A. Stodola

Die Dampfturbinen

Vierte Auflage

Ing. Antonio Sardagna

Die Dampfturbinen.

Mit einem Anhang
über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen
und über die Gasturbine.

Von

A. Stodola,

Dr. phil., Dr.-Ing., Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich.

Vierte, umgearbeitete und erweiterte Auflage.

Mit 856 Figuren und 9 Tafeln.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1910.

Inhaltsübersicht.

Seite

Einleitung 1

I. Elementare Theorie der Dampfturbine in beschreibender Darstellung.

1. Grundbegriffe; die Lavalsche Düse; Bezeichnungen 4
2. Die Ausflußgeschwindigkeit des Dampfes 5
3. Die Wirkungsweise der einfachen Gleichdruckturbine; Grenze ihrer Anwendungsfähigkeit . . 6
   Der Satz vom Antrieb. Die Parabel des Wirkungsgrades. Die Energiegleichung. Grenze für die Ausführbarkeit der einfachen Gleichdruckturbine.
4. Die Überdruckturbine 9
   a) Die Reaktion 9
   b) Die „Reaktion" unzulänglich, die Erscheinungen vollkommen aufzuklären 10
   c) Entwurf und Leistungsberechnung der Überdruckturbine, gestützt auf das Energieprinzip 11
   d) Vergleich der einfachen Überdruckturbine mit der Gleichdruckturbine 12
5. Die vielstufige Dampfturbine. Turbinen mit Geschwindigkeitsstufen. Gemischte Systeme . 13

II. Die Hauptsätze der Wärmelehre.

6. Das Perpetuum mobile erster Art 16
7. Das Perpetuum mobile zweiter Art und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik 17
8. Umkehrbare und nicht umkehrbare Zustandsänderungen 19
9. Der Carnotsche Kreisprozeß 20
10. Kreisprozeß mit umkehrbarer Wärme-Zu- und -Abfuhr bei beliebigen Temperaturen und das Integral von Clausius 22
11. Die Entropie 24
12. Der Wärmeinhalt 26
13. Berechnung der Entropie für Gase 26
14. Berechnung der Entropie für Wasserdampf 28
15. Die Entropietafel für Wasserdampf 32
16. Die Tafel von Mollier 35
17. Tafeln von Proell und Bánki 36
18. Nicht umkehrbare Vorgänge und das Gesetz von der Zunahme der Entropie 36
19. Nicht umkehrbare Vorgänge im Entropiediagramm 37
   a) Überströmen ins Vakuum 37
   b) Die Drosselung 38

III. Die strömende Bewegung elastischer Flüssigkeiten.

A. Kanäle mit geradliniger Achse.

20. Die Energie-Gleichungen 39
21. Die Stetigkeitsbedingung 44
22. Das Druckgefälle bei reibungsfreier adiabatischer Strömung 44
23. Die Lavalsche Düse bei adiabatischer Strömung 45
24. Wiederholte Einschnürung. Höchstwert von G 49
25. Mit Reibung verbundene Strömungen 50
26. Reibungsarbeit und Verlust an kinetischer Energie. Abschätzung der Reibungsarbeit . . . 50
27. Neuere Untersuchungen über die Reibung der geradlinigen Strömung 52
   a) Im Poiseuilleschen Gebiete 52
   b) Kritische Strömungsgeschwindigkeit 53
   c) Über der kritischen Geschwindigkeit 54
28. Integration der Strömungsgleichungen. Die Kurven von Fanno für konstanten Rohrquerschnitt. Darstellung des Druckverlaufs bei beliebigem Reibungsgesetz für eine Leitung von konstantem Querschnitt 56

