

Walter Traupel

Thermische Turbomaschinen

Erster Band
Thermodynamisch-strömungstechnische
Berechnung

3., neubearbeitete und erweiterte Auflage

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1977

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
1. Thermodynamische Grundlagen	1
1.1 Die thermodynamischen Hauptsätze	1
1.2 Zur Thermodynamik der Wärmekraftmaschinen	5
1.3 Grundsätzliches über Prozeßuntersuchungen	7
1.4 Energieumsatz in stetig durchströmten Systemen	10
1.5 Ideales Gas	12
1.6 Idealer Dampf	15
1.7 Polytroper Wirkungsgrad, Polytropenexponent	21
1.8 Isentroper Wirkungsgrad, Rückgewinn, Erhitzungsverlust	25
1.9 Innere Wirkungsgrade und Gesamtwirkungsgrade von Turbinen	33
1.10 Innere Wirkungsgrade und Gesamt Wirkungsgrade von Verdichtern	42
1.11 Energiebilanz offener Prozesse	47
Literatur	49
2. Theorie der Arbeitsprozesse	51
2.1 Der Dampfprozeß	51
2.2 Die Berechnung des Dampfprozesses	60
2.3 Hilfsmittel zur Berechnung des Gasturbinenprozesses	66
2.4 Berechnung des Gasturbinenprozesses	71
2.5 Der Gasturbinenprozeß mit gekühlter Turbine	78
2.6 Kombinierte Prozesse	85
Literatur	91
3. Strömungstheoretische Grundlagen	93
3.1 Grundgleichungen	93
3.2 Integralbeziehungen und Folgerungen aus den Grundgleichungen	94
3.3 Wirbelsätze, Zirkulation	96
3.4 Stromfunktion	97
3.5 Potentialströmung	99
3.6 Strömung bei hoher Geschwindigkeit	102
3.7 Verdichtungsstoß, Verdichtungs- und Verdünnungswellen	105
3.8 Die Lavaldüse	108
3.9 Ähnlichkeitstheorie und Modellgesetze	112
3.10 Grundlagen der Grenzschichttheorie	116
3.11 Grenzschichten an der ebenen Platte	119
3.12 Grenzschichtberechnung bei beliebiger Druckverteilung	121
3.13 Ergänzendes zur Grenzschichttheorie	124
3.14 Strömung in Kanälen	126
3.15 Reibungsverluste in Kanälen	134

3.16	Strömung durch Diffusoren	139
3.17	Abschätzung von Verlusten durch Dissipationskoeffizienten	141
	Literatur	142
4.	Arbeitsverfahren thermischer Turbomaschinen	145
4.1	Turbinen	145
4.2	Verdichter	154
	Literatur	160
5.	Elementare Theorien der Stufe	161
5.1	Vorbereitende Untersuchungen	161
5.2	Eindimensionale Theorie der Turbinenstufe	163
5.3	Eindimensionale Theorie der Verdichterstufe	172
5.4	Mittelwertbildungen	178
5.5	Umrechnung von Strömungswirkungsgraden	185
5.6	Kennzahlen der Stufe	188
5.7	Das Stufenelement, allgemeine Grundlagen	192
5.8	Energieumsatz und Wirkungsgrad des Stufenelementes	197
	a) Turbine	199
	b) Verdichter	202
5.9	Besondere Untersuchungen über das Stufenelement	205
	a) Turbine	205
	b) Verdichter	212
5.10	Gerades Schaufelgitter, Tragflügeltheorie	214
5.11	Verallgemeinerte Tragflügeltheorie des Schaufelgitters	220
5.12	Grundsätzliches über die Wirkungsweise der Turbomaschinen	225
	Literatur	229
6.	Das Schaufelgitter	231
6.1	Allgemeines	231
6.2	Mathematische Verfahren der Gittertheorie	232
6.3	Grundlagen zur Gitterberechnung nach der Singularitätenmethode	235
6.4	Exakte Berechnung der Potentialströmung durch ein gerades Schaufelgitter	237
6.5	Angenäherte Gitterberechnung nach der Singularitätenmethode	243
6.6	Gitterberechnung durch konforme Abbildung	249
6.7	Kompressibilitätseinfluß bei schwach ablenkenden Gittern	261
6.8	Zirkulationsverhältnisse im Schaufelstern	263
6.9	Abströmwinkel aus eng geteilten Kreisgittern, subsonisch	266
6.10	Abströmwinkel aus eng geteilten Kreisgittern, transsonisch	272
6.11	Die Netzmethode	274
6.12	Exakte Theorie der Strömung durch das rotierende Kreisgitter	277
6.13	Entspannung ins Überschallgebiet, Strahlableitung	284
6.14	Transsonische und supersonische Turbinengitter	290
6.15	Geschwindigkeitsverteilung in transsonisch durchströmten Gittern	293
6.16	Reibungseinflüsse in axial durchströmten Gittern	300
6.17	Radial durchströmtes Kreisgitter	307
6.18	Ergänzendes zur Gittertheorie	311
	Literatur	314
7.	Räumliche Strömung durch Turbomaschinen	317
7.1	Allgemeines	317
7.2	Potentialströmung	319

