

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 radialer 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 Schaufelspitze	54
4.1.2 Radiusabhängige Arbeitsverteilung	58
4.1.3 Zusammenstellung verschiedener Drallverteilungen	58
4.2 Segmentierung in Teilfluträder, 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 Skelettlinie	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 Ventilatorschallleistung.....	120
6.5 Literatur zu Kapitel 6	120
7 Psychoakustische Bewertung des Ventilatorgeräuschs.....	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 Ventilatorgeräuschs	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 Turbulenzkontrollschirm	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 Gehäuselooser 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 Profilmfamilien.....	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