Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Grundlagen 1

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

2. Der Strömungsmechanismus im Laufrad 25

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 Pfleiderersche Verfahren zur Berechnung der Minderleistung bei Pumpen 45

2.5 Gleich- und Überdruckwirkung, Reaktionsgrad r und Druckzahl ψ 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
2.54 Reaktionsgrad r 53
2.55 Druckzahl ψ 54
a) Berechnung der Druckzahl ψ für $\alpha_0 = 90°$ 54
b) Besonderheiten der Druckzahl ψ bei Turbinen und Pumpen 56
c) Die Druckzahl ψ bei Pumpenturbinen 58
d) Die Druckzahl ψ bei mehrstufigen Maschinen 59
e) Bestimmung der optimalen Druckzahl für partiell beaufschlagte Turbinen 60
f) Die Schaufelarbeitszahl ψ_{Sch} 62

2.6 Elementare Erläuterung der Kräftewirkung zwischen Strömung und Schaufel 63

2.7 Wahl des Schaufelwinkels β_2, Verwendungsgebiete der verschiedenen Schaufelformen 64

Bibliografische Informationen
http://d-nb.info/860476790

digitalisiert durch DEUTSCHE NATIONAL BIBLIOTHEK

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 Schnelläufigkeit und Wirkungsgrad 90

3. Die Kavitations- und Überschallgefahr 95

3.1 Kavitation 95

3.2 Die Saughöhe der Wasserpumpe 98

3.3 Die Saughöhe der Wasserturbine 107

3.4 Die Überschallgrenze bei Verdichtern 114
3.41 Dichteänderung im Radeinlauf und die Schallkennzahl . . 117
3.42 Radeintritt mit Drall 120
3.43 Beziehung zwischen Schallkennzahl S_q und Mach-Zahl w_{0a}/a 123
3.44 Ergänzende Bemerkungen 123
3.45 Gegenüberstellung der Kenngrößen 124

3.5 Die Verwirklichung des Strömungswinkels β_{0a}; die Einlaufzahl ε; der Auslaßwert ε^2 125

4. Entwurf des Laufrades 130

4.1 Festigkeit und Formgebung von Welle und Laufrad 130
4.11 Welle 130
4.12 Laufrad 132
4.13 Umrechnungsregeln für Festigkeitsbeanspruchung durch Fliehkräfte bei geometrischer Ähnlichkeit 135

4.2 Der allgemeine Gang der Berechnung der Laufradschaufel, erläutert am Langsamläufer 136
4.21 Das Schaufelende an der Saugkante 137
4.22 Das Schaufelende an der Druckkante 140

4.3 Schaufelentwurf bei einfacher Schaufelkrümmung 141
4.31 Kreisbogenschaufel 142
4.32 Punktweise berechnete Schaufel 148
4.33 Oberflächenrauhigkeit 151

4.4 Die doppelt gekrümmte Radialschaufel, Mittelläufer 152
4.41 Übertragung der Schaufelschnitte auf Kegelflächen 155
4.42 Punktweise Errechnung der Stromlinien 158
4.43 Tangenten 160
4.44 Axialschnitte und Schreinerschnitte 160

4.5 Schnelläufer, gekennzeichnet durch die Schräglage der Druckkante der Schaufel im Meridianschnitt 162

5. Ausführungsbeispiele von Laufrädern 167

5.1 Kreiselpumpe mit einfach gekrümmter Radialschaufel 167
5.11 Saugkante 169
5.12 Druckkante 170
5.13 Ergänzende Betrachtungen 172

5.2 Einstufiger Radialverdichter 173
5.21 Berechnung unter Vernachlässigung der Dichteänderung im Rad 174
5.22 Konstruktive Ausbildung 176
5.23 Berücksichtigung der Dichteänderung 178
5.24 Zustandsverlauf 180

5.3 Schnelläufige Kreiselpumpen 182

5.4 Francis-Turbine 187
5.41 Vorbemerkung 187
5.42 Übungsbeispiel 190
a) Wahl der Drehzahl 190
b) Radumriß 191
c) Berechnung der Schaufelwinkel 194
d) Winkelübertreibung beim Turbinen-Schnelläufer 196
e) Kantenlage 198
f) Lichte Austrittsweite 198

