

Schlussbericht, 05. Dezember 2017

Energieeffiziente Ventilatoren

Potenzialanalyse und Massnahmenkatalog



Autor

Marc Hauser, BKW ANTEC Group

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt ist alleine der Autor verantwortlich.**

BKW ANTEC Group
Energieberatung, Viktoriaplatz 2, 3013 Bern
Telefon: 058 477 50 48
energieberatung@bkw.ch, www.bkw.ch/energieberatung

KURZFASSUNG

In der Schweiz werden jährlich rund 2.0 TWh Strom (ca. 3.5 % des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs) für die Luftförderung in raumlufttechnischen Anlagen verwendet. Viele Anlagen wurden vor mehreren Jahrzehnten gebaut und sind weder auf dem aktuellen Stand der Technik, noch erfüllen sie die aktuell geltenden normativen Anforderungen. Entsprechend besteht bei der energetischen Sanierung der bestehenden Anlagen Optimierungspotenzial. Die vorliegende Studie zeigt das Optimierungspotenzial für die verschiedenen Wirtschaftszweige anhand eines Massnahmenkatalogs auf.

Anhand von 25 untersuchten Lüftungsanlagen unterschiedlicher Baujahre wurde die aktuelle Situation in der Praxis analysiert. Grundlegend für die Ermittlung des Optimierungspotenzials sind die geltenden rechtlichen und normativen Anforderungen sowie der aktuelle Stand der Technik.

Potenzial wurde hauptsächlich im Bereich der energetischen Betriebsoptimierung, in der bedarfsabhängigen Regelung sowie im Einsatz von effizienten Ventilator-, Motor-, Antriebs- und Filtertechnologien identifiziert. Das Einsparpotenzial bei der Umsetzung der wirtschaftlichen Massnahmen im aktuellen Gebäudepark beträgt je nach Branche zwischen 42 und 50 % für eine Summe von 909 GWh pro Jahr über alle Branchen hinweg. Dabei erzielt die konsequente Durchführung von Betriebsoptimierungen die höchste Wirkung mit einem Gesamtpotenzial von 663 GWh pro Jahr. Werden die wirtschaftlichen Massnahmen erst bei Ersatzinvestitionen nach kompletter Amortisation des bestehenden Anlagenparks systematisch umgesetzt, könnten bei einem Erneuerungszyklus sämtlicher Lüftungsanlagen jährlich 1'197 MWh eingespart werden.

Aktuell wird das Gesamtoptimierungspotenzial durch die Umsetzung des Grossverbraucherartikels in den meisten Kantonen, die natürliche Erneuerung von alten Anlagen, diverse Förderprogramme sowie durch Eigeninitiative von Anlagenbesitzern teilweise ausgeschöpft. Die Einführung der überarbeiteten Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014 [1]) stellt die Grundlage für eine systematische Umsetzung von Betriebsoptimierungen in stromintensiven Betrieben dar. Ein konsequenter Vollzug ist dabei eine Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser Massnahme. Ein weiterer Anteil des ermittelten Optimierungspotenzials setzt weitere Massnahmen und insbesondere eine konsequente Umsetzung der geltenden normativen Rahmenbedingungen beim Neu- oder Umbau von Anlagen voraus. Zusätzlich zu regulatorischen Massnahmen könnten gezielte finanzielle Anreize die Umsetzung von weiteren unwirtschaftlichen Massnahmen und von vorzeitigen Erneuerungen beschleunigen.

RÉSUMÉ

Les installations aérauliques consomment en Suisse environ 2.0 TWh par année pour la pulsion de l'air (env. 3.5 % de la consommation totale d'électricité en Suisse). Un grand nombre d'installations de ventilation a été construit il y a plusieurs décennies, ne correspond plus à l'état actuel de la technique et ne répond plus aux normes actuellement en vigueur. La rénovation énergétique recèle ainsi un potentiel d'optimisation. La présente étude met en évidence le potentiel d'optimisation dans les différentes branches économiques à l'aide d'un catalogue de mesures.

La situation actuelle dans la pratique été analysé suite au relevé de 25 installations de ventilation existantes ayant été construites à des moments différents. Le potentiel d'optimisation a été évalué sur la base des exigences légales et normatives en vigueur ainsi que sur la base de l'état actuel de la technique.