Seite

29. Experimentelle Bestimmung des Reibungsverlustes in Düsen. Messung des Temperaturverlaufes in der Düse; Versuche von Batho . . . 59
30. Zeichnerische Ermittelung der Düsenabmessungen . . . 64
a) Gewöhnliche Methode . . . 64
b) Entwurf der Düse mittels der v-Quadrat-Methode . . . 67
31. Die Düse als Diffusor . . . 68
32. Das Auftreten des Dampfstoßes . . . 70
33. Graphische Ermittelung des Dampfzustandes am Ende der Düse nach einem Verdichtungsstoß 72
34. Strömung mit abwechselnder Erweiterung und Verengerung. Die Besonderheit der Strömung im zylindrischen Rohr . . . 73
35. Der Differentialquotient des Druckes nach dem Achsenabstand. Eigenartige Rolle der Schallgeschwindigkeit. Düse für konstanten Druck . . . 74
36. Isentropische Linien . . . 78
37. Die Düse mit verlängertem Einströmhals . . . 80
38. Unstabile Dampfströmung . . . 81
39. Die Strahlkontraktion . . . 81
40. Plötzliche Erweiterung im zylindrischen Rohr . . . 82
41. Ausfluß durch einfache Mündungen . . . 83
42. Schallschwingungen beim Ausströmen aus einer erweiterten Düse ins Freie . . . 88
43. Prandtls Untersuchungen über die Vorgänge bei Überschallgeschwindigkeiten in freien Luftstrahlen . . . 90

B. Strömung in krummlinigen Kanälen (Schaufeln).

44. Turbulenz; Verdichtung in der Krümmung . . . 93
45. Experimentelle Untersuchung der Druckverteilung . . . 94
a) Schaufeln für Leitvorrichtungen und Überdruckturbinen . . . 95
b) Mit Überdruck arbeitende Düse als Leitvorrichtung . . . 96
c) Schaufel für Gleichdruckturbinen . . . 98
46. Die Reibungsverluste in Schaufelkanälen . . . 103
a) Leitradschaufeln . . . 105
b) Die Überdruckschaufel . . . 106
c) Gleichdruckschaufeln bei Unterschallgeschwindigkeit . . . 106
d) Gleichdruckschaufeln bei Überschallgeschwindigkeit . . . 112

IV. Der Energieumsatz in der Dampfturbine.

A. Allgemeine Beziehungen.

47. Der thermodynamische Wirkungsgrad . . . 113
48. Die „indizierte" Leistung. Indizierter und mechanischer Wirkungsgrad . . . 114
49. Gleichung der Gesamtenergie. Ermittelung der indizierten Leistung und des thermodynamischen Wirkungsgrades aus dem Dampfzustand vor dem Abschließungsventil und im Abdampfrohr . . . 115
50. Bestimmung des Endzustandes, wenn Dampfverbrauch und Leistung bekannt sind . . . 116
51. Das Prinzip vom Antrieb („Impuls") . . . 116
52. Der axiale Druck. Welches Drehmoment beansprucht den Rahmen einer Turbine? . . . 119
53. Die Dampfreibung rotierender Scheiben . . . 120
54. Bezeichnungen; Gleichung der Stetigkeit, bezogen auf den axialen (oder „Meridian-") Reinquerschnitt. Theoretische und effektive Schaufellänge. Teilweise Beaufschlagung . . . 130
55. Die relative Bewegung . . . 132
56. Die hauptsächlichen Turbinenarten . . . 134

