

**Leonhard Bommers / Jürgen Fricke / Reinhard Grundmann  
(Hrsg.)**

# **Ventilatoren**

**2. Auflage**

**VULKAN-VERLAG ESSEN**

# Inhalt

Vorwort zur 2. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VI
Autorenverzeichnis	IX

## 1 Strömungstechnische, thermodynamische und aeroakustische Grundlagen

L. Bommers

1.1	Einleitung	1
1.2	Anwendung des Energiesatzes auf Ventilatoren mit und ohne Berücksichtigung des Anlagensystems	2
1.2.1	Energiebilanz	2
1.3	Ventilatorbetriebsgrößen	8
1.3.1	Volumenstrom	8
1.3.2	Gesamtdruckerhöhung	8
1.3.2.1	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus den Daten und Abmessungen des Anlagensystems für $e = 0$	9
1.3.2.2	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus dem Energieumsatz im Laufrad	10
1.3.2.3	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus den Meßwerten am Ventilator ...	15
1.3.3	Leistungen, Verluste und Wirkungsgrade	19
1.4	Ähnlichkeitsgesetze	22
1.4.1	Einführung	22
1.4.2	Ableitung von Modellgesetzen	24
1.4.2.1	Das Froudesche Modellgesetz	24
1.4.2.2	Das Reynoldssche Modellgesetz	25
1.4.2.3	Das Cauchysche Modellgesetz	26
1.4.2.4	Das Machsche Modellgesetz	27
1.4.2.5	Das Strouhalsche Modellgesetz	27
1.4.3	Dimensionsanalyse	28
1.4.3.1	Anwendung auf Ventilatoren	29
1.4.4	Aerodynamische Modellgesetze	34
1.4.5	Aeroakustische Modellgesetze	40
1.4.5.1	Berechnungsgrundlagen	43
1.4.5.2	Geräuschkennlinien	52
1.4.5.3	Emissions-Kenngrößen	57
1.4.5.4	Geräuschspektrum	58
1.4.5.5	Aeroakustisches Kennfeld eines Radialventilators	60
1.4.5.6	Ausgewählte Drehklang- und Rauschkennlinien	61
1.4.5.7	Abschätzung des Ventilatorgeräusches	66
1.5	Spezielle Formelzeichen	74

## 2 Radialventilatoren

T. Gikadi, R. Grundmann, W. Kamphausen, M. Nedeljkovic, Z. Protic, J. Sentek, K. Szarska

2.1	Einleitung	77
2.1.1	Vorbemerkung	77
2.1.2	Das radiale Strömungsfeld	80
2.2	Berechnungsgrundlagen	81
2.2.1	Hauptgleichungen und Laufradkinematik	81
2.2.2	Minderleistung	86
2.2.3	Druckzahl und Reaktionsgrad	95
2.2.4	Verluste	98
2.2.5	Kennlinie und stoßfreier Eintritt	100
2.3	Laufraddimensionierung	105
2.3.1	Typbestimmung	105
2.3.2	Laufradgeometrie	107
2.4	Spiralgehäuse	117
2.5	Trommelläufer/Querstromventilator	121
2.6	Regelungsmöglichkeiten	123
2.6.1	Drosselregelung	123
2.6.2	Drehzahlregelung	124
2.6.3	Drallregler	125
2.7	Auslegungsbeispiel	125
2.8	Weitere Berechnungsverfahren	131
2.8.1	Polynomisches Auslegungsverfahren	131
2.8.2	Auslegungsverfahren auf empirischer Grundlage	136
2.9	Optimierte Saugkästen	144
2.9.1	Einleitung	144
2.9.2	Einfluß des Saugkastens auf das Betriebsverhalten	145
2.9.3	Experimentelle Untersuchungen mit einem variablen Saugkasten	146
2.9.4	Ermittlung des Druckverlustes am Saugkasten	148
2.9.5	Versuchsergebnisse	149
2.9.6	Zusammenfassung	153
2.10	Spezielle Formelzeichen	153

