

Ventilatoren

Mit ausgewählten Problemlösungen für den Geräte- und Anlagenbau

Prof. Dr.-Ing. Leonhard Bommers
Prof. Dr.-Ing. Carl Kramer

Dipl.-Ing. Hans-Ulrich Banzhaf
Prof. Dipl.-Ing. Willi Bohl
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fricke
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Grundmann
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Siegfried Harmsen
Dr.-Ing. Horst-Rüdiger Hupe
Prof. Dr.-Ing. Klaus Klaes
Dipl.-Ing. Dieter Reinartz
Dr.-Ing. Frank Schiller
Prof. Dr.-Ing. Hartwin Ufer
Dipl.-Ing. Heinz Wieland

Mit 306 Bildern



Kontakt & Studium
Band 292

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz
Technische Akademie Esslingen
Weiterbildungszentrum
DI Elmar Wippler
expert verlag

expert  **verlag**

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort

Autoren-Vorwort

1	Ventilatoren-Grundlagen	1
	H. Wieland	
1.1	Begriffsbestimmung	1
1.2	Ventilatorbauarten	2
1.2.1	Axialventilator	4
1.2.2	Halbaxialventilator	4
1.2.3	Halbradialventilator	4
1.2.4	Radialventilator	4
1.2.5	Querstromventilator	4
1.3	Betriebswerte, Förderdaten	5
1.4	Kennlinien	12
1.4.1	Ventilator Kennlinien	12
1.4.1.1	Leistungscharakteristik verschiedener Ventilatorbauarten	12
1.4.1.2	Kennlinien-Unstetigkeiten, labile Betriebsbereiche	16
1.4.1.3	Normkennlinie von Ventilatoren	19
1.4.1.4	Darstellung der Betriebswerte in Katalogen	20
1.4.2	Anlagenkennlinien	20
1.5	Zusammenwirken von Ventilator und Anlage	22
1.6	Parallelschaltung von Ventilatoren	24
1.7	Hintereinanderschaltung von Ventilatoren	25
1.8	Veränderung der Förderleistung (Anpassen, Steuern, Regeln)	26
1.8.1	Drosselklappe	28
1.8.2	Bypassregelung	29
1.8.3	Drehzahlveränderung	30
1.8.4	Gruppenschaltung von mehreren Ventilatoren	30
1.8.5	Laufschaufelverstellung	30
1.8.6	Drallregler	31
1.8.7	Vergleich der verschiedenen Systeme	31

2	Ähnlichkeitsgesetze	34
	R. Grundmann	
2.1	Einleitung	34
2.2	Dimensionsanalyse/ π -Theorem	39
2.2.1	Anwendung auf Ventilatoren	42
2.3	Bauformen	46
2.3.1	Axialventilator	46
2.3.1.1	ohne Leitrad	46
2.3.1.2	mit Nachleitrad	47
2.3.1.3	mit Vorleitrad	47
2.3.2	Radialventilatoren	47
2.3.3	Querstromventilatoren	48
2.3.4	Geschwindigkeitsdreiecke	49
2.4	Kennfunktionen	51
2.5	Auslegungsbeispiele	54
2.5.1	Aufgabentypen	54
2.5.2	Auslegung über das CORDIER-Diagramm	54
2.5.3	Auswahl über Kennlinien	59
2.5.3.1	Dimensionslose Kennlinien	59
2.5.3.2	Dimensionsbehaftete Kennlinienfelder	65
2.5.4	Einfluß der Ausführungsformen	73
2.6	Ventilatorgeräusch	74
2.6.1	Geräuschursache und -zusammensetzung	74
2.6.2	Problematik der Modellgesetze	75
2.6.3	Strömungsakustische Modellgesetze	77
2.6.3.1	Gesamtschalleistungspegel und spezifischer Schallleistungspegel	78
2.6.3.2	Rauschspektrum	80
2.6.3.3	Drehklangspektrum	83
2.6.3.4	Bemerkungen zur Regressionsanalyse	85
3	Axialventilatoren	89
	F. Schiller	
3.1	Einleitung	89
3.2	Theoretische Grundlagen	91
3.3	Dimensionslose Kennzahlen und Typenauswahl	98
3.4	Entwurf einer Axialventilatorbeschaukelung	101
3.4.1	Bestimmung der Entwurfsvorgaben	102
3.4.2	Beschaukelungsentwurf nach dem Gitterverfahren von Lieblein	104

