

Carl Pfleiderer • Hartwig Petermann

Strömungs- maschinen

Sechste, neubearbeitete Auflage
von Hartwig Petermann

Mit 446 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg NewYork

London Paris Tokyo

HongKong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Grundlagen	1
1.1 Einleitende Betrachtung von Strömungsmaschinen	1
1.2 Absolute und relative Bewegung	9
1.3 Die spezifische Stutzenarbeit Y	11
1.4 Verluste und Wirkungsgrade in Strömungsmaschinen	18
1.41 Die verschiedenen Verlustarten	18
1.42 Die verschiedenen Wirkungsgrade	20
1.43 Besondere Formen des Wirkungsgrades bei Gasförderung	22
a) Der adiabatische und isothermische Wirkungsgrad des gekühlten Verdichters	22
b) Der polytropische Wirkungsgrad	23
2. Der Strömungsmechanismus im Laufrad	25
2.1 Das Moment der Schaufelkräfte und die auf Masse bezogene Schaufelarbeit Y_{Sch}	25
2.2 Häufige Anwendungsformen der Hauptgleichung	30
2.3 Der Einfluß der Endlichkeit der Schaufelzahl	30
2.31 Fall der Reibungsfreiheit	31
2.32 Einfluß der Zähigkeit	33
2.33 Das umlaufende radiale Schaufelgitter	37
a) Reibungseinfluß vernachlässigt	37
b) Reibungseinfluß berücksichtigt	38
2.4 Rechnerische Berücksichtigung des Einflusses der Endlichkeit der Schaufelzahl	43
2.41 Druckkante	43
2.42 Saugkante	44
2.43 Schaufelarbeit	45
2.44 Das Pfeilerersche Verfahren zur Berechnung der Minderleistung bei Pumpen	45
2.5 Gleich- und Überdruckwirkung, Reaktionsgrad t und Druckzahl x_p	48
2.51 Der Spaltdruck $p_3 - p_0$	48
2.52 Berechnung der spez. Spaltdruckarbeit Y_{Sp}	49
2.53 Gleich- und Überdruckwirkung	50
a) Turbinen mit $Y_{Sp} = 0$	50
b) Turbinen mit $Y_{Sp} > 0$	52
2.54 Reaktionsgrad r	53
2.55 Druckzahl y	54
a) Berechnung der Druckzahl x_p für $\alpha_0 = 90^\circ$	54
b) Besonderheiten der Druckzahl $\%p$ bei Turbinen und Pumpen	56
c) Die Druckzahl t_p bei Pumpenturbinen	58
d) Die Druckzahl y_p bei mehrstufigen Maschinen	59
e) Bestimmung der optimalen Druckzahl für partiell beaufschlagte Turbinen	60
f) Die Schaufelarbeitszahl $y >_{Schf}$	62
2.6 Elementare Erläuterung der Kräftewirkung zwischen Strömung und Schaufel	63