5.5 Pelton-Rad 199
5.51 Vorbemerkung 199
5.52 Rechnungsgang 206
5.53 Zusammenhang zwischen spez. Drehzahl und Strahlverhältnis d_3/D 209

5.6 Einstufige Dampfturbine 210
5.61 Vorbemerkung 210
5.62 Übungsbeispiel 211
5.63 Ergänzende Bemerkung 216

5.7 Einstufige Gasturbine 218

6. Die Kennlinien einstufiger Maschinen bei vernachlässigbarer Dichteänderung 220

6.1 Allgemeine Regeln 220

6.2 Kennlinien der Kreiselpumpen 222
6.21 Annahme unendlicher Zahl von Laufschaufeln 222
6.22 Endliche Schaufelzahl 224
6.23 Die Vorausbestimmung der Drosselkurve 225
6.24 Die Kennfläche 227
6.25 Einfluß konstruktiver Änderungen auf die Form der Drosselkurve 230
6.26 Die Linien der Wellenleistung 232
6.27 Die Bestimmung des Betriebspunktes 233
6.28 Das „Pumpen" und die Pumpgrenze 236
6.29 Das rotierende Abreißen und die Abreißgrenze 239

6.3 Kennlinien der Turbinen 241
6.31 Änderung der Drehzahl bei gleichbleibender Steuerstellung 241
6.32 Veränderung der Steuerstellung 244
6.33 Bestimmung der Steuerstellung zu dem jeweiligen Durchfluß 244

6.4 Besonderheiten der Schnelläufer 246
6.41 Kreiselpumpen 247
a) Allgemeines 247
b) Lage der Abreißzonen 251

c) Die Drosselkurve im Abreißgebiet 252
d) Die praktische Bedeutung des Totraumes B 254
6.42 Francis-Turbine 258
6.43 Regelung der Kaplan-Turbine (Gleichzeitige Verstellung von Leit- und Laufschaufeln) 259

6.5 Modellgesetze der Strömungsmaschinen 264
6.51 Umrechnung unter Annahme gleichbleibender Wirkungsgrade und konstanter Dichte 265
6.52 Umrechnung bei Dichteänderung 272
6.53 Umrechnung der Wirkungsgrade 272
6.54 Umrechnung der Festigkeit 276
6.55 Aufstellung von Typenreihen 277

7. Spaltverlust, Radreibungsverlust und Achsschub 280

7.1 Der Spaltverlust 280
7.11 Berechnung des Spaltstromes bei Rädern mit Deckscheibe 280
7.12 Der Sekundäreinfluß des Spaltstromes bei Rädern mit Deckscheibe 288
7.13 Räder ohne Deckscheibe 293
7.14 Vereinfachte Bestimmung des Spaltverlustes bei Axialrädern 296

7.2 Der Achsschub und sein Ausgleich 298
7.21 Berechnung des Achsschubes eines langsamläufigen Radialrades 298
7.22 Der Ausgleich des Achsschubes 302

7.3 Der Radreibungsverlust 312
7.31 Radreibungsverlust bei einem Radseitenraum ohne Durchfluß 312
7.32 Radreibungsverlust bei einem Radseitenraum mit Durchfluß 315
7.33 Radreibungsverlust und Ventilationsverlust bei Axialrädern 316

8. Die Leitvorrichtung 318

8.1 Das beschaufelte Leitrad 318
8.11 Besonderheiten bei den Pumpen 320

8.2 Der schaufellose Ringraum (glatter Leitring) 325

8.3 Das Spiralgehäuse 331
8.31 Spiralgehäuse mit beliebiger Querschnittsform 331
8.32 Spiralgehäuse mit kreisförmigem Querschnitt 335
8.33 Ergänzende Bemerkungen 338
8.34 Doppelspiralgehäuse 342

8.4 Die Leitvorrichtung am Saugmund des Laufrades 342

9. Besonderheiten der axialen Strömungsmaschinen 347

9.1 Grundlegende Gesichtspunkte 347
9.11 Die Sekundärströmungen am Axialrad 347
9.12 Schaufelform und Reaktionsgrad 350
9.13 Die Gleichgewichtsbedingungen der Strömung in Axialmaschinen 354

