

Kamprath-Reihe

Prof. Dipl.-Ing.  
Willi Bohl

# Strömungsmaschinen 2

Berechnung und Konstruktion

7. aktualisierte Auflage

Vogel Buchverlag

# Inhaltsverzeichnis

## Teil A

### Strömungstechnische Auslegung und Berechnung der Bauteile von Strömungsmaschinen

|          |   |    |          |   |     |
|----------|---|----|----------|---|-----|
| <b>1</b> | <b>Bestimmung der Hauptabmessungen des Laufrades</b> . . . . .                        | 13 | 1.7.2.4  | Wahl der Stufenzahl . . . . .   | 63  |
| 1.1      | Einleitung . . . . .  | 13 | 1.7.3    | Dimensionierung der axialen Verdichterstufe . . . . .                               | 65  |
| 1.2      | Die Laufräder der Wasserturbinen . . . . .  | 13 | 1.7.3.1  | Einleitung . . . . .  | 65  |
| 1.2.1    | Das Laufrad der Freistrahlturbine . . . . .   | 13 | 1.7.3.2  | Hauptparameter eines Axialverdichters . . . . .                                     | 65  |
| 1.2.2    | Das Laufrad der Francisturbine . . . . .  | 16 | 1.7.3.3  | Bestimmung der Hauptabmessungen über dimensionslose Kennzahlen . . . . .            | 66  |
| 1.2.3    | Das Laufrad der Kaplan turbine . . . . .  | 18 | 1.7.3.4  | Auslegung von Axialverdichtern mit Hilfe von Auslegediagrammen . . . . .            | 67  |
| 1.2.4    | Das Laufrad der Diagonalturbine . . . . .   | 21 | <b>2</b> | <b>Schaufelgitter</b> . . . . .   | 71  |
| 1.2.5    | Das Laufrad der Durchströmturbine . . . . .   | 24 | 2.1      | Einleitung . . . . .  | 71  |
| 1.3      | Die Laufräder der axialen Dampf- und Gasturbinen . . . . .                            | 24 | 2.2      | Radialgitter . . . . .  | 71  |
| 1.3.1    | Einleitung . . . . .  | 24 | 2.2.1    | Rotierende Radialgitter (Laufräder) . . . . .                                       | 71  |
| 1.3.2    | Vereinfachte Stufentheorie . . . . .  | 24 | 2.2.1.1  | Grundsätzliches zur Strömung in rotierenden Radialgittern . . . . .                 | 71  |
| 1.3.3    | Kennwerte der Stufe . . . . .   | 27 | 2.2.1.2  | Der Verengungsfaktor $k$ . . . . .  | 73  |
| 1.3.4    | Abschätzung der Stufenzahl . . . . .  | 29 | 2.2.1.3  | Der Minderleistungsfaktor $\mu$ . . . . .   | 74  |
| 1.3.5    | Kanalverlauf . . . . .  | 30 | 2.2.1.4  | Die Schaufelkonstruktion . . . . .  | 79  |
| 1.3.6    | Profilform . . . . .  | 30 | 2.2.2    | Stehende Radialgitter (Leiträder) . . . . .   | 82  |
| 1.4      | Das Laufrad der Zentripetalturbine . . . . .  | 32 | 2.2.2.1  | Einleitung . . . . .  | 82  |
