

Inhalt

1. Grundlagen

Strömungstechnische, thermodynamische und aeroakustische Grundlagen

L. Bommes

1.	Einleitung	2
2.	Anwendung des Energiesatzes auf Ventilatoren mit und ohne Berücksichtigung des Anlagensystems	3
2.1	Energiebilanz	3
3.	Ventilatorbetriebsgrößen	9
3.1	Volumenstrom	9
3.2	Gesamtdruckerhöhung	9
3.2.1	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus den Daten und Abmessung des Anlagensystems für $e = 0$	9
3.2.2	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus dem Energieumsatz im Laufrad	11
3.2.3	Berechnung der Gesamtdruckerhöhung aus den Meßwerten am Ventilator	15
3.3	Leistungen, Verluste und Wirkungsgrade	19
4.	Ähnlichkeitsgesetze	22
4.1	Einführung	22
4.2	Ableitung von Modellgesetzen	23
4.2.1	Das Froudesche Modellgesetz	23
4.2.2	Das Reynoldssche Modellgesetz	24
4.2.3	Das Cauchysche Modellgesetz	25
4.2.4	Das Machsche Modellgesetz	26
4.2.5	Das Strouhalsche Modellgesetz	26
4.3	Dimensionsanalyse	27
4.3.1	Anwendung auf Ventilatoren	28
4.4	Aerodynamische Modellgesetze	32
4.5	Aeroakustische Modellgesetze	38
4.5.1	Berechnungsgrundlagen	41
4.5.2	Geräuschkennlinien	50
4.5.3	Emissions-Kenngrößen	53
4.5.4	Geräuschspektrum	56
4.5.5	Aeroakustisches Kennfeld eines Radialventilators	58
4.5.6	Ausgewählte Drehklang- und Rauschkennlinien	60
4.5.7	Abschätzung des Ventilatorgeräusches	65

2. Berechnung und Entwurf von Ventilatoren

Axialventilatoren

W. Bohl

1.	Einleitung	72
2.	Berechnung des axialen Laufrads	75
2.1	Berechnung des Laufradaußendurchmessers D_a	75
2.1.1	Abschätzung des Nabendurchmessers D_i	77
2.1.2	Wahl der Spaltweite s	78
2.1.3	Wahl der Schaufelzahl	79
2.1.4	Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten und Winkel	79
2.2	Festlegung der Schaufelform	83
2.2.1	Allgemeines	83
2.2.2	Dimensionierung der Kreisbogenschaufel	84
2.3	Leiträder	89
2.3.1	Nachleiträder	89
2.3.2	Vorleiträder	90
2.4	Diffusoren	91
2.4.1	Einleitung	91
2.4.2	Druckumsetzung im Diffusor	91
2.4.3	Kreisringdiffusoren	92
2.5	Festigkeitsberechnung des axialen Laufrads	96
2.5.1	Fliehkraftbeanspruchung der Schaufeln	96
2.5.2	Biegeeigenfrequenz der starr eingespannten Schaufel	98
2.5.3	Die Torsionseigenfrequenz der starr eingespannten Schaufel	99
2.5.4	Berechnung und Gestaltung der Nabe	100
2.6	Kennfelder von Axialventilatoren	103
2.7	Zusammenfassung der Hauptbemessungsgleichungen	103

Radialventilatoren

Berechnung – Entwurf – Optimierung – Betriebsverhalten

K. Klaes

1.	Einleitung	108
2.	Problematik der Minderleistung	112
3.	Berechnungsgrundlagen	115
3.1	Laufrad mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln	115
3.2	Spiralgehäuse	119
3.3	Vorausberechnung der Drosselkennlinie	121
3.3.1	Bestimmung der Eulerschen Geraden	121
3.3.2	Berücksichtigung der Minderleistung	122
3.3.3	Berücksichtigung der Reibungsverluste	123
3.3.4	Berücksichtigung der Stoßverluste	124
3.3.5	Berücksichtigung der Spaltverluste	126
3.4	Vergleich der vorausberechneten und gemessenen Kennlinien	127
3.5	Volumenstromregelung	129
3.5.1	Drehzahlregelung	130
3.5.2	Drallregler	131
4.	Zusammenfassung	133

