

Luftförderung

Die fünf Punkte für energieeffiziente Luftförderung

- **Weniger Widerstand:** kurze, grosse, möglichst runde und dichte Luftleitungen, keine unnötigen Widerstände von Drosseln, Form- und Querschnittsänderungen, Wärmetauschern, etc.
- **Weniger Luft:** genaue Abklärung des benötigten Luftvolumenstroms, respektive Kälte/Wärme und Feuchte, bedarfsabhängiger Betrieb (Tageszeit, kein Betrieb ohne Nutzen).
- **Variabler Bedarf** erfordert variablen Volumenstrom und regelbaren Antrieb.
- **Effizienter Ventilatorbetrieb** aller Komponenten im Bereich des optimalen Wirkungsgrades.
- **Effizienter Motor** mit Direktantrieb ohne Transmission und ohne Getriebe.



Am 30. März 2011 wurde von der EU die Richtlinie 327/2011 mit Wirkungsgradanforderungen an Ventilatoren publiziert. [1] Sie legt Mindestwirkungsgrade für Ventilatoren im Leistungsbereich zwischen 0.12 kW und 500 kW fest. Relevant ist die elektrische Leistungsaufnahme des Antriebsmotors im Bestpunkt des Ventilators. Die EU-Richtlinie nennt im Anhang Bestwerte von Wirkungsgraden, welche heute schon je nach Ventilartyp erreicht werden können (Tabelle 1).

Ventilatorotyp	Messanordnung*	Wirkungsgrad-kategorie	Wirkungsgrad je nach Leistung	
			1 kW	10 kW
Axialventilator	A, C	statisch	58.7%	65%
	B, D	total	68.7%	75%
Radialventilator mit vorwärts gekrümmten oder radial endenden Schaufeln	A, C	statisch	55.7%	62%
	B, D	total	58.7%	65%
Radialventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln ohne Gehäuse	A, C	statisch	59.5%	70%
Radialventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln und Gehäuse	A, C	statisch	61.5%	72%
	B, D	total	64.5%	75%
Diagonalventilator (Mischform von Axial- und Radialventilator)	A, C	statisch	50.5%	61%
	B, D	total	54.5%	65%
Querstromventilator	B, D	total	29.4%	32%

Tabelle 1: Unverbindliche Referenzwerte für die Wirkungsgrade der verschiedenen Ventilatorotypen gemäss EU-Richtlinie 327/2011, Anhang IV, Tabelle 1.

*A: frei ansaugend, frei ausblasend
 B: frei ansaugend, Kanal druckseitig
 C: Kanal saugseitig, frei ausblasend
 D: Kanal saugseitig, Kanal druckseitig

Einführung

Ziel und Zielpublikum

Dieses Merkblatt thematisiert die mechanische Luftförderung mit Ventilatoren und will dazu beitragen, deren Elektrizitätsverbrauch zu reduzieren. Ventilatoren sind Strömungsmaschinen, die mittels eines Laufrades ein gasförmiges Medium fördern. Dazu brauchen sie einen Elektromotor, oft eine Transmission und ein Getriebe, manchmal auch einen Frequenzumrichter zur Regulierung der Drehzahl. Kleinere und mittelgrosse Ventilatoren sind immer mehr mit elektronisch geregelten Motoren ausgerüstet, die direkt an die Ventilatorwelle angekopplet sind. Die Optimierung des gesamten Systems der Luftförderung soll bei neuen und bei bestehenden Anlagen angestrebt werden.

Die Grundsätze dieses Merkblattes gelten für alle Lüftungssysteme. Doch der Inhalt ist auf mittelgrosse Lüftungssysteme mit Volumenströmen über 1 000 m³/h fokussiert. Das Hauptanwendungsgebiet sind mittelgrosse Anlagen für grosse Dienstleistungs- und Wohngebäude sowie industrielle Lüftungsanlagen.

Es werden keine Komfortlüftungsanlagen (z.B. für Einfamilienhäuser), keine WC-Abluft- und Küchenventilatoren und auch keine sehr grossen Anlagen (z.B. für Tunnel) behandelt. Die Behandlung von Luft zur Klimatisierung von Räumen (Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchtung) ist nicht explizites Thema dieses Merkblattes.

Zielpublikum sind in erster Linie Lüftungsanlagebauer, Planer, Techniker und Ingenieure der Gebäudetechnik. Zudem sind alle Besteller der Dienstleistung «Luftförderung» angesprochen, insbesondere soll bei Architekten die entsprechende Koordinations- und Vorleistungskompetenz und bei Bauherrschaften die nötige Bestellerkompetenz gefördert werden.

Energieverbrauch

Der Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren in der Schweiz beträgt total etwa 7 500 GWh/a, was 12.5% des Gesamtverbrauchs entspricht (2011). Der dominierende Anteil entfällt auf die Industrie.

Eine Untersuchung in fünf Industriebetrieben in der Schweiz mit insgesamt 1500 elektrischen Antrieben (Easy 2012) zeigt die Bedeutung der Ventilatoren: 26% des elektrischen Gesamtverbrauches geht auf das Konto dieser Verbraucher (Abbildung 2). In diesen Betrieben sind Ventilatoren in Gebläsen für feinkörniges Material, in Raumventilationen und in Heiz- und Kühlsystemen eingebaut. Die 500 untersuchten Ventilatoren weisen eine mittlere Nennleistung von 13 kW auf, sie laufen durchschnittlich 5 400 Stunden pro Jahr und sind im Mittel 15 Jahre alt. Nur 20% sind mit einem Frequenzumrichter zur Drehzahlregulierung und damit zur Anpassung an die variierende Last ausgerüstet (Durchschnittswert).

Mit guten Konzepten, korrekter Dimensionierung, energieeffizienten Komponenten und bedarfsgerichtetem Betrieb lässt sich ein erhebliches Sparpoten-

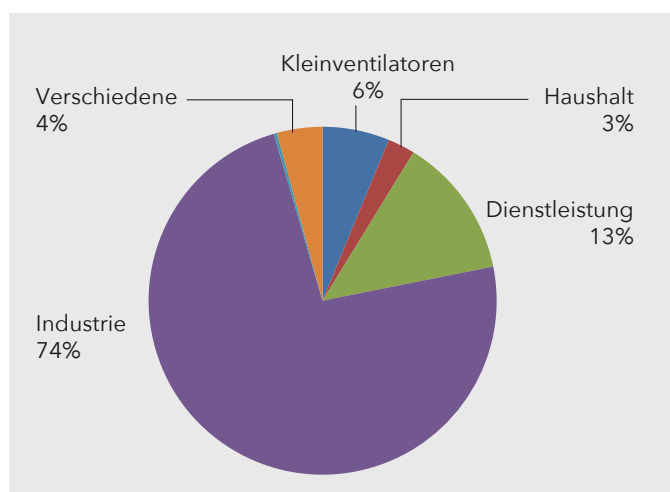


Abbildung 1: Elektrizitätsverbrauch von Ventilatoren in der Schweiz (Quelle: Steinemann 2012)

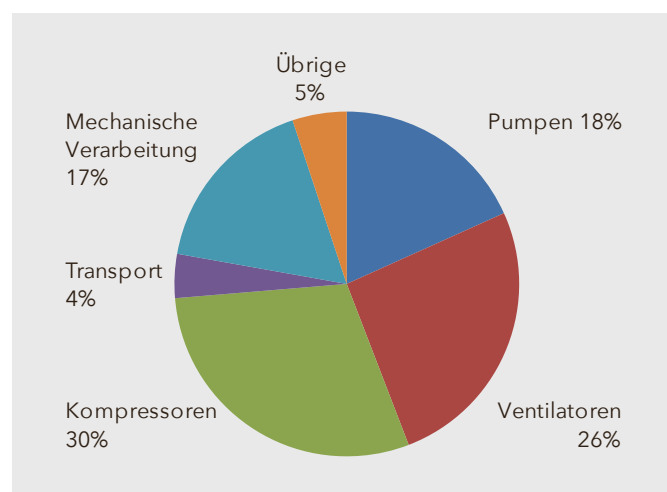


Abbildung 2: Anwendungen von elektrischen Motoren bei 5 grossen Industrieunternehmen (Quelle: Easy 2012)

zial ausschöpfen, vor allem durch Optimierung bestehender und neuer Anlagen. Bei Beachtung dieser Regeln kann der Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren trotz einer absehbaren Erweiterung des Anwendungsbereichs (z.B. vermehrter Bedarf für Kühlung in Komponenten, Bauten und der Industrie, vermehrte mechanische Lüftung in Gebäuden) markant reduziert werden.

Aufgaben der Beteiligten

Zur Erreichung einer optimalen mechanischen Luftförderung spielen die Fachleute der Lüftungstechnik eine zentrale Rolle. Gleichzeitig ist es wichtig, dass alle Beteiligten, von der Bauherrschaft über die Planerteams und Unternehmer bis zum Betreiber, ihre Aufgaben und Kompetenzen kennen und wahrnehmen. Ein wesentliches Anliegen ist, dass die richtigen Entscheidungen frühzeitig – früher als in der Praxis heute üblich – angegangen werden.

Besteller und Bauherrschaften (Bestellerkompetenz)

- Klares Bekenntnis zur Energieeffizienz
- Variantenentscheide aufgrund von Lebenszykluskosten fällen statt aufgrund der reinen Investitionskosten.
- Spezifische Vorgaben wie Labels etc. definieren, z.B. Grenz- oder Zielwerte nach SIA 2056:2019 oder 382/1:2014.
- Spezifische Vorgaben definieren, z.B. Grenz- oder Zielwerte nach SIA 380/4 oder 382/1.
- Allgemeine Vorgaben deklarieren
- Neben den gesetzlichen Vorgaben für das Inverkehrbringen von Produkten sind auch die kantonalen und evt. kommunalen Vorschriften für die Erstellung und den Betrieb von Anlagen zu beachten.
- Die Normen SIA 2056:2019 und 382/1:2014 lassen verschiedene Optimierungsschritte zu. Eine gute Anlage kann durch die spezifische Ventilatorleistung in Kombination mit der Pflicht zur Optimierung des Bedarfs, der Steuerung und des Betriebes vorgegeben werden. Der spezifische Elektrizitätsverbrauch kann als Kontrollgrösse für die Einhaltung dieser Vorgaben dienen.
- Festlegung der Verantwortlichkeiten, d.h. auch Bestellen der entsprechenden Fachkompetenz in der strategischen Planung und den Vorstudien, wenn nötig Beizug eines Bauherrenberaters. Denn gemäss SIA 108 beginnen die Grundleistungen des Ingenieurs erst ab der Vorprojektphase.