2.7 Wahl des Schaufelwinkels β_2 , Verwendungsgebiete der verschiedenen Schaufelformen	64
2.71 Wasserturbinen	67
2.72 Dampfturbinen	68
2.73 Pumpen	68
2.74 Zusammenfassung	69
2.8 Strömungsverhältnisse am Eintritt und Ausbildung der Eintrittskante von Schaufelgittern	70
2.81 Verzögerungsstoß bzw. Beschleunigungsstoß	71
2.82 Profilierung der Schaufeln	74
2.83 Optimale Zuströmrichtung	77
2.84 Unstetige bzw. ungleichmäßige Zuströmung zum Schaufelgitter	79
2.9 Die verschiedenen Radformen	80
2.91 Die spezifische Drehzahl oder Radformkennzahl	80
2.92 Das Axialrad	87
2.93 Die spezifische Drehzahl bei mehrstufigen Maschinen	90
2.94 Schnellläufigkeit und Wirkungsgrad	90
3. Die Kavitations- und Überschallgefahr	95
3.1 Kavitation	95
3.2 Die Saughöhe der Wasserpumpe	98
3.3 Die Saughöhe der Wasserturbine	109
3.4 Die Überschallgrenze bei Verdichtern	116
3.41 Dichteänderung im Radeinlauf und die Schallkennzahl	119
3.42 Radeintritt mit Drall	122
3.43 Beziehung zwischen Schallkennzahl S und Mach-Zahl w_{0a}/a	125
3.44 Ergänzende Bemerkungen	125
3.45 Gegenüberstellung der Kenngrößen	126
3.5 Die Verwirklichung des Strömungswinkels β_{0a} ; die Einlaufzahl e ; der Auslaßwert e^2	127
3.6 Die Kavitations- und Überschallgefahr bei Teil- und Überlast	131
4. Entwurf des Laufrades	134
4.1 Festigkeit und Formgebung von Welle und Laufrad	134
4.11 Welle	134
4.12 Laufrad	136
4.13 Umrechnungsregeln für Festigkeitsbeanspruchung durch Fliehkräfte bei geometrischer Ähnlichkeit	139
4.2 Der allgemeine Gang der Berechnung der Laufradschaufel, erläutert am Langsamläufer	140
4.21 Das Schaufelende an der Saugkante	141
4.22 Das Schaufelende an der Druckkante	144
4.3 Schaufelentwurf bei einfacher Schaufelkrümmung	145
4.31 Kreisbogenschaufel	146
4.32 Punktweise berechnete Schaufel	152
4.33 Oberflächenrauigkeit	155
4.4 Die doppelt gekrümmte Radialschaufel, Mittelläufer	156
4.41 Übertragung der Schaufelschnitte auf Kegelflächen	159
4.42 Punktweise Errechnung der Stromlinien	162
4.43 Tangenten	164
4.44 Axialschnitte und Schreinerschnitte	164
4.5 Schnellläufer, gekennzeichnet durch die Schräglage der Druckkante der Schaufel im Meridianschnitt	166

5. Ausführungsbeispiele von Laufrädern	171
5.1 Kreiselpumpe mit einfach gekrümmter Radialschaufel	171
5.11 Saugkante	173
5.12 Druckkante	174
5.13 Ergänzende Betrachtungen	176
5.2 Einstufiger Radialverdichter	177
5.21 Berechnung unter Vernachlässigung der Dichteänderung im Rad	178
5.22 Konstruktive Ausbildung	180
5.23 Berücksichtigung der Dichteänderung	182
5.24 Zustandsverlauf	184
5.3 Schnellläufige Kreiselpumpen	186
5.4 Francis-Turbine	191
5.41 Vorbemerkung	191
5.42 Übungsbeispiel	194
a) Wahl der Drehzahl	194
b) Radumriß	195
c) Berechnung der Schaufelwinkel	198
d) Winkelübertreibung beim Turbinen-Schnellläufer	200
e) Kantenlage	202
f) Lichte Austrittsweite	202
5.5 Pelton-Rad	203
5.51 Vorbemerkung	203
5.52 Rechnungsgang	210
5.53 Zusammenhang zwischen spez. Drehzahl und Strahlverhältnis d_s/D	213
5.6 Einstufige Dampfturbine	214
5.61 Vorbemerkung	214
5.62 Übungsbeispiel	215
5.63 Ergänzende Bemerkung	220
5.7 Einstufige Gasturbine	222
6. Die Kennlinien einstufiger Maschinen bei vernachlässigbarer Dichteänderung	224
6.1 Allgemeine Regeln	224
6.2 Kennlinien der Kreiselpumpen	226
6.21 Annahme unendlicher Zahl von Laufschaufeln	226
6.22 Endliche Schaufelzahl	228
6.23 Die Vorausbestimmung der Drosselkurve	229
6.24 Die Kennfläche	231
a) Schnittebenen mit $n = \text{const}$	231
b) Schnittebenen längs der Y^{\wedge} -Achse	232
c) Die waagerechten Schnittebenen	234
d) Schnittebenen parallel zur $(n, I^{\wedge}J)$ -Ebene	234
6.25 Einfluß konstruktiver Änderungen auf die Form der Drosselkurve	234
6.26 Die Linien der Wellenleistung	236
6.27 Die Bestimmung des Betriebspunktes	237
6.28 Das „Pumpen“ und die Pumpgrenze	240
6.29 Das rotierende Abreißen und die Teillast-Rezirkulation	243
6.3 Kennlinien der Turbinen	247
6.31 Änderung der Drehzahl bei gleichbleibender Steuerstellung	247
6.32 Veränderung der Steuerstellung	250
6.33 Bestimmung der Steuerstellung zu dem jeweiligen Durchfluß	250

