

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Formelzeichen (Auswahl) | XI |
| 1 Grundlagen..... | 1 |
| 1.1 Kurze technikgeschichtliche Anmerkung | 1 |
| 1.2 Betriebsparameter eines Ventilators | 3 |
| 1.3 Bedarf einer Anlage – Auswahl des Ventilators..... | 5 |
| 1.4 Kennlinien | 6 |
| 1.5 Dimensionslose Kennzahlen, Modellgesetze, Bauarten | 6 |
| 1.5.1 Dimensionslose Kennzahlen | 6 |
| 1.5.2 Modellgesetze | 8 |
| 1.5.3 Systematik der Bauarten: CORDIER-Diagramm | 9 |
| 1.5.4 Aufwertung | 11 |
| 1.6 Übungsaufgaben zu Kapitel 1..... | 12 |
| 1.6.1 Totaldruckbedarf einer Anlage und Ventilatorspezifikation | 12 |
| 1.6.2 Auswahl der Ventilatorbauart..... | 13 |
| 1.6.3 Vom Modell zur Großausführung | 14 |
| 1.6.4 Dimensionslose Kennlinien..... | 14 |
| 1.6.5 Kompressibilität vs. Inkompressibilität | 15 |
| 1.7 Literatur zu Kapitel 1 | 15 |
| 2 Schaufelentwurfsparameter, Kinematik, Verluste und Wirkungsgrade..... | 17 |
| 2.1 Schaufelentwurfsparameter | 17 |
| 2.2 Kinematik der Strömung (Geschwindigkeitsdreiecke)..... | 17 |
| 2.2.1 Radiales Schaufelgitter..... | 17 |
| 2.2.2 Ebenes axiales Schaufelgitter..... | 20 |
| 2.3 Verluste und Wirkungsgrade | 22 |
| 2.3.1 Laufradverluste und -wirkungsgrade..... | 22 |
| 2.3.2 Verluste und Wirkungsgrade in Leitvorrichtungen und im Gehäuse..... | 23 |
| 2.4 Literatur zu Kapitel 2 | 27 |
| 3 Entwurf radiauer Ventilatoren | 29 |
| 3.1 Schaufelentwurf..... | 30 |
| 3.1.1 Minderumlenkung und -leistung bei endlicher Schaufelzahl | 30 |
| 3.1.2 Minderleistungsfaktor | 32 |
| 3.1.3 Ansätze zur Berechnung des Minderleistungsfaktors..... | 33 |
| 3.1.4 Wahl der Schaufelzahl..... | 35 |
| 3.1.5 Versperrung des Ein- und Austritts durch die endliche Dicke der Schaufel..... | 35 |
| 3.1.6 Zusammenfassung: Schaufelentwurf Radialrad | 37 |
| 3.1.7 Weitere empirische Geometrieparameter des Radiallaufrades | 39 |
| 3.2 Berechnung von Spiralgehäusen..... | 44 |
| 3.2.1 Eindimensionale Stromfadentheorie..... | 45 |
| 3.2.2 Weitere empirische Geometrieparameter des einfachen Spiralgehäuses..... | 47 |
| 3.3 Übungsaufgaben zu Kapitel 3..... | 48 |
| 3.3.1 Entwurf Radialventilatorrad | 48 |
| 3.3.2 Entwurf eines Spiralgehäuses..... | 48 |
| 3.4 Literatur zu Kapitel 3 | 48 |

| | |
|--|------------|
| 4 Entwurf axialer Ventilatoren | 51 |
| 4.1 Kinematik der Strömung im axialen Laufrad: Radiales Gleichgewicht..... | 52 |
| 4.1.1 Isoenergetische Arbeitsverteilung von Nabe zu Schaufel spitze | 54 |
| 4.1.2 Radiusabhängige Arbeitsverteilung..... | 58 |
| 4.1.3 Zusammenstellung verschiedener Drallverteilungen..... | 58 |
| 4.2 Segmentierung in Teillfluträder, Schaufelgitterschnitte | 58 |
| 4.3 Tragflächen- (Blade Element Momentum-)Verfahren..... | 60 |
| 4.3.1 Herleitung der Schlüsselgleichung | 60 |
| 4.3.2 Zusammenfassung: Schaufelentwurf für Niederdruckaxialventilatoren..... | 64 |
| 4.3.3 Schaufelsichelung..... | 66 |
| 4.4 Schaufelgitterverfahren nach LIEBLEIN | 68 |
| 4.4.1 Schaufeleintrittswinkel | 68 |
| 4.4.2 Schaufelaustrittswinkel..... | 70 |
| 4.4.3 Profilwölbung und Skeletlinie | 70 |
| 4.4.4 Zusammenfassung: Schaufelentwurf Hochdruckaxialventilatoren | 71 |
| 4.5 Entwurfskriterien | 72 |
| 4.5.1 Kriterium von DE HALLER | 72 |