B. Axialturbinen.

57. **Die einstufige Gleichdruckturbine** . . . 136
Die Leitvorrichtung. Übertritt vom Leitrad ins Laufrad; Saugwirkung, Stoßvorgänge. Strömung in der Laufschaufel. Die Leistung am Radumfang.
Der Wirkungsgrad am Radumfang. Veränderung des Wirkungsgrades mit der Umlaufzahl für eine gegebene Turbine. Einfluß der Radreibung. Bestimmung der Verlustkoeffizienten aus der Kurve des Wirkungsgrades. Der Dampfverbrauch. Die Querschnitte . 140
Zahlenbeispiel mit Anwendung der Molliertafel . . . 146
Die teilweise beaufschlagte Turbine . . . 147
58. Einstufige Druckturbine mit mehreren Geschwindigkeitsstufen . . . 148
Leistung am Radumfang. Wahl der Winkel. Der Wirkungsgrad am Radumfang. Der Dampfverbrauch. Die Querschnitte.
59. **Mehrstufige Gleichdruckturbine** mit je einer Geschwindigkeitsstufe . . . 153
a) Die Zustandsdarstellung . . . 153
b) Betrag der rückgewinnbaren Reibungswärme . . . 155
c) Einfluß der Radreibung . . . 156
d) Einfluß der Undichtheit . . . 157
60. Turbine mit Verwertung der Auslaßgeschwindigkeit . . . 158
a) Zustandskurve . . . 158
b) Wirkungsgrad und Verlustkoeffizient . . . 160

Seite

61. Neuentwurf der vielstufigen Gleichdruckturbine 163
a) Turbine mit sehr großer Leistung, daher Vernachlässigung der Radreibung und der Undichtheitsverluste. Praktische Wichtigkeit des Ausdruckes $\Sigma u^2 z$ 164
b) Einfluß der Radreibung und der teilweisen Beaufschlagung 165
c) Die Verwendung von Geschwindigkeitsstufen 166
d) Turbine mit wesentlicher Undichtheit. Die kleinste Entropievermehrung. Die günstigste Stufenzahl. Günstigste Gefällsverteilung bei gegebener Radgröße und Stufenzahl. Curtisrad in der 1. Stufe 167
61 a. Gleichdruckturbine mit Geschwindigkeitsstufen und leichtem Überdruck 171
Durchrechnung einer ausgeführten Curtisturbine 171
62. **Die Überdruckturbine** 176
a) Einfluß der Undichtheit über die freien Schaufelenden hin. Gesetz des Widerstandskoeffizienten 176
b) Die einstufige Turbine ohne Undichtheitsverlust 179
c) Die einstufige Turbine unter Berücksichtigung der Undichtheit 180
d) Kongruente Leit- und Laufschaufeln und konstante Axialgeschwindigkeit 180
e) Leistung am Radumfang 181
f) Veränderlichkeit der sekundlichen Dampfmenge und des Wirkungsgrades bei wechselnder Umfangsgeschwindigkeit 181
63. Die mehrstufige Überdruckturbine 183
64. Die vielstufige Überdruckturbine 184
a) Entwurf auf Grund einer erfahrungsmäßig angenommenen Zustandskurve 184
b) Genauere Ermittelung der Zustandskurve aus den Geschwindigkeiten und den bekannt vorausgesetzten Widerstandskoeffizienten 192
c) Die „praktische" Berechnungsart der vielstufigen Überdruckturbine 196
d) Rechnerisches Verfahren des „Engineering" 198
e) Vielstufige Turbinen mit stetig veränderlicher Umfangs- und Dampfgeschwindigkeit . 199
Die hyperbolische Turbine 199
f) Veränderlichkeit des Wirkungsgrades mit der Umfangsgeschwindigkeit. Vergleich mit der vielstufigen Gleichdruckturbine 200
Einfluß des Auslaßverlustes 202
65. Druckverlauf bei vorgeschriebenen Querschnitten und Austrittswinkeln der Leit- und Laufräder. **Die v^2-Methode** 203
Die v^2-Methode in Verbindungen mit den Widerstandskoeffizienten. Tafel der adiabatischen v-Quadrate 205
66. Genauere Durchrechnung der letzten Stufen bei vielstufigen Turbinen 206