## 3 Axialventilatoren

S. Baumgarten, J. Friedrichs, G. Kosyna, H. Krasmann, M. Rohdenburg, H. Rohkamm

3.1	Einleitung	157
3.2	Axialventilatoren und ihre Anwendung	157
3.3	Grundlagen für den Entwurf	159
3.3.1	Entwurfskriterien	159
3.3.2	Belastungskriterien	160
3.4	Entwurf	161
3.4.1	Bestimmung der Strömungsgrößen	161
3.4.2	Entwurfsverfahren	162
3.5	Entwurf hochbelasteter Axialventilatoren	163
3.5.1	Definition des Begriffs „hochbelastet“	163
3.5.2	Auslegungssystematik nach Lieblein	163
3.5.3	Entwicklung eines treffsicheren Entwurfsverfahrens	173
3.5.3.1	Entwurfsvorgaben	174
3.5.3.2	Korrekte Vorherbestimmung der spezifischen Schaufelarbeit	175

## XIV

3.5.3.3	Berechnung der Axialgeschwindigkeitsverteilung	175
3.5.4	Verlustkorrelationen, Einfluß der Naben- und Gehäusegrenzschichten, Spalteinflüsse	177
3.5.4.1	Verluste im Laufrad	178
3.5.4.2	Verluste im Leitrad	181
3.5.4.3	Innerer Wirkungsgrad der Gesamtstufe	182
3.5.4.4	Spalteinflüsse	182
3.5.5	Belastungsgrenzen	183
3.5.6	Variation der Drallverteilung	185
3.5.7	Besonderheiten des Leitradentwurfs	186
3.6	Betriebsverhalten unter dem Einfluß von Zuströmstörungen	193
3.7	Zusammenfassung und Ausblick	204
3.8	Spezielle Formelzeichen	208

## 4 Großventilatoren

Chr. Pohl

4.1	Was sind Großventilatoren?	213
4.2	Anforderungen an Großventilatoren	213
4.2.1	Aerodynamisch	215
4.2.2	Geräuschtechnisch	215
4.2.3	Thermisch-mechanisch	219
4.3	Auslegung von Großventilatoren mittels Modellen	221
4.3.1	Kennlinie und Leistungsdaten	221
4.3.2	Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze	223
4.3.3	Einfluß der Reynoldszahl	224
4.3.4	Schalltechnische Werte	225
4.3.5	Mechanische Eigenschaften	229
4.4	Bau-, Konstruktions- und Antriebsarten	230
4.5	Besonderheiten einzelner Baugruppen	234
4.5.1	Laufrad	234
4.5.2	Welle und Lagerung	234
4.5.3	Gehäuse, Lager- und Motorbock	237
4.6	Spezielle Formelzeichen	240

## 5 Kleinventilatoren

S. Harmsen

5.1	Einleitung	243
5.2	Anwendungsgebiete und Ausführungsformen	243
5.3	Technische Kennwerte und Vergleich mit größeren Ventilatoren	245
5.3.1	Optimalwerte	245
5.3.2	Bauvolumen	246
5.4	Leistungsverhalten und Prüfstände	247
5.5	Geräuschverhalten und -meßverfahren	250
5.5.1	Akustische Kennlinie	252
5.5.2	Tonhaltigkeit	253
5.6	Elektrische Antriebe und Funktionsüberwachung	253
5.7	Intelligente Kühlung mit PAPST VARIOFAN	254
5.8	Zuverlässigkeit und elektrische Sicherheit	255