| 1.4.1    | Einleitung . . . . .  | 32 | 2.2.2.2  | Leiträder von Pumpen . . . . .  | 83  |
| 1.4.2    | Vereinfachte Stufentheorie . . . . .  | 32 | 2.2.2.3  | Rückführschaufeln . . . . .   | 84  |
| 1.4.3    | Festlegung der Hauptabmessungen mit Hilfe von Kennzahlen . . . . .                    | 33 | 2.2.2.4  | Leiträder von Radialverdichtern . . . . .   | 86  |
| 1.5      | Die Laufräder der Kreiselpumpen . . . . .   | 34 | 2.2.2.5  | Leiträder der Francisturbine und der Kaplan turbine . . . . .                       | 87  |
| 1.5.1    | Einleitung . . . . .  | 34 | 2.2.2.6  | Leitrad der Zentripetalturbine . . . . .  | 88  |
| 1.5.2    | Das Laufrad der Radialpumpe . . . . .   | 34 | 2.3      | Axialgitter . . . . .   | 89  |
| 1.5.3    | Das Laufrad der Axialpumpe . . . . .  | 39 | 2.3.1    | Einleitung . . . . .  | 89  |
| 1.6      | Die Laufräder der Ventilatoren . . . . .  | 45 | 2.3.2    | Einteilung der Axialgitter und Grundbegriffe . . . . .                              | 89  |
| 1.6.1    | Einleitung . . . . .  | 45 | 2.3.3    | Strömung und Kraftwirkungen in Axialgittern . . . . .                               | 90  |
| 1.6.2    | Das Laufrad des Radialventilators . . . . .   | 45 | 2.3.4    | Hauptbemessungsgleichung für Axialgitter . . . . .                                  | 95  |
| 1.6.3    | Das Laufrad des Axialventilators . . . . .  | 49 | 2.3.5    | Der Gitterentwurf . . . . .   | 97  |
| 1.6.4    | Das Laufrad des Querstromventilators . . . . .  | 56 | 2.3.6    | Einige Hinweise zur Festlegung des Abstandes/zwischen Leitrad und Laufrad . . . . . | 105 |
| 1.7      | Die Laufräder der Verdichter . . . . .  | 58 | <b>3</b> | <b>Weitere Bauteile von Strömungsmaschinen</b> . . . . .                            | 113 |
| 1.7.1    | Kurze Einführung in die Theorie der Verdichterstufe . . . . .                         | 58 | 3.1      | Düsen . . . . .   | 113 |
| 1.7.2    | Dimensionierung der radialen Verdichterstufe . . . . .                                | 60 | 3.1.1    | Einlaufdüsen . . . . .  | 113 |
| 1.7.2.1  | Einleitung . . . . .  | 60 | 3.1.2    | Lavaldüsen . . . . .  | 115 |
| 1.7.2.2  | Festlegung der Laufradabmessungen mittels dimensionsloser Kennzahlen . . . . .        | 60 | 3.1.3    | Die Düse der Freistrahlturbine . . . . .  | 117 |
| 1.7.2.3  | Festlegung der Laufradabmessungen mittels Auslegediagrammen und Richtwerten . . . . . | 61 |          |   |     |