C. Radialturbinen.

67. Die Hauptgleichungen für den gleichmäßig rotierenden Kanal beliebiger Form 208
Anwendung auf die Radialturbine 209

D. Allgemeines Verhalten der Dampfturbine unter veränderten Betriebsverhältnissen.

68. Einfluß kleiner Druck- und Temperaturänderungen auf den Dampf- und Wärmeverbrauch (bei konstanter Umlaufzahl) 212
a) Erhöhung der Anfangsspannung 212
b) Erhöhung der Überhitzungstemperatur 212
c) Einfluß der Dampfnässe 213
d) Einfluß der Kondensatorspannung 214
Die wirkliche Abnahme des Dampfverbrauches. Nutzlosigkeit tiefen Vakuums unterhalb der Schallgrenze 214
69. Druckverlauf und durchströmendes Dampfgewicht einer gegebenen Turbine bei größeren Druckänderungen und konstanter Umlaufzahl 215
a) Kleiner Gegendruck (Vakuum) 215
b) Die Ellipse als Gesetz der Veränderung des durchströmenden Dampfgewichtes bei höherem Gegendruck. Der Kegel der Dampfgewichte 216
c) Druckverlauf im Inneren der vielstufigen Turbine bei Änderung des Anfangs- und des Gegendruckes. Auffindung der Schallgeschwindigkeitspunkte. Druckverlauf für einen willkürlich vorgeschriebenen Gegendruck 217
d) Dampfmenge und Druckverlauf bei veränderlicher Umlaufszahl. Druckverlauf mit Verdichtung 222
e) Gleichzeitige Drosselung und Verringerung der Umlaufzahl 224
f) Dampfverbrauch für die effektive PS-st bei Turbinen gleicher Bauart, aber verschieden großer Leistung 225

V. Konstruktion der wichtigsten Turbinenelemente.

70. Praktisch übliche Schaufelformen 226
71. **Konstruktion und Befestigung der Schaufeln** 228
1. Hohe Umfangsgeschwindigkeit 228
2. Mäßige Umfangsgeschwindigkeit ($u < 120$ m) 233

