

Fritz Dietzel

Dampfturbinen

Berechnung · Konstruktion · Teillast-
und Betriebsverhalten · Kondensation

3., völlig überarbeitete Auflage
mit 326 Abbildungen,
42 durchgerechneten Beispielen
und Düsentafeln im Anhang

Carl Hanser Verlag München Wien 1980

Inhaltsverzeichnis

Zusammenstellung der Berechnungsbeispiele	11
Verwendete Formelzeichen und Einheiten	14
1 Einführung und grundlegende Fragen	17
1.1 Dampfturbinen verdrängen die Kolbendampfmaschine	17
1.2 Hinweise zum Arbeitsverfahren und zu den Festigkeitsbeanspruchungen	18
1.3 Offensichtliche Vorteile der Dampfturbine	20
1.4 Einsatzbereiche von Dampfturbinen	20
1.5 Wirkungsgrade, Enthalpiedifferenten, Dampfdurchsatz, Leistung	23
1.6 Kontinuitätsgleichung und Strömungsquerschnitte	27
1.7 Dampfgeschwindigkeit, Düsenströmung, Lavaldüse, Schluckvermögen	29
1.7.1 Ausführung der Strömungsquerschnitte von Dampfturbinen	36
1.7.2 Anwendungsbeispiel	40
1.8 Wirkungsweise und Bauteile mehrstufiger Dampfturbinen	42
2 Mehrstufige Dampfturbinen und ihre Arbeitsverfahren	48
2.1 Energieumwandlung in der Stufe der Dampfturbine	48
2.1.1 Vorgänge in der Stufe, Geschwindigkeitspläne	49
2.1.2 Umfangskraft F_u und Leistung am Radumfang P_u Umfangskraft F_u	51
2.1.3 Berechnungsbeispiel zu h_{st} , F_u , P_u , η_u	52
2.2 Gefälleverteilung innerhalb der Stufe	54
2.2.1 Aktions- und Reaktionskräfte	55
2.2.2 Der Reaktionsgrad r ; Profilformen der Stufe	56
2.2.3 Leit- und Laufschaufelgeschwindigkeiten abhängig von r	60
2.2.4 Gefälle- und Druckverteilung, Stufenenthalpie und spez. Leistung abhängig von r	62
2.2.5 Stufe mit veränderlichem r ; Berechnungsbeispiel	63
2.2.6 Einfluß des Reaktionsgrades auf die konstruktive Gestaltung der Einzelstufe und der Gesamtturbinen	66
2.3 Die Gleichdruck-Dampfturbine; Grundlage	69
2.3.1 Leistung am Laufrad, Geschwindigkeitsverhältnis u/c_1 , Radwirkungsgrad	69
2.3.2 Stufengefälle von Gleichdruckstufen	72
2.3.3 Geschwindigkeitsstufung im Curtis-Rad	73
2.3.4 Berechnungsbeispiel: 2-C-Rad mit Reaktion	77
2.3.5 Beschreibung einer mehrstufigen Gleichdruckturbine	79
2.4 Die Überdruck-Dampfturbine; Grundlagen	79
2.4.1 Leistung am Laufrad, Laufzahl u/c , Wirkungsgrad η_u	80
2.4.2 Stufengefälle der Überdruckstufe $r=0,5$	82

2.4.3	Beschreibung einer mehrstufigen Überdruckturbine	84
2.4.4	Radialturbinen	85
2.5	Verluste in den Stufen, Wirkungsgrade	89
2.5.1	Schaufungsverluste	90
2.5.2	Wirkungsgrad am Radumfang η_u	92
2.5.3	Radreibungs- und Ventilationsverluste; Beispiele	100
2.5.4	Spaltverluste bei Gleichdruck- und Überdruck	106
2.5.5	Innerer- η_i , Wärmerückgewinnung μ , mechanischer- η_m , effektiver Wirkungsgrad η_e	113
2.5.6	Verluste in Wellenstopfbüchsen und Labyrinth von Schubausgleichkolben	116
2.5.7	Zusammenfassende Betrachtung der Verlustgrößen	119
2.6	Kennzahlen zur Entwurfsberechnung	120
2.6.1	Durchfluß-Zahl ϕ	122
2.6.2	Druckzahl ψ	124
2.6.3	Kennzahlen, mit deren Hilfe Wirkungsgrade voraus geschätzt werden können	125
3	Strömungstechnische Berechnung der Dampfturbinen	128
3.1	Die Dampfturbinen als Teile des Dampfkraftprozesses	129
3.1.1	Einsatzbereiche für Dampfturbinen	131
3.2	Strömungstechnische Abmessungen der Beschauflung	132
3.2.1	Die Abmessungen von Laval-Düsen;	132
3.2.2	Die Abmessungen der Leitkanäle von Gleichdruckstufen	136
3.2.3	Die Schauffellängen der Überdruckstufen $r=0,5$	143
3.2.4	Die Durchmesser der letzten Stufen	145
3.2.5	Laufschaufelprofile langer Endstufenschaufeln;	150
3.2.6	Kurze Hinweise zu Strömungs-, Festigkeits- und Schwingungsfragen	155
3.3	Naßdampfstufen und Naßdampfturbinen	160
3.3.1	Expansion von Naßdampf; Unterkühlung; Wilson-Linien; Kondensationsstoß	160
3.3.2	Verluste in den Naßdampfstufen	165
3.3.3	Erosion der Schaufelkanten; Wasserabscheidung	168
3.4	Begrenzung der Leistung von Kondensationsturbinen	171
3.4.1	Einfluß des Vacuums	172
3.4.2	Volltouriger oder halbtouriger Dampfturbosatz	174
3.4.3	Schluckfähigkeit und Leistung der letzten Stufe	177
4	Strömungstechnische Berechnung; ausgeführte Konstruktionen	180
4.1	Kleinturbinen mit Leistungen bis etwa 1200 kW	180
4.1.1	Einkränzige Gleichdruckturbine, A-Rad	181
4.1.2	Konstruktiver Aufbau 1-stufiger Kleinturbinen; Baukastensystem	184
4.1.3	2-C-Rad-Turbine größerer Leistung	191
4.1.4	Getriebeturbine für Vorwärts- und Rückwärtslauf	194
4.1.5	Spezielle Anwendungsbereiche für Kleinturbinen	195
4.2	Mehrstufige Dampfturbinen der Gleichdruck-Bauart	196
4.2.1	Berechnung der beiden ersten Stufen	196

