



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Schlussbericht vom 18. August 2016

EFFILUFT

Elektroeffizienz von mittleren und grossen
Lüftungsanlagen



EFFILUFT

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik

Datum: 18. August 2016

Ort: Horw

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Gebäude und Städte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Hochschule Luzern
Departement für Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:

Christoph Dahinden, Hochschule Luzern, christoph.dahinden@hslu.ch
Urs Greber, Hochschule Luzern
Heinrich Huber, Hochschule Luzern, heinrich.huber@hslu.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Rolf Moser, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/500997-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

In Verwaltungs- und Industriegebäuden wird bis zu einem Viertel der Elektrizität für die Luftförderung verwendet. Lüftungsanlagen müssen nach SIA Norm 382/1 den Grenzwert der spezifischen Ventilatorleistung (SFP) einhalten oder Einzelanforderungen erfüllen. Bei 46 Anlagen wurden die Auslegungsdaten untersucht und in 14 Anlagen Nachmessungen vollzogen. Bereits anhand der Planungsdaten haben 50% der Zuluftanlagen und beinahe 95% der Abluftanlagen den SFP Grenzwert nicht eingehalten. Messungen haben diese Aussage erhärtet. Die SFP Grenzwerte sowie die Einzelanforderung der Druckverluste der Norm sind teilweise umstritten, da diese nur schwer einzuhalten sind. Bei einer Anlage wurde als Verbesserungsmassnahme ein Gehäuse-Ventilator durch einen freilaufenden Radialventilator mit Direktantrieb durch einen EC-Ventilator ersetzt. Die SFP konnte durch diese Massnahme um 7% verbessert werden. Bessere Resultate hinsichtlich einer Energieoptimierung wurden durch den Einsatz der druckoptimierten anstelle der druckkonstanten Regelung erzielt. Mit der untersuchten Anlage konnte während einer typischen Periode über 23% der elektrischen Energie eingespart werden, dies bei verhältnismässig kleinem finanziellen Aufwand.

Résumée

Près d'un quart du besoin d'électricité des bâtiments industriels et administratifs est utilisé pour le renouvellement d'air par ventilation. Selon la norme SIA 382/1, les installations de ventilation doivent respecter la valeur limite de la puissance spécifique du ventilateur (valeur PSV) ou les exigences ponctuelles. Le maintien des exigences lors de la mise en œuvre mais aussi lors de la planification est mise en doute, raison pour laquelle une campagne d'analyse des valeurs de dimensionnement de 46 installations a été effectuée. De plus, le débit d'air et la puissance du ventilateur ont été mesurés sur 14 autres installations. L'analyse des données a montré que lors de la planification, pour 50% des installations de pulsion d'air et 95% des installations d'extraction, les valeurs limites selon la norme ne sont pas respectées. Les mesures ont corroboré cette constatation. Les valeurs limites ainsi que les exigences ponctuelles des pertes de charge selon la norme sont de ce fait remises en question car elles sont très difficiles à respecter. Si l'on calcule le rendement à atteindre en fonction des exigences ponctuelles de pertes de charge, celui-ci serait supérieur à 1. De plus, les exigences de la norme ne donne aucune indication sur l'efficacité énergétique de l'installation. Les valeurs se réfèrent uniquement à un point de fonctionnement, lequel est donné pour un débit d'air maximal. Le remplacement du ventilateur dans une installation existante a permis d'améliorer la valeur PSV de 7%. L'utilisation d'un réglage à pression optimisée à la place d'un réglage à pression constante montre un meilleur potentiel en termes d'optimisation énergétique. Les mesures de l'installation en question ont montré un potentiel d'économie d'énergie électrique de 23% avec un investissement moindre.

Abstract

Up to one quarter of the electrical energy use in office and industrial buildings is used for ventilation systems. According to the SIA 382/1 standard, ventilation units must follow a threshold for the specific fan power (SFP) or meet single requirements. The design parameters of 46 ventilation units were analyzed and 14 further existing installations were measured. The analysis showed that already in the planning phase 50% of the supply air units and nearly 95% of the exhaust air units are not compliant with the SFP threshold. The measurements substantiated the analysis. The SFP thresholds as well as the single requirements for the pressure losses of the engineering standard are controversial because they are hard to meet. If the degree of efficiency is calculated according to single requirements for the pressure losses, the resulting degree of efficiency to reach is then greater than 1. Furthermore, the SFP value doesn't tell anything about the energy efficiency of the installation. The SFP value is determined for certain operating points at maximal air volume. In an existing ventilation unit, the old fan was replaced with a new radial fan in order to improve the installation. Through this measure, the SFP value could be improved by 7%. More significant results regarding the energy optimization were obtained replacing the constant pressure control with an optimized pressure control. The measurement of the installation during a certain period showed a potential to reduce the electrical energy demand of 23% without a big effort.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumée	3
Abstract	3
1 Kurzfassung	6
2 Ausgangslage	8
3 Ziel der Arbeit	9
3.1 Arbeitspakete	10
4 Normen	10
4.1 SIA Norm 382/1	10
4.2 Vergleich SIA 382/1:2007 zu SIA 382/1:2014	11
4.3 Diskussion der Grenzwerte nach SIA 382/1	13
4.4 Vergleich mit Norm EN 13779	15
5 Auslegedaten	15
5.1 Auswahl der Anlagen	15
5.2 Ergebnis Auslegungsdaten	18
6 Feldmessung	21
6.1 Messgrößen	21
6.2 Aufbau	21
6.3 Ergebnis Feldmessung	22
7 Verbesserungsmassnahmen	25
7.1 Einflussgrößen	25
7.2 Ergebnis Verbesserungsmassnahmen	26
7.2.1 Ist-Situation: Konstantdruck-Regelung	28
7.2.2 Druckoptimierte Regelung	29
7.2.3 Ersatz Gehäuse Ventilator durch EC-Radialventilator	31
7.2.4 Validierung Volumenstrommessung	33
8 Sicht der Stakeholder	35
8.1 Sicht Ventilator Hersteller	35
8.2 Sicht Monoblock Hersteller	35
8.3 Sicht Planer	35
8.4 Sicht Betreiber (Technisches Personal)	36
8.5 Sicht Betreiber (Management)	36
8.6 Sicht GA Lieferanten	37
9 Schlussfolgerung	37
9.1 Schätzung Sparpotential	37
9.2 Hinterfragung SFP als Energie-Benchmark	39
9.3 Beurteilung Verbesserungsmassnahmen druckoptimierte Regelung	41



9.4	Ausblick und Empfehlungen.....	41
10	Dank.....	42
11	Literaturverzeichnis.....	42
12	Anhang.....	43
12.1	Anlagedatenbank	43
12.1.1	Auslegedaten Allgemein	43
12.1.2	Auslegedaten ZUL	44
12.1.3	Auslegedaten ABL	46
12.1.4	Auszug Messdaten und Auslegung Anlagendatenbank	47
12.2	Messprotokolle (Muster Anlage Nr. 46)	49
12.3	Zeitprofil Norm-Tag	53



1 Kurzfassung

In der Schweiz wird rund 13% der elektrischen Energie für die Luftförderung verbraucht. Grenzwerte der Norm SIA 382/1 [1] bezüglich spezifischen Ventilatorleistung und der Druckverluste bilden dabei eine Grundlage der effizienten Realisation von Lüftungs- und Klimaanlagen.

Ein hochwertiger Ventilator reicht jedoch noch nicht aus, um eine effiziente Anlage zu bauen. Wird das Kanalnetz zu knapp dimensioniert oder der Volumenstrom zu hoch angesetzt, bleibt eine Lüftungsanlage trotz top Komponenten unter ihren energetischen Möglichkeiten.

Die Kontrolle von Minergie-P Anträgen zeigt, dass die Grenzwerte der spezifischen Ventilatorleistung (SFP) häufig bereits während der Planung überschritten werden. Die momentane Situation von mittleren und grösseren Lüftungsanlagen in der Schweiz soll widerspiegelt werden.

Vorgehen

Von 46 Anlagen wurden Planungsunterlagen eingeholt. Die „Spezifische Ventilatorleistung SFP“ wird darin als Kenngrösse für Wirkungsgrad und Druckverlust beschrieben. Aus diesen Anlagen wurden 14 Stück für Nachmessungen ausgesucht. In einem letzten Schritt sollen Verbesserungsmassnahmen an einer Anlage erkannt, durchgeführt und nachgemessen werden.

Normen

Die Klassierung und Typen der SFP Werte gemäss SIA 382/1 Ausgabe 2007 [1] im Vergleich zur Ausgabe 2014 [2] unterscheiden sich nur unwesentlich. In beiden Ausgaben sind abluftseitig die Grenzwerte eine Kategorie niedriger angesetzt als auf der Zuluftseite. Dies ist damit zu begründen, dass zuluftseitig Heizregister, Kühlregister, Befeuchter, Tropfenabscheider und höhere Filterstufen eingebaut sind. Der interne Druckverlust ist dadurch höher. Seit 2014 dürfen bei Anlagen mit speziellen Anforderungen und einer Wärmerückgewinnung die SFP-Grenzwerte um eine Kategorie erhöht werden. Auch bezüglich Einzelanforderungen wurden kleinere Änderungen vorgenommen. So wird neu anstelle der Mindestsystemwirkungsgrade auf die ErP-Richtlinie für Ventilatoren verwiesen.

Grenzwerte

Sowohl in Spiralgehäusen eingebaute Ventilatoren als auch freilaufende Ventilatoren blasen die Zuluft typischerweise in eine Kammer aus. Die hohe Austrittsgeschwindigkeit lässt sich dabei nicht als statischen Druck zurückgewinnen, sondern wandelt sich als Borda-Carnotscher Stossverlust in Wärme um. Ein Planer oder Monoblock-Lieferant muss also berücksichtigen, dass der Gesamtförderdruck des Ventilators nicht gleich dem Druckverlust der Anlage ist, sondern dass bei typischen Einbausituatio-nen der dynamische Druck des Ventilators als Verlust dazuzählen ist.

Lüftungsanlagen mit mehrstufigem oder stufenlosem Betrieb werden nur selten unter Auslegungsbedingungen betrieben. Mit sinkendem Volumenstrom nimmt die spezifische Ventilatorleistung aufgrund der quadratisch abnehmenden Druckverluste ab. Dabei verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad in der Regel. Es stellt sich die Frage, ob der SFP-Wert nicht besser bei einem typischen Betriebspunkt zu definieren wäre. Dies wäre Anreiz dazu, den Gesamtwirkungsgrad auf diesen Fall zu optimieren.

Bei der Definition des SFP-Werts ist die Dichte der Luft nicht berücksichtigt. Dies kann sowohl bei speziellen Höhenlagen wie auch bei variablen Lufttemperaturen zu Unklarheiten führen.

Gemäss Norm ist es zulässig, anstelle des SFP-Wertes die Einzelanforderungen an Druckverlust und Systemwirkungsgrad der Ventilatoren einzuhalten. Dabei wird gefordert, dass die Ventilatoren die ErP-Richtlinien der EU erfüllen müssen. Bedenkt man, dass Ventilatoren mit tieferen Wirkungsgraden im europäischen Markt nicht verkauft werden dürfen, ist diese Anforderung fragwürdig. Neben der Einzelanforderung an den Druckverlust nennt die SIA 382/1 [1] Richtwerte für maximale Luftgeschwindigkeiten. Diese sind mit den Anforderungen der kantonalen Energievorschriften abgeglichen.

Werden die Grenzwerte für den Druckverlust und die SFP miteinander verrechnet, ergeben sich für die Abluft Anlagen unrealistisch hohe Wirkungsgrade von 75 bis über 100%. Typischerweise gilt der

Grundsatz, dass mit dem Einhalten der Einzelanforderungen auch die Systemanforderung eingehalten ist. In der SIA 382/1 [1] ist es umgekehrt. Wenn die Einzelanforderung des Druckverlusts eingehalten ist, wird der SFP-Grenzwert in den meisten Fällen nicht eingehalten. Bei kleineren und mittleren Anlagen ist es selbst mit neuester Antriebstechnik schwierig, einen Gesamtwirkungsgrad von 60% zu erreichen. Selbst bei grösseren Anlagen sind 75% eine Herausforderung. Dabei ist zu beachten, dass es sich hier nicht um die Bestwirkungsgrade handelt, sondern um die Wirkungsgrade im Auslegfall (maximaler Betriebspunkt) der Anlage. Die Einzelanforderungen an die Druckverluste sollten überarbeitet werden.

Auslegedaten

Von Planern und Betreibern wurden Prinzipschemas und Monoblock Datenblätter beschafft. 46 Lüftungs- und Klimaanlagen mit einem Volumenstrom von 2500 bis 46'000 m³/h und dem Baujahr ab 2005 wurden ausgewertet. Die damals gültige SIA Norm 382/1:2007 [1] liegt zu Grunde. Die SFP wurde aus dem Datenblatt aus der Summe der Druckverluste und dem Produkt der Wirkungsgrade bestimmt. Dabei mussten gewisse Annahmen getroffen werden, da beispielsweise Angaben zum Wirkungsgrad der Keilriemen und Frequenzumformer fehlten.

Nur gerade 52% der Zuluft- und 5% der Abluftanlagen haben den SFP-Grenzwert eingehalten. Die Grenzwerte der Abluftseite sind demnach deutlich strenger als auf der Zuluftseite. Bei den durchgefallenen Anlagen wurden nun die Einzelanforderungen (Druckverlust) überprüft. Dort haben 18% der Zuluft- und 44% der Abluftanlagen die Anforderungen der Norm erfüllt.

Feldmessungen

Bei den Feldmessungen haben sieben Zuluft- und nur gerade drei Abluftanlagen der 14 gemessenen Objekte die SFP eingehalten. Das Resultat der Auslegungsdaten wurde demnach erhärtet. Druckverlustmessungen waren nicht bei allen Anlagen möglich. Bei den erfolgreich durchgeföhrten Druckverlustmessungen wurde festgestellt, dass bei sieben von zehn Anlagen der Druckverlust unter dem Planungswert liegt. Eine Anlage wurde mit einem höheren Volumenstrom als in der Auslegung vorgegeben betrieben, was sich negativ auf die SFP auswirkt.

Verbesserungsmassnahmen

- Reduktion Druckverluste

Eine Reduktion der Druckverluste gestaltet sich in bestehenden Anlagen als schwierig. Ein bestehendes Kanalnetz zu optimieren ist nur selten wirtschaftlich und umsetzbar. Bei Anlagen mit variablen Volumenströmen (VAV) ist korrekte Einregulierung wichtig. Im Teillastfall werden Anlagen oft mit einem zu hohen Druck betrieben, welcher von den VAV Reglern wieder zu-nichte gemacht wird.

- Reduktion Luftmenge

Durch eine Reduktion der Luftmenge wird nebst der elektrischen Energie für die Luftpörderung auch der Energieverbrauch für die Konditionierung der Luft reduziert.

- Steigerung Systemwirkungsgrad

Der Systemwirkungsgrad ist das Produkt aus den Wirkungsgraden von Ventilator, Riemenantrieb, Motor und Frequenzumformer. Dabei werden Riemenantriebe in neuen Anlagen und bei einem Ventilatorersatz immer weniger eingesetzt. Frequenzumformer haben einen Standard-wirkungsgrad von über 96%. Elektromotoren müssen in der Schweiz aktuell die Effizienzklasse IE2 aufweisen. Das grosse Potential der Wirkungsgradverbesserung liegt daher bei den Ven-tilatoren selbst.

- Ersatz Gehäuse Ventilator durch EC-Radialventilator

Ein Gehäuse-Ventilator aus dem Jahr 1994 wurde durch einen modernen frei laufenden Radi-alventilator mit einem Direktantrieb und EC-Motor ersetzt. Der Luftvolumenstrom war praktisch gleich (11'000 m³/h). Um den Erfolg messen zu können, wurde die bedarfsgeführte Klimaan-lage mit variablen Volumenströmen jeweils mit dem identischen Sollwertprofil gefahren. Der



Energieverbrauch eines Tages konnte von 20.2 kWh/d auf 18.8 kWh/d gesenkt werden, was einer Ersparnis von 7% entspricht.

- Druckoptimierte Regelung

Bei derselben Anlage wurde die Regelstrategie von der Druckkonstant-Regelung auf eine Druckoptimierte Regelung modifiziert. Im Teillastfall wiesen zuvor alle VAV-Regler eine Öffnung von unter 40% auf. Mit der optimierten Regelung ist zumindest immer ein VAV-Regler zu 90% offen. Dadurch reduziert sich der Förderdruck des Ventilators. Der Energieverbrauch konnte auf 15.5 kWh/d gesenkt werden, was einer Ersparnis von 23% entspricht.

Schätzung Einsparpotential

Wenn die SFP gemäss SIA 382/1 [1] eingehalten worden wäre, liessen sich bei den untersuchten Zuluftanlagen gemäss Auslegung im Schnitt über 10% an elektrischer Leistung einsparen, bei den Abluftanlagen wären es sogar 46%. Gemäss TopMotors [3] beträgt der Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren in der Schweiz etwa 7.5 TWh/a, je zur Hälfte für Zuluft- und Abluftventilatoren. Mit den oben aufgeführten Annahmen würde sich ein theoretisches Einsparpotential von 0.8 TWh/a in der Zuluft und 3.5 TWh/a in der Abluft ergeben.

Ausblick

Die Auswertungen der Anlagedaten und Feldmessungen lassen darauf schliessen, dass ein erhebliches Einsparpotential an elektrischer Energie bestehen würde, wenn die SFP-Anforderungen gemäss SIA 382/1 bei Neuanlagen und Sanierungen konsequent umgesetzt würden. Da die Anforderungen der Norm aber als zu anspruchsvoll eingeschätzt werden, muss das theoretische Potential relativiert werden.

Obwohl die SFP keine umfassende Beurteilungsgrösse für die Energieeffizienz von Lüftungs- und Klimaanlagen darstellt, ist sie doch ein pragmatischer Kontrollwert. Es wird empfohlen, die SFP oder die damit verbundenen Grössen (Druckverlust und Gesamtwirkungsgrad der Ventilatoren) weiterhin im schweizerischen Normenwesen zu verankern. Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob das heutige System von Einzel- und Systemanforderungen nicht zugunsten einer einfacheren Lösung aufgegeben werden soll. Insbesondere gilt es zu überlegen, wie die Planer und Lieferanten besser in die Verantwortung eingebunden werden können. HLK-Planer sind für die externen Druckverluste zuständig und die Lieferanten von Luftaufbereitungsgeräten bestimmen massgebend die internen Druckverluste. Aus Sicht der Autoren würde es Sinn machen, diese in der Praxis übliche Aufgabenteilung mit adäquaten Anforderungen in Normen abzubilden. Mit der Übernahme der EU-Verordnung 1253/2014 in die schweizerische Energieverordnung tragen die Lieferanten auch juristisch die Verantwortung für die energetischen Kennwerte der verkauften Luftaufbereitungsgeräte.

Ein bemerkenswertes Nebenresultat dieser Arbeit ist der exemplarische Vergleich der druckoptimierten Regelung mit einem Ventilatorersatz. Die untersuchte Anlage dürfte typisch für eine grosse Anzahl von bestehenden Lüftungs- und Klimaanlagen in mittleren und grösseren Verwaltungsgebäuden, Schulhäusern, Gewerbegebäuden, Verkaufsläden und Industriebetrieben sein. Das Einsparpotential dürfte mindestens so hoch sein wie bei der Umsetzung der heutigen SFP-Anforderungen. Es wird empfohlen, Nachrüstungen auf druckoptimierte Regelungen zu propagieren und zu fördern. Dabei ist zu beachten, dass für die Realisierung und Optimierung neben HLK-Planern auch die GA-Branche mit einzogen werden muss. Eine kritische Stelle bei der Umsetzung sind die System-Integratoren, die heute wegen fehlender Sensibilisierung und aus Zeitmangel (resp. fehlendes Honorar) dieses Thema zu wenig beachten.

2 Ausgangslage

Dichte Gebäudehüllen, Behaglichkeitsansprüche und Anforderungen an die Energieeffizienz lassen mechanische Lüftungsanlagen immer mehr zum Standard in Wohn- und Dienstleistungsgebäuden werden. Wer im Minergie Standard bauen möchte, kommt kaum um ein mechanisches Lüftungssystem herum. Meist werden solche Anlagen jährlich mit Laufzeiten von über 3000 Stunden betrieben, um Gebäude mit Frischluft zu versorgen oder zu klimatisieren. Es ist daher nicht weiter erstaunlich,

dass in der Schweiz rund 13% der elektrischen Energie für die Luftförderung verbraucht wird. Grenzwerte der Norm SIA 382/1 [1] bezüglich spezifischen Ventilatorleistung (SFP) und der Druckverluste bilden dabei die Grundlage der effizienten Realisation solcher Anlagen. Die neuen Technologien in der Ventilatorherstellung versprechen beste Wirkungsgrade. Rückwärts gekrümmte Hochleistungs-Laufräder, elektronisch kommutierende Motoren oder direkt angetriebene Freiläufer-Ventilatoren verdrängen langsam aber sicher die alte Generation von Ventilatoren aus den Sortimenten der Anbieter.