Un potentiel a notamment été identifié au niveau de l'optimisation d'exploitation énergétique, de la régulation en fonction des besoins et au niveau de l'utilisation de ventilateurs, de moteurs, de systèmes de transmissions et de filtres efficaces. La mise en œuvre des mesures rentables sur l'ensemble du parc de bâtiments actuel permet une économie d'énergie qui se situe entre 42 % à 50 % en fonction de la branche économique pour un total de 909 GWh par année. La réalisation conséquente d'optimisations d'exploitation recèle le potentiel d'économies le plus important avec un total de 663 GWh par année. Si les mesures d'optimisations sont systématiquement mises en œuvre lors d'investissements de remplacement, l'énergie électrique économisée suite à un cycle de renouvellement de l'ensemble des installations de ventilation après amortissement complet des infrastructures se monterait à 1'197 MWh par année.

Le potentiel global d'optimisation est actuellement partiellement exploité par la mise en œuvre de l'article sur les gros consommateurs dans la plupart des cantons, le renouvellement naturel des anciennes installations, différents programmes d'incitation ainsi que par la propre initiative de propriétaires d'installations. L'introduction du modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014 [1]) constitue une base permettant de prescrire la réalisation systématique d'optimisations d'exploitation au sein des entreprises grandes consommatrices d'électricité. Une exécution conséquente de cette prescription est une condition requise afin de garantir que l'effet escompté soit atteint. Une autre part du potentiel global d'optimisation identifié repose sur d'autres mesures et notamment sur l'application conséquente des normes en vigueur dans le cadre de constructions nouvelles et de transformations. En parallèle aux mesures de régulation, des incitations financières ciblées peuvent permettre d'accélérer la mise en œuvre d'autres mesures non rentables à l'aide du renouvellement anticipé d'installations.

1 INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung.....	3
Résumé.....	4
2 Verzeichnisse	7
2.1 Abbildungen.....	7
2.2 Tabellen.....	8
2.3 Formeln	9
2.4 Glossar und Abkürzungen.....	9
3 Auftrag	11
3.1 Ausgangslage	11
3.2 Abgrenzung.....	12
3.3 Vorgehen.....	13
3.3.1 Branchen und Gebäudekategorien.....	14
3.3.2 Berechnung des gesamtschweizerischen Verbrauchs	14
3.3.3 Aktueller Bestand.....	14
3.3.4 Maximal erreichbare Effizienz.....	14
3.3.5 Praxiserfahrung.....	15
3.3.6 Massnahmenkatalog und Optimierungspotenzial.....	15
3.3.7 Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	15
3.4 Datengrundlage.....	15
4 Aktuelle Situation	16
4.1 Gesamtschweizerischer Verbrauch.....	16
4.1.1 Eigenes Berechnungsmodell	16
4.1.2 Gebäudeparkmodell.....	17
4.1.3 Modellevergleich	18
4.1.4 Vergleich mit weiteren Studien	19
5 Aktueller Bestand.....	19
5.1 Aufgenommene Anlagen	19
5.1.1 Motorwirkungsgrad.....	20
5.1.2 Spezifische Ventilatorleistung (SFP).....	20
5.1.3 Luftvolumenströme	22
5.1.4 Betriebszeiten und Volllaststunden.....	24
6 Stand der Technik.....	25
6.1 Gesetzliche und normative Anforderungen	25
6.2 Technologien	26

6.2.1 Ventilator.....	26
6.2.2 Motor und Motorsteuerung.....	26
6.2.3 Frequenzumrichter	27
6.2.4 Transmission	28
6.2.5 Regelung	28
6.2.6 Filter	28
6.3 Gesamteffizienz nach aktuellem Stand der Technik	29
6.3.1 Normative Zielwerte	29
6.3.2 Hocheffiziente Komponenten	31
7 Optimierungspotenzial	33
7.1 Massnahmenkatalog.....	33
7.1.1 Ersatz Ventilatereinheit.....	33
7.1.2 Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung	33
7.1.3 Druckoptimierte Regelung	34
7.1.4 Filter-Ersatz	34
7.1.5 Betriebsoptimierung	35
7.2 Gesamtschweizerisches Potenzial energetische Optimierungen	36
7.3 Gesamtschweizerisches Potenzial Ersatzinvestitionen	38
8 Chancen und Hemmnisse	40
8.1 Wirtschaftliche Massnahmen oft nicht umgesetzt	40
8.2 Anlagedimensionierung	40
8.3 Politische und normative Rahmenbedingungen.....	40
9 Fazit und Empfehlung.....	41
10 Literatur- und Quellenverzeichnis.....	43
Anhang.....	45
I. Flächenanteile der Raumnutzungen nach SIA 2024:2015	45
II. Aufgenommene Anlagen	46
II.I Baujahr	46
II.II Motorenleistung	46
II.III Branchen	46
II.IV Primäre Raumnutzung	47
III. Potenzialberechnung	48
III.I Eingesetzte Berechnungsparameter	48