|   |  |            |          |  |            |
|---|--|------------|----------|--|------------|
| 3.2   | Diffusoren . . . . .   | 120        | 4.6.2.3  | Der Radialschub. . . . .   | 159        |
| 3.2.1   | Einleitung . . . . .   | 120        | 4.6.3    | Spannungen und Verformungen . . .                                    | 160        |
| 3.2.2   | Strömungsverhältnisse . . . . .                                      | 120        | 4.6.4    | Die biegekritische Drehzahl . . . . .                                | 161        |
| 3.2.3   | Kreisringdiffusoren . . . . .  | 120        | 4.6.4.1  | Einführung. . . . .  | 161        |
| 3.3   | Spiralgehäuse . . . . .  | 124        | 4.6.4.2  | Überschlägige Berechnung der biege-<br>kritischen Drehzahl . . . . . | 162        |
| 3.3.1   | Abschätzung des Ein- bzw. Austritts-<br>querschnitts . . . . .       | 124        | 4.6.4.3  | Einflüsse auf die kritische Drehzahl .                               | 168        |
| 3.3.2   | Festlegung der Spiralenquerschnitte .                                | 124        | 4.6.5    | Die torsionskritische Drehzahl . . . .                               | 171        |
| 3.4   | Einlauf- und Abströmgehäuse . . . . .                                | 129        | 4.6.6    | Gestaltungsregeln und Betriebshin-<br>weise . . . . .                | 171        |
| <b>Teil B</b>   |  |            | 4.7      | Rotoren . . . . .  | 172        |
| Festigkeitsberechnung und Konstruktion der<br>Bauteile von Strömungsmaschinen |  |            | 4.7.1    | Konstruktive Ausführungen von Ro-<br>toren . . . . .                 | 172        |
| <b>4</b>  | <b>Rotierende Teile . . . . .</b>                                    | <b>133</b> | 4.7.2    | Berechnung der Rotoren . . . . .                                     | 173        |
| 4.1   | Einfache Grundelemente . . . . .                                     | 133        | <b>5</b> | <b>Gehäuseteile . . . . .</b>  | <b>177</b> |
| 4.1.1   | Prismatischer Stab . . . . .   | 133        | 5.1      | Einleitung . . . . .   | 177        |
| 4.1.1.1   | Spannungen . . . . .   | 133        | 5.2      | Zylindrische Schalen unter innerem<br>Überdruck . . . . .            | 177        |
| 4.1.1.2   | Die radiale Dehnung . . . . .  | 134        | 5.3      | Kreisförmige ebene Platten. . . . .                                  | 180        |
| 4.1.1.3   | Die Biegeeigenfrequenz . . . . .                                     | 134        | 5.4      | Gewölbte Böden. . . . .  | 183        |
| 4.1.1.4   | Die Torsionseigenfrequenz . . . . .                                  | 134        | 5.5      | Kugelschalen. . . . .  | 184        |
| 4.1.2   | Ring (Trommel, Kranz). . . . .                                       | 135        | 5.6      | Stützen . . . . .  | 184        |
| 4.1.3   | Scheiben gleicher Dicke (konstanter<br>Breite) . . . . .             | 136        | 5.7      | Flansche . . . . .   | 186        |
| 4.2   | Scheiben beliebigen Profiles (verän-<br>derlicher Dicke) . . . . .   | 140        | 5.7.1    | Flanscharten . . . . .   | 186        |
| 4.3   | Scheiben gleicher Festigkeit . . . . .                               | 143        | 5.7.2    | Rohrflansche (Rundflansche). . . . .                                 | 187        |
| 4.4   | Radiale Laufräder . . . . .  | 144        | 5.7.2.1  | Die äußeren Kräfte . . . . .   | 187        |
| 4.4.1   | Einleitung . . . . .   | 144        | 5.7.2.2  | Schraubenkraft . . . . .   | 193        |
| 4.4.2   | Überschlägige Berechnung nach Eck                                    | 144        | 5.7.2.3  | Berechnung der Flansche . . . . .                                    | 193        |
| 4.4.3   | Zerlegung des Laufrades in Scheiben<br>und Schaufeln . . . . .       | 145        | 5.7.3    | Gehäuseflansche (horizontale Teil-<br>flansche) . . . . .            | 195        |
| 4.4.4   | Berechnung der Schaufelbiegung im<br>Radialrad . . . . .             | 146        | 5.7.4    | Schrauben . . . . .  | 197        |
| 4.5   | Axiale Laufräder . . . . .   | 149        | 5.8      | Fixierung von Gehäusen . . . . .                                     | 198        |
| 4.5.1   | Einleitung . . . . .   | 149        | <b>6</b> | <b>Dichtungen . . . . .</b>  | <b>201</b> |
| 4.5.2   | Fliehkraftbeanspruchung . . . . .                                    | 149        | 6.1      | Berührungsdichtungen . . . . .                                       | 201        |
| 4.5.3   | Biegebeanspruchung der Axialschau-<br>fel. . . . .                   | 150        | 6.1.1    | Packungsstoppbuchsen . . . . .                                       | 201        |
| 4.5.4   | Torsionsbeanspruchung der Schaufel                                   | 152        | 6.1.1.1  | Einleitung . . . . .   | 201        |
| 4.5.5   | Biegeeigenfrequenzen der starr einge-<br>spannten Schaufel . . . . . | 152        | 6.1.1.2  | Konstruktiver Aufbau und Wirkungs-<br>weise . . . . .                | 201        |
| 4.6   | Wellen . . . . .   | 157        | 6.1.1.3  | Packungswerkstoffe . . . . .   | 202        |
| 4.6.1   | Rotorformen . . . . .  | 157        | 6.1.1.4  | Gestaltungshinweise . . . . .  | 203        |
| 4.6.2   | Kräfte und Momente . . . . .   | 157        | 6.1.1.5  | Kräfte, Drücke und Momente an und<br>in der Packung. . . . .         | 206        |
| 4.6.2.1   | Allgemeines . . . . .  | 157        | 6.1.1.6  | Einige besondere Stoffbuchskon-<br>struktionen . . . . .             | 208        |
| 4.6.2.2   | Der Axialschub . . . . .   | 158        | 6.1.2    | Axiale Gleitringdichtungen . . . . .                                 | 209        |