Ein hochwertiger Ventilator reicht jedoch noch nicht aus, um eine effiziente Anlage zu bauen. Wird das Kanalnetz zu knapp dimensioniert oder der Volumenstrom zu hoch angesetzt, bleibt eine Lüftungsanlage trotz top Komponenten unter ihren energetischen Möglichkeiten.

Die Kontrolle von Minergie-P Anträgen zeigt, dass die Grenzwerte der spezifischen Ventilatorleistung (SFP) häufig bereits während der Planung überschritten werden.

Im Auftrag des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich [4] hatte ein Team der Hochschule Luzern und der Fachhochschule Nordwestschweiz im Jahr 2012 sechs realisierte Lüftungsanlagen der Stadt Zürich hinsichtlich ihrer spezifischen Ventilatorleistung untersucht und beurteilt. Nur bei zwei dieser Anlagen wurde der Grenzwert der Norm SIA 382/1:2007 [1] eingehalten. Bei den übrigen Anlagen wurde der Grenzwert um 20 bis 100% überschritten.

3 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit soll eine Datenbasis schaffen, um ein mögliches Einsparpotential bezüglich der Luftförderung abschätzen zu können. Es soll aufgezeigt werden, wie weit die Grenzwerte der SIA 382/1 [1] eingehalten werden. Durch die Analyse von Auslegungs- und Messdaten wird ermittelt, ob Anlagen effektiv die Planungswerte erreichen.

Anhand der Datenbasis sollen Ursachen für das Verletzen von normativen Anforderungen lokalisiert werden. Daraus sollen Massnahmen abgeleitet werden, um bei Neu- aber auch Retrofitanlagen die Elektroeffizienz zu steigern.

Grenzwerte sind nur sinnvoll, wenn diese mit dem aktuellen Stand der Technik umgesetzt werden können. Um dies zu gewährleisten, werden die aktuellen Grenzwerte für Einzelanforderungen sowie für Systemanforderungen überprüft. Sind die Grenzwerte zu anspruchsvoll oder zu bescheiden, wird ein Anpassungsvorschlag ausgearbeitet.

Die Messung des Volumenstroms ist von zentraler Bedeutung, um die Effizienz einer Lüftungsanlage beurteilen zu können. Neue Ventilatoren sind meist mit Messvorrichtungen wie Einlaufdüsen ausgestattet. Anhand einer Tracer-gasmessung soll dieses Messprinzip validiert werden.

Die definierten Massnahmen und die ermittelten Anlagedaten sollen die Stakeholder sensibilisieren. Die Projekterkenntnisse sollen in die Weiterbildung und die Lehre einfließen sowie die Qualität von Lüftungsanlagen steigern.

Für die Beurteilung des schweizerischen Anlageparks fehlt eine fundierte Datenbasis. Mit der Überprüfung der Auslegungsdaten von 46 Anlagen sowie der Messung von 14 Anlagen soll dieses Fundament geschaffen werden.

3.1 Arbeitspakete

In einem ersten Arbeitsschritt wird vorhandenes Wissen zusammengetragen. Dazu werden gültige Normen untersucht und mit der Vorgängerversion verglichen. Aufgrund dieser Erkenntnisse werden die Grenzen des Projekts definiert. Anhand dieser Grenzen erfolgt die Anlagenakquise. Zuerst werden 46 Anlagen für die Untersuchung der Auslegungsdaten gesucht. Dabei werden die SFP-Werte und die Einzelanforderungen ermittelt und den Grenzwerten aus der SIA 382/1 [1] gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung der Resultate werden 14 Anlagen daraus für die Messreihe ausgewählt. Die Resultate der Auslegungsdaten sowie der Feldmessungen werden miteinander verglichen. Aus den Erkenntnissen werden Massnahmen definiert und ein Konzept zur Optimierung einer realen Anlage erstellt. Nach der Umsetzung der Retrofitmassnahmen wird eine Erfolgskontrolle durchgeführt.

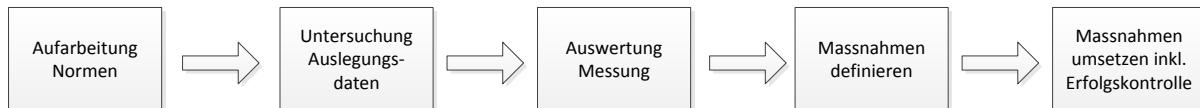


Abbildung 1 Vorgehen

4 Normen

4.1 SIA Norm 382/1

Aufgrund des Baujahrs der untersuchten Anlagen war die Ausgabe 2007 der SIA Norm 382/1 „Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen“ [1] massgebend. 2014 wurde die neueste Version [2] dieser Norm publiziert.

Folgende Kapitel aus der Norm sind für das Projekt besonders relevant:

Tabelle 1 Relevante Kapitel SIA Norm 382/1:2007

Kapitel	Inhalt
1.5.2	Tabelle „Anlagetypen von Lüftungs- und Klimaanlagen nach Funktionen“
1.8.1	Formel / Definition spezifische Ventilatorleistung (SFP)
1.8.2	Klassierung der spezifischen Ventilatorleistung
5.7.4.1	SFP Kategorien der Ventilatoren (nach Anlagetypen)
5.7.4.3	Aussage, falls SFP nicht eingehalten wird, müssen dafür Einzelanforderungen eingehalten werden 5.7.1 Druckverluste 5.7.2 Strömungsgeschwindigkeiten 5.7.3 Gesamtwirkungsgrad der Ventilatoren

**Formel 1 Spezifische Ventilatorleistung SFP**

$$SFP = \frac{\Delta p}{\eta_{sys} \cdot 3600} = \frac{P_{el}}{q_v} \left[\frac{W}{m^3/h} \right]$$

Δp	Gesamtdruckerhöhung des Ventilators	[Pa]
η_{sys}	Systemwirkungsgrad	[\cdot]
P_{el}	Elektrische Wirkleistung	[W]
q_v	Volumenstrom	[m^3/h]

Formel 2 SFP

dabei gelten folgende Rahmenbedingungen:

- Die Gesamtdruckerhöhung entspricht der Differenz der Gesamtdrücke vor und nach dem Ventilator
- maximal vereinbarter Volumenstrom
- geschlossene Bypassklappen
- saubere Filter

Formel 3 Systemwirkungsgrad

$$\eta_{sys} = \eta_v * \eta_{Tr} * \eta_M * \eta_R$$

η_{sys}	Systemwirkungsgrad
η_v	Wirkungsgrad Ventilator
η_{Tr}	Wirkungsgrad Transmission (Riemenantriebe)
η_M	Wirkungsgrad Motor
η_R	Wirkungsgrad Regelung (Frequenzumformer)

4.2 Vergleich SIA 382/1:2007 zu SIA 382/1:2014

Folgende Tabellen zeigen die Klassierung der SFP-Werte Norm SIA 382/1 der Ausgaben 2007 [1] und 2014 [2]. Die Werte in den rechten Spalten sind lediglich eine Umrechnung der Werte der mittleren Spalte in eine andere Einheit. In der Tabelle der Ausgabe 2007 wurde die Einheit der mittleren Spalte falsch angegeben (richtig wäre W pro m^3/s). Dies wurde in der Ausgabe 2014 [2] korrigiert. Ein Detail betrifft die Rundung bei der Grenze zwischen den Kategorien SFP 2 und 3, welche von 0.20 auf 0.21 W/(m^3/h) angehoben wurde. Zudem wurden in der neuen Tabelle die Kategorien erweitert. Bei der Kategorie SFP1+ handelt es sich um eine schweizerische Eigenheit. Die Kategorien SFP 5 bis 7 sind nur aufgeführt, da diese in der EN 13779 [5] definiert sind. In der SIA 382/1 [1] haben sie aber keine Bedeutung.

**Tabelle 2 Klassierung der SFP-Werte 2007**

Kategorie nach EN 13779	P_{SFP} W/(m³/h)	P_{SFP} W/(m³/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	> 0,56

Tabelle 3 Klassierung der SFP-Werte 2014

Kategorie	P_{SFP} W pro m³/s	P_{SFP} W pro m³/h
SFP 1+ *	≤ 300	≤ 0,083
SFP 1	> 300 bis 500	> 0,083 bis 0,14
SFP 2	> 500 bis 750	> 0,14 bis 0,21
SFP 3	> 750 bis 1250	> 0,21 bis 0,35
SFP 4	> 1250 bis 2000	> 0,35 bis 0,56
SFP 5 **	> 2000 bis 3000	> 0,56 bis 0,83
SFP 6 **	> 3000 bis 4500	> 0,83 bis 1,25
SFP 7 **	> 4500	> 1,25

Tabelle 4 zeigt die einzuhaltenden SFP-Kategorien für verschiedene Typen normaler Anlagen. Diese Tabelle hat sich in der neuen Ausgabe nicht verändert.

Tabelle 4 SFP-Kategorien der Ventilatoren für normale Anlagen aus SIA 382/1:2007 und SIA 382/1:2014

Anlagetyp gemäss Ziffer 1.5	SFP-Kategorie gemäss Ziffer 1.8			
	Zuluftventilator Grenzwert	Zuluftventilator Zielwert	Abluftventilator Grenzwert	Abluftventilator Zielwert
Einfache Zuluftanlage Zuluftanlage mit Lufterwärmung, Umluftkühlgerät	SFP 1 SFP 1	SFP 1+ SFP 1+	– –	– –
Einfache Abluftanlage Abluftanlage mit Abwärmenutzung	– –	– –	SFP 1 SFP 1	SFP 1+ SFP 1+
Einfache Lüftungsanlage Lüftungsanlage mit Lufterwärmung Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und -befeuhtung	SFP 1 SFP 2 SFP 2	SFP 1+ SFP 1 SFP 1	SFP 1 SFP 1 SFP 1	SFP 1+ SFP 1+ SFP 1+
Einfache Klimaanlage Klimaanlage mit Luftbefeuhtung Klimaanlage mit Luftbe- und -entfeuchtung	SFP 3 SFP 3 SFP 3	SFP 2 SFP 2 SFP 2	SFP 2 SFP 2 SFP 2	SFP 1 SFP 1 SFP 1

In beiden Ausgaben sind abluftseitig die Grenzwerte eine Kategorie niedriger angesetzt als auf der Zuluftseite. Dies ist damit zu begründen, dass zuluftseitig Heizregister, Kühlregister, Befeuchter, und Tropfenabscheider und höhere Filterstufen eingebaut werden, welche den internen Druckverlust ansteigen lassen.

In der aktuellen Norm wird spezifischer darauf eingegangen, bei welchen Anlagen spezielle Anforderungen geltend gemacht werden können und wie sich diese auf den SFP-Grenzwert auswirken. Bei Anlagen mit speziellen Anforderungen, beispielsweise aufgrund von Hygiene- oder Schallschutzbereichen können demnach die SFP-Grenzwerte um eine Kategorie erhöht werden. Diese Regelung gilt jedoch seit 2014 nur noch für Anlagen mit einer Wärmerückgewinnung bzw. Abwärmenutzung.

Auch bezüglich Einzelanforderungen wurden kleinere Änderungen vorgenommen. So wird neu anstelle der Mindestsystemwirkungsgrade auf die ErP-Richtlinie für Ventilatoren verwiesen. Zudem wurden die Grenzwerte für Druckverluste geringfügig revidiert.

4.3 Diskussion der Grenzwerte nach SIA 382/1

In der Theorie ist die Berechnung der SFP nach Formel 1 klar. In der Praxis ergeben sich aber wegen des üblichen Ventilatoreinbaus in Luftaufbereitungsgeräten Fragen. Sowohl in Spiralgehäusen eingebaute Ventilatoren als auch freilaufende Ventilatoren blasen die Zuluft typischerweise in eine Kammer aus. Die hohe Austrittsgeschwindigkeit lässt sich dabei nicht als statischen Druck zurückgewinnen, sondern wandelt sich als Borda-Carnotscher Stossverlust lediglich in Wärme um. Ein Planer oder Monoblock-Lieferant muss also berücksichtigen, dass der Gesamtförderdruck des Ventilators nicht gleich dem Druckverlust der Anlage ist, sondern dass bei typischen Einbausituationen der dynamische Druck des Ventilators als Verlust dazuzählen ist. Einige Ventilatorlieferanten fangen dies insofern auf, indem sie in ihren Unterlagen nur den statischen Druck und den statischen Wirkungsgrad angeben.

Lüftungsanlagen mit mehrstufigem oder stufenlosem Betrieb werden nur selten unter Auslegungsbedingungen betrieben. Mit sinkendem Volumenstrom nimmt die spezifische Ventilatorleistung aufgrund der quadratisch abnehmenden Druckverluste ab. Dabei verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad in der Regel. Es stellt sich die Frage, ob der SFP-Wert nicht besser bei einem typischen Betriebspunkt zu definieren wäre. Dies wäre Anreiz dazu, den Gesamtwirkungsgrad auf diesen Fall zu optimieren.

Damit nach SIA 382/1 [1] die Grenzwerte des SFP-Wertes erhöht werden dürfen, müssen spezielle Anforderungen an die Lüftungsanlagen nachgewiesen werden. Was als spezielle Anforderung gilt, ist nicht ausführlich definiert und lässt einen erheblichen Spielraum offen. Anlagen mit integrierten Kältemaschinen wie sie z.B. in Hallenbädern eingesetzt werden, haben durch ihren zusätzlichen Wärmeübertrager (Kondensator) einen grösseren Druckverlust als herkömmliche Anlagen mit separater Kälteerzeugung. Wie die Norm für solche Anlagen angewandt werden soll, ist unklar. Allenfalls könnten einzelne Produkte benachteiligt werden.

Bei der Definition des SFP-Werts ist die Dichte der Luft nicht berücksichtigt. Dies kann sowohl bei speziellen Höhenlagen wie auch bei variablen Lufttemperaturen zu Unklarheiten führen.

Bei den Einzelanforderungen der Druckverluste weist die Norm explizit darauf hin, dass die zuluft- und abluftseitigen Druckverluste gegenseitig kompensiert werden dürfen. Bei den SFP-Werten fehlt ein entsprechender Hinweis, obwohl es inhaltlich um das gleiche Thema (effiziente Luftförderung) geht.

Gemäss Norm ist es zulässig, anstelle des SFP-Wertes die Einzelanforderungen an Druckverlust, Strömungsgeschwindigkeit und Systemwirkungsgrad der Ventilatoren einzuhalten. Dabei wird gefordert, dass die Ventilatoren die ErP-Richtlinien der EU erfüllen müssen. Bedenkt man, dass Ventilatoren mit tieferen Wirkungsgraden im europäischen Markt nicht verkauft werden dürfen, ist diese Anforderung fragwürdig. Zudem hat die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal energetisch nur Auswirkungen auf den Druckverlust. Wenn die geforderten Grenzwerte an den Druckverlust eingehalten werden, sind die Einzelanforderungen demnach erfüllt.

Durch Umformen der Formel 1 kann der SFP-Wert mit den Anforderungen an den Druckverlust verglichen werden.

Formel 4 Wirkungsgrad nach SFP Grenzwert

$$\eta_{sys} = \frac{\Delta p}{SFP \bullet 3600}$$

Somit kann anhand des SFP-Grenzwerts der erforderliche Systemwirkungsgrad ermittelt werden, wenn ein Druckverlust entsprechend der Einzelanforderung herrschen würde. Die folgenden beiden Tabellen zeigen in der letzten Spalte den erforderlichen Systemwirkungsgrad. Der Druckverlust Δp entspricht dem oberen Wert der Einzelanforderungen von Tabelle 20 der SIA 382/1:2014 [2]. Der SFP-Wert entspricht dabei dem Grenzwert der gleichen Norm.

**Tabelle 5 ZUL Wirkungsgrade Einzelanforderung**

Anlagetyp (Zuluft)	Δp [Pa]	SFP	η_{sys}
Einfache Zuluftanlage	150	0.14	0.30
ZUL Anlage mit Lufterwärmung	200	0.14	0.40
Einfache Lüftungsanlage	400	0.14	0.79
Lüftung mit Lufterwärmung	600	0.21	0.79
Lüftung mit Erwärmung und Befeuchtung	650	0.21	0.86
Einfache Klimaanlage	700	0.35	0.56
Klima mit Befeuchtung	800	0.35	0.63
Klima mit Befeuchtung und Entfeuchtung	900	0.35	0.71

Tabelle 6 ABL Wirkungsgrade Einzelanforderung

Anlagetyp (Abluft)	Δp [Pa]	SFP	η_{sys}
Abluft mit Abwärmenutzung	300	0.14	0.60
Einfache Lüftungsanlage	300	0.14	0.60
Lüftung mit Lufterwärmung	550	0.14	1.09
Lüftung mit Erwärmung und Befeuchtung	600	0.14	1.19
Einfache Klimaanlage	550	0.21	0.73
Klima mit Befeuchtung	600	0.21	0.79
Klima mit Befeuchtung und Entfeuchtung	600	0.21	0.79

Die Auswertung zeigt, dass abgesehen von reinen Zuluftanlagen erstaunlich hohe Systemwirkungsgrade erforderlich wären, damit beim Einhalten der Einzelanforderung Druckverlust auch gleichzeitig die Systemanforderung SFP erfüllt würde. Bei den rot markierten Werten ist dies gar theoretisch unmöglich.

In Normen und Vorschriften wird teilweise die Wahl zwischen Einzelanforderungen und einer Systemanforderung angeboten. Typischerweise gilt der Grundsatz, dass mit dem Einhalten der Einzelanforderungen auch die Systemanforderung eingehalten ist. In der SIA 382/1 [1] ist es umgekehrt. Wenn die Einzelanforderung des Druckverlusts eingehalten ist, wird der SFP-Grenzwert in den meisten Fällen noch nicht eingehalten. Bei kleineren und mittleren Anlagen ist es selbst mit neuester Antriebstechnik schwierig, einen Gesamtwirkungsgrad von 60% zu erreichen. Auch bei grösseren Anlagen sind 75% eine Herausforderung. Dabei ist zu beachten, dass es sich nicht um die Bestwirkungsgrade handelt, sondern um die Wirkungsgrade im Auslegfall der Anlage.

Es ist davon auszugehen, dass in diesem Zusammenhang der dynamische Druckverlust des Ventilators nicht berücksichtigt wird. Die erwähnten Wirkungsgrade verstehen sich also als sog. statische Wirkungsgrade.

Fazit: Die Einzelanforderungen an die Druckverluste sollten überarbeitet werden. Vorschläge dazu werden im Kapitel 9.2 gegeben.

4.4 Vergleich mit Norm EN 13779

Die SIA 382/1 [1] basiert grösstenteils auf der europäischen Norm EN13779:2007 [5]. Beim Vergleich dieser Regelwerke wird festgestellt, dass das Thema der spezifischen Ventilatorleistung in der SIA 382/1 [1] stark vereinfacht ausgearbeitet wurde. Die EN 13779:2007 [5] unterscheidet drei verschiedene Betrachtungsweisen.

- SFP: für Gesamtmenge an Ventilatoren im Gebäude (Auslegungslastbedingungen)
- SFP_E : für einzelne Luftbehandlungseinheiten oder Ventilatoren (Auslegungslastbedingungen)
- SFP_V : zur einfachen Validierung der Anlage (Validierungslastbedingung für einzelne Ventilatoren)

Die Validierungslastbedingungen und die Auslegungslastbedingungen unterscheiden sich nur bei der Berücksichtigung der Filter-Druckverluste. Bei der Validierungslastbedingung wird mit einem neuen Filter gerechnet, bei der Auslegungslastbedingung mit dem Mittelwert aus Druckverlust bei verschmutztem Filter und dem Druckverlust bei neuem Filter.

Der SFP_V Wert entspricht somit der spezifischen Ventilatorleistung aus der SIA 382/1 [1]. Der SFP_E – Wert gilt für einzelne Luftbehandlungseinheiten zur Wärmerückgewinnung mit Be- und Entfeuchtung oder getrennten Zuluft- bzw. Abluftbehandlungseinheiten und einzelner Lüfter. Der SFP Wert berechnet sich aus der Summe aller Wirkleistungen über der Summe aller Volumenströme.

Zur Berechnung des SFP_E -Wertes bei Anlagen mit variablem Luftvolumenstrom muss mit einem partiellem Luftvolumenstrom (Standardwert: 65% des max. Nennvolumenstroms) und dem entsprechenden Druckverlust gerechnet werden. Zudem wird bei Luftbehandlungseinheiten zur Wärmerückgewinnung mit Be- und Entfeuchtung die elektrische Leistungsaufnahme aller Ventilatoren durch den jeweils grösseren Volumenstrom von Zu- und Abluft dividiert.

Im Gegensatz zur SIA 382/1 [1] sind in der europäischen Norm Anlagen mit speziellen Anforderungen besser geregelt. So wird für verschiedene zusätzliche Bauteile eine spezifische Leistung ausgewiesen, welche zum ursprünglichen SFP-Grenzwert in $W/(m^3/s)$ addiert werden darf.

Obwohl drei verschiedene SFP-Werte ausgewiesen werden können, werden in der EN 13779 keine Grenzwerte vorgegeben. Nur zu den SFP_V -Werten sind Beispiele aufgeführt, wie die Grenzwerte aussehen könnten.