Die Gestaltung von Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln

J. Sentek und K. Szarska

Einleitung	135
Beschreibung der untersuchten Ventilatoren	135
Wirkungsgrade des Ventilators	136
Maximalwirkungsgrad	139
Minderleistungszahl	139
Dimensionslose Kennzahlen	140
Andere Konstruktionen von Hochleistungsventilatoren	141
Zusammenfassung	141
Formelzeichen	142

Fliehkraftbeanspruchung radialer Ventilatorräder

H. Ufer

1. Einleitung	144
2. Fliehkraftwirkung an den Bauelementen eines Radiallaufrades mit rückwärts gekrümmten Schaufeln	144
3. Vereinfachte Spannungsberechnung an den Laufradelementen	146
3.1 Boden- und Deckscheibe	146
3.2 Bodenscheiben und Nabenverbindung	147
3.3 Einfluß der Schaufelmasse auf die Boden- und Deckscheibenbelastung	150
3.4 Biegebeanspruchung der Schaufeln	151
4. Spannungsmessungen an Laufräder und Laufradelementen mittels Dehnungsmeßstreifen	155
4.1 Der Schleuderprüfstand	155
4.2 Ermittlung der Spannungen	156
4.3 Untersuchte Scheiben und Laufräder	157

3. Prüfstandsmessungen

Die Problematik der experimentellen Ermittlung von Leistungsdaten bei Ventilatoren

T. Gikadi

1. Einführung	174
2. Normkennlinien von Ventilatoren	174
3. Normprüfstände	177
3.1 Einbauarten und Anordnungen	186
4. Messung der Kennlinien	186
4.1 Meßgrößen	186
4.2 Meßunsicherheiten	189
4.3 Einige Bemerkungen zur Bestimmung von Ventilator Kennlinien	189
4.4 Einfluß der saug- und druckseitigen Strömungsverhältnisse auf das Betriebsverhalten	196
5. Berechnung von Betriebsdaten von Ventilatoren anhand der Meßdaten von Modellaufrädern	196
5.1 Wirkungsgrad und Einfluß der Reynoldszahl	199
6. Nachwort	202

Meßverfahren zur Schalleistungsbestimmung bei Ventilatoren

W. Neise

1.	Einleitung	204
2.	Hallraum-Verfahren	205
2.1	Vergleichsmessung mit Referenzschallquelle	205
2.2	Direkte Schalleistungsbestimmung in speziellem Meßraum	206
3.	Hüllflächen-Verfahren	207
4.	Kanal-Verfahren	209
5.	Schalleistungsmessungen an Ventilatoren	212
5.1	DIN 45 635 Teil 38	212
5.2	ISO/TC 117/WG 2	214
6.	Experimenteller Vergleich genormter Geräuschmeßverfahren für Ventilatoren	214
7.	Zusammenfassung	219

PC gestützte Erfassung aerodynamischer und akustischer Ventilator Kennwerte

F. Jurisch

1.	Einleitung	222
2.	Druckseitiger Kanalprüfstand	222
2.1	Allgemeiner Aufbau	222
2.2	Der reflexionsarme Abschluß	223
2.3	Die Hubert-Sonde	223
3.	Realisierung der Meßwerterfassung und der Auswertung	225
3.1	Meßwerterfassung	225
3.2	Software	226
3.3	Aerodynamische Meßdaten	226
3.4	Akustische Meßdaten	228
3.4.1	Theoretische Grundlagen	228
3.4.2	Rauschanalyse	229
3.4.3	Drehklanganalyse	232