Architekt, GU, TU (Besteller- und Planerkompetenz)

- Einfordern und Einhalten der Vorgaben der Bauherrschaft
- Koordination: räumlich und fachlich
- Sicherstellen, dass die Ingenieuraufträge klare Zielvorgaben enthalten
- Beizug des Ingenieurs beim Festlegen des räumlichen Haus-technikkonzeptes (Schacht-Konzept, kurze Leitungen, genügend Platz)
- Je nach Vertrag Kontrolle der Zielvorgaben und Sicherstellen der Schnittstelle zwischen Planer und Unternehmer

Planender Lüftungsingenieur (Fachkompetenz)

- Einfordern und Einhalten der Vorgaben der Bauherrschaft
- Situationsbezogene Auslegung der Komponenten auf der Basis einer Druckverlustberechnung
- Klare Vorgaben in den Ausschreibungen betreffend Energieeffizienz
- Konzept für Inbetriebnahme, Abnahme, Wartung und Betrieb inkl. Messkonzept

Unternehmer (Komponenten- und Systemlieferant)

- Einfordern und Einhalten der Vorgaben
- Inbetriebnahme inkl. Messungen der Energieeffizienz
- Instruktion und Wartungsplan

Betreiber

- Einfordern und Beachten der Instruktionen und Unterlagen
- Regelmässige Wartung
- Energiebuchhaltung
- Betriebsoptimierung
- Bedarfsgerechter Betrieb
- Bei Änderungen: Nachführung der Planunterlagen und Anlagedokumentation veranlassen

Komponenten der Luftförderung

Ventilator

Ventilatoren sind Strömungsmaschinen, die mittels eines Laufrades ein gasförmiges Medium fördern. Dabei wird zwischen Ansaug- und Ausblasseite eine Druckerhöhung erzeugt. Maschinen mit einer grossen Druckerhöhung (Druckverhältnis zwischen 1.1 und 3) werden als Gebläse, Maschinen mit einer sehr grossen Druckerhöhung (Druckverhältnis von mehr als 3) als Verdichter bezeichnet.

Die wichtigsten Bauformen sind der Radialventilator und der Axialventilator. Der Axialventilator saugt die Luft axial an und fördert sie axial. Der Radialventilator saugt die Luft axial an und fördert sie radial. Energetisch am besten sind Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln.

Motor

Die Ventilatoren werden üblicherweise mit Elektromotoren angetrieben, deren Effizienzklassen gemäss Tabelle 2 differenziert sind.

Ab dem 1. Juli 2021 werden in der Schweiz die Anforderungen an die Energieeffizienz von Elektromotoren durch die Synchronisation der EnEV mit der Verordnung (EU) 2019/1781 schrittweise erhöht.

Ab dem 1. Juli 2021 ist:

- für Motoren mit einer Nennleistung ab 0.12 kW bis weniger als 0.75 kW mindestens Effizienzklasse IE2 vorgeschrieben.

- für Motoren mit einer Nennleistung ab 0.75 kW bis weniger als 1 000 kW mindestens die Effizienzklasse IE3 vorgeschrieben. In diesem Leistungsbereich ist die bisher erlaubte Kombination von einem IE2-Motor mit einem Frequenzumrichter nicht mehr zulässig.

Ab dem 1. Juli 2023 müssen zudem Motoren mit einer Nennleistung von mindestens 75 kW bis höchstens 200 kW die Effizienzklasse IE4 (oder IE5) haben.

Frequenzumrichter die für den Betrieb mit Motoren von 0.12 kW bis 1 000 kW ausgelegt sind müssen ab

dem 1. Juli 2021 ebenfalls Mindestanforderungen betreffend die Energieeffizienz (mindestens Effizienzklasse IE2) erfüllen.

Je nach erforderlicher Drehzahl des Antriebs können Asynchron-Motoren mit folgender Polzahl eingesetzt werden (nominale Synchrondrehzahl in Umdrehungen pro Minute):

2 Pole	3 000 U/min
4 Pole	1 500 U/min
6 Pole	1 000 U/min
8 Pole	750 U/min

Die Effizienzklassen von Motoren mit Leistungen zwischen 0,12 kW und 1 000 kW richten sich nach der IEC-Norm 60034-30-1 (Abbildung 2). Bei kleinen Leistungen bis 10 kW sind die Effizienzgewinne von IE4 zu IE1 prozentual sehr hoch. Bei grösseren Leistungen von 100 kW bis 1 000 kW sind die prozentualen Verbesserungen zwar gering, die Verminderung der Verluste in kW aber sehr bedeutend. Die höchsten Wirkungsgrade können mit elektronisch kommutierten Permanentmagnet- und Reluktanz- sowie mit Aussenläufermotoren erreicht werden.

Achtung: Effizientere Motoren (IE3) haben weniger Schlupf als alte ineffiziente Motoren (IE1 oder IE2), d.h. ihre Drehzahl ist 1% bis 5% höher. Das kann zum unerwünschten Effekt führen, dass durch den Ersatz

Vergleich Drehzahl und Leistung	
Erhöhung Drehzahl	Erhöhung Leistungsaufnahme
1%	3%
2%	6%
3%	9%
4%	12%
5%	16%

Tabelle 3: Eine höhere Drehzahl verursacht ohne zusätzliche Massnahmen eine höhere elektrische Leistungsaufnahme.

Effizienzklasse		Mindestwirkungsgrad (4 Pole, 1500 Umdrehungen pro Minute) bei mechanischer Leistung:		
		4 kW	15 kW	90 kW
IE4	Super Premium Effizienz	91.1%	93.9%	96.1%
IE3	Premium Effizienz	88.6%	92.1%	95.2%
IE2	Hohe Effizienz	86.6%	90.6%	94.2%
IE1	Standard Effizienz	83.1%	88.7%	93.0%
Verbesserung IE1 bis IE4 %-Punkte		8.0%	5.2%	3.1%

Tabelle 2: Wirkungsgradanforderungen an Motoren (IEC 60034-30-1)

des Motors ein entsprechend höherer Volumenstrom gefördert wird. Bei gleichem Luftleitungsquerschnitt steigt die Strömungsgeschwindigkeit. Da der elektrische Leistungsbedarf mit der 3. Potenz des Luftvolumenstroms zunimmt, kann – ohne Kompensation dieses Effektes – der Effizienzgewinn mit dem neuen Motor wieder verloren gehen. Dieser Negativeffekt lässt sich durch bessere Auswahl des Ersatzventilators respektive Anpassung der Transmissionsübersetzung ohne weiteres vermeiden.

Transmission

Die Übertragung der Motorleistung auf den Ventilator erfolgt durch Direktantrieb, Flachriemen, Keilriemen und in seltenen Fällen mit Zahnriemen (Tabelle 4).

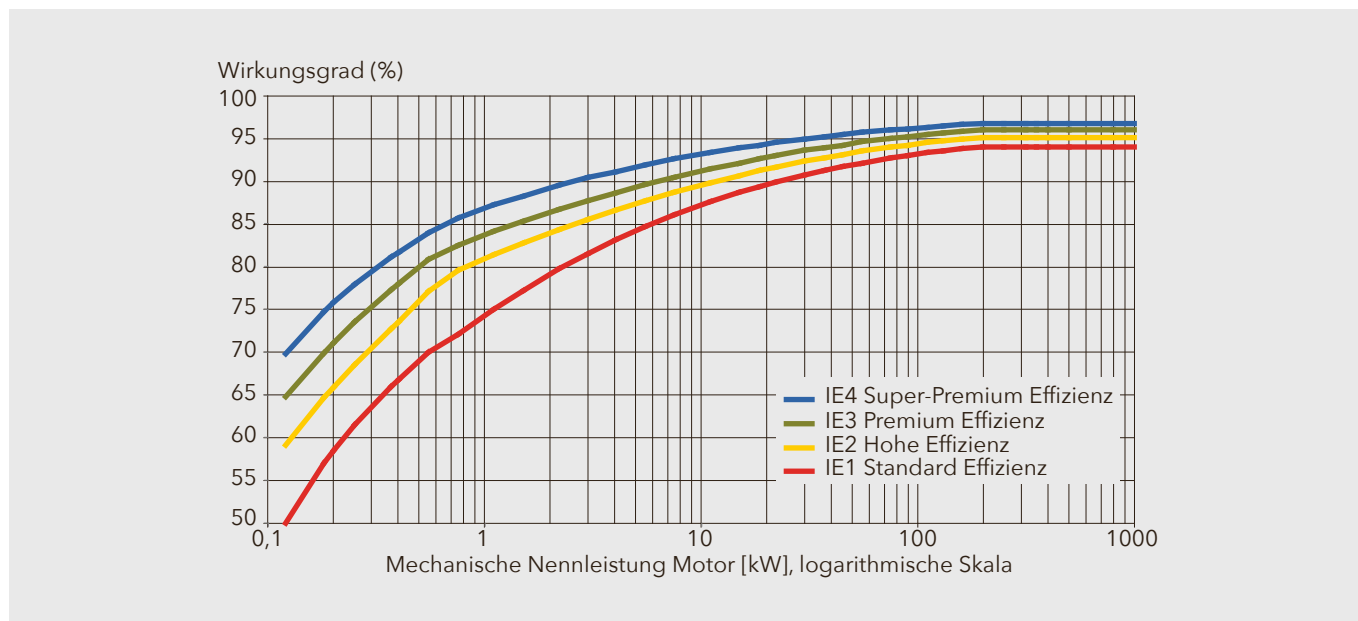


Abbildung 3: Wirkungsgrade von Elektromotoren (4 Pole, 50 Hz), gemäss IEC 60034-30-1



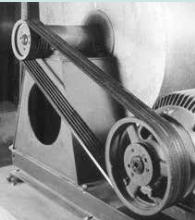
	<p>Direktantrieb</p> <p>Die direkte Kopplung von Motor- und Ventilatorwelle ist verlustfrei und hat damit den besten Wirkungsgrad (100%). Weitere Vorteile sind, dass diese Transmission wartungsfrei ist und keine Verschmutzung durch Riemenabrieb entsteht. Dadurch kann eventuell auf eine zweite Filterstufe nach dem Ventilator verzichtet werden. Bei einem Antrieb mit Drehstrommotoren bis zu einer Wellenleistung von 5 kW soll möglichst diese Lösung gewählt werden.</p>
	<p>Flachriemen</p> <p>Der Wirkungsgrad ist typischerweise 2 bis 5 Prozentpunkte höher als bei Keilriemen. Weitere Vorteile sind der geringere Wartungsaufwand (weniger Riemenwechsel) und der geringere Abrieb. Eventuell ist dadurch keine zweite Filterstufe nach dem Ventilator erforderlich. Flachriemen müssen zwar weniger oft gewechselt werden als Keilriemen, die Überprüfung der Riemenspannung ist indessen anspruchsvoller.</p>
	<p>Keilriemen</p> <p>Bei kleinen Leistungen und bei Teillast kann der Transmissionswirkungsgrad unter 80% fallen. Nachteilig ist auch der häufige Riemenwechsel. Wegen des Abriebs soll nach dem Ventilator eine zweite Filterstufe vorhanden sein. In Anbetracht dieser Nachteile sollen Keilriemen vermieden werden. Bei kleinen Anlagen sind Direktantriebe zu bevorzugen. Bei grösseren Leistungen sollen Flachriemen gewählt werden.</p>

Tabelle 4: Arten der Transmission

Abbildung 4 zeigt Beispiele von Transmissionswirkungsgraden von Keil- und Flachriemen bei Teillast. Das Diagramm gilt für Antriebe mit einem Riemen.