5 Auslegedaten

5.1 Auswahl der Anlagen

Das Projekt soll die momentane Situation von mittleren und grösseren Lüftungsanlagen in der Schweiz widerspiegeln. Das Projekt bezieht sich weiter auf Nicht-Wohngebäude. Prozesslüftungen (z.B. Absauganlagen) werden nicht berücksichtigt. Für die Evaluation der Anlagen wurden folgende Kriterien festgelegt:

Tabelle 7 Kriterien

Alter der Anlage	ab 2005
Volumenstrom	ab 2500 m^3/h
Anlagetyp (nach SIA 382/1 [1])	ab „einfach Lüftungsanlage“ (min. ZUL- und ABL Ventilator, WRG und Filter)



Folgende Dokumente wurden zur Untersuchung der Auslegedaten eingefordert:

- Zeichnungen Monoblock
- Datenblatt Monoblock
- Funktionsbeschreibung
- Prinzipschema Anlage

Zur Überprüfung der Auslegungsdaten wurden Unterlagen von 46 Anlagen zusammengetragen. Die spezifische Ventilatorleistung wird anhand des Systemwirkungsgrades und der Druckverluste ermittelt. Damit möglichst realitätsnahe Werte verwendet werden, wird bei unsicheren Datensätzen die Bestätigung der Hersteller eingeholt. Es werden keine ausgewiesenen SFP-Werte der Monoblock Hersteller verwendet, ohne dass diese auf ihre Richtigkeit überprüft wurden. Wenn keine Angaben zu Wirkungsgraden vorliegen, wird mit folgenden Standardwerten gerechnet.

Tabelle 8 Wirkungsgrade Antrieb

Direktantrieb	1
Flachriemen	0.97
Keilriemen	0.94
Motorenwirkungsgrad	Wirkungsgrad bei Nennleistung
Wirkungsgrad FU	0.97

Gemäss Topmotors [3] nehmen Motorwirkungsgrade erst bei tiefer Teillast signifikant ab. Für die rechnerische Ermittlung der SFP wird davon ausgegangen, dass der Wirkungsgrad bei maximalem Volumenstrom gleich dem Wirkungsgrad bei Nennleistung ist.

Bei den untersuchten Anlagen handelt es sich hauptsächlich um Anlagen aus Schulgebäuden, Turnhallen, Büroräumen oder Einkaufszentren. Industrieanlagen wurden keine geprüft. Bei der Anlagenakquise wurde darauf geachtet, dass verschiedene Monoblockhersteller, Planer, und Bauherren vertreten waren. So wurden pro Gebäude maximal drei Anlagen in der Auswertung berücksichtigt. Weiter wurde auf den Mix der Bauteile, der Anlagetypen und den Leistungsdaten geachtet, um eine hohe Diversität gewährleisten zu können. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen Überblick über die 46 untersuchten Anlagen.

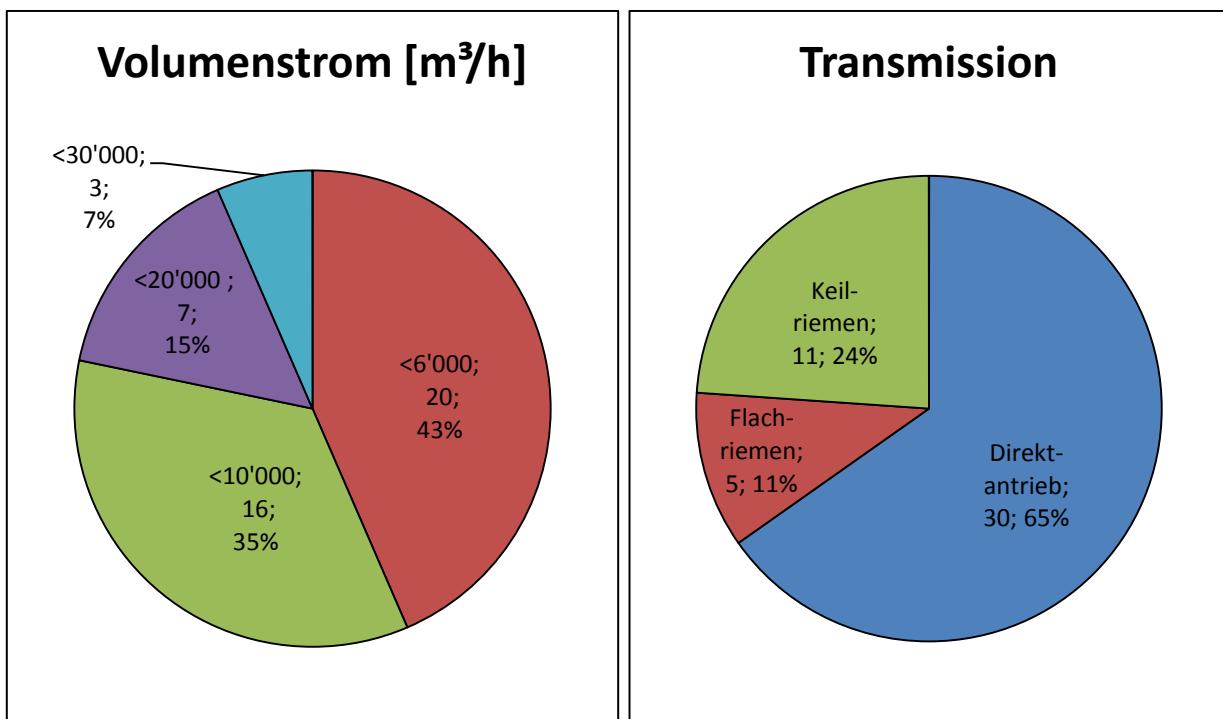


Abbildung 2 Vielfalt Volumenströme

Abbildung 3 Vielfalt Transmission

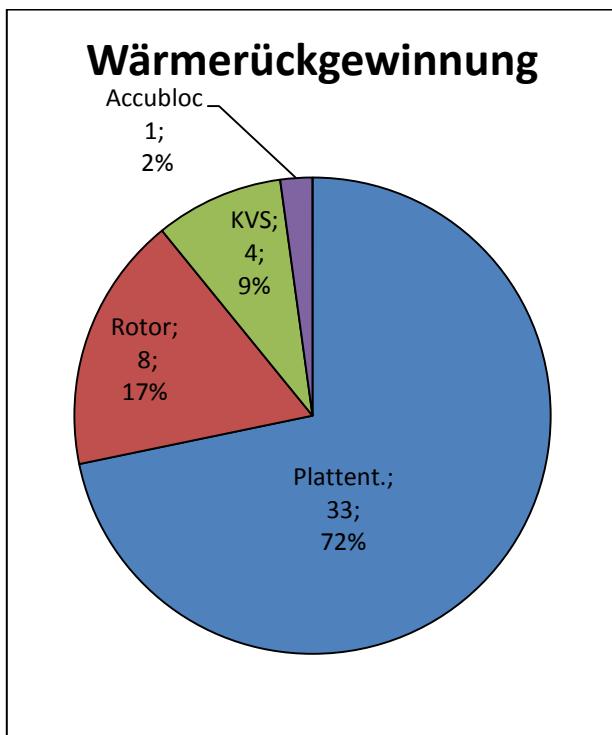


Abbildung 4 Vielfalt Wärmerückgewinnung



5.2 Ergebnis Auslegungsdaten

Für das Projekt konnten Anlagen von sechs verschiedenen Monoblock Herstellern gewonnen werden. Die Bestimmung der SFP-Werte anhand der Datenblätter war mit einigen Tücken versehen. So wird bei manchen Herstellern direkt der SFP-Wert ausgewiesen. Mit den Angaben der Druckverluste und Wirkungsgrade wurde teilweise eine abweichende SFP berechnet. Häufig ist von einer Leistung oder einem Wirkungsgrad die Rede, ohne dass eruiert werden kann, unter welchen Betriebsbedingungen (sauberer/verschmutzter Filter) dieser zustande kommt oder wo die Bilanzgrenze gezogen wurde. Ohne die Rückfrage bei den Herstellern war eine genaue Erfassung des SFP-Wertes teilweise unmöglich.

	Offerte	Objekt Stiftung Brändi, Horw	Datum 20.01.11	Bleit 3
	Antrag Rest.		Aufstellung 500 m.ü.M.	955 mbar
	Kunde BAP Group AG, Luzern		Sachb. Blt	
	Sachb. Hr. M.Haltner	Tel. 041 226 10 20	Tel. 041/2498585	
P111.78478_2				
LeiFertermi	Anzahl 1	Typ SKG 13	Qualitätsstufe 1 SPEZ	Höhn 2360 mm Breite 1880 mm Länge gem. Skizze 1130 kg Geblieposition Zuluft 2-1
Luftvolumenstrom 7020	m3/h 38 60 64 64 63 59 54 47	Schallleistungspegel saugseitig 63 - 8000 Hz total 70 dBA	Schallleistungspegel drucksseitig 63 - 8000 Hz total 43 66 74 77 78 75 72 68 83 dBA	Druckverlust Intam 229 total Δp Staubfilter 2
1 Leerteil				Δp Filteranz 92
1 Staubfilterteil	Luftvolumenstrom 7020	m3/h Filterklasse F7	Druckverlust Anfang 48 Pa Ende 180 Pa	Druckverlust 78
1 Satz Filter	Filterart FFA	Anz./Typ Filterzellen 2 / FW85-610-H	Anz./Typ Filterzellen 2 / FW85-305-H-Q	Filterfläche 35.2 m2
1 Rotationswärmetauscherteil	Mat. Roter/Gehäuse Alu/STVz	Luftvolumenstrom ZUL 7020 m3/h Lufteintritt -11.0 °C 90 % r.F. Luftaustritt 16.5 °C 41 % r.F. 83.2/76.3 %	Wirkungsgrad Temp./Fauch. 78	
1 Wärmetauscher	Typ PUMK-165-d2	Luftvolumenstrom ABL 7020 m3/h Luftmindest ABL Luftaustritt PDL Rückgewinn total 22.0 °C 35 % r.F. -5.4 °C 99 % r.F. 81.1 kW		
Rotor: hygroskopisch Eisbildungsgrenze: ca. °C Regler EMS inkl. Lauf-Überwachung				
1 Leerteil				
1 Lufterhitzerteil	Luftvolumenstrom 7020	m3/h Lufteintritt 12.0 °C % r.F. Luftaustritt 20.0 °C % r.F. Leistung Anz. RR 17.8 kW 1 Lm. Abst. 4.0 mm Nenndruck 6 bar		8
1 Lufterhitzerbatterie	Heizmedium PWW	Temperatur 50.0/40.0 °C Volumenstrom 1530 l/h Druckverlust Mat. Cu/Al Inhalt 9 l Anschlöße 1 1/4"		
Typ: LEW P440				
1 Frostschutzgitterteil	mit Frostschutzgitter ausziehbar			
1 Leerteil		Δp ext	Δp int	
1 Ventilatorteil VEF	Luftvolumenstrom 7020	m3/h Druckverlust ext. 350 int. 229 Schallleistungspegel über Oktaband 63 - 8000 Hz total 83 dBA		49
1 Ventilator	Typ GPEB-1-00-050-10	Totaldruckentzug 579 Pa Leistungsbedarf 1.4 kW Wirkungsgrad 72 % Motor 1531 min⁻¹		
1 Motor 3x400 V 50 Hz	Typ 100-4 Integral EFF1	Nennstrom 4.7 A Nennleistung 2.2 kW Nennwirkungsgrad 87 % Drehzahl 1420 min⁻¹		
Riemenantrieb	Typ Direktantrieb	o Welle Ventilator/Motor mm Riemenscheibe Scheibe Motor Δp Ventilat. 72 %		
fBP = 54 Hz, fmax = 61 Hz, k-Faktor = 14.88, Wirkdruck = 796 Pa Integralmotor mit aufgebautem FU und Steckerkit montiert, ohne Inbetriebnahme Spezifische Ventilatorteileistung P_SFP = 0.216 W/(m³/h) inklusive Frequenzumrichter, entspricht Klasse SFP 3 gemäß SIA 382/1				

Abbildung 5 Beispiel Datenblatt Firma ZAir

$$\begin{aligned}
SFP &= \frac{\Delta p_{Filter\ neu}}{\eta_{System}} = \frac{\Delta p_{ext} + \Delta p_{int} + \Delta p_{Filter\ Anfang} - \Delta p_{Staubfilter}}{\eta_{Venti} * \eta_{Antrieb} * \eta_{Motor} * \eta_{FU} * 3600} \\
&= \frac{350 + 229 + 48 - 92}{0.82 * 1 * 0.87 * 0.966 * 3600} \\
&= 0.216
\end{aligned}$$

Formel 5 Bsp. Auswertung

Für den Frequenzumformer (FU) wurde ein Wirkungsgrad von 0.97 angenommen. Der Wirkungsgrad für den Antrieb ist infolge des Direktantriebs 1.0.

Von den 46 untersuchten Anlagen haben 24 Ventilatoren auf der Zuluftseite die Grenzwerte der spezifischen Ventilatorleistung eingehalten. Dies entspricht etwas mehr als die der Hälfte aller Anlagen. Auf der Abluftseite haben nur 5 der 46 Anlagen die geforderten Grenzwerte eingehalten. Würden die Abluftanlagen mit derselben Kategorie wie die Zuluft bewertet, hätten 27 bzw. 59% der Abluftanlagen die Grenzwerte ebenfalls eingehalten.

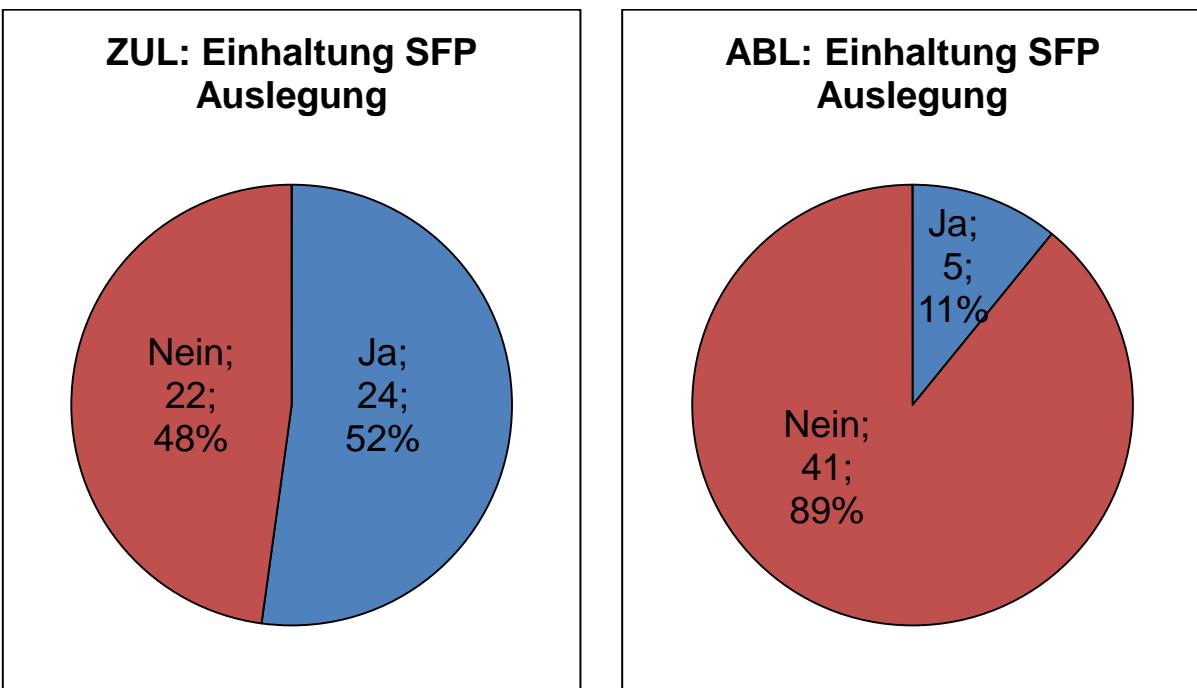
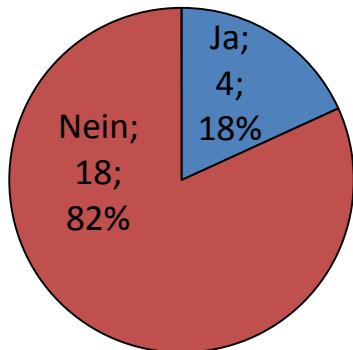


Abbildung 6 ZUL Einhaltung SFP Auslegung

Abbildung 7 ABL Einhaltung SFP Auslegung

Bei denjenigen Anlagen, welche die SFP nicht eingehalten haben (22 ZUL- und 41 ABL Anlagen), müssen die Einzelanforderungen untersucht werden. Dabei zeigt sich, dass auf der Abluftseite die Einzelanforderung an den Druckverlust häufiger eingehalten wird als auf der Zuluftseite. Dies deutet darauf hin, dass bei Zuluftanlagen, welche die Systemanforderungen SFP nicht einhalten, zu hohe Druckverluste verantwortlich sind. Abluftseitig könnte das nicht Einhalten dieser Einzelanforderung mit zu strengen Grenzwerten zusammenhängen (vgl. dazu Tabelle 5).

**ZUL: GW Druckverlust
erreicht trotz SFP
zu hoch**



**ABL: GW Druckverlust
erreicht trotz SFP
zu hoch**

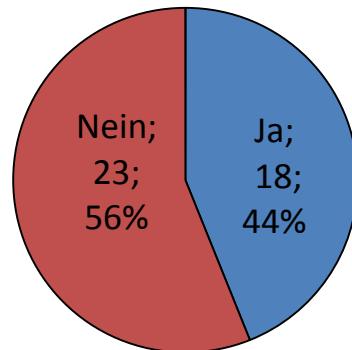
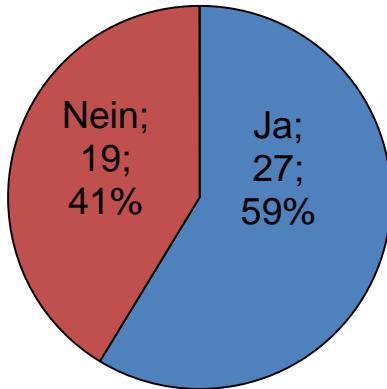


Abbildung 8 ZUL Anlagen Druckverlust erf\u00fcllt

Abbildung 9 ABL Anlagen Druckverlust erf\u00fcllt

In Abbildung 10 und Abbildung 11 ist dargestellt, wie viele Anlagen entweder die System- oder die Einzelanforderungen erfüllt haben.

**ZUL: Einhaltung SFP oder
Einzelanforderungen
Auslegung**



**ABL: Einhaltung SFP oder
Einzelanforderungen
Auslegung**

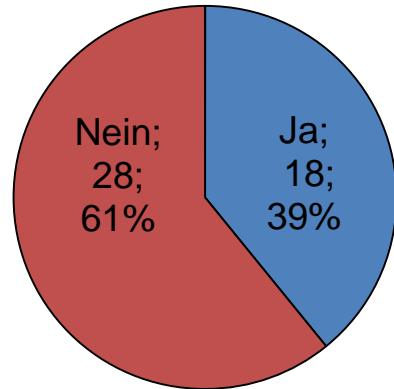


Abbildung 10 ZUL Einhaltung Norm Auslegung

Abbildung 11 ABL Einhaltung Norm Auslegung

6 Feldmessung

6.1 Messgrößen

Bei 14 Anlagen wurden Feldmessungen mit folgenden Messgrößen durchgeführt:

- Vom Ventilator geförderter Luftvolumenstrom
- Gesamtdruckerhöhung
- Elektrische Leistungsaufnahme ab Netz
- Ventilatordrehzahl
- Luftzustand beim Ventilatoreintritt

6.2 Aufbau

Zur Auswertung der Messdaten wird der SFP-Wert mit dem Gesamtvolumenstrom und der Eingangsleistung des Frequenzumformers berechnet. Zur Messung der Volumenströme wurden die Messeinrichtungen an der Einströmdüse der Ventilatoren verwendet. Aus dem Differenzdruck des statischen Drucks vor der Einströmdüse und dem statischen Druck an der stärksten Einschnürung der Einströmdüse kann der Volumenstrom berechnet werden. Die Düseneigenschaften werden mit einem Faktor (k -Faktor) berücksichtigt. Ein Vergleich zu anderen Methoden der Volumenstrombestimmung ist im Kapitel 7.2.4 zu finden.

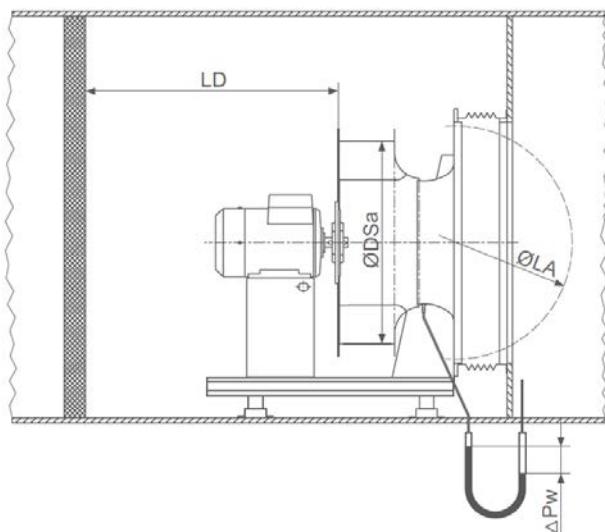


Abbildung 12 Volumenstrommessung (Ziehl Abegg [8])

Die Aufnahmefähigkeit des Frequenzumformers wurde wie in Abbildung 13 und 14 mit Zangenstromwandlern und einem Leistungsmessgerät gemessen.