## 6 Feststoffförderung

J. Fricke, R. Hupe, A. Neumann

6.1	Förderung von feststoffbeladener Luft	257
6.1.1	Einleitung	257
6.1.2	Besonderheiten der Feststoffförderung – Einfluß auf die Konstruktion	257
6.1.3	Grenzfälle der Zweiphasenströmung	258
6.1.4	Experimentelle Untersuchungen	259
6.1.4.1	Untersuchungen an Radialventilatoren	259
6.1.4.2	Untersuchungen an Axialventilatoren	260
6.1.4.3	Ermittlung der dargestellten Größen aus den Meßgrößen	263
6.1.5	Einfluß der Feststoffbeladung auf die Kennlinien von Radialventilatoren	265
6.1.6	Einfluß der Feststoffbeladung auf die Kennlinien von Axialventilatoren	266
6.1.7	Ansätze zur Berechnung der Gemischkennlinien aus den Reinluftkennlinien ...	268
6.1.7.1	Radialventilatoren	268
6.1.7.2	Axialventilatoren	269
6.1.8	Zusammenfassung	272
6.2	Verschleiß und Verschleißschutz	273
6.2.1	Einleitung	273
6.2.2	Verschleiß und Verschleißparameter	276
6.2.2.1	Terminologie: Verschleiß- und Verschleißsystem	276
6.2.2.2	Gleitstrahlverschleiß	277
6.2.2.3	Prallstrahl- bzw. Abrasivstoß-Verschleiß	278
6.2.3	Verschleißbeständige Werkstoffe	279
6.2.3.1	Zweikomponenten-Verbundstahlbleche	279
6.2.3.2	Das Verfahren der Auftragschweißung	280
6.2.3.3	Hartstoffe und Sinterhartmetalle	280
6.2.3.4	Gesinterte Hartkeramik	281
6.2.4	Verschleißschutzmaßnahmen an Industrie-Ventilatoren	281
6.2.4.1	Kritische Verschleißzonen an Ventilatorgehäusen und korrespondierende Verschleißschutzmaßnahmen	281
6.2.4.2	Verschleißzonen am Ventilatorflügelrad	283
6.2.4.3	Verschleißschutz an Ventilatorflügelrädern	284
6.2.5	Zusammenfassung	288
6.3	Spezielle Formelzeichen	288

## 7 Explosionsschutz

H. Witt

7.1	Einleitung	291
7.2	Literaturübersicht	292
7.3	Die Physik des Zündungsvorganges bei Reib- und Schlagfunken	292
7.4	Zündungszeitverlauf	294
7.5	Zündenergien	295
7.6	Zündfunken	296
7.7	Zündwilligkeit von Gasen und Stäuben	297
7.8	Temperatureinflüsse	298
7.9	Versuchsresultate	300
7.10	Zusammenfassung der LABOR-Versuchsresultate	308
7.11	Betriebserfahrungen	309
7.12	Zoneneinteilung und Vorschriften	310

7.13	Ventilatornorm	311
7.14	Schlußwort	314

## 8 Lärmstehung und Lärminderung

P. Koitzsch, W. Neise

8.1	Grundlagen der Schallentstehung und Lärminderungsmaßnahmen	323
8.1.1	Einleitung	323
8.1.2	Mechanismen der aerodynamischen Geräuschenstehung bei Ventilatoren ...	323
8.1.2.1	Aeroakustische Theorie	323
8.1.2.2	Entstehungsmechanismen stationärer und instationärer Schaufelkräfte	326
8.1.2.2.1	Stationäre Schaufelkräfte	326
8.1.2.2.2	Instationäre Schaufelkräfte	327
8.1.2.2.2.1	Laufblad in ungleichförmiger stationärer Strömung	327
8.1.2.2.2.2	Laufblad in instationärer Strömung	328
8.1.2.2.2.3	Druckschwankungen in der turbulenten Schaufelgrenzschicht	329
8.1.2.2.2.4	Geräusche durch Wirbelablösung	329
8.1.2.2.2.5	Rotierende Ablösung	329
8.1.2.2.2.6	Geräuscherzeugung durch Wirbel an den Schaufelspitzen	330
8.1.2.2.2.7	Schallerzeugung durch Strömungsablösungen	332
8.1.2.2.2.8	Ungleichmäßige Schaufelteilung	332
8.1.2.3	Schallerzeugung durch instationäre Kräfte auf feststehende Teile des Ventilators	333
8.1.2.4	Entstehung rotierender Kraftfelder durch die Wechselwirkung von Laufblad und Leitrad	334
8.1.2.5	Unterschiede zwischen der Schallabstrahlung ins Freie und in einen abgeschlossenen Kanal	335
8.1.2.6	Theoretische Verfahren zur Bestimmung des Lärms von Ventilatoren	336
8.1.3	Geräuschminderungsmaßnahmen bei Ventilatoren	336
8.1.3.1	Allgemeines	336
8.1.3.2	Konstruktive Geräuschminderungsmaßnahmen für Axialventilatoren	337
8.1.3.3	Konstruktive Geräuschminderung bei Radialventilatoren	343
8.1.3.4	Geräuschminderung durch optimalen Einbau und Betrieb des Ventilators	349
8.1.3.4.1	Anpassung von Ventilator und Anlage	349
8.1.3.4.2	Einfluß der Zuströmbedingungen auf das Ventilatorgeräusch	350
8.1.3.4.3	Ventilatorgeräusch bei unterschiedlicher Volumenstromregulierung	351
8.1.4	Zusammenfassung	351
8.2	Berechnung des Wirbellärms von Axialventilatoren	352
8.2.1	Einleitung	352
8.2.2	Prinzip des Berechnungsverfahrens, akustische Modelle	353
8.2.3	Schallerzeugungsmechanismus: Turbulente Zuströmung zur Schaufel	355
8.2.4	Schallerzeugungsmechanismus: Turbulente Grenzschicht auf der Schaufeloberfläche	356
8.2.5	Schallerzeugungsmechanismus: Nachlaufströmung hinter der Schaufel	357
8.2.6	Spektrale Energiedichte der Zuströmturbulenz	358
8.2.7	Spektrale Leistungsdichte der turbulenten Druckschwankungen auf der Schaufeloberfläche	360
8.2.8	Betrachtungen zur Frequenzabhängigkeit der Spektraldichte von Schallleistung, Anströmturbulenz, Wanddruckschwankungen und Auftriebskräften	363
8.2.9	Beispielrechnungen zum Wirbellärm von Axialventilatoren, Vergleich mit den Meßwerten	364