Bei mehreren Riemen reduziert sich der Wirkungsgrad pro zusätzlichen Riemen um 1%.

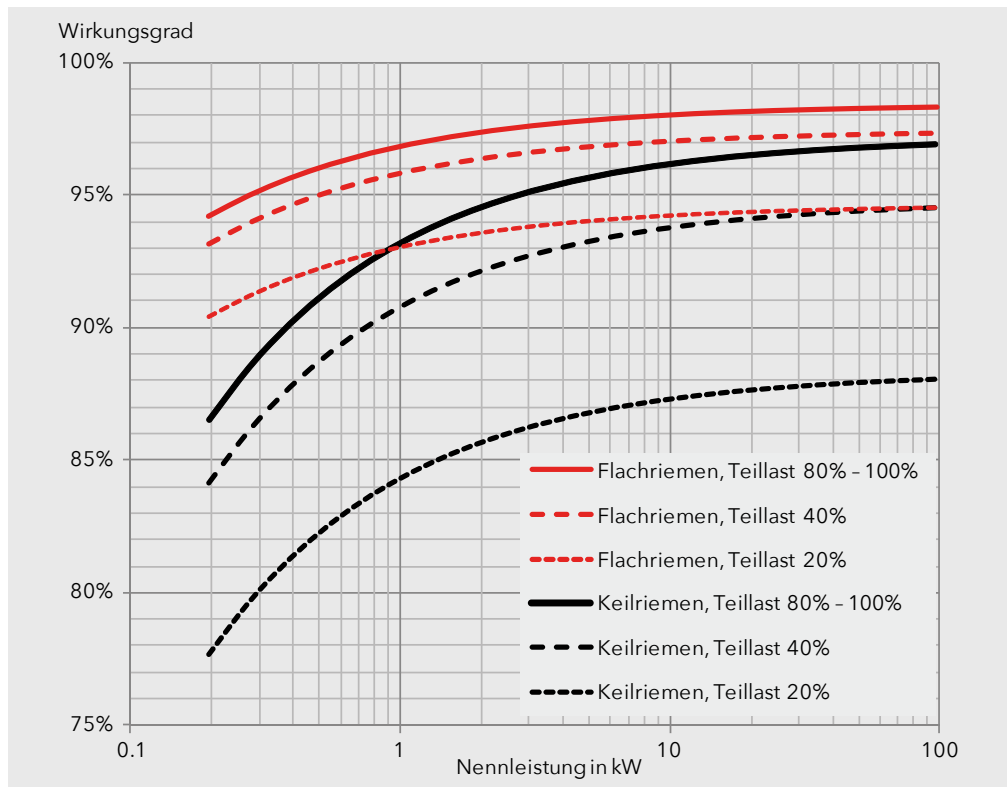


Abbildung 4: Transmissionswirkungsgrade von Keil- und Flachriemen je nach Nennleistung des Motors und Lastanteil (Antriebe mit 1 Riemen)

Lastregelung mit Frequenzumrichter

Ein Frequenzumrichter wandelt Netzstrom mit einer Frequenz von 50 Hz Drehstrom (bei kleinen Leistungen auch einphasig) elektronisch in einen Drehstrom mit veränderbarer Frequenz um. Damit kann ein der Anwendung angepasstes variables Verhältnis von

Spannung und Frequenz programmiert werden. Für die Medienförderung wird die Spannung (massgebend für die Magnetisierung) bei abnehmender Drehzahl überproportional reduziert, weil die Last einer Strömungsmaschine in einem geschlossenen Kreislauf mit der 3. Potenz der Drehzahl abnimmt (Abbildung 5).

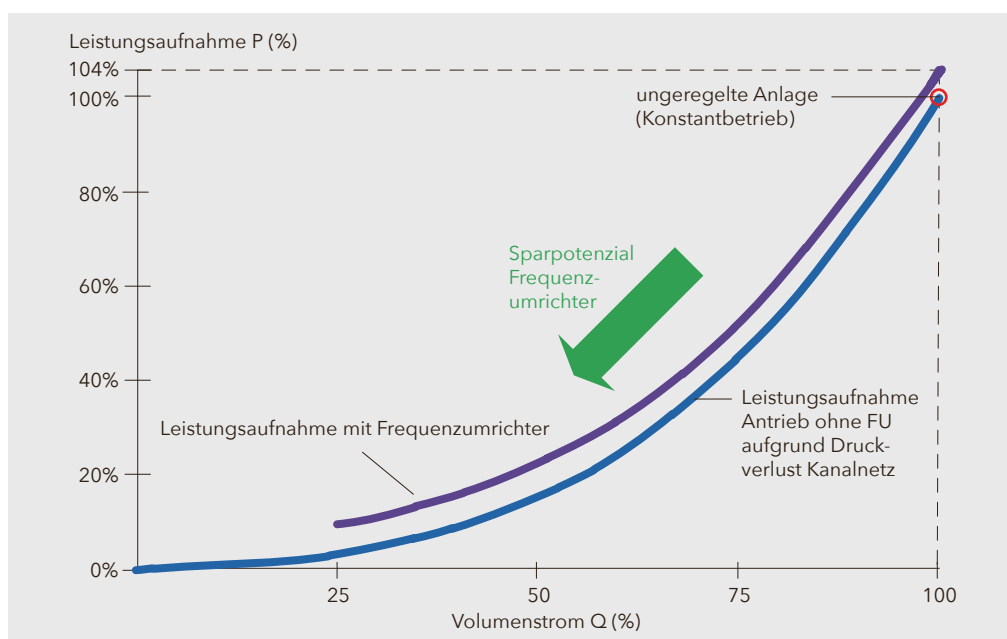


Abbildung 5: Einsparpotential bei Ventilatoren mit Frequenzumrichtern (FU) respektive elektronisch kommutierten Motoren.

Nachteile von Frequenzumrichtern

Die Frequenzumrichtung ist nicht umsonst zu haben (Abbildung 6):

- Ein FU kostet ungefähr so viel wie der damit versorgte Motor.
- Der Wirkungsgrad ist bei Nennlast 95% bis 98%.
- Durch die harmonischen Oberwellen der FU-Speisung kann der Wirkungsgrad des Motors um 1% bis 2% sinken.
- Bei Teillast unter 20% sinkt der Wirkungsgrad je nach Motor- oder FU-Grösse auf 70% bis 20%.

Weil die Ausgangsleistung von Frequenzumrichtern nicht ganz sinusförmig ist (auch mit Filtern nicht), verursachen die verbleibenden Oberwellen zusätzliche Verluste im Motor. Dieser Effekt muss bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt werden.

Motorkühlung: bei tiefen Drehzahlen kann die Eigenkühlung des Motors (Lüfterrad) ungenügend sein, da wegen der Oberwellen die Verluste in der Wicklung trotzdem recht hoch sein können. Ein Motor, der mit FU längere Zeit unter 50% Drehzahl betrieben wird, braucht eine drehzahlunabhängige Kühlung (z.B. Fremdlüfter oder Wasserkühlung).

Ein Motorbetrieb über FU ist nur sinnvoll, wenn tatsächlich variable Leistungen und Drehzahlen über einen nennenswerten Teil der Betriebszeit erforderlich sind. Wenn dies nur für den Maschinenhochlauf nötig ist, lassen sich vielleicht andere Lösungen finden. In manchen Fällen kann es auch sinnvoll sein, den FU bei überwiegend konstanter Drehzahl zu überbrücken (Bypass) und den Motor nur bei Bedarf über den FU zu starten.

Besonders zu beachten bei Drehzahlregelung

Elektromagnetische Felder (EMF): FU verursachen relativ starke EMF. Um Störungen anderer Geräte zu vermeiden und die Vorschriften einzuhalten, sind entsprechende Filter oder Abschirmungen erforderlich. Je näher Motor und FU zusammengebaut sind, umso einfacher sind die EMF zu beherrschen. Deshalb werden FU häufig mit dem Motor zusammengebaut statt separat in Schaltschränken angeordnet.

Ausschreibungshinweise

Grundsätze

- Fachgerechte Planung mit Leitungsführungskonzept und Druckverlustberechnung als Basis für die Ausschreibung einfordern.
- Wirkungsgrade der Komponenten im Bestpunkt und in den zu erwartenden Betriebspunkten festlegen respektive abfragen.
- Vorgehen zur Bewertung von Effizienzunterschieden bei den Angeboten festlegen.
- Kontrollmessungen und Sanktionen bei Nichterfüllung der Anforderungen festlegen.

Für einen energieeffizienten Betrieb ist es wesentlich, dass die tatsächlichen Betriebspunkte der Ventilatoren nahe beim Bestpunkt liegen. Für die Ausschreibung müssen darum die zu erwartenden Betriebspunkte mit einer zuverlässigen Druckverlustberechnung ermittelt und deklariert werden. Bei Anwendungen mit variablem Betrieb ist es zweckmässig, typische Betriebspunkte mit ihrer Häufigkeit anzugeben. Auf dieser Basis können die unterschiedlichen Angebote verglichen und bewertet werden.

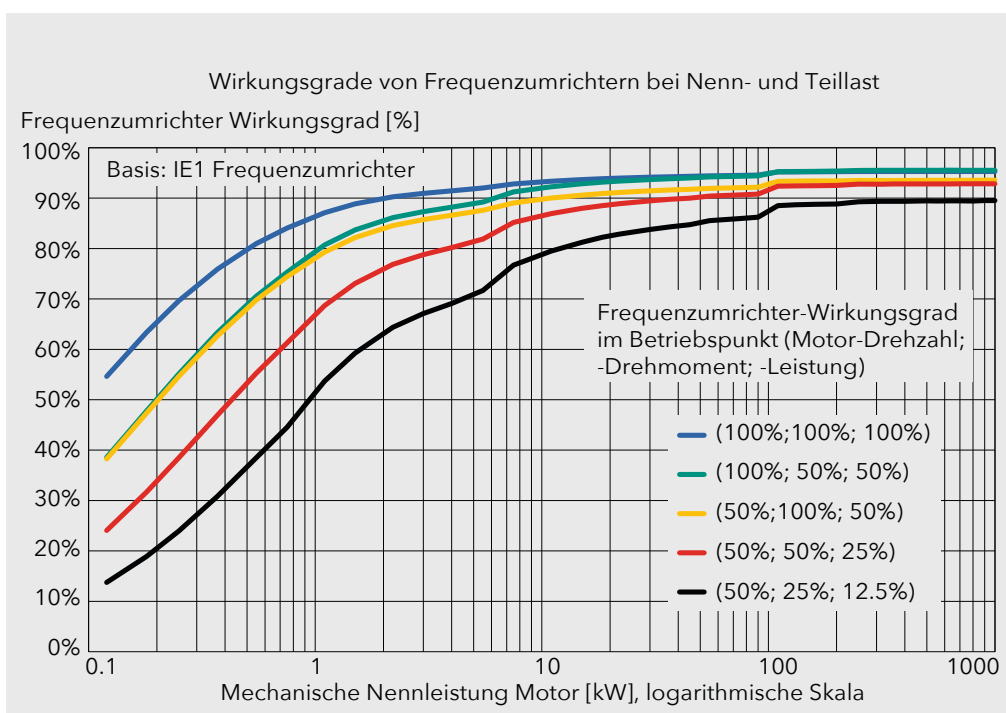


Abbildung 6: Wirkungsgrade von Frequenzumrichtern im Vergleich bei Nenn- und Teillast in Abhängigkeit der Motor-Nennleistung, nach IEC 61800-9-2, Edition 1, Basis: Effizienzklasse IE1 für Frequenzumrichter. Die Abbildung zeigt, dass ein FU bei tiefer Drehzahl beziehungsweise tiefem Drehmoment einen deutlichen Abfall des Wirkungsgrades, gegenüber des Wirkungsgrades bei Nennleistung, erleidet.