**Abbildung 13: Zangenstromwandler****Abbildung 14: Leistungsmessgerät**

Die Messung (Druck und Leistung) wurde im Beharrungszustand über 5 bis 10 Minuten aufgezeichnet. Weiter wurden Einzelmessungen der Lufttemperaturen, der Druckverluste, der Ventilatordrehzahlen und der Umgebungsbedingungen durchgeführt.

Die Messung wurde bei einem zufälligen Betriebspunkt und beim maximalen Volumenstrom durchgeführt. Der maximale Volumenstrom entspricht dem Auslegungszustand der Anlage bzw. dem grössten Volumenstrom, welcher die Anlage im geregelten Betrieb fördert. Für die Messung wurden die Sollwerte der Volumenstromregler auf 100% gesetzt, sodass eine maximale Anforderung (100% Gleichzeitigkeit) der einzelnen Stränge simuliert wurde. Die Anlage wurde durch das Fachpersonal des Anlagebetreibers auf die gewünschten Messzustände eingestellt, welche durch die Hochschule Luzern HSLU nicht kontrolliert oder beeinflusst werden konnten. Ein Druckabgleich bei Anlagen mit variablen Volumenstromreglern wurde nicht durchgeführt.

6.3 Ergebnis Feldmessung

Die Messdaten bestätigen die Resultate der Auslegungsdaten. Von 14 Anlagen haben 7 Zuluft- und 3 Abluftventilatoren die SFP Grenzwerte eingehalten.

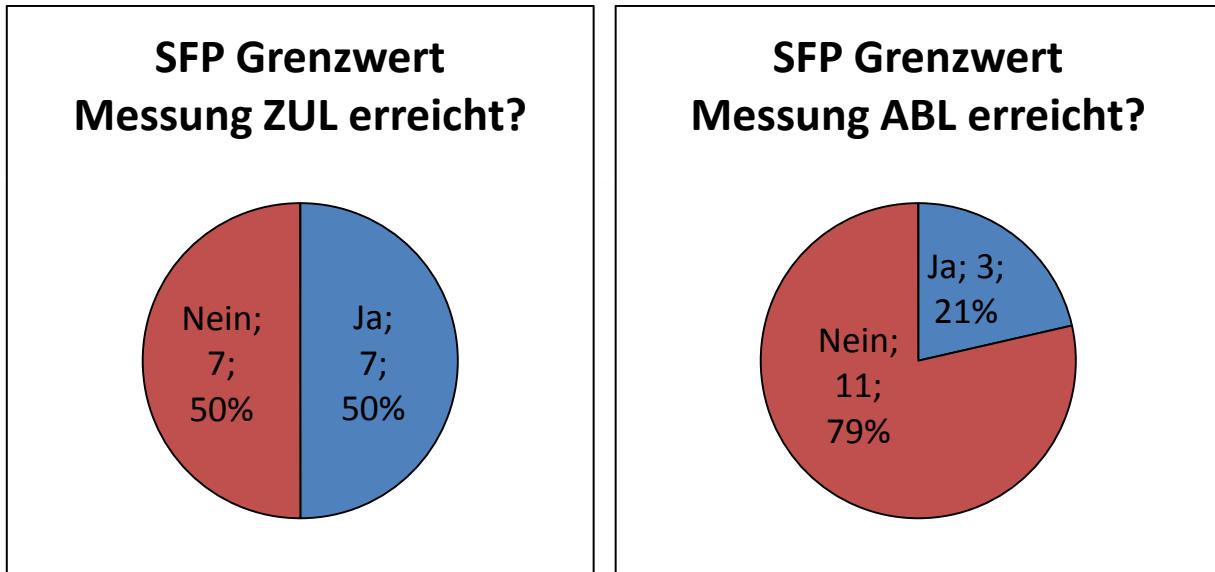


Abbildung 15 ZUL Anlagen SFP erreicht

Abbildung 16 ABL Anlagen SFP erreicht

Der Vergleich mit den Einzelanforderungen kann nur beschränkt gemacht werden, da bei 4 von 14 Anlagen der Druckverlust nicht gemessen werden konnte. Diese Anlagen befanden sich aussen auf dem Dach. Druckstutzen fehlten und der Monoblock durfte nicht durchbohrt werden. Zudem war der Zugang zum Kanalsystem nicht gegeben. Drei der gemessenen zehn Anlagen weisen einen zu hohen gemessenen Druckverlust auf. Bei den restlichen sieben Anlagen war der gemessene totale Druckverlust tiefer als der Auslegungswert.

Anteilmässig stimmen auch diese Messungen mit den Auslegungsdaten überein. Abluftseitig werden bei Nichteinhalten der Systemanforderung bei mehr Anlagen die Einzelanforderungen erfüllt als zuluflseitig.

Weiter wurde festgestellt, dass die Druckverluste nur bei drei von zehn Anlagen höher ausgefallen sind, als bei der Auslegung veranschlagt wurde. Anlage 51 wurde zuluftseitig mit einem um rund 8% grösseren Volumenstrom betrieben, was folglich den Druckverlust erhöht. Bei den Anlagen 48 und 49 konnte nicht ermittelt werden, weshalb die Messewerte des Zuluftvolumenstroms über den Auslegungswerten liegen.

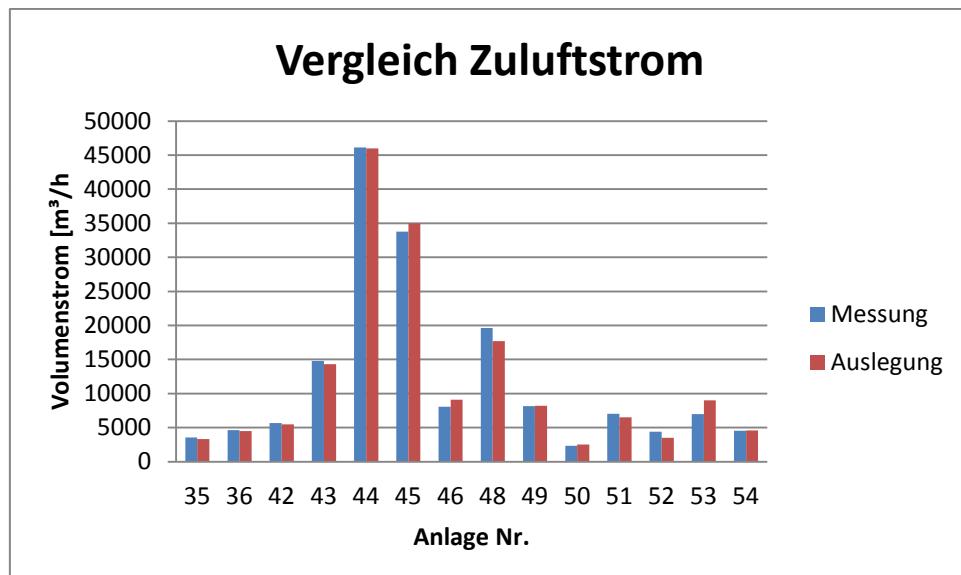


Abbildung 17 Zuluftstrom Messung vs. Auslegung

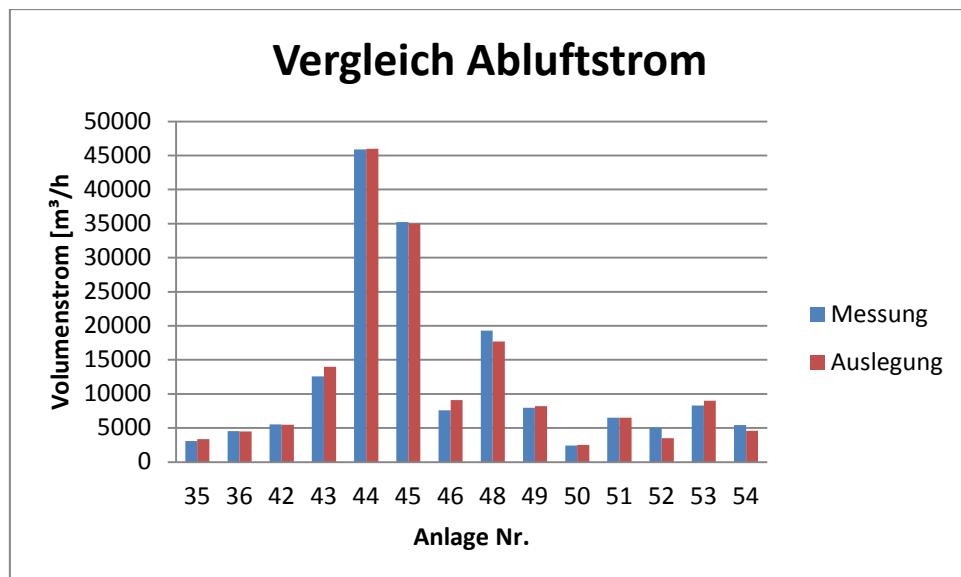


Abbildung 18 Abluftstrom Messung vs. Auslegung

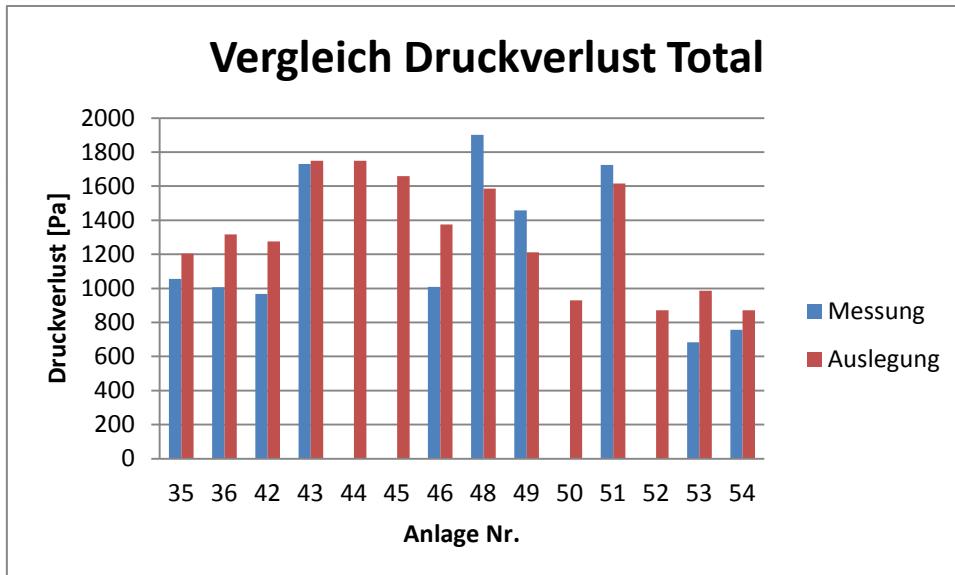


Abbildung 19 Druckverlust Messung vs. Auslegung

Bei den Anlagen 44, 45, 50 und 52 konnten der Druckverlust nicht gemessen werden.

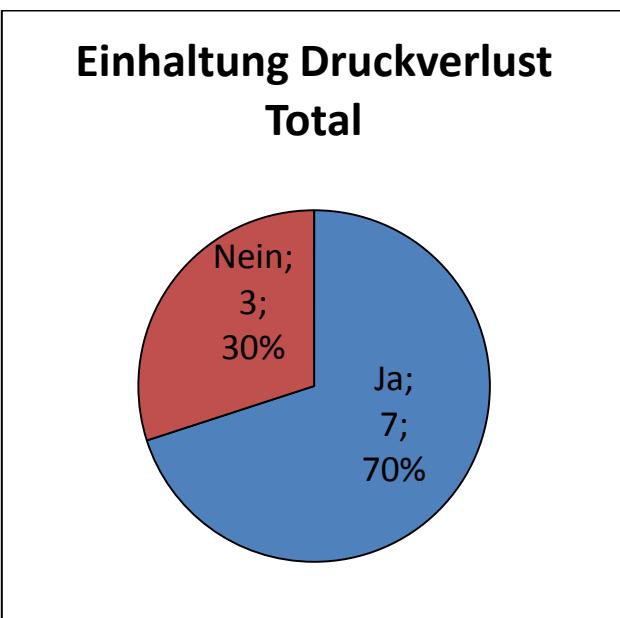


Abbildung 20 Einhaltung Druckverlust Total

7 Verbesserungsmassnahmen

7.1 Einflussgrößen

Stellt man die Formel 1 nach der elektrischen Leistung um, erhält man folgenden Zusammenhang:

Formel 6 Elektrische Leistung

$$P_{el} = \frac{\Delta p * q_v}{\eta_{sys} \cdot 3600} = [W]$$



Um die elektrische Leistungsaufnahme zu reduzieren, bestehen demnach folgende Möglichkeiten:

Reduktion Druckverluste

Die Reduktion der Druckverluste gestaltet sich in bestehenden Anlagen schwierig. Ein bestehendes Kanalnetz zu optimieren ist nur selten wirtschaftlich und umsetzbar. Bei Anlagen mit variablem Volumenstrom ist der Abgleich der Anlage wichtig. Zumindest das Regelorgan des ungünstigsten Strangs sollte gänzlich geöffnet sein, um den gewünschten Volumenstrom zu erreichen. Bei konstantdruckge-regelten Anlagen sollte demnach kontrolliert werden, ob der Sollwert des Druckes den minimalen Anforderungen der Anlage entspricht. Wird dieser Druck zu hoch angesetzt, wird unnötig Druck erzeugt, welcher mit den Volumenstromreglern wieder vernichtet wird.

Reduktion Luftmenge

Durch die Reduktion der Luftmenge bewirkt man nebst der elektrischen Energieeinsparung auch eine Einsparung auf der thermischen Seite, da die Energie für die Konditionierung der Luft ebenfalls abnimmt. Die Reduktion der Volumenströme ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da dies eine weitreichende Analyse der gesamten Gebäude erfordern würde.

Steigerung Systemwirkungsgrad

Um das Potential des Systemwirkungsgrades abzuschätzen, lohnt es sich, diesen etwas detaillierter zu betrachten.

η_v	Wirkungsgrad Ventilator	[-]
η_{Tr}	Wirkungsgrad Transmission (Riemenantriebe)	[-]
η_M	Wirkungsgrad Motor	[-]
η_R	Wirkungsgrad Frequenzumformer (FU)	[-]

Für den Wirkungsgrad von Frequenzumformern wird in der Praxis häufig ein Standardwert von 96 - 97% gewählt. Obwohl der Wirkungsgrad des FU im kleinen Teillastbetrieb markant abnehmen kann, besteht bei üblicher FU-Auslegung kein grosses Optimierungspotential.

Von den 46 untersuchten Anlagen sind 30 Anlagen mit direkt angetriebenen Ventilatoren ausgerüstet. Das Einsparpotential ist somit auch bei der Transmission niedrig.

Die Anforderungen an die Elektromotoren in der Schweiz sind in den letzten Jahren gestiegen. So muss ein Elektromotor aktuell eine Effizienzklasse von IE2 aufweisen. Zudem erobern hoch effiziente elektronisch kommutierende Ventilatoren den Markt oder gehören bei gewissen Anwendungen schon zum Stand der Technik. Auch die Monoblockhersteller kommen meist ihrer Verantwortung nach und legen Ventilatoren effizient aus.

7.2 Ergebnis Verbesserungsmassnahmen

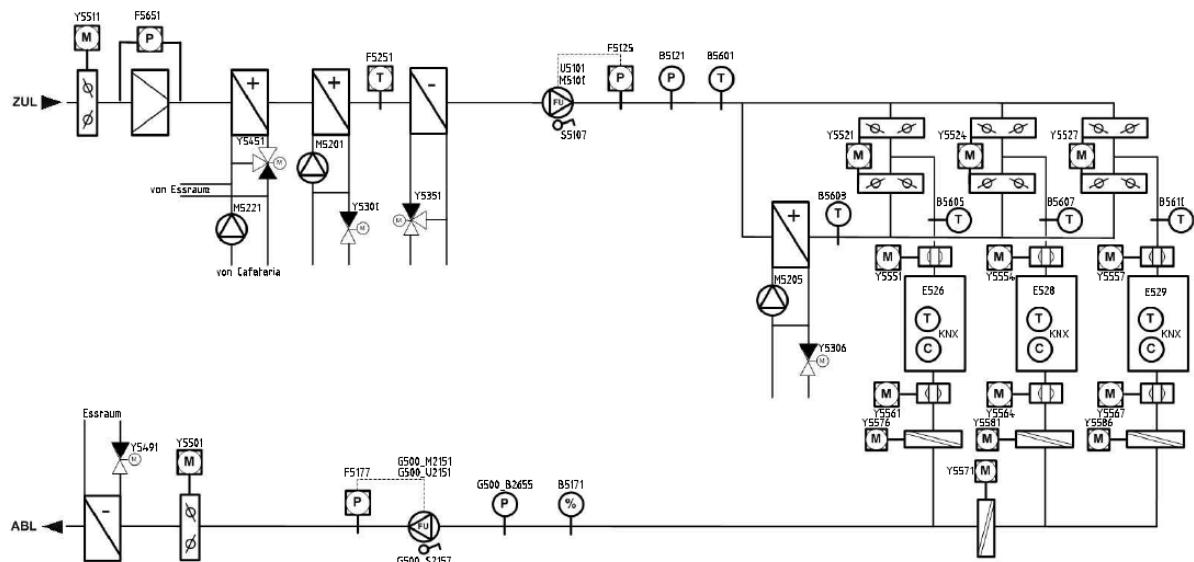
Für die Umsetzung der Verbesserungsmassnahmen wurde eine Hörsaal-Lüftung an der Hochschule Luzern in Horw ausgewählt. Die Kriterien der Anlage liegen zwar nicht durchwegs im angestrebten Bereich, aber trotz intensiver Suche konnte keine Anlage gefunden werden, die alle Voraussetzungen erfüllt hätte. Dafür bestand bei dieser Anlage ein guter Zugang zum Betreiber. Weiter konnten dank einer Umrüstung in der unterrichtsfreien Zeit Untersuchungen durchgeführt werden, die z.B. in einem Bürogebäude kaum möglich gewesen wären.

Tabelle 9 Allgemeine Angaben Anlage HSLU

Alter der Anlage	1994 Revision 2013 (neue Steuerung, neuer Antriebsmotor)
Volumenstrom	Total 11050 m ³ /h
Anlagetyp (nach SIA382/1 [1])	„einfache Klimaanlage“ drei Hörsäle, ausgerüstet mit Zuluft- und Abluftförderung, WRG, Filter, Heiz- und Kühlregister

Tabelle 10 Messwerte SFP Anlage HSLU (Konstantdruck)

	ZUL Ventilator	ABL Ventilator
Volumenstrom	10846 m ³ /h	10527 m ³ /h
Leistung	4580 W	3060 W
SFP	0.42	0.29
SPF Grenzwert	0.35	0.20
SFP eingehalten	nein	nein


Abbildung 21 Prinzipschema Anlage HSLU



Steuerbeschrieb

Die VAV (variable air volume) der eingeschalteten Zonen werden anhand der Luftqualität geregelt. Die minimale Luftmenge beträgt 40%. Steigt der CO₂ Gehalt in der Zone, öffnen die VAV-Regler und lassen mehr Luft in die Zone. Folglich sinkt der Druck im Kanalnetz. Eine Druckkonstantregelung korrigiert die entstandene Sollwertdifferenz (Druckkonstantregelung). Die Drehzahl der Ventilatoren wird mittels Frequenzumformer stufenlos gesteuert. (Drucksollwert ZUL 270 Pa, Drucksollwert ABL 220 Pa)

Vergleichbarkeit

Um die Verbesserungsmassnahmen miteinander vergleichen zu können, wurde ein Tages- Sollwertprofil (Kapitel 12.3) für jede Zone erstellt. Damit werden bestimmte Luftmengen zu bestimmten Tageszeiten angefordert. Die CO₂ Regulierung wurde dazu inaktiv geschaltet.

7.2.1 Ist-Situation: Konstantdruck-Regelung

Die VAV Klappenantriebe erhalten einen Sollwert für den Volumenstrom. Für die Drehzahlregelung ist ein Druckregler verantwortlich, welcher zu den einzelnen Klappen keine direkte Verbindung hat. Dieser hält den Druck auf einen konstanten Wert.