4.2.2	Vorschalten eines 2-C-Rades	201
4.2.3	Speisewasservorwärmung durch Anzapfdampf	203
4.2.4	Entwurf und Berechnung ab 2. Stufe; allgemeine Hinweise	209
4.2.5	Weitere Berechnung der 12000 kW-Turbine, B 4.2,1	211
4.2.6	Die Endstufen der 12 MW-Kondensationsturbine, B 4.2,1	220
4.2.7	Ausgeführte Kondensationsturbinen; Gleichdruckbauart	224
4.2.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen der Gleichdruckbauart	235
4.3	Mehrstufige Dampfturbinen der Überdruckbauart	238
4.3.1	Allgemeine Hinweise zum Berechnungsgang; D der 1. Stufe; Stufenzahl und Gefälleverteilung; D der letzten Stufe	239
4.3.2	Entwurf einer 1-gehäusigen 32 MW-Kondensationsturbine, $n=4$ Anzapfungen zur Speisewasservorwärmung, keine Zwischenüberhitzung; Aufteilung des Gefälles in Expansionsabschnitte	242
4.3.3	Abmessungen im 1. Expansionsabschnitt mit Regelstufe und nachfolgenden Überdruckstufen $r=0,5$	245
4.3.4	Stufenzahl und Abmessungen im Überdruckteil des 1. Expansionsabschnittes	248
4.3.5	Hauptabmessungen in den nachfolgenden Abschnitten	252
4.3.6	Ausgeführte Kondensationsturbinen der Überdruckbauart	263
4.3.7	Ausgeführte Gegendruck- und Entnahmeturbinen der Überdruckbauart	274
4.4	Kernkraftwerk-Turbinen	280
4.5	Schiffsturbinen	286
4.5.1	Aufbau einer Schiffs-Getriebeturbinenanlage	286
4.5.2	Beschreibung einer HD- und ND-Schiffsturbine	287
4.5.3	Turbinen des Kernforschungsschiffes „Otto Hahn“	289
4.6	Radial-Turbinen	291
4.6.1	Die KKK-Gegendruckturbine Bauart Köhler	291
4.6.2	Gegenlauf-Radialturbinen Bauart Ljungström	292
5	Konstruktive Einzelheiten und Festigkeitsbeanspruchungen	297
5.1	Entwurf der Schaufelprofile; Festigkeitsbeanspruchung	297
5.2	Leitvorrichtungen, Zwischenböden, Leitschaufelträger, Laufschaufeln	302
5.3	Turbinenläufer; Auswuchtprobleme	311
5.4	Turbinengehäuse	315
5.5	Wellenabdichtungen	323
5.6	Axialschub und Schubausgleich	327
5.7	Gehäuse- und Läuferdehnungen, Festpunkte	334
6	Kondensationsanlagen	337
6.1	Abwärmeverlust, Leistungsgewinn, Vakuum	337
6.2	Wassergekühlte Oberflächenkondensatoren	340
6.3	Berechnung und Auslegung der Kondensatoren	344
6.4	Anhaltswerte zur Kondensatorauslegung	348
6.5	Ausführungen; Hilfseinrichtungen; Betrieb	352

7 Änderung der Turbinenleistung; Turbinenbetrieb	360
7.1 Dampfdurchsatz, Druckverlaufänderung, Kegel der Dampfmassen	360
7.2 Drosselregelung	362
7.3 Mengenregelung (Massenregelung)	366
7.4 Zusammenfassung	368
7.5 Hinweise zur Frage der Überlastung	370
7.6 Hinweise zum Betriebsverhalten	371
7.7 Hinweise zur Sicherung und Überwachung des Betriebsablaufes	374
Anhang	
Kinematische Zähigkeit von Wasserdampf; Diagramm	377
Düsentafeln für Wasserdampf	378
Schriftumsverzeichnis	382
Bildquellenverzeichniss	383
Sachwortverzeichnis	384