



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Effizienzmaßnahmen in lufttechnischen Anlagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Mag. Dipl.Ing. Dr. Ingo Marini
E166

Inst. f. Verfahrenstechnik, Umwelttechnik
und Techn. Biowissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Christoph Kuh
0025910
Millergasse 20/3
1060 Wien

Wien, 20. April 2009
Ort, Datum

Christoph Kuh

Danksagung

Im Laufe meiner Studienzeit durfte ich mich glücklich schätzen, einen für mich unbeschreiblich wichtigen, sozialen sowie finanziellen Rückhalt genießen zu dürfen. Ohne diese stetige Unterstützung wäre es um einiges schwieriger gewesen, die Zeit während meines Studiums der Verfahrenstechnik zu bewältigen. Daher möchte ich den Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nutzen, um mich in erster Linie bei meinen Eltern, meiner Schwester, meinen Großeltern sowie der gesamten Verwandtschaft von tiefstem Herzen zu bedanken. Einen besonderen Stellenwert nahmen in dieser Zeit auch all meine Freunde und Studienkollegen ein. Meiner Freundin schicke ich einen Kuss für die Art und Weise, wie sie mich liebt.

Das Verfassen einer wissenschaftlichen Arbeit verlangt von einem Neuling auf diesem Gebiet viel Zeit und Nerven. Fachliche Ansprechpartner erleichtern das Lösen von Problemen, sei es nun durch einen Tipp oder ein Gespräch. Für die ständige Möglichkeit Fragen stellen zu dürfen, sowie konstruktive und hilfreiche Antworten bekommen zu haben, danke ich meinen zwei Betreuern Mag. Dipl.Ing. Konstantin Kulterer und Prof. Mag. Dipl.Ing. Dr. Ingo Marini. Der Österreichischen Energieagentur bin ich dankbar für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit in den Dienst der Energieeinsparung stellen zu können.

Kurzfassung

Langfristig gesehen wird weltweit der Energiepreis steigen. Erste Vorboten im Jahr 2008, wie z.B. die Erhöhung des Strom- bzw. Gaspreises im Herbst, ließen die Bevölkerung aufhorchen. Im Jahr 2006 verbrauchten die Standmotoren (u.a. Ventilatoren) 67% der elektrischen Energie des gesamten Industriesektors [62]. Der Einsatz neuer Technologien auf der einen sowie die Optimierung bestehender Systeme auf der anderen Seite gelten hierbei als Mittel, um die energetischen Kosten produzierender Betriebe gering zu halten.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Erläuterung und Bewertung von sechs Effizienzmaßnahmen in lufttechnischen Anlagen, welche eine elektrische Energieeinsparung implizieren. Daraus können erste Abschätzungen des Einsparungspotentials bestimmt werden. Die Luftkonditionierung an sich (Heizen, Kühlen und Befeuchten) sowie die Maßnahme „Wärmerückgewinnung“ wurden davon ausgenommen.

Die Ergebnisse sollen zum einen Energieberatern als Arbeitsgrundlage dienen und zum anderen der Österreichischen Energieagentur die Erstellung eines Leitfadens vereinfachen.

Bei den Maßnahmen „Bedarfsgerechter Betrieb“, „Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter“, „Ventilator-/Motortausch“, „Antriebe und Riementausch“ sowie „Filtertausch“ konnten relativ einfache und rasche Bewertungen sowie Kennzahlen als Grundlage für den Berater erarbeitet werden. „Wartung, Leckagen, Druckverluste“ gibt Empfehlungen für ein energiesparendes Nutzerverhalten.

Abstract

In the long run energy costs will increase all over the world. First signs in the year 2008 like the higher prices for gas and electric power, alerted consumers in many areas. In the year 2006 level engines (e.g. ventilators) needed 67% of the electric power in the whole industry segment [62]. Using new technologies and optimizing existing systems are considered as the best methods to keep energy costs of production businesses low.

This thesis explains and evaluates six efficiency measures in ventilation systems, which imply the reduction of electric energy. As a consequence, the potential of energy savings can be estimated. Air conditioning (heating, cooling and moistening) and the measure of heat recovery were not included. The results are intended as a base for energy consultants and should simplify the compilation of a guideline by the Austrian Energy Agency.

For the measures „Need-based use“, „Speed regulation with a frequency inverter“, „Change of a ventilator or a motor“, „Drives and changing a belt“ and „Filter change“ relatively simple and quick benchmarks and characteristics for consultants are presented. „Maintenance, leakages, pressure drops“ gives guidelines for energy-saving patterns of use and also highlights the topic of leaks.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Entwicklung des Stromverbrauches	3
2 Begriffe und Definitionen	5
3 Stand der Technik	7
3.1 Allgemeines	7
3.2 Einsatzgebiete in der Industrie	7
3.3 Ventilatoren	8
3.3.1 Bauarten und Kennzahlen	8
3.3.2 Ventilatoren für Absaugungsanlagen	12
3.3.3 Einbauarten und Druckverlauf	12
3.3.4 Betriebsdaten	12
3.3.5 Auswahl der Ventilatoren	16
3.3.6 Berechnungsmethoden	16
3.3.7 Kennlinien	21
3.3.8 Betriebspunkt	23
3.3.9 Regelung	25
3.3.10 Beachtenswertes und praktische Hinweise	33
3.3.11 Antriebsarten	34
3.3.12 Anlagen-Einbaufaktoren	37
3.3.13 Effizienz-Kriterien	37
3.4 Lufttechnische Anlage	43
3.4.1 Be- und Entlüftungskonzepte	44
3.4.2 Bestandteile einer Lüftungs- und Klimaanlage	47
3.4.3 Bestandteile einer industriellen Absaugungsanlage	49
3.4.4 Gründe für Be- und Entlüftung sowie Absaugung	49
3.5 Energieverbrauch	51
3.6 Einsparpotentiale für RLT-Anlagen	51

4	Maßnahmen	54
4.1	Allgemeines	54
4.2	Bedarfsgerechte Steuerung und Regelung	55
4.2.1	Allgemeines	55
4.2.2	Einsparungspotential	56
4.2.3	Beschreibung der Maßnahme	56
4.2.4	Kriterien für den Einsatz der Maßnahme	58
4.2.5	Bewertung der Maßnahme	58
4.2.6	Kennzahlen	59
4.2.7	Normen	59
4.3	Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter	60
4.3.1	Allgemeines	60
4.3.2	Einsparungspotential	63
4.3.3	Vorteile und Nachteile	64
4.3.4	Beschreibung der Maßnahme	68
4.3.5	Kriterien für den Einsatz der Maßnahme	69
4.3.6	Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie	70
4.3.7	Bewertung der Maßnahme	70
4.3.8	Kennzahlen	77
4.3.9	Normen	77
4.4	Ventilator- und Motortausch	78
4.4.1	Allgemeines	78
4.4.2	Einsparungspotential	83
4.4.3	Hinweise auf überdimensionierte Ventilatoren	83
4.4.4	Beschreibung der Maßnahme	86
4.4.5	Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie	87
4.4.6	Bewertung der Maßnahme Motortausch	89
4.4.7	Bewertung der Maßnahme Ventilatortausch	93
4.4.8	Kennzahlen	97
4.4.9	Normen	97
4.5	Antriebe und Riementausch	99
4.5.1	Allgemeines	99
4.5.2	Einsparungspotential	103
4.5.3	Vorteile und Nachteile	105
4.5.4	Beschreibung der Maßnahme	107
4.5.5	Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie	111
4.5.6	Bewertung der Maßnahme	111

4.5.7	Kennzahlen	113
4.5.8	Normen	113
4.6	Filbertausch	114
4.6.1	Allgemeines	114
4.6.2	Einsparungspotential	114
4.6.3	Kriterien für den Einsatz der Maßnahme	115
4.6.4	Beschreibung der Maßnahme	115
4.6.5	Bewertung der Maßnahme	116
4.6.6	Kennzahlen	117
4.6.7	Normen	118
4.7	Wartung, Leckagen, Druckverluste	119
4.7.1	Allgemeines	119
4.7.2	Einsparungspotential	120
4.7.3	Herkömmliche Strategie	120
4.7.4	Beschreibung der Maßnahme	121
4.7.5	Normen	125
5	Zusammenfassung	126
	Anhang	128
	Literaturverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

1.1	Elektrischer Energieverbrauch Österreichs im produzierenden Bereich 1996 – 2006 (Quelle: [62])	4
1.2	Anteil des Stromverbrauchs für Motoren in der Industrie, EU-25, 2000 (Quelle: [2])	4
3.1	Beispiel zu Axialventilator (Quelle: [58])	9
3.2	Beispiel zu Radialventilator (Quelle: [58])	10
3.3	Bauarten von Ventilatoren mit den wichtigsten Kennzahlen (Quelle: [58])	11
3.4	Geschwindigkeitsdreiecke bei verschiedenen Schaufelformen. a) radial endende gekrümmte Schaufeln, b) vorwärts gekrümmte, c) rückwärts gekrümmte (Quelle: [58])	14
3.5	Änderung der Kennlinie des verlustlosen Ventilators durch Druckverluste (Quelle: [58])	22
3.6	Kennfeld eines Radialventilators, linearer Maßstab (Quelle: [58])	23
3.7	Typisches Kennfeld eines Radialventilators mit rückwärts gekrümmten Schaufeln im doppeltlogarithmischen Diagramm (Quelle: [58])	24
3.8	Betriebspunkt von Ventilator und Anlage (Quelle: [73])	25
3.9	Mögliche Betriebspunkte (Quelle: [73])	26
3.10	Relativer Leistungsbedarf bei Radialventilatoren und verschiedenen Regelarten (Quelle: [73])	27
3.11	Parallelschaltung zweier Ventilatoren (Quelle: [73])	29
3.12	Instabiler Bereich der Parallelschaltung von Ventilatoren, deren Kennlinie einen Scheitel oder Wendepunkt aufweist (Quelle: [73])	29
3.13	Reihenschaltung von Ventilatoren (Quelle: [73])	30
3.14	Erhöhung des Volumenstroms durch Reihenschaltung (Quelle: [73])	31

3.15	Anpassung der Ventilator Kennlinie an den gewünschten Betriebspunkt durch zusätzliche Drosselung oder Bypass (Quelle: [73])	32
3.16	Zusätzliche Drosselung durch Einbau einer Drosselklappe in den Luftstrom (Quelle: [73])	32
3.17	Abzweigen eines Teilluftstroms vom Hauptluftstrom (verstellbare Drosselklappe im Bypass) (Quelle: [73])	33
3.18	Axialventilator mit Nachleitrad, Nabendiffusor und Gehäusediffusor (Quelle: [73])	34
3.19	Beispiele für prüfstandabweichende Ventilator-Einbauten (Quelle: [73])	37
3.20	Mindervolumenstrom durch den «System-Effekt-Faktor» (Quelle: [73])	38
3.21	Definition of product categories for ventilation fans 125 W – 500 kW (Quelle: [26])	39
3.22	Minimum energy performance requirements for fans on 2010 (Quelle: [27])	40
3.23	Berechnungsschritte für Ventilatoren ohne Antrieb (Quelle: [27])	42
3.24	Minimum energy performance requirements for fans on 2020 (Quelle: [27])	43
3.25	Extremfälle von Raumluftströmungsformen, idealisiert (Quelle: [58])	44
3.26	Lastabfuhrprinzipien und Kriterien zur Vorauswahl des Lüftungskonzepts (Quelle: [49])	46
3.27	Bauarten von Erfassungseinrichtungen (Quelle: [49])	47
3.28	Terminologie der wichtigsten Teile einer Klimaanlage (Quelle: [58])	48
3.29	Schema einer industriellen Absaugungsanlage (Quelle: [58]) . .	50
4.1	Regelbereiche (Quelle: [15])	61
4.2	U/f-Kennlinie für Hebezeug- (1) und Pumpen/Lüfter (2) (Energiesparkennlinie) (Quelle: [8])	63
4.3	Gegenüberstellung der Leistungsbedarfskurven C aufgetragen über den Volumenstrom in % bezogen auf den Auslegungspunkt (Quelle: [4])	64
4.4	Bewertungskriterien für FUs bei drehzahlveränderbaren Ventilatoren (Quelle: [1])	69
4.5	Ventilator Kurve (A), Anlagenkurve (B), Leistungskurve (C) sowie Wirkungsgradkurve (η) bei Drehzahlregelung (Quelle: [4])	71
4.6	Rekonstruierte Leistungskurve mit Trendlinie bei der Drehzahlregelung	72

4.7	Effizienzklassen nach CEMEP-Vereinbarung für 4-polige Motoren (Quelle: [17])	81
4.8	Typenschild eines Asynchronmotors (Quelle: [38])	88
4.9	Maximale Nennverlustleistung von EFF1- und EFF2-Motoren (Quelle: [37])	89
4.10	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Ventilatortausches (Radialventilator) (Quelle: [49])	93
4.11	Verluste in Keilriemenantrieben, Richtwerte (Quelle: [58]) . . .	101
4.12	Wirkungsgradverlauf eines Keilriemens (untere Kurve) bzw. Flachriemens (obere Kurve) (Quelle: [9])	106
4.13	Enddruckdifferenz eines Filters (3.400 m ³ /h, 8.736 h/a)	117
4.14	Druckbedingungen in einer Anlage (Quelle: [20])	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Einbauarten von Ventilatoren (Quelle: [73])	13
3.2	Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung (Quelle: [20])	20
4.1	Zu erhebende Systemdaten	73
4.2	Tabelle zur Berechnung des Energiebedarfs (beispielhafte Vorgabe des Lastprofils)	74
4.3	Netto-Richtpreise für Frequenzumrichter K_{FU} (Schutzklasse IP 55) (Quelle: [64])	75
4.4	Montage-/Installationskosten für Frequenzumrichter K_M (Quelle: [31], [64])	76
4.5	Gegenüberstellung der Motorenstandards (Quelle: [37])	82
4.6	Erläuterung der Eintragungen im Typenschild (Quelle: [38])	88
4.7	Brutto Richtpreise für Asynchronmotoren, EFF1 und EFF2 (Quelle: [60])	91
4.8	Nennwirkungsgrad von 4-poligen Asynchronmotoren (Quelle: [37])	92
4.9	Netto-Richtpreise (in Euro) von rückwärts gekrümmten Standard-Radialventilatoren [60]	96
4.10	Richtwerte für Montagekosten (K_M) beim Austausch des Ventilators (Quelle: [49], [60])	97
4.11	Wirkungsgrade nach DIN EN 13779	104
4.12	Eigenschaften und Vorteile eines Flachriemens [9, S. 3]	107
4.13	Kosten für den Umbau von Keil- auf Flachriemenantrieb (Quelle: [60])	112
4.14	Höchste Druckdifferenzen von Filtern (Quelle: [21], [53])	115
4.15	Dichtheitsklassen nach EN 13779 und EN 15242	120
4.16	Beispiele für Druckverluste von Bauteilen in Luftbehandlungseinheiten (Quelle: [20])	123
4.17	Empfohlene Strömungsgeschwindigkeiten (Quelle: [18, S. 2 zitiert nach [61]])	125

5.1	Richtpreise Gummi-Gewebe-Flachriemen, 50m-Rolle (Quelle: [51])	129
5.2	Richtpreise für Flachriemenscheiben aus Grauguss, 100 mm breit (Quelle: [30])	130
5.3	Richtpreise für Buchsen passend zu Tabelle 5.2 mit Keilnut für Flachriemenscheiben (Quelle: [30])	130

Einleitung

Motivation

„Für die EnergieAllianz Austria (EAA) kommt es nicht in Frage, angesichts der schwächelnden Konjunktur die Energiepreise für Gewerbe und Industrie zu senken, so EAA-Geschäftsführer Werner Perz. Unternehmen sollten besser in Energieeffizienz investieren, um sich gegen die steigenden Kosten für Strom und Co zu wappnen.“ Mit diesem einleitenden Satz aus der österreichischen Tageszeitung „Die Presse“ [25] wird der langfristig unbestreitbare Energiekostenanstieg deutlich aufgezeigt. Ebenso weist er auf die Wichtigkeit hin, sich in Zukunft stärker mit dem Thema der Optimierung bestehender Systeme zu befassen. Was bisher aufgrund der günstigen Energiebereitstellung ein wenig beachtetes Thema darstellte.

Ein weiteres Problem stellt der weltweit stetig steigende Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen dar. Österreich wird die Forderungen des 2012 auslaufenden Kyoto-Protokolls zur Reduktion der Treibhausgase weit verfehlen. Anstatt der vereinbarten Verminderung verzeichnete das Land in den letzten 12 Jahren einen Anstieg von rund 15% [68]. Der somit notwendig werdende Zukauf von internationalen Emissionsrechten könnte Österreich in Zukunft eine Menge Geld kosten. Von den Auswirkungen dieser Problematik auf die globale Erderwärmung gar nicht zu sprechen.

Es gilt also, durch den Einsatz neuer Technologien sowie die energetische Optimierung bestehender Systeme durch Effizienzmaßnahmen den weltweiten Energieverbrauch einzudämmen!

Die Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency befasst sich im Rahmen des Programms klima:aktiv – der Klimaschutzinitiative des Lebensministeriums – unter anderem mit Effizienzmaßnahmen in produzierenden Betrieben¹. Energieverbraucher in der Industrie wie z.B. Druckluft, Pumpen, Ventilatoren u.a. werden in Richtung Energieoptimierung untersucht. Aus diesen Erkenntnissen erstellt die Organisation Leitfäden und führt

¹Weitere Informationen dazu sind im Internet unter www.eebetriebe.klimaaktiv.at zu finden.

Schulungen für Energieberater durch, welche die gewonnenen Erkenntnisse an Betriebe weitergeben sollen. Die Recherchen zu Ventilatoren bzw. lufttechnischen Anlagen erfolgten im Zuge dieser Diplomarbeit. Weiters beteiligt sich die Österreichische Energieagentur im Auftrag des BMVIT am Motor Annex des Implementing Agreements 4 E (Energy Efficient End Use Equipment) der Internationalen Energieagentur. Hier sollen gemeinsam mit anderen Ländern auch Planungshilfen im Bereich Motorsysteme entwickelt werden. Diese Diplomarbeit soll auch hier erste Ansätze aufzeigen.

Herangehensweise

Die sechs Maßnahmen waren zum Teil bereits durch die Österreichische Energieagentur vorgegeben bzw. wurden im Laufe der Literaturrecherche konkretisiert. Radgen [56, S. 78–79] gibt hierzu einen nahezu vollständigen Überblick.

Anhand einer umfangreichen Literaturrecherche wurde versucht, die einzelnen Maßnahmen zu beschreiben sowie praktikable Ratschläge herauszuarbeiten.

Die Erarbeitung der maßnahmenspezifischen Bewertungsform stellte die größte Herausforderung dar. Galt es doch, Methoden und Kennzahlen zu finden, mit welchen der Energieberater relativ einfach sowie rasch eine Aussage über das Einsparpotential einer lufttechnischen Anlage tätigen kann.

Expertengespräche mit Betreibern, Planern und Herstellern brachten interessante Erfahrungen sowie Eindrücke aus der Praxis in die Arbeit ein. In den Gesprächen konnten diverse Maßnahmen bedingt auf ihre Plausibilität geprüft werden.

Ziele sowie Abgrenzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Stand der Technik in lufttechnischen Anlagen bzw. Ventilatoren aufzuzeigen. Im Weiteren sollen sechs Effizienzmaßnahmen inhaltlich erarbeitet werden. Eine energetische sowie ökonomische Bewertung soll die Aussagekraft der Maßnahmen verstärken, um daraus erste Abschätzungen des Einsparungspotentials zu erhalten.

Es werden jene Maßnahmen betrachtet, die eine elektrische Energieeinsparung implizieren. Die Luftkonditionierung an sich (Heizen, Kühlen und Befeuchten) sowie die Maßnahme „Wärmerückgewinnung“ werden nicht behandelt.

Kapitel 1

Entwicklung des Stromverbrauches

Der elektrische Endenergieverbrauch Österreichs belief sich im Jahre 1996 auf 47.714 GWh. In den darauf folgenden 10 Jahren verzeichnete dieser einen Zuwachs um 21%. Somit betrug 2006 der Energiebedarf 57.649 GWh [62].

Industriesektor

Der produzierende Bereich war mit einem Anteil von knapp 40%, das entspricht 24.915 GWh, am elektrischen Energieverbrauch im Jahr 2006 beteiligt. – Dies würde umgerechnet dem durchschnittlichen Stromverbrauch von 5,7 Millionen österreichischen Haushalten¹ entsprechen. Damit ist er der Nummer Eins-Stromverbraucher in Österreich, gefolgt von den privaten Haushalten mit 26% sowie den öffentlichen und privaten Dienstleistern mit 23%. Die darin inkludierte Nutzenergiekategorie der Standmotoren verbrauchte 66% davon [62]. Standmotoren werden beispielsweise für den Antrieb von Ventilatoren oder Pumpen verwendet. Die Abbildung 1.1 auf der Seite 4 veranschaulicht das Wachstum im Industriesektor und geht ebenso auf die Entwicklung der Nutzenergiekategorie der Standmotoren ein.

Ventilatoren und folglich lufttechnische Anlagen beteiligen sich EU-weit mit ca. 16% an diesem Sektor (siehe Abbildung 1.2 auf der Seite 4) [2, S. 69]. Wendet man diese Aufteilung auf Österreich an, so benötigen Ventilatoren 2.656 GWh pro Jahr an elektrischer Energie im produzierenden Bereich.

Das Einsparpotential wird bei Ventilatoren respektive lufttechnischen Anlagen auf 30% geschätzt [66]. Dies würde ein Einsparpotential von rund 796 GWh in Österreich bedeuten.

¹ 4.300 kWh/a [29]

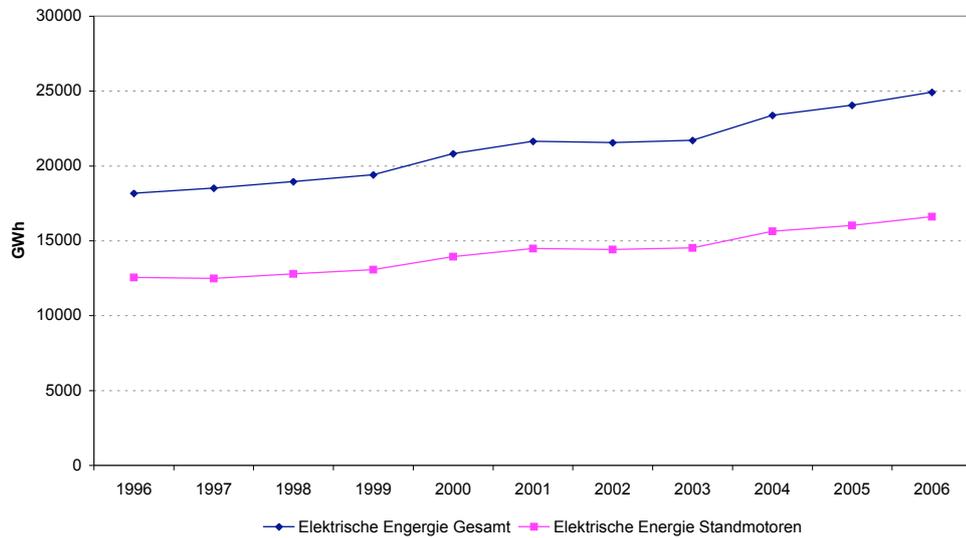


Abbildung 1.1: Elektrischer Energieverbrauch Österreichs im produzierenden Bereich 1996 – 2006 (Quelle: [62])

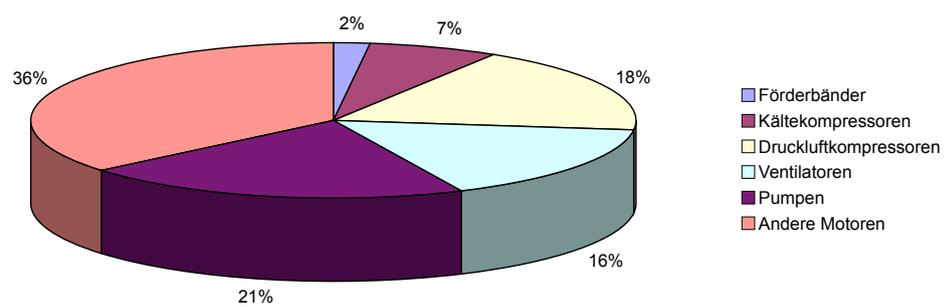


Abbildung 1.2: Anteil des Stromverbrauchs für Motoren in der Industrie, EU-25, 2000 (Quelle: [2])

Kapitel 2

Begriffe und Definitionen

Lufttechnische Anlagen

„Als lufttechnische Anlagen gelten insbesondere Lüftungs-, Klima- und Absauganlagen“ [72].

Lüftungsanlagen

„Lüftungsanlagen erneuern durch Belüftung, Entlüftung oder Kombination beider Systeme die Raumluft. Sie können mit zusätzlichen Einrichtungen zur Filtrierung, Befeuchtung, Trocknung, Kühlung oder Erwärmung der Raumluft versehen sein“ [72].

Klimaanlagen

„Klimaanlagen sind Lüftungsanlagen, die die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit in einem Raum selbsttätig auf vorgegebenen Werten halten. Filtereinrichtungen sorgen für die Reinigung der Zuluft“ [72].

Absauganlagen

„Absauganlagen haben die Aufgabe, brennbare, explosible oder gesundheitsschädigende Gase, Dämpfe, Nebel, Stäube und andere Schadstoffe am Entstehungsort zu erfassen und abzuführen“ [72].

Ventilator

„Ein Ventilator ist eine „Strömungsmaschine, die von Gas, meist Luft, durchströmt wird, wobei nur eine geringe Druckerhöhung (bis 10 kPa) erzielt wird. Der V. gehört zu den thermischen Strömungsmaschinen und ist eine Arbeitsmaschine. ... Der Volumenstrom kann sehr groß (bis $\dot{V} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$) sein. V.

sind zum Belüften von Räumen aller Größenordnungen, zum Bewettern von Bergwerken und Tunnelsystemen, zum Absaugen und Luftzufuhr in Kessel- und Trocknungsanlagen, in Haushaltsgeräten u.a. einsetzbar. ... V. werden einstufig als Axial- und Radial-V. ausgeführt. Ihre Konstruktion ist sehr einfach, da keine großen Strömungskräfte auftreten. ... Die Auswahl des geeigneten V. nach Typ und Größe erfolgt in Abhängigkeit von Volumenstrom, spezifischer Energieerhöhung und Drehzahl“ [43, S. 1309–1310].

Kapitel 3

Stand der Technik

3.1 Allgemeines

Laut VDI-Bericht [70, S. 461] verursachen raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) einen wesentlichen Anteil der gesamten Energiekosten eines Gebäudes (Betriebskosten betragen ca. 75% bis 90% der Gesamtkosten). Das Einsparpotential kann auf Grund von Planungsfehlern, Nutzungsänderungen, unzureichender Wartung und neuer Technologien erheblich ausfallen. Mittels einer raumlufttechnischen Anlagenanalyse lassen sich diese Einsparungen quantifizieren.

Im industriellen Bereich werden nicht weniger als 15% des Energieverbrauchs durch das Ventilationssystem in Anspruch genommen [54].

In Industrie und Gewerbe kommt ein Unternehmen ohne lufttechnische Anlage kaum mehr aus. Die Lufttechnik ist ein fester Bestandteil moderner Fertigungsstätten. Dabei bestehen in diesem Bereich erhebliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz: Meist können in den Betrieben der Stromverbrauch – und damit die Kosten – um 5 bis 50 Prozent gesenkt werden. Die meisten Effizienzmaßnahmen sind mit Amortisationszeiten von weniger als zwei Jahren und hohen Kapitalrenditen von über 20 Prozent wirtschaftlich sehr attraktiv für die Unternehmen [13].

3.2 Einsatzgebiete in der Industrie

Recknagel [58] verweist einerseits auf Industrieklimaanlagen und andererseits widmet er sich der industriellen Absaugung:

Industrieklimaanlagen haben die Aufgabe, den für die Fabrikation günstigsten Luftstrom herzustellen. Viele Produkte lassen sich nur dann einwandfrei herstellen, wenn die Luft einen bestimmten Zustand hat. Beispiels-

weise bei der Papierherstellung und Verarbeitung muss ein Gleichgewicht bestehen zwischen dem Wassergehalt des Papiers und dem der Luft, da sonst Schwierigkeiten beim Transport, Druck und an anderen Prozessen entstehen. Eine große Anzahl weiterer Industriezweige verlangen ebenfalls einen bestimmten Luftzustand, so z.B. die Tabakindustrie, Fotoindustrie, Süßwaren-, Lebensmittel- sowie Mikroelektronikfabriken u.a. [58, S. 1107].

Industrielle Absaugungen: Bei vielen industriellen Prozessen entstehen Verunreinigungen der Luft (Stäube, Gase oder Dämpfe), die aus der Luft entfernt werden müssen, weil sie beim Arbeitsprozess stören oder für die Arbeitskräfte gesundheitsschädlich sind. Geringe Schadstoffkonzentrationen werden durch die Be- und Entlüftungsanlage aus dem Raum entfernt. Bei größeren Schadstoffmengen erfolgt zweckmäßigerweise eine Erfassung der Schadstoffe direkt am Ort des Entstehens (Schadstoffquelle). Die Verbreitung dieser Anlagen steigt mit den zunehmenden Anforderungen an Arbeits- und Umweltschutz [58, S. 1657].

Weiters erwähnt Wagner [73, S. 5] die Anwendung lufttechnischer Anlagen als Haupt- und Hilfssysteme in vielen Industriebetrieben: vor allem in Trocknungsanlagen, Verbrennungsluft- und Rauchgassystemen, Zuluft-, Abluft-, Umluft- und Fortluftanlagen. Für den pneumatischen Transport kommen diese ebenso zum Einsatz.

3.3 Ventilatoren

Laut der VDI-Gesellschaft Energietechnik [70] sind Ventilatoren das „Herzstück“ einer Lüftungsanlage. In der Regel entfällt der größte Energiebedarf während des Betriebes einer Lüftungsanlage auf die Ventilatereinheit. Um so wichtiger ist die richtige Auswahl und der optimale Betrieb der Ventilatoren. Das heißt, die aufzuwendende Energie sollte möglichst effizient eingesetzt werden, um laufende Kosten zu reduzieren.

3.3.1 Bauarten und Kennzahlen

In lufttechnischen Anlagen werden üblicherweise folgende Ventilatorbauarten verwendet [16, S. 2–3]:

- Axialventilatoren

Die Bauform ist bekannt als Wand- oder Fensterlüfter oder Tischventilator. Größere Ausführungen können sehr effizient hohe Volumenströme bei geringen Druckdifferenzen bereitstellen. Sie setzt man z.B. als Lüfter in Autotunneln ein. Abbildung 3.1 auf der Seite 9 veranschaulicht einen Axialventilator.

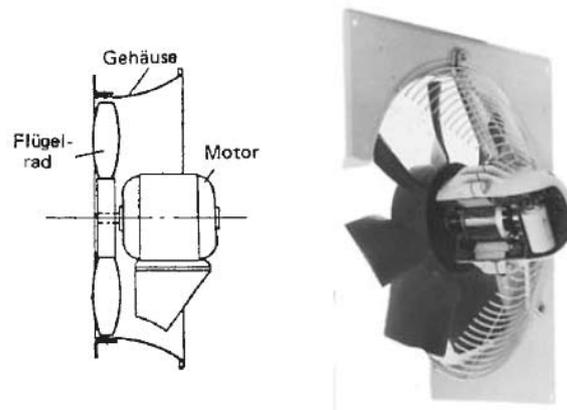


Abbildung 3.1: Beispiel zu Axialventilator (Quelle: [58])

- Radialventilatoren

Vorwärts gekrümmte Schaufeln: Auf Grund ihres Betriebsverhaltens in Anlagen mit größeren Volumenstromschwankungen aber relativ konstantem Druckabfall eingesetzt.

Ventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln, auch „Hochleistungsventilatoren“ genannt, werden bei Anlagen mit größeren Druckschwankungen (Filter- und Trockungsanlagen) eingesetzt und wenn mehrere Ventilatoren parallel geschaltet werden.

Ventilatoren mit radial endenden Schaufeln kommen in der Span- und Staubbförderung zum Einsatz.

Die Abbildung 3.2 auf der Seite 10 zeigt beispielhaft einen Radialventilator.

- Querstromventilatoren

Sie werden bei dezentralen Lüftungstruhen, Klimageräten und für Türluftschleieranlagen eingesetzt. Querstromventilatoren haben sehr schlechte Wirkungsgrade von ca. 60 Prozent.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird diese Type von Ventilator nicht näher behandelt, da aus der betrachteten Fachliteratur eine Fokussierung auf Axial- und vor allem Radialventilatoren zu erkennen war.

Die Bauarten von Ventilatoren sowie ihre wichtigsten Kennzahlen sind in Abbildung 3.3 auf der Seite 11 zusammengestellt. Die beiden darin gelisteten Kennzahlen, Lieferzahl und Druckzahl, erläutert Recknagel [58, S. 1660] wie folgt:

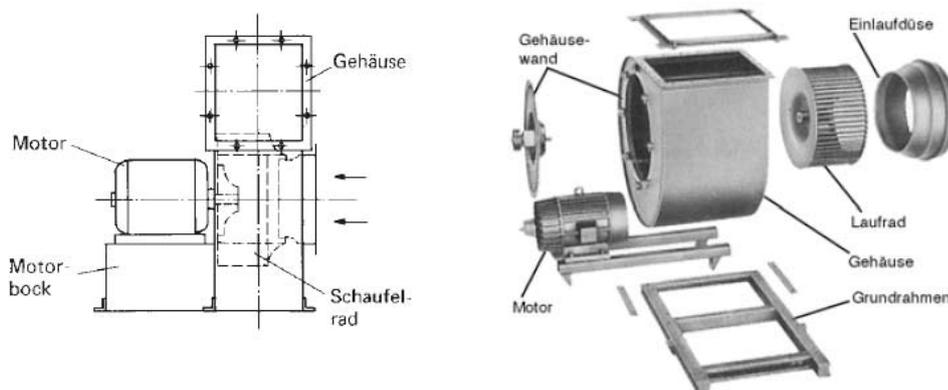


Abbildung 3.2: Beispiel zu Radialventilator (Quelle: [58])

Lieferzahl

$$\varphi = \frac{\text{Volumenstrom}}{\text{Lauftradscheibenfläche}} = \frac{\dot{V}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot u} \quad (3.1)$$

Druckzahl

$$\psi = \frac{\text{Gesamtdruckdifferenz}}{\text{Staudruck der Umfangsgeschwindigkeit}} = \frac{\Delta p_t}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} \quad (3.2)$$

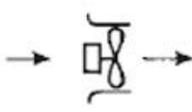
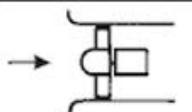
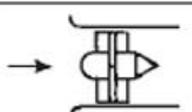
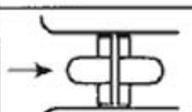
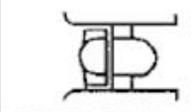
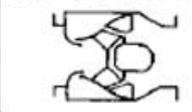
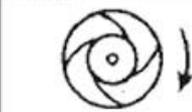
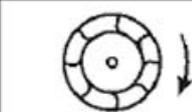
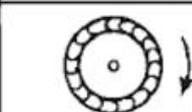
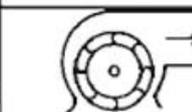
	Bauart	Schema	Lieferzahl ψ	Druckzahl ψ	Anwendung
Axialventilatoren	Wand-ventilator		0,1 ... 0,25	0,05 ... 0,1	für Fenster- und Wandeinbau
	ohne Leitrad		0,15 ... 0,30	0,1 ... 0,3	bei geringen Drücken
	mit Leitrad		0,3 ... 0,6	0,3 ... 0,6	bei höheren Drücken
	Gegenläufer		0,2 ... 0,8	1,0 ... 3,0	höchste Drücke, in Sonderfällen
mixed flow	halbaxial (meridian-beschleunigt)		0,2 ... 0,5	0,4 ... 0,8	hohe Drücke, in Sonderfällen
	halbradial (Rohr-ventilator)		0,2 ... 0,3	0,4 ... 0,6	bei Rohreinbau
Radialventilatoren	rückwärts gekrümmte Schaufeln		0,2 ... 0,4	0,6 ... 1,0	bei hohen Drücken und Wirkungsgraden
	gerade Schaufeln		0,3 ... 0,6	1,0 ... 2,0	für Sonderzwecke
	vorwärts gekrümmte Schaufeln		0,4 ... 1,0	2,0 ... 3,0	bei geringen Drücken und Wirkungsgraden
Querstromventilatoren			1,0 ... 2,0	2,5 ... 4,0	niedrige Drücke bei geringem Platzverbrauch

Abbildung 3.3: Bauarten von Ventilatoren mit den wichtigsten Kennzahlen (Quelle: [58])

3.3.2 Ventilatoren für Absaugungsanlagen

Gemäß Recknagel [58, S. 1660] erfordert die Förderung eines Staub/Luft-Gemisches in einem Rohrleitungssystem „zur Verringerung des Verschleißes spezielle Ventilatorenkonstruktionen. Zur Vermeidung von Ansätzen im Schaufelkanal haben sich Radiallaufräder mit radial endenden Schaufeln bewährt. Um ein Verstopfen des Schaufelkanals bei der Förderung von größeren Feststoffteilchen (Holzspäne, Textilien, Papierabschnitte u.ä.) zu vermeiden, werden Radialräder ohne Deckscheiben bevorzugt.

Bei explosionsgefährdeten Gemischen werden an die Ventilatoren besondere Anforderungen gestellt. Eventuelle Berührungsflächen zwischen Gehäuse und Rotor dürfen keine Funken bilden. Daher sind besondere Werkstoffpaarungen zu nutzen, wie

- Kunststoff mit Kunststoff
- Stahl oder Gußeisen mit Bronze, Messing, Kupfer
- Edelstahl mit Edelstahl

Die Werkstoffpaarung Leichtmetall mit Stahl ist nicht verwendbar. Wellendichtungen sollten eingesetzt werden. Die Motoren werden außerhalb des Luftstroms angeordnet. Explosionsgeschützte Ventilatoren sind gegen elektronische Aufladungen zu erden. Schließlich werden erhöhte Anforderungen an das Schwingungsverhalten gestellt (Auswuchten und Schwingungsisolierung). Bei schleißenden Stäuben sollten die Laufräder aus verschleißfestem Stahl hergestellt und das Gehäuse mit Gummi ausgekleidet werden. Bei Schadstoffkombinationen sind häufig Sonderstähle einzusetzen.“

3.3.3 Einbauarten und Druckverlauf

Die Normen ISO 5801 und DIN 2413 kennen vier Einbauarten, welche in der Tabelle 3.1 auf der Seite 13 angeführt sind. Je nach Einbauart ergibt sich eine besondere Druckverteilung im Bereich des Ventilators. Der Druckverlauf der vier Einbauarten wird in der ISO 5801/5802 dargestellt und soll hier nicht detaillierter betrachtet werden [73, S. 112].