6.4 Besonderheiten der Schneiläufer	252
6.41 Kreiselpumpen	253
a) Allgemeines	253
b) Lage der Abreißzonen	257
c) Die Drosselkurve im Abreißgebiet	258
d) Die praktische Bedeutung des Totraumes B	260
6.42 Francis-Turbine	264
6.43 Regelung der Kaplan-Turbine (Gleichzeitige Verstellung von Leit- und Laufschaufeln)	265
6.5 Modellgesetze der Strömungsmaschinen	270
6.51 Umrechnung unter Annahme gleichbleibender Wirkungsgrade und konstanter Dichte	271
6.52 Umrechnung bei Dichteänderung	278
6.53 Umrechnung der Wirkungsgrade	278
a) Gleichheit der Reynolds-Zahl	278
b) Bei Wasserströmung	278
c) Bei Gasströmung	279
6.54 Umrechnung der Festigkeit	282
6.55 Aufstellung von Typenreihen	283
7. Spaltverlust, Radreibungsverlust und Achsschub	286
7.1 Der Spaltverlust	286
7.11 Berechnung des Spaltstromes bei Rädern mit Deckscheibe	286
7.12 Der Sekundäreinfluß des Spaltstromes bei Rädern mit Deck- scheibe	294
7.13 Räder ohne Deckscheibe	299
7.14 Vereinfachte Bestimmung des Spaltverlustes bei Axialrädern	302
7.2 Der Achsschub und sein Ausgleich	304
7.21 Die Druckverteilung in den Radseitenräumen und die Be- rechnung des Achsschubes eines langsamläufigen Radial- rades	304
7.22 Der Ausgleich des Achsschubes	310
7.3 Der Radreibungsverlust	320
7.31 Radreibungsverlust bei einem Radseitenraum ohne Durch- fluß	320
7.32 Radreibungsverlust bei einem Radseitenraum mit Durchfluß	323
7.33 Radreibungsverlust und Ventilationsverlust bei Axial- rädern	324
8. Die Leitvorrichtung	326
8.1 Das beschauelte Leitrad	326
8.11 Besonderheiten bei den Pumpen	328
8.2 Der schaufellose Ringraum (glatter Leitring)	333
8.3 Das Spiralgehäuse	339
8.31 Spiralgehäuse mit beliebiger Querschnittsform	339
8.32 Spiralgehäuse mit kreisförmigem Querschnitt	343
8.33 Ergänzende Bemerkungen	346
8.34 Doppelspiralgehäuse	350
8.4 Die Leitvorrichtung am Saugmund des Laufrades	350
9. Besonderheiten der axialen Strömungsmaschinen	355
9.1 Grundlegende Gesichtspunkte	355
9.11 Die Sekundärströmungen am Axialrad	355
9.12 Schaufelform und Reaktionsgrad	358