4. Betriebsverhalten, Anwendungen, Vorschriften

Auswirkungen von Störungen in der Zuströmung auf das Betriebsverhalten aerodynamisch hochbelasteter Axialventilatoren

G. Kosyna und H. Krasmann

1.	Einleitung	236
2.	Aerodynamisch hochbelastete Ventilatorbeschaufelungen	236
3.	Störungen der Ventilatorzuströmung	236
4.	Aufbau und Durchführung der Versuche	237
4.1	Rotationssymmetrische Störungen	239
4.2	Nichtrotationssymmetrische Störungen	240
4.3	Versuchsauswertung	241
5.	Ergebnisse	243
5.1	Rotationssymmetrische Störungen	243
5.2	Nichtrotationssymmetrische Störungen	248
6.	Zusammenfassung	254

Einfluß der Zuströmung auf das aeroakustische Betriebsverhalten von Radialventilatoren mit unterschiedlicher Laufradform

D. Reinartz

1.	Einleitung	256
2.	Theoretische Grundlagen	256
3.	Versuchsergebnisse	258
3.1	Zuströmstörung durch ein Rohr-Knie	258
3.2	Einfluß des Radeinlaufs auf das Ventilatorgeräusch	263
3.3	Vorbau eines Saugkastens mit Regelklappen	266
3.4	Regelung mittels Drallregler	267
3.5	Trommelläufer mit Drallregler	273
3.6	Zusammenfassung	274

Einfluß der Rauigkeit der Schaufeln auf das Betriebsverhalten von Axialventilatoren

Ch. Schroeder

1.	Einführung	276
2.	Rauigkeit und ihre Kenngrößen	276
3.	Stufe und Stufenelement	277
4.	Einfluß der rel. Sandrauigkeit auf den Verlustbeiwert des zweidimensionalen Schaufelgitters	279
5.	Einfluß der rel. Sandrauigkeit auf die Strömungsumlenkung des Schaufelgitters	279
6.	Anwendung auf den Ventilator	280
7.	Verwendete Bezeichnungen	284

Aerodynamische Anregung und Schwingungsantwort der Laufschaufeln von Axialventilatoren

M. Staiger und K.-P. Zwiener

1.	Eigenschwingungsverhalten von Axialventilatoren	286
2.	Ursachen der Laufschaufelanregung	291
3.	Resonanzbedingungen	294
4.	Aerodynamische Erregeramplituden und Schwingungsbeanspruchung der Laufschaufeln eines Axialventilators	299
5.	Zusammenfassung	313
6.	Danksagung	313

Untersuchung des Axialschubes bei Radialventilatoren im Hinblick auf seine Entstehung

T. Gikadi, W. Kamphausen und J. Böke

Zusammenfassung	317
Einleitung	317
Versuchsstand	322
Meßergebnisse und Diskussion	324

Kleinventilatoren

S. Harmsen

1.	Anwendungsgebiete und Ausführungsformen	329
2.	Technische Kennwerte und Vergleich mit größeren Ventilatoren	331
2.1	Optimalwerte	332
2.2	Bauvolumen	333
2.3	Geräuschpegel	334
3.	Leistungsverhalten und Prüfstände	339
4.	Geräuschverhalten und -meßverfahren	343
4.1	Akustische Kennlinie	344
4.2	Tonhaltigkeit	345
5.	Zuverlässigkeit und elektrische Sicherheit	346

Kompaktlüfter für die Elektronik Kühlung

S. Harmsen

1.	Kompakte Produktgestaltung	353
2.	Erforderlicher Kühlluftstrom	355
3.	Lüftungskonzepte	358
4.	Ermittlung der Gerätekennlinie und besondere Einbaubedingungen	361
5.	Elektrische Antriebe und Funktionsüberwachung	363
6.	Intelligente Kühlung mit PAPST VARIOFAN	366