8.2.10	Zusammenfassung, Katalog für weitere Aufgaben	366
8.3	Spezielle Formelzeichen	368

## 9 Prüfstandsmessung

P. K. Baade, T. Gikadi, D. Reinartz

9.1	Problematik der experimentellen Ermittlung von Leistungsdaten	379
9.1.1	Einführung	379
9.1.2	Normkennlinien	379
9.1.3	Normprüfstände	380
9.1.4	Messung der Kennlinien	390
9.1.4.1	Meßgrößen	390
9.1.4.2	Meßunsicherheiten	392
9.1.4.3	Bemerkungen zur Bestimmung der Ventilator Kennlinien	393
9.1.4.4	Einfluß der saug- und druckseitigen Strömungsverhältnisse auf das Betriebsverhalten	400
9.1.5	Berechnung der Betriebsdaten von Ventilatoren anhand der Meßdaten von Modellaufködern	401
9.1.6	Wirkungsgrad und Einfluß der Reynoldszahl	403
9.2	Schalleistungsbestimmung bei Ventilatoren	406
9.2.1	Einleitung	406
9.2.2	Akustische Grundbegriffe	407
9.2.2.1	Schalldruck / Schalldruckpegel / Schallschnelle	407
9.2.2.2	Schalleistung / Schalleistungspegel	408
9.2.2.3	Schallintensität / Schallintensitätspegel	409
9.2.3	Geräuschmeßverfahren – Regelwerke – Richtlinien	410
9.2.3.1	Schalleistungsberechnung mittels Schalldruckpegelmessungen	410
9.2.3.1.1	Hallraum-Verfahren	410
9.2.3.1.2	Hüllflächen-Verfahren	412
9.2.3.1.3	Kanal-Verfahren	414
9.2.3.1.4	Vergleich der genormten Geräuschmeßverfahren	417
9.2.3.2	Schalleistungsberechnung anhand von Schallintensitätsmessungen	417
9.2.4	Geräuschmeßverfahren – nicht genormt	419
9.2.4.1	Einleitung	419
9.2.4.2	Frequenzgang der Hubert-Sonde	422
9.2.4.3	Experimentelle Ermittlung des akustischen Übertragungsmaßes	424
9.2.4.4	Typische Anwendungen der Hubertsonde	427
9.2.5	Ventilatorgeräusche	429
9.2.5.1	DIN 45 635 Teil 38	429
9.2.5.2	VDI 3731 Blatt 2	431
9.2.5.3	VDI 2081 Blatt 1	432
9.3	Spezielle Formelzeichen	432

## 10 Betriebsverhalten

H.-U. Banzhaf, J. Boke, T. Carolus, Th. Gikadi, W. Kamphausen, D. Reinartz

10.1	Ventilatoren und Anlage	437
10.1.1	Berechnung von Anlagendruckverlusten	437
10.1.1.1	Grundlagen	437
10.1.1.2	Anlagenkennlinien	438