2 VERZEICHNISSE

2.1 ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Vorgehen.....	13
Abbildung 2: Spezifischer Stromverbrauch der belüfteten Energiebezugsfläche: nach Gebäudeparkmodell (TEP Energy, Spezialauswertung Projekt GEPAMOD [3]), nach eigenem Berechnungsmodell, basierend auf SIA 2024:2015 (Bestandeswerte und Standardwerte).....	19
Abbildung 3: Motorwirkungsgrad der aufgenommenen Anlagen.....	20
Abbildung 4: Gemessene spezifische Ventilatorleistungen und Grenzwerte nach SIA 382/1:2014.....	21
Abbildung 5: Einhaltung der SFP-Grenzwerte bei den gemessenen Anlagen, nach Anlagekategorie.....	22
Abbildung 6: Abweichung der SFP-Messwerte zu den Grenzwerten nach SIA 382/1:2014, nach Baujahr.....	22
Abbildung 7: Gemessene Luftvolumenströme im Normalbetrieb, in Relation zu den Auslegungswerten nach SIA 2024:2015.....	23
Abbildung 8: Abweichung der gemessenen Volumenströme zu den Auslegungswerten nach SIA 2024:2015 in Relation zum Baujahr der Anlage...	24
Abbildung 9: Aufgenommene Volllaststunden, in Relation zu den Zielwerten für die entsprechende Raumnutzung nach SIA 2024:2015.....	25
Abbildung 10: Wirkungsgrad von 4-poligen Asynchronmotoren. Daten aus IEC 60034-30-1:2014.....	27
Abbildung 11: Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern der Marke Danfoss, Serie F102. Daten aus dem Ersteller-Planungstool «ecoSmart».....	28
Abbildung 12: Energieverbrauch von Filtern. Filterklassen aus EN 779, Effizienzklassen und Jahresverbrauch aus EUROVENT 4/21 (6'000 h/a, 3'400 m ³ /h).....	29
Abbildung 13: Spezifische Ventilatorleistung nach Norm SIA 382/1:2014 (Zielwerte) und berechnet aus den Referenzwerten in der EU-Verordnung Nr. 327/2011 nach Formel 4.....	31
Abbildung 14: Vergleich theoretische Systemeffizienz mit hocheffizienten Bauteilen, Referenzwerten und Minimalanforderungen nach EU-Verordnung Nr. 327/2011.....	32
Abbildung 15: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahmen für bestehende Anlagen, prozentual.....	37
Abbildung 16: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme für bestehende Anlagen.....	38

Abbildung 17: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme bei Ersatzinvestitionen, absolute Zahlen. 39

2.2 TABELLEN

Tabelle 1: Gebäudekategorien. 14

Tabelle 2: Energiebezugsfläche nach Gebäudekategorie. Quellen: Statistische Flächenangaben (Energiebezugsfläche) aus der «Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2015 nach Verwendungszwecken» [15]. Detaillierte Flächenaufteilung anhand der Studie «Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen – Perspektiven bis 2035» [16] interpoliert. 16

Tabelle 3: Belüftete Energiebezugsfläche pro Gebäudekategorie. Schätzung Ausrüstungsgrad basierend auf der Studie «Potenzialschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik» [4] und Schätzungen für das ProKilowatt-Programm «Proéla» [17]. Anteil belüftete Fläche nach SIA 2024:2015 und angenommene Raumnutzungsaufteilung nach Anhang I... 17