|          |  |     |          |   |     |
|----------|--|-----|----------|---|-----|
| 6.1.2.1  | Einleitung . . . . .   | 209 | 7.2.3.3  | Auslegung von Axiallagern mit eingearbeiteten Keilflächen . . . . . | 239 |
| 6.1.2.2  | Aufbau und Wirkungsweise . . . . .                             | 210 | 7.2.3.4  | Kippsegment-Axiallager. . . . .                                     | 242 |
| 6.1.2.3  | Kräfte und Momente an der Gleitringdichtung . . . . .          | 211 | 7.3      | Wälzlager . . . . .   | 244 |
| 6.1.2.4  | Anordnungen und Ausführungen von Gleitringdichtungen . . . . . | 213 | 7.3.1    | Einleitung . . . . .  | 244 |
| 6.1.2.5  | Leckage . . . . .  | 214 | 7.3.2    | Wahl der Lagerart . . . . .   | 244 |
| 6.1.2.6  | Beispiele . . . . .  | 215 | 7.3.3    | Wahl der Lagergröße (Dimensionierung) . . . . .                     | 244 |
| 6.1.3    | Radial-Wellendichtringe . . . . .                              | 216 | 7.3.4    | Drehzahlgrenzen. . . . .  | 247 |
| 6.1.3.1  | Aufbau und Wirkungsweise . . . . .                             | 216 | 7.3.5    | Toleranzen und Passungen . . . . .                                  | 247 |
| 6.1.3.2  | Auswahl der Dichtung . . . . .                                 | 217 | 7.3.6    | Lagerluft . . . . .   | 247 |
| 6.1.3.3  | Konstruktionsrichtlinien . . . . .                             | 217 | 7.3.7    | Gestaltungsfragen . . . . .   | 248 |
| 6.2      | Berührungsfreie Dichtungen . . . . .                           | 221 | 7.3.8    | Abdichtung . . . . .  | 248 |
| 6.2.1    | Einleitung und Einteilung. . . . .                             | 221 | 7.3.9    | Schmierung . . . . .  | 248 |
| 6.2.2    | Drucklose berührungsfreie Dichtungen . . . . .                 | 221 | 7.3.10   | Montage . . . . .   | 252 |
| 6.2.3    | Spaltdichtungen . . . . .                                      | 221 | 7.3.11   | Beispiele . . . . .   | 253 |
| 6.2.3.1  | Der axiale Spalt . . . . .                                     | 221 | <b>8</b> | <b>Kupplungen.</b> . . . . .  | 259 |
| 6.2.3.2  | Der radiale Spalt . . . . .                                    | 226 | 8.1      | Feste Kupplungen. . . . .   | 259 |
| 6.2.3.3  | Schwimmringdichtungen . . . . .                                | 227 | 8.2      | Elastische Kupplungen . . . . .                                     | 262 |
| 6.2.4    | Labyrinthspaltdichtungen. . . . .                              | 228 | 8.3      | Zahnkupplungen . . . . .  | 265 |
| 6.2.4.1  | Durchflußgleichungen (Leckage). . . . .                        | 228 | <b>9</b> | <b>Fundamente</b> . . . . .   | 267 |
| 6.2.4.2  | Gestaltungshinweise. . . . .                                   | 229 | 9.1      | Allgemeines . . . . .   | 267 |
| <b>7</b> | <b>Lager</b> . . . . .   | 233 | 9.2      | Zur Konstruktion der Fundamente . . . . .                           | 267 |
| 7.1      | Einleitung . . . . .   | 233 |          |   |     |
| 7.2      | Gleitlager . . . . .   | 233 |          | Die wichtigsten Formelzeichen und Einheiten                         |     |
| 7.2.1    | Bauformen . . . . .  | 233 |          |   |     |
| 7.2.2    | Radiallager. . . . .   | 233 |          | Literaturverzeichnis . . . . .                                      | 269 |
| 7.2.3    | Axiallager . . . . .   | 238 |          | Stichwortverzeichnis . . . . .                                      | 283 |
| 7.2.3.1  | Einleitung . . . . .   | 238 |          |   |     |
| 7.2.3.2  | Auslegung von Axiallagern mit glatten Anlaufbunden . . . . .   | 238 |          |   |     |