsbeispiele	442
17	Ergänzungen	539
18	Stichwortverzeichnis	550