Tabelle 4: Jährlicher Stromverbrauch für den gesamten Gebäudepark 2015. Quelle für den spezifischen Stromverbrauch pro belüftete Fläche: SIA 2024:2015 (Bestandeswerte) für den Raumnutzungsmix nach Anhang I. 17

Tabelle 5: Gesamtschweizerischer Stromverbrauch von Lüftungsanlagen im Jahr 2015. Quelle: TEP Energy, Spezialauswertung Projekt GEPAMOD [3]. 18

Tabelle 6: Ermittlungsmethoden für die Berechnung der spezifischen Ventilatorleistung..... 20

Tabelle 7: Übersicht über die geltenden gesetzlichen und normativen Anforderungen im Lüftungsbereich..... 26

Tabelle 8: Effizienz von Ventilatoreinheiten (ohne Frequenzumrichter) mit hocheffizienten Bauteilen..... 32

Tabelle 9: Optimierungspotenzial Ersatz Ventilatoreinheit. 33

Tabelle 10: Optimierungspotenzial Nachrüstung Frequenzumrichter. 34

Tabelle 11: Optimierungspotenzial druckoptimierte Regelung 34

Tabelle 12: Optimierungspotenzial Filter-Ersatz. 35

Tabelle 13: Optimierungspotenzial Betriebsoptimierung..... 35

Tabelle 14: Parameter für die Hochrechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials von bestehenden Anlagen..... 36

Tabelle 15: Globales Optimierungspotenzial nach Massnahme und Gebäudekategorie bei bestehenden Gebäuden..... 37

Tabelle 16: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme für bestehende Anlagen. 38

Tabelle 17: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme bei Ersatzinvestitionen..... 39

Tabelle 18: Baujahr der gemessenen Anlagen.....	46
Tabelle 19: Motorleistung der gemessenen Anlagen.....	46
Tabelle 20: Branchenaufteilung der gemessenen Anlagen.	46
Tabelle 21: Primäre Raumnutzung der gemessenen Anlagen.....	47

2.3 FORMELN

Formel 1: Berechnung der spezifischen Ventilatorleistung von einem Ventilator mit einem dreiphasigen Motor.....	20
Formel 2: Reduktion der Motor-Aufnahmeleistung im Teillastbereich in Bezug auf die Volumenstrom-Anpassung gemäss SIA 382/1:2014. P_{PL} : aufgenommene Leistung im Teillastbereich; P : aufgenommene Nennleistung Motor; $q_{V,PL}$: Volumenstrom im Teillastbereich; q_V : Nenn-Volumenstrom.	24
Formel 3: Gesamtwirkungsgrad (statisch) eines Radialventilators mit rückwärts gekrümmten Schaufeln in Abhängigkeit der aufgenommenen elektrischen Leistung. Effizienzgrad mit der besten auf dem Markt verfügbaren Technik. Formel und Konstanten aus EU-VO Nr. 327/2011.....	30
Formel 4: Spezifische Ventilatorleistung in Abhängigkeit des gesamten Druckverlustes.....	30
Formel 5: Globales Optimierungspotenzial einer Massnahme.....	36
Formel 6: Gesamtoptimierungspotenzial bei der Umsetzung unterschiedlicher Massnahmen.....	36

2.4 GLOSSAR UND ABKÜRZUNGEN

ABL	Abluftanlage
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
Asynchronmotor	Drehstrommotor, bei dem der Rotor asynchron mit dem Drehfeld im Stator dreht, um eine Kraft zu erzeugen
Ausrüstungsgrad	Anteil belüfteter Gebäude in einem Gebäudepark
BFE	Bundesamt für Energie
DC	Direct Current (Gleichstrom)
Dynamischer Ventilatordruck	Bezeichnet den anhand des Massenstroms, der durchschnittlichen Gasdichte am Auslass und der Ventilatorauslassfläche berechneten Druck ¹
EBF	Energiebezugsfläche, Summe der beheizten Brutto-Grundflächen von Gebäuden

¹ Definition aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011.