3.3.4 Betriebsdaten

Ein Teil der wichtigsten Betriebsdaten eines Ventilators wird im Folgenden behandelt. Wagner [73, S. 109–111] führt diese auf:

Tabelle 3.1: Einbauarten von Ventilatoren (Quelle: [73])

Einbauart	Beschreibung der Einbauart	
	Saugseite des Ventilators	Druckseite des Ventilators
A	Frei ansaugend	Frei ausblasend
B	Frei ansaugend	Druckseitig angeschlossen
C	Saugseitig angeschlossen	Frei ausblasend
D	Saugseitig angeschlossen	Druckseitig angeschlossen

Volumenstrom

Der Volumenstrom \dot{V} (Förderstrom) ist die zeitlich durch den Ventilator geförderte Gasmenge, die übliche Einheit ist m^3/s . Zweckmäßig bezieht man das Gasvolumen auf den Gaszustand am Eintritt (Druck $p_{st,1}$ und Temperatur T_1) und kennzeichnet diesen Volumenstrom mit dem Index 1.

Druckerhöhung beim Axialventilator

Gemäß Recknagel [58, S. 1168] erfolgt die Druckerhöhung, auch Förderdruck genannt, teils durch die Vergrößerung der absoluten Eintrittsgeschwindigkeit von c_1 auf c_2 , teils durch Verzögerung der Relativgeschwindigkeit w_1 auf w_2 . Somit lautet die Gesamtdruckerhöhung beim Axialventilator:

$$\Delta p_{th} = \frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2) + \frac{\rho}{2}(c_2^2 - c_1^2) \quad [\text{Pa}] \quad (3.3)$$

$(w_1^2 - w_2^2)$... statische Druckerhöhung

$(c_2^2 - c_1^2)$... dynamische Druckerhöhung

Druckerhöhung beim Radialventilator

In [73, S. 109] sind in Anlehnung an die DIN 24163/Teil 1 [23] zwei Arten der Druckerhöhung definiert:

- Druckerhöhung des frei ausblasenden Ventilators:

$$\Delta p_{fa} = p_{st,2} - p_{t,1} \quad [\text{Pa}] \quad (3.4)$$

$p_{st,2}$ statischer Druck am Ventilatoraustritt A_2

$p_{t,1}$ Totaldruck am Ventilatoreintritt A_1

$$= p_{st,1} + p_{d,1}$$

$$p_{d,1} = \frac{\rho_1}{2} \cdot \bar{\omega}_1^2$$

$$\bar{\omega}_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1}$$

- Totaldruckerhöhung des Ventilators:

$$\Delta p_t = p_{t,2} - p_{t,1} \cong \Delta p_{fa} + p_{d,2} \quad [\text{Pa}] \quad (3.5)$$

$p_{t,2}$ Totaldruck am Ventilatoraustritt A_2

$p_{t,1}$ Totaldruck am Ventilatoreintritt A_1

$$p_{d,2} = \frac{\rho_2}{2} \cdot \bar{\omega}_2^2$$

$$\bar{\omega}_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_2}$$

Recknagel [58, S. 1150] erklärt die Druckerhöhung mit Hilfe der Geschwindigkeitsdreiecke der Laufräder:

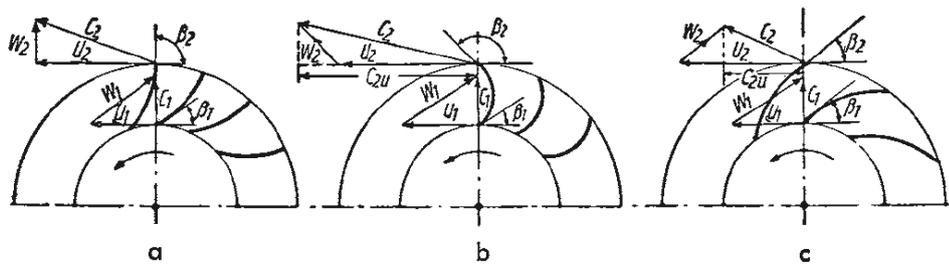


Abbildung 3.4: Geschwindigkeitsdreiecke bei verschiedenen Schaufelformen. a) radial endende gekrümmte Schaufeln, b) vorwärts gekrümmte, c) rückwärts gekrümmte (Quelle: [58])

Die Druckerhöhung lautet damit:

$$\Delta p_{th} = \frac{\rho}{2} [(u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2) + (c_2^2 - c_1^2)] \quad [\text{Pa}] \quad (3.6)$$

$(u_2^2 - u_1^2) + w_1^2$... statische Druckerhöhung

$(c_2^2 - c_1^2)$... dynamische Druckerhöhung

Das rotierende Laufrad einer Strömungsmaschine beschleunigt die Luft, welche dann in Richtung Druckstutzen umgelenkt wird. Durch die Abbremsung bei der Umlenkung wird kinetische Energie in statischen Druck umgewandelt. In Folge hat die Luft im Auslass sowohl einen dynamischen als auch einen statischen Druckanteil. Bei Ventilatoren ohne Gehäuse entfällt diese Umlenkung, so dass sie fast ausschließlich dynamischen Druck durch die Luftbewegung erzeugen. Der dynamische Druck ist für die Geschwindigkeit der Luft

nach dem Auslass und für die „Wurfweite“ relevant. [16, S. 2–3]

Förderleistung, Wellenleistung sowie den Wirkungsgrad eines Ventilators beschreibt Wagner [73, S. 110–111] wie folgt:

„Förderleistung

Als Förderleistung eines Ventilators wird das Produkt aus Massenstrom \dot{M} und spez. Förderarbeit Υ_t verstanden:

$$P_t = \dot{M} \cdot \Upsilon_t = \varrho_1 \cdot \dot{V} \cdot \Upsilon_t \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

Wellenleistung

Die Antriebsleistung eines Ventilators erhält man aus Drehmoment M_d , Winkelgeschwindigkeit ω bzw. aus Motorleistung P_M und Übertragungswirkungsgraden:

$$P_W = M_d \cdot \omega = P_M \cdot \eta_{Motor} \cdot \eta_{Getr.} \quad [\text{W}] \quad (3.8)$$

Bei direkt mit dem Ventilator (Laufrad) gekuppeltem Motor wird der Wirkungsgrad $\eta_{Getr.}$ zu 1,0!

Wirkungsgrad

Unter Wirkungsgrad versteht man, wie bei allen Arbeitsmaschinen, das Verhältnis aus Nutzleistung (entspricht der Förderleistung) und Antriebsleistung:

$$\eta_{t,W} = \frac{P_t}{P_W} \quad (3.9)$$

Bei dieser Definition werden die Lagerreibungsverluste P_R dem Ventilator zugeordnet, Energieverluste in Riementrieben oder Zahnradgetrieben dem Antrieb.

DIN 24163/Teil 1 [23] unterscheidet 5 Leistungs- und 6 Wirkungsgraddefinitionen.

Als einziges Regelwerk weist VDI 2044 [71] auf den Wirkungsgrad des Ventilators einschließlich weiterer Teile der Anlage, den sogenannten **Einbauwirkungsgrad** η_{Einbau} und die sog. nutzbare Druckerhöhung hin. Die zusätzlichen Zu- und Abströmverluste im Einbauzustand verringern grundsätzlich den Wirkungsgrad, insbesondere durch eine Reduzierung der Druckerhöhung bei gleichbleibender Antriebsleistung.“

3.3.5 Auswahl der Ventilatoren

Bei Recknagel [58, S. 1164–1166] erfolgt die Auswahl nach Investitions- und Energiekosten, Geräusch, Platzbedarf, Form der Kennlinie, Einbausituation, Betriebssicherheit, Wirkungsgrad und Wartungsaufwand. Praktisch werden zur Auswahl der geeigneten Größen von den Lieferanten Leistungs- und Maßstabellen geliefert. Ventilatoren mit großem Wirkungsgrad werden wegen der hohen Strompreise zunehmend eingesetzt.

Wesentlicher Gesichtspunkt ist bei RLT-Anlagen die Geräuschfrage: Geräusche steigen mit der Druckdifferenz Δp .

Geringe Ausblasgeschwindigkeit ist nicht unbedingt gleichbedeutend mit geringen Geräuschen. Sie ist jedoch bei freiausblasenden Ventilatoren wichtig, um den Verlust des dynamischen Drucks am Ausblas klein zu halten.

Vorteile der Axialventilatoren gegenüber Radialventilatoren:

- Geringer Raumbedarf
- Niedrige Anschaffungskosten
- Regelung durch Schaufelverstellung während des Laufens.

Nachteile:

- Größere Abrissgebiete im Kennfeld, größere Geräusche
- Schwierige Motorauswechslung bei Direktantrieben, außer bei Flanschmotor
- Schwierige Leistungsanpassung, falls nicht Riemenantrieb oder Schaufelverstellung
- Genauere Berechnung der Widerstände (Netzkennlinie) und Auswahl des Ventilators.

3.3.6 Berechnungsmethoden

Leistungsbedarf bei Radialventilatoren

Recknagel [58, S. 1151–1152] beschreibt die Antriebsleistung des Ventilators sowie die elektrische Motorleistung wie folgt:

Antriebsleistung (Wellenleistung) des Ventilators P_L :

$$P_L = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{\eta_L} \quad [\text{W}] \quad (3.10)$$

Elektrische Motorleistung P_M :

$$P_M = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{\eta_L \cdot \eta_M \cdot \eta_W} \quad [\text{W}] \quad (3.11)$$

\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
Δp_t	Gesamtdruckverlust [Pa] $\Delta p_t = p_{st} + p_{dyn}$
η_L	Ventilatorwirkungsgrad
η_M	Motorwirkungsgrad
η_W	Antriebswirkungsgrad
η_t	$= \eta_L \cdot \eta_M \cdot \eta_W$ = der Gesamtwirkungsgrad = 0,6...0,8 bei großen Ventilatoren, = 0,5...0,6 bei mittleren Ventilatoren, = 0,3...0,4 bei kleinen Ventilatoren

Der Wirkungsgrad η_t bezieht sich hier auf die Druckerhöhung zwischen Ventilator-Eintritt und Ventilator-Austritt, enthält also auch den dynamischen Druck in der Ausblasöffnung. Falls dieser, wie z.B. bei frei ausblasenden Ventilatoren, als Verlust anzusehen ist, ist der Wirkungsgrad natürlich geringer.

Mit Radialventilatoren können Wirkungsgrade von 85% und mehr erreicht werden (Hochleistungs-Ventilatoren bzw. Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln). Sie sind trotz hohen Kaufpreises häufig vorteilhaft, namentlich bei großen Leistungen und langen Betriebszeiten.

Ventilatoren mit vorwärts gekrümmten Schaufeln haben einen geringeren Wirkungsgrad als jene mit rückwärts gekrümmten Schaufeln, da die Umsetzung der hohen Luftgeschwindigkeit c_2 in statischen Druck mit größeren Verlusten verbunden ist.

Leistungsbedarf bei Axialventilatoren

Nach Recknagel [58, S. 1169] wird durch die bei der Strömung entstehenden unvermeidlichen Verluste die theoretische Druckerhöhung nicht erreicht. Verluste entstehen durch Reibung, Stoß, Umlenkung, Ablösung, Spaltströmung usw.

Der Leistungsbedarf ist wie folgt definiert:

$$P_L = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{th}}{\eta_L} \quad [\text{W}] \quad (3.12)$$

\dot{V} Volumenstrom in $[\text{m}^3/\text{s}]$
 Δp_{th} Gesamtdruckverlust $[\text{Pa}]$
 η_L Gesamtwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η_L ist sehr unterschiedlich, im Bereich von 0,3...0,9, je nach Ausführung, abhängig vom aerodynamischen Wirkungsgrad, Lagerwirkungsgrad, Spalt zwischen Laufrad und Schacht.

Maximalwerte:

Wandventilator	0,3...0,4
Axialventilator ohne Leitrad	0,6...0,7
Axialventilator mit Leitrad	0,7...0,8
Gegenläufige Axialventilatoren	0,8...0,9

Genauere Werte sind aus Kennbildern zu entnehmen, welche z.B. aus dem Recknagel [58] oder aus Hersteller-Datenblättern zu entnehmen sind.

Richtwerte für Spalteinfluss:

1% Spaltveränderung (bezogen auf d_a) ergibt 1...2% Wirkungsgradveränderung.

Proportionalitäts- und Affinitätsgesetze

Recknagel [58, S. 1155] sowie Wagner [73, S. 123] beschreiben diese auf folgende Weise:

Proportionalitätsgesetze

Mittels der *Proportionalitätsgesetze* können die Leistungsdaten eines Ventilators auf andere Drehzahlen umgerechnet werden.

Der Volumenstrom ist proportional der Drehzahl:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.13)$$

Der Druck ist proportional dem Quadrat der Drehzahl:

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (3.14)$$

Der Leistungsbedarf ist proportional der 3. Potenz der Drehzahl:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (3.15)$$

Affinitätsgesetze

Bei einander ähnlichen, jedoch verschieden großen Ventilatoren gelten bei gleicher Drehzahl die *Affinitätsgesetze*.

Der Volumenstrom ist proportional der 3. Potenz der Durchmesser oder einer anderen geometrischen Vergleichsgröße:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^3 \quad (3.16)$$

Der Druck ist proportional der 2. Potenz der Vergleichsgröße:

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad (3.17)$$

Der Leistungsbedarf ist proportional der 5. Potenz der Vergleichsgröße:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^5 \quad (3.18)$$

Spezifische Ventilatorleistung

Die spezifische Ventilatorleistung, im Englischen bekannt unter *specific fan power (SFP)*, wird in der DIN EN 13779 [20] näher beschrieben. Die Europäische Norm beschäftigt sich mit der Planung und Ausführung von Lüftungs- und Klimaanlage in Nichtwohngebäuden, welche für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind; Anwendungen aus der Industrie- und Prozesstechnik sind dabei ausgeschlossen. Trotzdem wird der SFP-Wert hier angeführt. Er soll als möglicher Richtwert für industrielle Anwendungen dienen.

Der Zielwert der spezifischen Ventilatorleistung, SFP, gibt den erforderlichen Leistungsbedarf sämtlicher Zuluft- und Abluftventilatoren im Gebäude an. Er sollte während der frühen Planungsphase definiert werden.

$$SFP = \frac{P_{sf} + P_{ef}}{q_{max}} \quad (3.19)$$

SFP	die erforderliche spezifische Ventilatorleistung [Ws/m^3]
P_{sf}	die Gesamtleistung der Zuluftventilatoren bei Auslegungsluftvolumenstrom [W]
P_{ef}	die Gesamtleistung der Abluftventilatoren bei Auslegungsluftvolumenstrom [W]
q_{max}	der Auslegungsluftvolumenstrom durch das Gebäude; sollte dem Abluftvolumenstrom entsprechen [m^3/s]

Die Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung (für jeden Ventilator) ist in Tabelle 3.2 zu finden (Klassifizierung je Ventilator). Dabei gilt

sehr gut	mittel	schlecht
< 1500	$1500 - 4000$	> 4000

Tabelle 3.2: Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung (Quelle: [20])

Kategorie	P_{SFP} in Ws/m^3
SFP 1	< 500
SFP 2	$500 - 750$
SFP 3	$750 - 1250$
SFP 4	$1250 - 2000$
SFP 5	$2000 - 3000$
SFP 6	$3000 - 4500$
SFP 7	> 4500

Die spezifische Ventilatorleistung hängt vom Druckabfall, dem Wirkungsgrad des Ventilators und der Auslegung von Motor und Antriebsleistung ab.

Weiters von Interesse ist der SFP_E -Wert, damit kann ermittelt werden, wie wirksam einzelne Luftbehandlungseinheiten oder Ventilatoren die elektrische Leistung nutzen.

Der SFP_V -Wert bietet einen leicht festzulegenden und zu überprüfenden Faktor. Dieser Kennwert soll von jeder Anlage ermittelt werden. Dazu sind die Nennleistungen der Antriebsmotoren vom Typenschild zu erheben und

zu addieren. Dieser Wert ist durch die Luftvolumenströme $[\text{m}^3/\text{s}]$ zu dividieren. Ist das Ergebnis größer als $4000 \text{ Ws}/\text{m}^3$, besteht Handlungsbedarf in Richtung Energieeffizienzmaßnahmen.

Der Unterschied zwischen SFP_E und SFP_V besteht in der Lastbedingung: Bei der SFP_E handelt es sich um eine Auslegungslastbedingung, bei der SFP_V hingegen um eine Validierungslastbedingung. Es wird empfohlen, beide Werte SFP_E und SFP_V zu berechnen.

3.3.7 Kennlinien

Laut Wagner [73, S. 112] verstehen die DIN 24163 [23] und 24166 [24] sowie die VDI 2044 [71] unter einer Ventilator Kennlinie den funktionellen Zusammenhang zwischen Totaldruckerhöhung Δp_t und angesaugtem Volumenstrom \dot{V} .

Recknagel [58, S. 1155] zufolge wird das betriebliche Verhalten von Ventilatoren durch Druck-Volumenstrom-Kurven, die sogenannten Kennlinien, dargestellt. Auf der Abszisse ist der Volumenstrom, auf der Ordinate die Druckdifferenz dargestellt. Bei verlustloser Strömung sind die theoretischen Kennlinien gerade Linien, d.h. der Förderdruck des Ventilators ändert sich geradlinig bei sich änderndem Volumenstrom. Die verschiedenen Verluste bewirken jedoch bei der realen Strömung eine wesentliche Änderung der Geraden zu einer Kurve (Abbildung 3.5 auf der Seite 22). Bei einem bestimmten Ventilator ergibt sich für jede Drehzahl n eine Kurve, die versuchsmäßig festgestellt wird. Siehe dazu Abbildung 3.6 auf der Seite 23.

Anders ausgedrückt, gilt eine Kennlinie nur für eine bestimmte Drehzahl des Laufrades, was die Schar von Kennlinien in den Kennlinienblättern der Hersteller erklärt [16, S. 4].

Der Widerstand des Leitungsnetzes einschließlich der darin eingebauten Apparate stellt sich meist in Form einer durch den Nullpunkt gehenden, quadratischen *Parabel*, der Anlagenkennlinie, dar. Dies ergibt sich daraus, dass die Druckdifferenz proportional dem Quadrat des geförderten Volumenstroms ist, also $\Delta p = \text{konst.} \cdot \dot{V}^2$. Der jeweilige *Betriebspunkt* eines Ventilators liegt auf dem Schnittpunkt einer n -Linie und einer Rohrnetz Kennlinie (Anlagenkennlinie). Der Betriebspunkt soll möglichst in der Nähe des höchsten Wirkungsgrades liegen. Er soll bei Ventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln auf keinen Fall auf dem linken abfallenden Teil der Ventilator Kennlinie liegen, da dann ein unstabiles Arbeiten (*Pumpen*) besonders bei Axialventilatoren und Trommelläufern erfolgen kann [58, S. 1155].

Die Wirkungsgrade zeigen sich in dem Druck-Volumenstrombild als Parabeln, wie die Widerstände der Anlage.

Eine wesentlich übersichtlichere Darstellung der Kennlinien bietet das

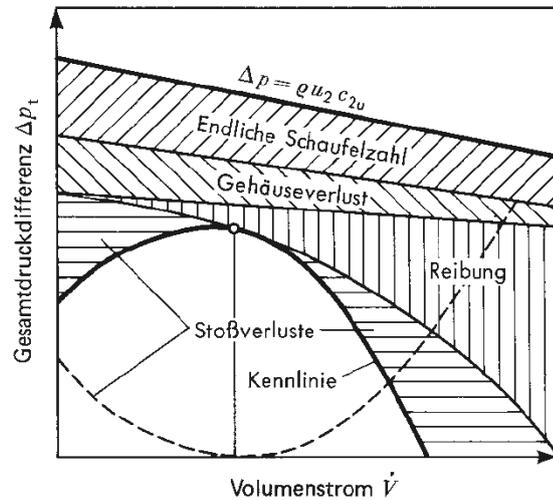


Abbildung 3.5: Änderung der Kennlinie des verlustlosen Ventilators durch Druckverluste (Quelle: [58])

doppeltlogarithmische Diagramm: Die Anlagenkennlinien sind Geraden, ebenso wie die Wirkungsgradkurven (Abbildung 3.7 auf der Seite 24). Alle wichtigen Daten wie Volumenstrom, Drehzahl, Umfangsgeschwindigkeit, statischer und dynamischer Druck, Sauggeschwindigkeit (Geschwindigkeit im Eintritt von Saugöffnungen) und Drehzahl können aus dem Diagramm abgelesen werden. Das Diagramm ist für alle Baugrößen einer bestimmten Typenreihe darstellbar [58, S. 1156].

Axial- und Hochleistungsventilatoren haben steile Kennlinien. Das bedeutet, dass sich bei Druckschwankungen der Volumenstrom nur unwesentlich ändert. Dies ist vorteilhaft für einen stabilen Betrieb [16, S. 4].

Energieeffizienz Recknagel [58, S. 1158] weist auf den Unterschied der vom Hersteller angegebenen Kennlinie und jener, die der Ventilator nach dem Einbau ins System besitzt, hin. – Diese beiden Kennlinien stimmen auf Grund der unterschiedlichen Einbauverhältnisse im Vergleich zum Laborprüfstand nicht mehr überein. Daher sind beim Einbau der Ventilatoren geringe Anströmgeschwindigkeiten und optimale Strömungsverhältnisse anzustreben, womit gleichzeitig Energie gespart wird.

Liegt stromab des Ventilators in der Druckkammer einer Klimazentrale ein Wärmetauscher, Filter, Luftwäscher o. dgl., so sind zu vollflächiger Luftbeaufschlagung Einbauten erforderlich (z.B. Lochblech, Prallplattendiffusor usw.). Zusatzwiderstände sind entsprechend zu beachten. Am besten wäre es in diesem Zusammenhang, die Ventilator Kennlinie im Gerät zu messen

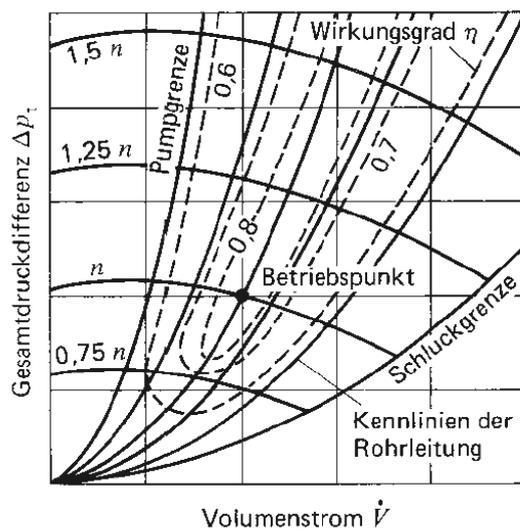


Abbildung 3.6: Kennfeld eines Radialventilators, linearer Maßstab (Quelle: [58])

(*Gerätekenlinie*).

Auch Diffusoren am Druckstutzen sind energetisch bei Ventilatoren mit hoher Austrittsgeschwindigkeit von Vorteil, speziell bei Drücken $> 800 \text{ Pa}$ und wenn der dynamische Anteil höher als 15% ist. Bei Platzmangel in Zentralgeräten soll wenigstens ein Kurzdifusor oder -verteiler zum Einbau kommen.

3.3.8 Betriebspunkt

Im Englischen wird der Betriebspunkt als „best efficient point“, kurz BEP, bezeichnet.

Energieeffizienz Der Ventilator ist derart auszuwählen, dass er im Bereich des geplanten Betriebspunktes den höchsten Wirkungsgrad aufweist, um eine energieeffiziente Betriebsweise zu ermöglichen. Ventilatoren sind für einen mehr oder weniger eng bemessenen Betriebspunkt konzipiert. Jeder Typ besitzt seine eigene Charakteristik, die ihn für bestimmte Einsatzgebiete prädestiniert. Bei der richtigen Auswahl eines Ventilators ist es unerlässlich zu wissen, für welchen Einsatz und für welchen Betriebspunkt dieser geplant werden soll [70, S.461–462].

Laut Wagner [73, S. 130] ist der Betriebspunkt eines Ventilators durch den

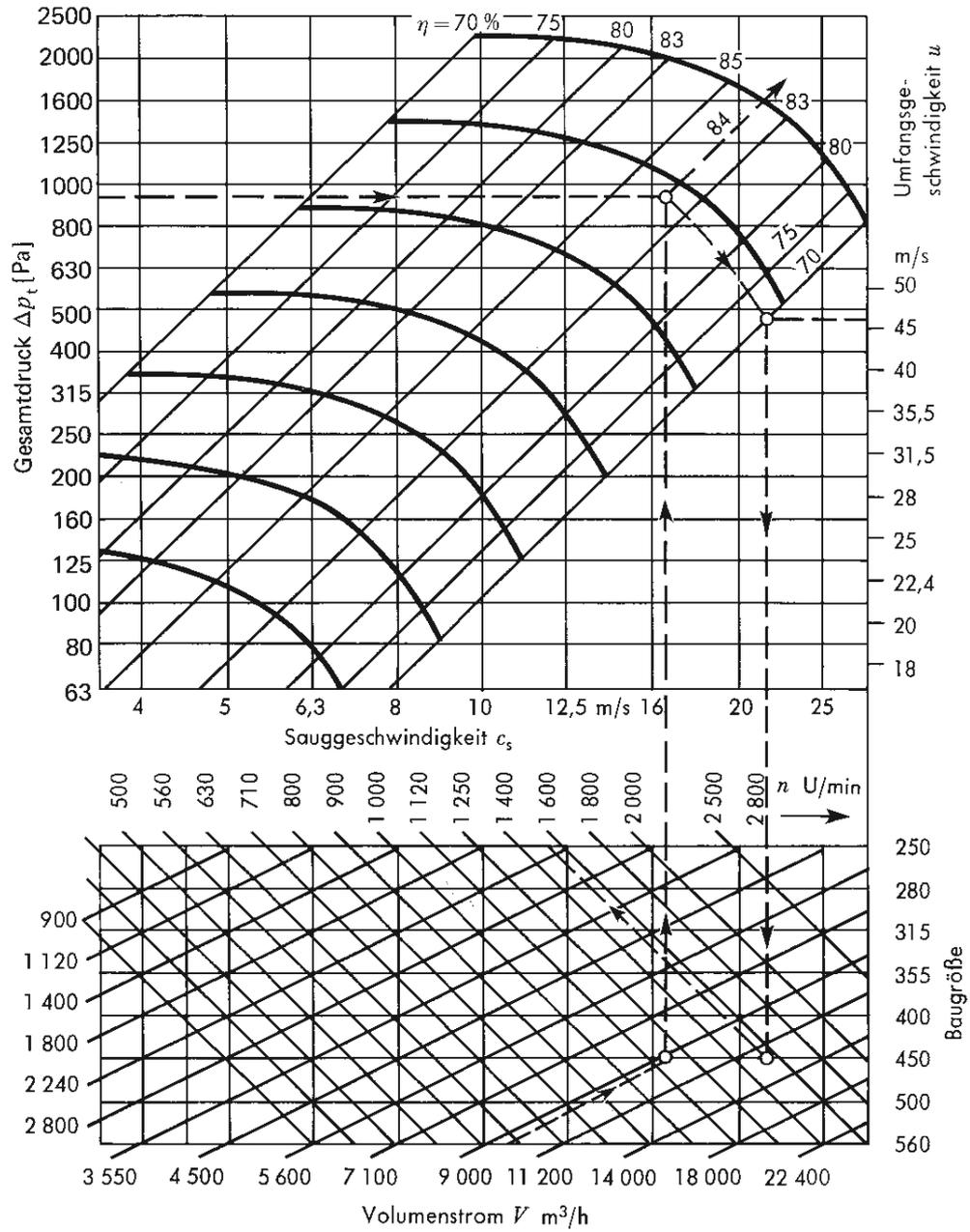


Abbildung 3.7: Typisches Kennfeld eines Radialventilators mit rückwärts gekrümmten Schaufeln im doppeltlogarithmischen Diagramm (Quelle: [58])

Schnittpunkt von Ventilatorenkennlinie $\Delta p_t(\dot{V})$ und Widerstandskennlinie $\Delta p_V(\dot{V})$ bestimmt (Abbildung 3.8).

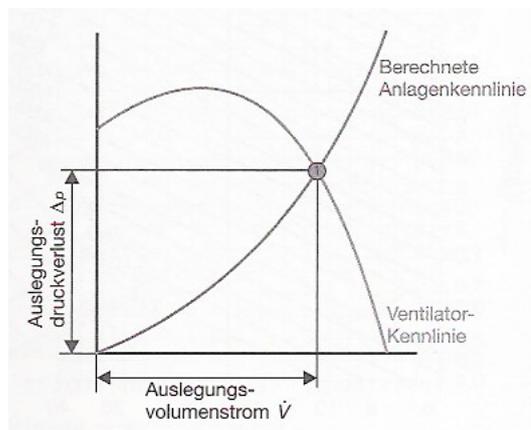


Abbildung 3.8: Betriebspunkt von Ventilator und Anlage (Quelle: [73])

Der Widerstand des Rohrnetzes, (Rohrleitungskennlinie oder auch Anlagenkennlinie) einschließlich der darin eingebauten Apparate, stellt sich als durch den Nullpunkt gehende Parabel dar.

Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass der Förderdruck proportional dem Quadrat des geförderten Volumenstroms ist:

$$\Delta p_V = konst. \cdot (\dot{V}^2) \quad (3.20)$$

Wählt man für die Darstellung ein doppeltlogarithmisches Koordinatensystem für \dot{V} und Δp erhält man statt der Parabeln Geraden.

Die Gesamtdruckerhöhung eines Ventilators setzt sich aus der dynamischen und der statischen Druckerhöhung zusammen. Dabei wird der dynamische Anteil auf den Ventilatorsaugstutzen bezogen.

Abbildung 3.9 auf der Seite 26 zeigt die Verschiebung des Betriebspunktes eines Ventilators entlang seiner Ventilator-kennlinie bei einer Veränderung des Druckverlustes.

3.3.9 Regelung

Wagner [73, S. 133–138] beschreibt die Regelung der Luftmengen zur Anpassung an den Bedarf. Diese ist auf verschiedene Weisen möglich.

Drosselregelung

Die Drosselregelung mit verstellbarer Klappe bei konstanter Drehzahl ist billig, aber unwirtschaftlich. Der Regelbereich geht von etwa 100 bis 70%.

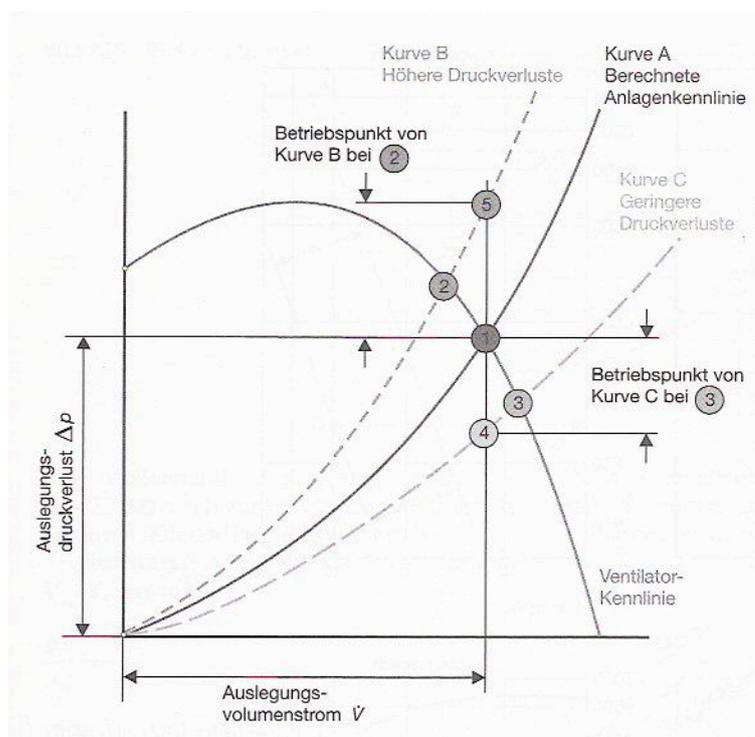


Abbildung 3.9: Mögliche Betriebspunkte (Quelle: [73])

Drallregelung

Bei der Drallregelung mit konstanter Drehzahl wird dem Volumenstrom vor Eintritt in das Laufrad durch verstellbare Schaufeln ein Vordrall erteilt. Besonders gut für große Leistungen. Der Regelbereich reicht von etwa 100 bis 50%.

Drehzahlregelung

Geschieht durch verschiedene elektrische Antriebe:

- Schleifringläufer mit Regulierwiderstand
- Gleichstromnebenschlussmotor
- Mechanische Regelgetriebe
- Polumschaltbarer Motor

Die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter wird bei Wagner [73] nicht erwähnt, obwohl diverse andere sowie ältere Literaturstellen [69], [13], [56]

dieses Thema bereits aufgegriffen haben und erläutern.

Der relative Leistungsbedarf bei verschiedenen Regelarten ist der Abbildung 3.10 zu entnehmen. Der theoretisch günstigste Verlauf ist gemäß den

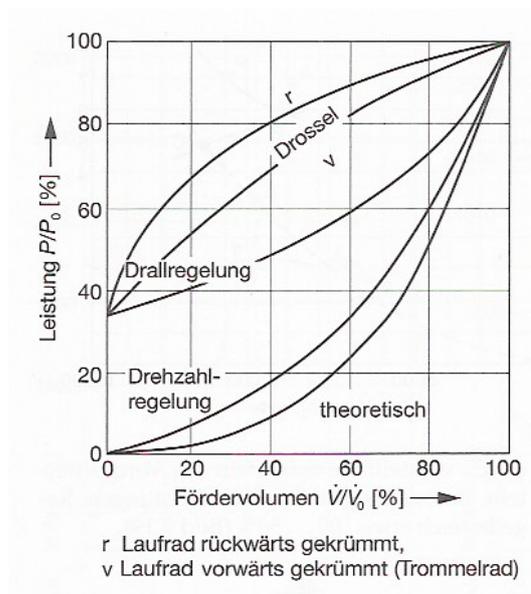


Abbildung 3.10: Relativer Leistungsbedarf bei Radialventilatoren und verschiedenen Regelarten (Quelle: [73])

Proportionalitätsgesetzen durch die Parabel $(\dot{V}/\dot{V}_0)^3$ gegeben. Diese Kurve ist in der Abbildung die am weitest rechts liegende, mit der Bezeichnung „theoretisch“.

$$P \sim \dot{V}^3 \quad (3.21)$$

Wagner verweist auf weitere Literatur [6], [7] und [50], in welcher die verschiedenen Regelverfahren ausführlich beschrieben, verglichen und bewertet werden.

Parallel- und Reihenschaltung bzw. Multiple Kombination von Ventilatoren

Das Zusammenwirken von mehreren Ventilatoren in einer Anlage kommt in der Praxis sehr häufig vor.

Energieeffizienz Parallel- und Reihenschaltungen von Ventilatoren sind wirtschaftliche Möglichkeiten, Anlagen mit wechselnden Betriebspunkten zu betreiben oder sich stetig wachsenden Anlagen anzupassen.

Weiters ist die Kombination von Ventilatoren eine Alternative zur Verwendung einzelner, großer Ventilatoren. In vielen Fällen sind zwei kleinere Ventilatoren kostengünstiger und liefern bessere Betriebseigenschaften als ein großer Ventilator. Jedem Ventilator zu ermöglichen, nahe seines BEP zu arbeiten, bringt erhebliche Energieeinsparungen. Darüber hinaus ist ein potentieller Vorteil der Kombination von Ventilatoren das hohe Niveau an Gesamteffizienz. Obwohl größere Motoren dazu tendieren, effizienter als kleinere zu sein, können kleine schnelllaufende Ventilatoren nahe ihres BEPs eine bessere Netzeffizienz erreichen, als ein großer langsam drehender Ventilator. [69, S. 51]

Parallelschaltung Man spricht von Parallelschaltung, wenn zwei oder mehrere Ventilatoren nebeneinander zwischen einer gemeinsamen Saug- und Druckleitung arbeiten. Aber auch mehrere aus einem Raum absaugende Ventilatoren arbeiten nahezu parallel. Für die Parallelschaltung gilt:

Bei gleichem Druck addieren sich die Volumenströme.

Die Abbildung 3.11 auf der Seite 29 zeigt den einfachen Fall der Parallelschaltung: zwei gleiche Ventilatoren mit scheinelloser Kennlinie werden nebeneinander betrieben. Hier erhält man die resultierende Kennlinie, indem für den Druckwert der Ventilatorenkennlinie der zugehörige Volumenstrom verdoppelt wird. Etwas komplizierter werden die Verhältnisse bei der Parallelschaltung von gleichen Ventilatoren mit Kennlinien, die einen ausgeprägten Scheitel- oder Wendepunkt aufweisen (Abbildung 3.12 auf der Seite 29).

Energieeffizienz Die Systemkennlinie W wird zwischen den Punkten AB und BC mehrfach geschnitten, d.h., hier ist ein instabiler Betrieb möglich. Besonders bei Zuschaltbetrieb ist deshalb darauf zu achten, dass die Systemkennlinie rechts vom Punkt BC liegt. Bei Parallelbetrieb von ungleichen Ventilatoren ist besondere Vorsicht geboten. Da meistens der größere Ventilator einen höheren Druck erzielt, kann es vorkommen, dass die Luft durch den kleineren Ventilator zurück geblasen wird.

Parallelgeschaltete Ventilatoren bieten hohe Effizienz bei breiter Variation des Systembedarfs. Des Weiteren vermindern sie das Stillstands-Risiko durch Versagen oder unerwartete Wartungsnotwendigkeit eines Ventilators. [69, S. 51]

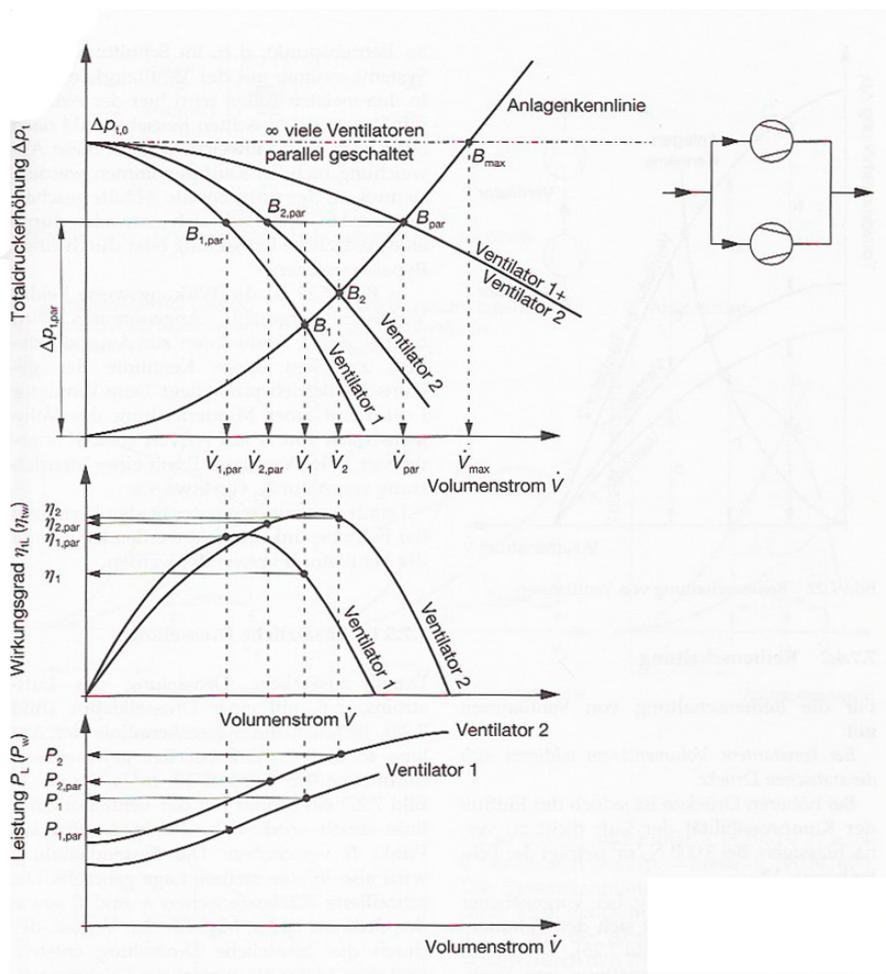


Abbildung 3.11: Parallelschaltung zweier Ventilatoren (Quelle: [73])

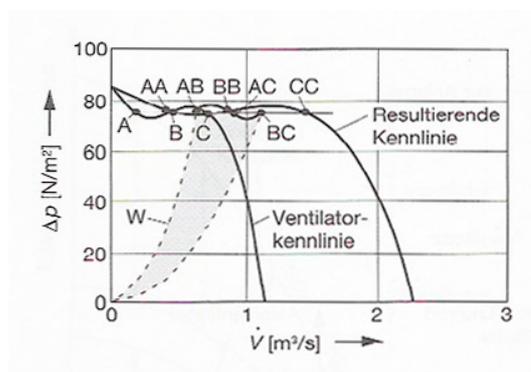


Abbildung 3.12: Instabiler Bereich der Parallelschaltung von Ventilatoren, deren Kennlinie einen Scheitel oder Wendepunkt aufweist (Quelle: [73])

Reihenschaltung Für die Reihenschaltung von Ventilatoren gilt:

Bei konstantem Volumenstrom addieren sich die statischen Drücke.