10.1.1.3	Ermittlung von Verlustbeiwerten	439
10.1.1.4	Berechnungsbeispiel	441
10.1.2	Ventilatoren in Parallelschaltung	443
10.1.2.1	Einleitung	443
10.1.2.2	Anlagenschema in Parallelschaltung	444
10.1.2.3	Anlagenkennlinie im Ventilator Kennfeld	445
10.1.2.4	Regelung der Ventilatoren	447
10.1.2.4.1	Axialventilatoren mit Laufradschaufelregelung	447
10.1.2.4.2	Ventilatoren mit Drallregelung	447
10.1.2.4.3	Ventilatoren mit Drehzahlregelung	448
10.1.2.5	Überwachung der Ventilatorgrenzen	449
10.1.2.6	Anfahren von Ventilatoren in Parallelschaltung	450
10.1.2.6.1	Axialventilatoren mit Laufradschaufelregelung	450
10.1.2.6.2	Ventilatoren mit Drallregelung	451
10.1.2.6.3	Ventilatoren mit Drehzahlregelung	451
10.1.2.7	Störfälle	452
10.1.3	Ventilatoren in Reihenschaltung	453
10.1.3.1	Einleitung	453
10.1.3.2	Anlagenschema in Reihenschaltung	454
10.1.3.3	Regelung und Kennfeld der Ventilatoren	456
10.1.3.4	Störfälle	457
10.1.3.5	Schilderung eines Störfalles	457
10.1.3.6	Entkoppelung des Ventilatorsystems	459
10.1.3.6.1	Offener Bypass	459
10.1.3.6.2	Geschlossener Bypass	460
10.1.3.6.3	Anlagen ohne Bypass	460
10.1.3.7	Konsequenzen für die Anlagenplanung	460
10.1.3.8	Anfahren von Ventilatoren in Reihenschaltung	461
10.1.4	Instationäres Betriebsverhalten	461
10.1.4.1	Dynamische Eigenschaften typischer Komponenten lufttechnischer Anlagen und ihre Modellierung	462
10.1.4.2	Beispiel: Druckstoß	465
10.1.4.3	Schwingungen in lufttechnischen Anlagen	466
10.1.4.3.1	Klassifikation von Schwingungen	467
10.1.4.3.2	Beispiele selbsterregter Schwingungen	468
10.1.4.3.3	Andere Schwingungsphänomene	473
10.1.4.3.3.1	Beispiele fremderregter Schwingungen	473
10.1.4.3.3.2	Reglerbedingte Schwingungen	476
10.2	Axialschub bei Radialventilatoren	477
10.2.1	Einleitung	477
10.2.2	Versuchsstand	482
10.2.3	Meßergebnisse und Diskussion	484
10.3	Einfluß von Einlaufstörungen bei Radialventilatoren	488
10.3.1	Einleitung	488
10.3.2	Theoretische Grundlagen	489
10.3.3	Versuchsergebnisse	490
10.3.3.1	Zuströmstörung durch ein Rohr-Knie	490
10.3.3.2	Einfluß des Radeinlaufs auf das Ventilatorgeräusch	494
10.3.3.3	Saugkasten mit Regelklappen	497
10.3.3.4	Regelung mittels Drallregler	498
10.3.4	Zusammenfassung	500
10.4	Formelzeichen	501