Energetische Optimierung	Umsetzung einer Optimierungsmaßnahme zwecks der Effizienz-Erhöhung
Ersatzinvestition	Ersatz einer Einrichtung zwecks ihrer Werterhaltung
EU	Europäische Union
FU	Frequenzumrichter: wandelt den Netzstrom elektronisch in einen Drehstrom mit variabler Frequenz um. Mit einem Frequenzumrichter kann ein Motor mit einer variablen Drehzahl gesteuert werden.
Gesamteffizienz	Verhältnis zwischen Gasleistung (statisch oder dynamisch) und elektrischer Eingangsleistung des Motors bzw. aufgenommener Leistung der Drehzahlregelung (falls vorhanden), am Energieeffizienzoptimum des Laufrads gemessen. ² Falls nicht anders explizit erwähnt, wird in diesem Bericht nur die Gesamteffizienz in Bezug auf die statische Gasleistung verwendet (statischer Wirkungsgrad).
Referenzwerte (EU-VO Nr. 327/2011)	Wertebereich für die beste der zur Zeit der Verabschiedung der Verordnung auf dem Markt verfügbaren Technik
Schlupf	Drehzahldifferenz zwischen Drehfeld im Stator und Drehzahl des Rotors in einem Motor
SFP	Specific Fan Power (spezifische Ventilatorleistung): Verhältnis der effektiven Aufnahmeleistung des Ventilatormotors zum gesamten geförderten Luftvolumenstrom ³
Statischer Ventilatordruck	Bezeichnet den Gesamtdruck des Ventilators abzüglich des anhand des Machfaktors berichtigten dynamischen Ventilatordrucks ⁴
Statischer Wirkungsgrad	Bezeichnet die Effizienz eines Ventilators auf der Grundlage des gemessenen statischen Ventilatordrucks ⁵
Transmission	Vorrichtung zwischen einem Motor und einem Ventilator, die zur Kraftübertragung dient
Ventilator	Vorrichtung mit einem rotierenden Laufrad, die zur Gasförderung dient und zu diesem Zweck eine Druckerhöhung von bis zu 10 kPa erzeugt
Ventilatoreinheit	System aus Ventilator, Transmission und Motor
VO	Verordnung
VOC	Volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen)
Volllaststunden	Zeit, die eine Lüftungsanlage bei Nennleistung betrieben werden müsste, um die gleiche Energie wie im

² Definition aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011.

³ Definition aus der Norm SIA 382/1:2014.

⁴ Definition aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011.

⁵ Definition aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011.

	Normalbetrieb während einer bestimmten Referenzdauer zu verbrauchen
Wertebereich (SIA 2024:2015 [2])	Anwendungsbereiche für die quantitativen normativen Vorgaben. Standardwerte: typische Planungswerte für Neubauten und Gesamterneuerungen. Zielwerte: angestrebte optimale Planungswerte für Neubauten und Gesamterneuerungen. Bestandswerte: typische Werte für bestehende, energetisch nicht erneuerte Gebäude mit Baujahr vor 1980.
Wh, Wh/a	Wattstunden, Wattstunden pro Jahr, i. d. R. in Kombination mit einem SI-Präfix: k (kilo), M (mega), G (giga), T (tera)
ZUL	Zuluftanlage

3 AUFTRAG

Seit 1. August 2013 gilt eine neue Effizienzvorschrift für Ventilatoren in der schweizerischen Energieverordnung. Diese hat zum Ziel, Energieeinsparungen durch Minimalanforderungen an das Inverkehrbringen von Ventilatoren zu erreichen. Neben der Untersuchung der Einsparmöglichkeiten durch Effizienzvorschriften muss die vorliegende Studie das gesamte Einsparpotenzial durch eine umfassende Systembetrachtung aufzeigen.

Die Hauptziele der Studie sind einerseits die Ermittlung des gesamten Stromverbrauchs von Ventilatoren/Lüftungsanlagen in der Schweiz und andererseits die Berechnung des Stromeinsparpotenzials für die verschiedenen Wirtschaftszweige und Technologien. Die vorliegende Studie soll einen Massnahmenkatalog hervorbringen, welcher in der Schweiz gut umsetzbar ist und der sich auf die Erfahrungen aus den bestehenden Programmen stützt. Ausserdem soll die Studie auch die Hemmnisse in den verschiedenen Wirtschaftszweigen/Technologien, ein grobes Umsetzungskonzept sowie eine Kostenwirksamkeit der Massnahmen präsentieren.