Bei höheren Drücken ist jedoch der Einfluss der Kompressibilität der Luft nicht zu vernachlässigen. Bei 3000 Pa beträgt der Fehler bereits 1%. Durch Reihenschaltung bei vorgegebener Anlagenkennlinie lässt sich der Volumenstrom $\Delta\dot{V}$ erhöhen (Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 auf der Seite 31).

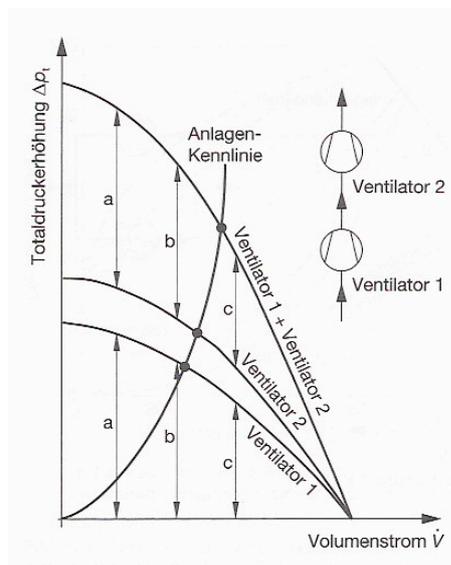


Abbildung 3.13: Reihenschaltung von Ventilatoren (Quelle: [73])

Drosselung oder Bypass?

Ventilatoren bei denen weder eine Drehzahländerung noch eine Flügel- oder Leitradverstellung vorgesehen sind, arbeiten nur selten im Betriebspunkt, d.h. im Schnittpunkt der Systemkennlinie mit der Ventilatorenkennlinie. In den meisten Fällen wird hier der Arbeitspunkt vom gewünschten Betriebspunkt nach oben oder unten abweichen. Kann diese Abweichung nicht in Kauf genommen werden, so muss auf der Anlagenseite Abhilfe geschaffen werden. Dies lässt sich entweder durch eine zusätzliche Drosselung oder durch einen Bypass erreichen.

In Abbildung 3.15 auf der Seite 32 ist die Wirkungsweise beider Verfahren dargestellt. Angenommen wird hierbei, dass zwei Ventilatoren zur Auswahl stehen, zwischen deren Kennlinie der gewünschte Betriebspunkt liegt. Beim

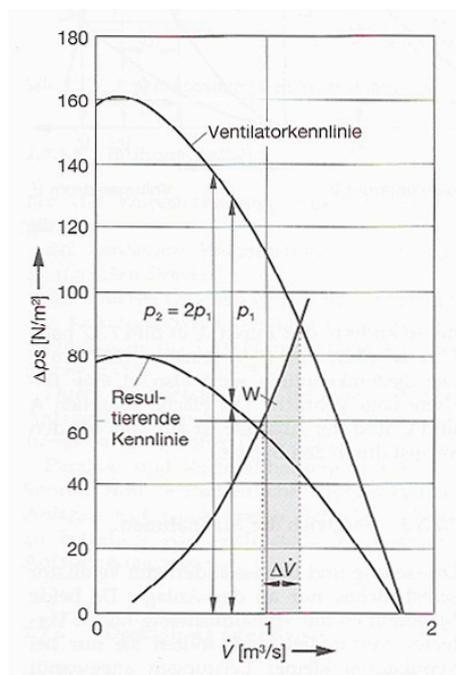


Abbildung 3.14: Erhöhung des Volumenstroms durch Reihenschaltung (Quelle: [73])

Ventilator I wird mit einer Minderleistung des Volumenstroms von A auf A1 von etwa 11% gerechnet, beim Ventilator II mit einer Mehrleistung von A auf A2 von etwa 8%. Damit nun mit einem der beiden Verfahren der Betriebspunkt erreicht werden kann, muss der Ventilator II verwendet werden.

Zusätzliche Drosselung Durch zusätzliche Drosselung des Luftstroms, z.B. mit einer Drosselklappe (Abbildung 3.16 auf der Seite 32), lässt sich die Systemkennlinie der Anlage so ändern, dass bei der gewünschten Luftmenge (im Beispiel $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, Punkt A, Abbildung 3.15 auf der Seite 32) ein Schnitt mit der Ventilator Kennlinie erzielt wird, d.h., Punkt A wird auf Punkt B verschoben. Die Systemkennlinie wird also in eine steilere Lage gebracht. Die schraffierte Fläche zwischen A und B sowie der Ordinate ist ein Maß für den Verlust, der durch die zusätzliche Drosselung entsteht und vom Motor als zusätzliche Leistung aufgebracht wird.

Bypass Mit dem Bypass zweigt man eine Teilluftmenge vom Hauptluftstrom ab, um die gewünschte Luftmenge einzuhalten. Die Teilluftmenge kann entweder ins Freie abgeblasen oder mit Hauptluftstrom wieder saugseitig zu-

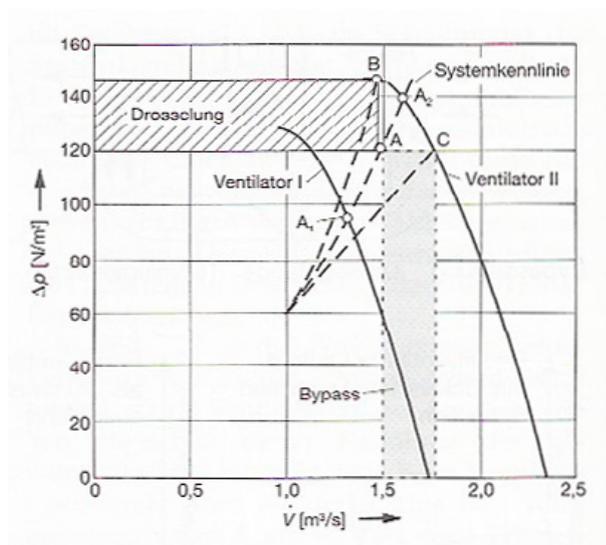


Abbildung 3.15: Anpassung der Ventilatorcharakteristik an den gewünschten Betriebspunkt durch zusätzliche Drosselung oder Bypass (Quelle: [73])

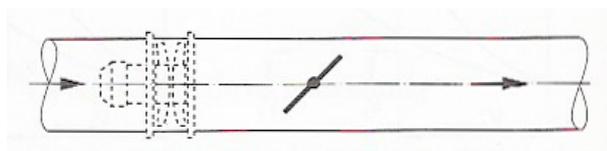


Abbildung 3.16: Zusätzliche Drosselung durch Einbau einer Drosselklappe in den Luftstrom (Quelle: [73])

geführt werden. Zur richtigen Dosierung wird zweckmäßigerweise eine verstellbare Drosselklappe im Bypass eingebaut (Abbildung 3.17 auf der Seite 33). Auf diese Weise lässt sich die Systemkennlinie so ändern, dass Punkt A in Abbildung 3.15 auf der Seite 32 nach C verschoben wird ($p_s = \text{konst.} = 120 \text{ N/m}^2$). Die Systemkennlinie wird also in eine flachere Lage gebracht. Die Fläche zwischen A und C und der Abszisse ist ein Maß für den Verlust durch den Bypass.

Vergleich der beiden Maßnahmen Drosselung und Bypass ändern am Ventilator selbst nichts, nur an der Anlage. Da beide Maßnahmen mit verhältnismäßig hohen Verlusten verbunden sind, sollten sie nur bei Ventilatoren kleiner Leistung angewandt werden. Ob die zusätzliche Drosselung oder der Bypass zu wählen ist, hängt im Wesentlichen von der Kennlinie der Ventilatoren und dem Verlauf des Leistungsbedarfs zwischen den Punkten B und C

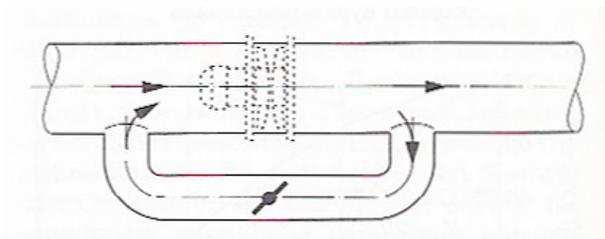


Abbildung 3.17: Abzweigen eines Teilluftstroms vom Hauptluftstrom (verstellbare Drosselklappe im Bypass) (Quelle: [73])

ab.

Steigt dieser von B nach C an, z.B. bei Radialventilatoren mit vorwärts gekrümmter Beschaufelung, dann sollte man der Drosselung den Vorzug geben. Nimmt der Leistungsbedarf jedoch von B nach C ab, so empfiehlt sich die Lösung mit dem Bypass. Diese trifft für Axialventilatoren und zum Teil für Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmter Beschaufelung zu.

Bei Anlagen mit wechselnden Betriebsbedingungen können die Drosselklappen über Stellantriebe verändert werden, so dass eine automatische Volumenstromregelung ermöglicht wird.

3.3.10 Beachtenswertes und praktische Hinweise

Wagner [73, S. 136–141] beschreibt folgende zwei Punkte:

Einfluss der Dichte vom Fördermittel auf die Leistungsdaten des Ventilators

Die Leistungsdaten der Ventilatoren gelten üblicherweise für ein Fördermittel der Dichte $1,2 \text{ kg/m}^3$ entsprechend Luft von 20 °C und einem Barometerstand von 1013 mbar (Normalzustand) mit einer Toleranz gemäß den VDI-Richtlinien 2044 „Abnahme und Leistungsversuche an Ventilatoren“ [71].

Bei abweichender Dichte ändern sich der vom Ventilator erzeugte Druck Δp_t und die Leistungsaufnahme an der Welle P_W proportional der Dichte. Der Volumenstrom bleibt dagegen konstant.

Bei der Auswahl eines Ventilators ist Folgendes zu beachten: Handelt es sich um einen Ventilator für eine lufttechnische Anlage, bei der geringfügige Abweichungen vom Normalzustand der Luft vernachlässigt werden können, ist der Ventilator unmittelbar nach den Kennlinien oder Auswahltabellen auszuwählen.

Ist diese Vernachlässigung nicht möglich oder handelt es sich um die Förderung eines anderen Gases, muss der für die Anlage effektiv benötigte

Druck $\Delta p_{t,1}$ umgerechnet werden. Es ist der Druck $\Delta p_{t,L_0}$ zu bestimmen, den der Ventilator bei Förderdruck von Luft bei Normzustand erzeugen müsste, damit er bei der abweichenden Dichte den effektiv benötigten Druck $\Delta p_{t,1}$ tatsächlich erreicht.

Der *Volumenstrom bleibt unverändert*. Es empfiehlt sich, den Leistungsbedarf P_W nachzurechnen, insbesondere wenn:

$$\Delta p_{t,L_0} < \Delta p_{t,1}$$

Details zur Berechnung sowie Fallbeispiele sind bei Wagner [73, S. 139–140] zu finden, auf diese wird hier nicht näher eingegangen.

Diffusoren an Ventilatoren

Frei ausblasende Radial- und Axialventilatoren haben im Austrittsquerschnitt eine erhebliche Geschwindigkeitsenergie (dynamischer Druck), die in der Regel als Verlust zu betrachten ist.

Energieeffizienz Durch den Anbau eines Diffusors, ein sich stetig erweiterndes Rohrstück hinter dem Ventilator oder am Fortluftstutzen (Abbildung 3.18), lässt sich ein Teil des dynamischen Drucks in statischen Druck (nutzbare Energie) umwandeln. Dieser gewonnene Druck kommt dem Lüftungssystem zugute, so dass häufig die Antriebsleistung erheblich gesenkt werden kann und damit eine Einsparung an Investitions- und Betriebskosten erreicht wird. Fallbeispiele sind wiederum bei Wagner [73, S. 141–142] nachzuschlagen.

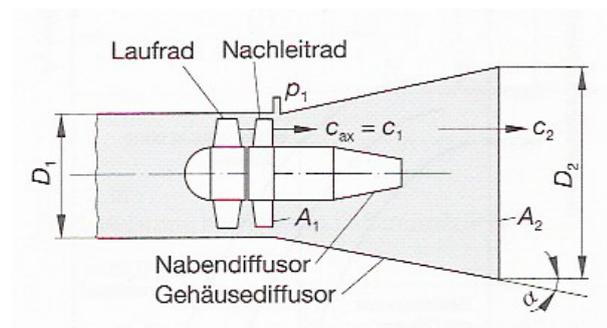


Abbildung 3.18: Axialventilator mit Nachleitrad, Nabendiffuser und Gehäusediffuser (Quelle: [73])

3.3.11 Antriebsarten

Wagner [73, S. 145] beschreibt die Motoren von Ventilatoren wie folgt:

„Motoren

Der Leistungsbedarf P_W an der Welle des Ventilators kann berechnet werden (siehe Abschnitt 3.3.4 auf der Seite 12 u.f.). Im Allgemeinen schlägt man dem Leistungsbedarf P_W noch eine gewisse Leistungsreserve zu. Diese beträgt bei direkt angetriebenen Ventilatoren etwa 5 bis 10%, bei über Keilriemen angetriebenen Ventilatoren je nach Größe 10 ... 20%.

Ein wichtiges Kriterium bei der Motorauswahl ist die Größe seines Beschleunigungsmomentes. Diese muss in einem bestimmten Verhältnis zum Massenträgheitsmoment des Ventilators stehen, damit ein einwandfreier Anlauf gewährleistet ist.

Das Massenträgheitsmoment J bezieht sich auf die drehenden Teile des Ventilators, also Laufrad, Nabe, Welle. Es ist das Produkt aus der Masse der drehenden Teile multipliziert mit dem Quadrat des *Trägheitsradius*. Es wird im Allgemeinen experimentell ermittelt und vom Ventilatorenhersteller angegeben. Die Motorenhersteller lassen grundsätzlich eine Anlaufzeit von 10 Sekunden zu. Damit kann der Motor überprüft werden nach der Beziehung:

$$t_A = \frac{J \cdot \omega}{M_b}, \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} : t_A = \frac{J \cdot n_M}{9,55 \cdot M_b} \quad (3.22)$$

t_A	Anlaufzeit in s
J	Massenträgheitsmoment des Ventilatorrades und des Motors in kg/m^2
n_M	Motorendrehzahl in min^{-1}
M_b	mittleres Beschleunigungsmoment in Nm als Differenz zwischen dem Motormoment M_M und dem Ventilatormoment M_W

Diese Beziehung gilt für direkten Antrieb. Bei Keilriemenantrieben ist mit dem sog. reduzierten Massenträgheitsmoment zu rechnen:

$$t_A = \frac{J_{red} \cdot n_M}{9,55 \cdot M_b} \quad (3.23)$$

$$J_{red} = J_M + \left(\frac{n_V}{n_M} \right)^2 \cdot J_V \quad (3.24)$$

Das Moment M_W kann aufgrund der Wellenleistung P_W und der Ventilatorendrehzahl n_V errechnet werden, das Beschleunigungsmoment M_b ist vom Motorenhersteller zu erfragen.“

Riemenantriebe

Bezüglich des Standes der Technik findet man bei Recknagel [58] und Wagner [73] Ausführungen zu Keilriemen. Diese besitzen nach Wagner [73, S. 145–146] „eine sehr gute Haftung durch die Keilwirkung zwischen Riemen und Scheibe. Der Keilriemen sollte so angelegt sein, dass die Riemengeschwindigkeit nicht größer als 20 m/s wird. Die Bestimmung erfolgt unter Berücksichtigung der DIN 2218 [19] nach Herstellerkatalogen, wo nach Wahl des Riemenprofils in Abhängigkeit von Scheibendurchmessern und Drehzahlen die übertragbaren Leistungen ermittelt werden“.

Nach Recknagel [58, S. 1165] zeigen Flachriemen wesentlich günstigere Wirkungsgradverläufe als Keilriemen. Näher geht er darauf nicht ein.

Weiteres zu Riemen wird daher im Kapitel 4.5 „Antriebe und Riemenausch“ ab Seite 99 näher behandelt.

Kupplungen

„Kupplungen dienen zur Verbindung drehender Maschinenteile. Bei Ventilatoren verbinden diese den Motor mit dem Ventilatorrad.

Sie haben die Aufgabe, bei einer bestimmten Drehzahl n ein Drehmoment M zu übertragen.

Grundlage der Dimensionierung ist deshalb die Ventilator Drehzahl n_V und das Drehmoment an der Ventilatorwelle M_W bzw. die Wellenleistung P_W . Die Beziehung lautet:

$$M_W = \frac{P_W}{\omega}, \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (3.25)$$

$$M_W = 9549 \cdot \frac{P_W}{n_V} \quad (3.26)$$

M_W	Drehmoment des Ventilators in Nm
P_W	Wellenleistung in kW
n_V	Ventilator Drehzahl in min^{-1}

In lufttechnischen Anlagen werden vorwiegend elastische, direkt wirkende Kupplungen eingesetzt. In besonderen Fällen (wenn der Motor in der max. Anlaufzeit nicht seine Nenndrehzahl erreicht) werden auch Fliehkraftkupplungen verwendet, bei denen erst der Motor auf seine Nenndrehzahl hochläuft und dann der Ventilator von der Kupplung durch Reibungskräfte beschleunigt wird, bis er seine Betriebsdrehzahl erreicht hat.“[73, S. 146]

3.3.12 Anlagen-Einbaufaktoren

„Ventilatoren werden oft so eingebaut, dass die Strömungsverhältnisse vor und hinter ihnen nicht ideal sind. Die dabei auftretenden Verluste sind einbaubedingt und werden daher gewöhnlich als Einbauverluste bezeichnet. Der Unterschied ist meist gem. Abbildung 3.19 durch den Drall am Eintritt sowie durch Druckverluste in den Anschlussstützen am Ein- und Austritt gegeben.“[73, S. 147]

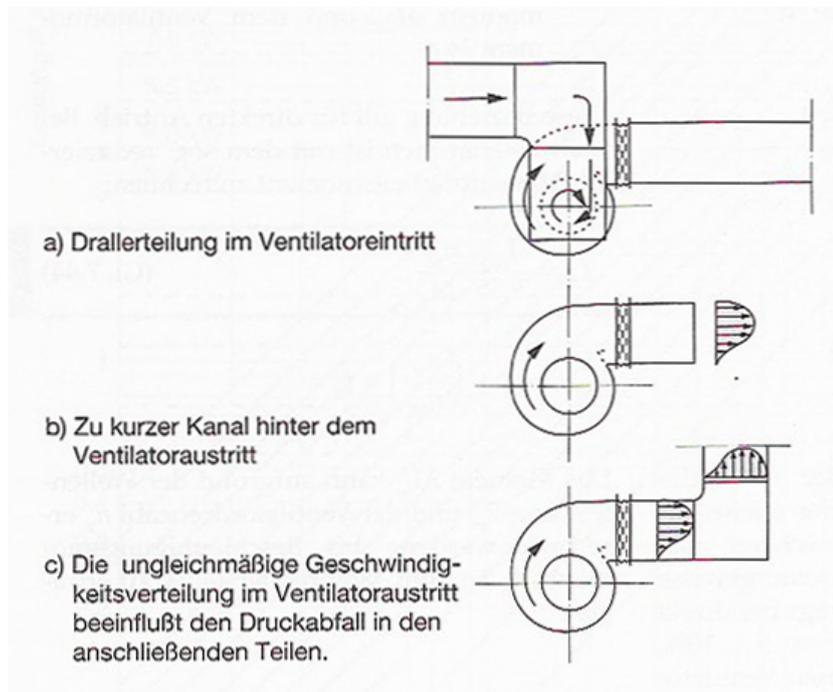


Abbildung 3.19: Beispiele für prüfstandabweichende Ventilator-Einbauten (Quelle: [73])

Nach Wagner [73, S. 151] ist „eine der häufigsten Ursachen dafür, dass eine Anlage nicht den gewünschten Volumenstrom liefert, ... der Einbauverlust“ (Abbildung 3.20 auf der Seite 38).

3.3.13 Effizienz-Kriterien

Das Arbeitsdokument der EU zu möglichen Ecodesign-Anforderungen bei Ventilatoren [27] hält fest:

Die EU-Richtlinie 2005/32/EC (Directive for energy using products) [32],

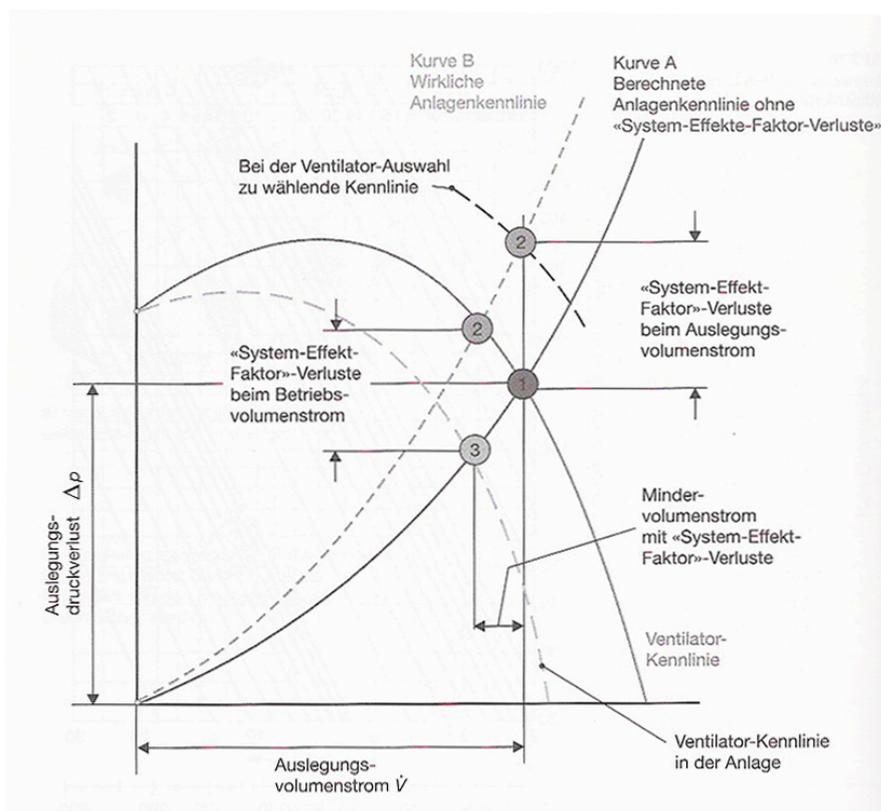


Abbildung 3.20: Mindervolumenstrom durch den «System-Effekt-Faktor» (Quelle: [73])

auch EuP-Richtlinie, definiert ökologische Kriterien für energiebetriebene Produkte. Sie ist sowohl für Hersteller, als auch für Importeure relevant [33].

Die Richtlinie gründete unter anderem Ecodesign-Anforderungen für Ventilatoren im Leistungsbereich von 125 W bis 500 kW. Die Studie Lot 11 [26] klassifiziert Ventilatoren in acht Kategorien (siehe Abbildung 3.21 auf der Seite 39).

Weiters zeigt sie, „energy in use phase is the only significant environmental aspects“. Die Ecodesign-Parameter in Annex I der EuP-Richtlinie werden nicht als bestimmend angesehen.

Ecodesign-Anforderungen

Das Dokument gibt Auskunft über die Mindest-Energieeffizienz-Anforderungen, welche in den Jahren 2010, 2012 und 2020 erzielt werden sollen. Abbildung 3.22 auf der Seite 40 zeigt die angedachten Werte für 2010, welche dem-

Product Category	Direction of flow	Type	Typical Sizes [mm]	Example
1	Axial	≤ 300 Pa (static pressure)	200 - 1,400	 Source: Helios
2		> 300 Pa (static pressure)	200 - 1,400	
3	Centrifugal	forward curved blades (with casing)	120 - 1,600	 Source: Nicotra
4		backward curved blades (no casing)	120 - 1,600	 Source: ebmpapst
5		backward curved blades (with scroll housing)	120 - 1,600	 Source: Ziehl-Abegg
6	Other	Box fans	100 - 1,000	 Source: Fläktwoods
7		Roof fans	250 - 1,000	 Source: Gebhardt
8		Cross-flow fans	60 - 120	 Source: ebmpapst

Abbildung 3.21: Definition of product categories for ventilation fans 125 W – 500 kW (Quelle: [26])

nach in knapp einem Jahr zum Stand der Technik zählen sollten. Die in der Abbildung vorkommende Abkürzung MEL bedeutet „Minimum efficiency lines“.

Anforderung an die Produktinformation: Ab Jänner 2010 muss die „overall static efficiency of the product“ inkl. Motor und Kraftübertragung, in die Produktkataloge entsprechend der ISO 5801, einschließlich der Teststandards in Übereinstimmung mit der ISO 13348:2006, aufgenommen werden.

Bemessungs- und Berechnungsmethode für Ventilatoren

Der Messstandard für die Bewertung der Effizienz des Ventilators ist die ISO 5801. Die Toleranzklassen sollen entsprechend der ISO 13348:2006 verwendet werden.

Wenn ein Ventilatorprodukt Ventilator, Motor und Kraftübertragung enthält, sollte dasselbe in Übereinstimmung mit der „overall static efficiency“ des aktuellen Produkts bemessen werden.

Wird allerdings nur der Ventilator (ohne Motor) verkauft, muss die Effi-

Fan Category	Power Range		
	0.125-1 kW	1-10 kW	10 -500 kW
MEL1 - Axial ≤ 300 Pa	$3.42 \cdot \ln(P_{el}) + 27.12$		=35
MEL2 - Axial > 300 Pa	$2.28 \cdot \ln(P_{el}) + 29.75$		=35
MEL3 - Centrifugal forw w housing	$2.74 \cdot \ln(P_{el}) + 28.69$		=35
MEL4 - Centrifugal backw free wheel	$4.68 \cdot \ln(P_{el}) + 47.23$		=58
MEL5 - Centrifugal backw w housing	$4.56 \cdot \ln(P_{el}) + 44.49$		=55
MEL6 - Box fans	$7.53 \cdot \ln(P_{el}) + 25.66$		=43
MEL7 - Roof fans	$3.42 \cdot \ln(P_{el}) + 37.12$		=45
MEL8 - Cross-flow fans	=8	$11.73 \cdot \ln(P_{el}) + 8$	=35
Results should be rounded to one digit, P_{el} to be entered in kW			

Abbildung 3.22: Minimum energy performance requirements for fans on 2010 (Quelle: [27])

zienz nach folgenden Punkten berechnet werden [27].

Motor

- „If $P_{el} > 1,1kW$ use motor efficiency η_M as required to achieve EFF2 rating. The rating to be replaced by IE1 after the new IEC 60034-30 Ed. 1 efficiency classes have come into force.
- If $P_{el} < 1.1kW$ calculate motor efficiency η_M by the following formula: $\eta_M = 0,0629 \cdot \ln(P_W) + 0,653$ (P_W = shaft power). This equation is based on the typical efficiencies of single phase motors with capacitor.“

Kraftübertragung

- „If the fan has a direct drive, transmission efficiency η_T of 100% is to be assumed,
- If the fan has a belt drive:
 - for $P_{el} < 1kW$: assumed transmission efficiency η_T of 75%;
 - for $1kW < P_{el} < 5kW$: assumed transmission efficiency η_T of 83%;
 - for $P_{el} > 5kW$: assumed transmission efficiency η_T of 90%.“

Regelung

- „for $P_{el} < 1kW$: assumed control compensation factor C_c of 1.15;
- for $1kW < P_{el} < 5kW$: assumed control compensation factor C_c of 1.11;

- for $P_{el} > 5kW$: assumed control compensation factor C_c of 1.04.“

Verluste

- „Assumed compensation factor for losses is ($C_m = 0.9$).“

Abbildung 3.23 auf der Seite 42 zeigt die Berechnungsschritte zu Ventilatoren, welche ohne Antrieb verkauft werden.

Anmerkungen

Anwendungsbereich

125 W – 500 kW

Die Kommission empfiehlt zusätzliche Maßnahmen durch nationale, regionale und lokale Behörden. Diese Maßnahmen sollten von Beginn an die dritte Stufe der Mindest-Energieeffizienz-Anforderungen für 2020 (siehe Abbildung 3.24 auf der Seite 43) in Forderung stellen [27]. In der Abbildung bedeutet MEP „Minimum energy performance requirement“.

Ecodesing-Anforderungen

„The preparatory study also identified the need to make generic requirements for the provision of information by manufacturers.

Depending on changes in ventilation fan markets and technological development, it is proposed to consider possible tighter ecodesing requirements no later than 5 years from the entry into force of this measure.“ [27]

Energieeffizienz-Levels

„The Lot 11 preparatory study has shown that the proposed energy efficiency levels lead to reduction in least life cycle cost to the consumer under average operating conditions of 4000 hours pa over 15 years of average life time and with 0,075 euros/kWh electricity price for industry. As the impact of the electricity price dominates in the total life cycle cost, possible increase in electricity prices would lead to increased least life cycle cost savings from the proposed minimum energy efficiency requirements.“ [27]

Benchmarks

„Ventilation fans cover a broad range of fan sizes, types and power ranges, which make it unpractical to specify benchmark values for the best products on the market. Instead of one benchmark value per product group, hundreds of values would have to be defined.“ [27]

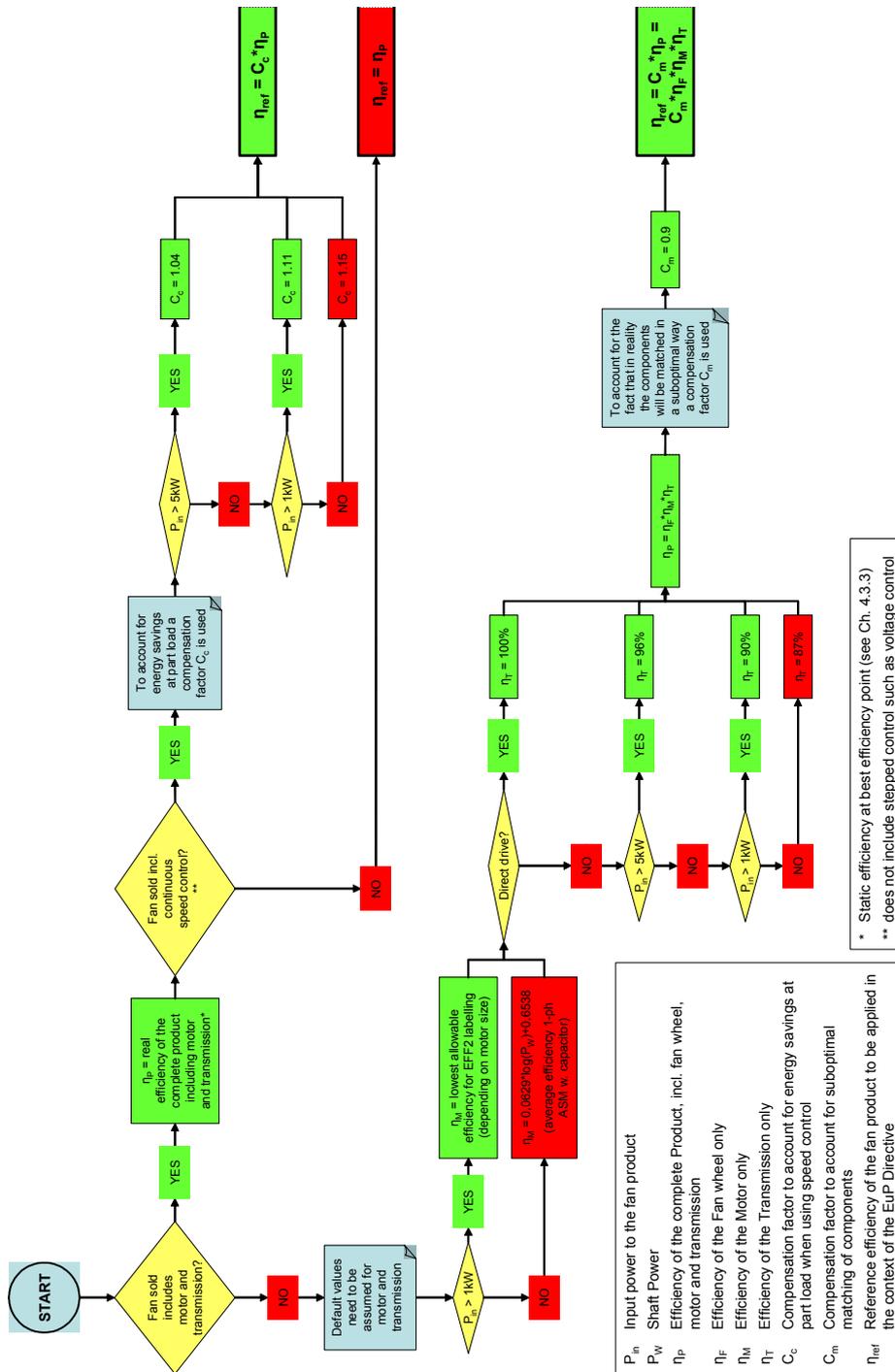


Abbildung 3.23: Berechnungsschritte für Ventilatoren ohne Antrieb (Quelle: [27])

Fan Category	Power Range		
	0.125-1 kW	1-10 kW	10 -500 kW
MEL1 - Axial ≤ 300 Pa	$3.42 \cdot \ln(P_{ei}) + 31.12$		=39
MEL2 - Axial > 300 Pa	$2.28 \cdot \ln(P_{ei}) + 33.75$		=39
MEL3 - Centrifugal forw w housing	$2.74 \cdot \ln(P_{ei}) + 32.69$		=39
MEL4 - Centrifugal backw free wheel	$4.68 \cdot \ln(P_{ei}) + 51.23$		=62
MEL5 - Centrifugal backw w housing	$4.56 \cdot \ln(P_{ei}) + 49.49$		=59
MEL6 - Box fans	if $(7.53 \cdot \ln(P_{ei}) + 29.66) < 24$ then MEP =24; if $(7.53 \cdot \ln(P_{ei}) + 29.66) \geq 24$ then MEP = $(7.53 \cdot \ln(P_{ei}) + 29.66)$		=47
MEL7 - Roof fans	$3.26 \cdot \ln(P_{ei}) + 41.5$		=49
MEL8 - Cross-flow fans	$2.74 \cdot \ln(P_{ei}) + 32.69$		=39
Results should be rounded to one digit, P_{ei} to be entered in kW			

Abbildung 3.24: Minimum energy performance requirements for fans on 2020 (Quelle: [27])

3.4 Lufttechnische Anlage

Voraussetzung für einwandfreie Funktion und wirtschaftlichen Betrieb einer lufttechnischen Anlage sind u.a. auch die richtige Planung und Auslegung des Kanalnetzes, d.h. vor allem eine sichere Abschätzung der Druckverluste. Die Druckverluste werden vor allem durch die vorgegebenen Kanallängen sowie die Wahl der Luftgeschwindigkeiten und der Kanalquerschnitte bestimmt. Auch die Festlegung von Übergangs- und Formstücken hat einen Einfluss auf den Druckverlust und damit auf die Betriebskosten. Die genaue Kenntnis der Druckverluste in Abhängigkeit vom Volumenstrom, die so genannte Anlagenkennlinie, ist auch für die optimale Auslegung bzw. Auswahl der Ventilatoren in der Anlage wichtig [73, S. 59].

Das Leitungssystem in Gebäuden und Industrieanlagen wird typischerweise installiert, nachdem die Hauptkonstruktionen/Hauptanlagen errichtet wurden. Dies erfordert teilweise häufige Krümmungen und Querschnittsänderungen. Hinzu kommt, dass meist rechteckige Lüftungskanäle installiert werden, während kreisförmige energetisch günstiger sind.

Darüber hinaus muss eine Ventilatoranlage nach der Installation so ausgelegt werden, dass überall die erforderlichen Luftmengen erreicht werden. Diese Auslegung beinhaltet zum Teil den Einsatz von Drosselklappen, was zusätzlich Druck- und Energieverluste mit sich bringt. Um diese zu minimieren, ist eine korrekte Planung der Lüftungsanlage nötig. [46, S. 9]

Die Planung und Auslegung von lufttechnischen Anlagen wird hier nicht betrachtet. Hierzu wird der Leser auf Fachliteratur wie [73] oder [58] verwiesen.

3.4.1 Be- und Entlüftungskonzepte

Lüftungseffektivität

Nach Recknagel [58, S. 1471] gibt es zwei Ziele der Lüftung:

- Die Zuluft (Außenluft) soll möglichst vollständig in die Aufenthaltszone gelangen, d.h. möglichst keine Kurzschlussströmungen außerhalb der Aufenthaltszone.
- Die Luft soll in Bezug auf Schadstoffquellen im Raum so geführt werden, dass diese schnellstmöglich in die Abluft gelangen und möglichst nicht die Menschen belästigen.

Die Wirksamkeit der Lüftung wird also gemessen an der Fähigkeit,

alte Raumluft in der Aufenthaltszone durch *frische* Außenluft zu ersetzen und Schadstoffe abzuführen.

Die Gütegrade für Austausch der Luft und Schadstoffabfuhr hängen im Wesentlichen von der Verweilzeit der Luft und der Verweilzeit der Schadstoffe im Raum ab. Man kennt vier Extremfälle von verschiedenen möglichen Raumströmungsformen (Abbildung 3.25) [58, S. 1471].