# 11 Festigkeits- und Schwingungsanalyse

Chr. Pohl, P. Sälzle, M. Staiger, K.-P. Zwiener

11.1	Festigkeitsberechnungen an Laufrädern von Radialventilatoren	505
11.1.1	Einleitung	505
11.1.2	Fliehkraftwirkung an den Bauelementen eines Radiallaufrades	505
11.1.3	Vereinfachte Spannungsberechnung an den Laufradelementen	506
11.1.3.1	Biegebeanspruchung der Schaufeln	507
11.1.3.2	Durchbiegung der Schaufeln	512
11.1.3.3	Boden- und Deckscheibe	513
11.1.3.4	Einfluß der Schaufelmasse auf die Boden- und Deckscheibenbelastung	514
11.1.4	Spannungsanalyse mit Dehnungsmeßstreifen	515
11.1.4.1	Der Schleuderprüfstand	515
11.1.4.2	Spannungsermittlung	516
11.1.4.3	Untersuchte Laufräder	516
11.1.4.4	Versuchsergebnisse	519
11.1.5	FEM-Analyse	522
11.1.5.1	Untersuchte Laufräder	522
11.1.5.2	Vernetzung des 3D-Modells	522
11.1.5.3	Festlegung der Koordinaten	523
11.1.5.4	Untersuchter Bereich	523
11.1.5.5	Untersuchung der Biegebeanspruchung an der Schaufelaustrittskante	525
11.1.5.5.1	Vergleich der Biegespannung	525
11.1.5.5.2	Ermittlung der Schaufeldurchbiegung	527
11.1.5.5.3	Einfluß der Deckscheibendicke	529
11.1.6	Zusammenfassung und Ausblick	530
11.2	Schwingungsverhalten von Radialventilatorlaufrädern	530
11.2.1	Einleitung	530
11.2.2	Grundlagen	531
11.2.2.1	Eigenschwingungen	531
11.2.2.2	Schwingungserregungsursachen	535
11.2.2.3	Resonanzbedingungen	536
11.2.3	Untersuchte Laufräder	536
11.2.4	Untersuchungen mit FEM	537
11.2.4.1	FE-Modelle	538
11.2.4.2	Eigenschwingungen	539
11.2.4.3	Variationen geometrischer Parameter	544
11.2.4.3.1	Variation der Materialdicken	544
11.2.4.3.2	Variation der Schaufelzahl	545
11.2.4.4	Verstimmungsmaßnahmen	546
11.2.5	Experimentelle Untersuchungen	547
11.2.5.1	Standuntersuchungen	547
11.2.5.2	Betriebsschwingungsuntersuchungen	552
11.2.6	Zusammenfassung	556
11.3	Schwingungsverhalten der Laufradschaufeln von Axialventilatoren	556
11.3.1	Eigenschwingungsverhalten von Axialventilatoren	557
11.3.1.1	Eigenschwingungsverhalten der Einzelschaufel	558
11.3.1.2	Eigenschwingungsverhalten der beschauften Scheibe	560
11.3.2	Ursachen der Laufschaufelanregung und daraus resultierende Erregerordnungen	562
11.3.3	Resonanzbedingungen	564
11.3.4	Schwingungsverhalten der Laufradschaufeln, ermittelt an einem Modellventilator	569

11.3.5	Dynamische Schaufelbeanspruchung bei gestörter Zuströmung zum Laufrad	571
11.3.6	Zusammenfassung	573
11.4	Schwingungsanregung der Laufradschaufeln von Axialventilatoren durch periodisch schwankende Luftkräfte	573
11.4.1	Alternierende Luftkräfte an den Laufradschaufeln aufgrund von Zuströmstörungen	574
11.4.1.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen am Modellaxialventilator ...	575
11.4.1.2	Strömungsfelder an Laufradeintritt bzw.-austritt	576
11.4.1.3	Periodisch alternierende Anströmung an den Laufschaufeln	577
11.4.1.4	Instationäre Profildruckantwort auf der Laufschaufeloberfläche	579
11.4.2	Rechenansatz zur Abschätzung der instationären Schaufelkraft aus Projektierungsdaten	579
11.4.2.1	Ermittlung der aerodynamischen Erregerfunktion	579
11.4.2.2	Ermittlung der instationären Profilauftriebskraft aus der aerodynamischen Erregerfunktion	587
11.4.3	Bewertung der Ergebnisse der rechnerischen Abschätzung der Luftkraftschwankungen an den Laufradschaufeln	589
11.4.3.1	Wiedergabe der Erregerfunktionen	589
11.4.3.2	Wiedergabe der instationären Auftriebskraft	590
11.4.4	Zusammenfassung	594
11.5	Spezielle Formelzeichen	594
12	Allgemeine Formelzeichen und Kenngrößen	599
12.1	Formelzeichen	599
12.2	Dimensionslose Kenngrößen	600

## **Stichwortverzeichnis** **601**

### **Marktspiegel Ventilatoren**

Alphabetisches Firmenverzeichnis	607
Firmenverzeichnis	612
Inserentenverzeichnis	614