7.3	Differentialgleichungen der rotationssymmetrischen Strömung	325
7.4	Allgemeines über einfache Lösungen	330
7.5	Strömung mit konstanter Massenstromdichte	333
7.6	Einfache Lösung für große Stufenbreite	336
7.7	Einfache Lösung für kleine Stufenbreite	337
7.8	Theorie der Repetierstufe	345
7.9	Exaktes zweidimensionales Differenzenverfahren	351
7.10	Verfahren der finiten Raumelemente (Zeitschrittverfahren)	356
7.11	Grundlagen einer dreidimensionalen Theorie	362
7.12	Räumliche Strömung durch Radialverdichterräder	365
	a) Grundgedanke	365
	b) Berechnung der Grundlösung	366
	c) Totwasser und Energieschichtung	370
	d) Vergleich mit Messungen, Ergänzendes	372
7.13	Ausgleich Vorgang nach einem Radialverdichterrad	374
7.14	Einfluß der Randeffekte	378
	Literatur	384
8.	Berechnungsunterlagen	387
	8.1 Allgemeines	387
	8.2 Versuche an ruhenden Modellen	388
	8.3 Versuche mit Versuchsmaschinen	397
	8.4 Unterlagen über Turbinen	404
	a) Gittergeometrie	404
	b) Radwirkungsgrade	407
	c) Spalt Verluste, Radreibung, Teilbeaufschlagung	415
	d) Zentripetalturbinen	421
	e) Verhalten unter geänderten Betriebsbedingungen	423
	f) Gekühlte Schaufelungen	426
	8.5 Unterlagen über Axialverdichter	428
	a) Gittergeometrie	428
	b) Verluste	432
	c) Geänderte Betriebsbedingungen, Stabilitätsgrenze	440
	8.6 Unterlagen über Radialverdichter	442
	a) Allgemeines	442
	b) Laufrad	449
	c) Diffusor	453
	d) Zusätzliche Verluste, Ergänzendes	461
	8.7 Rauigkeit der Oberflächen, Zähigkeit der Strömungsmedien	465
	8.8 Anhang	466
	Literatur	470
9.	Auslegung von Turbomaschinen	474
	9.1 Allgemeines	474
	9.2 Charakteristik der Turbinenstufe	475
	9.3 Untersuchung über den Leitradquerschnitt	480
	9.4 Auslegung der mehrstufigen Turbinenschaufelung	485
	9.5 Typen von Turbinenstufen	491
	9.6 Auslegung gekühlter Turbinenschaufelungen	496
	9.7 Entropieänderungen in gekühlten Schaufelungen	499
	9.8 Durchrechnung der gekühlten Turbinenstufe	503
	9.9 Entspannung ins Naßdampfgebiet, Feuchtigkeitsverluste	508

9.10	Unterlagen über Verluste in Naßdampfturbinen	514
9.11	Erosion und Wasserabscheidung	520
9.12	Charakteristik der Axialverdichterstufe	524
9.13	Auslegung des mehrstufigen Axial Verdichters	526
9.14	Einlauf und Diffusor der Axialmaschinen	530
9.15	Berechnung der Radialverdichterstufe	539
9.16	Charakteristik der Radialverdichterstufe	541
9.17	Auslegung mehrstufiger Radialverdichter mit Hilfe von Stufencharakteristiken	544
9.18	Theorie des Spiralgehäuses	546
	Literatur	552
10.	Wellendichtungen und Schubausgleich	554
10.1	Spiele an Dichtungen und Schaufelungen	554
10.2	Gestaltung der Labyrinthdichtungen	556
10.3	Theoretische Berechnung des Durchflusses durch Labyrinthdichtungen	558
10.4	Theoretisch-empirische Berechnung des Durchflusses durch Labyrinthdichtungen	560
10.5	Schaltung von Labyrinthdichtungen	563
10.6	Axialschub, Bemessung der Ausgleichkolben	564
10.7	Der Axialschub bei der Gleichdruckbauart	573
	Literatur	575
	Sachverzeichnis	576

Berichtigung

Seite 111, Abb. 3.8.5	: Statt $j//^* = 2$ lies $i//^*$	1,8
Seite 167, Abb. 5.2.5	: Statt ifl lies $r\beta_a$ Statt rfg) lies $rf\$$	
Seite 220, Abb. 5.11.1.	: Statt Ci , «i, lies $c\%$, α_2 Statt C_2	
Seite 308, Abb. 6.17.1	: Statt β lies β_1 Statt βf lies β'	
Seite 320, Abb. 7.2.2	: Statt h_x lies h_x^u Statt \ddot{A}_2 lies $h\backslash$	
Seite 439, Gl. 8.5(27)	: Statt $D_N^2 + D\%$ lies $2 -$	
Seite 498, Abb. 9.6.2	: Statt y lies Y	
Seite 509, Abb. 9.9.1	: Statt $/$ lies J	