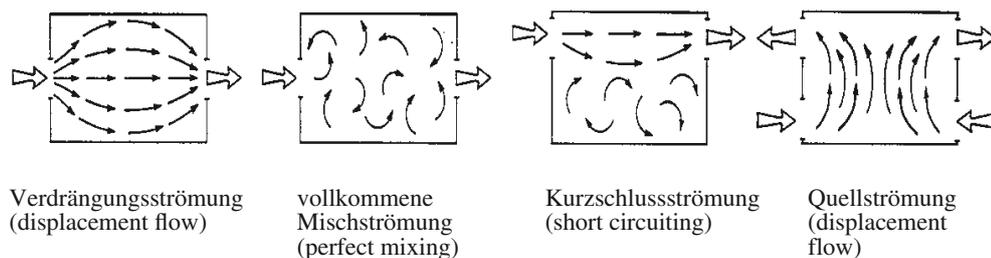


Abbildung 3.25: Extremfälle von Raumluftströmungsformen, idealisiert (Quelle: [58])

Lüftungskonzepte für Betriebsgebäude und -anlagen findet man bei Recknagel [58, S. 1588–1592]. Die folgenden Ausführungen erscheinen am relevantesten:

Fertigungsstätten

Hierbei unterscheidet man zum Abbau von Wärme- und Stofflasten nach ihrer Strömungsart drei Grundströmungsmuster, die im Raum oder in Teilbereichen eines Raumes durch die Luftzufuhr entstehen:

- Mischlüftung
Diese sind in Industriehallen Stand der Technik und weit verbreitet. Auch als Verdünnungs-, Strahl-, oder Induktionslüftung bezeichnet. Die Luft wird punktuell eingeblasen und vermischt sich mit der Raumluft. Je nach Ausblasegeschwindigkeit und Temperaturdifferenz dringt der Luftstrahl in den Raum („Wurfweite“) [14, S. 3].
- Turbulenzarme Verdrängungslüftung
Die einströmende Luft verdrängt die Raumluft ohne sich mit dieser zu vermischen. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die „verbrauchte“ Luft abgeführt [14, S. 3], z.B. in der elektronischen und optischen Industrie [67, S. 129].
- Schichtlüftung
Auch als Quelllüftung oder Eingrenzen bezeichnet [49]. Hierbei wird kühle Luft durch bodennahe Luftauslässe in den Raum geführt. Es bildet sich ein „Frischlufsee“. An lokalen Wärmelasten erwärmt sich die Luft und steigt auf. Dadurch können Wärme- und Schadstofflasten zielgenau und mit geringem Lufteinsatz abgeführt werden [14, S. 3].

Die Abbildung 3.26 auf der Seite 46 veranschaulicht die drei Lüftungsarten. Um das geeignete Lastabfuhrprinzip zu ermitteln, sind laut [49, S. 29–30] zusammen mit der Abbildung 3.26 folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Freisetzungsorte (Wärme-, Stofflasten, kombinierte Wärme- und Stofflasten) bestehen und welche Größenordnung haben diese?
- Welche Strömungsstörungen treten auf? Können Thermikströmungen zur Lastabfuhr genutzt werden?
- Welche Anforderungen sind in welchen Raumbereichen einzuhalten? Müssen sehr hohe Anforderungen eingehalten werden?

Dabei können die den Antworten entsprechenden Kriterien ggf. in Abbildung 3.26 angekreuzt werden. Das geeignete Lastabfuhrprinzip ergibt sich dann aus der Anzahl der jeweils vorhandenen Kreuze.

Weiteres soll der VDI 3802 entnommen werden [49].

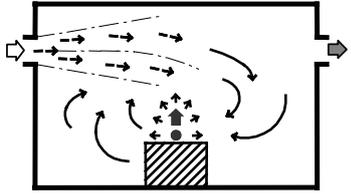
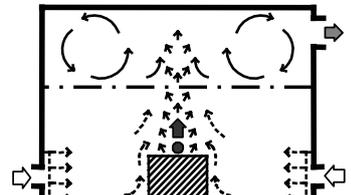
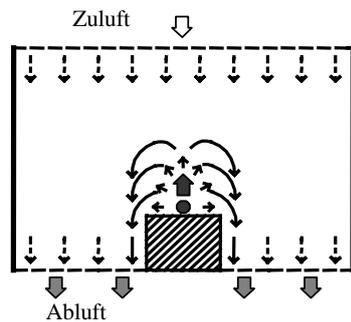
Lüftungsart, Lastabfuhrprinzip		Kriterien zur Auswahl	Beispiele
Mischen		<p>keine besonderen Anforderungen an die Luftqualität</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Priorität liegt auf niedrigem Luftstrom <input type="checkbox"/> keine oder geringe Wärmelasten bzw. Stoff- und Wärmequellen räumlich getrennt <input type="checkbox"/> sehr hohe Wärmelasten und sehr große Thermikluftströme im Arbeitsbereich <input type="checkbox"/> bereits aus dem Arbeitsbereich werden sehr große Erfassungsluftströme abgeführt 	Montagebetriebe, Laboratorien
Eingrenzen		<p>hohe Anforderungen an die Luftqualität im Arbeitsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> gekoppelte Wärme- und Stofflasten (die Stofflasten werden überwiegend durch die Thermikströmungen aus dem Arbeitsbereich abgeführt), Wärmelasten sind überwiegend durch freie Kühlung abzuführen <input type="checkbox"/> Thermikströmung möglichst ungestört <input type="checkbox"/> lufttechnische Installationen (Luftkanäle, Luftdurchlässe) im oder direkt über dem Arbeitsbereich möglich 	Gießereien, sonstige Hitzebetriebe, mechanische Fertigung
Verdrängen		<p>sehr hohe Anforderungen an die Luftqualität im Gesamt- oder Teilraum (Atembereich von Arbeitnehmern, Schutzbereich für Produktionsverfahren)</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> große Zuluftströme erforderlich ($720 - 1800 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) <input type="checkbox"/> freigesetzte Stoffe in Teilbereichen sollen durch eine abwärts gerichtete Strömung zum Boden transportiert werden 	Reinräume, Schleif- oder Lackierkabinen, Farbspritzräume

Abbildung 3.26: Lastabfuhrprinzipien und Kriterien zur Vorauswahl des Lüftungskonzepts (Quelle: [49])

Erfassungseinrichtungen

Dem Landesgewerbeamt Baden-Württemberg [49, S. 25–26] zufolge stehen zur Erfassung der Stoffe am Freisetzungsort drei Systeme zur Verfügung:

- Geschlossene Systeme
- Halboffene Systeme
- Offene Systeme

Abbildung 3.27 zeigt die drei unterschiedlichen Systeme. Hierbei ist die Einhausung bzw. Kapselung der Emissionsquelle die einfachste und sicherste Lösung. Die VDI 3802 weist auf Planungsrichtlinien hin. Oft sind diese Bauformen aus Handhabungsgründen nicht realisierbar. Daher muss häufig auf halboffene oder offene Bauarten zurückgegriffen werden. Die exakte Aus-

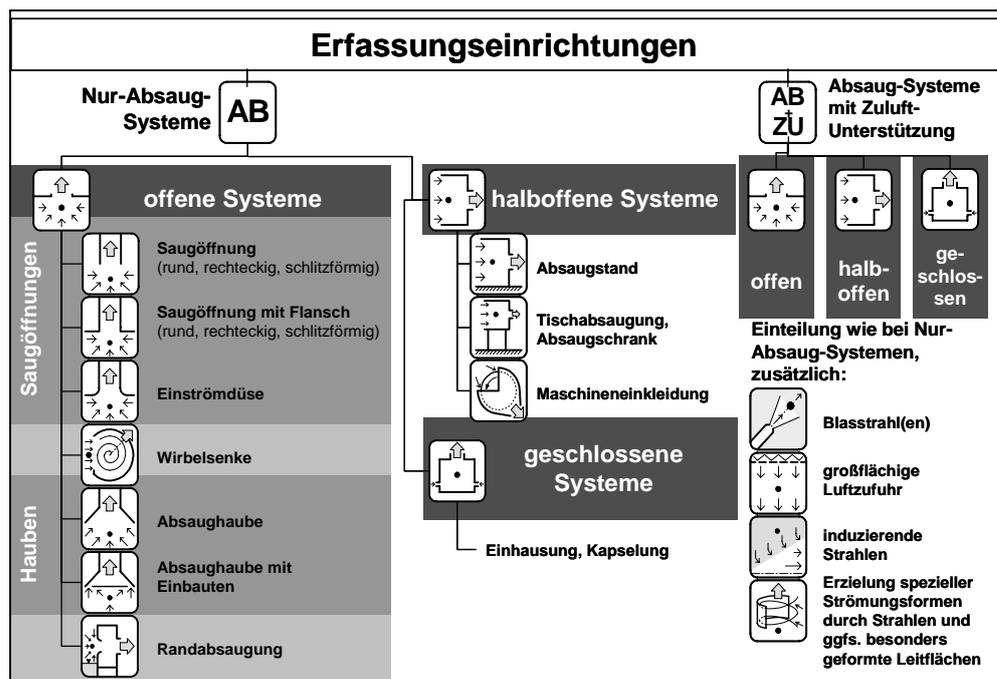


Abbildung 3.27: Bauarten von Erfassungseinrichtungen (Quelle: [49])

legung von Erfassungseinrichtungen ist notwendig. Mit Zunahme des Erfassungsluftstromes steigen ebenso die Investitions- wie die Betriebskosten (Luftkanal, Filter, Ventilator).

Die freigesetzten Stoffe sollten in geringer Entfernung von der Entstehungsstelle abgesaugt werden. Bei größerer Entfernung muss ein höherer Luftdurchsatz gewählt werden, der die Erfassungseinrichtung sehr leicht unwirtschaftlich werden lässt.

3.4.2 Bestandteile einer Lüftungs- und Klimaanlage

Folgende Bestandteile beinhaltet für gewöhnlich eine Lüftungs- bzw. Klimaanlage:

Recknagel [58, S. 1101] teilt die verschiedenen Luftarten wie folgt ein:

- | | | |
|------------------|------------------|----------------------|
| a) Ventilator | d) Lufterwärmer | g) Tropfenabscheider |
| b) Luftfilter | e) Schalldämpfer | h) Klappe |
| c) Wärmetauscher | f) Luftkühler | i) Luftkanäle |

Zuluft ist die dem Raum zugeführte Luft.

Abluft ist die aus dem Raum abströmende Luft.

Außenluft ist die aus dem Freien angesaugte Luft. Der Ausdruck „Frischlufte“ sollte zur Vermeidung von Verwechslungen nicht gebraucht werden.

Umluft ist der Teil der Abluft, der dem Raum wieder zugeführt wird. Umluft soll nur dann genommen werden, wenn die Qualität der Umluft der Zuluft entspricht.

Fortluft ist die ins Freie geblasene Abluft.

Mischluft ist die Mischung von Außenluft und Umluft.

Die Abbildung 3.28 veranschaulicht die Bauteile sowie die Terminologie einer Klimaanlage.

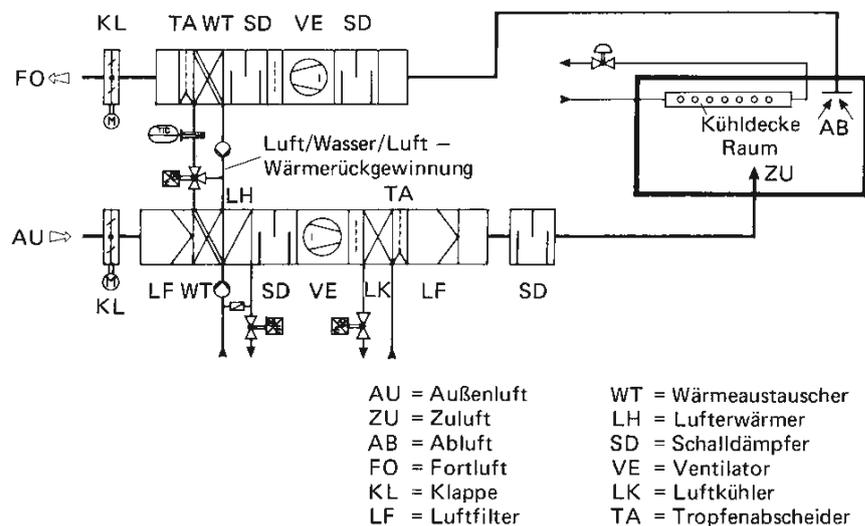


Abbildung 3.28: Terminologie der wichtigsten Teile einer Klimaanlage (Quelle: [58])

Im Rahmen der Maßnahmen (siehe Kapitel 4 auf der Seite 54 u.f.) wird

auch der Tausch von Luftfiltern betrachtet. In Folge dessen wird hier auf den Bauteil, Luftfilter, etwas näher eingegangen.

Luftfilter

Gemäß Wagner [73, S. 155] sind Luftfilter „Geräte und Apparate, mit denen teilchen- und gasförmige Verunreinigungen aus der Luft gefiltert und abgeschieden werden. Die atmosphärische Luft ist durch verschiedene Stoffe unterschiedlicher Teilchengröße und unterschiedlichen Materials verunreinigt. Die Teilchen bilden ein disperses Gemisch, der Durchmesser liegt in der Größe zwischen 0,001 und ca. 500 μm . Für dieses große Teilchenspektrum kommen für die Abscheidung verschiedene physikalische Effekte zum Tragen; gasförmige Verunreinigungen werden durch chemische und/oder physikalische Sorptionsvorgänge abgeschieden; die Schadstoffe werden damit an das Sorptionsmaterial gebunden.

Die natürliche Luft weist Verunreinigungen in der Konzentration zwischen 0,05 und 3,0 mg/m^3 auf. ... Man unterscheidet die Filter in Grob- und Feinstäube (meist auch als *Vorfilter* bezeichnet) und in Filter für Feinst- oder Schwebestäube (auch als *Schwebstoff-Filter* bezeichnet), wobei die Unterteilung aufgrund von genormten Prüfverfahren vorgenommen wird.“

3.4.3 Bestandteile einer industriellen Absaugungsanlage

Laut Recknagel [58, S. 1657–1658] besteht eine industrielle Absaugung (Abbildung 3.29 auf der Seite 50) im Allgemeinen aus folgenden Teilen:

- a) einer Erfassungseinrichtung an der Schadstoffquelle,
- b) einer Saug- und Druckleitung
- c) einem Ventilator
- d) gegebenenfalls einem Abscheider zur Abscheidung bzw. Rückgewinnung der mit der Luft abgesaugten Verunreinigungen.

3.4.4 Gründe für Be- und Entlüftung sowie Absaugung

Unter Punkt 3.2 auf der Seite 7 u.f. wurde bereits einleitend kurz auf die Einsatzgebiete von Ventilatorensystemen in der Industrie eingegangen. Die Gründe für die Lüftungstechnik sind mit den Aufgaben derselben, denen sich Recknagel [58, S. 1097–1098] widmet, gleichzusetzen: Mit Hilfe der Lufttechnik soll ein gewünschtes Raumklima sichergestellt werden. Je nach den

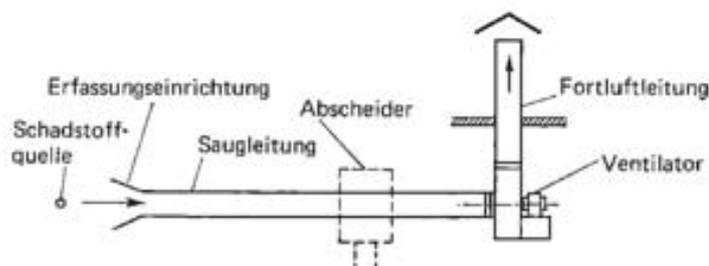


Abbildung 3.29: Schema einer industriellen Absaugungsanlage (Quelle: [58])

gestellten Anforderungen müssen dabei eine oder mehrere der folgenden Aufgaben erfüllt werden:

Außenluftversorgung

In Aufenthaltsräumen muss die von den Personen ausgeatmete, mit CO_2 angereicherte Luft, gegen Außenluft ausgetauscht werden.

Abfuhr von thermischen Lasten

Um bestimmte Raumlufttemperaturen einhalten zu können, müssen die Kühl- bzw. Heizlasten des Raumes abgeführt werden. Hierzu muss dem Raum gekühlte bzw. erwärmte Luft zugeführt werden.

Abfuhr von Feuchtelasten

Um bestimmte Raumluftfeuchten einhalten zu können, muss dem Raum je nachdem, ob sich dort Feuchtequellen oder -senken befinden, getrocknete Luft zugeführt werden.

Luftreinhaltung

Um die zulässigen Konzentrationen von Schadstoffen in Räumen (z.B. MAK-Werte) einhalten zu können, muss die mit Schadstoffen angereicherte Raumluft gegen schadstofffreie Luft ausgetauscht werden. Als Schadstoffe werden all jene Substanzen bezeichnet, von denen eine schädigende Wirkung ausgeht. Dabei geht es nicht nur um gesundheitsschädigende Wirkungen, wie sie z.B. durch hohe CO -Konzentrationen hervorgerufen werden. Auch Staub kann ein Schadstoff sein, wenn er z.B. bei der Chipproduktion zu einem hohen Produktionsausschuss führt.

Schutzdruckhaltung

Um einen ungewollten Luftaustausch mit der Umgebung zu unterbinden, muss ein Raum zu seiner Umgebung, je nach den Anforderungen,

in einem Überdruck (z.B. Reinraum) oder einem Unterdruck (z.B. Sicherheitslabor) gehalten werden. Hierzu müssen die dem Raum zu- und abgeführten Luftmassenströme unterschiedlich groß gewählt werden.

3.5 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch für die Luftförderung mit elektrisch angetriebenen Ventilatoren errechnet sich aus dem Leistungsbedarf (siehe Gleichung 3.11 auf der Seite 17) desselben und der Laufzeit, sprich den Betriebsstunden des Ventilators.

$$E = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p \cdot h}{\eta_L \cdot \eta_M \cdot \eta_W} \quad (3.27)$$

E	Energiebedarf [kWh/a]	η_M	Motorwirkungsgrad
\dot{V}	Volumenstrom [m^3/s]	η_W	Antriebswirkungsgrad
Δp	Gesamtdruckdifferenz [Pa]	h	Betriebsstunden pro Jahr [h/a]
η_L	Ventilatorwirkungsgrad		

Das Produkt der Teilwirkungsgrade wird oft zu einem Gesamtwirkungsgrad zusammengefasst. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn ein Ventilator direkt durch den Motor angetrieben wird.

Energieeffizienz Um den elektrischen Energieverbrauch zu verringern bzw. verbessern, gibt es entsprechend der Gleichung 3.27 folgende Möglichkeiten:

1. Reduktion des Volumenstroms
2. Druckverluste minimieren (Bauteile z.B. Filter, Luftleitungen)
3. Reduktion der Betriebszeiten
4. Einsatz effizienter Ventilatoren (mit hohem Wirkungsgrad)
5. Einsatz effizienter Antriebe (mit hohem Wirkungsgrad)

3.6 Einsparpotentiale für RLT-Anlagen

Der VDI-Bericht aus dem Jahre 2006 über Ventilatoren [70, S. 463] stellt fest, dass anhand des Alters einer Lüftungsanlage (Ventilator) noch keine

konkrete Aussage über mögliche Einsparungen gemacht werden kann. Richtig ausgelegte Ventilatoren alter Baureihen, die immer noch in ihrem optimalen Betriebspunkt laufen, können u. U. problemlos weiterhin so betrieben werden, da sich ein eventueller Umbau nur sehr spät amortisieren würde. Hingegen können neuere Ventilatoren, die falsch ausgelegt bzw. betrieben werden, problemlos wirtschaftlich sinnvoll ausgetauscht werden.

Gründe für einen wirtschaftlichen Betrieb von neuen Ventilatoren im Überblick [70, S. 463]:

- Nutzungsänderung des zu versorgenden Gebäudes
- Zu große „Sicherheitszuschläge“ bei der Planung – Planungsfehler
- Technische Verbesserung der neuen Ventilatorengeneration (verbesserte Strömungsverhältnisse und auch Verminderung der Schallemissionen)
- Verbesserte Regelungstechnik, Regelstrategie
- Ausführungsfehler beim Aufstellen der ursprünglichen Lüftungsanlage (z.B. Fehlen von Leitblechen)
- Sehr schlechter Wartungszustand der Lüftungsanlage (z.B. Verschmutzung der Register)

„Durch den Austausch des Ventilators lassen sich viele der genannten Punkte kompensieren, wodurch die RLT-Anlage effizienter und wirtschaftlicher betrieben werden kann. Je nach Laufzeit der Anlage und prozentualer Einsparung (bis zu 50%) sind hierbei Amortisationszeiten von unter zwei Jahren möglich. Die prozentuale Energieeinsparung durch einen Ventilatortausch lässt sich am sichersten durch eine entsprechende Anlagenanalyse ermitteln.“ [70, S. 463]

Mittels weiteren geeigneten Umbaumaßnahmen können noch mehr Einsparpotentiale ausgeschöpft werden [70, S. 467]:

- Optimierung der Volumenströme in dem Gebäude – Ermittlung des tatsächlichen Bedarfs und entsprechende Anpassung.
- Vermeidung / Entfernung von unnötigen Druckverlusten. Nicht mehr benötigte Einbauteile können entfernt werden, wie z.B. Heizregister bei einer entsprechenden Nutzungsänderung.

- Optimale, bedarfsgerechte Regelung der RLT-Anlage z.B. mittels eines Frequenzumrichters.
- Tageszeitschaltung – nachts Reduzierung oder Abschaltung der RLT-Anlage

„In der Summe dieser vielen, zum Teil kleinen Verbesserungsschritte, lässt sich die Effektivität von RLT-Anlagen meist erheblich steigern. Eine große Rolle spielt dabei neben der richtigen Auslegung auch der fachgerechte Einbau der Ventilatoren.

Jedoch muss die RLT-Anlage nach einer erfolgreichen Optimierung weiterhin betreut werden. Ohne eine entsprechende, fachgerechte Wartung lässt sich ein effizienter Betrieb der RLT-Anlage nicht dauerhaft aufrechterhalten. Dann kann auch ein kürzlich eingebauter, optimal ausgelegter Ventilator der neuesten Generation nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden.“ [70, S. 467]

Kapitel 4

Maßnahmen

4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden fünf Maßnahmen zur Verbesserung lufttechnischer Anlagen erläutert. Weiters wird ein Vorschlag für eine energetische sowie ökonomische Bewertung der jeweiligen Maßnahme aufgezeigt.

Preislisten

Die Preislisten zu den einzelnen Komponenten, wie z.B.: Frequenzumrichter, Ventilator usw. dienen als reine Richtpreise für die Abschätzung. Die Recherche sowie das Zusammenstellen dieser Daten erwies sich als schwierig. Daher kann kein Anspruch auf Vollständigkeit sowie Richtigkeit dieser Preislisten gegeben werden.

Energiekosten

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung der Maßnahmen werden Berechnungsbeispiele angeführt. Um diesen eine einheitliche Aussage zu geben, wurden die Preise für die Energiekosten auf 0,10 EUR/kWh abgeglichen. Der Wert wurde im Zuge der Recherche anhand diverser Quellen: [3], [60], [44] u.a. festgelegt. Dieser Wert gilt ebenso als Richtpreis, da jedes Unternehmen einen speziellen Vertrag mit seinem Energieanbieter hat.

4.2 Bedarfsgerechte Steuerung und Regelung

4.2.1 Allgemeines

Die Wichtigkeit der Regelung in Bezug auf die Energieeffizienz hebt Radgen [56, S. 78] hervor: „Control System ... a very important system when it comes to energy saving“. Die Steuerung der Betriebszeiten einerseits sowie die Steuerung der Luftmenge (variabler Luftvolumenstrom mittels bedarfsgerechter Steuerung – z.B. Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter, siehe dazu Abschnitt 4.3 auf der Seite 60 u.f.) auf der anderen Seite sind hierbei die Schlüsselparameter.

Nach der DIN EN 15239 [22, S. 11] ist die Übereinstimmung zwischen den Nutzungszeiten des Gebäudes und den Laufzeiten der Lüftungsanlage ein wichtiger Faktor bei der Energieeinsparung. Dabei sind erhebliche Einsparungen möglich.

Betriebszeiten

Oft laufen Lüftungsanlagen unabhängig vom Bedarf. Hier empfiehlt sich, die Notwendigkeit der Lüftung zu verschiedenen Zeiten des Tages, der Woche und des Jahres zu analysieren. Nach Ravel [10, S. 68] ist sicherzustellen, dass die Lüftungstechnische Anlage nur in Betrieb ist, wenn dies erforderlich ist.

Bedarfsgerechte Steuerung

Laut Rechnagel [58, S. 1466-1471] erfolgt die Bestimmung des notwendigen Volumenstroms je nach Art der Anlage von verschiedenen Gesichtspunkten:

- a) Bestimmung nach dem stündlichen Außenluftwechsel (Luftwechselraten)
- b) Bestimmung nach der Außenlufttrate
- c) Bestimmung nach der Kühllast
- d) Bestimmung nach der Luftverunreinigung (MAK-Werte)

Der Initiative Energieeffizienz [15, S. 5] zu Folge wird die Maximalleistung von lufttechnischen Anlagen oft nur während einer kurzen Zeit gebraucht. Für die restliche Zeit reicht ein Teil der Leistung aus, um die bestimmungsgemäße Aufgabe zu erfüllen. Beispiele für solche Teillastfälle sind z.B. Nachtschicht- od. Wochenendbetrieb.

Daher ist beim Betrieb der Anlage darauf zu achten, dass diese möglichst bedarfsgerecht arbeitet und ihre Aufgabe mit möglichst geringem Energieaufwand erfüllt [10, S. 68].

Umbauten an der lufttechnischen Anlage, wie z.B. das Stilllegen diverser Zonen, ändern den Luftstrombedarf derselben. Daher sollte im Anschluss daran ebenso eine Neuadaptierung der Regelung/Steuerung vorgenommen werden [36].

Durch die Regelung der Anlagenleistung auf den tatsächlichen Bedarf können in erheblichem Maße Betriebskosten gespart werden.

Einher mit dieser Maßnahme geht die wärmetechnische Einsparung bezüglich der Luftkonditionierung (Heizen, Kühlen und Befeuchten). Da während der Stillstandszeiten der lufttechnischen Anlage nicht nur der Ventilator keine Energie benötigt, sondern auch die Register für die Luftkonditionierung nicht im Einsatz stehen. Somit wird auch hier Energie gespart [36].

4.2.2 Einsparungspotential

Radgen [56, S. 78] weist folgendes Potenzial aus:

- Betriebszeiten („operation schedule“): **10 – 50%**

4.2.3 Beschreibung der Maßnahme

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass mit einem bedarfsgerechten Betrieb der Energieverbrauch einer Lüftungsanlage oft wesentlich reduziert werden kann [20, S. 53].

Das bloße Ein-/Ausschalten der Anlage bei Nichtbedarf stellt ein hohes Einsparpotential dar: „There is much energy that can be saved in stopping the fan when the ventilation is not needed“ [56, S. 78].

Häufig sind die einfachsten Maßnahmen wie Handschalter und Zeitschaltuhr die wirksamsten [10].

Um die Betriebszeiten zu minimieren, „it is important to analyse the need for ventilation during different parts of the year, month and day. Using this analysis to set up an optimised timer schedule could dramatically reduce energy demand. An example of the large saving potential is the need for ventilation during 'out of hours' time in commercial buildings and industry“ [56, S. 78]. „Die für die Inspektion verantwortliche Person muss, sofern möglich, die Einstellungen der Regeleinrichtung aufzeichnen ... und diese mit den Nutzungszeiten des Gebäudes vergleichen“ [22, S. 11].

Einfache Verfahren zur Anpassung des Ventilatorsystems an den Bedarf der Anlage können hierbei angewendet werden. Die EN 13779 [20, S. 53] weist auf folgende Mittel hin:

- Handschalter
- Kombination mit Lichtschalter
- Schaltuhr (Tag, Woche oder volles Jahr)
- Endschalter am Fenster

Bei wechselndem Bedarf kann der Betrieb des Ventilatorsystems über die Erfüllung bestimmter Kriterien im Raum erfolgen. In Räumen, die von Personen genutzt werden, können dann für die Regelung der Lüftung nach dem tatsächlichen Bedarf folgende Sensoren eingesetzt werden [20, S. 53]:

- Bewegungssensoren
- Zählsensoren
- CO₂-Sensoren
- Mischgas-Sensoren
- Infrarotsensoren

Des Weiteren werden

- Temperatur-Sensoren und
- Feuchte-Sensoren

eingesetzt.

Schweizer [60] von der Firma Bösch zu Folge werden in der Industrie CO₂- und Bewegungssensoren selten eingesetzt. Der Temperatur-Sensor zählt zu den Standardapplikationen. Über die Praxisrelevanz der anderen Sensoren konnte keine qualitative Aussage gewonnen werden.

Tipps zur Maßnahme

Die Initiative Energieeffizienz [15, S. 5] sowie Schweizer [60] nennen folgende hilfreiche Informationen zur Umsetzung der Maßnahme:

- Man erstelle ein Lastprofil der Anlage und ermittle, ob der größte Teil des Energieverbrauchs insgesamt im Volllast- oder im Teillastbetrieb stattfindet.
- Man sehe Anlagen, die z.B. nur während der Produktion benötigt werden, mit Zeitschaltuhren. Die Sonderprogramme in diesen Uhren können nach Bedarf eingestellt werden.
Eine Zeitschaltuhr umgeht im Vergleich zum Handschalter den Fehlerfaktor Mensch.
- Man programmiere in die Anlagensteuerung so viele Auszeiten wie möglich ein, z.B. durch Einbeziehung von freier Lüftung, Abschaltung der Lüftungsanlage außerhalb der Arbeitszeit, etc.
- Man steure und regele einzelne Bereiche mit unterschiedlicher Nutzung getrennt voneinander.
- Man prüfe bei Anlagen, die überwiegend im Teillastbetrieb arbeiten, die Nachrüstung einer elektronischen Drehzahlregelung.

4.2.4 Kriterien für den Einsatz der Maßnahme

Dem Experten [64] zufolge ist eine **Dynamische Gebäude- und Anlagen-simulation**, wie sie [75] erwähnt, nicht praxisüblich. Trotzdem sei diese Bemerkung hier erlaubt: Mittels einer bedarfsgerechten Parametrierung für die Regelung von Lüftungsanlagen sind große Einsparpotentiale möglich. Zum Ausschöpfen dieser Einsparpotentiale ist jedoch eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulation für jedes Einzelobjekt notwendig.

4.2.5 Bewertung der Maßnahme

Die Abschätzung der Einsparung durch die Verringerung der Betriebszeiten kann über eine einfache Schlussrechnung erfolgen.

Beispielsweise läuft die Anlage zuerst 24 h pro Tag – am Stromzähler kann die verbrauchte Energie in kWh über die 24 h ablesen werden. Ergibt die Analyse des Lastprofils eine benötigte Anlagenlaufzeit von nur 8 h pro Tag, ergibt sich die Einsparung mit:

Energieeinsparung (ΔE)

$$\Delta E = E_{t_{alt}} - E_{t_{neu}} = E_{t_{alt}} \cdot \left(1 - \frac{t_{neu}}{t_{alt}}\right) \quad [\text{kWh/a}] \quad (4.1)$$

ΔE	Energieeinsparung
$E_{t_{alt}}$	Energiekosten des bestehenden Lastprofils
$E_{t_{neu}}$	Energiekosten des neu ermittelten Lastprofils
t_{alt}	Anlagenlaufzeit des bestehenden Lastprofils
t_{neu}	Anlagenlaufzeit des neu ermittelten Lastprofils

Im Beispiel wären dies ein Drittel des alten Energieverbrauchs.

Energiekosteneinsparung (ΔK_E)

$$\Delta K_E = \Delta E \cdot k_e \quad [\text{EUR/a}] \quad (4.2)$$

ΔK_E	Energiekosteneinsparung
k_e	Strompreis

Investitionskosten (K_I) Mögliche Investitionskosten sind z.B. die Anschaffung einer Zeitschaltuhr. Die Netto-Richtpreise bewegen sich hier im Bereich von 70,00 – 310,00 EUR [65, S. 19].

4.2.6 Kennzahlen

- Die Verringerung der Betriebszeiten einer lufttechnischen Anlage von einem 24h-Betrieb auf den Betrieb während der Arbeitszeit (8 h) reduziert den Energieverbrauch um zwei Drittel.

4.2.7 Normen

DIN EN 15239: Lüftung von Gebäuden – Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen. August 2007

DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüfungs- und Klimaanlageanlagen und Raumklimasysteme. September 2007

4.3 Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter

4.3.1 Allgemeines

Zonen, welche eine lufttechnische Anlage versorgt, benötigen nicht immer jene Luftmenge, auf die sie ausgelegt wurden, z.B. während der Nachtschicht. Im Zuge von Umbauarbeiten können diverse Bereiche einer Anlage stillgelegt werden, da sie nicht mehr in Verwendung stehen. In diesen Teillastfällen muss der Ventilator nicht seinen Nennvolumenstrom liefern. Somit kann das Ventilatorrad mit einer verminderten Drehzahl (als der Nenndrehzahl) laufen.

Zur stufenlosen Variation der Antriebsdrehzahl (von Null bis zur Nenndrehzahl) gibt es mehrere Möglichkeiten: transformatorische Drehzahlregelung (Trafo-Spannungsregelung), EC-Motoren, mechanische Drehzahlregelung, Nebenschlussmotoren sowie elektrische Drehzahlregelung mittels Thyristorsteller oder Frequenzumrichter (FU) [15, S. 4], [1].

Drehzahlregelungen bei Ventilatoren bieten die effizienteste Möglichkeit, den Luftstrom eines Ventilators zu kontrollieren. Durch die Reduktion der Drehzahl wird weniger Energie an den Luftstrom übermittelt, was wiederum bedeutet, dass weniger Energie für die Drehzahlregelung verbraucht wird. Zwei Einrichtungen werden für die Drehzahlregelung eines Ventilators verwendet: polumschaltbare Motoren sowie Antriebe mit einstellbarer Drehzahl. Zu Letzteren zählen Frequenzumrichter [69, S. 44].

„Mit einem Frequenzumrichter kann die Statorspannung und Frequenz des Asynchronmotors stufenlos verändert werden. Dadurch wird aus dem Standardmotor ein drehzahlveränderliches Antriebssystem“[39]. Daher werden Frequenzumrichter in Verbindung mit preiswerten Standard-Asynchronmotoren immer häufiger verwendet und sind in der Industrie weit verbreitet. Sie stellen eine robuste sowie komfortable Lösung dar und arbeiten insbesondere bei Anlagen mit einem weiten Regelbereich sehr energieeffizient [15, S. 4], [1].

Ihre zwei Hauptanwendungsgebiete findet man bei Pumpen- und Lüfteranwendungen sowie Hebe- und Fortbewegungsanwendungen [8, S. 77].

Achtung bei Volllastbetrieb: Aufgrund ihrer internen Verluste (ca. 3–5%) mindern Frequenzumrichter die Effizienz des Gesamtsystems im Volllastbetrieb. Im Teillastbetrieb weisen sie jedoch ein hohes Einsparpotential auf. Signifikante Energieeinsparungen können unter anderem bei Pumpen und Ventilatoren erzielt werden [2, S. 132].

Herkömmliche Strategien der Regelung

Regelungsarten Folgende Verallgemeinerungen treffen für die bereits bekannten Regelarten zu (siehe auch Abbildung 4.1) [15, S. 5]:

- Drossel- und Bypassregelungen sind sehr ineffizient. Nur bei nahezu ständigem Volllastbetrieb sollten diese eingesetzt werden.
- Drallregelungen eignen sich für Volllastbetrieb bzw. den oberen Teillastbereich.
- Drehzahlregelungen sind besonders wirtschaftlich, wenn die Anlage im mittleren Teillastbetrieb arbeitet.
- Laufschaufelregelungen kommen nur bei Axialventilatoren zum Einsatz. Für einen sehr großen Regelbereich sind sie die beste Lösung. Weiters stellen sie bei größeren Axialventilatoren eine verbreitete Methode dar, um den Luftstrom zu regeln [56, S. 78].

Generell ist eine Anpassung der Ventilatorleistung gegenüber der Regelung mit Drosselklappen und Bypässen zu bevorzugen.

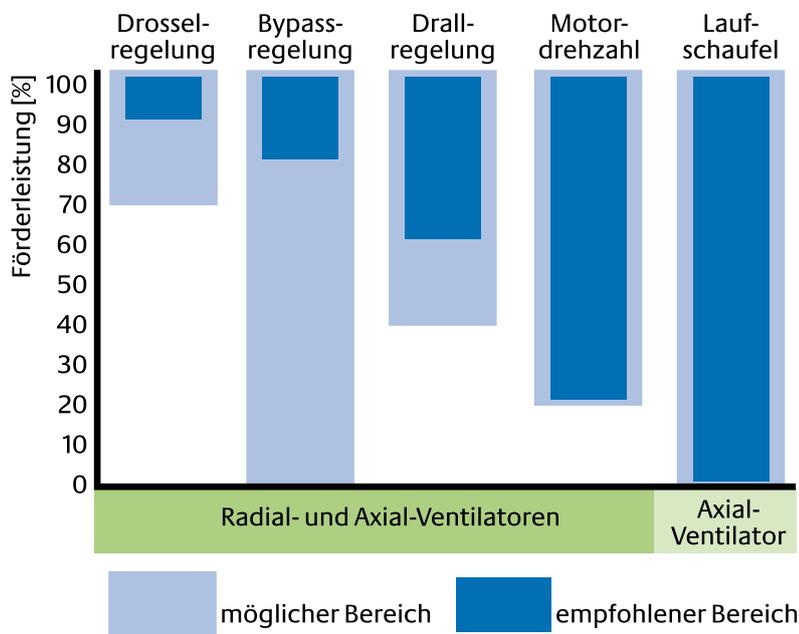


Abbildung 4.1: Regelbereiche (Quelle: [15])

Auf Grund der oben genannten Tatsachen sollte man im Betrieb die Umsetzung einer **bedarfsgerechten Steuerung** anstreben:

Nach [15, S. 5] wird die Maximalleistung von lufttechnischen Anlagen oft nur während einer kurzen Zeit gebraucht. Für die restliche Zeit reicht ein Teil der Leistung aus, um die bestimmungsgemäße Aufgabe zu erfüllen.

Daher ist beim Betrieb der Anlage darauf zu achten, dass diese möglichst bedarfsgerecht arbeitet und ihre Aufgabe mit möglichst geringem Energieaufwand erfüllt [10, S. 68].

Durch die Regelung der Anlagenleistung auf den tatsächlichen Bedarf können in erheblichem Maße Betriebskosten gespart werden: Ein Beispiel stellt die CO₂-Überwachung, bei der die Luftstromrate über einen definierten CO₂-Wert geregelt wird, dar. Somit wird bei geringer Belegung der Räume Energie eingespart. In solchen Fällen kann das Energieeinsparpotential 30% betragen [56, S. 78].

Anlaufproblematik Beim Anlauf nimmt der Asynchronmotor sehr hohe Ströme auf. Um die Belastung des Stromnetzes zu reduzieren, wird der Motor bei grösseren Leistungen mit einer tieferen Spannung angefahren. Die hohen Anlaufströme und die mechanischen Anfahrstöße können mittels Stern-Dreieck-Schaltung oder auch mit einem Sanftanlaufgerät reduziert werden. Der Softstarter wird normalerweise nach dem Hochfahren überbrückt [40].

Der Frequenzumrichter

Funktion des Frequenzumrichters „Mit einem Frequenzumrichter kann die Statorspannung und Frequenz des Asynchronmotors stufenlos verändert werden. Dadurch wird aus dem Standardmotor ein drehzahlveränderliches Antriebssystem“ [39].