Energiebedarf der Luftförderung

Der Energiebedarf für die Luftförderung mit elektrisch angetriebenen Ventilatoren berechnet sich nach der Formel:

$$E = \frac{q_v \cdot \Delta p \cdot t}{\eta_v \cdot \eta_{Tr} \cdot \eta_M \cdot \eta_R}$$

E	Elektrischer Energiebedarf in Wh
q_v	Volumenstrom in m^3/s
Δp	Gesamtdruckdifferenz in Pa
t	Betriebszeit in h
η_v	Wirkungsgrad des Ventilators
η_{Tr}	Wirkungsgrad der Transmission (Keil- oder Flachriemen)
η_M	Wirkungsgrad des Motors
η_R	Wirkungsgrad der Regelung (Frequenzumformer)

Das Produkt der vier Teilwirkungsgrade wird häufig zum Gesamtwirkungsgrad η_{ges} zusammengefasst. Bei mehrstufigen Anlagen und bei Anlagen mit stufenlos variablem Volumenstrom ist die Betrachtung für die verschiedenen Betriebszustände separat durchzuführen.

Für einen tiefen Energieverbrauch sind die Grössen q_v , Δp und t zu minimieren, die Wirkungsgrade zu maximieren.

Angemessene Luftvolumenströme

Grundsätze

- Bei Lüftungsanlagen für Personen (Wohnen, Arbeiten) den Luftvolumenstrom nach der Aussenluft rate pro Person bemessen.
- Im Raum anfallende Wärme-, Schadstoff- und Feuchtelasten reduzieren oder an der Quelle absaugen.
- Grössere Wärmelasten nicht über die Lüftungsanlage abführen sondern den Einsatz eines wasserführenden Kühlsystems oder einer örtlichen Umluftkühlung prüfen. In Räumen, in denen die Raumluft vorwiegend durch Personen belastet wird (z. B. Büros, Wohnbauten, Schulen), erfolgt die Bemessung der Luftvolumenströme nach SIA 382/1:2014. Zudem finden sich Standardwerte in SIA 2024:2015. Je nach Nutzung und Anforderung an die Raumluftqualität liegen die Luftvolumenströme zwischen ca. 15 und 36 m^3/h Person. Je nach Nutzung liegen die Werte zwischen 15 und 36 m^3/h Person. Angaben für typische Personenbelegungen finden sich im Merkblatt SIA 2024.

Der erforderliche Zuluftvolumenstrom zur Wärmeabfuhr mit der Lüftungsanlage ist abhängig von der Wärmelast und der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Zuluft. Für das schweizerische Mittelland gilt:

$$q_{v,ZUL} = \frac{\Phi}{0,32(\theta_{RAL} - \theta_{ZUL})}$$

$q_{v,ZUL}$	Zuluftvolumenstrom in m^3/h
Φ	Wärmelast in W
θ_{RAL}	Raumlufttemperatur in $^{\circ}C$
θ_{ZUL}	Temperatur der Zuluft beim Luftdurchlass in $^{\circ}C$

Kleine Druckverluste

Grundsätze

- Kurzes Luftleitungsnetz
 - Kleine Luftgeschwindigkeiten
 - Strömungsgünstige Formgebung (runde Luftleitungen, wenig Formstücke, strömungsgünstige Formstücke)
- Die Anordnung der Aussenluftfassungen, Technikräume, Fortluftöffnungen und Schächte hat einen starken Einfluss auf die Länge des Luftleitungsnetzes. Die damit verbundenen Entscheide müssen in einer sehr frühen Planungsphase gefällt werden. Dezentralen Lösungen sind durch den Wartungsaufwand und bei Fassadengeräten zusätzlich durch hygienische Aspekte Grenzen gesetzt.

Zur Minimierung der Druckverluste ist auf kleine Luftgeschwindigkeiten zu achten. Folgende Richtwerte finden sich in SIA 382/1:2014 Ziffern 5.7.2.6 und 5.7.2.7. Die Anforderungen der VO EU 1353/2014 können allenfalls zu tieferen Luftgeschwindigkeiten führen:

- Maximale Luftgeschwindigkeit in Apparaten (bezogen auf die Nettoflächen): 2 m/s. Dieser Richtwert wird bei Luftaufbereitungsgeräten der Klasse V1 (maximal 1.6 m/s), V2 (> 1.6 bis 1.8 m/s) und V3 (> 1.8 bis 2.0 m/s) nach EN 13053 eingehalten.
 - Maximale Luftgeschwindigkeiten in Luftleitungen je nach maximalem Luftvolumenstrom
- | | |
|-----------------------|---------|
| bis 40 m^3/h : | 2.5 m/s |
| bis 1 000 m^3/h : | 3.0 m/s |
| bis 2 000 m^3/h : | 4.0 m/s |
| bis 4 000 m^3/h : | 5.0 m/s |
| bis 10 000 m^3/h : | 6.0 m/s |
| über 10 000 m^3/h : | 7.0 m/s |

Hier wird empfohlen, die oben genannten Richtwerte bei runden Luftleitungen mit energieäquivalenten

Volllaststunden bis 2000 h/a anzuwenden. Bei Volllaststunden von 4000 h/a und Luftvolumenströmen über 4000 m³/h sowie bei Volllaststunden von 8000 h/a und Luftvolumenströmen über 1000 m³/h werden die reduzierten Werte nach Abbildung 7 empfohlen.

Die hier empfohlenen Luftgeschwindigkeiten sind auch aus ökonomischer Sicht (Investition und Betrieb über 30 Jahre) bei heutigen Preisen begründbar, aus gesamt-energetischer Sicht (Graue Energie und Betriebsenergie) wären sogar um 1 bis 2 m/s tiefere Luftgeschwindigkeiten optimal.

Bei verzweigten Luftleitungssystemen sind diese Richtwerte im Strang mit dem grössten Druckverlust einzuhalten. In den anderen Strängen sind unter Ausnut-

zung des ohnehin vorhandenen Druckniveaus höhere Luftgeschwindigkeiten zulässig. Zu beachten sind jedoch die schalltechnischen Konsequenzen. Mit einer strömungsgünstigen Formgebung sind die Druckverluste deutlich geringer als mit ungünstiger Formgebung.

■ Bei gleicher Fläche, gleicher Strömungsgeschwindigkeit und Rauigkeit ergeben sich mit runden Luftleitungen die geringsten Druckverluste. Rechteckige Kanäle werden mit zunehmendem Verhältnis von Breite zu Höhe ungünstiger (Abbildung 8). Bei gleicher Luftgeschwindigkeit, d.h. gleichem Querschnitt, verursacht z.B. eine rechteckige Ausführung mit einem Seitenverhältnis von 1:5 einen um rund 50% erhöhten Druckverlust gegenüber einer runden Luftleitung. Im gleichen Ausmass ist auch der Materialverbrauch (Umfang) und

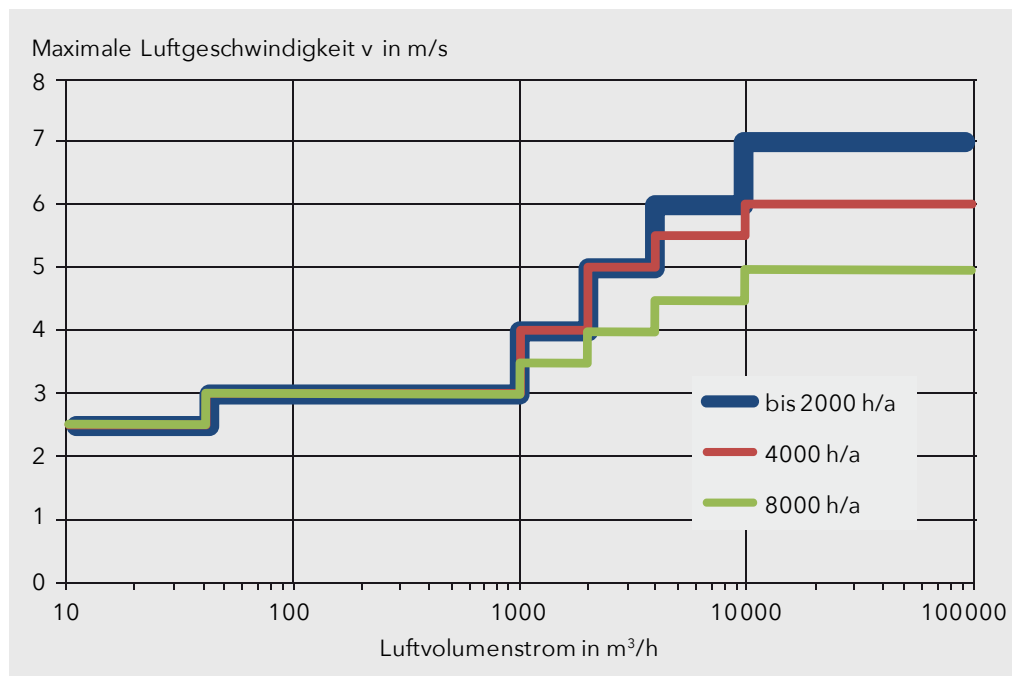


Abbildung 7: Maximale Luftgeschwindigkeiten in runden Luftleitungen

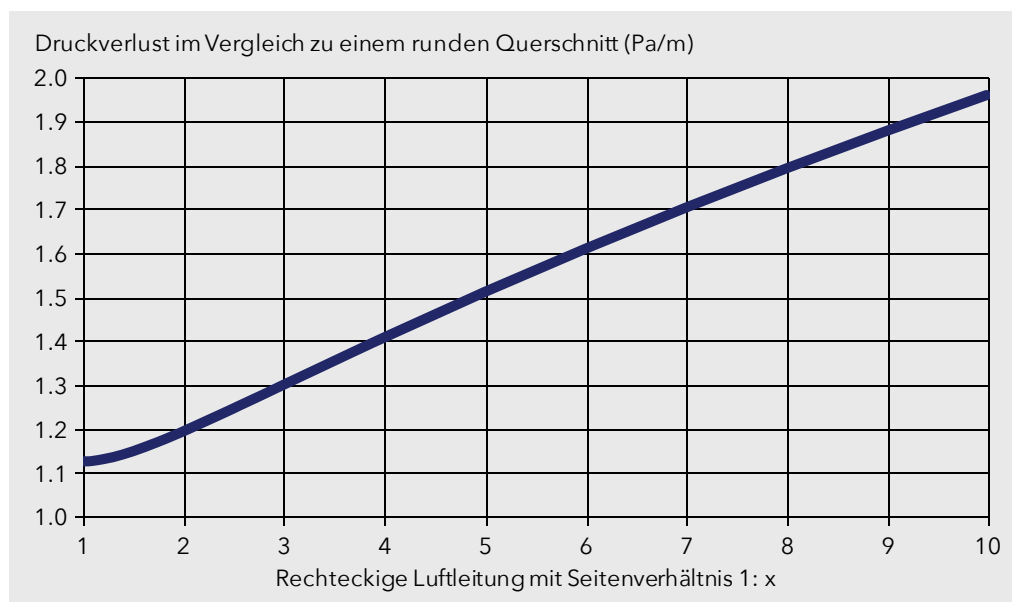


Abbildung 8: Druckverlust einer rechteckigen Luftleitung je nach Seitenverhältnis im Vergleich zu einer runden Luftleitung bei gleicher Luftgeschwindigkeit