3.1 AUSGANGSLAGE

Schweizweit werden jährlich ca. 2.0 TWh elektrische Energie für die Luftförderung in raumlufttechnischen Anlagen verbraucht. Dieser Verbrauch entspricht ca. 3.5 % des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs (Quelle: [3], Referenzjahr 2015). Eine BFE-Studie zum Optimierungspotenzial in der Gebäudetechnik [4] wurde bereits veröffentlicht und zeigt auf, dass Potenzial im Bereich der anwesenheits- und bedarfsgerechten Steuerung, Regelung und energetischen Betriebsoptimierung besteht und dass diese Massnahmen in etwa die Auswirkung aufgrund des erhöhten Stromverbrauchs durch mehr Lüftungsanlagen kompensieren. Der «Erläuternde Bericht zur Revision der Energieverordnung: Vorschriften Elektrogeräte (EnV; SR 730.01)» [5] sieht vor, dass die Übernahme der EU-Effizienzanforderungen in der Schweiz zu einer Einsparung von 200 GWh/a im Jahr 2020 über alle eingesetzten Ventilatoren führen wird. Bezogen auf einen jährlichen Gesamtstromverbrauch von 5.6 TWh (2012) für sämtliche eingesetzten Ventilatoren mit einer elektrischen Eingangsleistung

von 125 W bis 500 kW,⁶ entspricht diese Einsparung ca. 3.6 % des Stromverbrauchs in der Schweiz. Die EU-Effizienzanforderungen beziehen sich jedoch exklusiv auf die Effizienz von Ventilator-Einheiten, ohne Systembetrachtung.

Die geltenden Anforderungen an die Energieeffizienz von raumlüfttechnischen Anlagen werden im Wesentlichen durch die schweizerische Energieverordnung 730.01 [6], die EU-Verordnung 327/2011 [7], die EU-Verordnung 640/2009 [8], die EU-Verordnung 1253/2014 [9], die schweizerische Norm SIA 382/1:2014 [10] sowie die kantonalen Energieverordnungen definiert. Weitere Anforderungen an die Planung von Energie- und Gebäudetechnikanlagen werden durch die Norm SIA 380/4:2006 [11] sowie durch das Merkblatt SIA 2024:2015 [2] definiert. Die BFE-Studie «EFFILUFT – Elektroeffizienz von mittleren und grossen Lüftungsanlagen» [12] zeigt jedoch anhand einer Analyse von 46 Anlagen mit Baujahr ab 2005, dass die geltende Norm SIA 382/1:2014 in den meisten Fällen nicht eingehalten wird.

Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014) [1] stellen die gemeinsame Grundlage für die kantonalen Energiegesetze dar. Die Mustervorschriften stellen Anforderungen an die Planung von Lüftungsanlagen und beinhalten eine obligatorische periodische Betriebsoptimierung von Gebäudetechnikanlagen. Betroffen sind Betriebsstätten mit einem jährlichen Elektrizitätsverbrauch von mindestens 200 MWh.

Mit der Revision des schweizerischen Energiegesetzes im Jahr 2007 wurden unter anderem wettbewerbliche Ausschreibungen für die Förderung von Stromsparmassnahmen eingeführt. Das Programm «ProKilowatt» wurde für die konkrete Umsetzung eingeführt. Neben der Förderung von einzelnen Projekten werden unter anderem folgende ProKilowatt-Programme im Lüftungsbereich durchgeführt:

- Proéla (2012–2015): Optimierung von Lüftungsanlagen ab ca. 15'000 m³/h bzw. 15 kW Leistung. Die Schwerpunkte waren die Reduktion der Volllaststunden durch stufenlose Regelungen, der Einsatz von hocheffizienten Ventilatoren und Filtern sowie der Einsatz der Luftionisation zur Reduktion der Aussenluftzufuhr.
- NEBO+ (2012–2015): Betriebsoptimierung von mittleren und grossen Lüftungsanlagen von mehr als 10'000 m³/h pro Standort.
- Küchenlüftung hotelleriesuisse (2015–2018): Nachrüstung von Lüftungen in Grossküchen (ab ca. 8'000 m³/h) mit einer bedarfsabhängigen Regelung.
- Optivent (2017–2020): Ersatz von Lüftungsanlagen oder deren Komponenten, branchenunabhängig.