Brosch [8, S. 74–77] betrachtet das Verhalten der Asynchronmaschine bei Frequenzsteuerung:

„Die Veränderung der Speisefrequenz f ändert die Drehfeldfrequenz n_d bei konstanter Polpaarzahl p

$$n_d = \frac{f}{p} \quad (4.3)$$

Über die Veränderung der Drehfeldspeisefrequenz lässt sich die Drehfeldfrequenz verlustarm stufenlos verstellen. Damit die Maschine magnetisch optimal arbeitet, muss der Maschinenhauptfluss Φ_H konstant gehalten werden. Dies erfordert einen konstanten Magnetisierungsstrom I_μ . Den Magnetisierungs-

strom erhält man zu

$$I_{\mu} = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_H} = \text{konstant} \sim \frac{U}{f} \quad (4.4)$$

Wird zur Drehzahlverstellung die Speisefrequenz f verändert, muss gleichsinnig frequenzproportional die Speisespannung U verändert werden, damit der magnetische Zustand erhalten bleibt.“

Pumpen/Lüfter-Kennlinien

Im Regelkreis wird die Regelgröße mittels Sensor überwacht und auf den Sollwert geregelt (z.B. Pumpenbetrieb: Über PI-Regler wird der Druck im Rohrleitungsnetz konstant gehalten). Bei der quadratisch steigenden Drehmomentenkennlinie, wie sie Pumpen oder Lüfter zeigen, kann der Magnetisierungsstrom frequenzabhängig reduziert werden. Man stellt dann die entsprechende Kennlinie am Umrichter ein, wie Abbildung 4.2 zeigt (Energiesparbetrieb) [8, S. 76–77].

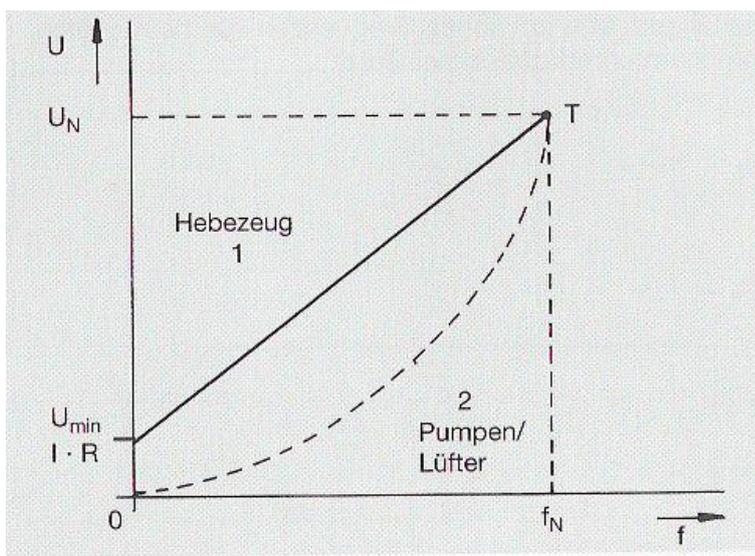


Abbildung 4.2: U/f -Kennlinie für Hebezeug- (1) und Pumpen/Lüfter (2) (Energiesparkennlinie) (Quelle: [8])

4.3.2 Einsparungspotential

Der Theorie zufolge sinkt die Antriebsleistung mit der dritten Potenz der Drehzahl sowie des Volumenstroms: $P \sim n^3$, $P \sim \dot{V}^3$ [58, S. 1155].

Daraus folgt, dass bei einer Halbierung des Volumenstroms die Antriebsleistung auf ein Achtel der Nennleistung sinkt.

Radgen [56, S. 78] weist der Optimierung der bedarfsabhängigen Steuerung (demand control) ein Potential von **-5 – 50%** zu. Der Einsatz eines Frequenzumrichters könnte bei nicht benötigter Volumenstromregelung, sprich Volllast, den Energieverbrauch um 5% heben. Dadurch kommt der negative Prozentbereich bei der Einsparung zustande.

Hohe Einsparungen gegenüber Drossel- und Drallregelung Da ausschließlich drehzahlregelte Systeme durch ihre Ausrichtung an der Anlagenkennlinie jeweils den optimalen Wert erreichen, sind in einer Beispielrechnung signifikante Energieeinsparungen von 71% gegenüber der Drallregelung und 80,3% gegenüber der Drosselregelung am Betriebspunkt 50 (50% des Auslegungsvolumenstroms) zu verzeichnen (Abbildung 4.3) [59].

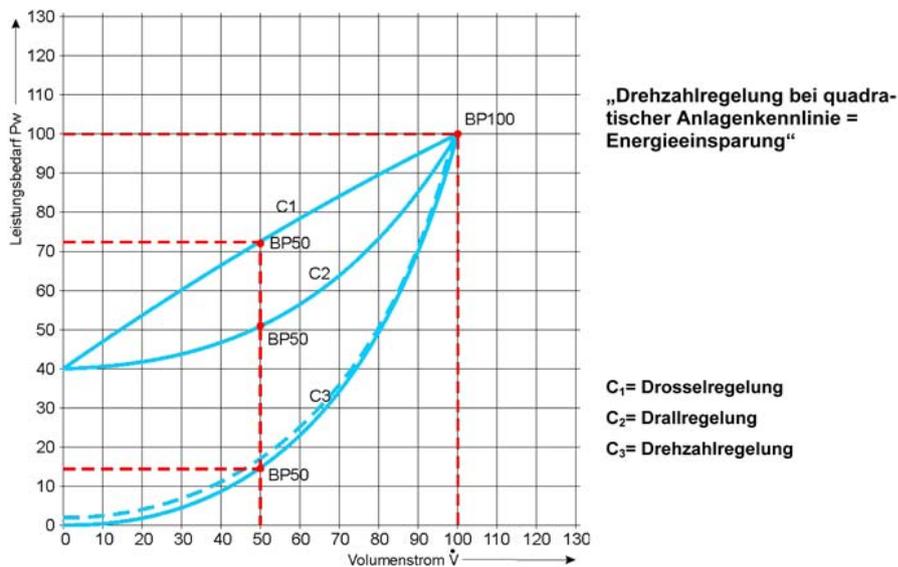


Abbildung 4.3: Gegenüberstellung der Leistungsbedarfskurven C aufgetragen über den Volumenstrom in % bezogen auf den Auslegungspunkt (Quelle: [4])

4.3.3 Vorteile und Nachteile

Vorteile des Frequenzumrichters

- FUs verbessern die Effizienz des Ventilators im Betrieb über einen weiten Bereich der Einsatzbedingungen [69, S. 44].
- FUs bieten eine effektive und einfache Methode zur Regelung/Steuerung des Luftstroms [69, S. 44].

- Geringere Beanspruchung im Teillastbereich:
Auch im Teillastbereich laufen drall- und drosselgeregelte Ventilatoren mit voller Drehzahl. Der nicht benötigte Fördervolumendurchsatz wird mehr oder weniger abgesperrt. Es kommt daher zu Druckschwankungen und Schwingungsanregungen, die Laufzeug, Gehäuse und Regelorgane auf Dauer belasten [4, S. 45].
- Wenn die Ventilatordrehzahl abfällt, bewegt sich die Leistungskurve des Ventilators in Richtung des Ursprungs. Dies führt zu essentiellen Kostenvorteilen während Perioden mit geringem Verbrauch [69, S. 45].

Sekundäre Vorteile

- Bessere Kontrolle des Volumenstroms [69, S. 44].
- Nachrüstbarkeit an bestehenden Motoren [69, S. 44].
- Kompakte Bauweise [69, S. 44].
- Eliminierung der Verschmutzungsprobleme im Vergleich mit mechanischen Kontrollsystemen [69, S. 44]:
„Weniger Materialanbackung durch Vermeidung von Rückströmungen: Wenn Feststoffe wie z.B. Staub im Fördermedium enthalten sind, erhöhen Rückströmungen im Teillastbereich die Anbackungsgefahr auf der Schaufel- und Saugseite. Dadurch müssen die Laufräder häufiger gereinigt werden und die Stillstandzeiten erhöhen sich. Im drehzahlgeregelten System dagegen wird durch Absenken der Drehzahl eine gleichmäßige Durchströmung erzeugt, die sämtliche Partikel sauber aus dem Schaufelkanal herausbefördert.“[59]
- FUs mindern die Energieverluste durch die Verringerung des Gesamtluftstroms [69, S. 45].
- FUs halten die Ventilatoreffizienz während Systemschwankungen so hoch wie möglich und reduzieren dadurch Betriebskosten [69, S. 45].
- FUs eliminieren die Abhängigkeit von mechanischen Komponenten und bieten somit einen attraktiven Vorteil im Betrieb, besonders in partikelbehafteten Luftströmen [69, S. 45].
- FUs können die Luftstromgeräusche reduzieren, da der drehzahlgeregelte Ventilator insgesamt zwischen 9 und 13 dB(A) leiser ist als der drossel- bzw. drallgeregelte [69, S. 45], [4, S. 42].

- FUs bieten ein perfektes Anlaufverhalten

Ein nicht unwesentlicher Energieverbrauch entsteht im Moment des Anlaufens. Da bei Hochdruckventilatoren das Massenträgheitsmoment sehr groß ist, müssen in der Regel viel größere Motoren eingesetzt werden, als dies in Bezug auf die Wellenleistung notwendig wäre. Beim Anlaufen muss das Stromnetz das Vielfache des ohnehin hohen Motorenennstroms aufnehmen. Diese verhindert im drehzahlgeregelten System eine im Frequenzumrichter eingestellte Rampe. Der Stromverbrauch steigt maximal auf das 1,1-fache des Nennstroms. Dagegen wird über Stern-Dreieck-Schaltung das 2,7 bis 3-fache und bei Direkt-Einschaltung sogar das 7-fache des Nennstroms aufgenommen [4, S. 43], [59].

- Das sanfte Anfahren des Motors bevorteilt auch das Stromversorgungsnetz. Hoher Einschaltstrom kann Spannungslöcher erzeugen, welche den störungsfreien Betrieb von sensiblem Equipment, z.B. Regler, beeinflussen kann. Durch die Limitierung des Einschaltstroms beugen FUs diesem Problem vor [69, S. 45].

Nachteile des Frequenzumrichters Trotz der Vielzahl an Vorteilen in Bezug auf geringere Betriebs- und Wartungskosten sind Frequenzumrichter nicht für jede Anwendung geeignet. Somit ergeben sich folgende Nachteile:

- **Instabiler Betrieb:** Eine zu hohe Reduzierung der Ventilator Drehzahl führt oft zu unstabilem Betrieb, vor allem bei Axialventilatoren. Auch manche Radialventilatoren, wie z.B. vorwärtsgekrümmte Typen können betroffen sein. Bei diesen Ventilatoren sollte eine genaue Betrachtung der Leistungskurve der Auswahl des FUs vorangehen [69, S. 45].
- **Resonanz:** Ventilatoren sind, wie die meisten Rotationsmaschinen, anfällig für Resonanzprobleme. Die Minderung der Drehzahl eines Ventilators erhöht die Chance, eine Resonanzfrequenz zu erwischen. Die Vibrationen können eine Vielzahl an Problemen hervorrufen: Die Spannweite reicht von Lärm bis zerstörerischen Defekten [69, S. 45].

Lösung: Durch sorgfältige Auswahl der Komponenten im Vorfeld und umfangreiche Abstimmungsarbeiten können diese Schwingungen ausgeschaltet werden. Der FU-Hersteller sieht im Bezug auf die Überlagerung mit einer Resonanzfrequenz kein Problem. Das große Spektrum an einzustellenden Frequenzen kann die Resonanzfrequenz ohne Probleme ausgrenzen. Die Einstellung des Systems nennt er als wichtige Prävention [64].

- **Hoher statischer Druck:** Das Problem tritt bei Systemen mit hohem statischem Druck (z.B.: Schalldämpfer, welche hohen statischen Druck benötigen) auf. Mindert ein FU die Drehzahl, so kann der benötigte Druck für das System den durch den Ventilator erzeugten Druck übersteigen. Damit wird kein Luftstrom erzeugt und der Ventilator arbeitet umsonst [69, S. 45].

Lösung: Hierbei weist der Experte [64] auf die Wichtigkeit des gesamten Regelsystems (FU, Sensorplatzierung, ...) hin. In diesem speziellen Fall muss sich die Regelung bzw. der FU nach dem benötigten statischen Druck des Schalldämpfers richten.

- **Leistungsgüte:** Das kontaktlose Schalten, welches die Umrichter-Operation begleitet, kann Spannungsspitzen erzeugen, die die Motorwicklungstemperatur erhöhen. Dies führt zu einem beschleunigten Isolationsabbau. Ein Motortyp, bekannt als Inverter-Duty-Motoren, wurde entwickelt, um die Anpassung von Frequenzumrichter zu Motor zu verbessern.

Dem Experten [64] zu Folge ist dieses Problem nur bei alten Motoren relevant. Auskünfte sollen beim Motorhersteller eingeholt werden. Standardgeräte sind jedoch alle mit FU kompatibel.

FUs können ebenso elektrische Störungen erzeugen, welche die Leistungsgüte der unterstützenden elektronischen Geräte beeinträchtigen. Abhilfe schafft die Installation von z.B. elektrischen Filtern (Sinusfiltern). Systeme, welche sensibel auf Stromversorgungsstörungen reagieren, sollten durch eine andere Stromquelle als jene des Frequenzumrichters versorgt werden. Der FU-Hersteller verweist auf die ÖNORM EN 55011, welche hierzu nähere Auskünfte gibt [64].

- Bei Betrieb oberhalb der Nenndrehzahl treten im Motor erhöhte Wirbelstrom- und Hystereseverluste auf. Dies führt zu Erwärmung, was jedoch oft durch dessen ebenfalls schneller drehendes Lüfterrad ausgeglichen wird. Der Motor muss für die Frequenz für den Dauerbetrieb zugelassen sein [5].
- Langsamer drehende Motoren bis 3Hz, wie auch in der Industrie verwendet, müssen durch Fremdlüfter gekühlt werden, deren Drehzahl von einem sogenannten Fremdnetz, also Drehstrom von 50 oder 60 Hz abhängt [55].
- FU Wirkungsgrad: Obwohl FU bei Vollast einen Wirkungsgrad von bis zu 98% erreichen können, ist dieser in Teillast jedoch meist erheblich geringer.

- In Fällen in denen der Volumenstrom nicht geregelt werden muss (Volllast), könnte der Frequenzumrichter den Energieverbrauch um 5% erhöhen [56, S. 78].

Wenngleich Frequenzumrichter attraktive Möglichkeiten bieten, um den Energieverbrauch zu senken, so sollten die genannten Gründe in jeder Machbarkeitsstudie berücksichtigt werden [69, S. 46].

Auswahl und Installation des Frequenzumrichters

Dem Experten [64] zu Folge wird in der Praxis der Nennstrom des Motors von dessen Typenschild (siehe auch Abschnitt 4.8 auf der Seite 88) abgelesen. Mit diesem Wert bestellt der Professionist den Frequenzumrichter.

In Abbildung 4.4 auf der Seite 69 bewertet Albig [1, S. 3] mögliche Frequenzumrichtervarianten.

Im Weiteren empfiehlt sich eine fachgerechte Installation, um den im Abschnitt 4.3.3 unter „Nachteile des Frequenzumrichters“ auf der Seite 66 erwähnten Problemen, die durch den FU auftreten können, vorzubeugen. Das Vertrauen in den Fachmann ist hier wichtig. Er kennt die Zusammenhänge. Die Hinweise der Hersteller sind oft hilfreich [8, S. 5].

4.3.4 Beschreibung der Maßnahme

Allgemeines

Laut Gleichung 3.13 im Abschnitt 3.13 auf der Seite 18 ist der Volumenstrom proportional der Drehzahl. Da sich die Leistungsaufnahme des Ventilators mit der dritten Potenz der Drehzahl verändert (siehe Gleichung 3.15 auf der Seite 19), kann bei einer Verringerung des Volumenstroms um 50% diese auf 12,5% verringert werden. Somit ist ein bedarfsgerechter Betrieb vor allem zur Reduktion des Energieverbrauchs für die Luftförderung von großer Bedeutung [10]. Viele bedarfsorientierte Kontrollsysteme sind am Markt erhältlich. Unter Beobachtung des Bedarfs kann die Luftstrommenge an den Bedarf angepasst werden. Eines der meist verwendeten Systeme ist die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter [56, S. 78].

Die elektronischen Regelvarianten werden in Verbindung mit Käfigläufer-Asynchronmotoren immer häufiger verwendet. Sie stellen eine robuste und komfortable Lösung dar und arbeiten insbesondere bei Anlagen mit einem weiten Regelbereich sehr energieeffizient [15, S. 4].

4.3. DREHZAHLREGELUNG MITTELS FREQUENZUMRICHTER 69

Art der Drehzahlveränderung	Investitionskosten	Wirkungsgrad	Wirtschaftlichkeit	Geräuschverhalten	Einfache Installation	Bemerkung
Frequenzsteuerung mit allpoligem Sinusfilter Fcontrol	+	++	+++	+++	+++	Optimales Preis-Leistungs-Verhältnis, keine elektromagnetischen Geräusche. Einsatz von Standardventilatoren möglich.
Frequenzsteuerung ohne allpoligem Sinusfilter	+	++	+++	++	+	Nicht für den Parallelbetrieb von Standardventilatoren einsetzbar. Hohes Ausfallrisiko für Motorwicklung und Kugellager. Weitere Informationen auf Anfrage.
Ventilator mit angebautem Frequenzumrichter FREvent	+	++	++	+++	++	Moderate Investitionskosten bei gutem Preis-Leistungs-Verhältnis, nachrüstbar.
Ventilator mit angebautem EC-Controller ETAvent	-	+++	+++	+++	++	Hoher Wirkungsgrad, Sondermotor, kein Bypass (Netzbetrieb) bei Ausfall der Elektronik möglich.

Abbildung 4.4: Bewertungskriterien für FUs bei drehzahlveränderbaren Ventilatoren (Quelle: [1])

Tipps zur Maßnahme

- Man erstelle ein Lastprofil der Anlage und ermittle, ob der größte Teil des Energieverbrauches insgesamt im Volllast- oder im Teillastbetrieb stattfindet [15, S. 5].
- Man prüfe bei Anlagen, die überwiegend im Teillastbetrieb arbeiten, die Nachrüstung einer elektronischen Drehzahlregelung [15, S. 5].
- Man steuere und regle einzelne Bereiche mit unterschiedlicher Nutzung getrennt voneinander [15, S. 5].

4.3.5 Kriterien für den Einsatz der Maßnahme

Nach Reitz [4, S. 52] müssen zwei Voraussetzungen aus prozesstechnischer Sicht der Ventilatoren erfüllt sein:

1. Teillastbetrieb über weite Bereiche des Arbeitszyklus.

2. Die Anlagenkennlinie muss eine quadratische Kennlinie sein.

Weiters verweist er auf die Wichtigkeit der präzisen **Systemabstimmung** der drei Komponenten: Ventilator, Motor und Frequenzumrichter [59].

4.3.6 Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie

Selbst Frequenzumrichterhersteller [64] kennen für Österreich keine Zahlen. Dies ergab ein Expertengespräch. Hierbei konnte nur eine quantitative Aussage zu Deutschland getätigt werden:

- Dort wird jeder achte Motor mittels FU betrieben.
- 15–12% der Neuanlagen werden mit FU konzipiert.

4.3.7 Bewertung der Maßnahme

Standardisierte Abschätzung

Reitz [4] untersucht drei Regelungsarten eines typischen Ventilators. Drall-, Drossel- und Drehzahlregelung vergleicht er theoretisch sowie im praktischen Versuch – hierbei decken sich die beiden Ergebnisse bezüglich der Leistungsreduzierung.

Anhand dieser Betrachtung erfolgt die Beurteilung der Einsparung wie folgt:

Die Leistungskurven der von Reitz betrachteten Regelungen wurden Punkt für Punkt ($\dot{V}/\Delta p_t$) aus den jeweiligen Diagrammen aufgenommen und in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen. Damit konnten die Kurven rekonstruiert werden. – Die Abbildung 4.5 auf der Seite 71 zeigt beispielhaft das Diagramm von Reitz zur Drehzahlregelung. Die darin blau gestrichelte Kennlinie ergibt sich dadurch, dass bei drehzahlgeregelten Anlagen durch antriebsbedingte Größen, z.B. Fremdlüfter eines Gleichstrommotors oder Verluste des Stromrichtergerätes, der kubische Verlauf der Leistungsbedarfskurve verzerrt wird [4, S. 12].

Diesen für die Drall-, Drossel- und Drehzahlregelung punktweise erhobenen Kurven wurde jeweils eine Trendlinie zugewiesen. Somit ergaben sich Näherungskurven mit der Abhängigkeit $P_W = f(\dot{V})$ (siehe Gleichungen: 4.5, 4.6, 4.7 auf der Seite 72). Abbildung 4.6 auf der Seite 72 veranschaulicht diesen Vorgang.

4.3. DREHZAHLREGELUNG MITTELS FREQUENZUMRICHTER 71

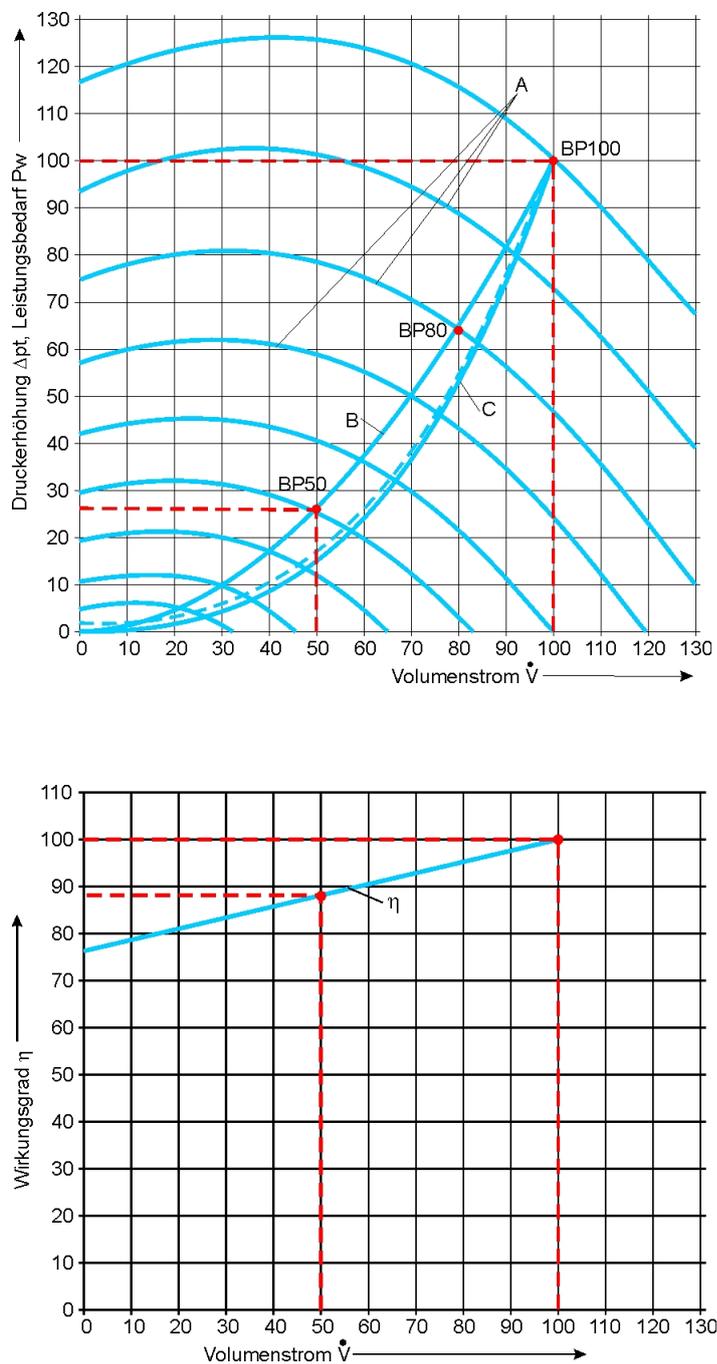


Abbildung 4.5: Ventilatorcurve (A), Anlagenkurve (B), Leistungskurve (C) sowie Wirkungsgradkurve (η) bei Drehzahlregelung (Quelle: [4])

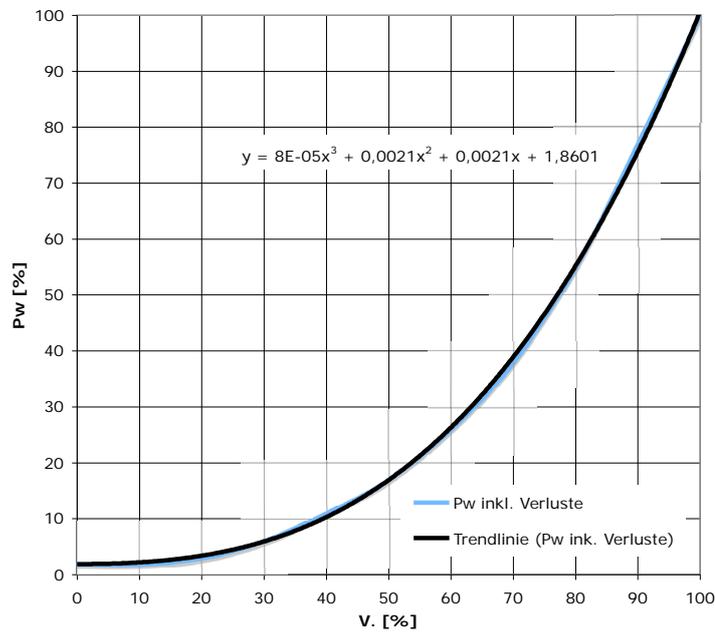


Abbildung 4.6: Rekonstruierte Leistungskurve mit Trendlinie bei der Drehzahlregelung

Vorgehen bei der Abschätzung Die für die Abschätzung zu erhebenden Werte finden sich in Tabelle 4.1 auf der Seite 73 wieder.

Mittels der folgenden Näherungsgleichungen (4.5, 4.6, 4.7) erfolgt die Errechnung des Leistungsbedarfs $P_W = f(\dot{V})$ [%] im jeweiligen Lastbereich (\dot{V} [%] = 0, 0,1...0,6...1). Als Ergebnis erhält man beispielhaft die in Spalte 2 der Tabelle 4.2 auf der Seite 74 befindlichen Werte. Folglich wird in Spalte 3 die Ventilatorleistung mit

$$P_W[\text{kW}] = P_W[\%] \cdot P_{W,100\%}$$

berechnet.

Näherungsgleichung zum Leistungsbedarf der **Drosselregelung**:

$$P_{W,Drossel} = -1 \cdot 10^{-05} \cdot \dot{V}^3[\%] + 0,0007 \cdot \dot{V}^2[\%] + 0,6343 \cdot \dot{V}[\%] + 39,888 \quad [\%] \quad (4.5)$$

Näherungsgleichung zum Leistungsbedarf der **Drallregelung**:

$$P_{W,Drall} = 4 \cdot 10^{-05} \cdot \dot{V}^3[\%] + 0,0011 \cdot \dot{V}^2[\%] + 0,0717 \cdot \dot{V}[\%] + 40,259 \quad [\%] \quad (4.6)$$

Tabelle 4.1: Zu erhebende Systemdaten

Leistungsbedarf des Ventilators bei Volllast ¹	$P_{W,100\%}$	[kW]
Lastprofil bzw. Arbeitszyklus ² :	Prozentanteil der Zeit bei $\dot{V}_{0\%}, \dot{V}_{10\%} \dots \dot{V}_{60\%} \dots \dot{V}_{100\%}$	[%]
Betriebszeit:		[h/a]
	- Anzahl der Stunden/Tag	[h/d]
	- Anzahl der Tage/Woche	[d/w]
	- Anzahl der Wochen/Jahr	[w/a]
Strompreis		[EUR/kWh]
FU-Kosten		[EUR]
Montagekosten ³		
Wartungskosten für		
	- Drosselregelung	[EUR]
	- Drallregelung	[EUR]
	- Drehzahlregelung ⁴	[EUR]

1) Entspricht der Motorleistung bei Volllast. Laut Danfoss [64] kann für die Abschätzung Wellenleistung, Motorleistung und FU-Leistung als gleich angesehen werden.

2) Siehe auch Spalte 1 und 4 in Tabelle 4.2 (Seite 74)

3) Bei Drossel und Drallregelung sind die Installationskosten gleich Null, da es bestehende Anlagen sind, welche mit der Drehzahlregelung verglichen werden. Danfoss [64] schätzt diese beim FU auf 10% des FU-Nettopreises.

4) Der Frequenzumrichter ist wartungsfrei.

Näherungsgleichung zum Leistungsbedarf der **Drehzahlregelung**:

$$P_{W,Drehz.} = 8 \cdot 10^{-05} \cdot \dot{V}^3[\%] + 0,0021 \cdot \dot{V}^2[\%] + 0,0021 \cdot \dot{V}[\%] + 1,8601 \quad [\%] \quad (4.7)$$

Energieverbrauch (E_{xy}) für $P_{W,Drossel}$, $P_{W,Drall}$ bzw. $P_{W,Drehz.}$ ($P_{W,xy}$):

$$E_{xy} = P_{W,xy} \cdot Lastprofil[\%] \cdot t \quad [kWh/a] \quad (4.8)$$

E_{xy}	Energieverbrauch der Drossel-, Drall- bzw. Drehzahlregelung
$P_{W,xy}$	ist $P_{W,Drossel}$, $P_{W,Drall}$ oder $P_{W,Drehz.}$
t	Betriebszeit

Die einzelnen Energieverbräuche aus dem Arbeitszyklus werden in Tabelle 4.2 summiert. Daraus ergibt sich der Jahresenergieverbrauch.

Energiekosten (K_E):

Tabelle 4.2: Tabelle zur Berechnung des Energiebedarfs (beispielhafte Vorgabe des Lastprofils)

\dot{V} [%]	$P_{W,xy}$ [%]	$P_{W,xy}$ [kW]	Lastprofil [%]	E [kWh/a]
0	2	1,8	0	0
10	2	1,8	0	0
20	3	2,7	0	0
30	6	5,4	0	0
40	11	9,9	0	0
50	17	15,3	0	0
60	26	23,4	30	68.141
70	38	34,2	0	0
80	55	49,5	0	0
90	77	69,3	60	403.603
100	100	90,0	10	87.360
Summe			100	559.104

$$K_{E_{xy}} = E_{xy} \cdot k_e \quad [EUR/a] \quad (4.9)$$

K_E	Energiekosten
E_{xy}	Energieverbrauch der Drossel-, Drall- bzw. Drehzahlregelung
k_e	Strompreis

Energiekostenvergleich (ΔK_E):

$$\Delta K_E = K_{E,xy} - K_{E,Drehz.} \quad [EUR/a] \quad (4.10)$$

ΔK_E	Energiekostenvergleich
$K_{E,xy}$	ist $K_{E,Drossel}$ oder $K_{E,Drall}$

Kapitaleinsatz (K_I):

$$K_I = K_{FU} + K_M \quad (4.11)$$

K_I Kapitaleinsatz

K_{FU} Kosten für den Frequenzumrichter. Für Richtpreise siehe Tabelle 4.3 auf der Seite 75. Weiters wird auf die Herstellerkataloge verwiesen.

K_M Kosten für die Montage bzw. Installation des FUs (siehe Tabelle 4.4 auf der Seite 76).

Tabelle 4.3: Netto-Richtpreise für Frequenzumrichter K_{FU} (Schutzklasse IP 55) (Quelle: [64])

Leistungsklasse	Preis [EUR]
1,1–4,0	905,00
4,0–10,0	1380,00
10,0–30,0	2550,00
30–70	5185,00
70–130	9305,00
130–160	13190,00

In der Tabelle 4.4 auf der Seite 76 wurde versucht, Richtwerte für die entstehenden Kosten bei der Montage bzw. Installation eines Frequenzumrichters zu ermitteln. Es konnte keine einheitliche Aussage gefunden werden. Der Experte [64] nennt als Richtwert für diese Kosten 10% vom Nettopreis des FUs. Die Europäische Kommission [31] gibt auf die Leistung bezogene Werte an.

Exakte Berechnung

Für die exakte Berechnung benötigt man die Proportionalitätsgesetze (siehe auch Abschnitt 3.3.6 auf der Seite 18):

$$\dot{V} \sim n \quad \Delta p \sim n^2 \quad P_W \sim n^3$$

Die Gleichung

$$P_W = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{\eta} \quad (4.12)$$

Tabelle 4.4: Montage-/Installationskosten für Frequenzumrichter K_M (Quelle: [31], [64])

Leistungsklasse	Preis laut [31] [EUR/kW]	Preis laut [64] [EUR]
1,1 – 4,0	121,00	310,00
4,0 – 10,0	104,00	730,00
10,0 – 30,0	49,00	980,00
30,0 – 70,0	31,00	1550,00
70,0 – 130,0	32,00	3200,00
130,0 – 160,0	25,00	3625,00

reduziert sich mit den oben genannten Proportionen auf

$$P_W \sim \frac{\dot{V} \cdot \dot{V}^2}{\eta} \sim \frac{\dot{V}^3}{\eta} \quad (4.13)$$

Somit ergibt sich in Bezug auf das Proportionalitätsgesetz:

$$\frac{P_{W,2}}{P_{W,1}} = \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right)^3 \cdot \frac{1}{\eta} \quad (4.14)$$

Weiters muss der Gesamtwirkungsgrad η des Ventilators gemessen werden. Somit ist eine Leistungsmessung durchzuführen, die in der DIN 24163/Teil 1 sowie in der VDI 2044 näher beschrieben ist [73, S. 110–111]. Siehe auch Abschnitt 3.3.4 auf der Seite 15.

Berechnungstool der Fa. Danfoss

Die Firma Danfoss weist auf ihrer Website ein Berechnungstool für Frequenzumrichter, die HAVAC Energy Box, aus. Unter folgendem Link kann dieses heruntergeladen werden [12]:

<http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/0F2CC665-5B14-41EE-A511-4E08C06F87D9/0/vltebv121.zip>

4.3.8 Kennzahlen

- Arbeitet die Anlage die meiste Zeit im Teillastbetrieb, sollte man eine Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter zur Luftmengenregelung einsetzen.

4.3.9 Normen

ÖVE/ÖNORM EN 55011: Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) – Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren. Jänner 2008.

DIN EN 61800-2: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 2: Allgemeine Anforderungen; Festlegungen für die Bemessung von Niederspannungs-Wechselstrom-Antriebssystemen mit einstellbarer Frequenz. August 1999.

ÖVE/ÖNORM EN 61800-3: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren. September 2005

ÖVE/ÖNORM EN 61800-5-1: Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl - Teil 5-1: Anforderungen an die Sicherheit – Elektrische, thermische und energetische Anforderungen. Juni 2008.

4.4 Ventilator- und Motortausch

„Bei der Durchführung einer Anlagenoptimierung darf das Augenmerk jedoch nicht nur auf den Ventilator gelegt werden. Die Betrachtung der Lüftungsanlage als Ganzes darf man nicht vernachlässigen, um weitere Verbesserungen erreichen zu können.“ [70, S. 469]

4.4.1 Allgemeines

Ventilator

Nach [49, S. 17] sollte bei der Ventilatorauswahl neben den Auslegungskriterien Volumenstrom, Druckerhöhung und Schallleistungspegel besonders auf einen hohen Wirkungsgrad Wert gelegt werden. Sehr wichtig ist dies bei Anlagen mit einer hohen Anzahl an Jahresbetriebsstunden und großen zu transportierenden Volumenströmen.

Um im Teillastbetrieb einen sicheren Betrieb der lufttechnischen Anlage zu gewährleisten, ist auf eine gute Regelbarkeit des Ventilators zu achten.

Ventilatoren gibt es in verschiedenen Bauarten für verschiedene Anwendungen. Eine generelle Empfehlung für eine zu bevorzugende Art ist nicht möglich. Bei der Auswahl muss auf den Wirkungsgrad, die Regelbarkeit, stabiles Verhalten im Betriebsbereich und die Geräusentwicklung geachtet werden [16, S. 5]. Ventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus und sind daher im Allgemeinen zu bevorzugen (Erklärung siehe Abschnitt 3.3.6 auf Seite 16).

Motor

„In lufttechnischen Anlagen gibt es eine Vielzahl verschiedener Motorarten, abhängig von den Gebläsetypen, Leistungsklassen, Umgebungsbedingungen, Laufzeiten etc. Für kleinere Leistungen werden meist Außenläufer- und Käfigläufer-Asynchronmotoren eingesetzt, für mittlere Leistungen polumschaltbare Drehstrommotoren und für große Leistungen Drehstrom-Nebenschlussmotoren. Bei Nebenschlussmotoren wird mit Kohlebürsten ein Kontakt vom Läufer zum Stator geschlossen. Dieser unterliegt einem hohen Verschleiß, weshalb die Wartungskosten solcher Motoren für kleine und mittlere Leistungsklassen zu hoch sind. Für große Leistungen werden die Instandhaltungskosten in Kauf genommen, da Nebenschlussmotoren sehr energieeffizient und sehr gut regelbar sind. Eine Option für kleinere Leistungen sind elektronisch kommutierte Motoren (EC-Motoren), die ebenfalls sehr hohe Wirkungsgrade und eine gute Regelbarkeit besitzen.“ [16, S. 5]

Bei Motoren und Antrieben ist es wichtig, Komponenten mit einem hohen Wirkungsgrad einzusetzen. [16, S. 5]

Sowohl beim Riemenantrieb als auch beim Direktantrieb sind für das Erzielen niedriger Betriebskosten am besten eintourige, über Frequenzumrichter drehzahlgeregelte Elektromotoren zu verwenden [49, S. 5].

Motorarten Für Ventilatoren und Pumpen werden die selben Antriebsmotoren verwendet. Die Initiative Energieeffizienz [16, S. 5] verweist bei ihren Ausführungen zu Motoren auf ihr Infoblatt zu „Motoren für Pumpenantriebe“ [17]. Dem zufolge kommen die unten angeführten Motoren ebenso in lufttechnischen Anlagen zum Einsatz [17, S. 3–4].

- **Synchronmotoren:** *kompakt, gut regelbar und sehr effizient*

Diese haben einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Motorbauarten: sehr hoher elektrischer Wirkungsgrad, auch bei Teillast; ihre Leistungsdichte, Verhältnis von Leistung zu Volumen, ist höher als bei anderen Motorbauarten. In Verbindung mit Frequenzumrichtern ist eine präzise Regelung möglich. Die hohe Energieeffizienz hat ihren Preis: Synchronmotoren sind in der Anschaffung meist teurer als entsprechende Asynchronmotoren. In vielen Fällen macht sich jedoch die Mehrinvestition durch die Energiekosteneinsparung bald bezahlt.

Gegenwärtig haben Synchronmotoren bei Ventilatormotoren nur eine sehr geringe Verbreitung, daher werden diese im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Mit steigenden Energiepreisen und zugleich sinkenden Preisen für Frequenzumrichter ist allerdings anzunehmen, dass sich dies ändern wird.

- **Asynchronmotoren:** *preiswert, robust und weit verbreitet*

Diese lassen sich preiswert herstellen und sind – ohne Schleifringe – fast wartungsfrei. Ein Betrieb am Drehstromnetz ist meist ohne Anlaufhilfe möglich. Ihre weite Verbreitung sorgt dafür, dass der Anwender aus einem großen Angebot verschiedener Lieferanten auswählen kann, um die Kompatibilität der angebotenen Motoren zu gewährleisten. In Europa wurden Motoren bis 132 kW Leistungsstufe in der EN 50347 genormt – „Normmotoren“.

