

Carl Pfeleiderer • 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

<b>1. Allgemeine Grundlagen</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Der Strömungsmechanismus im Laufrad</b>	<b>25</b>
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 $\beta_2$ , 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
<b>3.</b>	<b>Die Kavitations- und Überschallgefahr . . . . .</b>	<b>.95</b>
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 $\beta_{0a}$ ; die Einlaufzahl $e$ ; der Auslaßwert $e^2$ . . . . .	.127
3.6	Die Kavitations- und Überschallgefahr bei Teil- und Überlast . . . . .	.131
<b>4.</b>	<b>Entwurf des Laufrades . . . . .</b>	<b>.134</b>
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

<b>5. Ausführungsbeispiele von Laufrädern</b>	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
<b>6. Die Kennlinien einstufiger Maschinen bei vernachlässigbarer Dichteänderung</b>	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 gleichbleibende 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
<b>7. Spaltverlust, Radreibungsverlust und Achsschub.</b> . . . . .	<b>286</b>
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
<b>8. Die Leitvorrichtung</b> . . . . .	<b>326</b>
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
<b>9. Besonderheiten der axialen Strömungsmaschinen.</b> . . . . .	<b>355</b>
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
<b>10. Die mehrstufigen Strömungsmaschinen</b>	<b>468</b>
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 Laufschaufelkränze 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
<b>11.</b>	<b>Kennlinien ein- und mehrstufiger Maschinen unter Berücksichtigung der Dichteänderung</b>	<b>535</b>
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
<b>12.</b>	<b>Mathematische Verfahren der Strömungsmechanik zur Berechnung von Strömungsmaschinen</b>	<b>551</b>
12.1	Zweidimensionale Strömung durch gerade Schaufelgitter.	551
12.11	Konforme Abbildung.	552
12.12	Singularitätenmethode.	555
12.2	Berechnung radialer Maschinen.	557
<b>13.</b>	<b>Besondere Bedingungen bei den einzelnen Arten von Strömungsmaschinen</b>	<b>558</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis.</b>	<b>567</b>
	<b>Sachverzeichnis.</b>	<b>577</b>