3.2 ABGRENZUNG

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Luftförderung bei raumlüfttechnischen Anlagen in Gebäuden mit Personenbelegung. Wohnbauten werden vollständigshalber bei der Ermittlung des gesamtschweizerischen Energieverbrauchs berücksichtigt. Der Massnahmenkatalog (Kap. 7.1) richtet sich jedoch an Gebäude mit kommerzieller und industrieller Nutzung. Prozesslüftungen, Lüfter

⁶ Ventilatoren in Prozessanlagen, in Verkehrsinfrastrukturen etc. werden in dieser Betrachtung auch berücksichtigt.

in mobilen Apparaten, Ventilatoren in Tunnels und in Fahrzeugen, Gebläse und Kompressoren sowie Ventilatoren mit einer elektrischen Aufnahmeleistung unter 125 W sind nicht Teil dieser Studie.

Sämtliche Bauteile, die die Luftförderung direkt beeinflussen (Motor, Laufrad, Transmission, Frequenzumrichter, Steuergerät und Filter) werden in der Ermittlung des Optimierungspotenzials berücksichtigt. Das Kanalnetz und die Volumenstromregler werden nicht berücksichtigt, da eine wesentliche energetische Optimierung in der Praxis aus baulichen Gründen selten möglich oder sinnvoll ist.

Der Einsatz von thermischer Energie und die Bauteile, die zur Regelung der Lufttemperatur und Feuchtigkeit dienen, haben keinen direkten Zusammenhang mit der Luftförderung und sind auch nicht Teil dieser Studie.

3.3 VORGEHEN

Diese Studie muss einerseits Informationen zum gesamtschweizerischen Verbrauch und Optimierungspotenzial von raumlufttechnischen Anlagen hervorheben. Andererseits werden Optimierungsmassnahmen aufgezeigt, welche sich auf theoretische Betrachtungen sowie auf Praxiserfahrungen bei einzelnen Anlagen stützen. Im Rahmen dieser Studie werden zwei Betrachtungsebenen nach Abbildung 1 definiert:

- Gesamtschweizerischer Gebäudepark: Berechnung des gesamtschweizerischen Energieverbrauchs pro Gebäudekategorie.
- Einzelne Anlagen: detaillierte Betrachtung des Optimierungspotenzials von einzelnen Anlagen.

Für die Berechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials wird das Optimierungspotenzial von einzelnen Anlagen beurteilt und die entsprechenden Massnahmen auf eine gesamtschweizerische Ebene hochgerechnet (Bottom-up-Ansatz).

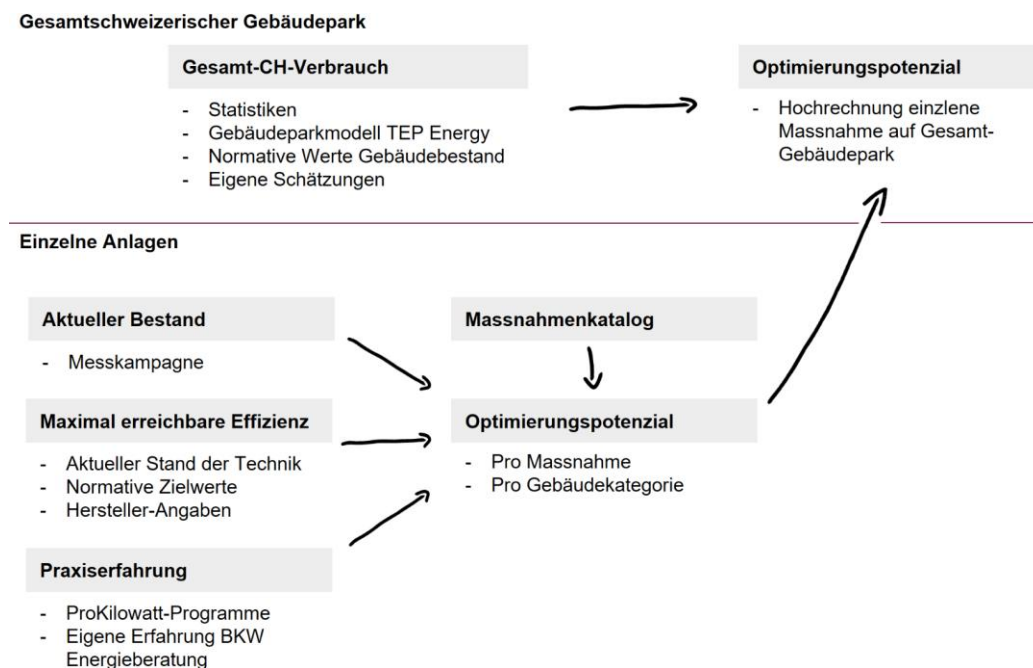


Abbildung 1: Vorgehen.