Oberhalb von 132 kW beginnt der Bereich der „Transnormmotoren“. Hier werden die Abmessungen aus der ICE 60072 entnommen. Diese sind aber keinen Leistungsstufen zu geordnet.

Elektrisch kommutierte oder EC-Motoren ergänzen die positiven Eigenschaften von Synchronmaschinen um die Fähigkeit, sich an die Last anzupassen. Diese sind wie Synchronmotoren aufgebaut, besitzen jedoch zusätzlich eine Leistungselektronik. Da der Rotor selbst das Drehfeld steuert, ist stets das volle Drehmoment verfügbar. Bei Überlastung nimmt die Drehzahl ab, das Drehmoment bricht nicht zusammen.

EC-Motoren sind auch unter dem Namen „Brushless-DC Motoren“ (BLDC) bekannt. Sie zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad auch im Teillastbereich, durch hohe Leistungsdichte und durch eine gute Regelbarkeit aus. Diesem Vorteil im Betrieb stehen jedoch höhere Anschaffungskosten gegenüber. Zurzeit werden EC-Motoren im Leistungsbereich bis 2 kW verwendet.

Lebenszykluskosten von Ventilormotoren Gemäß dem Infoblatt zu „Motoren für Pumpenantriebe“ [17, S. 5] (gilt auch für Ventilatoren – siehe dazu Abschnitt 4.4.1 unter „Motorarten“ auf Seite 79) sollte die Auswahl des Ventilatorantriebs unter dem Gesichtspunkt erfolgen, welche Alternative über die Lebensdauer des Motors am wirtschaftlichsten ist. Bei Motoren haben die Anschaffungskosten einen eher geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Auch die Installationskosten unterscheiden sich kaum, solange es sich um Normmotoren handelt. Bei Transnormmotoren sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Anschlüsse von Motoren und Ventilatoren zusammenpassen.

Die Folgekosten übertreffen die Anschaffungskosten eines Motors oft schon im ersten Jahr. Asynchronmotoren haben eine durchschnittliche Lebensdauer von:

$< 7,5kW$	→	12 Jahre
$7,5kW - 75kW$	→	16 Jahre
$> 75kW$	→	20 Jahre

Angesichts dieser hohen Lebensdauer bestimmen die Wartung- und vor allem die Energiekosten die Summe der Lebenszykluskosten. Durch hocheffiziente Motoren können die Energiekosten gesenkt werden.

Die Effizienzklasse ist entscheidend In Anlehnung an [17, S. 5–6] und [47, S. 7] entscheiden Art, Nennleistung und Belastung der Motoren über die Verluste von Elektromotoren im Dauerbetrieb. Große Motoren haben wesentlich bessere Wirkungsgrade als kleine. Da die meisten Ventilormotoren

aber viele Stunden am Stück laufen, ist jeder Prozentpunkt Wirkungsgrad bares Geld wert. Durch zusätzliche Investitionskosten von 20–30% bieten energieeffiziente Motoren einen 2 bis 6% höheren Wirkungsgrad als konventionelle Elektromotoren. Bei der Auswahl eines Motors sollte verglichen werden, wie hoch der angebotene Wirkungsgrad im Verhältnis zu dem bestmöglichen ist. Hierbei ist es wichtig zu wissen, dass die möglichen Wirkungsgrade von der Baugröße des Motors abhängen.

Eine Orientierung gibt die Klassifizierung nach der freiwilligen Vereinbarung zwischen der Europäischen Kommission und dem Komitee der Hersteller von elektrischen Maschinen und Leistungselektronik (CEMEP). Sie teilt 2- und 4-polige Asynchronmotoren im Leistungsbereich zwischen 1,1 kW und 90 kW in drei Effizienzklassen ein (Abbildung 4.7). Dabei wird nach Baugrößen und Polzahl differenziert:

- EFF1-Motorenklasse → Für Motoren mit hoher Auslastung
- EFF2-Motorenklasse → Motoren mit geringer Betriebsstundenzahl
- EFF3-Motorenklasse → Diese Motoren zählen nicht mehr zum Stand der Technik.

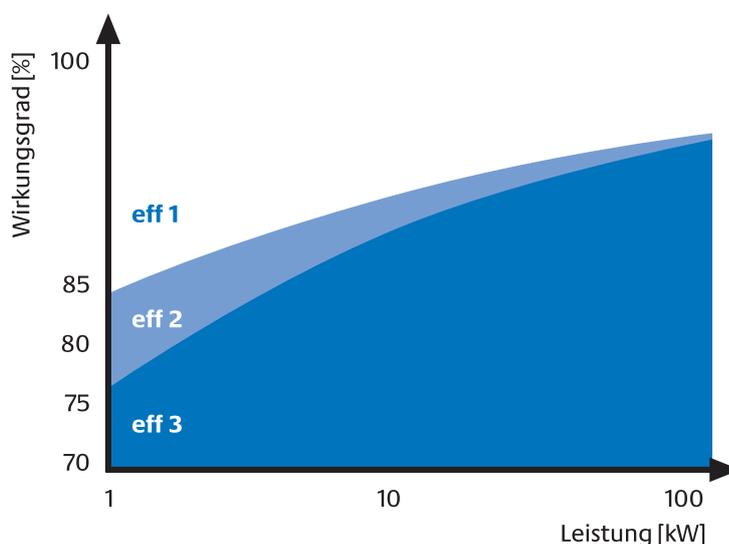


Abbildung 4.7: Effizienzklassen nach CEMEP-Vereinbarung für 4-polige Motoren (Quelle: [17])

Basierend auf der durchschnittlichen Betriebsstundenzahl führt der Einsatz von EFF1-Motoren in der Industrie zu Amortisationszeiten, die unter 3 Jahren liegen [31, S. 33].

Im internationalen Vergleich sind die europäischen Anforderungen an die Energieeffizienz elektrischer Motoren wenig ambitioniert. Die USA und Kanada stellen durch die NEMA Mindestanforderungen für die am nordamerikanischen Markt eingesetzten Motoren. Auch im oberen Qualitätssegment sind die Nordamerikaner anspruchsvoller als die Europäer [17, S. 6].

Neu gibt es von der IEC (International Electrotechnical Commission) einen Teststandard, den IEC 60034-2-1 (vom 10.9.2007). Darin werden zum Beispiel bei der Wirkungsgradberechnung die bisher umstrittenen Streuverluste eingerechnet. Die Klassen umfassen 2-, 4- und 6-polige Motoren und sind für Nennleistungen von 1,1 bis 370 kW definiert. In der neuen Norm IEC 60034-30 (Entwurf vom August 2007) sind die Energieklassen IE1 bis IE4 definiert. Die Bedeutung der Zahlwerte wurde gegenüber der älteren EFF-Klasse umgekehrt [37].

Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der Motorenstandards (Quelle: [37])

IEC Energieklasse	IEC-Code	EFF-Code	NEMA
Super Premium Efficiency	IE4		
Premium Efficiency	IE3		NEMA Premium
High Efficiency	IE2	EFF1	EPAct
Standard Efficiency	IE1	EFF2	
Below Standard Efficiency	-	EFF3	

Für Industriemotoren wird Zuverlässigkeit empfohlen Spezielle Informationen für die Industrie sind in Normen sowie Literatur fast nicht ausgewiesen. Die Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe bestätigt dies [17, S. 6]:

„Da die in den internationalen Normen spezifizierten Eigenschaften in vielen Fällen noch nicht ausreichend für den Einsatz in der Industrie sind, haben wichtige Anwender aus der Chemie, der Kraftwerkstechnik und anderen Industriezweigen in Deutschland den Arbeitskreis Elektrische Antriebstechnik gegründet, welcher in seiner VIK-Empfehlung VE1 „Drehstrom-Asynchronmotoren“ die industriellen Anforderungen in Bezug auf Handhabbarkeit und die betriebstüchtige, zuverlässige Ausführung beschreibt.

Im Interesse minimaler Lebenszykluskosten empfiehlt es sich für industrielle Anwender, Motoren generell nach der VIK-Empfehlung zu beschaffen. Viele Hersteller bieten entsprechende Motoren mit günstigen Lieferzeiten und

nur geringen Mehrpreisen an. In den meisten Fällen ist es empfehlenswert, sich auf einen einheitlichen, hohen Standard festzulegen, da der Aufwand einzelfallspezifischer Ausschreibungen und einer Ersatzteilverhaltung für verschiedene Motorstandards zumindest bei den kleineren und mittleren Leistungsklassen nicht gerechtfertigt ist.“

Bei großen Anwendungen stellt das Neuwickeln eines bestehenden Motors oft eine ökonomisch praktikable Alternative dar. Obwohl das Neuwickeln von Motoren eine kostengünstige Alternative ist, können Motoren, die bereits neu gewickelt waren, zusätzliche Effizienzverluste bei weiteren Neuwicklungen erleiden [69, S. 30].

4.4.2 Einsparungspotential

Bei Radgen [56, S. 78] findet man folgende Einsparpotentiale in Bezug auf die Maßnahme Ventilator-/Motortausch.

Motor

- Auswahl des richtigen Motortyps und -größe: **5 – 20%**
- Einsatz hocheffizienter Motoren: **2 – 10%**

Ventilator

- Ventilatorauswahl und -wartung: **5 – 15%**

4.4.3 Hinweise auf überdimensionierte Ventilatoren

Tendenz zur Überdimensionierung von Ventilatoren

Im „Sourcebook for industry“ [69, S. 33] wird auf eine US Studie verwiesen, der zufolge so gut wie 60% der betrachteten Ventilatoren überdimensioniert waren. Nahezu 10% der Ventilatoren werden sogar um bemerkenswerte 60% überdimensioniert.

Die Probleme, welche mit überdimensionierten Ventilatoren meist einhergehen, sind im Folgenden aufgelistet [69, S. 33]:

- **Hohe Kapitalkosten**
Große Ventilatoren kosten typischer Weise mehr als kleinere. Weiters benötigen diese größere sowie kostspieligere Motoren.

- **Hohe Energiekosten**

Überdimensionierte Ventilatoren erhöhen die Energiekosten des Systems sowohl in Bezug auf den Energieverbrauch als auch auf den Instandhaltungsbedarf. Höhere Energiekosten können auf zwei grundlegende Gründe zurückgeführt werden:

- Der Ventilator arbeitet ineffizient, weil die Anlagenkurve die Ventilatorcurve in einem Punkt schneidet, welcher weit vom optimalen Betriebspunkt des Ventilators entfernt liegt.
- Auch wenn ein überdimensionierter Ventilator in seinem optimalen Betriebspunkt arbeitet, produziert er dort mehr Luftstrom als benötigt, verbraucht mehr Energie und erhöht die Belastung des Gesamtsystems.

- **Schlechtes Betriebsverhalten**

Überdimensionierte Ventilatoren neigen dazu, im Betrieb laut, ineffizient oder instabil (Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt) zu arbeiten. Diese drei Eigenschaften weisen einzeln oder in Summe auf Überdimensionierung hin.

- **Häufige Wartung**

Arbeiten überdimensionierte Ventilatoren entfernt von ihrem optimalen Betriebspunkt, können zyklische Lager- sowie Antriebsbelastungen auftreten. Diese zyklischen Lagerbelastungen neigen dazu, die Belastungen auf andere Antriebskomponenten, wie Keilriemen oder Motor, zu übertragen.

Ebenso tendieren überdimensionierte Ventilatoren dazu, den Systemdruck zu erhöhen und damit die Belastung auf das Kanalnetz, was wiederum Leckagen begünstigt.

- **Hohes Geräusch-/Vibrationsniveau**

Überdimensionierte Ventilatoren erzeugen oft laute Geräusche. Dieser erhöhte Lärmpegel führt unter anderem zu Ermüdungen bei Arbeitern und reduziert somit deren Produktivität.

Ventilatoren, welche ineffizient arbeiten, neigen dazu, hohe Vibrationen in der Luft sowie an der Anlage zu erzeugen. Vibrationen an der Anlage führen eventuell zu Materialermüdung bei Schweißnähten und mechanischen Verbindungen.

Typische Hinweise auf überdimensionierte Ventilatoren

Nach [69, S. 33–34] und [46, S. 3–4] gibt es mehrere Hinweise auf überdimensionierte Ventilatoren. Einige dieser Hinweise können durch schnelle Überprüfung der Luftstromregleinrichtungen erkannt werden. Systeme in denen der Volumenstrombedarf stark variiert, benötigen unweigerlich eine Regelung, um den Volumenstrom in speziellen Abschnitten einzuschränken. Hierzu wird empfohlen, sich ebenso die beiden Maßnahmen „Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter“ (Kapitel 4.3, Seite 60 u.f.) und „Bedarfsgerechte Steuer- und Regelung“ (Kapitel 4.2, Seite 55 u.f.) anzusehen.

- Gedrosselte Ventilatoren weisen auf Überkapazität hin.
- Einige Änderungen der Anlagenbetriebsbedingungen (z.B. Erweiterungen, Stilllegungen von Zonen, . . .) können bewirken, dass Ventilatoren, welche vorher effizient arbeiteten, einen verringerten Wirkungsgrad aufweisen.
- Bypass-Ströme geben generell einen Hinweis auf vergeudete Energie, da ein größerer Luftstrom als nötig gefördert wird.
- Überdimensionierte Ventilatoren erzeugen eventuell einen lauten Luftstrom sowie verstärkte Vibration der Kanäle.

Eine rasche sowie praktikable Prüfung nennt Raichel [36]:

- Messung der Motorstromaufnahme (mittels Amperemeter) und Vergleich mit der Stromaufnahme des Ventilators, welche man aus dem Ventilator-Datenblatt erhält. Die beiden Ströme sollten sich nicht mehr als $\pm 5 - 10\%$ unterscheiden. Weichen diese jedoch deutlich von einander ab – Motorstromaufnahme ist geringer als die Ventilatorstromaufnahme aus dem Datenblatt – deutet dies auf einen überdimensionierten Ventilator hin [36].

Andere Hinweise benötigen detailliertere Messungen. So z.B. kann die Bestimmung des Betriebspunktes auf der Ventilatorcurve eine Aussage über die Exaktheit der Dimensionierung des Ventilators geben.

Wenn möglich, sollte man den Druck bestimmen, welchen die Endgeräte benötigen, und diesen mit dem erzeugten Druck des Ventilators vergleichen. Falls der Ventilator überdimensioniert ist, wird er mehr Totaldruck für den gleichen Volumenstrom erzeugen als ein richtig ausgelegter Ventilator.

Lastfaktor des Ventilators Die Brauchbarkeit jeder Messung ist unter Umständen limitiert, da bei stark variierender Last eine einmalige Messung keine repräsentative Aussage über den Energieverbrauch des System liefern kann.

Eine Abschätzung über den durchschnittlichen Lastfaktor – die Prozentzahl der Vollast unter welcher der Ventilator arbeitet – muss getätigt werden. Ohne umfangreiche Informationen über das System könnte die Bestimmung des durchschnittlichen Lastfaktors schwierig werden.

Direktmessungen Der korrekte Weg, um die Leistung des Motors zu bestimmen, ist eine Volt-Ampere-Messung unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors. Dieser kann vom Typenschild des Motors abgelesen bzw. beim Hersteller erfragt werden. Der Leistungsfaktor liegt meist zwischen 0,8 und 1. Falls es die Bedingungen erlauben, ist die Messung während des Betriebs möglich.

Manchmal stellt der Regler des Motors einen geeigneteren Punkt für diese Messung dar, während ein anderes Mal der Anschlusskasten am Motor besser zugänglich ist.

Als Alternative steht die Leistungsmessung über ein Wattmeter zur Verfügung. Die meisten Wattmeter messen die Echtzeitleistung, die Bestimmung des Leistungsfaktors wird hierbei nicht benötigt. Die direkte Messung der Motorleistung ist nicht immer praktikabel sowie mit Risiken für das Messpersonal verbunden. Nur geschultes Personal sollte diese durchführen!

4.4.4 Beschreibung der Maßnahme

Allgemeine Tipps

- Man überprüfe die Betriebszeiten sowie die Auslastung der Ventilatoren/Motoren. Arbeiten diese zur Gänze im Teillastbetrieb, sollte ein Wechsel auf eine kleinere Type in Betracht gezogen werden [47, S. 4].
Die meisten Motoren arbeiten bei über 50% der vollen Last mit relativ konstanten Effizienzwerten. Unterhalb von 40% der Motorlast beginnt die Effizienz allerdings abzunehmen. Dieser Effizienzverlust sollte in jeder ökonomischen Analyse berücksichtigt werden. Falls die Ventilatorleistung signifikant zu reduzieren ist, sollte ein kleinerer Motor angedacht werden [69, S. 35].
- Man vergleiche die Motorstromaufnahme mit der Stromaufnahme des Ventilators (aus dem Datenblatt des Ventilators zu entnehmen).

Die beiden Ströme sollten sich nicht mehr als $\pm 5-10\%$ unterscheiden. Weichen diese jedoch deutlich von einander ab – Motorstromaufnahme ist geringer als die Ventilatorstromaufnahme aus dem Datenblatt – deutet dies auf einen überdimensionierten Ventilator hin [36].

- Man überprüfe die Wirkungsgrade der eingesetzten bzw. der in Frage kommenden Ventilatoren/Motoren bei verschiedenen Betriebspunkten [16, S. 5]. Siehe dazu auch Gleichung 4.19 auf Seite 94.
- Solange keine betriebstechnischen oder schallschutzbedingten Gründe dagegen sprechen, sollten Ventilatoren mit hohen Drehzahlen verwendet werden [16, S. 5].
- Weiters sollte auf den Leistungsfaktor des Motors Rücksicht genommen werden. Bei relativ geringen Lasten tendiert der Leistungsfaktor des Motors abzufallen. Geringe Leistungsfaktoren wirken sich nachteilig auf den Motor und seine Leistungsversorgung aus [69, S. 35].
- Man sollte bei der Auswahl des Motors auf eine möglichst gute Effizienzklasse achten. Eine Orientierung bietet das CEMEP-Gütesiegel. Motoren mit dem Label EFF1 sind die effizientesten innerhalb dieser Klassifizierung [16, S. 5].

Motortausch

Anhand des Typenschildes kann die Effizienzklasse des eingebauten Motors erhoben werden. Findet sich an der Position 7 in Abbildung 4.8 auf der Seite 88 kein Eintrag, so handelt es sich um die Effizienzklasse EFF3, welche nicht mehr zum Stand der Technik zählt. Hierbei ist ein Motortausch aus energetischen Gründen auf jeden Fall zu empfehlen. Tabelle 4.6 auf Seite 88 erklärt die Positionen am Typenschild.

Handelt es sich um einen Motor der Effizienzklasse EFF2, kann mittels der Abschätzung über die Nennverlustleistung, welche in Abschnitt 4.4.6 auf Seite 89 näher erläutert wird, eine rasche Aussage über mögliche Energieeinsparungen im Vergleich zu einem EFF1-Motor getätigt werden.

4.4.5 Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie

Laut Schweitzer [60] stellen zwei große österreichische Unternehmen in der Kommunikations- bzw. Pharmabranche an ihre Anlagen den Anspruch, nur mehr EFF1- und EFF2-Motoren eingebaut zu haben.

1	Motorenwerke ACME	EFF2	7
2	ASM 100L-2	0123456	8
3	Δ 400 V	5,9 A	9
4	3 kW	cosφ 0,86	10
5	2890 U/min	50 Hz	11
6	Isol. Kl. F	IP 44	12

Abbildung 4.8: Typenschild eines Asynchronmotors (Quelle: [38])

Tabelle 4.6: Erläuterung der Eintragungen im Typenschild (Quelle: [38])

Feld	Symbol	Bezeichnung	Bemerkung
1		Hersteller	
2		Motortyp	Typenbezeichnung des Herstellers, oft Baugröße und Polzahl
3	U	Nennspannung	es wird die verkettete Spannung angegeben
4	P	Nennleistung	Zulässige dauernde mechanische Abgabeleistung
5	n	Nenn Drehzahl	Drehzahl bei der Belastung mit der Nennleistung
6		Isolationsklasse	Temperaturfestigkeit der Wicklung
7		Effizienzklasse	EFF1 ist am besten; ohne Bezeichnung \rightarrow EFF3
8		Seriennummer	
9	I	Nennstrom	Stromaufnahme bei Nennspannung und Nennbelastung
10	cos φ	Leistungsfaktor	Phasenwinkel bei Nennspannung und Nennbelastung
11	f	Nennfrequenz	
12		Schutzklasse	Schutz gegen das Eindringen von Fremdkörpern und Wasser

Einer Studie zu Folge waren in der EU im Jahr 2007 anteilig nur noch 2% EFF3-, 86% EFF2- und 12% EFF1-Motoren im Einsatz [11].

4.4.6 Bewertung der Maßnahme Motortausch

Abschätzung über die Nennverlustleistung

Aus Abbildung 4.9 kann mittels der Nennleistung des Motors die Differenz der Nennverlustleistung eines EFF1 zu einem EFF2 abgelesen werden. Mit diesem Differenzwert kann die Energieeinsparung abgeschätzt werden.

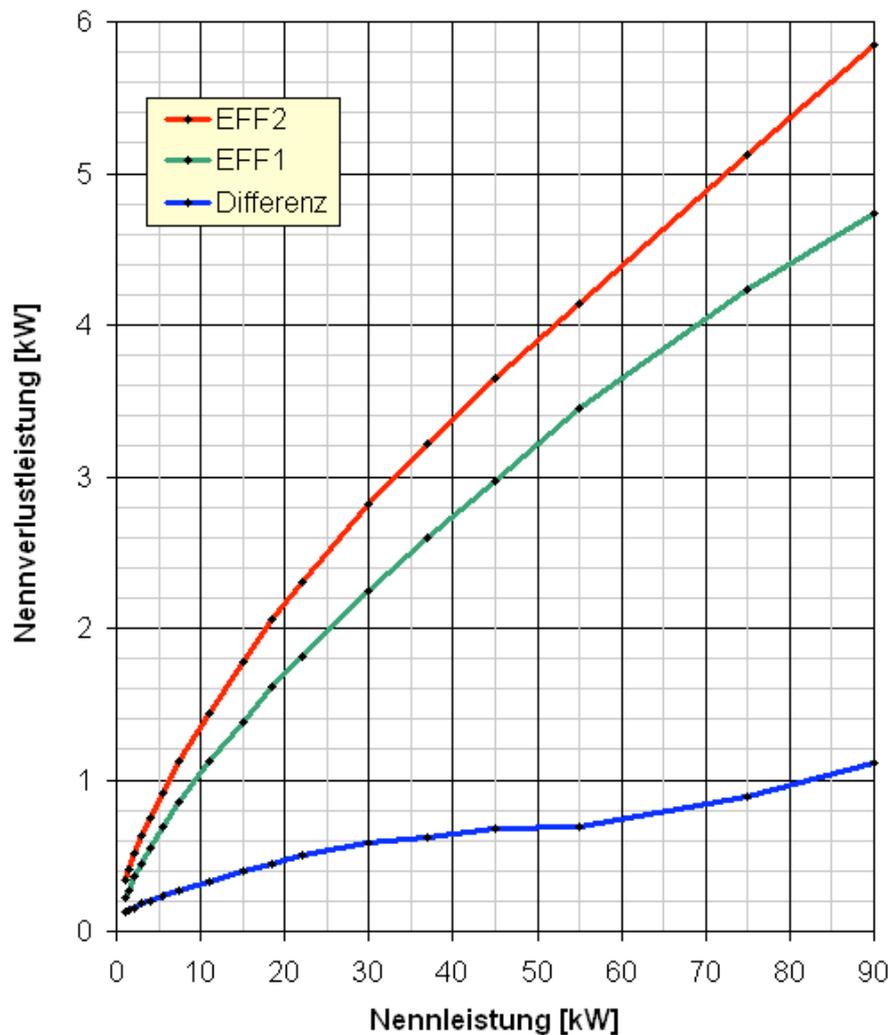


Abbildung 4.9: Maximale Nennverlustleistung von EFF1- und EFF2-Motoren (Quelle: [37])

Laut Goor [41] ist die Nennverlustleistung ein sehr praktischer Wert. Die Definition leitet sich aus dem Betrieb im Nennpunkt ab:

Nennverlustleistung = Nennaufnahmeleistung – Nennabgabeleistung.

Eine elektrische Maschine kann bei den extremen Umgebungsbedingungen (40°C und 1000 m ü.M.) die Nennverlustleistung abführen, ohne dass sich eine die Lebensdauer einschränkende Temperaturerhöhung ergibt. Ob die Verlustleistung nun im Eisen oder im Kupfer anfällt, ist nicht wichtig. Wenn man die Maschine besser kühlt, dann kann man mehr Verlustleistung abführen. Aus dieser Sicht ist die Nennverlustleistung viel interessanter als der Wirkungsgrad [41].

Ein guter (EFF1) 11kW Motor hat so z.B. etwa 0,4 kW weniger Verluste, als ein mittelmässiger (EFF2) – siehe blaue Kurve in Abbildung 4.9 auf Seite 89. Bei 4.000 Jahresbetriebsstunden und einem Strompreis von 0,10 EUR/kWh⁵ ergibt sich eine jährliche Einsparung von rund 160,00 EUR. Ein EFF1-Motor kostet in der Neuanschaffung etwa 130,00 EUR mehr, als ein 11 kW Standardmotor (rund 640,00 EUR). Die Anschaffung des teureren Motors macht sich also schon nach rund 10 Monaten Betrieb bezahlt. Gleichung 4.15 veranschaulicht den einfachen Zusammenhang für die Berechnung der Einsparung [37, S. 2–3].

$$\Delta K_E = \Delta P_{Verlust} \cdot t \cdot k_e \quad [\text{EUR/a}] \quad (4.15)$$

ΔK_E	Energieeinsparkosten
$\Delta P_{Verlust}$	Nennverlustleistung (siehe Abbildung 4.9)
t	Anlagenlaufzeit in Stunden pro Jahr
k_e	Energiepreis

Im Beispiel von zuvor stellt sich Gleichung 4.15 wie folgt dar:

$$\Delta K_E = 0,4 \text{ kW} \cdot 4000 \text{ h/a} \cdot 0,10 \text{ EUR/kWh} = 160 \text{ EUR/a}$$

Für den **Motortausch** ergibt sich der Kapitaleinsatz K_I wie folgt:

$$K_I = K_{Motor,neu} + K_M \quad [\text{EUR}] \quad (4.16)$$

K_I	Kapitaleinsatz
$K_{Motor,neu}$	Kosten für den neuen Motor
K_M	Montagekosten: ca. 500,00–600,00 EUR (An-/Abklemmen der Motoren) [60]

Tabelle 4.7: Brutto Richtpreise für Asynchronmotoren, EFF1 und EFF2 (Quelle: [60])

Leistung	EFF1-Motor [EUR]	EFF2-Motor [EUR]
1,1 kW	230,00	180,00
3,0 kW	330,00	260,00
5,3 kW	500,00	390,00
15,0 kW	1.050,00	810,00
37,0 kW	2.250,00	1.730,00
55,0 kW	3.240,00	2.490,00

Im Jahre 2000 meinten diverse Betriebswirte, ein Motortausch vor dem Versagen des alten Motors sei nicht amortisationsfähig [31, S. 48].

Unter Berücksichtigung der Gleichung 4.16 brachte die Auswertung einer Liste eines Unternehmens im Bereich des Gesundheitswesens [3], in der Preise sowie Energieverbräuche von EFF2- und EFF1-Motoren verglichen wurden, folgende Ergebnisse: Bei 2-poligen Motoren betrug die durchschnittliche Amortisationszeit 8 Jahre. 4-polige Motoren schafften es in 6 Jahren.

Im betrachteten Leistungsbereich von 1,1–90 kW wurden 17 Motoren mit verschiedenen Leistungen untersucht. Die Betriebsstundenzahl betrug 8.760 h pro Jahr und die Energiekosten wurden mit 0,10 EUR/kWh⁶ angenommen. Die Amortisationsrechnung erfolgte statisch.

Der bereits weiter oben betrachtete 11 kW Motor mit 4.000 Betriebsstunden pro Jahr würde sich nach dieser Auswertung nach ca. 11 Jahren rechnen.

Energieeffizienz:

Somit wird der Tausch eines intakten EFF2-Motors gegen einen EFF1-Motor aufgrund der hohen Amortisationszeiten von Betrieben als nicht wirtschaftlich angesehen werden.

Der Ersatz eines EFF3-Motors durch einen EFF1-Motor bleibt hingegen unumstritten!

⁵ Siehe Abschnitt 4.1 auf der Seite 54

⁶ Siehe Abschnitt 4.1 auf der Seite 54

Exakte Berechnung

Nach [38, S. 3] kann eine exakte Aussage über die Effizienz des Elektromotors über die Berechnung des Wirkungsgrades η erfolgen.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} = \frac{P}{P_{el}} \quad (4.17)$$

P Zulässige dauernde mechanische Abgabeleistung, welche dem Typenschild des Motors entnommen werden kann (siehe Feld 4 in Abbildung 4.8 auf Seite 88).

P_{el} Elektrische Leistung: $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Diese kann unmittelbar in der Netzleitung mit einem Wattmeter gemessen werden oder über eine Volt/Ampere-Messung unter Einbeziehung des Leistungsfaktors bestimmt werden [49, S. 9].

Der errechnete Wirkungsgrad des Motors kann mit den Nennwirkungsgraden aus Tabelle 4.8 verglichen werden. Liegt dieser unter den Werten eines EFF2 Motors (Spalte 2), ist Handlungsbedarf gegeben.

Tabelle 4.8: Nennwirkungsgrad von 4-poligen Asynchronmotoren (Quelle: [37])

Nennleistung kW	Nennwirkungsgrad		Nennleistung kW	Nennwirkungsgrad	
	EFF2 %	EFF1 %		EFF2 %	EFF1 %
1,1	76,2	83,8	18,5	90,0	92,2
1,5	78,5	85,0	22,0	90,5	92,6
2,2	81,0	86,4	30,0	91,4	93,2
3,0	82,6	87,4	37,0	92,0	93,6
4,0	84,2	88,3	45,0	92,5	93,9
5,5	85,7	89,2	55,0	93,0	94,2
7,5	87,0	90,1	75,0	93,6	94,7
11,0	88,4	91,0	90,0	93,9	95,0
15,0	89,4	91,8			

4.4.7 Bewertung der Maßnahme Ventilatortausch

Abschätzung über die Motornennleistung

Eine grobe Abschätzung der Amortisationszeit beim Ventilatortausch (Radialventilator [63]) bietet die Abbildung 4.10. Je größer die Anlagenlaufzeit und die Motornennleistung des Ventilators sind, umso höher ist die Wirtschaftlichkeit bzw. umso kürzer verläuft die Amortisationszeit. Die Kurven beruhen auf praxisbewährten Erfahrungen aus dem Jahr 2002. Die seitdem gestiegenen Energiepreise sollten die Aussage des Diagramms im positiven Sinne verändern. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme verbessert sich zusätzlich, wenn diese mit notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. einem anstehenden Lagerwechsel am Ventilator kombiniert werden kann [49, S. 13].

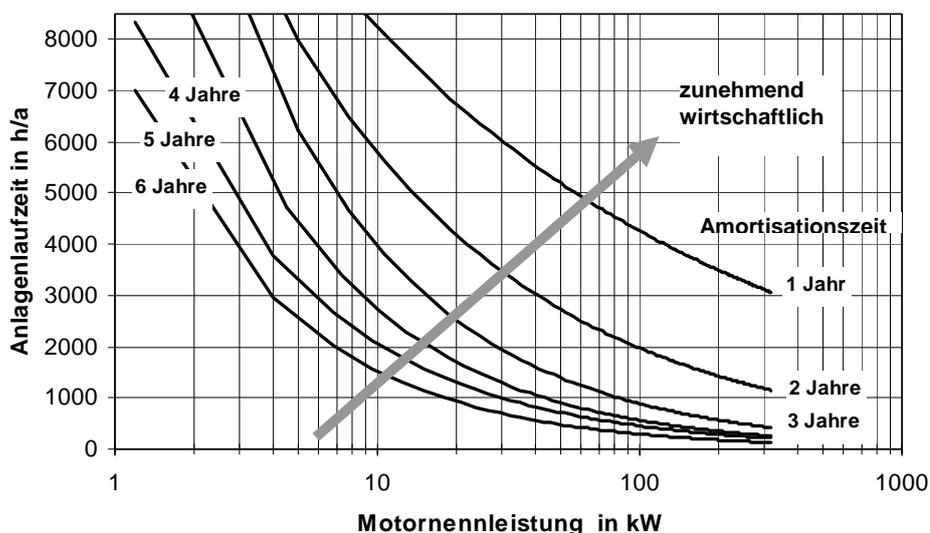


Abbildung 4.10: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Ventilatortausches (Radialventilator) (Quelle: [49])

Exakte Berechnung

Eine Möglichkeit wird in der Broschüre zu „Energieeffizienten Lüftungsanlagen in Betrieben“ [49, S. 14–15] angeführt.

„Der Berechnung sollte eine Datenerhebung mittels Checkliste (siehe Anhang) voran gehen. Hierbei sind die Daten des Ventilators und jene des Antriebs sowie die Einbaubedingungen von besonderem Interesse.“

Weitere wertvolle Informationen sind vorhandene Kennlinien und Datenblätter in den technischen Unterlagen (Betriebshandbüchern) der lufttechnischen Anlage.

Auf dieser Basis lässt sich mit guter Näherung der voraussichtliche Ist-Betriebspunkt für die Auslegung eines neuen Ventilators abschätzen. Folgende Annahmen haben sich dabei in der Praxis bewährt:

- Der Antriebsmotor arbeitet im Teillastbereich mit ca. 75% der Nennleistung $P_{nenn,alt}$. Damit gilt für die elektrische Wirkleistung des Altventilators:

$$P_{M,alt} \approx P_{nenn,alt} \quad (4.18)$$

- Der tatsächlich geförderte Luftstrom ist meist um ca. 10% geringer als der bei der Auslegung zugrunde gelegte Luftstrom \dot{V}_{alt} .
- Die Druckerhöhung Δp_{fa} des Ventilators erhält man aus dem Gerätedatenblatt.

Im nächsten Schritt wird mit diesen Daten der Einbauwirkungsgrad $\eta_{fa,M,E,alt}$ berechnet und auf Plausibilität geprüft:

$$\eta_{fa,M,E,alt} = \frac{0,9 \cdot \dot{V}_{alt} \cdot \Delta p_{fa}}{P_{M,alt}} = \frac{0,9 \cdot \dot{V}_{alt} \cdot \Delta p_{fa}}{P_{nenn,alt}} \quad (4.19)$$

Der so ermittelte Einbauwirkungsgrad beträgt bei Altanlagen 30 bis 50%. Bei wesentlich höheren Werten sind die Ausgangsdaten nochmals zu überprüfen.

Schweizer [60] stimmt dieser Aussage zum Wirkungsgrad von Altanlagen nur bedingt zu: „Für Axialventilatoren könnte der Bereich passen“. Jedoch kann ihm zufolge beispielsweise ein sich langsam drehender (ca. 600 U/min) alter Radialventilator einen sehr hohen Wirkungsgrad von rund 90% besitzen.

Bestimmung des Kapitaleinsatzes Der voraussichtliche Kapitaleinsatz kann im Rahmen der Grobanalyse nur abgeschätzt werden und gilt für die bei der Grobanalyse ermittelten Daten und Randbedingungen. Der voraussichtliche Kapitaleinsatz setzt sich bei einer energetischen Optimierung der lufttechnischen Anlage durch Ventilortausch nach Gleichung 4.20 zusammen.

$$K_I = K_V + K_A + K_M - K_R \quad (4.20)$$

- K_I Kapitaleinsatz
- K_V Kosten für neuen Ventilator einschließlich Antrieb, Zubehör und, sofern notwendig, auch einschließlich Frequenzumrichter. Die Preise sind den Herstellerkatalogen zu entnehmen.
- K_A Kosten für die Feinanalyse der lufttechnischen Anlage. Die messtechnische Erfassung des Istzustands verursacht je nach Baugröße der lufttechnischen Anlage Kosten in Höhe von 500 bis 750 EUR.
- K_M Kosten für die Montage und zusätzlich notwendige Bauteile. Die Höhe der Kosten für die Montage hängt von der Anlagengröße und dem Leistungsumfang ab. Zur Abschätzung können die in Tabelle 4.10 auf der Seite 97 angeführten Richtwerte herangezogen werden.
- K_R Minderung der Investitionskosten durch eingesparte Instandsetzungs- und Wartungskosten für den Altventilator. In der Regel ca. 10–20% der Ventilatorkosten.“

In Tabelle 4.9 sind Richtpreise zu rückwärts gekrümmten Standard-Radialventilatoren aufgelistet. Diese beinhalten neben dem Ventilator den Grundrahmen, Motorspannschlitten und Keilriemenantrieb. Spalte 1 gibt über die Baugröße bzw. den Laufraddurchmesser Auskunft. Der Ventilator wird an Hand des Druckverlustes und der Luftmenge ausgelegt. Eine Klassifizierung nach der Leistung ist nicht möglich, da z.B. ein Ventilator der Baugröße 400 für einen Einsatzbereich von 0,7–20 kW eingesetzt werden kann. Die Motorleistung hängt vom Druckverlust ab und nicht nur von der Ventilatorgröße [60].

Bestimmung der voraussichtlichen jährlichen Energiekosteneinsparung ΔK_E Nach [49, S. 14–15] sind für die Höhe der Energiekosteneinsparung neben der Wirkleistungsreduzierung durch den neuen, effizienten Ventilator vor allem die Anlagenlaufzeit, d.h. die Betriebsstunden pro Jahr, und die Preise für elektrische Leistung und elektrische Arbeit entscheidend. Zudem muss bei geregelten Ventilatoren der Lastgang berücksichtigt werden. Die Berechnungsformel für die Energieeinsparkosten lautet:

$$„\Delta K_E = (P_{M,alt} - P_{M,neu}) \cdot (k_{el} + k_e \cdot t) \quad (4.21)$$

$P_{M,alt}$	Motorwirkleistung Ventilator (alt)
$P_{M,neu}$	Motorwirkleistung Ventilator (neu); ist z.B. beim Ventilatorhersteller zu bekommen
k_{el}	Preis für elektrische Leistung
k_e	Preis für elektrische Arbeit (Strompreis)
t	Anlagenlaufzeit in Stunden pro Jahr“

Tabelle 4.9: Netto-Richtpreise (in Euro) von rückwärts gekrümmten Standard-Radialventilatoren [60]

Typ Lauf-rad- \emptyset	RZR 11	RZR 13	RZR 15
200	780		
225	810		
250	842		
280	998		
315	1.047		
355	1.168		
400			1.796
450			2.095
500			2.307
560			2.844
630			3.093
710			3.759
800			4.819
900			6.055
1000			6.777
1120		13.699	
1250		19.215	
1400		24.176	

4.4.8 Kennzahlen

- Ab 15 kW (20.000–30.000 m³/h) zahlt sich Ventilatortausch aus.
- Jeder Motor, der am Typenschild (siehe Abbildung 4.8 auf der Seite 88) nicht die Effizienzklasse EFF1 bzw. EFF2 ausweist, ist ein veralteter Motor (EFF3). Aus energetischer Sicht muss dieser Motor getauscht werden.