Explosionsschutz bei Ventilatoren

H. Witt

1.	Literaturübersicht	369
2.	Die Physik des Zündungsvorganges bei Reib- und Schlagfunken	371
3.	Zündungszeitverlauf	373
4.	Zündenergien	373
5.	Zündfunken	373
6.	Zündwilligkeit von Gasen und Stäuben	375
7.	Temperatureinflüsse	376
8.	Bisherige Explosionsklassen	377
9.	Versuchsergebnisse	380
10.	Zusammenfassung der Labor-Versuchsergebnisse	388
11.	Betriebserfahrungen	390
12.	Neue Zoneneinteilung und Vorschriften	390
13.	Schlußwort	

5. Lärmentstehung, Lärmerfassung und Lärminderung

Grundlagen der Schallentstehung und Lärminderungsmaßnahmen bei Ventilatoren

W. Neise

1.	Einleitung	406
2.	Mechanismen der aerodynamischen Geräuschenstehung bei Ventilatoren	406
2.1	Aeroakustische Theorie	406
2.2	Entstehungsmechanismen stationärer und instationärer Schaufelkräfte	410

2.2.1	Stationäre Schaufelkräfte	410
2.2.2	Instationäre Schaufelkräfte	410
2.2.2.1	Lauftrad in ungleichförmiger stationärer Strömung	410
2.2.2.2	Lauftrad in instationärer Strömung	411
2.2.2.3	Druckschwankungen in der turbulenten Schaufelgrenzschicht	411
2.2.2.4	Geräusche durch Wirbelablösung	412
2.2.2.5	Geräuscherzeugung durch Wirbel an den Schaufelspitzen	412
2.2.2.6	Rotierende Ablösung	412
2.2.2.7	Ungleichmäßige Schaufelteilung	412
2.3	Schallerzeugung durch instationäre Kräfte auf feststehende Teile des Ventilators ...	412
2.4	Entstehung von rotierenden Kraftfeldern durch die Wechselwirkung von Lauftrad und Leitrad	413
2.5	Unterschiede zwischen der Schallabstrahlung ins Fernfeld und in einen angeschlossenen Kanal	413
2.6	Theoretische Verfahren zur Bestimmung des Lärms von Ventilatoren	415
3.	Geräuschminderungsmaßnahmen bei Ventilatoren	415
3.1	Allgemeines	415
3.2	Konstruktive Geräuschminderungsmaßnahmen für Axialventilatoren	416
3.3	Konstruktive Geräuschminderung bei Radialventilatoren	421
3.4	Geräuschminderung durch optimalen Einbau und Betrieb des Ventilators	424
3.4.1	Anpassung von Ventilator und Anlage	424
3.4.2	Einfluß der Zuströmbedingungen auf das Ventilatorgeräusch	424
3.4.3	Ventilatorgeräusche bei unterschiedlicher Volumenstromregulierung	425
4.	Zusammenfassung	425

Über die Geräusche von Radialventilatoren

J. Sentek und K. Szarska

Schalleistung eines Radialventilators	428
Einfluß der Reynoldszahl	430
Zusammenfassung	432

Beitrag zur Berechnung des Wirbellärms von Axialventilatoren

P. Koltzsch

1.	Einleitung	434
2.	Prinzip des Berechnungsverfahrens, akustische Modelle	434
3.	Schallerzeugungsmechanismus: Turbulente Zuströmung zur Schaufel	437
4.	Schallerzeugungsmechanismus: Turbulente Grenzschicht auf der Schaufeloberfläche	437
5.	Schallerzeugungsmechanismus: Nachlaufströmung hinter der Schaufel	438
6.	Spektrale Energiedichte der Zuströmturbulenz	439
7.	Spektrale Leistungsdichte der turbulenten Druckschwankungen auf der Schaufeloberfläche	441
8.	Betrachtungen zur Frequenzabhängigkeit der Spektraldichte von Schalleistung, Anströmturbulenz, Wanddruckschwankungen und Auftriebskräften	444
9.	Beispielrechnungen zum Wirbellärm von Axialventilatoren, Vergleich mit den Meßwerten	446
10.	Zusammenfassung, Katalog für weitere Aufgaben	449