9.2 Verschiedene Möglichkeiten der Schaufelverwindung bei axialen Strömungsmaschinen 357
9.21 Allgemeines 357
9.22 Konstanter Drall (d. h. drehungsfreie Strömung) im druckseitigen Spalt zwischen Lauf- und Leitrad 358

9.23 Verwundene Laufschaufeln, aber zylindrische (nicht verwundene) Leitschaufeln bei Dampfturbinen 361
9.24 Die „solid-body"-Beschaufelung 363
9.25 Konstante Reaktion $r(r)$, insbesondere $r(r)=0{,}5$ 363
a) Fall der Pumpe 363
b) Fall der Turbine 374
9.26 Andere Möglichkeiten der Schaufelverwindung 385

9.3 Angaben zur Konstruktion der Axialschaufeln 385
9.31 Druckzahl und Lieferzahl 385
9.32 Die Profilierung der Schaufeln 387
9.33 Das Verhalten der Axialräder bei Teillast 392
9.34 Schaufelkräfte, Achsschub und Schaufelschwingungen . . . 393
9.35 Die zulässige Belastung von Verdichtergittern 395
9.36 Die Festlegung der Schaufelprofile 398

9.4 Axialräder mit enggestellten Schaufeln 399
9.41 Die Übertreibung der Winkel bei Turbinen 400
9.42 Die Winkelübertreibung bei der axialen Pumpenschaufel . 403
9.43 Zusätzliche Bemerkungen 406

9.5 Axialräder mit weit auseinandergestellten Schaufeln 408
9.51 Der einzelne Tragflügel im unbegrenzten Raum 408
9.52 Änderung der Strömungsverhältnisse am Tragflügel bei Übergang auf das Schaufelgitter 417
9.53 Anwendung der Tragflügelrechnungen auf das axiale Laufrad 419
9.54 Kavitation und Überschall 422
9.55 Berücksichtigung der Kompressibilität bei Gasförderung . . 425
9.56 Wirkungsgradberechnung 425

9.6 Die Leitvorrichtung der Axialmaschine 427
9.61 Berechnung der Leitschaufeln bei Pumpen 427
9.62 Abstand zwischen Laufrad und Leitrad 428
9.63 Nabentotwasser 430
a) Reibungsfreie, inkompressible Strömung mit konstantem Drall und konstantem Gesamtdruck 430
b) Experimentelle Untersuchungen und Einfluß der Kompressibilität 435

9.7 Berechnungsbeispiele für Axialmaschinen 436
9.71 Berechnung einer Kaplan-Turbine 436
a) Wahl der Drehzahl 436
b) Hauptabmessungen des Rades 436
c) Berechnung der Laufschaufel 437
d) Lage der Schaufel-Drehachse 440
e) Zusätzliche Betrachtungen 442
9.72 Rechnungsgang einer Propellerpumpe oder eines Axiallüfters (Ventilators) 442
a) Laufrad 443
b) Leitrad 444
c) Fall der Verwendung eines Eintrittsleitrades 444
d) Zusätzliche Bemerkungen 445
9.73 Berechnung einer einstufigen Axialpumpe mäßiger spezifischer Drehzahl bzw. der ersten Stufe eines mehrstufigen Axialverdichters 445
a) Luftförderung 445
b) Wasserförderung 447
9.74 Berechnung der axialen Zwischenstufe einer Dampf- oder Gasturbine 447
a) Leitrad 449
b) Laufrad 450
c) Die spez. Stufenarbeit 451

d) Zustandsverlauf 452
e) 50% Reaktion 452
f) Wahl der Winkel 453
g) Konstruktive Angaben 453
h) Gleichdruck mit geringer Überdruckwirkung 456
i) Die zusätzlichen Schaufelverluste der Dampfturbine . . 457