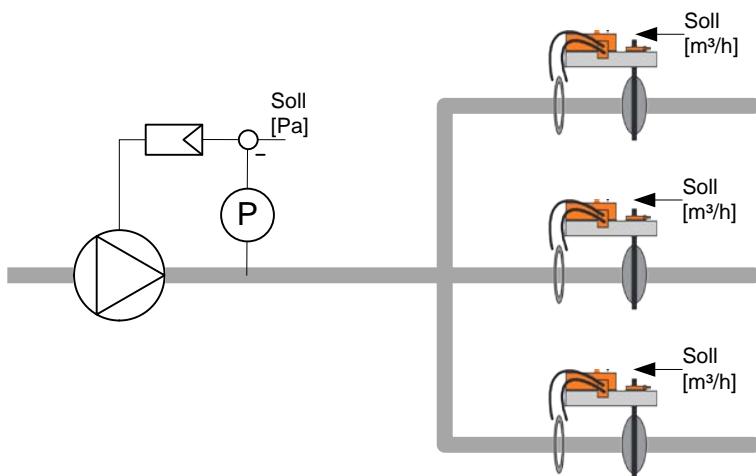


Abbildung 22 Prinzip Konstantdruck Regelung

In der Abbildung 23 liegt anfänglich liegt ein Teillastfall vor. Für einen Volumenstrom von 4419 m³/h wird ein Druck von 270 Pa erzeugt und dafür 1.059 kW benötigt. Der Förderdruck (ca. 1 m von Ventilator entfernt) wird konstant geregelt. Die Klappenantriebe sind zwischen 36% und 40% geschlossen und erzeugen so einen unnötigen Druckverlust. Nach einer Sollwerterhöhung des Volumenstroms öffnen die Klappen, der Druck fällt zusammen. Die Regelung erhöht den Druck stetig wieder bis zum Sollwert, in dem sie den Ventilator mit einer höheren Frequenz betreibt. Ein Anstieg der aufgenommenen elektrischen Leistung ist die Folge.

Umgekehrt werden nach einer Reduktion des Volumenstromwertes die Antriebsstellungen reduziert. Der Druck steigt kurzfristig, bis die Regelung durch herunterfahren des Ventilators den eingestellten Drucksollwert wieder erreicht hat.

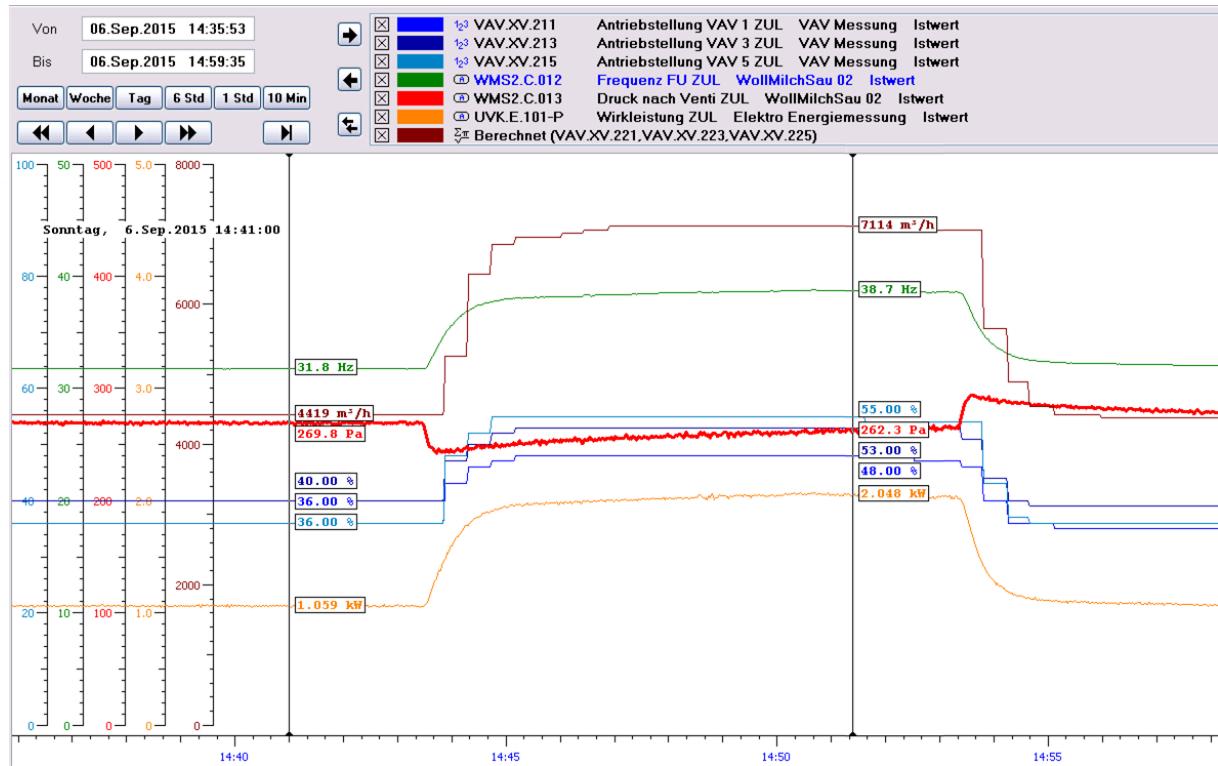


Abbildung 23 Konstantdruck-Regelung

7.2.2 Druckoptimierte Regelung

Hier ist dieselbe Periode mit einer anderen Regelstrategie aufgezeichnet. Es wird nicht mehr auf einen konstanten Drucksollwert geregelt, sondern auf die maximale Klappenstellung (Antriebsstellung) der VAV. Das bedeutet, mindestens ein Klappenantrieb soll voll geöffnet (90%) sein. Daraus resultiert, dass für den Volumenstrom von $4419 \text{ m}^3/\text{h}$ nun noch 56 Pa bzw. 0.522 kW nötig sind.

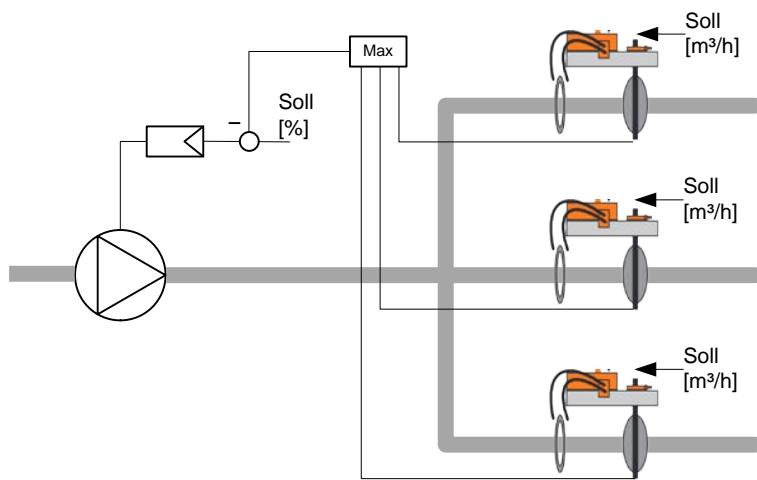


Abbildung 24 Prinzip druckoptimierte Regelung



Nach einer Sollwerterhöhung des Volumenstroms öffnen die Klappen. Die Regelung betreibt den Ventilator mit einer höheren Frequenz, bis wieder eine Klappe zu 90% geöffnet ist. (Hier erkennt man, dass nicht auf 100% geregelt werden kann, sonst könnte der Fall eintreten, dass die Klappe zwar zu 100% offen ist, jedoch der Volumenstrom noch nicht erreicht wurde.) Für den Volumenstrom von 7000 m³/h sind mit dieser Methode nur noch 129 Pa bzw. 1.704 kW notwendig.

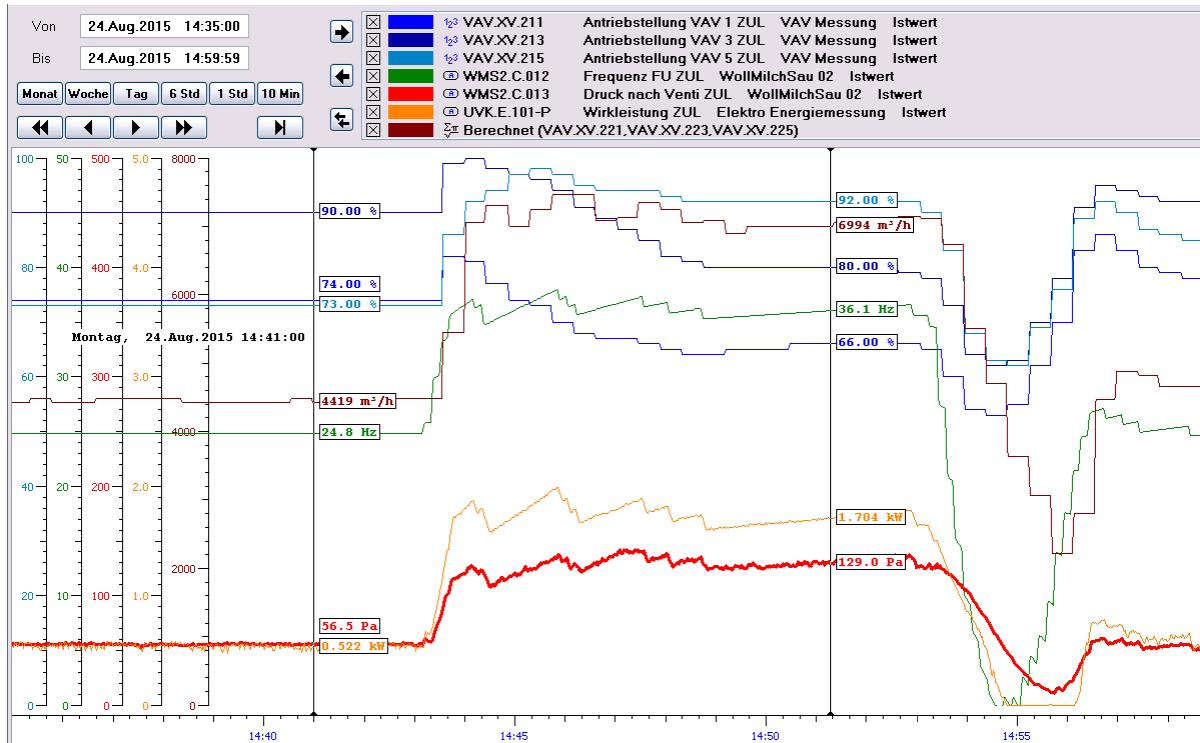


Abbildung 25 Druckoptimierte Regelung

Der SFP konnte mit dem Wechsel der Regelstrategie nicht beeinflusst werden, denn der SFP bezieht sich auf den Nennwert und berücksichtigt keinen Teillastfall.

Tabelle 11 SFP der Anlage (Strategie Druckoptimiert)

	ZUL Ventilator	ABL Ventilator
Volumenstrom	10728 m ³ /h	10592 m ³ /h
Leistung	4510 W	3260 W
SFP (Druckoptimiert)	0.42	0.31
SFP (Druckkonstant)	0.42	0.29
SPF Grenzwert	0.35	0.20
SFP eingehalten	nein	nein

Der Energiebedarf über das ganze Tagesprofil konnte hingegen rein durch diese Methode mit einer Reduktion von 23% massiv gesenkt werden.

Tabelle 12 Energieersparnis Druckkonstant vs. Druckoptimiert

Strategie	Energie (pro Norm-Tag)
Strategie Druck konstant	20.2 kWh/d
Strategie Druck optimiert	15.5 kWh/d
Energieersparnis absolut	4.7 kWh/d
Energieersparnis prozentual	23 %

Der Aufwand für die Umprogrammierung war bescheiden. Anstelle des Drucksoll- und Istwertes wurde die Maximalauswahl der Stellungsrückmeldungen der Volumenstromregler auf den Drehzahlregler geführt. Dies bedeutet eine leichte Anpassung von einigen Zeilen Programmcode. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Rückmeldungen der Stellungssignale der Volumenstromregler bereits auf der Steuerung vorhanden waren. Hätten die Rückmeldungen auf der Steuerung gefehlt, hätte dies einen erheblichen Aufwand bedeutet (Ersatz Antriebe, Schemaänderungen, Erweiterung Elektroinstallation, Anpassung Steuerung...).

7.2.3 Ersatz Gehäuse Ventilator durch EC-Radialventilator

Bei derselben Lüftungsanlage der Hochschule Luzern wurde der bestehende Ventilator durch einen neuen EC Radialventilator der modernsten Technik ersetzt. Dabei wurde angestrebt, das Norm-Profil mit weniger elektrischer Energie abfahren zu können.

Tabelle 13 Gegenüberstellung Ventilator alt vs. neu

	Alt	Neu
Bild	 Abbildung 26 Foto Ventilator alt	 Abbildung 27 Foto Ventilator neu
Lüftungsanlage	ZUL_Alt	ZUL_Neu
Antriebsmotor Hersteller	ABB	EBM Papast
Antriebsmotor Typ	M2BA 132 SMC-4 (Jg 2013)	K3G560-PC04-01 [6] rückwärts gekrümmmt, einseitig saugend
Motorenreihe	IE3	
Transmission	Keilreimen, 2 Rippen	



Nennleistung	5500 W	5000 W
Volumenstrom	10755 m ³ /h	11760 m ³ /h
Druckerhöhung	825 Pa	1035 Pa
Ventilator Hersteller	Fläkt Woods	-
Ventilator Typ	GXLB-5-045-1-1-1-1 (Jg ca. 94)	-
Ventilator Bauart	Rückwärtsgekrümmtes Laufrad in Spiralgehäuse	Rückwärtsgekrümmtes Laufrad, freilaufend
Umrichter	Danfoss, FC102, 5.5 kW	-

Das Norm-Profil wurde mit dem neuen Ventilator abgefahren. Die Tabelle 14 zeigt die pro Norm-Tag eingesparte Energiemenge. Diese Zeigt, dass mit der Kombination des Ventilatorersatzes und der Anpassung der Regelstrategie eine erhebliche Energieeinsparung möglich ist.

Tabelle 14 Energieeinsparung Ventilator alt vs- neu

Energieeinsparung	Ventilator alt	Ventilator neu
konstante Druckregelung	20.2 kWh/d (100%)	18.8 kWh/d (-7%)
druckoptimierte Regelung	15.5 kWh/d (-23%)	12.2 kWh/d (-37%)

Der neue Ventilator führte zu einer Verbesserung des SFP. Der Grenzwert von 0.35 W/(m³/h) konnte jedoch knapp nicht erreicht werden.

Tabelle 15 SFP Verbesserung (Strategie druckoptimiert)

	ZUL Ventilator_Alt	ZUL Ventilator_Neu
Volumenstrom	10728 m ³ /h	11047 m ³ /h
Wirkleistung	4510 W	4238 W
SFP	0.42	0.38

Je höher der Volumenstrom, desto grösser ist die im Vergleich zum alten Ventilator eingesparte Leistung.

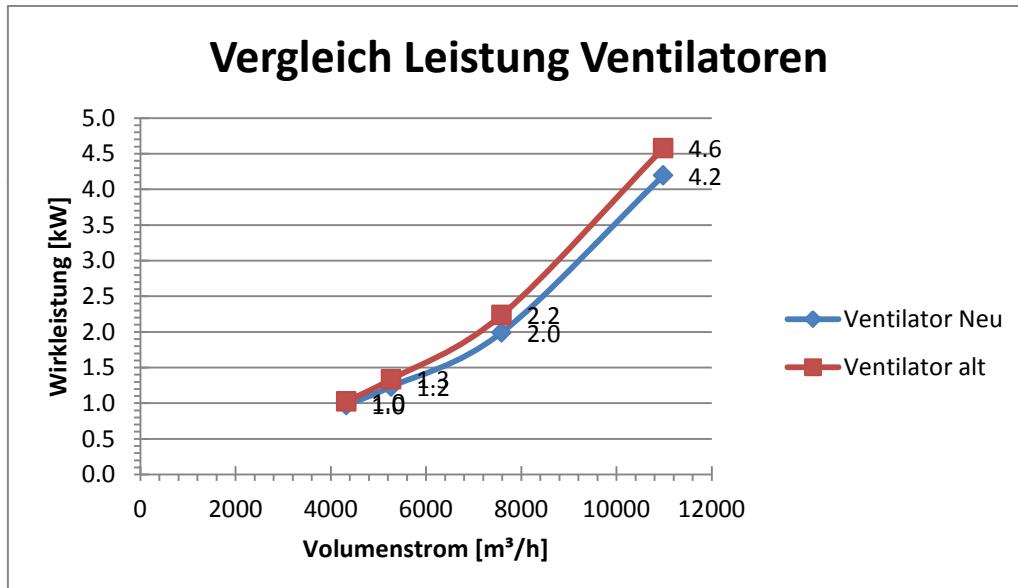


Abbildung 28 Betriebsverhalten Ventilator alt vs. neu

Der Umbau der ZUL-Anlage war recht aufwendig. Der alte Ventilator befand sich im Monoblockgehäuse auf der Saugseite, der neue Ventilator hingegen auf der Druckseite. Um den Einbau im selben Ventilatorteil zu ermöglichen, war das Einbringen einer Montageplatte notwendig. Zwei Monteure waren mit dem Umbau über einen Tag lang beschäftigt.

7.2.4 Validierung Volumenstrommessung

Der Volumenstrom kann mit den nachfolgend beschriebenen Verfahren gemessen werden.

Einlaufstromdüse

Im einfachsten Fall steht im Monoblock eine Einlaufstromdüse zur Verfügung. Der Volumenstrom lässt sich aus dem Wirkdruck (Differenzdruck des statischen Drucks vor und in der Einlaufstromdüse) mit der Formel 7 berechnen:

Formel 7 Volumenstrombestimmung mit Einlaufstromdüse

$$q_V = K \cdot \sqrt{\Delta P}$$

$$q_V \left[\frac{m^3}{h} \right] \text{ und } \Delta P \left[Pa \right]$$

Der neue Ventilator der Hochschule Luzern ist von der Baugröße 560 mit dem K-Wert 348.

MP-Bus Rückmeldung

Der Volumenstromregler (VAV) wird über das MP-Bus Signal angesteuert. Nebst der Ansteuerung besteht auch die Möglichkeit, Informationen aus dem Antrieb auszulesen. Eine der Informationen ist der Volumenstrom. Durch die Summenbildung aller VAV Rückmeldungen kann ebenfalls auf den gesamten Volumenstrom geschlossen werden.

**Abbildung 29 VAV Volumenstromregler****Tracergasmessung mit SF6**

Eine sehr genaue, aber aufwendige Art der Volumenstrombestimmung ist die Tracergasmethode. Das verwendete Tracergas Schwefelhexafluorid (SF6) kommt in der Natur kaum vor und wird in den zu bestimmenden Luftstrom eindosiert. Mittels Mehrpunktsampling wurden die Tracergaskonzentrationen in der Aussenluft und Zuluft durch Infrarotspektroskopie gemessen. Unabhängig vom Strömungsquer-schnitt und vom Strömungsprofil können die Massen- und Volumenströme mit einer Genauigkeit von ca. 2% ermittelt werden.

**Abbildung 30 Tracergasmessung**

Die Ergebnisse der drei beschriebenen Methoden für einen definierten Betriebspunkt sind in der Tabelle 16 miteinander verglichen.

Tabelle 16 Vergleich der Volumenstrommessungen

Methode	Volumenstrom [m³/h]	Abweichung
Tracergasmethode	11'125	0% (Referenzwert)
MP-Bus	11'060	0.58%
Einlaufstromdüse	10'681	3.99%

8 Sicht der Stakeholder

Der SFP-Wert wird durch Ventilatorhersteller, Monoblock-Hersteller und Lüftungsplaner beeinflusst. Um die Einstellung dieser Interessengruppen gegenüber diesem Grenzwert einzuholen, wurde ein Interview mit je einer Person dieser Gruppen durchgeführt. Obwohl eine einzelne Person kaum alle Meinungen einer Gruppe abdeckt, wiederspiegeln folgende subjektive Eindrücke den jeweiligen Umgang um die Problematik des SFP Wertes.

8.1 Sicht Ventilator Hersteller

Ventilator Hersteller sind wenig an der spezifischen Ventilatorleistung interessiert. Sie werden auch selten durch Kunden mit SFP-Faktoren konfrontiert. Vielmehr legen sie Wert auf das Erreichen optimaler Wirkungsgrade ihrer Produkte. Sie orientieren sich deshalb auch eher an die ErP-Richtlinien für Ventilatoren. Mit neuen Technologien wie Kunststofflaufräder oder hochklassigen Motoren lassen sich heutige Wirkungsgrade um einige Prozentpunkte verbessern. Das grosse Einsparpotential liegt aus ihrer Sicht jedoch bei der Planung, genauer gesagt bei den Druckverlusten der Anlagen. Ihr Bestreben liegt darin, Ventilatoren so zu konstruieren, dass möglichst hohe Wirkungsgrade erreicht werden. Diese sollen jedoch nicht bloss in einem bestimmten Betriebspunkt, sondern über einen möglichst grossen Anwendungsbereich effizient eingesetzt werden können. Damit wird auch der Unsicherheit in der Planung entgegengewirkt. In Anbetracht der Messwerte der 14 Anlagen ist das sicher eine sinnvolle Haltung, wenn man bedenkt, dass viele Ventilatoren nachträglich unter andern Betriebsbedingungen eingesetzt werden. Dass die Herstellerangaben bezüglich des Wirkungsgrads teilweise etwas un-durchschaubar sind, ist ihnen bewusst. Gerade die Differenzierung von statischen und dynamischen Wirkungsgraden führt öfters zu Verwirrung. Um zwei Ventilatoren bezüglich Effizienz vergleichen zu können, sollte deshalb nur der statische Wirkungsgrad verwendet werden. Heutige Ventilatoren erreichen höchst selten statische Systemwirkungsgrade von über 75 %. Wenn also Werte darüber versprochen werden, könnten die Angaben für den totalen Systemwirkungsgrad mit Berücksichtigung des dynamischen Anteils gelten.