4.4.9 Normen

ÖVE/ÖNORM EN 50347: Drehstromasynchronmotoren für den Allgemeingebrauch mit standardisierten Abmessungen und Leistungen – Baugrößen 56 bis 315 und Flanschgrößen 65 bis 740. Oktober 2003

ÖVE/ÖNORM EN 60034-30: Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE code) (IEC 2/1464/CDV). November 2007.

DIN EN 12238: Lüftung von Gebäuden – Luftdurchlässe – Aerodynamische Prüfung und Bewertung für Anwendung bei Mischströmung. Dezember 2001.

DIN EN 12239: Lüftung von Gebäuden – Luftdurchlässe – Aerodynamische Prüfung und Bewertung für Anwendung bei Verdrängungsströmung. November 2001.

DIN EN 12599: Lüftung von Gebäuden – Prüf- und Messverfahren für die

Tabelle 4.10: Richtwerte für Montagekosten (K_M) beim Austausch des Ventilators (Quelle: [49], [60])

Volumenstrom Anlage [m ³ /h]	der Motornennleistung des Ventilators [kW]	Montagekosten [EUR]
Bis 6000	bis 2,2	500,00
6.000-12.000	bis 4,0	600,00
12.000-25.000	bis 7,5	1500,00
25.000-40.000	bis 30,0	1500,00
40.000-200.000 ⁷	bis 90,0	1500,00 ⁸

7) In dieser Volumenstromklasse werden bereits mehrere Ventilatoren eingesetzt.

8) Kosten pro Ventilator

Übergabe eingebauter raumlufttechnischer Anlagen. August 2008.

ISO 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes. Juli 2008.

VDI 2044: Abnahme- und Leistungsversuche an Ventilatoren (VDI-Ventilatorregeln). November 2002.

VDI/VDE 2640 Blatt 2: Netzmessungen in Strömungsquerschnitten; Bestimmung des Wasserstromes in geschlossenen, ganz gefüllten Leitungen mit Kreis- oder Rechteckquerschnitt (Inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig; Februar 1999). November 1981.

VDI/VDE 2640 Blatt 3: Netzmessungen in Strömungsquerschnitten; Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt. November 1983.

IEC 60034-2 determination efficiency teststandard.

IEC 61972 Method for determining losses and efficiency of three-phase cage induction motors.

4.5 Antriebe und Riementausch

„Die effizienteste Kopplung von Motor und Ventilator ist die Direktkopplung auf einer Achse. Folglich sollte nach Möglichkeit jedes unnötige Element zwischen Motor und Ventilator vermieden werden“ [46, S. 9].

Mehreren Expertengesprächen zufolge sind jedoch in raumlufttechnischen Anlagen zur Zeit rund 95% aller Ventilatoren mittels eines Riemenantriebes mit dem Elektromotor verbunden. Bei den Riemenantrieben steht ein sehr hoher Anteil an Keilriemen in Verwendung. Selten werden Direktantriebe verwendet [3], [60], [36].

Aufgrund der Expertengespräche, Erkenntnisse aus einschlägiger Fachliteratur und des höheren Wirkungsgrades von Flachriemen im Vergleich zu Keilriemen beschäftigt sich diese Maßnahme hauptsächlich mit dem Tausch von Keilriemen auf Flachriemen.

4.5.1 Allgemeines

„Bei der Antriebsart unterscheidet man zwischen Riemenantrieb und Direktantrieb. Unter den Riemenantrieben sind besonders die Flachriemenantriebe zu empfehlen. Sie zeichnen sich durch einen im Vergleich zum Keilriemen höheren Wirkungsgrad aus. Je nach Motorleistung beträgt der Wirkungsgrad der Kraftübertragung beim Keilriemen zwischen rund 90 und 95%. Moderne Flachriemen hingegen weisen Wirkungsgrade zwischen ungefähr 97 und 98% auf. Als weitere Vorteile des Flachriemenantriebs sind der weitgehend schwingungsfreie Betrieb, die Abriebsfreiheit und die wesentlich längere Lebensdauer zu nennen. Bei Direktantrieb wiederum ist die Welle des Antriebsmotors direkt mit dem Laufrad des Ventilators verbunden“ [49, S. 5].

Der Vollständigkeit halber seien hier die Maßnahmen angeführt, welche zur Optimierung des Antriebes ergriffen werden können [46, S. 9]:

- a) Regelmäßige Wartung des Antriebs
- b) Getriebe vermeiden
- c) Von Keilriemen- zu Flachriemenantrieb wechseln
- d) Von Keilriemen- zu Direktantrieb wechseln
- f) Von Flachriemen- zu Direktantrieb wechseln

Egal welche Antriebe (Keilriemen-, Flachriemen-, Direktantriebe) im Betrieb verwendet werden, sie sollten regelmäßig gewartet werden. Bei den Riemen

ist die Riemenspannung zu prüfen und verschlissene Riemen sind rechtzeitig zu ersetzen [16, S. 5].

Für die Umrüstung sollte auf jeden Fall eine Fachfirma herangezogen werden. Nach der DIN 2218 hängt die richtige Bemessung eines Keilriemens von einer Reihe von Faktoren und Umweltbedingungen ab. Die Norm empfiehlt, die Erfahrung der Firmen dieses Fachgebiets, d.h. der Hersteller von Keilriemen und Antrieben, zu berücksichtigen [19, S. 1]. Diese Aussage trifft ebenso auf den Flachriemen zu [42].

Bei der Kraftübertragung geht ein Teil der Energie verloren. Während dieser Teil bei der direkten Kupplung sehr gering ist, können die Verluste bei Keilriemenantrieben bis zu 20% der Ventilatorleistung ausmachen. Bei der Dimensionierung des Motors muss der Leistungsbedarf der Kraftübertragung (meist wird vom „Antrieb“ gesprochen) mit berücksichtigt werden. Da die Antriebsverluste selten genau vorherbestimmt werden können, werden in der Praxis oft prozentuale Leistungszuschläge angesetzt, die von der Art des Antriebs und der Wellenleistung abhängen. Diese Zuschläge beinhalten auch schon Leistungsreserven für Lastschwankungen in einer üblichen Größenordnung [16, S. 5].

Keilriemen

Keilriemengetriebene Ventilatoren sind in vielen Fällen auch bei kleinen Leistungen gegenüber direktem Antrieb vorzuziehen, da der Aus- und Einbau der Antriebsmotoren leichter und eine nachträgliche Änderung des Volumensstroms oder des Förderdruckes durch Änderungen der Riemensübersetzung möglich ist. Versperrung der Ansaugöffnung durch Riemenschutz bei zweiseitig saugenden Ventilatoren kann insbesondere bei Baugrößen < 450 mm zu Minderleistung führen [58, S. 1165]. Auch muss beachtet werden, dass in Keilriemenantrieben besonders bei kleiner Motorleistung prozentual erhebliche Verluste entstehen, die bei der Motorauslegung berücksichtigt werden müssen [58, S. 1165]. Richtwerte hierfür zeigt die Abbildung 4.11 auf der Seite 101.

Keilriemen erreichen maximal 95% Wirkungsgrad, und auch dies nur im günstigsten Fall. Bedingt durch die Eigenschaft von Keilriemen, mit zunehmender Betriebsdauer länger zu werden, verringert sich allmählich die Vorspannung des Riemens und der Schlupf steigt. Dies führt dazu, dass der Wirkungsgrad von Keilriemen sinkt, in Extremfällen auf unter 90% [45]. Um dem Schlupf entgegen zu wirken, werden Spannrollen eingesetzt [3].

Ein zweiter Grund für den vorrangigen Einsatz von Keilriemen ist, dass bei der leistungsmäßigen Auslegung der Keilriemenantriebe ausschließlich nach der Motornennleistung vorgegangen werden kann. Überlasten, die vor

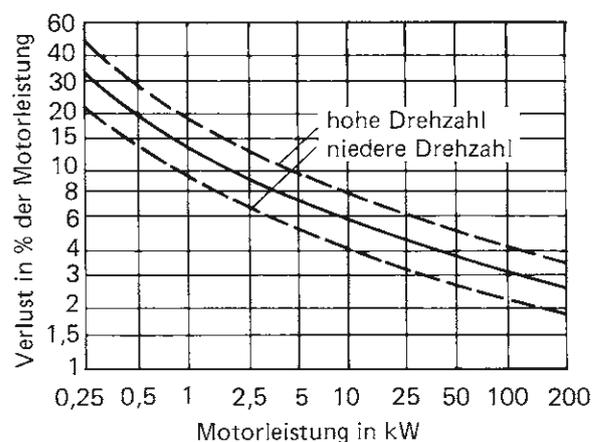


Abbildung 4.11: Verluste in Keilriemenantrieben, Richtwerte (Quelle: [58])

allen bei direkter Einschaltung oder im Stern-/Dreieck-Betrieb auftreten, werden vom Keilriemen durch kurzes Durchrutschen abgebaut [45].

In der Industrie werden Keilriemen der Type XPA, ein flankenoffener Keilriemen, eingesetzt [60]. Flankenoffene Keilriemen mit Formzahnung sind laufgenauer und haben einen geringeren Verschleiß. Durch die Zahnung sind sie besser biegsam und halten längeren Laufzeiten stand, wobei sie weniger Energie verbrauchen. Ihr Einsatzgebiet erstreckt sich von Kompressoren über die Fördertechnik bis zu Motoren [52].

Flachriemen

Für lüftungstechnische Anlagen respektive für den Antrieb von Ventilatoren werden gummibeschichtete Flachriemen eingesetzt [42].

Bezüglich der Verluste sind Flachriemen wesentlich günstiger als Keilriemen, aber nur bei größeren Leistungen (> 100 kW) sinnvoll [58, S. 1165]. Im Gegensatz sieht Schweizer [60] das energetisch sinnvolle Einsatzgebiet von Flachriemen bereits ab einer Leistung von rund 25 kW. Diese beiden Aussagen stehen im Widerspruch zu jener von Hanzlik [42], für den der Einsatz anlagenabhängig ist. Weiters verweist er auf eine Referenzanlage in den U-Bahnstationen der U2 in Wien, dort werden Flachriemenantriebe für Motoren mit einer Leistung < 5 kW eingesetzt.

Nach Hanzlik [42] haben Flachriemen einen entscheidenden Vorteil: im Unterschied zu Keilriemen ermöglichen sie eine Endlosfertigung vor Ort. In manchen Fällen bietet diese Option einen günstigeren bzw. mit Sicherheit schnelleren Austausch der Riemen. Praxisfachleute [3] sowie Schweizer [60]

stimmen dem nicht zu. Sie verwenden vorgefertigte Flachriemen. Die Erfahrung lehrte sie, dass bei der Herstellung der Schweißnaht vor Ort Falze sowie Überlappungen entstehen können. Die Fertigung der Flachriemen überlassen sie somit dem Experten, dem Riemenproduzenten. Jeweils zwei Flachriemen werden auf Lager gehalten, um einen ständigen Betrieb aufrecht erhalten zu können.

Bei der Auslegung des Flachriemens muss auch die Anlaufart des Motors berücksichtigt werden. Wird der Motor im Stern-Dreieckverfahren angefahren so muss der Flachriemen höhere Belastungen aushalten. Hingegen beim sanften Anfahren mittels Frequenzumrichter entstehen nicht so hohe Belastungen auf den Riemen [3].

Ein Nachteil von Flachriemen im Vergleich zu Keilriemen stellt die höhere Lagerbelastung dar [60]. Dies ist für die Umrüstung zu bedenken.

Zahnriemen

Vom Wirkungsgrad ist der Zahnriemen die beste Lösung unter den Riemenantrieben, man kann von mindestens 98% Wirkungsgrad ausgehen. Dem gegenüber erreicht der Keilriemen nur maximal 96% Wirkungsgrad und kann in Extremfällen bis auf 90% sinken. Bei Zahnriemen bleibt der gute Wirkungsgrad erhalten [45].

Hauptsächlicher Grund für den immer noch sehr seltenen Einsatz von Zahnriemen an Lüftern sind die Baukosten, die im Vergleich zu Keilriemen (Scheiben inklusive) sicherlich doppelt so hoch liegen [45].

Allerdings sind die Mehrkosten für Zahnriemenantriebe innerhalb weniger Monate durch den besseren Wirkungsgrad wieder eingespart. Diese Energieeinsparung als Verkaufsargument zu nutzen, hat sich bei Herstellern von Lüftern noch nicht durchgesetzt. Jedoch stellen seit einigen Jahren Anwender von Lüftern diese auf Zahnriemenbetrieb um. Der Firma Gates zufolge haben sich in allen ihnen bekannten Fällen die Umbaukosten durch die Energieeinsparung in weniger als einem Jahr amortisiert [45].

Im Vergleich zu Keilriemen kann bei der Auslegung von Zahnriemen nicht nach der Motornennleistung vorgegangen werden (siehe Seite 101). Beim Zahnriemen muss sich die Auslegung nach dem Maximaldrehmoment des Motors richten [45].

Den Vorteil der Auslegung nach der Motornennleistung, wie z.B. beim Keilriemen, hat der Zahnriemen vorerst nicht, in solchen Fällen muss sich die Auslegung an dem Maximaldrehmoment des Motors orientieren. Nur in den Fällen, wo der Motor über Frequenzumrichter betrieben wird oder ein Sanftanlasser im Einsatz ist, kann auch der Zahnriementrieb anhand der Nennleistung des Motors ausgelegt werden [45].

Direktantrieb

Die an der Ventilatorwelle geforderte Leistung kann entweder direkt vom Motor übertragen werden oder indirekt mit einer Drehzahlübersetzung. Für die direkte Übertragung kommen starre oder flexible Kupplungen in Frage. Letztere haben den Vorteil, einen leichten Wellenversatz ausgleichen und auch in gewissem Maße Drehmomentstöße und Schwingungen abfedern zu können. [16, S. 5]

Schweizer [60] empfiehlt anstatt des Flachriemens eher den Direktantrieb. Diese benötigen allerdings mehr Platz als ein Riemenantrieb. Bei großen Anlagen verschwindet dieses Problem, da hier stets genügend Platz für einen Direktantrieb vorhanden ist.

Bei Direktantrieben, welche mit Frequenzumrichter betrieben werden, wird empfohlen, stets einen Ersatz-FU auf Lager zu haben. Im Falle eines irreparablen Schadens am FU kann so ein längerer Stillstand der Anlage vermieden werden. Ein Unternehmen im Bereich des Gesundheitswesens in Wien verwendet sowohl Flachriemen- als auch Direktantriebe. Lange Stillstandszeiten in den Klimaanlageanlagen kann man sich während des Produktionsprozesses nicht leisten. Die Erfahrung zeigte, dass mit Flachriemen das Wiederaufnehmen des Betriebes schneller erfolgen kann [3].

4.5.2 Einsparungspotential

Wartung

Bei riemengetriebenen Ventilatoren sind die Riemen die Komponenten mit den höchsten Wartungsanforderungen. Bei abgenutzten Riemen kann sich der Wirkungsgrad um 5 bis 10% verringern. Die Energieverluste machen sich durch erhöhte Lautstärke bemerkbar. Bei notwendigem Ersatz eines einzelnen Riemens in einem Mehrriemensystem sollte der gesamte Riemensatz gewechselt werden, da sonst der neue Riemen überlastet wird [46, S. 9].

Riementausch bzw. -ersatz

Radgen [56, S. 78] beziffert die Potentiale eines Riementausches sowie jene eines Ersatzes durch einen Direktantrieb.

- Von Keilriemen zu Flachriemenantrieb wechseln: 5–10%

Dabei sollte man beachten, dass erst ab ca. 25 kW Motorleistung die Umrüstung im energetischen Sinn etwas bringt. Bei geringeren Leistungen steht die Reduzierung der Wartungsintensität im Vordergrund [60].

- Von Keilriemen zu Direktantrieb wechseln: 5–15%

Durchschnittliche Einsparung bei kleineren Ventilatoren 15% und bei größeren Ventilatoren 5%.

Wirkungsgrade der Antriebe

Um die Potentiale noch etwas genauer abschätzen zu können, werden im Anschluss Wirkungsgrade mit Leistungsbezug der einzelnen Antriebsformen angeführt [57, S. 4]:

- Direktantrieb: 100%
- Einzelner Keilriemen
 - Effizienz der Kraftübertragung von 83% (für $P_{el} < 5$ kW) oder
 - Effizienz der Kraftübertragung von 90% (für $P_{el} > 5$ kW)
- Mehrere Keilriemen (Keilriemensatz)
 - Jeder zusätzliche Riemen reduziert die Kraftübertragung um je 1%-Punkt.
- Flachriemen
 - Effizienz der Kraftübertragung von 90% (für $P_{el} < 5$ kW) oder
 - Effizienz der Kraftübertragung von 96% (für $P_{el} > 5$ kW)

Die oben angeführten Werte stimmen mit den Wirkungsgraden, welche in der DIN EN 13779 [20, S. 68] stehen, gut überein.

Tabelle 4.11: Wirkungsgrade nach DIN EN 13779

		Wirkungsgrad in Prozent (%)		
		niedrig	normal	hoch
Riemenantrieb	$< 1,1$ kW	70	75	80
Riemenantrieb	$< 3,0$ kW	75	80	85
Riemenantrieb	$< 7,5$ kW	80	85	90
Riemenantrieb	$> 7,5$ kW	85	90	95
Flachriemen		90	93	97

4.5.3 Vorteile und Nachteile

Keilriemen

Vorteile

- In Bezug auf die Fluchtung der Riemenscheiben verzeiht der Keilriemen erfahrungsgemäß mehr Abweichungen als der Flachriemen [3].
- Der Keilriemen belastet die Lager weniger als der Flachriemen. [60]
- Im Bezug auf das Fluchten der Riemenscheiben verzeiht der Keilriemen größere Abweichungen [3].
- Im Vergleich zum Flachriemen hat er einen geringeren Stückpreis in der Anschaffung [60].

Nachteile

- Der Keilriemen besitzt einen geringeren Wirkungsgrad als der Flachriemen.
- Die Wartungsintensität ist größer als beim Flachriemen [60].
- Bei Ausfall eines Keilriemens muss der gesamte Riemensatz getauscht werden.

Flachriemen

Laut der Broschüre [9, S. 5] von Forbo Siegling Austria, einem Flachriemenhersteller, haben Flachriemen folgende

Vorteile

- Flachriemen besitzen einen höheren Wirkungsgrad als Keilriemen. Energieverluste entstehen bei Keilriemen nicht nur durch die Walkarbeit im Material, sondern auch durch die Flankenreibung und andere bauartbedingte Eigenschaften.

Anhand der Abbildung 4.12 auf Seite 106 kann man vereinfacht sagen, dass bei einer erbrachten Leistung von 100 kW über den Flachriemen 2% davon verloren gehen. Den Rest, also 98 kW gibt der Riemen weiter an den Ventilator. Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad des Flachriemens von rund 98%. Hingegen erreicht der Keilriemen nur rund 95% [42].

- Flachriemen sind hochbelastbar.
- Sie haben ein ausgezeichnetes Dämpfungsverhalten.
- Flachriemen sind äußerst robust und langlebig.

Damit sind sie das ideale Antriebselement bei trockenen und auch staubigen Betriebsverhältnissen in allen Industriebereichen [9, S. 5].

- Weiters zeichnen sich Flachriemen durch geringen Eigenenergieverbrauch aus [9, S. 5], was auf den höheren Wirkungsgrad zurück zu führen ist.
- Sie lassen im Vergleich zu Keilriemen eine Endloserstellung vor Ort zu. Somit kann ein rascher und manchmal auch günstigerer Riementausch direkt bei der Anlage erfolgen [42]. Gemäß den Aussagen von [3] und [60] ist dieser Punkt kritisch zu betrachten. Näheres ist im Abschnitt 4.5.1 „Allgemeines“ unter „Flachriemen“ auf Seite 101 zu finden.

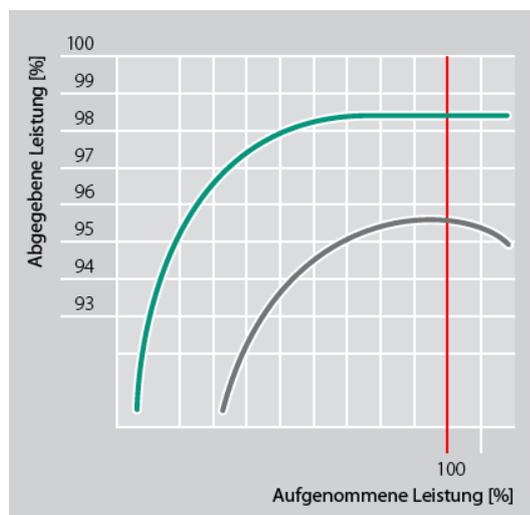


Abbildung 4.12: Wirkungsgradverlauf eines Keilriemens (untere Kurve) bzw. Flachriemens (obere Kurve) (Quelle: [9])

Tabelle 4.12 auf Seite 107 zeigt Vorteile des Flachriemens in Verbindung mit den Eigenschaften desselben.

Tabelle 4.12: Eigenschaften und Vorteile eines Flachriemens [9, S. 3]

Eigenschaften	Vorteile
dünn/flexibel	– geringer Eigenleistungsverbrauch, kleine Umlenkdurchmesser
konstanter Reibwert, hohe Abriebfestigkeit	– sichere Drehzahleinhaltung, hohe Standzeiten
hoher Elastizitätsmodul	– kurze Spannweite, geringer Dehn-schlupf
quersteif	– hohe Kantenstabilität
gute Dämpfungseigenschaften	– schont die Lager, schwingungsfreier Lauf

Nachteile

- Flachriemen haben eine höhere Lagerbeanspruchung [3], [60].
- Höherer Stückpreis in der Anschaffung im Vergleich zum Keilriemen [60].

4.5.4 Beschreibung der Maßnahme

„Grundsätzlich sichert das regelmäßige Warten der Antriebe, das Prüfen der Riemen Spannung und das rechtzeitige Ersetzen verschlissener Riemen einen intakten Antrieb“ [16, S. 5]. Experten sowie Betreiber lufttechnischer Anlagen mit einem funktionierenden Instandhaltungs-Prozess weisen ebenso auf die Wichtigkeit der Wartung in Bezug auf die Funktionalität sowie die Energiekostensenkung hin. Daher widmet sich die Maßnahmenbeschreibung zunächst Verbesserungen, die im Betrieb zu meist ohne Fremdpersonal durchgeführt werden können.

Tipps zur Riemeninstandhaltung

„Im Interesse geringer Lebenszykluskosten sollten die Antriebsverluste minimiert werden. Eine sachgemäße Wartung, wie z. B. das Nachspannen und rechtzeitige Austauschen von Riemen und falls nötig auch das Schmieren von Getrieben, reduziert nicht nur die Energiekosten, sondern oft auch die Ausfallwahrscheinlichkeit“ [16, S. 5].

Instandhaltungskontrollen bei Riemen

- „Überprüfen Sie die Riemen­spannung.
- Kontrollieren Sie den Abnutzungsgrad der Scheiben.
- Prüfen Sie die Fluchtung der Scheiben.
- Achten Sie auf Geräusche (können auf Probleme hindeuten).
- Tauschen Sie alle Riemen gleichzeitig aus.

Riemen sind nicht sehr wartungsintensiv. Um jedoch unerwarteten Problemen vorzubeugen, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Regelmäßiges Nachspannen der Riemen
- Festziehen loser Antriebskomponenten, Schrauben und Muttern, Spannrollenhebel, Motorträger, Schutzvorrichtungen und Spannrollenschrauben
- Kontrollieren Sie die ordnungsgemäße Fluchtung der Scheiben, die Abnutzung der Scheibenrille, die korrekte Fluchtung der Wälzlager sowie den Abnutzungsgrad der Riemen.
- Halten Sie die Schutzvorrichtungen sauber, um eine geeignete Belüftung sicherzustellen.
- Reinigen Sie die Scheibenrillen, um die Ansammlung von Staub, Schmutz, Rost oder anderen Fremdkörpern zu vermeiden.

Entspricht die Antriebsleistung nicht den Erwartungen, können bestimmte Umwelteinflüsse dafür verantwortlich sein, u. a. extrem hohe oder niedrige Temperaturen, Staub und Schmutz, chemische Dämpfe und Öle. Ebenso können rauhe Witterungsbedingungen, hohe Luftfeuchtigkeit und UV-Licht die Antriebsleistung beeinträchtigen.

Für die Fehlersuche werden folgende Kontrollen und Prüfungen empfohlen:

- Fluchtung der Scheiben
- Richtige Riemen­größe und korrekter Querschnitt
- Geeignete Montagespannung
- Verunreinigung der Riemen mit Ölen, Fetten oder Riemenzugmittel

Unter keinen Umständen sollte ein Riemen mit Gewalt auf eine Scheibe geschoben werden. Es wird empfohlen, den Achsabstand des Antriebs anzupassen, um den Riemen problemlos über den Scheibenrand gleiten zu lassen. Bei Bedarf muss eine der Scheiben demontiert werden, um den Riemen zu installieren.

Alle Antriebe müssen eine geeignete Konstruktion aufweisen und langlebig sein. Um die optimale Größe und Anzahl der einzusetzenden Antriebsriemen zu bestimmen, sollten auch andere Konstruktionsfaktoren berücksichtigt werden. So müssen die Scheiben beispielsweise den branchenüblichen Toleranzen entsprechen. Die Schutzvorrichtungen müssen einen geeigneten Schutz des Antriebs sicherstellen und gleichzeitig für eine ausreichende Belüftung sorgen. Die Konstruktionselemente des Antriebs einschließlich Rahmen, Motorenhalterungen, Motorenpolster usw. müssen für höchste Beanspruchung ausgelegt sein. Außerdem sollten Vibrationen möglichst vermieden werden. Wichtig ist zudem eine problemlose Instandhaltung und Inspektion.“

Verbesserungsmaßnahmen bei bestehenden Systemen

Verbesserung problematischer Antriebe „Wenn der Antrieb korrekt berechnet, montiert und gewartet wird, ist kein großer Aufwand erforderlich. Gelegentlich kann ein Antrieb versehentlich beschädigt oder verstellt werden. Die Veränderung von Betriebsanforderungen oder Umgebungseinflüssen kann auch Probleme hervorrufen.“ [35, S. 23]

Verbesserung der Antriebsleistung „Ein Riemenantrieb kann manchmal aufgerüstet werden, um die Leistung zu verbessern. Der erste Schritt besteht darin zu prüfen, ob einfache Verbesserungen zu Mindestkosten durchgeführt werden können. Das beinhaltet die Prüfung der Antriebskonstruktion auf ausreichende Kapazität. Hier sind einige Beispiele kleinerer Veränderungen, die die Leistung verbessern könnten:

- Scheibendurchmesser erhöhen.
- Zahl der Riemen erhöhen oder breitere Riemen benutzen.
- Vibrationsdämpfung in das System integrieren
- Belüftung der Schutzvorrichtung verbessern, um Betriebstemperatur zu senken.
- Korrekte Mindestdurchmesser für Scheiben und Außenspannrollen verwenden.

- Allzweckriemen durch optimierte Riemen ersetzen.
- Abgenutzte Scheiben ersetzen.
- Scheiben richtig fluchten.
- Spannrolle sollte immer im Leertrum positioniert sein.
- Neu montierte Keilriemen nach 4 bis 24 Stunden Einlaufzeit nachstellen.
- Korrekte Riemenmontage und Wartungsverfahren prüfen.

Wenn weitere Verbesserungen erforderlich sind, besteht der nächste Schritt darin, den Antrieb auf ein leistungsfähigeres Riemensystem (z.B.: Flachriemenantrieb) aufzurüsten“[35, S. 23].

Riementausch

Laut den Erfahrungen der Ingenieure [3] ist für den Umbau von Keil- auf Flachriemenantrieb Folgendes zu berücksichtigen:

- Die Riemenscheiben inkl. der Lagerbuchsen sind zu tauschen.
- Eventuell muss der Motorschlitten getauscht werden.
- Auf Grund der besseren Kraftübertragung (durch höheren Wirkungsgrad des Flachriemens) könnte der Ventilator versteift werden müssen.
- Unter Umständen müsste der Unterbau angepasst bzw. verstärkt werden.

Für die Bewertung des Einzelfalles sollte ein Fachmann herangezogen werden.

Bemerkung Bei einem Unternehmen im Bereich des Gesundheitswesens lag der Grund für den Wechsel von Keil- auf Flachriemen grundsätzlich in der Verlängerung des Wartungsintervalls (Arbeitszeit- und damit Kosteneinsparung) sowie in der Notwendigkeit, die Leistung des Ventilators zu erhöhen, um den Anforderungen an die Luftwechselrate gerecht zu werden. Die Energieeinsparung war ein positiver Nebeneffekt [3].

Nach Schweitzer [60] zahlt sich energetisch gesehen der Riementausch ab einer Leistung von 25 kW aus.

4.5.5 Marktdurchdringung – Umsetzung in der Industrie

Nach Schweizer [60] sind Keilriemen in der Industrie mit einem prozentualen Anteil von rund 90% weit verbreitet. Die Aussage deckt sich mit jener des Unternehmens im Bereich des Gesundheitswesens [3], welches auf 95% Keilriemenanteil bei seinen Anlagen hinweist.

Flachriemen und Direktantriebe haben aus dieser Sicht einen großen Aufholbedarf, wobei man bedenken muss, dass „bis vor 5 Jahren nur Riemenantriebe verwendet“ [60] wurden. Allmählich erfolgt nun der Umstieg in Richtung Direktantrieb.

4.5.6 Bewertung der Maßnahme

Bestimmung der voraussichtlichen jährlichen Energiekosteneinsparung ΔK_E :

$$\Delta K_E = P_{W, Motor} \cdot t \cdot (\eta_{Flachr.} - \eta_{Keilr.}) \cdot k_e \quad [\text{kWh/a}] \quad (4.22)$$

$P_{W, Motor}$	Motorleistung
t	Anlagenlaufzeit in Stunden pro Jahr
$\eta_{Flachr.}$	Wirkungsgrad des Flachriemens
$\eta_{Keilr.}$	Wirkungsgrad des Keilriemens
k_e	Strompreis

Bestimmung des Kapitaleinsatzes ΔK_I :

$$K_I = K_{Flachr.} + K_M \quad (4.23)$$

K_I	Kapitaleinsatz
$K_{Flachr.}$	Kosten für den gesamten neuen Flachriemensatz (Riemen, Riemenscheiben, Lager, ...). Für Richtpreise siehe Spalte 2 in Tabelle 4.13 auf der Seite 112. Weiters wird auf die Herstellerkataloge verwiesen.
K_M	Kosten für die Montage des Flachriemensatzes (siehe Spalte 3 in Tabelle 4.13 auf der Seite 112).

Ein Beispiel zur Kostenersparung im Bereich Heizung, Lüftung, Klimatisieren [35, S. 47] wurde mit den recherchierten Daten modifiziert:

- Motor: 40 kW, 11.450 U/min, 89% Effizienz

Betriebsstunden: 24 Std./Tag, 7 Tage/Woche, 52 Wochen/Jahr

Energiekosten: 0,10 EUR/kWh⁹

- Kosten eines neuen Flachriemenantriebs nach Tabelle 4.13: 1700,00 EUR
- Angenommene Effizienzsteigerung von 7% ($\eta = 96\%$ bei einem Flachriemen mit $P_{el} > 5$ kW)

Jährliche Energieeinsparung:

$$40 \text{ kW} \cdot 8.736 \text{ h} \cdot (0,96 - 0,89) = 24.460,00 \text{ kWh/a}$$

Jährliche Energiekosteneinsparung:

$$24.460,00 \text{ kWh/a} \cdot 0,10 \text{ EUR/kWh} = 2.446,00 \text{ EUR/a}$$

- Amortisationszeit:

$$1.700,00 \text{ EUR} / 2.446,00 \text{ EUR/a} = 0,70 \text{ Jahre oder } 8 \frac{1}{2} \text{ Monate}$$

Die Kosten für den Umbau von Keil- auf Flachriemenantrieb werden in der Tabelle 4.13 für eine Abschätzung pauschalisiert. Die Preise sind als Richtpreise zu sehen. Ab 45 kW Leistung werden keine Einzelventilatoren mehr eingebaut, sondern 2 bzw. 3 Stück im Parallelbetrieb. Billiger, leichter ausbaubar sowie das Vorhandensein einer Ausfallreserve werden als Vorteile genannt [60].

Tabelle 4.13: Kosten für den Umbau von Keil- auf Flachriemenantrieb (Quelle: [60])

Leistung kW	Materialkosten EUR	Montagekosten EUR
1,1 – 4,0	350,00	300,00
5,5 – 11,0	550,00	400,00
15,0 – 22,0	800,00	400,00
22,0 – 45,0	1200,00	500,00

⁹ Siehe Abschnitt 4.1 auf der Seite 54

4.5.7 Kennzahlen

- Ab 25 kW zahlt sich energetisch gesehen der Wechsel von Keil- auf Flachriemen aus. Ein weiterer Vorteil hierbei ist die geringere Wartungsintensität des Flachriemens [60].

4.5.8 Normen

DIN 2218: Endlose Keilriemen für den Maschinenbau; Berechnung der Antriebe, Leistungswerte. April 1976.

DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüfungs- und Klimaanlageanlagen und Raumklimasysteme. September 2007

4.6 Filtertausch

4.6.1 Allgemeines

Die Maßnahme des Filtertausches fällt grundsätzlich in den Bereich der Wartung einer lufttechnischen Anlage. Sie wird hier allerdings aufgrund sehr einfach nachzuvollziehender Parameter für die Umsetzung gesondert behandelt.

„Luftfilter dienen zur Abscheidung von Staub und anderen Verunreinigungen aus der Luft“ [49, S. 17–18]. Folgende Anforderungen werden an diese gestellt:

- Ausreichender und möglichst gleichmäßiger Abscheidegrad
- Ausreichende Staubspeicherfähigkeit, also lange Standzeit
- Möglichst geringer Druckverlust
- Leichte Wartung

Zur Beurteilung und Auslegung von Filteranlagen wird der Abscheidegrad in Prozent in Abhängigkeit von der Staubgröße herangezogen. Der Abscheidegrad ist das Verhältnis von abgeschiedener Staubmasse zur in der Luft enthaltenen Staubmasse.“

Bei der Dimensionierung der Filterstufe sollte ein von der Situation (Betriebszeiten, Staubbelastung, besondere Verunreinigungsbedingungen, ...) abhängiges Optimierungsergebnis das Ziel sein [20, S. 44].

Bei der Auswahl von Luftfiltern sollte auf eine möglichst lange Standzeit geachtet werden. Deshalb ist ein Feinfilter nur in der Kombination mit einem Grobstaubfilter sinnvoll. Zudem sollte auf eine niedrige Flächenbelastung geachtet werden. Im Zuge der Festlegung der Filterklasse sind für Aufenthalts- bzw. Arbeitsräume die Auswahlkriterien der DIN 1946 Teil 2 zu beachten. Bei einstufiger Filterung sollte demnach das Filterelement ein Feinstaubfilter sein und mindestens der Klasse F5 entsprechen [49, S. 17–18].

4.6.2 Einsparungspotential

Radgen [56, S. 79] weist folgende Potenziale aus:

- Regelmäßige Wartung der Ventilatoren und der Systemkomponenten:
5 – 20%

Tabelle 4.14: Höchste Druckdifferenzen von Filtern (Quelle: [21], [53])

	Filterklasse	Anfangs- druckdifferenz	Enddruckdifferenz	
			DIN 13053	EN 779
Grobstaubfilter	G1–G4	30 Pa	150 Pa	250 Pa
Feinstaubfilter	F5–F7	50 Pa	200 Pa	450 Pa
Feinstaubfilter	F8–F9	50 Pa	300 Pa	450 Pa

4.6.3 Kriterien für den Einsatz der Maßnahme

Als Kriterien für den Filtertausch können die Einhaltung der Enddruckdifferenzen sowie die Betriebsstunden der Filter genannt werden. Eine regelmäßige Wartung der Anlagen ist dem Ganzen zu Grunde zu legen.

4.6.4 Beschreibung der Maßnahme

Die Verschmutzung des Luftfilters ist mit fest eingebauten Messgeräten vor Ort zu überwachen. Die wirtschaftliche Enddruckdifferenz, d.h. die Druckdifferenz, bei der das Filterelement gewechselt werden soll, kann über eine Bilanz der Filterwechsel- und Luftförderkosten bestimmt werden [49, S. 17–18].

Die in Tabelle 4.14 angegebenen Werte gelten zwar nicht für Anlagen in produzierenden Betrieben, können allerdings als Anhaltswerte dienen. Die darin in Spalte 4 (DIN 13053) angeführten Enddruckdifferenzen sind die typischen Höchstwerte für RLT-Geräte im Betrieb. Aus Gründen der Energieeinsparung sind sie niedriger als die in EN 779 [21, S. 37].

Diese Druckdifferenzen ähneln jenen, welche ein Unternehmen im Bereich des Gesundheitswesens als Kriterium für den Wechsel ihrer Filter verwendet (F7: 250 Pa, F9: 350 Pa) [3].

Die DIN 13779 macht folgende allgemeine Bemerkungen zu Filtern in lufttechnischen Anlagen [20, S. 45–46]:

- Die Enddruckdifferenz wird im Hinblick auf zulässige Schwankungen des Luftstromes und für eine Kostenbewertung im Hinblick auf die Lebensdauerkosten (Life Cycle Costs) bewertet.
- Filter sollten spätestens ausgewechselt werden, wenn der Druckverlust den festgelegten zulässigen Endwert erreicht hat oder wenn folgende

hinsichtlich der Hygiene einzuhaltenen Bedingungen erreicht wurden. Lassen sich die Betriebsstunden vorhersehen, können diese ebenfalls ein Kriterium für das Auswechseln sein:

- Das Filter in der ersten Filterstufe sollte nach 2000 Betriebsstunden oder nach maximal einem Jahr ersetzt werden.
- Das Filter in der zweiten Filterstufe und Filter in der Fortluft- oder Umluftsystemen sollten nach 4000 Betriebsstunden oder nach maximal zwei Jahren ersetzt werden.

„Bei Filtern der Klasse F7 und höher sollte der Einfluss der Druckbedingungen auf die Luftvolumenströme beachtet werden, da diese sich auf den Verbrauch an elektrischer Energie auswirken“ [20, S. 45].

„Ein Filterwechsel sollte bei beladenen Filtern vorgenommen werden, was durch das Erreichen des Enddrucks angezeigt wird. Hierzu werden sowohl eine visuelle Überprüfung als auch eine Überwachung des Druckabfalls empfohlen“ [20, S. 45].

„Folgenden Daten müssen gut sichtbar (z.B. durch Aufkleber) auf der Filtereinheit angegeben werden: Filterklasse, Art des Filtermaterials, Enddruckdifferenz. Beim Wechseln der Filter muss der Anwender diese Informationen überprüfen und aktualisieren“ [21, S. 37].

4.6.5 Bewertung der Maßnahme

Die Bewertung des Filtertausches kann relativ einfach erfolgen – je höher die Enddruckdifferenz am Filter, desto höher ist auch der Energieverbrauch durch das Filter. Die in der DIN 13053 [21, S. 37] für Energieeinsparung empfohlenen Werte (Tabelle 4.14 auf der Seite 115) sollten eingehalten werden.