Seite
72. Festigkeit der Schaufeln. Genauere Methode für Radialturbinen 236
73. Konstruktion der **Leitvorrichtung** 238
74. **Die Berechnung der Scheibenräder** 242
Das Gesetz von Guest-Mohr 244
75. Die Scheibe gleicher Festigkeit ohne Bohrung 245
76. Scheibe gleicher Dicke 248
a) Durchlochte Scheibe mit freien Rändern 248
b) Durchlochte ruhende Scheibe mit vorgeschriebenen radialen Randspannungen . . 249
c) Volle Scheibe 249
Die Gefahr der Anbohrung. Ansichten über die „zulässige" Beanspruchung in einer Bohrung 249
77. Berechnung der Nabe 251
a) Schwach beanspruchtes Rad mit großer Bohrung 251
b) Stärker beanspruchtes Rad mit kleiner Bohrung 252
78. Scheibe mit hyperboloidischem Profil 254
79. Graphische Methode für die Berechnung der Scheibenräder 255
80. Beanspruchung einer gegebenen Scheibe 259
81. Geometrisch ähnliche Scheibenräder 261
82. Beanspruchung der Scheibenräder bei ungleichmäßiger Erwärmung 262
a) Scheibe gleicher Dicke 264
b) Hyperboloidische Scheibe 265
c) Graphische Ermittelung der Scheibenabmessungen bei gegebener Temperaturverteilung 265
83. **Die Rad-Trommeln** 266
84. Befestigung der Trommel und der Welle. Moderne Befestigungsarten 268
84a. Die Kupplung zwischen Turbine und Dynamo 274
85. Baustoffe und Beanspruchung 275
86. Der **Massenausgleich** rotierender starrer Körper. Theorie der Federausgleichvorrichtung. Allgemeinere Untersuchung 278
87. Die Berechnung der Wellen 284
88. **Kritische Geschwindigkeit** für ein einzelnes Rad auf gewichtsloser Welle. Die biegsame Welle von de Laval. Eigenschwingung der ruhenden Welle und kritische Umlaufzahl. Schiefstellung der Scheibe. Beispiel: Die Schiefstellung der fliegenden Scheibe 284
89. Kritische Winkelgeschwindigkeit einer einzelnen rotierenden Masse von beliebiger Form . 289
90. Kritische Winkelgeschwindigkeit bei zwei Einzelrädern auf gewichtsloser Welle 291
91. Stetig und gleichmäßig belastete Welle mit unveränderlichem Durchmesser 293
a) Ohne Rücksicht auf die Schiefstellung der Scheiben 293
b) Einfluß der Schiefstellung der Scheiben 298
c) Eigenschwingung der stetig belasteten Welle und kritische Umlaufzahl 299
92. Der Knesersche Ausgleich bei stetig belasteter Welle 300
93. Graphische Behandlung bei beliebiger Verteilung der Massen und beliebig veränderlicher Wellenstärke. Zahlenbeispiel. Scheinbarer Widerspruch mit der Theorie. I. Die Welle ist frei biegsam. II. Versteifende Wirkung des Ankers 301
94. Die Formel von Dunkerley 305
95. Versuche über die kritische Geschwindigkeit glatter und belasteter Wellen. Einfluß von Torsionsschwingungen auf die kritische Geschwindigkeit 306
96. **Die Dampfturbinenlager** 309
a) Die Reibungswärme der Halslager 309
b) Die Reibungswärme der Kammlager 311
c) Konstruktive Ausbildung der Lager 312
97. **Die Stopfbüchsen** 317
a) Labyrinthdichtung 317
b) Theorie der Labyrinthdichtung. α) Angenäherte Formel für kleine Druckunterschiede. β) Angenäherte Formel für den Fall, daß die Schallgeschwindigkeit erreicht wird. γ) Genaueres Verfahren für unveränderlichen Querschnitt. δ) Allgemeines Verfahren für veränderlichen Querschnitt 318
c) Versuche über die Labyrinthverluste. Verluste durch lange schmale Spalte 322
d) Stopfbüchsen mit Wasserabdichtung 326
e) Stopfbüchsen mit fester Liderung 326
f) Abdichten der Zwischenwände bei Gleichdruckturbinen 328
98. **Die Turbinengehäuse.** Die Festigkeit einer längeren zylindrischen Trommel. Festigkeit der Zwischenböden. Die Wärmedehnung der Gehäuse. — Gefahren raschen Anlassens . . 329
99. **Die Regelungsverfahren.** Zur Theorie selbsttätiger Überlastungsventile 335
100. Die Regler. Versuche über die Wirkung der Ölbremse 338
101. Die Kraftgetriebe der indirekt wirkenden Regler 340
a) Unbrauchbarkeit des einfachen Kraftgetriebes ohne „Rückführung" 340
b) Das einfache Kraftgetriebe mit Rückführung und freiem Reglerhub 341
c) Kraftgetriebe mit beschränktem Reglerhub 342
d) Isodrome Regulierung 342
e) Negative Ungleichförmigkeit 343
f) Die Gestalt der Kraftkurve 344
g) Größte Geschwindigkeitsschwankung. α) Momentaner Abschluß. β) Allmählicher Schluß. γ) Bei plötzlicher Entlastung 345
102. Ausführungsformen der Reglergetriebe 347