8.2 Sicht Monoblock Hersteller

Mit Fragen zur spezifischen Ventilatorleistung werden Monoblock Hersteller von Planern nur selten konfrontiert. Heute gehört es jedoch zum Standard, die SFP Werte auf den Datenblättern auszuweisen. Die Grundlagen für die Berechnung kann jedoch nicht vollständig dem Datenblatt entnommen werden. Einem Planer ist es somit nicht möglich, den SFP Wert zu überprüfen, ohne weitere Informationen beim Hersteller anzufordern. Deshalb ist es schwierig, zwei Anlagen verschiedener Hersteller bezüglich Effizienz zu vergleichen. Auch sonst wird ein Vergleich schwierig, da interne Druckverluste auf Kosten der Qualität verbessert werden können.

Es wird grossen Wert darauf gelegt, dass bei jeder Anlage optimale Geräte eingesetzt werden. Die Monoblock Hersteller wählen ihre Komponenten grundsätzlich nicht anders aus, nur um SFP-Grenzwerte einhalten zu können. Sie weisen Planer auch nicht drauf hin, wenn Grenzwerte überschritten werden. Wie die Ventilator Hersteller sehen auch die Monoblock Hersteller die Verantwortung für effiziente Anlagen hauptsächlich bei den Planern, da nur diese die gesamte Anlage inklusive Kanalnetz kennen.

8.3 Sicht Planer

Die Planer wissen um ihre Verantwortlichkeit bezüglich der Grenzwerte. Trotzdem ist es häufig schwierig, diese einzuhalten. Gerade bei komplexen Anlagen mit erhöhten Anforderungen an Brandschutz oder Hygiene, aber auch bei Anlagen mit langen Verteilnetzen reicht es nicht aus, wenn der Grenzwert um eine Kategorie erhöht werden darf. Bei kleinen Standard-Anlagen können die Anforde-



rungen der SIA 382/1 [1] eingehalten werden. Dazu ist aber eine fachgerechte Auslegung inklusive Druckverlustberechnung erforderlich. Die Druckverluste fallen dabei meist tiefer als geschätzt aus, was sich positiv auf die spezifische Ventilatorleistung auswirkt. Den häufigen Änderungen während der Bauphase ist es zu verübeln, dass Druckverlustberechnungen meist sehr zeitintensiv ausfallen und deshalb häufig weggelassen werden. Zudem müssen für nachträgliche Änderungen meist Formstücke mit ungünstigen strömungstechnischen Eigenschaften verbaut werden.

Der Verantwortlichkeit bezüglich der SFP-Werte sind sich noch nicht alle bewusst. So fehlen Rückmeldungen bei nichteinhalten der Grenzwerte, ganz zu schweigen von Konsequenzen von zuständigen Behörden.

Ein weiteres Einsparpotential wird bei der Inbetriebnahme der Anlage vermutet. So werden Drucksollwerte bei variablen Volumenstrom Anlagen häufig abgeschätzt und zu hoch eingestellt. Dadurch werden durch den Ventilator zu hohe Drücke generiert, welche durch Volumenstromregler wiederum vernichtet werden. Gerade bei komplexen Anlagen ist es zwingend nötig, optimale Parametrierungen vorzunehmen.

Ein Grenzwert sollte deshalb für alle Beteiligten einfach und klar verständlich sein. Dies könnte auch bedeuten, dass auf Systembetrachtungen verzichtet würde und Einzelanforderungen die Beteiligten direkter ansprechen würden.

8.4 Sicht Betreiber (Technisches Personal)

Das technische Personal ist typischerweise dann mit einer Anlage zufrieden, wenn die Anlage funktioniert und keine Reklamationen von den Benutzern kommen. Letzteres können zu hohe Schallgeräusche, stickige Luft oder Zugluft sein. Regeltechnisch bestraft man das eine, wenn man das andere erreichen will. So steigt der Schallpegel, wenn die Benutzer einen grösseren Luftwechsel verlangen. Die energetische Betrachtung wird durch diese Bedürfnisse eher untergeordnet.

8.5 Sicht Betreiber (Management)

Betriebswirtschaftlich sollte ein Minimum zwischen Anschaffungs- und Betriebskosten gefunden werden. Bei den Anschaffungskosten kann gespart werden, wenn eine Lüftungsanlage möglichst klein gebaut werden kann (kleiner Monoblock, kleinere Ventilatoren, kleines Kanalnetz). Bei den Betriebskosten schlagen vor allem die Energiekosten zu Buche. Ein System mit weniger Druckverlust und effizienteren Bauteilen verbraucht weniger Energie und verursacht tiefere Betriebskosten.

In Zweckbauten kann sich die Nutzung einer Anlage schon nach wenigen Betriebsjahren ändern. Raumeinteilungen und der damit verbundene Bedarf an Luftmenge ändern sich, nur der Monoblock bleibt bestehen. So kann es schnell vorkommen, dass Anlagen über- oder unterdimensioniert sind. Der Wirkungsgrad der Anlage verschlechtert sich dabei. Die Aussagekraft der SFP ist in diesem Fall nicht von Bedeutung, da die SFP nur für den maximalen Volumenstrom gilt. Der Betreiber hat keine Ahnung, wie ungünstig seine Anlage in der aktuellen Nutzung betrieben wird.



8.6 Sicht GA Lieferanten

Bei grösseren Anlagen wird eine Lüftungsanlage durch eine frei programmierbare Automationsstation gesteuert oder geregelt. Die GA Lieferanten setzen dabei mehrfach erprobte Lösungen ein. Die dazu gehörenden Sollwerte werden von den HLK-Planern erhalten. Bei der Abnahme fehlt oft die Zeit, den Druckabgleich zu machen.

Erprobte Lösungen haben den Vorteil, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines Programmierfehlers verkleinert. Fehler werden einfacher gefunden oder gar verhindert. Je mehr Funktionalität in einer mehrfach erprobten Lösung steckt, desto mehr wird deren Funktionalität zu einer Blackbox. Der Programmierer füttert die Funktion nur mit Ein- und Ausgängen und versteht nicht mehr genau, was sich dahinter verbirgt.

Ähnliches wird auch bei Planern beobachtet. Funktionsbeschriebe bestehender Anlagen werden kopiert und bei neuen Projekten wieder verwendet. So kann es gut vorkommen, dass sogar Sollwertvorgaben kopiert werden, ohne diese auf die aktuelle Anlage abzustimmen.

9 Schlussfolgerung

9.1 Schätzung Sparpotential

In der Tabelle 17 und Tabelle 18 werden die berechneten Wirkleistungen aus Auslegung und Grenzwert gegenübergestellt. Die Wirkleistungen der Zuluft- und Abluftventilatoren wurden jeweils auf Grenzwertverletzung gefiltert. Die Wirkleistung wird wie folgt berechnet:

Formel 8 Umstellungen Formel 1

$$P_a = SFP_a \cdot qv \quad \text{Wirkleistung berechnet aus Auslegung} \quad [\text{W}]$$

$$P_{gw} = SFP_{gw} \cdot qv \quad \text{Wirkleistung berechnet aus Grenzwert} \quad [\text{W}]$$

$$dP_{abs} = P_{gw} - P_a \quad \text{Sparpotential Wirkleistung Absolut} \quad [\text{W}]$$

$$dP_{rel} = \frac{dP_{abs}}{dP_{gw}} \quad \text{Sparpotential Wirkleistung relativ} \quad [\%]$$

$$SFP_a \quad \text{SFP berechnet aus Auslegung} \quad [\text{W}/(\text{m}^3/\text{h})]$$

$$SFP_{gw} \quad \text{SFP berechnet aus Grenzwert} \quad [\text{W}/(\text{m}^3/\text{h})]$$

$$qv \quad \text{Volumenstrom aus Auslegung} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$



Tabelle 17 SFP Sparpotential an ZUL

Zuluft Sparpotential				
	P_a	P_gw	dP_abs	dP_rel
Nr.	Wirkleistung Auslegung	Wirkleistung GW	Sparpotential Wirkleistung Absolut	Sparpotential Wirkleistung Relativ
1	1655 W	1684 W	28 W	1.7%
2	2558 W	3015 W	457 W	15.2%
4	1925 W	2293 W	367 W	16.0%
6	1088 W	1505 W	417 W	27.7%
7	994 W	1593 W	599 W	37.6%
8	530 W	515 W	-15 W	-3.0%
10	2928 W	2082 W	-846 W	-40.7%
11	1301 W	1480 W	179 W	12.1%
12	1514 W	1404 W	-110 W	-7.8%
13	1867 W	1200 W	-667 W	-55.6%
14	796 W	610 W	-186 W	-30.4%
15	3554 W	3675 W	121 W	3.3%
19	1362 W	1400 W	38 W	2.7%
21	3633 W	4200 W	567 W	13.5%
22	4150 W	2400 W	-1750 W	-72.9%
23	628 W	560 W	-68 W	-12.2%
24	2023 W	1320 W	-703 W	-53.2%
26	1323 W	860 W	-463 W	-53.8%
28	3207 W	1386 W	-1821 W	-131.4%
29	5159 W	2170 W	-2989 W	-137.7%
30	8794 W	7525 W	-1269 W	-16.9%
32	2347 W	2485 W	138 W	5.5%
34	2101 W	1400 W	-701 W	-50.0%
35	1175 W	665 W	-510 W	-76.8%
36	1787 W	895 W	-892 W	-99.6%
40	3187 W	2821 W	-366 W	-13.0%
41	1503 W	1782 W	279 W	15.6%
42	1722 W	1925 W	203 W	10.5%
43	5434 W	5005 W	-429 W	-8.6%
44	21079 W	16100 W	-4979 W	-30.9%
45	14427 W	12250 W	-2177 W	-17.8%
46	2931 W	3185 W	254 W	8.0%
47	1397 W	1750 W	353 W	20.2%
48	6054 W	6195 W	141 W	2.3%
49	2161 W	2870 W	709 W	24.7%
50	618 W	875 W	257 W	29.3%
51	2367 W	2275 W	-92 W	-4.0%
52	794 W	1225 W	431 W	35.2%
53	1978 W	3150 W	1172 W	37.2%
54	1060 W	1610 W	550 W	34.1%
55	1387 W	1789 W	401 W	22.4%
56	1458 W	1750 W	292 W	16.7%
57	1285 W	1750 W	465 W	26.6%
59	1356 W	2100 W	744 W	35.4%
60	2310 W	1800 W	-510 W	-28.3%
61	989 W	800 W	-189 W	-23.6%
Summen aller 46 Anlagen				
	133897 W	121327 W	-12570 W	-10.4%
Mittelwerte				
	2911 W	2638 W	-273 W	-10.4%

Tabelle 18 SFP Sparpotential an ABL

Abluft Sparpotential				
	P_a	P_gw	dP_abs	dP_rel
Nr.	Wirkleistung Auslegung	Wirkleistung GW	Sparpotential Wirkleistung Absolut	SparPotential Wirkleistung Relativ
1	1630 W	1024 W	-606 W	-59.2%
2	2601 W	1878 W	-723 W	-38.5%
4	1598 W	1280 W	-318 W	-24.8%
6	1151 W	1540 W	389 W	25.2%
7	891 W	910 W	19 W	2.1%
8	504 W	361 W	-144 W	-39.9%
10	3018 W	1527 W	-1491 W	-97.6%
11	1670 W	1600 W	-70 W	-4.4%
12	1494 W	983 W	-511 W	-52.0%
13	1767 W	840 W	-927 W	-110.3%
14	628 W	399 W	-229 W	-57.5%
15	2940 W	2100 W	-840 W	-40.0%
19	724 W	680 W	-44 W	-6.5%
21	2925 W	2400 W	-525 W	-21.9%
22	3681 W	1680 W	-2001 W	-119.1%
23	667 W	420 W	-247 W	-58.7%
24	1684 W	924 W	-760 W	-82.2%
26	1103 W	602 W	-501 W	-83.3%
28	2695 W	1316 W	-1379 W	-104.8%
29	4663 W	2170 W	-2493 W	-114.9%
30	7367 W	4300 W	-3067 W	-71.3%
32	1942 W	1360 W	-582 W	-42.8%
34	1800 W	980 W	-820 W	-83.7%
35	1156 W	471 W	-685 W	-145.5%
36	1779 W	629 W	-1150 W	-183.0%
40	2234 W	1580 W	-654 W	-41.4%
41	1065 W	954 W	-111 W	-11.6%
42	1399 W	1100 W	-299 W	-27.2%
43	4996 W	4900 W	-96 W	-2.0%
44	14428 W	9200 W	-5228 W	-56.8%
45	10541 W	7000 W	-3541 W	-50.6%
46	2481 W	1820 W	-661 W	-36.3%
47	1315 W	1000 W	-315 W	-31.5%
48	5274 W	3540 W	-1734 W	-49.0%
49	2003 W	1640 W	-363 W	-22.1%
50	494 W	500 W	6 W	1.2%
51	2141 W	1300 W	-841 W	-64.7%
52	747 W	700 W	-47 W	-6.7%
53	2053 W	1800 W	-253 W	-14.0%
54	836 W	920 W	84 W	9.1%
55	1055 W	1022 W	-33 W	-3.3%
56	1196 W	1000 W	-196 W	-19.6%
57	1531 W	1200 W	-331 W	-27.6%
59	1159 W	1200 W	41 W	3.5%
60	2277 W	1260 W	-1017 W	-80.7%
61	963 W	560 W	-403 W	-72.0%
Summen aller 46 Anlagen				
	112265 W	76569 W	-35696 W	-46.6%
Mittelwerte				
	2441 W	1665 W	-776 W	-46.6%

Bei den Zuluftanlagen hätte gemäss Auslegung im Schnitt über 10% an elektrischer Leistung eingespart werden können, bei den Abluftanlagen sogar deren 46%.

Gemäss Topmotors [3] wurden im Jahr 2014 7.5 TWh/ elektrische Energie für Ventilatoren in der Schweiz verwendet. Mit den in Tabelle 19 aufgeführten Annahmen würde sich ein theoretisches Einsparpotential von 0.4 TWh/a in der Zuluft und 1.7 TWh/a in der Abluft ergeben.

Tabelle 19 Annahmen Theoretisches Sparpotential

Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren in der Schweiz	12.5%	7.5 TWh/a
Anteil ZUL Ventilatoren	50%	3.7 TWh/a
Anteil ABL Ventilatoren	50%	3.7 TWh/a
Sparpotential in ZUL durch Einhalten SFP	10%	0.4 TWh/a
Sparpotential in ABL durch Einhalten SFP	46%	1.7 TWh/a

9.2 Hinterfragung SFP als Energie-Benchmark

Der SFP gemäss SIA 382/1 [1] ist nur ein Indikator für die energetische Güte einer Anlage im Auslegfall. Wie gut eine Anlage im Teillastfall betrieben wird, wird mit diesem Wert nicht bewertet.

Aus dem Vergleich der Einzelanforderungen mit den Systemanforderungen wird ersichtlich, dass bei der nächsten Revision der SIA 382/1 [1] Handlungsbedarf besteht. Falls weiterhin beide Anforderungen bestehen bleiben, müssten die Grenzwerte so angepasst werden, dass die Anforderungen kompatibel sind. Zudem können die Einzelanforderungen auf den Druckverlust reduziert werden. Die nachfolgenden Varianten in Tabelle 20 zeigen Möglichkeiten mit ihren Vor- und Nachteilen auf, die bei einer Revision der SIA 382/1 [1] umgesetzt werden könnten.

Tabelle 20 Vorschläge Anpassungen an SFP

Änderung	Vorteil	Nachteil
nur Systemanforderung, keine Einzelanforderungen mehr	<ul style="list-style-type: none">• EN Norm kompatibel• nur 1 Grenzwert• einfache Validierung	<ul style="list-style-type: none">• Grenzwerte bei speziellen Anlagen noch genauer definieren
nur Einzelanforderungen, keine Systemanforderung mehr	<ul style="list-style-type: none">• einfach• Verantwortung zwischen Planer und Monoblock Anbieter wird geteilt• Teillastbetrieb berücksichtigt	<ul style="list-style-type: none">• Validierung in Betrieb schwierig
nur Systemanforderung, aber Berücksichtigung der Teillast	<ul style="list-style-type: none">• Teillastfall berücksichtigt• einfache Validierung	<ul style="list-style-type: none">• Definition Betriebspunkte notwendig
Jahreswert für SFP	<ul style="list-style-type: none">• Jahresverhalten wird mitberücksichtigt• Teillast berücksichtigt• zu hohe Drucksollwerte werden miterfasst	<ul style="list-style-type: none">• Validierung aufwendig und erst nach mindestens einem Betriebsjahr möglich



Nur Systemanforderungen

Die Einzelanforderungen Druckverlust und Strömungsgeschwindigkeit würden aufgegeben. Einzig die Anforderung an die SFP würde bestehen bleiben. Im Rahmen der Ecodesign-Richtlinien (EU-Verordnung 1253/2014, die auch in der Schweiz eingeführt wird) wird die SFP bei neuen Luftaufbereitungsgeräten vom Lieferanten ermittelt. Neben dem standardisierten Kennwert der EU-Verordnung liesse sich auch die SFP im Dimensionierungsfall der Anlage einfach ausweisen. Für Planer und Unternehmer würde kaum eine Mehraufwand entstehen. Mit einem einzigen Anforderungswert würde SIA 382/1 [1] vereinfacht.

Die SFP-Anforderungen müssten jedoch validiert und genauer definiert werden. Da die heutigen Anforderungen für die abluftseitigen Ventilatoren sehr streng sind, wären diese voraussichtlich anzupassen.

Nur Einzelanforderungen

Bei dieser Variante würde die Systemanforderung SFP aufgegeben. Die EU-Verordnung 1253/2014 [7] stellt Anforderungen an das Luftaufbereitungsgerät und damit an einen wesentlichen Teil der Anlage. Es wäre denkbar, dass sich die SIA 382/1 [2] nur noch auf denjenigen Teil der Anlage bezieht, der nicht von der EU-Verordnung 1253/2014 [7] abgedeckt wird. Das könnte heißen, dass die SIA 382/1 [2] Anforderungen an den externen Druckverlust und an diejenigen Komponenten stellt, die bei der SFP gemäss Verordnung nicht eingerechnet sind. Die Anforderungen in der SIA 382/1 [2] würden sich vereinfachen. Die Verantwortung zwischen Planer und Lieferant des Luftaufbereitungsgeräts würde so aufgeteilt, wie sie auch in der Praxis gängig ist.

Die Nachkontrolle durch eine Messung ist etwas aufwändiger. Zusätzlich zur elektrischen Aufnahmeleistung und zum Luftvolumenstrom müssten immer die externen Druckverluste gemessen werden. Die Messwerte der SFP müssten rechnerisch korrigiert werden. Dabei ist zu erwähnen, dass die Messung der externen Druckverluste schon heute sinnvoll ist und allenfalls rechnerische Korrekturen für einen Vergleich mit Planungsdaten angemessen sind.

Systemanforderung bei Teillast

Bei Lüftungs- und Klimaanlagen mit mehrstufigem oder stufenlosem Betrieb ist häufig nicht der Dimensionierungsfall entscheidend für den Jahresenergieverbrauch. Ein Teillastfall repräsentiert den typischen Zustand oft besser. Die SFP könnte auf einen Teillastfall bezogen werden. Die Aussagekraft der SFP würde steigen, ohne dass der Aufwand zur Ermittlung der Kennzahl wesentlich zunimmt. Die SFP könnte weiterhin durch eine Messung einfach überprüft werden.

Die Definition des massgebenden Betriebspunktes wäre noch zu lösen. Nicht bei allen Anlagen ist der gleiche Teillastfall repräsentativ für den Jahresenergieverbrauch.

Jahreswert für SFP

Die SFP wird als Jahresmittelwert ausgewiesen. Dazu wäre eine Berechnung anhand von verschiedenen Teillastfällen erforderlich. Der Jahresenergieverbrauch ist für Bauherren und Anlagenbetreiber eine hilfreiche Grösse. Das gesamte Betriebsverhalten könnte abgebildet werden.

Die Definition eines Jahreswertes von Förderdruck und Luftvolumenstrom ist komplex. Verschiedene Anlagetypen können deutlich unterschiedliche Lastprofile aufweisen. Eine einfache Kontrolle von Planungswerten anhand von Messwerten ist kaum möglich.

Empfehlung

Die dritte und vierte Variante scheinen aufwändig und teilweise schwer kontrollierbar zu sein. Es wird empfohlen, die ersten beiden Varianten weiter zu verfolgen. Im Sinne einer Systemanforderung, die möglichst viel Planungsfreiheit lässt, wäre die erste Variante zu bevorzugen. Die zweite Variante ist rezeptartig und wäre für Planer und Installateure einfacher umsetzbar als Variante 1. Bei beiden Varianten wäre aber eine Überarbeitung und Validierung der heutigen Werte der SIA 382/1 [2] erforderlich.