3.4.2.1	Theoretische Vorausberechnung des inneren Wirkungsgrades	106
3.4.2.2	Berechnung der Meridiangeschwindigkeitsverteilung $c_{3m}(r)$	113
3.4.2.3	Schaufelentwurf für Lauf- und Leitrad	117
3.4.3	Entwurf nach dem Minderleistungsverfahren von Pfeleiderer	122
3.4.3.1	Einfluß der endlichen Schaufelzahl und der Zähigkeit auf die Geometriefestlegung nach der Minderleistungstheorie	123
3.4.3.2	Schaufelentwurf für Lauf- und Leitrad	125
3.4.4	Beschaufelungsentwurf nach der Tragflügeltheorie	129
3.4.4.1	Grundlagen für die Berechnung nach der Tragflügeltheorie	130
3.4.4.2	Beschaufelungsentwurf für das Lauf- und Leitrad	132
3.5	Betriebsverhalten von Axialventilatoren	136
3.5.1	Verhalten außerhalb des Entwurfspunktes (Drosselkennlinie)	137
3.5.2	Theoretische Vorausberechnung der Axialventilator-kennlinie	139
3.5.2.1	Berechnung der ψ^*_{Schx} -Kennlinien	140
3.5.2.2	Berechnung von η_i bei Abweichungen vom Entwurfspunkt	142
3.5.3	Regelung von Axialventilatoren	149
3.5.4	Zusammenfassung	158
3.5.5	Entwurfsdiagramme	160

4 Sonderventilatoren 165

C. Kramer

4.1	Einleitung und Überblick	165
4.2	Heißgasventilatoren	166
4.2.1	Einsatzgebiet	166
4.2.2	Ausführungsformen	167
4.2.3	Strömungstechnische Untersuchungsergebnisse	167
4.2.3.1	Radeinlaufströmung	167
4.2.3.2	Lauftradfüllung	171
4.2.3.3	Gehäuseeinfluß	174
4.2.4	Heißgas-Radialventilatorräder mit allseitiger Abströmung	178
4.2.5	Festigkeitsuntersuchungen	180
4.2.6	Verbundkonstruktion und Flügelkonstruktion	183
4.3	Reversierbare Ventilatoren	185
4.4	Transportventilatoren	188
4.4.1	Einsatzgebiet	188
4.4.2	Ausführungsformen	189
4.4.2.1	Lauftrad mit Deckscheibe	189

4.4.2.2	Offenes Laufrad	191
4.5	Seitenkanalgebläse	191
4.5.1	Einsatzgebiet	191
4.5.2	Funktionsprinzip	192
4.5.3	Bauformen	194
4.5.4	Hinweise für die Berechnung von Seitenkanalgebläsen	195
4.5.4.1	Schaufelformen	195
4.5.4.2	Grenzdruckverhältnis	195
4.5.4.3	Kennlinie	198
4.5.4.4	Einfluß der Kanalform	199
4.6	Druckfeste Radialventilatoren	200
4.6.1	Einsatzgebiete	200
4.6.2	Ausführung	201
5	Radialventilatoren	202
	<i>L. Bommers</i>	
5.1	Einleitung	202
5.2	Theoretische Grundlagen	202
5.3	Typenauswahl	210
5.4	Gestaltung des Radeinlaufs	214
5.5	Berechnung und Entwurf des Radialventilators	218
5.5.1	Ermittlung der spezifischen Drehzahl n_q	218
5.5.2	Abschätzung der Druckzahl ψ und des inneren Wirkungsgrades η_i	218
5.5.3	Laufraddurchmesser	218
5.5.4	Antriebsleistung	218
5.5.5	Saugdurchmesser	219
5.5.6	Schaufeleintrittsdurchmesser	219
5.5.7	Laufradeintrittsbreite	220
5.5.8	Schaufeleintrittswinkel	220
5.5.9	Laufradaustritt	222
5.5.10	Entwurf des Meridianschnittes	223
5.5.11	Entwurf der Laufschaufeln	224
5.5.12	Berechnung und Entwurf des Spiralgehäuses	226
5.6	Zahlenbeispiel	228
5.6.1	Berechnung des Laufrades	228
5.6.2	Berechnung des Schaufelkanals	231
5.6.3	Berechnung des Spiralgehäuses	231
5.7	Betriebsverhalten	233
5.7.1	Kennlinien	233
5.7.2	Zusammenspiel von Ventilator und angeschlossener Anlage	236
5.8	Schlußbemerkungen	240