Bestimmung der voraussichtlichen jährlichen Energiekosteneinsparung ΔK_E Vereinfacht kann gesagt werden:

$$\Delta K_E = (\Delta p_{Filter,alt} - \Delta p_{Filter,neu}) \cdot \dot{V} \cdot t \cdot k_e \quad [\text{kWh/a}] \quad (4.24)$$

$\Delta p_{Filter,alt}$	Alte Enddruckdifferenz
$\Delta p_{Filter,neu}$	Neue Enddruckdifferenz
\dot{V}	Volumenstrom der Anlage
t	Anlagenlaufzeit in Stunden pro Jahr
k_e	Strompreis

Die Abbildung 4.13 soll den Energieverbrauch sowie die Energiekosten pro Jahr bei den empfohlenen Enddruckdifferenzen nach der DIN 13053 veranschaulichen. Als Luftmenge wurde $3.400 \text{ m}^3/\text{h}$ genommen, dies entspricht der Luftmenge zur Klassifizierung der Filter nach EN 779. Die Betriebsstunden betragen 8.736 h/a .

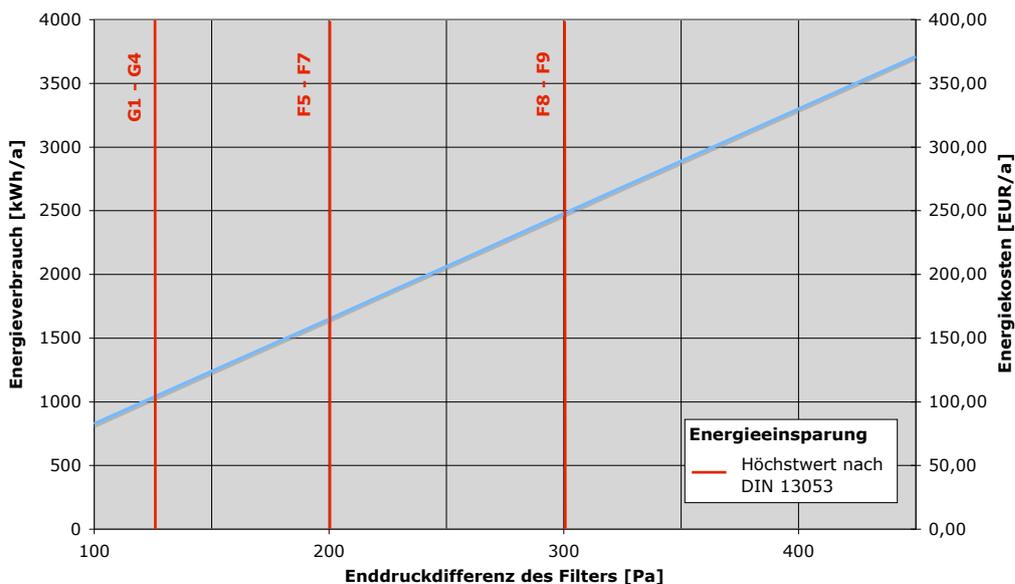


Abbildung 4.13: Enddruckdifferenz eines Filters ($3.400 \text{ m}^3/\text{h}$, 8.736 h/a)

4.6.6 Kennzahlen

- Zweimal pro Jahr sollte eine Sichtprüfung der Filter erfolgen [3].
- Das Filter in der ersten Filterstufe sollte nach 2.000 Betriebsstunden oder nach maximal einem Jahr ersetzt werden.
- Das Filter in der zweiten Filterstufe und Filter in Fortluft- oder Umluftsystemen sollten nach 4.000 Betriebsstunden oder nach maximal zwei Jahren ersetzt werden.
- Die max. Enddruckdifferenzen in Bezug auf Energieeinsparung sollten folgende Werte nicht überschreiten:

G1 – G4	150 Pa
F5 – F7	200 Pa
F8 – F9	300 Pa

4.6.7 Normen

ÖNORM EN 779: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Bestimmung der Filterleistung. April 2003.

ÖNORM H 6021: Lüftungstechnische Anlagen – Reinhaltung und Reinigung. September 2003.

ÖNORM EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten. November 2007.

4.7 Wartung, Leckagen, Druckverluste

4.7.1 Allgemeines

In diesem Teil des Maßnahmenkapitels werden die Wartung von lufttechnischen Anlagen, die Leckagen (Undichtigkeiten) in den Luftleitungen sowie die Druckverluste in der Anlage behandelt. Es konnte nur wenig in Bezug auf die Optimierung bestehender Anlagen recherchiert werden. Die gesammelten Informationen sollen zwecks ihrem Informationsgrad trotzdem hier erwähnt werden.

Leckagen

Die Prüfung der Dichtheit von Lüftungsanlagen ist in der EN 12237 für runde Luftleitungen und in der EN 1507 für rechteckige Luftleitungen angegeben. Die EN 1886 legt die Anforderungen für die Dichtheit von Luftbehandlungsgeräten, einschließlich Bypass-Undichtheit von Filtern sowie deren Prüfung fest.

Um übermäßige Energieverluste zu vermeiden und die vorgesehene Luftverteilung zu sichern, sollte der Verlustanteil des Luftvolumenstroms der Anlage geringer als 2% sein. Dies entspricht im Allgemeinen der Dichtheitsklasse Klasse B nach EN 12237. Leitlinien zur Abschätzung der Leckagen und deren Einfluss auf die Luftströme und den Energieverbrauch findet man in EN 15242 und EN 15241 [20, S. 49]. Die Durchsicht dieser Normen führte zu keiner brauchbaren Bewertungsmethode.

Dichtheitsklassen Bei den in Tabelle 4.15 auf der Seite 120 angeführten Dichtheitsklassen hat die Klasse A die geringste und C die höchste Anforderung an die Dichtheit der Anlage. Gegenwärtig ist in Österreich die Klasse B Standard, davor galt die Klasse A, welche hohe Undichtheiten zulässt. Viele Kunden wollen noch die Klasse A eingebaut haben, obwohl ihnen die Klasse B empfohlen wird. Ein Lüftungskanal der Klasse A hat 3-mal so viele Leckagen wie ein B-Kanal. Die Entscheidung für eine höhere Dichtheitsklasse amortisiert sich in der Regel in 1–2 Jahren. [48]

Der erste Schritt zur Behebung der Leistungsverluste von Ventilatorsystemen ist die Kontrolle der Dichtheit des Leitungsnetzes. Besonders flexible Verbindungen und Bereiche, die hohen Vibrationsniveaus ausgesetzt sind, neigen zur erhöhten Leckage [46, S. 10].

Tabelle 4.15: Dichtheitsklassen nach EN 13779 und EN 15242

Dichtheits- klasse	Verlust/ Luft- volumen- strom [%]	Beschreibung
Klasse A	0,06	Legt die Anforderungen an die Undichtheit von geschlossenen Luftbehandlungseinheiten sowie von Geräteräumen und Kammern für Ventilatoren und andere Einrichtungen fest.
Klasse B	0,02	Stellt die allgemeine Mindestanforderung für Luftleitungen dar.
Klasse C	0,00	Ist in vielen Fällen die empfohlene Mindestklasse, besonders bei einer hohen Druckdifferenz im Rohrgehäuse.
Klasse D	0,00	Wird in besonderen Situationen angewendet: vor allem bei Installationen mit hohen Anforderungen in Bezug auf die Energieeffizienz oder die Hygiene.

4.7.2 Einsparungspotential

Radgen [56, S. 79] weist folgende Potenziale aus:

- regelmäßige Wartung der Ventilatoren und der Systemkomponenten: **5 – 20%** sowie die
- Leitungen: ca. **15%**

4.7.3 Herkömmliche Strategie

Luftkanäle und Leckagen

Bei Radgen [56, S. 79] findet man Informationen zur Energieeinsparung in Bezug auf die Kanäle. Diese beziehen sich allerdings eher auf die Planungsphase und nicht auf Verbesserungsmaßnahmen im Betrieb. Trotzdem sei die Problematik hier aufgezeigt:

- Das Kanalsystem wird typischer Weise nach Fertigstellung des Gebäudes eingebaut. Selten erfolgt eine Berücksichtigung während der Planungs-

phase. Aus diesem Grund müssen bei der Auslegung der Luftanlage Kompromisse bzw. Umwege bei der Kanalführung (Bögen, Durchmesseränderungen) in Kauf genommen werden. Meist werden rechteckige Luftschächte ausgeführt, wobei sich runde Querschnitte bezüglich des damit verbundenen Energieverbrauches besser auswirken würden.

- Bei zentralen Lüftungsanlagen müssen die einzelnen Zonen bezüglich ihrer unterschiedlichen Luftmengen abgeglichen werden. Schweizer [60] sieht, genau wie Radgen, hierbei das Problem, dass die Stränge für die Regelung bzw. bei Auslegung nicht korrekt dimensioniert werden. Aus Zeitmangel der Techniker in den Ingenieurbüros sowie der kurzfristigen Auftragsvergabe hat man nicht die Zeit für diese exakten Berechnungen. Eine Standard-Rohrdimension, die ungefähr passt, wird eingebaut. Die Feineinstellung der Volumenströme wird über angesteuerte Drosselventile, die heutzutage kostengünstig zu erwerben sind, geregelt. Die Betriebskosten geraten dabei in Vergessenheit. Eine kurzsichtige Betrachtung der Anschaffungskosten sowie der Konkurrenzdruck am Markt können als Gründe für dieses Vorgehen genannt werden.

Einzonen-Anlagen, welche nur einen Raum versorgen, ermöglichen einen bedarfsgerechten Betrieb.

4.7.4 Beschreibung der Maßnahme

Wartung

Die folgende Checkliste soll den Eigentümern und Nutzern des Gebäudes, in welchem die lufttechnische Anlage betrieben wird, beim Wartungsvorgang helfen. Im Sinne einer regelmäßigen Wartung nach EN 15240 (Klimaanlagen) und EN 15239 (Lüftungsanlagen) sollte diese Liste periodisch überprüft werden, sowie eine entsprechende Dokumentation bereitgehalten werden [20, S. 63].

- a) Betrieb mit festgelegten Raumtemperaturen
- b) Betrieb mit festgelegten Raumfeuchten
- c) Bedarfsgerechter Betrieb der Anlage
- d) Korrekte Anwendung des Sonnenschutzes im Sommer und im Winter
- e) Minimierung innerer Wärmelasten im Sommer
- f) Regelmäßige Kontrollen von Bauteilen (Filter, Antriebe, Sauberkeit, Sensoren)

- g) Regelmäßige Kontrolle des Energieverbrauchs
- h) Regelmäßige Kontrolle des hygienischen Zustandes der Anlage
- i) Betriebsoptimierung nach den tatsächlichen Bedingungen und Anforderungen

Der Abschnitt „Beschreibung der Maßnahme“ 4.5.4 auf der Seite 107 bzw. der Abschnitt 4.6.6 „Kennzahlen“ auf der Seite 117 geben in den vorangegangenen Maßnahmenbeschreibungen bereits Auskünfte zum Wartungsprozess.

Druckverluste

Der notwendige Energieverbrauch zum Transport von Luft in einem Lüftungsabschnitt erhöht sich unter anderem durch den Druckabfall. Bei bestehenden Anlagen hängt der Hauptfaktor in Bezug auf den Energieverlust zusammen mit dem Nutzungszeitraum bei der Be- und Entlüftung der Räume unter Berücksichtigung eines erhöhten Druckabfalls auf Grund verschmutzter Filter oder Leitungen [22, S. 21]. Ebenso können Klappen einen hohen Druckverlust verursachen. Fast vollständig geschlossene bzw. nicht ordnungsgemäß funktionierende Klappen (z.B. eingerostete) sind hierbei als Gründe zu nennen. „Bei bestehenden Gebäuden sind die hauptsächlich zu berücksichtigenden Punkte die Verbindungen und die Klappenalterung. Klappen sollten sauber sein und auf Schäden hin überprüft werden; außerdem sollte überprüft werden, ob sie korrekt funktionieren und eingestellt sind, um einen ordnungsgemäßen Betrieb der Lüftungsanlage sicherzustellen“ [22, S. 21]. Der Instandhaltung der Anlage kommt hierbei eine Schlüsselfunktion zu.

Die Norm EN 13779 [20, S. 54] gibt „typische Druckverluste“ von Bauteilen in Luftbehandlungseinheiten an. Den tatsächlichen Werten der Bauteile ist natürlich ein Vorzug zu geben; stehen diese allerdings nicht zur Verfügung, können die in Tabelle 4.16 auf der Seite 123 aufgelisteten Werte als Standardwerte verwendet werden.

Die Abbildung 4.14 auf der Seite 124 veranschaulicht die Druckbedingungen in einer Anlage.

In der EN 13053 [20, S. 52] findet man Empfehlungen zum Druckabfall für Filter und Filterstufen, Klappen, Klappenbereiche und Mischbereiche in Luftbehandlungseinheiten. Bei Anlagen mit variablem Luftstrom werden zusätzliche Anforderungen festgelegt für:

- die maximale Schwankung der Druckdifferenz und das Verhältnis des Fortluft- zum Zuluftstrom;
- die Drucküberwachung.

Tabelle 4.16: Beispiele für Druckverluste von Bauteilen in Luftbehandlungseinheiten (Quelle: [20])

Bauteil	Druckabfall in Pa		
	Niedrig	Normal	Hoch
Luftleitungssystem Zuluft	200	300	600
Luftleitungssystem Fortluft	100	200	300
Heizregister	40	80	100
Kühlregister	100	140	200
Wärmerückgewinnungseinheit H3 ¹⁰	100	150	250
Wärmerückgewinnungseinheit H2-H1 ¹¹	200	300	400
Befeuchter	50	100	150
Luftwäscher	100	200	300
Luftfilter F5-F7 je Filterstufe ¹²	100	150	250
Luftfilter F8-F9 je Filterstufe ¹³	150	250	400
HEPA-Filter (Schwebstofffilter)	400	500	700
Gasfilter	100	150	250
Schalldämpfer	30	50	80
Luftdurchlass	30	50	100
Lufteinlass und -auslass	20	50	70

8,9) Klasse H1-H3 nach EN 13053

10,11) Endgültiger Druckverlust

Luftleitungen

„Strömungsgünstig ausgebildete und undichte Luftleitungen führen im Betrieb zu hohen Kosten“ [49, S. 17–18]. Vor allem die Verbindungen und das Alter der Luftleitungen sind bei bestehenden Gebäuden in Betracht zu ziehen. Der Hauptfaktor eines erhöhten Energieverbrauches hängt jedoch mit Wärmeverlusten durch vorgeheizte Luft bei nicht isolierten Leitungen zusammen [22, S. 20].

Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb der lufttechnischen Anlage sind eine optimierte Luftkanalführung und -auslegung. Folgende Forderungen sollten erfüllt sein [49, S. 17–18]:

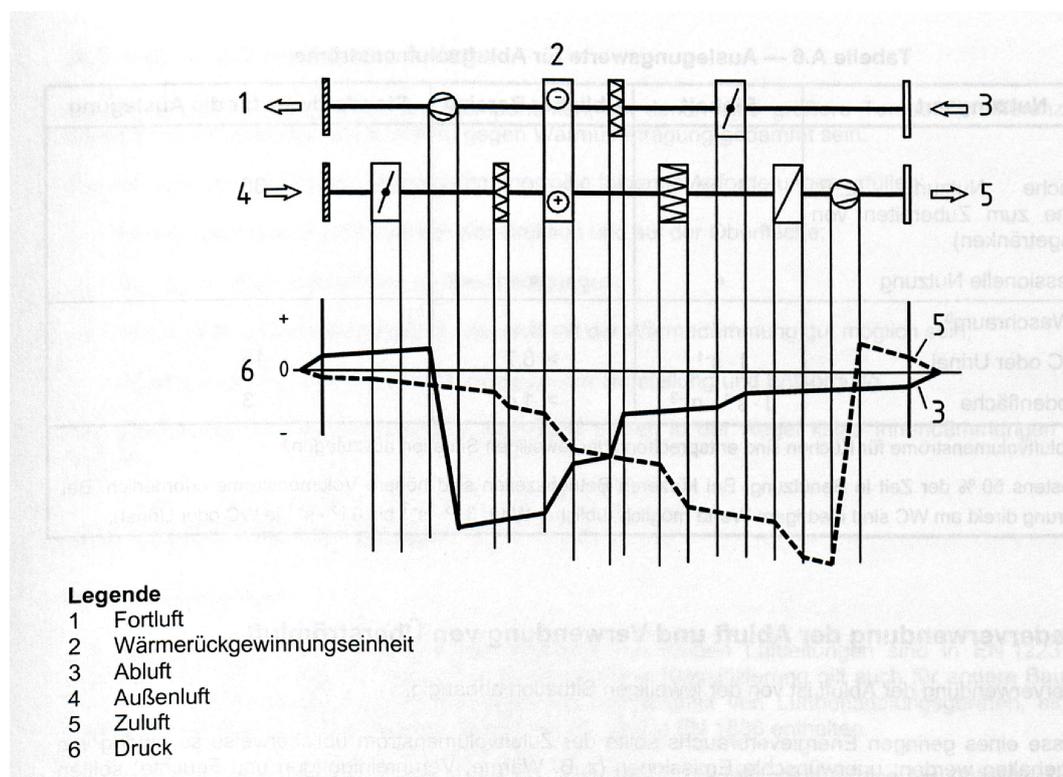


Abbildung 4.14: Druckbedingungen in einer Anlage (Quelle: [20])

- "Möglichst kurze Gesamtleitungslänge
- Möglichst große Luftleitungsquerschnitte; Für die Dimensionierung können nach VDI 3802 folgende Richtwerte der Luftgeschwindigkeit angenommen werden:
Hauptleitung: $w_{Luft} = 5$ bis 10 m/s
Nebenleitung: $w_{Luft} = 4$ bis 8 m/s
- Keine sprungartigen Kanalerweiterungen
- Die Fortluft sollte auf der Windsogseite ausgeblasen werden, um unnötige Luftwiderstände zu vermeiden
- Kaltluftführende Leitungen innerhalb beheizter Räume, sowie warm-luftführende Leitungen innerhalb unbeheizter Räume sind zu dämmen."

Dem Experten [48] nach wird sich eine Sanierung einer Altanlage bezüglich der Leckagen finanziell nicht auszahlen. Der Zugang zur Anlage ist oft schon

durch die Situierung der Luftkanäle in Zwischendecken bzw. durch die Isolation dieser ein Problem. Des Weiteren befinden sich meist in unmittelbarer Nähe der Luftkanäle die restlichen Haustechnikinstallationen, wie Wasser- und Elektroleitungen, welche das Erreichen der Kanäle ebenfalls erschweren können. Im Vorfeld der Leckagenbehebung, welche durch Ausschmieren erfolgt, müssten die oft verschmutzten Kanäle gereinigt werden.

Die Tabelle 4.17 gibt Auskunft über empfohlene Strömungsgeschwindigkeiten in Luftkanälen in Abhängigkeit der Luftmenge.

Tabelle 4.17: Empfohlene Strömungsgeschwindigkeiten (Quelle: [18, S. 2 zitiert nach [61]])

Luftvolumenstrom der Anlage	maximale Luftgeschwindigkeit
bis 1.000 m ³ /h	3 m/s
bis 2.000 m ³ /h	4 m/s
bis 4.000 m ³ /h	5 m/s
bis 10.000 m ³ /h	6 m/s
über 10.000 m ³ /h	7 m/s

4.7.5 Normen

ÖNORM H 6015-1: Lüftungstechnische Anlagen – Luftleitungen aus Stahlblech – Teil 1: Kreisrunde Wickelfalzrohre und Formstücke – Anforderungen, Abmessungen und Ausmaß. Juli 2006.

ÖNORM H 6015-2: Lüftungstechnische Anlagen – Luftleitungen aus Stahlblech – Teil 2: Rechteckige Luftleitungen und Formstücke – Anforderungen, Abmessungen, Ausmaß. Juli 2006.

ÖNORM EN 12237: Lüftung von Gebäuden – Luftleitungen – Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech. Juli 2003.

DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüfungs- und Klimaanlageanlagen und Raumklimasysteme. September 2007

DIN EN 15242: Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. September 2007.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Energieeffizienz hängt stark mit der Unternehmensphilosophie zusammen. Einige Unternehmen in der Industrie entwickeln eigene Abläufe um ihre Prozesse zu optimieren. Ganze Abteilungen beschäftigen sich losgelöst von der Produktion mit diesen Optimierungen. Allerdings kommt es auch vor, dass die Energieeffizienz eine untergeordnete Rolle spielt, da die Funktion der Produktionsprozesse Priorität hat. Lufttechnische Anlagen greifen nicht aktiv in den Produktionsprozess ein, wie dies z.B. bei Pumpen der Fall ist. Daher sollte die Optimierung der lufttechnischen Anlage hierbei kein Problem darstellen.

Die betrachteten Maßnahmen werden im Folgenden nach ihrem Potential in Bezug auf den Schwierigkeitsgrad der Umsetzung (einfach → aufwendig) sowie die Energieeinsparung (hoch → gering) gereiht. Diese Bewertung soll als Empfehlung gesehen werden und stellt keinerlei Anspruch auf Richtigkeit.

Wartung

Die Wartung wird den spezifischen Maßnahmen vorangestellt, da sie als Basis für eine funktionierende lufttechnische Anlage zu sehen ist. Ein intakter Instandhaltungsprozess erhöht generell die Effizienz sowie Lebensdauer einer Anlage.

Bedarfsgerechte Steuer- und Regelung

Anlagen in Abhängigkeit ihrer Betriebszeiten zu betreiben sowie eine bedarfsgerechte Anlagenregelung (z.B. reduzierter Luftstrom bei Nachtschicht oder am Wochenende usw.) erbringt beträchtliche Energieeinsparungen - 66% sind keine Seltenheit.

Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter

Die bedarfsgerechte Regelung des Luftstroms im Teillastfall hängt mit der Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter unmittelbar zusammen - 50%

Volumenstrom benötigen nur 12,5% Leistung. Neuanlagen werden Standardmäßig mit dieser ausgestattet. Auch bestehende Anlagen sollten damit ausgerüstet werden.

Filtertausch

Die Überwachung der Druckdifferenzen der Filter sowie der Wechsel des Filters bei Erreichen der max. End-Druckdifferenz benötigen geringen Aufwand. Der Ablauf kann ohne Probleme in die Wartungsarbeit integriert werden. Eine neue Festlegung der End-Druckdifferenzwerte nach DIN 13053 wird empfohlen.

Riementausch

Rund 95% der Ventilatoren in lufttechnische Anlagen werden momentan mit Keilriemen getrieben. Der Trend weist allerdings in Richtung der effizienteren Flachriemen. Bei der Umrüstungen auf diese Riemen sind Amortisationszeiten von weniger als ein Jahr realisierbar.

Ventilator- und Motortausch

EFF3-Motoren entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und müssen ausgetauscht werden. Ab einer Leistung von rund 15 kW und einer Betriebsstundenzeit von 4000 h/a amortisiert sich ein Ventilatortausch in weniger als drei Jahren.

Für die Bewertung der Umsetzung der einzelnen Maßnahmen die jeweiligen Investitionskosten berücksichtigt. Betriebsunterbrechungskosten, welche während des Umbaus der Anlagen entstehen, wurden nicht betrachtet. Diese Kosten sollten als Zusatzkosten mit in die Rechnung einbezogen werden.

Bei der Durchsicht der Normen fiel auf, dass die meisten Normen für den produzierenden Bereich ihre Gültigkeit verlieren. Dies beruht aller Wahrscheinlichkeit nach auf der Komplexität industrieller Anlagen. Weiters wurde ein genereller Mangel in Bezug auf die Energieeffizienz festgestellt. Dieser Mangel sollte in Zukunft behoben werden.

Es zeigte sich, dass der momentan noch relativ niedrige Energiepreis die Umsetzung vieler Effizienzmaßnahmen in Unternehmen nicht gerade bevorzugen. Mögliche Anreize, wie z.B. Förderungen oder Gesetze könnten hierbei einen Umdenkprozess einleiten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen der Österreichischen Energieagentur bei ihrer weiterführenden Tätigkeit dienen. Informationsfolder sollen erstellt sowie Beraterschulungen durchgeführt werden, um das Potential an Energieeinsparung in der Industrie ausschöpfen zu können. Sekundär soll diese Diplomarbeit mit ihrem Inhalt sowie den gewonnenen Erkenntnissen zur Sensibilisierung in Bezug auf ein energiesparendes Verhalten beitragen. Dieses

muss, genau wie das Umweltbewusstsein der Menschen (z.B. Mülltrennen), von Kindes an vermittelt werden. Obwohl technische Probleme und Themen in der Gesellschaft eher unattraktiv wirken, kommt hierbei dem Techniker als Botschafter eine schwierige jedoch wichtige Rolle zu.

Um eine möglichst praxisnahe Umsetzung der Maßnahmen zu garantieren, wäre es sinnvoll, dabei weitere Experten zu Rate zu ziehen.

Ebenso sollten Effizienzmaßnahmen zur Energieeinsparung im Zuge der Luftkonditionierung sowie der Wärmerückgewinnung bei lufttechnischen Anlagen untersucht werden.

Anhang

Richtpreise für Riemenantrieb

Die Preise für Keilriemen und Keilriemenscheiben werden hier nicht angeführt, da jeder Betrieb über die bei ihm in Verwendung stehenden Produkte sowie deren Preise Bescheid wissen sollte.

Preise Flachriemen

Tabelle 5.1: Richtpreise Gummi-Gewebe-Flachriemen, 50m-Rolle (Quelle: [51])

Artikel Bezeichnung Breite/Gewebeeinlage	Brutto Preis [EUR/m]
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 100/4-fach	21,80
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 120/4-fach	25,12
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 30/3-fach	5,30
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 40/3-fach	7,02
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 50/3-fach	8,75
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 60/3-fach	10,47
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 70/3-fach	12,20
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 70/4-fach	16,14
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 80/3-fach	13,79
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 80/4-fach	18,48
Gi.-Gew.-Flachriemen offen 90/4-fach	20,81

Richtpreise Flachriemenscheiben

Tabelle 5.2: Richtpreise für Flachriemenscheiben aus Grauguss, 100 mm breit (Quelle: [30])

Außen- \emptyset [mm]	Preis [EUR]
100	95,00
112	95,00
125	110,00
140	119,00
150	125,00
160	132,00
180	143,00
200	152,00
224	169,00
250	185,00
400	330,00
630	603,00

Tabelle 5.3: Richtpreise für Buchsen passend zu Tabelle 5.2 mit Keilnut für Flachriemenscheiben (Quelle: [30])

Riemenscheiben- \emptyset [mm]	Preis [EUR]
100	9,-
125	13,-
140–250	19,-
400	44,-
630	92,-

Literaturverzeichnis

- [1] Albig, J.. Fachwissen in CCI.Net Kiosk: *Anwendungsorientierte Effizienzsteigerung bei Radial- und Axialventilatoren: Drehzahlregelung von Ventilatoren*. 29.10.2008. <www.cci-promotor.de/archiv/ventilator.html>
- [2] Almeida, A. / Ferreira, F. / Fong, J./ Fonseca, P.: *EuP Lot 11 Motors: Final Report*. ISR- University of Coimbra: Feber 2008.
- [3] Anonym, Betriebsingenieure eines Unternehmens im Bereich des Gesundheitswesens: Persönliches Experteninterview, geführt von Christoph Kuh. Wien, 29.1.2009.
- [4] Benderoth H.: *Regelung von Ventilatoren*; erhalten von Julia Schwiete. <jsh@reitz-ventilatoren.de>. „Unterlagen zu Regelung von Ventilatoren.“ Persönliches Email. 03.11.2008. 04.11.2008.
- [5] Bogner, Thomas. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency: Persönliches Experteninterview, geführt von Christoph Kuh. Wien, 16.2.2009.
- [6] Bohl, W.: *Ventilatoren*. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1983.
- [7] Bohl, W.: *Strömungsmaschinen 1. Aufbau und Wirkungsweise*. 9. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2004.
- [8] Brosch, P.: *Drehzahlvariable Antriebe für die Automatisierung*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 1999.
- [9] Broschüre zu „siegling extremultus flachriemen“; erhalten von Hanzlik, Robert. <Robert.Hanzlik@forbo.com>. „Flachriemen bei Antrieben von Ventilaor.“ Persönliches Email. 13.1.2009. 14.1.2009.
- [10] Bundesamt für Konjunkturfragen: *RAVEL*. Bern, 1993.

- [11] CEMEP, gcyoung@gambica.org.uk: *Renewed Voluntary Agreement of CEMEP*. 18.3.2009. <<http://www.cemep.org/index.php?id=21#c27>>.
- [12] Danfoss: *HAVAC Energy Box*. 12.11.2008. <<http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/0F2CC665-5B14-41EE-A511-4E08C06F87D9/0/vltebv121.zip>>.
- [13] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter Lufttechnik*. 16.10.2008. <<http://www.industrie-energieeffizienz.de/technologien/lufttechnik.html?0=>>>.
- [14] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter Lufttechnik – Erfassung, Aufbereitung und Verteilung*. 16.10.2008. <http://www.industrie-energieeffizienz.de/uploads/media/L05-Erfassung-Aufbereitung-Verteilung_01.pdf>.
- [15] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter Lufttechnik – Regelungstechnik*. 16.10.2008. <http://www.industrie-energieeffizienz.de/uploads/media/L06-Regelungstechnik_01.pdf>.
- [16] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter Lufttechnik – Ventilatoren und Antriebe*. 16.10.2008. <http://www.industrie-energieeffizienz.de/uploads/media/L04-Ventilatoren_01.pdf>.
- [17] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter zu Pumpensystemen – Motoren für Pumpenantriebe*. 16.10.2008. <http://www.industrie-energieeffizienz.de/fileadmin/InitiativeEnergieEffizienz/referenzprojekte/images/Pumpensysteme_alleFactsheets.pdf>.
- [18] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) – Initiative Energieeffizienz Industrie & Gewerbe, info@dena.de: *Informationsblätter zu Pumpensystemen – Planung und Optimierung lufttechnischer Anlagen*. 16.10.2008. <http://www.industrie-energieeffizienz.de/fileadmin/InitiativeEnergieEffizienz/referenzprojekte/images/Pumpensysteme_alleFactsheets.pdf>.
- [19] DIN 2218: Endlose Keilriemen. April 1976.

- [20] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme. September 2007.
- [21] DIN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumlufttechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten. November 2007.
- [22] DIN 15239: Lüftung von Gebäuden – Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen. August 2007.
- [23] DIN 24163/Teil 1: Ventilatoren, Leistungsmessung, Normkennlinien. Januar 1985.
- [24] DIN 24166: Ventilatoren – Technische Lieferbedingungen. Januar 1989.
- [25] DiePresse.com, online-redaktion@diepresse.com: *Industrie protestiert gegen höhere Strompreise*. 30.12.2008 <<http://diepresse.com/home/wirtschaft/economist/427039/print.do>>.
- [26] Ecomotors.org: *EuP Lot 11: Fans for ventilation in non residential buildings Final Report*. 10.9.2008. <<http://www.ecomotors.org/files/Lot11-fans-2nd-report.pdf>>.
- [27] EBPg, ebpg@bam.de: *Eco-design Directive (2005/32/EC) – Working document on possible eco-design requirements for ventilation fans*. 28.12.2008. <http://www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/011_workd_08-05_fans.pdf>.
- [28] E-Control, office@e-control.at: 30.12.2008. <http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/STROMPREISE/ENDVERBRAUCHERPREISE/INDUSTRIESTROMPREISE>.
- [29] E-Control, office@e-control.at: 19.2.2009. <http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/SERVICE/ENERGIEEFFIZIENZ/ZAHLEN_DATEN_FAKTEN/STROMVERBRAUCH/>.
- [30] Elektromotoren.at, office@elektromotoren.at: 27.1.2009. <<http://www.elektromotoren.at/tab1002.php>>.

- [31] European Commission: *Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives*. Department of Electrical Engineering, University of Coimbra. 2000.
- [32] European Commission: *DIRECTIVE 2005/32/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. 10.9.2008 <http://ec.europa.eu/enterprise/eco_design/directive_2005_32.pdf>.
- [33] EuP-Richtlinie (Ecodesign), franz.kesner@bmwfj.gv.at: *EuP-Richtlinie*. 5.1.2009<<http://www.eup-richtlinie.at>>.
- [34] Gates Corporation: 14.1.2009. <<http://www.gates.com>>.
- [35] Gates Corporation: *Vorbeugende Wartung von industriellen Antriebsriemen und Antrieben*. 14.1.2008. <http://www.gates.com/Germany/index.cfm?location_id=8903>.
- [36] Geißecker, Georg / Reichel, Philipp. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency: Persönliches Experteninterview, geführt von Christoph Kuh. Wien, 9.2.2009.
- [37] Gloor, Rolf. Energie.ch: *Wirkungsgrade von Asynchronmotoren*. 09.12.2008. <<http://www.energie.ch/at/asm/beispiel/eff.htm>>.
- [38] Gloor, Rolf. Energie.ch: *Asynchronmaschinen*. 09.12.2008. <<http://www.energie.ch/at/asm/index.htm>>.
- [39] Gloor, Rolf. Energie.ch: *Frequenzumrichter*. 14.12.2008. <<http://www.energie.ch/at/asm/umrichter.htm>>
- [40] Gloor, Rolf. Energie.ch: *Asynchronmaschinen*. 14.12.2008. <<http://www.energie.ch/at/asm/index.htm>>
- [41] Gloor, Rolf. <gloor@energie.ch>. „Frage zum Text: Wirkungsgrade von Asynchronmotoren.“ Persönliches Email. 30.12.2008. 2.1.2009.
- [42] Hanzlik, Robert. <Robert.Hanzlik@forbo.com>. „Flachriemen bei Antrieben von Ventilator.“ Persönliches Email. 14.1.2009. 14.1.2009.
- [43] Hiersig, H.: *Lexikon Maschinenbau*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.
- [44] Hodits, Martin. Wien Energie: Gesprächsnotiz basierend auf einem Telefonat, geführt vom Christoph Kuh. Drumling, 30.12.2008.
- [45] Hoffmann, Mathias. <MathiasH@gates.com>. „Welcher Riemen bei Ventilatorsystemen.“ Persönliches Email. 27.1.2009. 27.1.2009.

- [46] Klima:aktiv Management, Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency: *Energieeffizienz in Ventilatorensystemen*. 25.10.2008. <<http://www.klimaaktiv.at/filemanager/download/17400>>.
- [47] Klima:aktiv Management, Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency: *Energieeffizienz in Antriebssystemen*, 25.10.2008. <<http://www.klimaaktiv.at/filemanager/download/17396>>.
- [48] Kratochwilla, Christian. Troges: Gesprächsnotiz basierend auf einem Telefonat, geführt vom Christoph Kuh. Wien, 2.2.2009.
- [49] Landesgewerbeamt Baden-Württemberg – Informationszentrum Energie, ortrud.stempel@lgabw.de: *Energieeffiziente Lüftungsanlagen in Betrieben*. 11.9.2008. <http://www.umweltschutz-bw.de/PDF_Dateien/Wichtig_fuer_alle_Branchen/BaWue_Lueftungsanlagen.pdf>.
- [50] Lexis, J.: *Ventilatoren in der Praxis*. 2. Auflage. Stuttgart: Gentner Verlag, 1983.
- [51] service@mercateo.com: Mercateo. 27.1.2009. <[http://www.mercateo.com/kw/gummi\(2d\)gewebe\(2d\)flachriemen/gummi_gewebe_flachriemen.html](http://www.mercateo.com/kw/gummi(2d)gewebe(2d)flachriemen/gummi_gewebe_flachriemen.html)>.
- [52] service@mercateo.com: Mercateo. 2.2.2009, <[http://www.mercateo.com/kw/riementriebe\(20\)\(28\)industribedarf\(29\)/riementriebe_industribedarf_.html](http://www.mercateo.com/kw/riementriebe(20)(28)industribedarf(29)/riementriebe_industribedarf_.html)>
- [53] ÖNORM EN 779: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Bestimmung der Filterleistung. April 2003.
- [54] Pedersen, Thomas Lykke: spareventilator.dk. 27.10.2008 <<http://www.spareventilator.dk/>>.
- [55] Pfeiffer Elektromotoren: Gesprächsnotiz basierend auf einem Telefonat, geführt vom Christoph Kuh. Wien, 29.1.2009.
- [56] Radgen, P.: *Market Study for Improving Energy Efficiency for Fans*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002.
- [57] Radgen P. / Oberschmidt J.: *The European Energy Using Products (EuP) Directive and its impacts on Fans and Room Air Conditioning*. 15.10.2008. <<http://www.ecomotors.org/files/EuP-Fans-Radgen-Oberschmidt.pdf>>.

- [58] Recknagel/Sprenger/Schramek: *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*. 73. Auflage. München: Oldenburg Industrieverlag, 2007.
- [59] Reitz-Ventiltoren, info@reitz-ventilatoren.de: *Broschüre Energieeffizienz (Drehzahlregelung)*; 03.11.2008. <www.reitz-ventilatoren.de>.
- [60] Schweizer, Gerhard. Bösch heizung.klima.reinigung: Persönliches Experteninterview, geführt von Christoph Kuh. Wien, 30.1.2009.
- [61] Schweizer SIA-Norm 382
- [62] Statistik Austria: *Nutzenergieanalyse 1996-2006*. 1.9.2008. <http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html>.
- [63] Stempl, Ortrud. <ortrud.stempel@lgabw.de>. „Broschüre Energieeffiziente Lüftungsanlagen.“ 18.3.2009. 23.3.2009.
- [64] Stormer, Martin. Danfoss: Persönliches Experteninterview, geführt von Christoph Kuh. Wien, 5.11.2008.
- [65] TELE, info@tele-haase.at: *Preisliste 2009*. 19.2.2009. <http://www.tele-haase.at/medialibrary/folder/preisliste2009_deu.pdf>.
- [66] Topmotors.ch, info@topmotors.ch: *Argumente für den Chef – Effiziente Antriebe*. 3.2.2009. <http://www.topmotors.ch/_data/Argumente-fuer-den-Chef.pdf>.
- [67] Trogisch, A.: *Planungshilfen Lüftungstechnik*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: C. F Müller Verlag, 2006.
- [68] UNFCCC, secretariat@unfccc.int.: *National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2006*; 2.3.2009. <unfccc.int/resource/docs/2008/sbi/eng/12.pdf>.
- [69] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy: *Improving Fan System Performance; a sourcebook for industry*. Washington, D.C., 2003.
- [70] VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK: *VDI-Berichte Nr. 1922, Ventilatoren*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2006.
- [71] VDI 2044: Abnahme- und Leistngsversuche an Ventilatoren. August 1993.

- [72] VKF: *BRANDSCHUTZRICHTLINIE – Lufttechnische Anlagen*. 11.10.2008. <<http://bsvonline.vkf.ch/web/Richtlinien/BSR26/26-03d.asp>>.
- [73] Wagner, W.: *Lufttechnische Anlagen. Ventilatoren und Ventilatorenanlagen*. 2. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007.
- [74] Wolters, K.: *Drehzahlveränderbare Antriebe mit Asynchronmotoren*. Berlin; Offenbach: vde-verlag, 1994.
- [75] Zens, M. / Schraps, S.: *Bedarfsgerechte Regelung, Energiekostenreduzierung bei der Klimatisierung von Produktionshallen*. 20.10.2008. <www.perpendo.de/files/kka-2004.pdf>.