Drehklangarme Axialventilatoren durch Optimierung konstruktiver Parameter

W. von Heesen

1.	Einleitung	454
2.	Das Modenspektrum der Drehklangeinzeltöne	454
3.	Beschreibung des Optimierungsverfahrens	456
4.	Experimentelle Überprüfung des Optimierungsverfahrens	458
4.1	Prüfstandsmessungen	458
4.1.1	Variation der Laufraddrehzahl	458
4.1.2	Variation von Lauf- und Leitschaufelzahlen	462
4.2	Andere Beispiele	463
5.	Auslegungsbeispiele für drehklangarme Axialventilatoren	467
5.1	Optimierung eines drehzahlgeregelten Windkanalgebläses	467
5.2	Optimierung eines bergbautypischen Lattenlüfters	470
6.	Zusammenfassung	470

Modenfilter als Schalldämpfer für Axialventilatoren

Chr. Faber

1.	Wirkungsweise von Modenfiltern	473
2.	Schallausbreitungseigenschaften von Schallwellen in zylindrischen, schallharten Rohrleitungen	474
3.	Rechenmodell zur Auslegung von Modenfiltern	478
4.	Auslegungsrechnungen für Modenfilter und Vergleich mit Messungen	480
4.1	Phasenwinkeldifferenzen am Innenrohraustritt	480
4.2	Axiale Schalldruck- und Phasenwinkelverteilung im Bereich des Innenrohrs	482
4.3	Dämmwirkung des Modenfilters	486
4.4	Modenumwandlungen	488
4.5	Auslegungsrechnungen für Modenfilter mit konzentrischem Innenrohr	492
5.	Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von Modenfiltern	493

6. Feststoff-Förderung

Verhalten von Radialventilatoren bei der Förderung von feststoffbeladener Luft

J. Fricke und A. Neumann

1.	Einleitung	498
2.	Grenzfälle bei der Zweiphasenströmung	498
3.	Einfluß der Feststoffbeladung auf die Kennlinien von Radialventilatoren	499
3.1	Untersuchungsergebnisse	500
3.2	Ansätze für eine Kennlinienberechnung	501
4.	Feststoffablagerungen im Laufrad	506
5.	Verschleiß	508
5.1	Tribologisches System und Verschleißarten	509
5.2	Strahlverschleiß	509
5.3	Verschleißzonen am Ventilatorlaufrad	510
5.4	Bahnlinien der Feststoffpartikel im Schaufelkanal	510
6.	Zusammenfassung	516
7.	Bezeichnungen	517

Verschleiß und Verschleißschutz von Ventilatoren

H. R. Hupe

1.	Einleitung	519
2.	Verschleiß und Verschleißparameter	522
2.1	Terminologie: Verschleiß- und Verschleißsystem	522
2.2	Gleitstrahlverschleiß	523
2.3	Prall-Schrägstahl- bzw. Abrasiv-Stoßverschleiß	525
3.	Verschleißbeständige Werkstoffe	526
3.1	Zweikomponenten-Verbundstahlbleche	526
3.2	Das Verfahren der Auftragsschweißung	527
3.3	Hartstoffe und Sinterhartmetalle	527
3.4	Gesinterte Hartkeramik	528
4.	Verschleißschutzmaßnahmen an Industrie-Ventilatoren	528
4.1	Kritische Verschleißzonen an Ventilatorgehäusen und korrespondierende Verschleißschutzmaßnahmen	528
4.2	Verschleißzonen am Ventilatorflügelrad	529
4.3	Verschleißschutz an Ventilatorflügelrädern	531
5.	Zusammenfassung	535
Autorenverzeichnis		537
Stichwortverzeichnis		539
Inserentenverzeichnis		545
Inserenten-, Lieferungs- und Leistungsverzeichnis		548