9.13 Die Gleichgewichtsbedingungen der Strömung in Axialmaschinen.	362
9.2 Verschiedene Möglichkeiten der Schaufelverwindung bei axialen Strömungsmaschinen.	365
9.21 Allgemeines.	365
9.22 Konstanter Drall (d.h. drehungsfreie Strömung) im druckseitigen Spalt zwischen Lauf- und Leitrad.	366
9.23 Verwundene Laufschaufeln, aber zylindrische (nicht verwundene) Leitschaufeln bei Dampfturbinen.	369
9.24 Die „solid-body“-Beschäufelung.	371
9.25 Konstante Reaktion $t(r)$, insbesondere $x(r) = 0,5$.	371
a) Fall der Pumpe.	371
b) Fall der Turbine.	382
9.26 Andere Möglichkeiten der Schaufelverwindung.	393
9.3 Angaben zur Konstruktion der Axialschaufeln.	393
9.31 Druckzahl und Lieferzahl.	393
9.32 Die Profilierung der Schaufeln.	395
9.33 Das Verhalten der Axialräder bei Teillast.	400
9.34 Schaufelkräfte, Achsschub und Schaufelschwingungen.	401
9.35 Die zulässige Belastung von Verdichtergittern.	403
9.36 Die Festlegung der Schaufelprofile.	406
9.4 Axialräder mit enggestellten Schaufeln.	407
9.41 Die Übertreibung der Winkel bei Turbinen.	408
9.42 Die Winkelübertreibung bei der axialen Pumpenschaufel.	411
9.43 Zusätzliche Bemerkungen.	414
9.5 Axialräder mit weit auseinandergestellten Schaufeln.	416
9.51 Der einzelne Tragflügel im unbegrenzten Raum.	416
9.52 Änderung der Strömungsverhältnisse am Tragflügel bei Übergang auf das Schaufelgitter.	425
9.53 Anwendung der Tragflügelrechnungen auf das axiale Laufrad.	427
9.54 Kavitation und Überschall.	430
9.55 Berücksichtigung der Kompressibilität bei Gasförderung.	433
9.56 Wirkungsgradberechnung.	433
9.6 Die Leitvorrichtung der Axialmaschine.	435
9.61 Berechnung der Leitschaufeln bei Pumpen.	435
9.62 Abstand zwischen Laufrad und Leitrad.	436
9.63 Nabentotwasser.	438
a) Reibungsfreie, inkompressible Strömung mit konstantem Drall und konstantem Gesamtdruck.	438
b) Experimentelle Untersuchungen und Einfluß der Kompressibilität.	443
9.7 Berechnungsbeispiele für Axialmaschinen.	444
9.71 Berechnung einer Kaplan-Turbine.	444
a) Wahl der Drehzahl.	444
b) Hauptabmessungen des Rades.	444
c) Berechnung der Laufschaufel.	445
d) Lage der Schaufel-Drehachse.	448
e) Zusätzliche Betrachtungen.	450
9.72 Rechnungsgang einer Propellerpumpe oder eines Axiallüfters (Ventilators).	450
a) Laufrad.	451
b) Leitrad.	452
c) Fall der Verwendung eines Eintrittsleitrades.	452
d) Zusätzliche Bemerkungen.	453
9.73 Berechnung einer einstufigen Axialpumpe mäßiger spezifischer Drehzahl bzw. der ersten Stufe eines mehrstufigen Axialverdichters.	453

a) Luftförderung	453
b) Wasserförderung	455
9.74 Berechnung der axialen Zwischenstufe einer Dampf- oder Gasturbine	455
a) Leitrad	457
b) Laufrad	458
c) Die spez. Stufenarbeit	459
d) Zustandsverlauf	460
e) 50% Reaktion	460
f) Wahl der Winkel	461
g) Konstruktive Angaben	461
h) Gleichdruck mit geringer Überdruckwirkung	464
i) Die zusätzlichen Schaufelverluste der Dampfturbine	465
10. Die mehrstufigen Strömungsmaschinen	468
10.1 Allgemeine Hinweise über die Anwendung der Mehrstufigkeit	468
10.2 Die Mehrstufigkeit, erläutert am Beispiel der Dampfturbine	469
10.21 Die beiden Arten der Mehrstufigkeit	470
a) Stufenweise Verarbeitung des Druckgefälles (Druckstufen)	470
b) Stufenweise Verarbeitung der Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsstufen)	471
c) Vergleich der beiden Arten der Abstufung	471
10.22 Ausführungsformen der Druckstufung	472
a) Kammerstufen	473
b) Trommelstufen	475
c) Allgemeine Hinweise	479
10.23 Ausführungsformen und Eigenschaften der Geschwindigkeitsabstufung	480
a) Gemeinsamer Laufkranz für alle Stufen	480
b) Ebenso viele Lauf schaufelkränze wie Stufen (Curtis-Turbine)	481
c) Berechnung einer Dampfturbine mit Geschwindigkeitsstufen	481
d) Wahl der Stufenzahl und erreichbare Wirkungsgrade bei Curtis-Turbinen	485
e) Geschwindigkeitsabstufung mit geringer Überdruckwirkung und ihre Berechnung	490
f) Zusammenstellung des Rechnungsganges einer Curtis-Turbine	491
10.24 Auswirkung der Reibungswärme bei Druckstufung	493
a) Gas- oder dampfförmiges Arbeitsmedium	493
b) Vergleich der Wirkungsgrade bei tropfbarem und gasförmigem Energieträger	496
10.25 Mehrgehäuseturbinen, Drehzahl und Grenzleistung	496
a) Allgemeines über die Anwendung mehrerer Gehäuse	496
b) Zusammenhang zwischen Drehzahl, Grenzleistung und mehrflutigem Niederdruckteil	497
c) Zusammenhang zwischen Grenzleistung und der Volumenänderung des Dampfes	505
10.26 Wahl des Reaktionsgrades	506
a) Allgemeine Hinweise	506
b) Bestimmung des kleinstzulässigen Reaktionsgrades für Kammerstufen-Dampfturbinen	507
10.27 Gang der Berechnung einer mehrstufigen Dampfturbine	509
a) Allgemeines	509
b) Letzte Stufe	509
c) Regulierstufe und folgende (zweite) Stufe	511
d) Die mittleren Stufen	512