VI. Die Dampfturbinensysteme.

Seite
103. Turbine von de Laval . . . 357
104a. Turbine von Seger . . . 365
104b. „Elektra"-Dampfturbine . . . 366
105. Die Riedler-Stumpf-Turbine . . . 376
105a. Die Sturtevant-Turbine . . . 378
106. Die Curtis-Turbine der General Electric Company in Schenectady . . . 378
107. Die Schulz-Turbine . . . 389
108. Turbine der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, Berlin . . . 393
109. Die Turbine der Bergmann-Elektrizitätswerke in Berlin . . . 405
110. Die Turbine der Allgemeinen Dampfturbinenbau-Gesellschaft m. b. H. in Nürnberg . . . 406
111. Die Turbine von Gadda & C. in Mailand . . . 408
112. Die Zoelly-Turbine . . . 408
113. Die Rateauturbine . . . 423
114. Die Rateau-Turbine der Skodawerke in Pilsen . . . 428
115. Turbine der Maschinenfabrik Oerlikon . . . 432
116. Amerikanische Gleichdruckturbinen . . . 435
a) Hamilton Holzwarth . . . 435
b) C. V. Kerr . . . 436
c) Dake American Steam Turbine Company . . . 436
117. Die Turbine von Parsons . . . 437
Versuche von Gensecke . . . 440
118. Turbine der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden und Mannheim . . . 442
119. Turbine von F. Tosi in Legnano . . . 449
120. Turbine der Westinghouse-Gesellschaft . . . 454
121. Turbine der Österreichischen Dampfturbinen-Gesellschaft in Brünn . . . 461
122. Turbine der Allis-Chalmers Co. in Milwaukee . . . 464
123. Turbine von Willans and Robinson, L^d, Rugby . . . 467
124. Turbine von Gebr. Sulzer . . . 468
125. Turbine von Melms & Pfenninger . . . 475
126. Turbine von Eyermann . . . 484
127. Turbine von Zvoniček . . . 489
128. Turbine von Lindmark . . . 492

VII. Die Schiffsturbine.

A. Einleitung.

B. Zur Theorie der Schiffsturbine.

129. Die Überdruckturbine mit Reihenschaltung . . . 497
130. Die Gleichdruckturbine mit Einzelwellenantrieb . . . 498
131. Gemischte Systeme und Schaltungen . . . 499
Die Schaltung von Föttinger . . . 500
Verbindung von Turbine mit Kolbenmaschine . . . 501
132. Der axiale Propellerschub . . . 501
133. Die Rückwärtsturbine . . . 501

C. Zahlenbeispiele.

134. Die Lusitania und Mauretania. Beschreibung der Turbinenanlage. Thermodynamische Berechnung der Mauretaniaturbinen. Festlegung der Hauptabmessungen und Ermittelung der Undichtheitsverluste. Zustandskurve; Stufenzahlen. Schaufellängen; Berechnung der letzten Gruppen der Niederdruckturbine . . . 503
134a. Berechnung der Marschturbinen . . . 509
134b. Das Verhalten der Hauptturbinen während der Marschfahrt . . . 510

D. Ausführungsbeispiele.

135. Die Schiffsturbine der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden und Mannheim. Torpedoboot-Schiffsturbine. Die „kombinierte" Turbine der A.-G. Brown, Boveri & Cie. Vereinfachte Vierwellenanordnung. Die Manövriervorrichtung der Soc. An^e. John Cockerill in Seraing. Versuchsergebnisse Parsonsscher Schiffsturbinen . . . 512
136. Schiffsturbine der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin. Konstruktive Einzelteile. Versuchsergebnisse. I. Turbine für ein Torpedoboot. II. Torpedobootsturbine ohne Marschstufen. III. Turbinen für einen kleinen Kreuzer . . . 525
137. Schiffsturbine von Zölly . . . 533
138. Schiffsturbine von Curtis . . . 534

E. Mittelbarer Schraubenantrieb mit Herabsetzung der Umlaufzahl.

139. Elektrische Übertragung der Turbinenleistung auf die Schraubenwelle . . . 535
139a. Der „Transformator" von Föttinger . . . 535
139b. Zahnradübertragung . . . 541

VIII. Turbinen für Sonderzwecke.

Seite

140. Die Abdampfturbine. Theorie des Wärmespeichers. Verbindung einer Frischdampf- und einer Abdampfturbine 542
141. Turbinen mit Zwischendampfentnahme. Theorie der „Anzapf"turbine 545
142. Die Turbinen-Lokomotive 547