damit der Preis grösser. Wenn immer möglich sind runde oder quadratische Luftleitungen zu verwenden. Wenn rechteckige Luftleitungen verwendet werden müssen, sollten die Luftgeschwindigkeiten gegenüber den oben genannten Richtwerten um einen Faktor nach Abbildung 9 reduziert werden.

■ Umlenkungen sollten mit möglichst grossen Radien respektive Leitblechen ausgeführt werden. Wenn z.B. ein 90°-Bogen mit einem Verhältnis des mittleren Radius R zum Durchmesser D von nur schon 1.0 statt 0.5 (kein innerer Radius) ausgeführt wird, reduziert sich der Druckverlust auf etwa einen Drittel. Mit $R/D = 3$ statt 1 wird eine weitere Halbierung erreicht. Rohrbo- gen sollten aus möglichst vielen Segmenten bestehen und ebenfalls ein möglichst grosses Verhältnis von R/D aufweisen. Bei rechteckigen Luftleitungen sind flache Kanäle wesentlich ungünstiger als quadratische oder hochkantige. Von den in Abbildung 10 gezeigten Bei- spielen mit 90°-Umlenkungen weist die schlechteste Lösung mit $\zeta = 2.1$ den 14-fachen Druckverlust im Ver- gleich zur besten Lösung mit $\zeta = 0.15$ auf.

Ausführliche Angaben zu den Druckverlusten von Luft- leitungselementen finden sich z.B. im Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik von Recknagel, Sprenger und Schramek. [2] Die Berücksichtigung dieser Zusam- menhänge verlangt eine fachgerechte und frühzeitige Planung des Luftleitungsnetzes mit Druckverlustbe- rechnung.

Bei Anlagen mit Luftaufbereitungsgeräten liegen die internen Druckverluste häufig in der gleichen Grös- senordnung wie die externen. Auch hier sind kleine Luftgeschwindigkeiten anzustreben (Maximalwert bezogen auf die Nettofläche: 2 m/s), was sich auf den Platzbedarf auswirkt.

Dem Bedarf angepasste Betriebszeiten

Grundsätze

- Luftvolumenstrom dem tatsächlichen Bedarf anpas- sen.
- Betriebszeiten dem tatsächlichen Bedarf anpassen. Bei vielen Anwendungen, z.B. bei Räumen mit varia- bler Personenbelegung, ist der Luftbedarf abhängig von der Nutzung. In diesen Fällen wird der Energiever- brauch mit einer Anpassung des Luftvolumenstroms

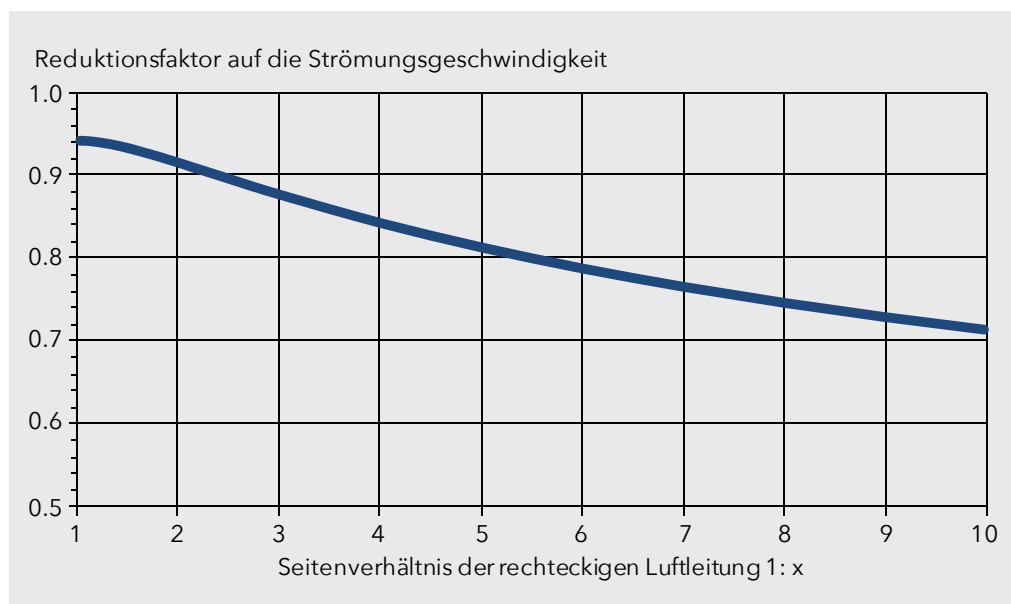


Abbildung 9: Reduktion der Luftgeschwindigkeit in rechteckigen Luftleitungen zur Erreichung vergleichbarer Druckverluste wie in runden Leitungen.

Bogen		1		2	
$R/D = 0,5$	$0,75$	$1,0$	$1,5$	2	3
$\zeta = 0,9$	$0,43$	$0,33$	$0,24$	$0,19$	$0,15$
$h/b = 0,25$	$0,5$	$1,0$	$2,0$	$R/W = 0$	$0,2$
$\zeta = 2,1$	$1,7$	$1,2$	$0,6$	$\zeta = 1,4$	$0,7$
				$0,4$	$0,6$
				$0,6$	$0,7$
				$0,7$	$1,1$

Abbildung 10: Beispiele von Einzelwiderständen von 90°-Umlenkungen. Quelle [2]

an den tatsächlichen Bedarf deutlich reduziert. Bei variabler Personenbelegung ist eine Regelung anhand der CO₂- oder Mischgaskonzentration im Raum empfehlenswert. Unbedingt zu beachten ist, dass das Anlagenkonzept mit der Zonierung respektive den Volumenstromreglern auf diese Bedürfnisse Rücksicht nimmt. Bei anderen Anwendungen kann eine Regelung anhand der Temperatur, Feuchte oder Schadstoffkonzentration oder der Einsatz einer Schaltuhr zweckmässig sein.

Die Anlagen sollen nur betrieben werden, wenn die versorgten Räume tatsächlich genutzt werden. Bei Anlagen für Räume oder Gebäude mit einer hohen Personenbelegung (z. B. Büros, Schulen) ist eine Vor- und Nachlaufzeit von rund einer Stunde empfehlenswert. Es ist darum immer eine entsprechende Steuerung der Anlagen vorzusehen.

Hohe Wirkungsgrade

Grundsätze

- Hohe Wirkungsgrade von Ventilator, Transmission, Motor und Frequenzumrichter
 - Betrachtung der Wirkungsgrade bei den tatsächlich zu erwartenden Betriebspunkten
 - Betrachtung des Gesamtsystems
- Für den Gesamtwirkungsgrad von Ventilatoren gelten europäische Anforderungen und Deklarationsvorschriften (Seite 1). Bei Neuanlagen sind nur noch Ventilatoren einzusetzen, welche die geltenden Effizienzanforderungen der EU erfüllen. Zu beachten ist, dass die Effizienzanforderungen der EU abhängig sind von der Ventilatorbauart. Es sollten darum ausschliesslich Axialventilatoren oder Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln verwendet werden. Bei den anderen Bauarten sind die Ventilatorwirkungsgrade bauartbedingt schlechter.
- Bei Anwendungen mit konstantem Betriebspunkt ist sicherzustellen, dass dieser nahe beim Bestpunkt des

Klasse	SFP W pro m ³ /s	SFP W pro m ³ /h
SFP 1+	< 300	< 0.083
SFP 1	300 - 500	0.083 - 0.14
SFP 2	500 - 750	0.14 - 0.20
SFP 3	750 - 1250	0.20 - 0.35
SFP 4	1250 - 2000	0.35 - 0.56
SFP 5*	2000 - 3000	0.56 - 0.83
SFP 6*	3000 - 4500	0.83 - 1.25
SFP 7*	> 4500	> 1.25

Tabelle 5: Effizienzklassen der spezifischen Ventilatorleistungen (siehe Seite 12)

Ventilators liegt. Bei Anwendungen mit mehrstufigem oder variablem Betrieb ist die beste Lösung anhand der vorhandenen Betriebspunkte und deren Häufigkeiten zu bestimmen.

Spezifische Leistung von Ventilatoren (SFP)

Grundsätze

- Vorgabe tiefe SFP-Klasse (W pro m³/h, Tabelle 5)
- Anforderungen nach SIA 382/1 einhalten (Tabelle 6)

Definition

Die spezifische Ventilatorleistung quantifiziert den elektrischen Leistungsbedarf eines Ventilators zur Förderung eines bestimmten Luftvolumenstroms und erlaubt die kombinierte Beurteilung der Wirkungsgrade und der Druckverluste.

$$SFP = \frac{P}{q_v} = \frac{\Delta p}{\eta_{ges} \cdot 3600}$$

- SFP Spezifische Ventilatorleistung in W pro m³/h
- P Elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators inkl. FU in W
- q_v Luftvolumenstrom in m³/h
- Δp Druckerhöhung im Ventilator in Pa
- η_{ges} Gesamtwirkungsgrad des Ventilators

Bei Anwendungen mit einem Luftaufbereitungsgerät (Monoblock) wird die erforderliche Druckerhöhung im Ventilator durch interne und externe Druckverluste verursacht, d.h. Δp = Δp_{int} + Δp_{ext}. In SIA 382/1 werden die Klassen der spezifischen Ventilatorleistung definiert. Diese Klassierung gilt für jeden Ventilator separat. Zu beachten ist, dass der SFP_{int}, der nach VO EU 1253/2014 deklariert werden muss, nur definierte interne Druckverluste von Luftaufbereitungsgeräten berücksichtigt.

Anforderungen

Nach SIA 382/1 müssen Lüftungs- und Klimaanlage im Auslegungsfall die SFP-Anforderungen gemäss Tabelle 6 erfüllen.