10.28	Hochdruck-Hochtemperatur-Dampfturbinen.	515
	a) Werkstoffe.	516
	b) Wärmeelastizität.	516
	c) Topfbauweise.	516
	d) Doppelgehäuse.	519
	e) Wellendichtungen.	519
	f) Dampfnäse.	520
10.29	Radial beaufschlagte Dampfturbinen.	520
	a) Einfach-Radialturbine.	521
	b) Gegenlauf-Radialturbine von Ljungström.	521
10.3	Besonderheiten der mehrstufigen Verdichter.	523
10.31	Konstruktive Einzelheiten radialer und axialer mehrstufiger Verdichter.	524
10.32	Rechnungsgang.	527
	a) Gleichbleibende Stufenarbeiten.	528
	b) Ungleiche Stufenarbeiten.	530
11.	Kennlinien ein- und mehrstufiger Maschinen unter Berücksichtigung der Dichteänderung	535
11.1	Der Verdichter bei Abweichung vom Berechnungspunkt.	535
	11.11 Bestimmung der Drosselkurve eines mehrstufigen Verdichters.	535
	11.12 Die Abhängigkeit der Drosselkurve von der Verdichterdrehzahl.	537
	11.13 Der Einfluß der Mehrstufigkeit auf die Abreißgrenze und den Expansionsbeginn.	537
	11.14 Die Abhängigkeit der Drosselkurve von der Anfangstemperatur und der Gasart.	539
11.2	Die Dampf- oder Gasturbine bei Abweichung vom Berechnungspunkt.	542
	11.21 Darstellung von Versuchsergebnissen mittels Einheitswerten.	542
	11.22 Der Kegel des Dampfdurchsatzes nach <i>Stodola</i> .	544
	11.23 Das Teillastverhalten von Dampfturbinen.	547
	11.24 Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeiten in einer beliebigen Stufe einer Kondensationsdampfturbine.	549
12.	Mathematische Verfahren der Strömungsmechanik zur Berechnung von Strömungsmaschinen	551
12.1	Zweidimensionale Strömung durch gerade Schaufelgitter.	551
	12.11 Konforme Abbildung.	552
	12.12 Singularitätenmethode.	555
12.2	Berechnung radialer Maschinen.	557
13.	Besondere Bedingungen bei den einzelnen Arten von Strömungsmaschinen	558
	13.1 Die Zwischenkühlung bei Verdichtern.	558
	13.2 Besonderheiten der Dampf- und Gasturbinen.	561
	13.3 Arten der Regelung.	564
	13.4 Kreiselpumpen zur Feststoff-Förderung.	564
	Literaturverzeichnis.	567
	Sachverzeichnis.	577