IX. Die Kondensation.

143. Das theoretische Vakuum; der ideale Kondensator 548
143a. Die Vorgänge im wirklichen Kondensator 549
a) Der Mischkondensator. Regelung der Einspritzwassermenge. Übergang zu einem anderen Beharrungszustand 549
b) Oberflächenkondensation. Wärmeübergangszahlen. Versuche an Oberflächenkondensatoren. Druckverluste im Kondensator 551
144. Die Luftpumpe. Zahlenbeispiele. Ausführungsbeispiele von Luftpumpen 558
144a. Zusammenhang zwischen Vakuum und Fördervolumen der Luftpumpe. Luftpumpengröße für beste Arbeitsausbeute 562
145. Strahlkondensator. Ausführungsbeispiele 563
145a. Der Kreiselkondensator 566
Versuche an Leblanc-Westinghouse-Kreisel-Strahlluftpumpen 569
146. Parsons' Vakuumvermehrer 570

X. Einige Sonderprobleme der Dampfturbinen-Theorie und -Konstruktion.

147. Allgemeine Gleichungen für die Strömung elastischer Flüssigkeiten 572
a) Rechtwinklige Koordinaten 572
b) Zylinderkoordinaten 575
147a. Ebene, wirbelfreie „isothermische" Strömung. Die Lösung von Hirsch. Einströmung in eine Düse. Druckverteilung in einer Turbinenschaufel 577
147b. Geradlinige Strömung in Leitungen mit konstantem Querschnitt 582
a) Oberhalb der kritischen Grenze 582
b) Strömung in engen Spalten unterhalb der kritischen Grenze 583
148. Strömung mit Überschallgeschwindigkeit 584
a) Die Schallgeschwindigkeit 584
b) Die Lösungen von Prandtl 585
149. Allgemeine (dreidimensionale) Gleichungen für die Flüssigkeitsströmung einer Turbine . . 587
„Achsensymmetrische" kreisende Strömung 587
150. Zweidimensionale Strömung. Die Bedingungsgleichung von Bauersfeld. Die Lösungen von Lorenz und Bauersfeld für unelastische Flüssigkeiten 588
151. Verdichtung und Änderung des Reaktionsgrades durch die „Fliehkraft" bei Axialturbinen 591
152. Differentialgleichung für die Druckverteilung in der vielstufigen axialen Überdruckturbine 593
153. Beanspruchung langer und dünner Naben. Die Beanspruchung in der Hohlkehle 594
154. Die Festigkeit einer Kegelschale. Der geschlossene Kegel. Zahlenbeispiel und empirische Formel 597
155. Biegung einer horizontalen ungleich dicken Scheibe unter dem Einflusse ihres Eigengewichtes 604
Reine Biegung der hyperbolischen Scheibe durch Randmomente 607
156. Geraderichten der wagerecht rotierenden Scheibe durch die Eigenfliehkräfte 607
157. Ausbreitung der Temperatur beim Anwärmen der Dampfturbine 610
158. Beanspruchung eines rotierenden Elipsoides nach C. Chree 617
159. Seitliches Ausknicken des Scheibenrandes 619
160. Gyroskopische Wirkung der Schiffsturbine 620
161. Kritische Geschwindigkeit zweiter Art, hervorgebracht durch die Biegung der glatten Welle unter ihrem Eigengewicht 621
162. Mitschwingen des Fundamentes: Ungefährlichkeit der „Resonanz" 624
162a. Seitliche Schwingung der Laufradscheiben 626
163. Bedingungen für die Stabilität des Gleichgewichtes über der kritischen Geschwindigkeit . 626
164. Graphische Ermittelung der kritischen Umlaufzahl bei mehrfach gelagerten („durchlaufenden") Wellen 629