*Diese Klassen nach EN 13779 werden in SIA 382/1:2014 nicht verwendet. Die Norm EN 13779 wurde unterdessen zurückgezogen und durch die EN 16798-3:2017 ersetzt.

Wohnraumlüftungsgeräte

Gemäss VO EU 1253/2014 werden Geräte bis zu einem maximalen Luftvolumenstrom von 250 m³/h als Wohnraumlüftungsgeräte bezeichnet, auch wenn sie nicht in Wohngebäuden eingesetzt werden. Bis zu einem maximalen Luftvolumenstrom von 1000 m³/h kann ein Lieferant ein Gerät optional als Wohnraumlüftungsgerät bezeichnen. Bei Wohnraumlüftungsgeräten muss die Energieklasse deklariert werden, wobei A+ die beste und G die schlechteste Klasse ist.

Tabelle 7 zeigt die Anforderungen der SIA 382/5 an Anlagen mit Wohnraumlüftungsgeräten.

Anlagentyp	SFP-Klasse			
	Zuluftventilator		Abluftventilator	
	Grenzwert	Zielwert	Grenzwert	Zielwert
Einfache Zuluftanlage	SFP 1	SFP 1+	-	-
Zuluftanlage mit Lufterwärmung, Umluftkühlgerät	SFP 1	SFP 1+	-	-
Einfache Abluftanlage			SFP 1	SFP 1+
Abluftanlage mit Abwärmenutzung			SFP 1	SFP 1+
Einfache Lüftungsanlage	SFP 1	SFP 1+	SFP 1	SFP 1+
Lüftungsanlage mit Lufterwärmung	SFP 2	SFP 1	SFP 1	SFP 1+
Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und -befeuchtung	SFP 2	SFP 1	SFP 1	SFP 1+
Einfache Klimaanlage	SFP 3	SFP 2	SFP 2	SFP 1
Klimaanlage mit Luftbefeuchtung	SFP 3	SFP 2	SFP 2	SFP 1
Klimaanlage mit Luftbe- und -entfeuchtung	SFP 3	SFP 2	SFP 2	SFP 1

Tabelle 6: SFP-Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage (SIA 382/1)

Anlagentyp	Mindestanforderung an die Energieklasse	max. externer Druckverlust	
		Grenzwert	Zielwert
Einfache Lüftungsanlage	A ¹⁾	150 Pa ²⁾	100 Pa ²⁾
Einzelraum-Lüftungsgerät	A ¹⁾	(0 Pa)	(0 Pa)
Abluftanlage für Dauerbetrieb	C	70 Pa	50 Pa
Abluftanlage mit Bedarfssteuerung ein/aus	C	100 Pa	70 Pa

Tabelle 7: Anforderungen der SIA 382/5 an Anlagen mit Wohnraumlüftungsgeräten.

¹⁾ Für Geräte mit Enthalpieübertrager mit einem Feuchteverhältnis > 60% gilt die Klasse B

²⁾ Kann zwischen Zuluft- und Abluftseite aufgeteilt werden; z. B. Grenzwert 80 Pa AUL-ZUL, 70 Pa ABL-FOL

Planung energieeffizienter Luftförderung

Die Umsetzung der Informationen der Seiten 4 bis 12 ist notwendig für den Bau und den Betrieb von energieeffizienten Anlagen mit kleinerem spezifischem Leistungs- und Energiebedarf für die Luftförderung mit Ventilatoren. Wesentliche Grundvoraussetzungen werden in einer sehr frühen Phase bestimmt. Es ist darum wichtig, dass diese Aspekte in einer sehr frühen Phase des Projektes behandelt werden. Sehr zu empfehlen ist auch, dass nach dem Abschluss der Arbeiten eine Erfolgskontrolle und eine periodische Überprüfung und Optimierung durchgeführt wird.

Die vier häufigsten Hindernisse für eine energieeffiziente Luftförderung

- Ungenügende Platzverhältnisse, Luftleitungen mit langen respektive komplizierten Wegen
- Falsche oder fehlende Dimensionierung, Überdimensionierung
- Ungenügende Anpassungsmöglichkeit an variable Nutzungsbedingungen
- Wahl energetisch schlechter Komponenten aus Unkenntnis oder aufgrund der ausschliesslichen Berücksichtigung der Investitionskosten

Ungenügende Platzverhältnisse

Für eine Luftförderung mit kleinem Druckverlust müssen die Luftgeschwindigkeiten klein und die Wege kurz sein.

Kleine Luftgeschwindigkeiten bedeuten grosse Querschnittsflächen. Die Sicherstellung des dazu erforderlichen Platzbedarfs erfordert eine frühzeitige Planung. Bei den Zentralen ist zusätzlich auch der Platzbedarf für eine gute Zugänglichkeit der Apparate zu beachten. Die Forderung nach kurzen Wegen verlangt eine wohl überlegte Anordnung der Zentralen, Aussenluftfassungen und Fortluftöffnungen sowie ein darauf abgestimmtes Schachtkonzept. Auch dieses Anliegen kann nur mit einer frühzeitigen Planung erfüllt werden.

Falsche oder fehlende Dimensionierung

Ventilatoren, Motoren, Riemenantriebe und Frequenzumrichter erreichen ihre Bestwirkungsgrade in einem definierten Bereich. Es ist darum wichtig, dass diese Komponenten richtig ausgewählt werden. Bei falscher oder fehlender Dimensionierung können sich markante Wirkungsgradeinbussen ergeben.

Ungenügende Anpassungsmöglichkeit an variable Nutzungsbedingungen

Viele Anwendungen weisen variable Nutzungsbedingungen auf. Mit einem bedarfsabhängigen Betrieb sind erhebliche Energieeinsparungen möglich. Dies setzt voraus, dass die Nutzungsbedingungen rechtzeitig abgeklärt und die Systeme inkl. Zonierung und Regelung entsprechend ausgelegt werden.

Wahl energetisch schlechter Komponenten

Bei den Komponenten der Luftförderung bestehen je nach Bauart und Herstellungsqualität teilweise erhebliche Unterschiede im Bestwirkungsgrad und im Teillastverhalten. Es empfiehlt sich darum eine seriöse Prüfung von Varianten. Auf den Seiten 14 bis 16 ist das konkrete Vorgehen zur Erfassung und Beurteilung von Ventilatoren unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten bei den vorgesehenen Einsatzbedingungen dargestellt.

Überprüfung und Optimierung bestehender Anlagen

Bei bestehenden Anlagen kann die energetische Qualität der Luftförderung mit Messungen bestimmt und beurteilt werden. Werden Abweichungen zu den heute gültigen Standards festgestellt, ist im Einzelfall zu prüfen, ob Anpassungen möglich und sinnvoll sind.

Die fünf wichtigsten Mängel bestehender Anlagen

- Zu lange Betriebszeiten
- Zu hohe Volumenströme
- Veraltete Ventilatorantriebe und Steuerungen
- Fehlende Bedarfsregelung
- Nicht fachgerechte Instandhaltung, keine nachgeführten Installationspläne

Zu lange Betriebszeiten

Häufig stimmen eingestellte Betriebszeiten nicht mit der aktuellen Nutzung überein.

Anpassungen von Regler- und Schaltuhren-Einstellungen lassen sich sehr schnell umsetzen und kosten praktisch nichts. Periodische Kontrollen der vorhandenen Einstellungen sind sehr empfehlenswert.

Zu hohe Luftvolumenströme

Viele Lüftungsanlagen sind überdimensioniert. Gründe dazu liegen in der ursprünglichen Planung (Angstzuschläge) und geänderten Nutzungsbedingungen.

Bei Lüftungsanlagen, die mehrere Räume versorgen, muss die Überprüfung und Neueinstellung raumweise erfolgen. Neueinstellungen sollen in der Regel durch Fachleute erfolgen. Bei einer Reduktion des Luftvolumenstroms um mehr als 20% soll gleichzeitig ein Ersatz des Ventilators geprüft werden.

Veraltete Ventilatorantriebe und Steuerungen

Keilriemen weisen insbesondere bei kleinen und mittleren Ventilatoren schlechte Wirkungsgrade auf. In alten Anlagen finden sich teilweise noch Drehzahlsteuerungen mit Transformatoren, die technisch veraltet sind.

Bei neuen Bauformen sind elektronisch kommutierte Permanentmagnet- oder Reluktanz-Motoren direkt auf der Antriebswelle der Ventilatoren aufgebaut. Neben den mechanischen Transmissionsverlusten (Reibung) sind dabei auch die elektrischen Verluste markant

geringer als bei alten Lösungen mit Trafo-Steuerung respektive Asynchronmotoren. Bei kleineren und mittleren Ventilatoren kann durch den Wechsel von alter auf neue Technik 30% bis 50% elektrische Energie eingespart werden.

Fehlende Bedarfsregelung

Bedarfsregelungen (Raumluftqualität, Raumtemperatur, Druck) durch variable Luftvolumenströme waren vor zehn und mehr Jahren deutlich aufwändiger und teurer als heute. Bei variablen Raumbelastungen und Lasten (Wärme, Feuchte, Schadstoffe) sollte bei mittleren und grossen Anlagen eine Nachrüstung geprüft werden.

Nicht fachgerechte Instandhaltung

Der Betrieb von Ventilatoren und deren Anlagen erfordert eine fachgerechte Instandhaltung. Dazu gehören periodische Reinigungs- und Wartungsarbeiten, Filterwechsel, Ersatz von defekten Teilen etc. Sehr hilfreich ist eine Energiebuchhaltung, mit welcher Veränderungen der Energieverbräuche und der Energieeffizienz rasch erkannt werden können. Zu beachten sind auch Anpassungen aufgrund von Nutzungsänderungen. Dies erfordert die Nachführung der Installationspläne und der Anlagedokumentation.

Wann soll eine Anlage überprüft werden?

Es wird empfohlen, dass eine Lüftungsanlage etwa alle 10 Jahre bezüglich Grundkonzept und Energieeffizienz überprüft wird. In diesem Zeitraum können sich die Nutzungsbedingungen ändern oder durch Alterung von Komponenten kann sich der Wirkungsgrad verschlechtern. Ein weiterer Grund ist, dass sich innerhalb einer Dekade die Technik markant weiterentwickelt und so effizientere Komponenten und Teilsysteme zur Verfügung stehen.



Abbildung 11: Der Gebrauch verschmutzter Ventilatoren vermindert Luftvolumenstrom und vergrössert den Energieverbrauch

Ein weiterer Grund für die Überprüfung der Lüftungsanlage ist dann gegeben, wenn ein unerklärlich hoher Stromverbrauch der Anlage oder des Gebäudes festgestellt wird.

Wie soll grundsätzlich vorgegangen werden?