| 4.5.2 Kriterium von STRSCHELETZKY | 72 |
| 4.5.3 Diffusionszahl nach LIEBLEIN | 73 |
| 4.5.4 Weitere Grenzen..... | 74 |
| 4.6 Übungsaufgaben zu Kapitel 4 | 74 |
| 4.6.1 Entwurf Niederdruckaxialventilator | 74 |
| 4.6.2 Entwurf Hochdruckaxialventilator mit Nachleitrad..... | 75 |
| 4.7 Literatur zu Kapitel 4 | 76 |
| 5 Entstehung von Schall in Ventilatoren und seine Ausbreitung | 77 |
| 5.1 Überblick über die Mechanismen der Schallentstehung | 77 |
| 5.2 Rotierende Druckfelder bei Axialventilatoren | 80 |
| 5.2.1 Das rotierende Druckfeld eines isolierten Rotors | 80 |
| 5.2.2 Rotor-Stator-Interaktion | 81 |
| 5.3 Strömungsinduzierter Schall auftriebserzeugender Flächen | 84 |
| 5.4 Schallausbreitung..... | 86 |
| 5.4.1 Abstrahlung in das Freifeld | 88 |
| 5.4.2 Ausbreitung des rotierenden Druckfelds im Rohr | 88 |
| 5.4.3 Anregung von Rohrmoden durch einen Ventilator | 91 |
| 5.5 Bewertung und Beispiele der einzelnen Schallquellen | 93 |
| 5.5.1 Rotor-Stator-Interaktion | 94 |
| 5.5.2 Turbulente Zuströmung, Strömungsabriss | 98 |
| 5.5.3 Wirbelablösung | 99 |
| 5.5.4 Sekundärströmung: Wirbelsystem am Kopfspalt..... | 99 |
| 5.6 Übungsaufgabe zu Kapitel 5: Rohrmoden beim Axialventilator | 100 |
| 5.7 Literatur zu Kapitel 5 | 101 |
| 6 Berechnungsverfahren für den Ventilatorschall..... | 103 |
| 6.1 Schallberechnungsverfahren der Klasse I | 104 |
| 6.1.1 Formel von MADISON | 104 |
| 6.1.2 Ansatz von REGENSCHEIT | 105 |
| 6.1.3 Abschätzung des Schallleistungsspektrums in Oktavbändern | 107 |
| 6.2 Schallberechnungsverfahren der Klasse II..... | 107 |
| 6.2.1 Berechnung der Gesamtschallleistung mit dem SHARLAND-Verfahren | 108 |
| 6.2.2 Berücksichtigung der spektralen Verteilung..... | 112 |
| 6.2.3 Kanalmodell | 117 |
| 6.2.4 Zusammenfassung und Beispiel | 117 |

| | |
|--|------------|
| 6.3 Fortgeschrittene Verfahren | 119 |
| 6.4 Übungsaufgaben zu Kapitel 6 | 120 |
| 6.4.1 Akustisches Modellgesetz | 120 |
| 6.4.2 Ventilatorschalleistung | 120 |
| 6.5 Literatur zu Kapitel 6 | 120 |
| 7 Psychoakustische Bewertung des Ventilatorgeräusches | 125 |
| 7.1 Lästigkeitsempfinden - Beurteilungspegel | 125 |
| 7.2 Geräuschqualität | 127 |
| 7.3 Beispiele | 129 |
| 7.4 Literatur zu Kapitel 7 | 131 |
| 8 Konstruktive Maßnahmen zur Minderung des Ventilatorgeräusches | 133 |
| 8.1 Generelle Maßnahmen | 133 |
| 8.1.1 Reduktion der Umfangsgeschwindigkeit | 133 |
| 8.1.2 Vergrößerung des Abstands zwischen feststehenden und rotierenden Bauteilen | 135 |
| 8.1.3 Phasenverschiebung zwischen feststehenden und rotierenden Bauteilen | 136 |
| 8.1.4 Ungleichmäßige Schaufelteilung | 137 |
| 8.1.5 Wellige Vorderkante und gezackte Hinterkante | 139 |
| 8.1.6 Optimale Einlaufgeometrie und Turbulenzkontrollschild | 140 |
| 8.2 Weitere spezielle Maßnahmen bei Radialventilatoren | 142 |
| 8.2.1 Ablösearme Meridiankontur | 142 |
| 8.2.2 Resonanzunterdrückung im Schaufelkanal | 143 |
| 8.3 Weitere spezielle Maßnahmen bei Axialventilatoren | 144 |
| 8.3.1 Abstimmung der Schaufelzahl (Modenausbreitung) | 144 |
| 8.3.2 Sichelschaufeln | 144 |
| 8.3.3 Beeinflussung der Kopfspaltströmung | 147 |
| 8.4 Literatur zu Kapitel 8 | 148 |
| 9 Schwingungen und niederfrequenter Schall in Anlagen mit Ventilatoren | 153 |
