

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
<b>4.</b>	<b>Arbeitsverfahren thermischer Turbomaschinen</b>	<b>145</b>
4.1	Turbinen	145
4.2	Verdichter	154
	Literatur	160
<b>5.</b>	<b>Elementare Theorien der Stufe</b>	<b>161</b>
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
<b>6.</b>	<b>Das Schaufelgitter</b>	<b>231</b>
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, Strahlablenkung	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
<b>7.</b>	<b>Räumliche Strömung durch Turbomaschinen</b>	<b>317</b>
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
<b>10.</b>	<b>Wellendichtungen und Schubausgleich . . . . .</b>	<b>554</b>
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 $c\%$ , $\alpha_2$ Statt $C_2$	
Seite 308, Abb. 6.17.1	: Statt $\beta$ lies $\beta_1$ Statt $\beta f$ lies $\beta'$	
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 $J$	