Bestehende Anlagen werden in einem mehrstufigen Verfahren beurteilt:

- In einer ersten Phase wird die Anlage bei einer Sichtkontrolle grob beurteilt.
- Wenn sich ein relevantes energetisches Verbesserungspotenzial zeigt, wird in einer zweiten Phase eine Energieanalyse erstellt. Diese basiert im Wesentlichen auf der Anlagedokumentation.
- Bei fehlenden oder unklaren Daten in der Anlagedokumentation können in einer dritten Phase Messungen durchgeführt werden.

Sichtkontrolle

Instandhaltung

Bei nicht fachgerechter Instandhaltung können durch Verschmutzung, Alterung und manuelle Eingriffe (z.B. Verstellen von Klappen und Reglern) höhere Druckverluste oder andere ungünstige Betriebsbedingungen entstehen.

Vor einer Energieanalyse sollten immer die Filter gewechselt werden. Wenn dabei beobachtet wird, dass die Filter nicht oder zu wenig oft ersetzt werden, ist der Betriebsdienst darauf aufmerksam zu machen.

Um eine hygienisch einwandfreie Luftqualität zu gewährleisten, wird eine regelmässige Hygieneinspektion empfohlen. Die SWKI VA 104-01 sieht je nach Art der Luftbehandlung alle zwei bis drei Jahre eine Inspektion vor.

Falls festgestellt wird, dass eine Hygieneinspektion fällig ist, soll diese vor der Energieanalyse veranlasst werden.

Beobachtung im Betrieb

Die Ventilatoren eines Objektes (Gebäude, Fabrikationsanlage, etc.) werden qualitativ beurteilt. Dies erfolgt durch eine Besichtigung mit Betriebsleuten (z.B. Betriebselektriker oder Hausdienst). Als Raster für die Beurteilung dienen die fünf wichtigsten Mängel (siehe Seite 14).

Resultate der Sichtkontrolle und weiteres Vorgehen

Die Sichtkontrolle wird in einem Protokoll dokumentiert. Dabei werden pro Anlage die weiteren Schritte vorgeschlagen, zum Beispiel folgende Beurteilungen:

- Kein Handlungsbedarf: Die Anlage ist energetisch gut oder unbedeutend und weist keine offensichtlichen Mängel auf.
- Sofortmassnahmen: Anpassung von Betriebszeiten und Riemenspannung überprüfen, etc.
- Weitere energetische Analyse: Die Anlage wird weiter untersucht. Dies kann durch eine Analyse der Anlagedokumentation respektive mittels Messungen erfolgen.
- Weitere nicht energetische Massnahmen: Aufgrund von offensichtlichen Mängeln wird die energetische Analyse abgebrochen und Massnahmen zur Mängelbehebung werden eingeleitet.

Analyse der Anlagedokumentation

In der zweiten Phase wird bei den ausgewählten Anlagen anhand der Anlagedokumentation beurteilt:

- SFP (spezifische Ventilatorleistung)
- Luftvolumenstrom (pro Person; bezogen auf Wärme- oder Schadstofflasten)
- Bedarfssteuerung und Bedarfsregelung (Luftqualität, Raumtemperatur, Differenzdruck)

Zudem wird geprüft, ob offensichtlich ineffiziente Komponenten vorhanden sind:

- Ventilatorwirkungsgrad (nach Datenblatt oder Erfahrungswert)
- Transmission
- Motor (schlechte Energieklasse, Überdimensionierung)
- Stufensteuerung und Stufenregelung (Drosselung, Trafosteuerung)

Offensichtlich ungünstige Verhältnisse liegen vor, wenn:

- $SFP > 0.5 \text{ W/m}^3/\text{h}$
- Volumenstrom 30% über dem Bedarf
- keine Bedarfssteuerung oder Bedarfsregelung
- Keilriemenantriebe bei Ventilatoren mit einer Wellenleistung von unter 2 kW

Die Analyse wird in einem Protokoll dokumentiert. Dabei werden pro Anlage die weiteren Schritte vorgeschlagen. Allgemein kommen folgende Varianten in Frage:

- Kein weiterer Handlungsbedarf
- Veranlassen von Massnahmen, z.B. Luftvolumenstrom neu einstellen
- Auslösen von Messungen
- Auslösen einer Sanierung der Anlage

Messungen

Grundsätzliches zu den Messungen

Vor Messbeginn muss bedacht werden:

- Massgebende Einstellungen (Betriebsstufen, Lastfälle)
- Die Steuerung respektive Regelung muss während der Messung so eingestellt werden, dass der Luftvolumenstrom dem Dimensionierungswert entspricht. Zum Beispiel muss bei einer Anlage mit Luftqualitätsregelung der Sollwert des CO₂-Gehalts auf den minimalen Wert gestellt werden.
- Eine allfällige Umluftbeimischung muss so eingestellt werden, dass der Umluftanteil dem Dimensionierungszustand entspricht.
- Sind spezielle Komponenten wie Volumenstrom- oder Konstantdruckregler vorhanden?
- Bei Anlagen mit Zu- und Abluftventilator muss entschieden werden, ob die elektrische Leistungsaufnahme von jedem Ventilator separat gemessen wird oder ob die Leistungsaufnahme des gesamten Luftaufbereitungsgerätes erfasst wird.
- Die Aussagekraft von Messungen erhöht sich markant, wenn neben dem Dimensionierungsfall auch Messungen bei Teillastbetrieb durchgeführt werden. Nicht vergessen: Bei den Messungen müssen Sicherheitsvorschriften (Starkstrom, Verletzungsgefahr bei Ventilatoren) beachtet werden.

Elektrischer Energieverbrauch

Im Betriebszustand, bei dem der Luftvolumenstrom und der Förderdruck gemessen werden, wird auch die elektrische Leistungsaufnahme (Wirkleistung) gemessen.

Messungen in Starkstromanlagen dürfen nur von autorisierten Personen (lizenzierte Elektriker) durchgeführt werden.

Luftvolumenstrom und Förderdruck

Bei grösseren Anlagen wird der Luftvolumenstrom in der Regel in einer möglichst geraden Strecke vor oder nach dem Luftaufbereitungsgerät (Monobloc) gemessen. Die Messstelle soll sich in Strömungsrichtung nicht unmittelbar nach Formstücken wie z.B. Bögen oder Komponenten befinden. Mit einem Anemometer wird das Strömungsprofil (Luftgeschwindigkeit) aufgenommen. Durch Multiplikation mit dem Querschnitt ergibt sich der Luftvolumenstrom. Falls die Temperatur am Messpunkt um mehr als 10 K vom Referenzwert (oft 20 °C) abweicht, ist bei der Auswertung der Dichteinfluss zu berücksichtigen.

Bei kleineren und mittleren Anlagen kann der Luftvolumenstrom auch an den Luftdurchlässen gemessen werden. Um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten, sollen dazu Trichter-Messgeräte eingesetzt werden.

Zur Beurteilung der Ventilatoren und der Anlage müssen neben dem Luftvolumenstrom auch Druckmessungen durchgeführt werden. Für die Bestimmung der Betriebspunkte der Ventilatoren sollen die Drücke an den Ventilatorstutzen gemessen werden. Zur Beurteilung der Luftverteilung sollen Druckmessungen an den Stutzen des Luftaufbereitungsgerätes durchgeführt werden.

Wenn bei einer Druckdifferenzmessung die Querschnitte der beiden Messstellen nicht gleich gross sind, müssen die Unterschiede der dynamischen Drücke berücksichtigt werden.

Energetische Konsequenzen verschiedener Lösungen (Beispiel)

Die Angaben in diesem Merkblatt zeigen, dass mit einer energieeffizienten und bedarfsgerecht betriebenen Anlage der Energieverbrauch markant gesenkt werden kann. Diese Tatsache wird am Beispiel von Messungen an sechs realen Anlagen und am rechnerischen Beispiel einer Zuluftanlage mit 10 000 m³/h dargestellt.

Messungen

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der gemessenen spezifischen Ventilatorleistungen von sechs Anlagen im Auslegefall mit einem Luftvolumenstrom von 4 000 bis 25 000 m³/h. Dabei wurden die elektrische Leistungsaufnahme von Zu- und Abluftventilator addiert und durch den Mittelwert von Zu- und Abluftvolumenstrom dividiert.

Die vier Anlagen Garderoben, Schule, Sporthalle und Saal sind Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung. Alle Anlagen (ausser der Sporthalle mit 25 000 m³/h) haben einen Volumenstrom zwischen 4 000 und 6 000 m³/h.

■ Die Anlage «Garderoben» ist mit effizienten Ventilatoren mit Direktantrieben ausgerüstet. Wegen den hohen externen Druckverluste (Summe Zu- und Abluftseite 900 Pa) liegt die spezifische Leistungsaufnahme fast um den Faktor 2 über dem Grenzwert.

■ Die Anlage «Schule» zeichnet sich durch tiefe Strömungsgeschwindigkeiten in der Luftverteilung (ca. 2 m/s) aus und kommt so auf einen externen Druckverlust von nur 320 Pa. Trotz konventioneller Antriebstechnik mit Keilriemen wird so ein guter SFP-Wert erreicht.

■ Bei der «Sporthalle» beträgt der Luftvolumenstrom 25 000 m³/h. Bei dieser grössten Anlage ist ein relativ hoher externer Druckverlust von 920 Pa wirksam. Daher wird trotz gutem Ventilator- und Motorwirkungsgrad der Grenzwert überschritten.

■ «Saal»: Das Lüftungsgerät hat dank eines kurzen Leitungsnetzes zwar einen geringen externen Druckverlust von 370 Pa, aber das gut 10 Jahre alte Lüftungsgerät entspricht bezüglich internem Druckverlust und Wirkungsgraden nicht mehr heutigen Anforderungen.

■ «Schwimmhalle»: Bei den beiden Lüftungen handelt es sich um Teilklimaanlagen. Die beiden Schwimmhallen weisen kurze Luftverteilungen mit dementsprechend kleinen externen Druckverlusten von 350 Pa (Schwimmhalle 1) und 260 Pa auf. In der Schwimmhalle 1 ist ein neues Lüftungsgerät mit direkt angetriebenen Ventilatoren vorhanden. Das Lüftungsgerät in der Schwimmhalle 2 ist gut 10 Jahre alt und hat einen Keilriemenantrieb.