| 9.1 Übersicht über strömungsinduzierte Schwingungen | 153 |
| 9.2 Lokale Schwingungen | 153 |
| 9.2.1 Der Ventilator als Erreger | 153 |
| 9.2.2 Schwingungsanregung durch passive Bauteile | 155 |
| 9.2.3 Abhilfemaßnahmen | 157 |
| 9.3 Fremderregte Anlagenschwingungen - Resonanz | 158 |
| 9.4 Selbsterregte Anlagenschwingungen | 161 |
| 9.4.1 Pumpschwingungen | 161 |
| 9.4.2 Parallelgeschaltete Ventilatoren | 164 |
| 9.4.3 Reglerbedingte Schwingungen | 165 |
| 9.5 Übungsaufgabe zu Kapitel 9: Stehende Welle | 166 |
| 9.6 Literatur zu Kapitel 9 | 166 |
| 10 Numerische und experimentelle Methoden | 169 |
| 10.1 Numerische Stromfeldsimulation | 169 |
| 10.1.1 Übersicht über CFD-Verfahren | 169 |
| 10.1.2 Rechengebiet und numerisches Gitter | 174 |
| 10.1.3 Die Rotor-Stator-Problematik | 176 |
| 10.1.4 Rand- und Anfangsbedingungen | 177 |
| 10.1.5 Steuerparameter, Konvergenzverlauf und Abbruchkriterium | 179 |
| 10.1.6 Postprocessing | 180 |
| 10.1.7 Validierung und Verifikation | 181 |
| 10.1.8 Beispiel: Axialventilator | 181 |

| | |
|---|------------|
| 10.2 Experimentelle Methoden..... | 184 |
| 10.2.1 Messung integraler aerodynamischer Betriebsparameter – Ventilatorprüfstände..... | 184 |
| 10.2.2 Messung von Stromfeldgrößen..... | 186 |
| 10.2.3 Akustische Messverfahren..... | 190 |
| 10.3 Optimierung..... | 194 |
| 10.3.1 Optimierungsverfahren | 195 |
| 10.3.2 Beispiel: Optimierung eines Axialventilators..... | 198 |
| 10.3.3 Beispiel: Radialräder für maximalen freiausblasenden Wirkungsgrad..... | 199 |
| 10.4 Literatur zu Kapitel 10..... | 201 |
| 11 Anhang | 205 |
| 11.1 Freiausblasende Druckerhöhung..... | 205 |
| 11.1.1 Gehäuseloser Radialventilator | 205 |
| 11.1.2 Axialventilator ohne Nachleitrad und Diffusor | 206 |
| 11.1.3 Axialventilator mit Nachleitrad und Diffusor | 208 |
| 11.2 Tragflächenprofile | 212 |
| 11.2.1 Einzelflügel im unbegrenzten Raum..... | 212 |
| 11.2.2 Profilfamilien..... | 214 |
| 11.2.3 Tragflächen im Gitterverband..... | 221 |
| 11.3 Einige akustische Grundbegriffe..... | 222 |
| 11.4 Mittelwertbildung von Stromfeldgrößen..... | 227 |
| 11.5 Tabellen (Profile, asymmetrische Schaufelteilungen) | 231 |
| 11.6 LIEBLEIN-Entwurfsdiagramme..... | 234 |
| 11.7 Literatur zu Kapitel 11..... | 239 |
| 12 Lösungen der Übungsaufgaben | 241 |
| 12.1 Lösung 1.6.1: Totaldruckbedarf einer Anlage und Ventilatorspezifikation..... | 241 |
| 12.2 Lösung 1.6.2: Auswahl der Ventilatorbauart | 243 |
| 12.3 Lösung 1.6.3: Vom Modell zur Großausführung | 245 |
| 12.4 Lösung 1.6.4: Dimensionslose Kennlinien | 245 |
| 12.5 Lösung 1.6.5: Kompressibilität vs. Inkompressibilität | 246 |
| 12.6 Lösung 3.3.1: Entwurf Radialventilatorrad..... | 247 |
| 12.7 Lösung 3.3.2: Entwurf eines Spiralgehäuses | 249 |
| 12.8 Lösung 4.5.1: Entwurf Niederdruckaxialventilator..... | 250 |
| 12.9 Lösung 4.5.2: Entwurf Hochdruckaxialventilator mit Nachleitrad | 254 |
| 12.10 Lösung 5.6: Rohrmoden beim Axialventilator..... | 258 |
| 12.11 Lösung 6.4.1: Akustisches Modellgesetz | 259 |
| 12.12 Lösung 6.4.2: Ventilatorschallleistung | 259 |
| 12.13 Lösung 9.5: Stehende Welle | 260 |
| 12.14 Literatur zu Kapitel 12 | 261 |
| Sachwortverzeichnis..... | 263 |