9.3 Beurteilung Verbesserungsmassnahmen druckoptimierte Regelung

Im Kapitel 7.2 wurde dieselbe Lüftungsanlage einerseits durch einen regeltechnischen Eingriff verbessert, andererseits durch den Einsatz eines neuen Ventilators. In beiden Varianten hat sich am Komfort nichts geändert, die vorgegebenen Volumenströme aus dem Zeitprofil Kapitel 12.3 wurden eingehalten. Bei der druckoptimierten Lösung wurde mit minimalem Förderdruck der Volumenstrom erzeugt und somit auch der Energieaufwand minimiert. Eine Voraussetzung dazu ist, dass die Anlage verschiedene Zonen mit variablen Volumenströmen versorgt. Die Volumenstromregler müssen ihre aktuelle Stellung zurück melden können. Die Regelstrategie muss in die Automatisierungsstation implementiert werden. Bei einigen VAV-Lieferanten sind entsprechende Hardwareregler (Fanoptimiser) erhältlich.

Weitere bekannte Möglichkeiten für eine effektive Energieeinsparung bei Lüftungsanlagen sind:

- Zeitschaltprogramme
- Bedarfsgerechte Luftqualitätsregelung, insbesondere CO₂
- Kontrolle der benötigten Volumenströme.

9.4 Ausblick und Empfehlungen

Die Auswertung der Anlagedaten und Messungen lässt darauf schliessen, dass ein erhebliches Einsparpotential an elektrischer Energie (ca. 2.1 TWh) bestehen würde, wenn die SFP-Anforderungen gemäss SIA 382/1 [2] bei Neuanlagen und bei Sanierungen konsequent umgesetzt werden. Wie in Abschnitt 4.3 aufgezeigt wurde, ist die SFP und die Einzelanforderung an den Druckverlust in der aktuellen SIA 382/1 [2] nicht kompatibel. Bei einer Revision sollte mindestens dieses Missverhältnis behoben werden. Durch realistische SFP-Grenzwerte würde das theoretische elektrische Einsparpotential auf das der Zuluftanlagen relativiert werden, was noch einem Einsparpotential von 0.8 TWh entspricht.

Obwohl die SFP keine umfassende Beurteilungsgrösse für die Energieeffizienz von Lüftungs- und Klimaanlagen darstellt, ist sie doch ein pragmatischer Kontrollwert. Es wird empfohlen, die SFP oder die damit verbundenen Grössen (Druckverlust und Gesamtwirkungsgrad der Ventilatoren) weiterhin im schweizerischen Normenwesen zu verankern. Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob das heutige System von Einzel- und Systemanforderungen nicht zugunsten einer einfacheren Lösung aufgegeben werden soll (vgl. 9.2). Insbesondere gilt es zu überlegen, wie die Planer und Lieferanten besser in die Verantwortung eingebunden werden können. HLK-Planer sind für die externen Druckverluste zuständig und die Lieferanten von Luftaufbereitungsgeräten bestimmen massgebend die internen Druckverluste. Aus Sicht der Autoren würde es Sinn machen, diese in der Praxis übliche Aufgabenteilung mit adäquaten Anforderungen in Normen abzubilden. Mit der Übernahme der EU-Verordnung 1253/2014 [7] in die schweizerische Energieverordnung tragen die Lieferanten auch juristisch die Verantwortung für die energetischen Kennwerte der verkauften Luftaufbereitungsgeräte.

Ein bemerkenswertes Nebenresultat dieser Arbeit ist der exemplarische Vergleich der druckoptimierten Regelung mit einem Ventilatorersatz. Die untersuchte Anlage dürfte typisch sein für eine grosse Anzahl von bestehenden Lüftungs- und Klimaanlagen in mittleren und grösseren Verwaltungsgebäuden, Schulhäusern, Gewerbegebäuden, Verkaufsläden und Industriebetrieben. Das Einsparpotential dürfte mindestens so hoch sein wie bei der Umsetzung der heutigen SFP-Anforderungen. Es wird empfohlen, Nachrüstungen und Optimierung von druckoptimierten Regelungen zu propagieren und zu fördern. Dabei ist zu beachten, dass für die Realisierung von zu optimierenden Anlagen neben HLK-Planern auch die GA-Branche abgeholt werden muss. Eine kritische Stelle bei der Umsetzung sind die System-Integratoren, die heute wegen fehlender Sensibilisierung und aus Zeitmangel (resp. fehlendes Honorar) dieses Thema zu wenig beachten.



10 Dank

Ohne die finanzielle Unterstützung des Bundesamtes für Energie und der Mitglieder von ProKlima wäre die Untersuchung in dieser Form nicht möglich gewesen. Die ebm-papst AG hat uns grosszügiger Weise unentgeltlich einen Ventilator der neusten Generation zur Verfügung gestellt. Die Firmen Credit Suisse, Axpo AG, Migros und Stadt Luzern haben uns an ihren Anlagen Messungen ermöglicht. Die Monoblockhersteller 7-Air, Mountair und Weger haben unsere Rückfragen zur SFP Bestimmung gründlich erläutert. Das Facility Management der Hochschule Luzern hat uns das Vertrauen geschenkt, an einer ihrer Anlagen Umbauarbeiten vornehmen zu dürfen. Die Firma Panthek AG hat unsere Ideen einer druckoptimierten Regelung implementiert.

Ein herzliches Dankeschön gilt besonders dem wissenschaftlichen Assistenten Urs Greber, welcher massgeblich am Erfolg dieser Arbeit beteiligt war.

11 Literaturverzeichnis

- [1] SIA 382/1:2007, „Lüftungs- und Klimaanlagen- Allgemeine Grundlagen und Anforderungen,“ 2007.
- [2] SIA 382/1:2014, „Lüftungs- und Klimaanlagen- Allgemeine Grundlagen und Anforderungen,“ 2014.
- [3] Topmotors, „Merkblatt 24 Luftförderung,“ Schweizerische Agentur für Energieeffizienz S.A.F:E, 2012.
- [4] HSLU, FHNW, „Spezifische Ventilatorleistung von sechs mittleren Lüftungsanlagen der Stadt Zürich,“ Amt für Hochbauten Stadt Zürich, 2012.
- [5] DIN EN 13779:2007, „Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme,“ 2007.
- [6] ebm-papst, „EC-Radialventilatoren- RadiPac,“ 2014.
- [7] EUV 1253/2014, „Verordnung (EU) Nr. 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen,“ 2014.
- [8] Ziehl-Abegg, „Radial Ventilatoren für Klimazentralgeräte,“ 2011.



12 Anhang

12.1 Anlagedatenbank

In der Klammer steht die Anzahl der in der Auswertung vorgekommenen Typen bzw. Häufigkeiten.

12.1.1 Auslegedaten Allgemein

Firma, Standort der Anlage	
Name der Anlage	
Anlagetyp	<ul style="list-style-type: none">• einfache Klimaanlage (28)• einfache Lüftungsanlage (2)• Klimaanlage mit Luftbefeuchtung (1)• Lüftungsanlage mit Luftherwärmer (15)
Baujahr	<ul style="list-style-type: none">• 2005 (2)• 2006 (2)• 2007 (5)• 2008 (5)• 2009 (9)• 2010 (5)• 2011 (8)• 2012 (5)• 2013 (4)• 2014 (1)
Monoblockhersteller	<ul style="list-style-type: none">• 7-Air (31)• airfox (1)• Mountair (3)• Orion (2)• Swegon (1)• Weger (8)
Nutzung Anlage	<ul style="list-style-type: none">• Büro (11)• Garderobe (3)• Hallenbad (1)• Küchen (3)• Restaurant (7)• Schulen (9)• Sport (3)• Veranstaltungen (2)• Verkauf (5)• Andere (2)
Lastregelung	<ul style="list-style-type: none">• 1-stufig (14)• 2-stufig (2)• Frequenzumrichter mit AC Motor (23)• Variabel ohne Frequenzumrichter (7)
Motor Typ	<ul style="list-style-type: none">• AC-Motor (36)• EC Motor (7)• PM Motor (3)
Ventilator Typ	<ul style="list-style-type: none">• Radial Rückwärts gekrümmmt (41)• Radial Vorwärts gekrümmmt (1)• keine Angabe (4)
Transmission	<ul style="list-style-type: none">• Direktantrieb (30)• Flachriemen (5)• Keilriemen (11)
Volumenstromregler	<ul style="list-style-type: none">• Ja (15)• Nein (4)• keine Angabe (27)
WRG	<ul style="list-style-type: none">• Plattenauscher (33)• Rotor (8)



	<ul style="list-style-type: none">• KVS (4)• Accubloc (1)
Anzahl Filterstufen	<ul style="list-style-type: none">• 1 (38)• >1 (8)
höchste Filterklasse	<ul style="list-style-type: none">• Feinstaubfilter F (43)• Fettfilter (3)

12.1.2 Auslegedaten ZUL

Ventilator-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• <0.7 (2)• 0.7 – 0.74 (2)• 0.75 – 0.79 (16)• 0.80 - 0.84 (6)• keine Angabe (20)• =46
Transmissions-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.92 (1)• 0.94 (8)• 0.97 (2)• keine Angabe (35)
Motor-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.45 – 0.49 (2)• 0.50 – 0.54 (0)• 0.55 - 0.59 (4)• 0.60 - 0.64 (10)• 0.65 – 0.69 (3)• 0.70 – 0.74 (1)• 0.75 – 0.79 (3)• 0.80 – 0.84 (4)• 0.85 – 0.89 (17)• 0.90 – 0.95 (2)
Umformer-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.97 (25)
System-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• <0.5 (2)• 0.50 – 0.54 (2)• 0.55 - 0.59 (11)• 0.60 - 0.64 (12)• 0.65 – 0.69 (17)• 0.70 (2)
Volumenstrom	<ul style="list-style-type: none">• 2000 – 3999 m³/h (6)• 4000 – 5999 m³/h (14)• 6000 – 7999 m³/h (9)• 8000 – 9999 m³/h (7)• 10'000 – 14'999 m³/h (5)• 15'000 – 20'000 m³/h (2)• 21'000 – 46'000 m³/h (3)
Nennleistung Motor	<ul style="list-style-type: none">• bis 1.85 kW (11)• 2 - 2.4 kW (10)• 3 – 3.8 kW (13)• 4 kW (4)• 5.5 kW (3)• 7.5 kW (1)• 11 kW (2)• 18.5 kW (1)• 30 kW (1)
externer Druckverlust	<ul style="list-style-type: none">• 200 – 299 Pa (14)• 300 – 399 Pa (14)• 400 – 599 Pa (9)• 600 – 799 Pa (6)• 800 – 999 Pa (2)• 1024Pa (1)
interner Druckverlust	<ul style="list-style-type: none">• 000 – 199 Pa (14)• 200 – 399 Pa (20)



	<ul style="list-style-type: none">• 400 – 599 Pa (12)• SFP1+ <0.083 (0)• SFP1 0.083-0.14 (0)• SFP2 0.14-0.20 (1)• SFP3 0.20-0.35 (37)• SFP4 0.35 – 0.56 (8)• SFP5 >0.56 (0)
SFP Auslegung [W/(m³/h)]	



12.1.3 Auslegedaten ABL

Ventilator-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• <0.7 (1)• 0.7 – 0.74 (5)• 0.75 – 0.79 (16)• 0.80 - 0.84 (4)• keine Angabe (20)
Transmissions-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.92 (2)• 0.94 (7)• 0.97 (2)• keine Angabe (35)
Motor-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.45 – 0.49 (2)• 0.50 – 0.54 (2)• 0.55 - 0.59 (3)• 0.60 - 0.64 (9)• 0.65 – 0.69 (2)• 0.70 – 0.74 (0)• 0.75 – 0.79 (4)• 0.80 – 0.84 (7)• 0.85 – 0.89 (13)• 0.90 – 0.95 (2)• keine Angabe (2)
Umformer-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• 0.97 (36)
System-Wirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none">• <0.5 (2)• 0.50 – 0.54 (5)• 0.55 - 0.59 (11)• 0.60 - 0.64 (15)• 0.65 – 0.69 (11)• 0.70 (2)
Volumenstrom	<ul style="list-style-type: none">• 2000 – 3999 m³/h (7)• 4000 – 5999 m³/h (12)• 6000 – 7999 m³/h (10)• 8000 – 9999 m³/h (7)• 10'000 – 14'999 m³/h (5)• 15'000 – 20'000 m³/h (2)• 21'000 – 46'000 m³/h (3)
Nennleistung Motor	<ul style="list-style-type: none">• bis 1.85 kW (15)• 2 - 2.4 kW (12)• 3 – 3.8 kW (9)• 4 kW (3)• 5.5 kW (2)• 7.5 kW (2)• 11 kW (1)• 18.5 kW (1)• 30 kW (1)
externer Druckverlust	<ul style="list-style-type: none">• 200 – 299 Pa (13)• 300 – 399 Pa (17)• 400 – 599 Pa (10)• 600 – 799 Pa (6)• 800 – 999 Pa (0)• 1024Pa (0)
interner Druckverlust	<ul style="list-style-type: none">• 000 – 199 Pa (20)• 200 – 399 Pa (25)• 400 – 599 Pa (1)
SFP Auslegung [W/(m³/h)]	<ul style="list-style-type: none">• SFP1+ <0.083 (0)• SFP1 0.083-0.14 (0)• SFP2 0.14-0.20 (2)• SFP3 0.20-0.35 (42)• SFP4 0.35 – 0.56 (2)• SFP5 >0.56 (0)



12.1.4 Auszug Messdaten und Auslegung Anlagendatenbank

Zuluft														
Nr.	Anlagentyp	Messdaten			Berechnung / Auslegung									
		qv_m	P_m	SPF_m	eta_sys	qv_a	SFP_a	SPF_gw			dpe_a	dpi_a	eta_gw	
1	Einfache Klimaanlage				0.57	4810 m³/h	0.34	0.35	Ja	709 Pa	0 Pa	0.56	Ja	
2	Einfache Klimaanlage				0.60	8615 m³/h	0.30	0.35	Ja	646 Pa	0 Pa	0.61	Nein	
4	Einfache Klimaanlage				0.59	6550 m³/h	0.29	0.35	Ja	350 Pa	274 Pa	0.58	Ja	
6	Einfache Klimaanlage				0.55	4300 m³/h	0.25	0.35	Ja	350 Pa	154 Pa	0.54	Ja	
7	Einfache Klimaanlage				0.58	4550 m³/h	0.22	0.35	Ja	200 Pa	254 Pa	0.55	Ja	
8	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.57	2575 m³/h	0.21	0.20	Nein	200 Pa	225 Pa	0.50	Ja	
10	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.66	10410 m³/h	0.28	0.20	Nein	400 Pa	316 Pa	0.63	Ja	
11	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.68	7400 m³/h	0.18	0.20	Ja	250 Pa	181 Pa	0.59	Ja	
12	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.69	7020 m³/h	0.22	0.20	Nein	350 Pa	185 Pa	0.59	Ja	
13	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.58	6000 m³/h	0.31	0.20	Nein	655 Pa	0 Pa	0.57	Ja	
14	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.50	3050 m³/h	0.26	0.20	Nein	250 Pa	215 Pa	0.51	Nein	
15	Einfache Klimaanlage				0.61	10500 m³/h	0.34	0.35	Ja	350 Pa	393 Pa	0.63	Nein	
19	Einfache Klimaanlage				0.56	4000 m³/h	0.34	0.35	Ja	250 Pa	436 Pa	0.54	Ja	
21	Einfache Klimaanlage				0.62	12000 m³/h	0.30	0.35	Ja	250 Pa	423 Pa	0.65	Nein	
22	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.57	12000 m³/h	0.35	0.20	Nein	300 Pa	406 Pa	0.65	Nein	
23	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.53	2800 m³/h	0.22	0.20	Nein	250 Pa	178 Pa	0.51	Ja	
24	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.67	6600 m³/h	0.31	0.20	Nein	300 Pa	441 Pa	0.58	Ja	
26	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.66	4300 m³/h	0.31	0.20	Nein	300 Pa	426 Pa	0.54	Ja	
28	Einfache Lüftungsanlage				0.61	9900 m³/h	0.32	0.14	Nein	400 Pa	311 Pa	0.63	Nein	
29	Einfache Lüftungsanlage				0.60	15500 m³/h	0.33	0.14	Nein	320 Pa	403 Pa	0.67	Nein	
30	Einfache Klimaanlage				0.70	21500 m³/h	0.41	0.35	Nein	560 Pa	477 Pa	0.70	Ja	
32	Einfache Klimaanlage				0.66	7100 m³/h	0.33	0.35	Ja	430 Pa	361 Pa	0.59	Ja	
34	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.66	7000 m³/h	0.30	0.20	Nein	430 Pa	279 Pa	0.59	Ja	
35	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern	3527 m³/h	1174 W	0.33	0.48	3323 m³/h	0.35	0.20	Nein	611 Pa	0 Pa	0.52	Nein	
36	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern	4608 m³/h	1760 W	0.38	0.46	4477 m³/h	0.40	0.20	Nein	661 Pa	0 Pa	0.55	Nein	
40	Einfache Klimaanlage				0.60	8060 m³/h	0.40	0.35	Nein	300 Pa	554 Pa	0.60	Nein	
41	Einfache Klimaanlage				0.62	5090 m³/h	0.30	0.35	Ja	250 Pa	409 Pa	0.56	Ja	
42	Klimaanlage mit Luftfeuchtigkeitsregelung	5646 m³/h	1510 W	0.27	0.62	5500 m³/h	0.31	0.35	Ja	400 Pa	299 Pa	0.57	Ja	
43	Einfache Klimaanlage	14792 m³/h	2279 W	0.15	0.68	14300 m³/h	0.38	0.35	Ja	600 Pa	324 Pa	0.66	Ja	
44	Einfache Klimaanlage	46151 m³/h	25817 W	0.56	0.62	46000 m³/h	0.46	0.35	Nein	1024 Pa	0 Pa	0.70	Nein	
45	Einfache Klimaanlage	33758 m³/h	20500 W	0.61	0.64	35000 m³/h	0.41	0.35	Nein	954 Pa	0 Pa	0.70	Nein	
46	Einfache Klimaanlage	8044 m³/h	1863 W	0.23	0.65	9100 m³/h	0.32	0.35	Ja	400 Pa	349 Pa	0.62	Ja	
47	Einfache Klimaanlage				0.66	5000 m³/h	0.28	0.35	Ja	350 Pa	314 Pa	0.56	Ja	
48	Einfache Klimaanlage	19621 m³/h	9588 W	0.49	0.70	17700 m³/h	0.34	0.35	Nein	400 Pa	456 Pa	0.69	Ja	
49	Einfache Klimaanlage	8133 m³/h	3094 W	0.38	0.66	8200 m³/h	0.26	0.35	Nein	250 Pa	379 Pa	0.60	Ja	
50	Einfache Klimaanlage	2310 m³/h	594 W	0.26	0.57	2500 m³/h	0.25	0.35	Ja	250 Pa	253 Pa	0.50	Ja	
51	Einfache Klimaanlage	7023 m³/h	2964 W	0.42	0.65	6500 m³/h	0.36	0.35	Nein	847 Pa	0 Pa	0.58	Ja	
52	Einfache Klimaanlage	4381 m³/h	1365 W	0.31	0.56	3500 m³/h	0.23	0.35	Ja	455 Pa	0 Pa	0.52	Ja	
53	Einfache Klimaanlage	6984 m³/h	1176 W	0.17	0.62	9000 m³/h	0.22	0.35	Ja	250 Pa	243 Pa	0.62	Ja	
54	Einfache Klimaanlage	4519 m³/h	897 W	0.20	0.59	4600 m³/h	0.23	0.35	Ja	250 Pa	237 Pa	0.55	Ja	
55	Einfache Klimaanlage				0.66	5110 m³/h	0.27	0.35	Ja	240 Pa	405 Pa	0.56	Ja	
56	Einfache Klimaanlage				0.66	5000 m³/h	0.29	0.35	Ja	270 Pa	423 Pa	0.56	Ja	
57	Einfache Klimaanlage				0.65	5000 m³/h	0.26	0.35	Ja	350 Pa	247 Pa	0.56	Ja	
59	Einfache Klimaanlage				0.65	6000 m³/h	0.23	0.35	Ja	350 Pa	181 Pa	0.57	Ja	
60	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.64	9000 m³/h	0.26	0.20	Nein	350 Pa	244 Pa	0.62	Ja	
61	Lüftungsanlage mit Lufterwärmern				0.65	4000 m³/h	0.25	0.20	Nein	350 Pa	228 Pa	0.54	Ja	