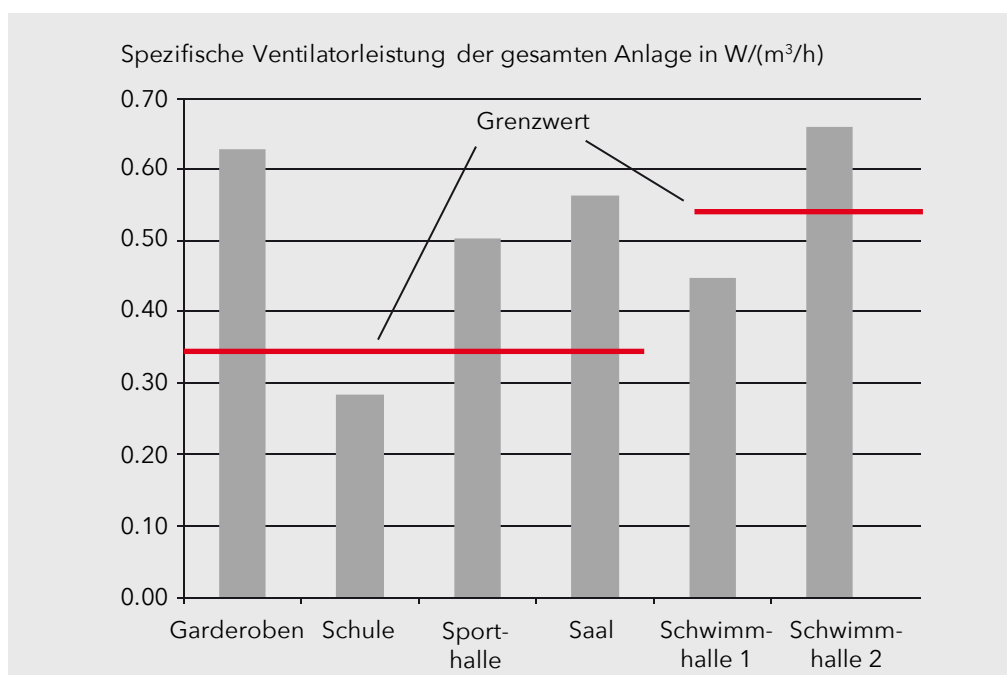


Abbildung 12: Beispiele von gemessenen spezifischen Ventilatorleistungen

Rechnerisches Beispiel Einfache Klimaanlage

Im Sinne von SIA 382/1:2014 definiert der Begriff «Einfache Klimaanlage» eine Anlage mit WRG, Filtern, Heizen und Kühlen.

Die Kombination der Betriebsarten, Druckdifferenzen und Gesamtwirkungsgrade ergibt die Kennwerte der Abbildungen 13 und 14. Bei einem Dauerbetrieb einer einstufigen energetisch schlechten Anlage ist der Leistungsbedarf 8-mal, der jährliche Energiebedarf 60-mal so gross wie bei einem bedarfsgerechten Betrieb einer energetisch sehr guten Anlage mit kleinem Druckverlust und variablem Luftvolumenstrom. Bei einem unnötigen Dauerbetrieb wird mit dem einfachen Einbau einer Schaltuhr eine erhebliche Energieeinsparung erreicht. Zur vollen Ausschöpfung des gezeigten Sparpotenzials müssen zusätzlich energieeffiziente Komponenten und eine Anpassung des Luftvolumenstroms an den Bedarf, z.B. mit einer CO₂-Messung als Leitgrösse für die Personenbelegung, realisiert werden.

Vergleicht man im Beispiel auf Seite 19 die Fälle B3/D3/W3 (Betrieb einer zweistufigen energetisch guten Anlage während 12 h/Tag an den Arbeitstagen) und B4/D4/W4 (bedarfsgerechter Betrieb einer energetisch sehr guten Anlage mit variablem Luftvolumenstrom) zeigt sich beim Leistungsbedarf immer noch ein Faktor 1.9, beim Energiebedarf ein Faktor 2.4.

Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
Dauerbetrieb einer 1-stufigen energetisch schlechten Anlage	Betrieb einer 1-stufigen energetisch mittelmässigen Anlage während 12 h/Tag an den Wochentagen	Betrieb einer 2-stufigen energetisch guten Anlage während 12 h/Tag an den Arbeitstagen	Bedarfsgerechter Betrieb einer energetisch sehr guten Anlage mit VAV

Beispiel eines Zuluftventilators mit 10 000 m³/h (einfache Klimaanlage für gemischte Büronutzung)

Spezifischer Leistungsbedarf in W pro m³/h

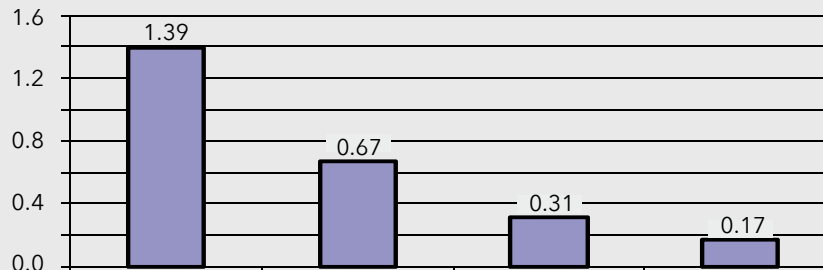


Abbildung 13: Spezifischer Leistungsbedarf des Zuluftventilators der Beispielanlage Grenzwert nach SIA 382/1: 0.35 W pro m³/h, Zielwert 0.21 W pro m³/h (mit hochgestellten «3» für Kubikmeter)

Jährlicher Energiebedarf in MWh/a

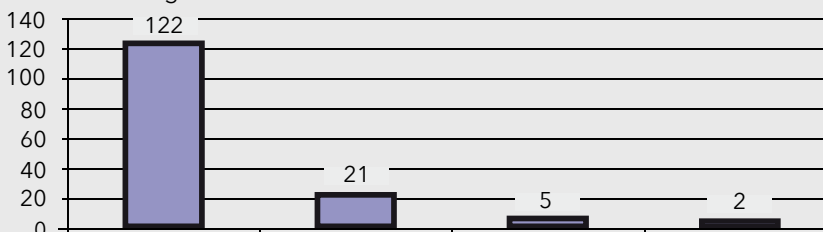


Abbildung 14: Jährlicher Energiebedarf des Zuluftventilators der Beispielanlagen

Betriebsart	B1	B2	B3	B4
	Luftvolumenstrom in m ³ /h			
Stufe 4	10 000	10 000	10 000	10 000
Stufe 3	-	-	5 000	8 000
Stufe 2	-	-	-	6 000
Stufe 1	-	-	-	4 000
	Tägliche Laufzeit in h/24 h-Tag			
Stufe 4	24	12	6	2
Stufe 3	-	-	6	4
Stufe 2	-	-	-	4
Stufe 1	-	-	-	2
Total	24	12	12	12
	Jährliche Betriebstage in Tage/Jahr			
Total	365	260	220	220
Druckdifferenz in Pa	D1	D2	D3	D4
Stufe 4	2 000	1 200	700	460
Stufe 3	-	-	175	294
Stufe 2	-	-	-	166
Stufe 1	-	-	-	74
Gesamtwirkungsgrad	W1	W2	W3	W4
Stufe 4	0.40	0.50	0.63	0.77
Stufe 3	-	-	0.58	0.72
Stufe 2	-	-	-	0.67
Stufe 1	-	-	-	0.62

Tabelle 8: Betriebsarten, Druckdifferenzen und Gesamtwirkungsgrade eines Zuluftventilators

Hinweise

Nach SIA 382/1:2007

- Summe Druckverluste auf der Zuluftseite (extern und intern) maximal 500 Pa bis 700 Pa

Nach EU-Richtlinie

Nach der EU-Richtlinie ist der maximal erreichbare Wirkungsgrad abhängig von der Leistungsaufnahme bei Nennlast. Für 3.1 kW (W3) wird der heute erreichbare Bestwert mit 0.72, für 1.7 kW (W4) mit 0.70 angegeben.

Weiterführende Infos

Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Erklärung
Betriebszeit	t	h	
Elektrischer Energiebedarf	E	Wh	
Gesamtdruckdifferenz	Δp	Pa	Delta p
Gesamtwirkungsgrad	η_{ges}	-	Eta global
Luftgeschwindigkeit	v	m/s	
Raumlufttemperatur	θ_{RAL}	°C	Theta air ambient
Spezifische Leistung Kompaktlüftungsgeräten	SPI	W pro m ³ /h	
Spezifische Leistung Ventilatoren	SFP	W pro m ³ /h	
Temperatur der Zuluft beim Luftdurchlass	θ_{ZUL}	°C	Theta Zuluft
Wirkungsgrad Motor	η_M	-	Eta
Wirkungsgrad Regelung	η_R	-	Eta, Frequenzumformer
Wirkungsgrad Transmission	η_{Tr}	-	Eta, Keil- oder Flachriemen
Wirkungsgrad Ventilator	η_V	-	Eta

Editorischer Vermerk

Das Merkblatt Ventilatoren wurde von S.A.F.E. im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner, Bruno Hari, Bürgi Schärer, Prof. Heinrich Huber, FHNW, und Urs Steinemann, Ing US, 2012 erarbeitet und im März 2021 teilweise aktualisiert (Normen, Gesetze und Quellen). Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG

Das Merkblatt ist unter www.topmotors.ch in deutscher, französischer und italienischer Sprache verfügbar. Topmotors wird von EnergieSchweiz unterstützt.

Normen, Gesetze und Quellen

Gesetzliche Anforderungen Schweiz

Energieeffizienzverordnung (EnEV):

- Anhang 2.6: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Ventilatoren
- Anhang 2.7: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Motoren und Frequenzumrichtern
- Anhang 1.17 Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Lüftungsanlagen

Normen Schweiz

- SIA 108:2020 Ordnung für Leistungen und Honorare der Maschinen- und der Elektroingenieure sowie der Fachingenieure Gebäudeinstallationen
- SIA 382/1:2014 Lüftungs- und Klimaanlage: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen
- SIA 2056:2019 Elektrizität in Gebäuden - Energie- und Leistungsbedarf
- SIA 382/5:2021 Mechanische Lüftung in Wohngebäuden

Gesetzliche Anforderungen Europa (EU)

Ecodesign-Richtlinie, Verordnungen:

- Nr. 1781 (2019): Elektromotoren von 0.12 kW bis 1 000 kW, Frequenzumrichter die für den Betrieb mit Motoren von 0.12 kW bis 1 000 kW ausgelegt sind und Nassläufer-Umwälzpumpen
- Nr. 327 (2011): Ventilatoren mit elektrischen Eingangsleistung zwischen 0.12 kW und 500 kW [1]
- Nr. 1253 (2014): Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen

Internationale Standards

- IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1, Efficiency classes (IE code)

Quellen

- Recknagel, Sprenger, Alders: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 2021/2022, ITM InnoTech Medien GmbH, ISBN 978-3-96143-090-1 [2]
- Merkblatt SIA 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik [5]
- Themenheft Motor: Heft 28, 2010, Faktor Verlag [6]
- Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, MuKE, EnDK
- Vollzugshilfen EN-105 (Lüftungstechnische Anlagen, 2018) und EN-142 (Energetische Betriebsoptimierung, 2017)
- AMO EERE U.S. Department of Energy, Motors Tip Sheets Nr. 1-12, Washington DC, 2006-2008
- Jürg Nipkow: Elektrizitätsverbrauch von Pumpen in der Schweiz, Arbeitspapier S.A.F.E./Topmotors, 2011
- Easy: Förderprogramm für effiziente Antriebe, Auswertung von 1500 Motoren in 5 Unternehmen, Zürich 2012 (unveröffentlicht)
- Conrad U. Brunner, Jürg Nipkow, Rolf Tieben, Rita Werle: Energieeffiziente elektrische Antriebe; in: Bulletin electrosuisse/VSE, Nr. 8/2012