XI. Geschichtlicher Rückblick.

165. Ältere Vorschläge und Ausführungen 635
166. Neuere Dampfturbinen-Vorschläge 639
a) Gegenlauf und Umsteuerungsturbinen C. A. Parsons 639
Vereinigte Dampfturbinen-Gesellschaft m. b. H., Berlin 640
Siemens-Schuckert-Werke 641
W. L. Webster 641
b) Entlastungskolben von Fullagar 642
Turbine von Nadrowski 642
c) Spiralturbinen. α) Die Turbine von Lilienthal. β) Turbine von Zahikjanz 642

Seite
d) Schaufelung von Westinghouse 643
e) Die Löffelschaufelung der Maschinenfabrik Grevenbroich 644
f) Verfahren von Dolder 644
g) Turbine von Rademacher 645
167. Problematische und verfehlte Ideen 645
a) Die Mischungsturbine 646
b) Allmähliche Beimischung des Fremdstoffes 650
c) Beimischung unter vorheriger Beschleunigung des Zusatzstoffes 651
d) Reibungsturbine 651
e) Die Drosselturbine 652

Anhang.

Die Aussichten der Wärmekraftmaschinen.

168. Der gegenwärtige Entwicklungsstand der Kolbenmaschine, des Gasmotors und der Turbine 654
169. Das Prinzip der Vermehrung der Entropie als der eigentliche Ausdruck des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre 657
170. Die größte erzielbare Nutzarbeit 660
171. Wärmekraftmaschine mit einem Wirkungsgrade > 1. Die Jagd nach der Wärme der Umgebung 662
172. Wie muß der Prozeß günstigster Arbeitsausbeute im einzelnen beschaffen sein? 664
a) Der Dampfturbinenprozeß 665
b) Der Brennkraftmaschinenprozeß 666
173. Verbesserungsvorschläge des Arbeitsverfahrens für Wärmekraftmaschinen 667
a) Maschinen mit Dampf als Energieträger. Annäherung an den Carnotschen Prozeß. Der Wärmeregenerator. Die Vorwärmung des Speisewassers durch Dampf aus dem Zwischenbehälter. Die Zwischenüberhitzung. Die Dauerüberhitzung. Überhitzung durch Vermischen von Brenngasen mit Dampf. Erweiterung der Temperaturgefälle durch die Mehrstoffdampfmaschine. Die Abwärmemaschine. Die Luft-Dampfmaschine von Pictet. Verwendung schwerer Dämpfe nach Rahmer, Leblane, Zuppinger . . . 667
b) Die Natronmaschinen 673
c) Verbesserungsvorschläge für das Arbeitsverfahren der Brennkraftmaschinen im besonderen 673
d) Elektrizität aus Kohle 675
174. **Die Gasturbine** 676
175. Theorie der Gasturbine für ideale Gase, d. h. konstante spezifische Wärmen 677
a) Verbrennung bei konstantem Druck und adiabatischer Verdichtung, ohne Regenerator 678
b) Isothermische Verdichtung ohne Regenerator 679
c) Isothermische Verdichtung mit Regenerator 679
d) Explosionsturbine ohne Vorverdichtung 680
176. Theorie der Gasturbine unter Annahme veränderlicher spezifischer Wärmen 682
Prozeß für konstanten Verbrennungsdruck 684
1. Ohne Wassereinspritzung. α) Adiabatische Verdichtung. β) Isothermische Verdichtung. γ) Mit beliebigem Verdichtungsgesetz.
2. Mit Wassereinspritzung 686
177. Die „Explosions"turbine mit Vorverdichtung 688
178. Andere Arbeitsverfahren für Gasturbinen 691
179. Die Gasturbine der Société anonyme des Turbomoteurs, Paris 694
180. Entwertung der Energie. Vertiefung des Entropiebegriffes. Die Wahrscheinlichkeit. Der Wärmetod. Die Entropie-Polemik im „Electrician" 696
Die Herleitung der Entropie aus dem Begriff der Wahrscheinlichkeit 700

Alphabetisches Sach- und Namenverzeichnis 705