Abluft														
Messdaten			Berechnung / Auslegung											
Nr.	ABL Volumenstrom Messung	ABL Leistungsaufnahme Messung	ABL SFP Messung	Systemwirkungsgrad	Volumenstrom	SFP Auslegung	SFP Grenzwert	SFP Messung eingehalten?	SFP Auslegung eingehalten?	Druckverlust extern	Druckverlust intern	GW Gesamtwirkungsgrad	GW Wirkungsgrad eingehalten?	Baujahr
1				0.54	5120 m³/h	0.32	0.20	Nein	Nein	624 Pa	0 Pa	0.56	Nein	2010
2				0.59	9390 m³/h	0.28	0.20	Nein	Nein	587 Pa	0 Pa	0.62	Nein	2010
4				0.59	6400 m³/h	0.25	0.20	Nein	Nein	350 Pa	180 Pa	0.58	Ja	2008
6				0.55	4400 m³/h	0.26	0.35	Ja	Ja	350 Pa	171 Pa	0.55	Ja	2008
7				0.58	4550 m³/h	0.20	0.20	Ja	Ja	200 Pa	207 Pa	0.55	Ja	2009
8				0.58	2575 m³/h	0.20	0.14	Nein	Nein	200 Pa	210 Pa	0.50	Ja	2009
10				0.70	10910 m³/h	0.28	0.14	Nein	Nein	400 Pa	296 Pa	0.64	Ja	2014
11				0.69	8000 m³/h	0.21	0.20	Nein	Nein	250 Pa	268 Pa	0.60	Ja	2011
12				0.69	7020 m³/h	0.21	0.14	Nein	Nein	350 Pa	178 Pa	0.59	Ja	2011
13				0.59	6000 m³/h	0.29	0.14	Nein	Nein	621 Pa	0 Pa	0.57	Ja	2009
14				0.50	2850 m³/h	0.22	0.14	Nein	Nein	250 Pa	143 Pa	0.51	Nein	2009
15				0.59	10500 m³/h	0.28	0.20	Nein	Nein	350 Pa	249 Pa	0.63	Nein	2007
19				0.51	3400 m³/h	0.21	0.20	Nein	Nein	250 Pa	139 Pa	0.52	Nein	2007
21				0.61	12000 m³/h	0.24	0.20	Nein	Nein	250 Pa	285 Pa	0.65	Nein	2007
22				0.55	12000 m³/h	0.31	0.14	Nein	Nein	300 Pa	308 Pa	0.65	Nein	2005
23				0.53	3000 m³/h	0.22	0.14	Nein	Nein	270 Pa	154 Pa	0.51	Ja	2005
24				0.66	6600 m³/h	0.26	0.14	Nein	Nein	300 Pa	302 Pa	0.58	Ja	2012
26				0.63	4300 m³/h	0.26	0.14	Nein	Nein	300 Pa	284 Pa	0.54	Ja	2012
28				0.60	9400 m³/h	0.29	0.14	Nein	Nein	400 Pa	222 Pa	0.62	Nein	2006
29				0.60	15500 m³/h	0.30	0.14	Nein	Nein	340 Pa	305 Pa	0.67	Nein	2007
30				0.70	21500 m³/h	0.34	0.20	Nein	Nein	410 Pa	448 Pa	0.70	Nein	2011
32				0.64	6800 m³/h	0.29	0.20	Nein	Nein	360 Pa	299 Pa	0.59	Ja	2011
34				0.65	7000 m³/h	0.26	0.14	Nein	Nein	350 Pa	251 Pa	0.59	Ja	2011
35	3085 m³/h	1084 W	0.35	0.48	3362 m³/h	0.34	0.14	Nein	Nein	594 Pa	0 Pa	0.52	Nein	2010
36	4539 m³/h	1562 W	0.34	0.46	4491 m³/h	0.40	0.14	Nein	Nein	656 Pa	0 Pa	0.55	Nein	2011
40				0.56	7900 m³/h	0.28	0.20	Nein	Nein	300 Pa	270 Pa	0.60	Nein	2007
41				0.58	4770 m³/h	0.22	0.20	Nein	Nein	300 Pa	166 Pa	0.55	Ja	2006
42	5524 m³/h	1174 W	0.21	0.63	5500 m³/h	0.25	0.20	Nein	Nein	400 Pa	177 Pa	0.57	Ja	2009
43	12595 m³/h	3561 W	0.28	0.64	14000 m³/h	0.36	0.35	Ja	Nein	550 Pa	275 Pa	0.66	Nein	2009
44	45881 m³/h	14200 W	0.31	0.64	46000 m³/h	0.31	0.20	Nein	Nein	725 Pa	0 Pa	0.70	Nein	2011
45	35206 m³/h	17265 W	0.49	0.65	35000 m³/h	0.30	0.20	Nein	Nein	705 Pa	0 Pa	0.70	Nein	2011
46	7601 m³/h	1757 W	0.23	0.64	9100 m³/h	0.27	0.20	Nein	Nein	400 Pa	227 Pa	0.62	Ja	2010
47				0.66	5000 m³/h	0.26	0.20	Nein	Nein	350 Pa	275 Pa	0.56	Ja	2008
48	19313 m³/h	8720 W	0.45	0.68	17700 m³/h	0.30	0.20	Nein	Nein	400 Pa	329 Pa	0.69	Nein	2010
49	7985 m³/h	2678 W	0.34	0.66	8200 m³/h	0.24	0.20	Nein	Nein	250 Pa	333 Pa	0.60	Ja	2012
50	2425 m³/h	578 W	0.24	0.60	2500 m³/h	0.20	0.20	Nein	Ja	250 Pa	177 Pa	0.50	Ja	2012
51	6525 m³/h	2735 W	0.42	0.65	6500 m³/h	0.33	0.20	Nein	Nein	768 Pa	0 Pa	0.58	Ja	2009
52	4995 m³/h	1295 W	0.26	0.54	3500 m³/h	0.21	0.20	Nein	Nein	417 Pa	0 Pa	0.52	Ja	2012
53	8286 m³/h	1500 W	0.18	0.60	9000 m³/h	0.23	0.20	Ja	Nein	250 Pa	243 Pa	0.62	Nein	2013
54	5436 m³/h	980 W	0.18	0.59	4600 m³/h	0.18	0.20	Ja	Ja	250 Pa	134 Pa	0.55	Ja	2013
55				0.62	5110 m³/h	0.21	0.20	Nein	Nein	190 Pa	271 Pa	0.56	Ja	2013
56				0.64	5000 m³/h	0.24	0.20	Nein	Nein	290 Pa	261 Pa	0.56	Ja	2013
57				0.64	6000 m³/h	0.26	0.20	Nein	Nein	350 Pa	239 Pa	0.57	Ja	2008
59				0.66	6000 m³/h	0.19	0.20	Ja	Ja	350 Pa	106 Pa	0.57	Ja	2008
60				0.64	9000 m³/h	0.25	0.14	Nein	Nein	350 Pa	234 Pa	0.62	Ja	2009
61				0.65	4000 m³/h	0.24	0.14	Nein	Nein	350 Pa	213 Pa	0.54	Ja	2009

(Insgesamt wurden 61 Anlagen erfasst, jedoch erfüllten nur 46 Anlagen die Kriterien der im Kapitel 5.1 beschriebenen Auswahlkriterien)

12.2 Messprotokolle (Muster Anlage Nr. 46)

Alle gemessenen Anlagen haben die Auswertung ihrer Messdaten in folgender Form erhalten:

Fachhochschule Nordwestschweiz

Hochschule Luzern

Hour 9, September 2015
Seite 2/6

Datenauswertung

Die Messungen wurden mit neuen Filtern durchgeführt. Die Volumenströme können anhand der gemessenen Wirkdrücke der Messdüse am Ventilator berechnet werden. Die Leistungsaufnahme wurde am Eingang des Frequenzumformers gemessen, um die damit verbundenen Verluste ebenfalls zu berücksichtigen. Die Messdaten der Wirkdrücke und der Aufnahmleistung entsprechen den Mittelwerten über fünf bis zehn Minuten, in welchen konstante Bedingungen geherrscht haben. Alle übrigen Größen wurden über Einzelmessungen ermittelt.

Tabelle 1 : Messresultate Auslegungspunkt

Groesse	Symbol	Einheit	Zuluft	Abuft
			Planung	Messung
Druckverluste extern	Δp_{ext}	Pa	400	400
Förderdruck statisch (Filter neu)	Δp_{stat}	Pa	749	516
Volumenstrom	q_v	m^3/h	9100	8044
Dreitzahl	n	U/min		9100
Ei. Aufnahmleistung	P_{el}	W		7601
Systemwirkungsgrad statisch	η_{stat}	[]	0.65	0.62*
Grenzwert SFP	GW_{SFP}	$W/(m^3/h)$	0.35	0.20
Spez. Ventilatorleistung SFP	P_{SFP}	$W/(m^3/h)$	0.32	0.23
*Errechneter Systemwirkungsgrad aus den Messdaten. (Leistungsaufnahme, Volumenstrom und Druckverlust)				

Vergleich der Resultate SFP

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Resultate der Messung im Vergleich zur Berechnung mit den Auslegungsdaten.

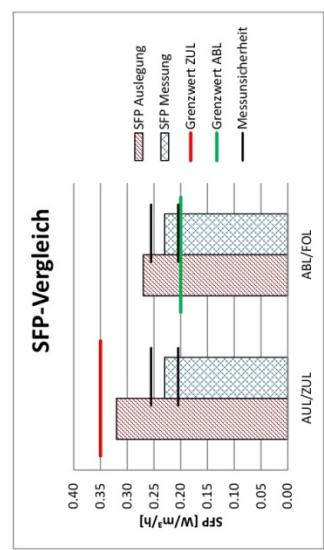
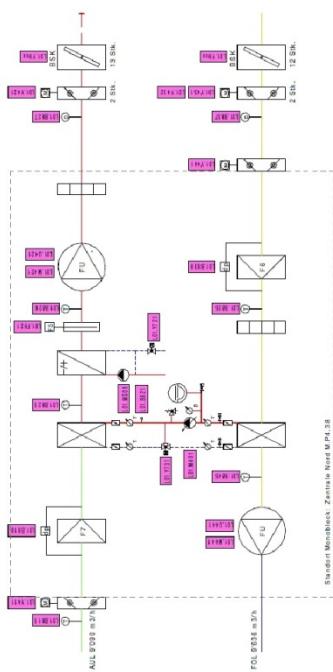


Bild 1: Vergleich der Resultate

Elektroeffizienz von Lüftungsanlagen Auswertung der Messdaten im Rahmen des BFE-Projekts EFFILUFT

Anlagendaten

Objekt	
Anlage	7-Air
Fabrikat	Nein
Spezielle Anforderungen	Einfache Klimaanlage
AnlagenTyp (SIA 380/1)	
Datum der Messung	05.03.2015



Messung

Die Messung wurde für einen zufälligen Betriebspunkt und für den maximalen Volumenstrom durchgeführt. Der maximale Volumenstrom entspricht dem Auslegungszustand der Anlage bzw. dem grössten Volumenstrom, welcher die Anlage im gegebenen Betrieb fördert. Für die Messung wurden die Sollwerte der Volumenstromregler auf 100% gesetzt, sodass eine maximale Anordnung (100% Gleichzeitigkeit) der einzelnen Stränge simuliert wurde. Die Anlage wurde durch das Fachpersonal des Anlagebetreibers auf die gewünschten Messzustände eingestellt, welche durch die HS LU nicht kontrolliert oder beeinflusst werden konnten.

Tabelle 2: Einzelanforderungen

Die Norm SIA 382/1:2007 sieht vor, dass anstelle der Grenzwerte für die spezifische Ventilatorleistung (SFP) auch Einzelanforderungen bezüglich Druckverlust, Systemwirkungsgrad und Strömungsgeschwindigkeit eingehalten werden können. Die Grenzwerte für Systemwirkungsgrade sind beim Bespielpunkt des jeweiligen Ventilators und unter Prüfstandbedingungen definiert. Dieser Grenzwert ist somit lediglich ein Indiz für die Qualität des Ventilators, sagt jedoch nichts über den effektiven Einsatz des Ventilators aus. Der Vergleich des aus den Messdaten ermittelten Systemwirkungsgrades mit dem Grenzwert ergibt jedoch einen Einblick in das Potential des eingeplanten Ventilators. Die Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeiten ist nicht Gegenstand des Projekts und wurde somit nicht betrachtet.

Tabelle 3: Messresultate Betriebspunkt

Groesse	Einheit	Grenzwert SIA 382/1	Planungswert	Ist-Wert
Druckverlust Δp_{tot} (Förderdruck)	Pa	1300	1376	1008
Systemwirkungsgrad ABU/FOL	-	-	0.64	0.59
Systemwirkungsgrad AUL/ZUL	-	-	0.65	0.62

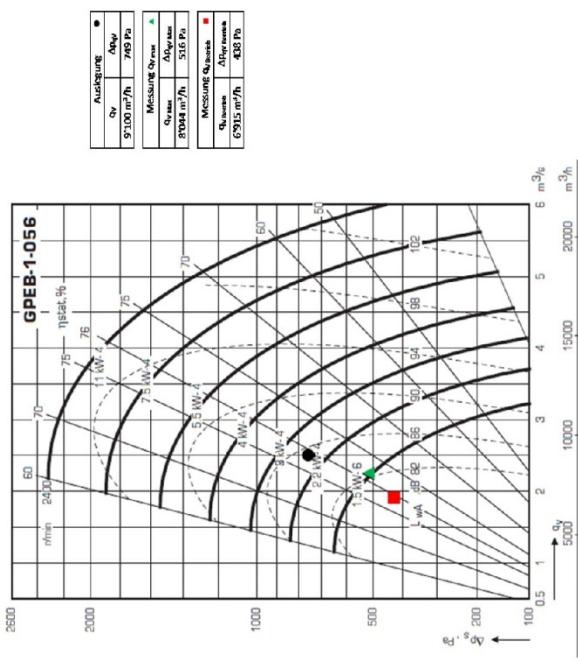
Betriebspunkt

Tabelle 3 zeigt die Messresultate für einen regulären Betriebsfall der Anlage.

Tabelle 3: Messresultate Betriebspunkt

Groesse	Symbol	Einheit	Zulässig	Abluft
Förderdruck	Δp_{tot}	Pa	438	436
Volumenstrom	q_v	m^3/h	6915	6573
Ei. Aufnahmeeinstellung	P_{el}	W	1405	1394

* SFP bei Betriebspunkt darf nicht mit dem Grenzwert nach SIA382/1: 2007 verglichen werden, da dieser bei Auslegungsbedingungen definiert ist.

Ventilatorkennlinie
In den nachfolgenden Bildern sind die untersuchten Betriebspunkte für die Auslegung, die Messung bei maximalem Volumenstrom und die Messung bei Betriebszustand eingezeichnet. Bild 2 zeigt den Zuluftventilator, Bild 3 den Abluftventilator.

Bild 2: Druck-Volumenstrom-Kennlinie ZUL-Ventilator

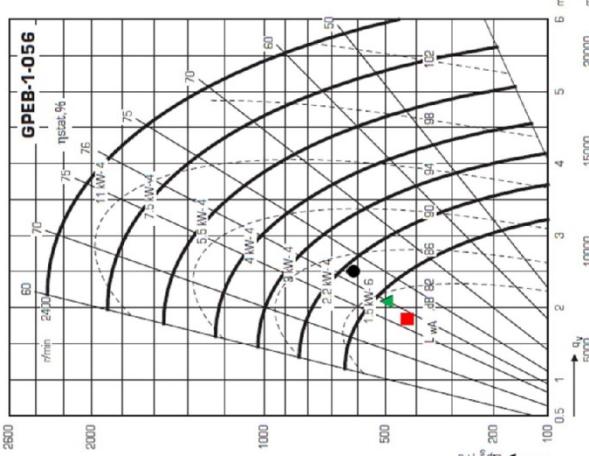


Bild 3: Druck-Volumenstrom-Kennlinie ABL-Ventilator

Messunsicherheit

Bei der Beurteilung der Resultate muss eine Messunsicherheit berücksichtigt werden. Für die Messung des Volumenstroms mittels Wirkdruckverfahren bei der Einströmstelle, kann mit einer Auslegungsaufnahme von ca. -10% auf den berechneten Volumenstrom gerechnet werden. Die Lesungsaufnahme fällt mit ungefähr 3% vom Messwert kleiner aus. Bezogen auf den SFP ergibt das eine Unsicherheit von $\pm 11\%$. Die Messung der Druckverluste gestatte sich teilweise etwas umständlicher. Deshalb muss bei diesen Werten eine höhere Messunsicherheit von 15% angenommen werden.

Fazit

Beide Ventilatoren weisen gemäss den Berechnungen einen tieferen SFP-Wert auf als bei den Auslegungsberechnungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anlage bereits optimiert wurde. Die Reduktion der Volumenströme bewirkt wiederum eine Reduktion der Druckverluste, was sich bei den elektrischen Leistungsaufnahme positiv bemerkbar macht. Die Abbildungen der Ventilatorkennlinien zeigen auf, dass trotz neuen Betriebspunkten keine Einbuße des Ventilatorwirkungsgrades resultiert. Dies macht sich auch bei der Berechnung des Systemwirkungsgrades bemerkbar, welcher sich nur geringfügig vom berechneten Wert aus den Auslegungsdaten unterscheidet.

Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudedynamik ZIG
Urs Greber
Bachelor in Gebäudetechnik HUKS
Assistent
urs.greber@hslu.ch



12.3 Zeitprofil Norm-Tag

Zeitprofile für Sollwert Profil

T5 C513 L03 Mehrzonenanlage Hörsäle

Nominal volumetric flow		6048 m³/h		Nominal volumetric flow		3690 m³/h		Nominal volumetric flow		6048 m³/h		
Max		70 %	<th>Max</th> <td><th>69 %</th><td><th>Max</th><td><th>70 %</th><td></td></td></td></td>	Max	<th>69 %</th> <td><th>Max</th><td><th>70 %</th><td></td></td></td>	69 %	<th>Max</th> <td><th>70 %</th><td></td></td>	Max	<th>70 %</th> <td></td>	70 %		
Max		4234 m³/h		Max	<th>2546 m³/h</th> <td><th>Max</th><td><th>4234 m³/h</th><td></td></td></td>	2546 m³/h	<th>Max</th> <td><th>4234 m³/h</th><td></td></td>	Max	<th>4234 m³/h</th> <td></td>	4234 m³/h		
MP5_MP6			q_v [m³/h]	q_v [%]	MP3_MP4			q_v [m³/h]	q_v [%]	MP1_MP2		
0.00 h	6.00 h	0	0	0	0.00 h	6.00 h	0	0	0	0.00 h	6.00 h	0
6.00 h	7.00 h	2964	70	6.00 h	7.00 h	1528	60	6.00 h	7.00 h	2964	70	
7.00 h	7.30 h	0	0	7.00 h	7.30 h	0	0	7.00 h	7.30 h	0	0	
7.30 h	7.45 h	1693	40	7.30 h	7.45 h	1018	40	7.30 h	7.45 h	1900	45	
7.45 h	8.30 h	0	0	7.45 h	8.30 h	0	0	7.45 h	8.30 h	0	0	
8.30 h	8.50 h	2455	58	8.30 h	9.10 h	1400	55	8.30 h	10.10 h	1693	40	
8.50 h	9.10 h	2159	51	9.10 h	9.50 h	1451	57	10.10 h	10.20 h	2964	70	
9.10 h	10.10 h	2074	49	9.50 h	10.10 h	1400	55	10.20 h	12.15 h	2000	47	
10.10 h	10.20 h	2500	59	10.10 h	10.20 h	1528	60	12.15 h	12.45 h	2964	70	
10.20 h	10.45 h	1693	40	10.20 h	11.00 h	1197	47	12.45 h	13.15 h	0	0	
10.45 h	11.00 h	2074	49	11.00 h	11.40 h	1120	44	13.15 h	13.45 h	2000	47	
11.00 h	11.30 h	1905	45	11.40 h	11.50 h	1069	42	13.45 h	14.40 h	1693	40	
11.30 h	12.15 h	2032	48	11.50 h	12.15 h	1146	45	14.40 h	14.50 h	2500	59	
12.15 h	12.45 h	2964	70	12.15 h	12.45 h	1528	60	14.50 h	16.45 h	1693	40	
12.45 h	13.15 h	0	0	12.45 h	13.15 h	0	0	16.45 h	17.15 h	2600	61	
13.15 h	13.45 h	1778	42	13.15 h	14.40 h	1018	40	17.15 h	17.45 h	1693	40	
13.45 h	14.40 h	1693	40	14.40 h	14.50 h	1528	60	17.45 h	18.30 h	0	0	
14.40 h	14.50 h	2964	70	14.50 h	16.45 h	1018	40	18.30 h	18.45 h	1700	40	
14.50 h	16.45 h	1693	40	16.45 h	17.15 h	1528	60	18.45 h	20.00 h	2964	70	
16.45 h	17.15 h	2964	70	17.15 h	17.45 h	1018	40	20.00 h	21.00 h	4234	100	
17.15 h	17.45 h	1693	40	17.45 h	18.30 h	0	0	21.00 h	23.59 h	0	0	
17.45 h	19.00 h	0	0	18.30 h	19.00 h	1018	40				0	
19.00 h	19.30 h	1693	40	19.00 h	20.00 h	1528	60				0	
19.30 h	20.00 h	2964	70	20.00 h	21.00 h	2546	100				0	
20.00 h	21.00 h	4234	100	21.00 h	0.00 h	0	0				0	
21.00 h	0.00 h	0	0				0				0	