6	Vorausberechnung der Kennlinie von Radial-ventilatoren	243
	K. Klaes	
6.1	Einleitung	243
6.2	Theoretische Grundlagen	243
6.2.1	Eulersche Gerade	244
6.2.2	Berücksichtigung der Minderleistung	245
6.2.3	Berücksichtigung der Reibungsverluste	245
6.2.4	Berücksichtigung der Stoßverluste	246
6.2.5	Berücksichtigung der Spaltverluste	247
6.3	Berechnung und Entwurf des Prüfventilators	248
6.4	Vorausberechnete Kennlinie	250
6.5	Versuchsaufbau	250
6.6	Meßergebnisse	253
6.7	Vergleich zwischen gerechneter und gemessener Kennlinie	256
6.8	Zusammenfassung	258
7	Meßmethoden	259
	W. Bohl	
7.1	Einleitung	259
7.2	Kennlinien von Ventilatoren	260
7.2.1	Normkennlinie	260
7.2.2	Kennlinien geregelter Ventilatoren	266
7.2.3	Einflüsse auf den Kennlinienverlauf	269
7.3	Prüfstände	270
7.3.1	Einführung	270
7.3.2	Prüfstandsarten	271
7.3.3	Einbauarten und Anordnungen	274
7.4	Meßgrößen, Meßverfahren und Meßgeräte	276
7.4.1	Meßgrößen	276
7.4.2	Meßverfahren	277
7.4.3	Meßgeräte	278
7.5	Meßunsicherheiten	278
7.6	Bautoleranzen	282
7.7	Einfluß der saug- und druckseitigen Strömungsverhältnisse auf das Betriebsverhalten	287
7.7.1	Einleitung	287
7.7.2	Rechnerische Abschätzung der saug- und druckseitigen Einbauverluste	288
7.7.3	Gemessene Kennlinien eingebauter Ventilatoren	290

8	Messung und Analyse des Ventilatorgeräusches	292
	D. Reinartz	
8.1	Einleitung	292
8.2	Geräuschmeßprüfstände	292
8.2.1	Kanal-Prüfstand mit saug- und druckseitig reflexionsarm abgeschlossenen Meßkanälen (Rohrdurchmesser 160 bis 315 mm)	292
8.2.1.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	292
8.2.1.2	Überprüfung der Reflexionsfreiheit der Meßleitungen	295
8.2.1.3	Schalldruckpegel-Meßsonden	297
8.2.1.3.1	Experimentelle Ermittlung des akustischen Übertragungsmaßes	299
8.2.1.4	Eigengeräusche des Antriebes	304
8.2.1.5	Vergleich der auf verschiedenen Prüfständen ermittelten aerodynamischen Kennlinien	304
8.2.2	Kanal-Prüfstand für Kleinventilatoren (Rohrdurchmesser 106 mm)	306
8.2.2.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	307
8.2.3	Kanal-Prüfstand mit druckseitig reflexionsarm abgeschlossenem Meßkanal (Rohrdurchmesser 400 mm)	309
8.2.3.1	Versuchsanordnung	311
8.2.3.2	Vergleich der auf drei verschiedenen Prüfständen ermittelten aerodynamischen Kennlinien eines Ventilators	312
8.3	Auswertung, Darstellung und Vorausberechnung des Ventilatorgeräusches	314
8.3.1	Theoretische Grundlagen	314
8.3.2	Dimensionsloses aero-akustisches Kennfeld des Ventilators	319
8.3.3	Spezifische Schallkenngrößen	320
8.3.4	Einfluß der Konstruktion und der Einbausituation des Ventilators auf sein Geräuschverhalten	321
8.3.4.1	Beschreibung der durchgeführten Versuche	321
8.3.4.2	V Versuchsergebnisse	321
8.3.5	Auswertungsbeispiel	328
8.3.5.1	Hauptbemessungsgrößen bzw. optimale Förderdaten des Ventilators	328
8.3.5.2	Rauschanalyse	329
8.3.5.3	Drehklanganalyse	332