10. Die mehrstufigen Strömungsmaschinen 460

10.1 Allgemeine Hinweise über die Anwendung der Mehrstufigkeit . . 460

10.2 Die Mehrstufigkeit, erläutert am Beispiel der Dampfturbine . . . 461
10.21 Die beiden Arten der Mehrstufigkeit 462
a) Stufenweise Verarbeitung des Druckgefälles (Druckstufen) 462
b) Stufenweise Verarbeitung der Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsstufen) 463
c) Vergleich der beiden Arten der Abstufung 463
10.22 Ausführungsformen der Druckstufung 464
a) Kammerstufen 465
b) Trommelstufen 467
c) Allgemeingültige Hinweise 471
10.23 Ausführungsformen und Eigenschaften der Geschwindigkeitsabstufung 472
a) Gemeinsamer Laufkranz für alle Stufen 472
b) Ebenso viele Laufschaufelkränze wie Stufen (Curtis-Turbine) 473
c) Berechnung einer Dampfturbine mit Geschwindigkeitsstufen 473
d) Wahl der Stufenzahl und erreichbare Wirkungsgrade bei Curtis-Turbinen 477
e) Geschwindigkeitsabstufung mit geringer Überdruckwirkung und ihre Berechnung 482
f) Zusammenstellung des Rechnungsganges einer Curtis-Turbine 483
10.24 Auswirkung der Reibungswärme bei Druckstufung 485
a) Gas- oder dampfförmiges Arbeitsmedium 485
b) Vergleich der Wirkungsgrade bei tropfbarem und gasförmigem Energieträger 488
10.25 Mehrgehäuseturbinen, Drehzahl und Grenzleistung 488
a) Allgemeines über die Anwendung mehrerer Gehäuse . . 488
b) Zusammenhang zwischen Drehzahl, Grenzleistung und mehrflutigem Niederdruckteil 489
c) Zusammenhang zwischen Grenzleistung und der Volumenänderung des Dampfes 497
10.26 Wahl des Reaktionsgrades 498
a) Allgemeine Hinweise 498
b) Bestimmung des kleinstzulässigen Reaktionsgrades für Kammerstufen-Dampfturbinen 499
10.27 Gang der Berechnung einer mehrstufigen Dampfturbine . . 501
a) Allgemeines 501
b) Letzte Stufe 501
c) Regulierstufe und folgende (zweite) Stufe 503
d) Die mittleren Stufen 504
10.28 Hochdruck-Hochtemperatur-Dampfturbinen 507
a) Werkstoffe 508
b) Wärmeelastizität 508
c) Topfbauweise 508
d) Doppelgehäuse 511

e) Wellendichtungen 511
f) Dampfnässe 512
10.29 Radial beaufschlagte Dampfturbinen 512
a) Einfach-Radialturbine 513
b) Gegenlauf-Radialturbine von Ljungström 513

10.3 Besonderheiten der mehrstufigen Verdichter 515
10.31 Konstruktive Einzelheiten radialer und axialer mehrstufiger Verdichter 516
10.32 Rechnungsgang 519
a) Gleichbleibende Stufenarbeiten 520
b) Ungleiche Stufenarbeiten 522

11. Kennlinien ein- und mehrstufiger Maschinen unter Berücksichtigung der Dichteänderung 527

11.1 Der Verdichter bei Abweichung vom Berechnungspunkt 527
11.11 Bestimmung der Drosselkurve eines mehrstufigen Verdichters 527
11.12 Die Abhängigkeit der Drosselkurve von der Verdichterdrehzahl 529
11.13 Der Einfluß der Mehrstufigkeit auf die Abreißgrenze und den Expansionsbeginn 529
11.14 Die Abhängigkeit der Drosselkurve von der Anfangstemperatur und der Gasart 531

11.2 Die Dampf- oder Gasturbine bei Abweichung vom Berechnungspunkt 534
11.21 Darstellung von Versuchsergebnissen mittels Einheitswerten 534
11.22 Der Kegel des Dampfdurchsatzes nach *Stodola* 536
11.23 Das Teillastverhalten von Dampfturbinen 539
11.24 Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeiten in einer beliebigen Stufe einer Kondensationsdampfturbine 541

12. Mathematische Verfahren der Strömungsmechanik zur Berechnung von Strömungsmaschinen 543

12.1 Zweidimensionale Strömung durch gerade Schaufelgitter . . . 543
12.11 Konforme Abbildung 544
12.12 Singularitätenmethode 547

12.2 Berechnung radialer Maschinen 549

13. Besondere Bedingungen bei den einzelnen Arten von Strömungsmaschinen 550

13.1 Die Zwischenkühlung bei Verdichtern 550

13.2 Besonderheiten der Dampf- und Gasturbinen 553

13.3 Arten der Regelung 556

13.4 Kreiselpumpen zur Feststoff-Förderung 556

Literaturverzeichnis 559

Sachverzeichnis 569