9	Förderung abrasiver Fluide	335
	H.-R. Hupe	
9.1	Einleitung	335
9.2	Verschleiß und Verschleißparameter	339
9.2.1	Terminologie: Verschleiß- und Verschleißsystem	339
9.2.2	Verschleißpaarungen und Gleitstrahlverschleiß	341
9.2.3	Prall-Schrägstrahl- und Stoßverschleiß	343
9.3	Verschleißbeständige Werkstoffe	345
9.3.1	Zweikomponenten-Verbundstahlbleche	345
9.3.2	Das Verfahren der Auftragsschweißung	346
9.3.3	Hartstoffe und Sinterhartmetalle	347
9.3.4	Gesinterte Hartkeramik	348
9.4	Verschleißschutzmaßnahmen an Industrie-Ventilatoren	348
9.4.1	Kritische Verschleißzonen an Ventilatorgehäusen und korrespondierende Verschleißschutzmaßnahmen	348
9.4.2	Verschleißzonen am Ventilatorflügelrad	350
9.4.3	Verschleißschutz an Ventilatorflügelrädern	352
9.5	Zusammenfassung	358
10	Betriebsverhalten von Radialventilatoren bei der Förderung feststoffbeladener Fluide	359
	J. Fricke	
10.1	Einleitung	359
10.2	Experimentelle Untersuchungen	360
10.3	Untersuchungsergebnisse	361
10.4	Ansätze für eine Berechnung	363
10.5	Zusammenfassung	371
11	Kleinventilatoren	372
	S. Harmsen	
11.1	Klassifizierung und Besonderheiten	372
11.2	Einordnung und Stand der Technik	374
11.2.1	Optimalwerte	374
11.2.2	Bauvolumen	377
11.2.3	Geräuschpegel	379
11.3	Auswahl-Verfahren	383
11.3.1	Vorauswahl nach Kennzahlen	383
11.3.2	Auswahl nach Herstellerunterlagen	384

11.4	Einsatz von Ventilatoren zur Kühlung elektrischer Geräte	384
11.4.1	Wärmestrom und Temperaturverhältnisse	384
11.4.2	Druckverluste und Geräuschzunahme	390
11.4.3	Geräuschreduzierung durch Drehzahlenskung	395
11.5	Zusammenfassung	397
12	Großventilatoren	398
	H. Ufer	
12.1	Was sind Großventilatoren?	398
12.2	Anforderungen an Großventilatoren	402
12.2.1	Aerodynamisch	405
12.2.2	Geräuschtechnisch	405
12.2.3	Thermisch-mechanisch	409
12.3	Auslegung von Großventilatoren mittels Modellen	413
12.3.1	Kennlinie und Leistungsdaten	413
12.3.2	Schalltechnische Werte	420
12.3.3	Mechanische Eigenschaften	426
12.4	Bau-, Konstruktions- und Antriebsarten	428
12.5	Besonderheiten einzelner Baugruppen	431
12.5.1	Lauftrad	431
12.5.2	Welle und Lagerung	433
12.5.3	Gehäuse, Lager- und Motorbock	436
13	Anlagenspezifische Fragen bei Ventilatoren in Parallel- und Reihenschaltung	442
	H.-U. Banzhaf	
13.1	Einleitung	442
13.2	Ventilatoren in Parallelschaltung	442
13.2.1	Anlagenschema	442
13.2.2	Kennfeld	444
13.2.3	Regelung	445
13.2.3.1	Axialventilatoren mit Laufradschaufelregelung	446
13.2.3.2	Ventilatoren mit Drallregelung	446
13.2.3.3	Ventilatoren mit Drehzahlregelung	448
13.2.4	Überwachung der Ventilatorgrenzen	449
13.2.5	Anfahren von Ventilatoren in Parallelschaltung	450
13.2.5.1	Axialventilatoren mit Laufradschaufelregelung	451
13.2.5.2	Ventilatoren mit Drallregelung	451
13.2.5.3	Ventilatoren mit Drehzahlregelung	453
13.2.6	Störfälle	454
13.3	Ventilatoren in Reihenschaltung	456

13.3.1	Anlagenschema	456
13.3.2	Regelung und Kennfeld	459
13.3.3	Störfälle	460
13.3.3.1	Schilderung eines Störfalles	461
13.3.4	Entkopplung des Ventilatorsystems	464
13.3.4.1	Offener Bypass	465
13.3.4.2	Geschlossener Bypass	465
13.3.4.3	Anlagen ohne Bypass	466
13.3.5	Konsequenzen für die Anlagenplanung	466
13.3.6	Anfahren von Ventilatoren in Reihenschaltung	467
13.4	Zusammenfassung	468
13.5	Bezeichnungen	469
 Literaturverzeichnis		 470
 Sachregister		 478
 Autorenverzeichnis		 481