3.3.1 Branchen und Gebäudekategorien

Die Klassifizierung der Wirtschaftszweige erfolgt anhand von sechs Gebäudekategorien nach Tabelle 1. Diese Klassifizierung soll die Vielfalt des gesamten Gebäudeparks in der Schweiz sinnvoll abbilden und einen Querverweis mit vorhandenen Statistiken und Normen ermöglichen. Die Modellierung der Gebäudekategorien nach SIA 2024:2015 und nach Gebäudeparkmodell von TEP Energy (Stand GEPAMOD [13]) basiert auf unterschiedlichen angenommenen prozentualen Flächenanteilen der Raumnutzungen. Aus diesem Grund ist diese Äquivalenztabelle als Annäherung zu verstehen und kritisch zu betrachten.

Gebäudekategorie vorliegende Studie	Äquivalenz Gebäudeparkmodell Stand GEPAMOD [13]	Äquivalenz SIA 2024:2015
Haushalte	EFH MFH	Eigene Flächenaufteilung der Raumnutzungen gemäss Anhang I.
Verwaltung/Dienstleistung	Erziehungswesen andere Dienstleistungen: <i>Verkehr</i> <i>IKT</i> <i>Finanzwesen</i> <i>Öffentl. Verwaltung</i> <i>Unternehmensdienstleistungen</i> <i>Andere Dienstleistungen</i> <i>Landwirtschaft</i>	
Läden und Handel	Grosshandel Detailhandel	
Gesundheit	Gesundheitswesen Heime und Soziales	
Gastgewerbe	Beherbergung Gastronomie	
Industrie	Industrie	

Tabelle 1: Gebäudekategorien.

3.3.2 Berechnung des gesamtschweizerischen Verbrauchs

Der gesamtschweizerische Stromverbrauch für die raumlufttechnischen Anlagen wurde anhand von zwei Modellen ermittelt:

- Eigenes Berechnungsmodell, basierend hauptsächlich auf Standardverbrauchswerten aus dem Merkblatt SIA 2024:2015.
- Spezialauswertung im Rahmen des Projektes GEPAMOD [3].

Die Abweichungen aus beiden Berechnungsmodellen werden anhand von Plausibilitätsüberlegungen begründet und in Relation zu Resultaten aus weiteren Publikationen gesetzt.

3.3.3 Aktueller Bestand

Als Abbild des Ist-Zustandes im aktuellen Gebäudebestand wurde eine Messkampagne durchgeführt. Insgesamt wurden 25 Lüftungsanlagen an 11 verschiedenen Standorten aufgenommen. Die Anzahl und Aufteilung der Anlagen wurde ausgewählt, um die definierten Gebäudekategorien mit kommerzieller und industrieller Nutzung sinnvoll abzubilden. Weitere Angaben zu den aufgenommenen Anlagen sind im Anhang I aufgeführt. Die Auswertung der aufgenommenen Anlagen und der Vergleich mit aktuellen normativen Anforderungen befinden sich im Kapitel 5.1.

3.3.4 Maximal erreichbare Effizienz

Die maximal erreichbare Effizienz von Anlagekomponenten sowie von gesamten Anlagen wurde einerseits anhand einer Untersuchung der aktuell bestver-

fügbaren Technologien sowie anhand von normativen Ziel- und Referenzwerten untersucht. Detaillierte Angaben dazu befinden sich im Kapitel 6. Diese Betrachtung dient zur Abschätzung des theoretisch maximalen Optimierungspotenzials von bestehenden Anlagen.

3.3.5 Praxiserfahrung

Eine praxismgerechte Abschätzung des Optimierungspotenzials von bestehenden Anlagen stützt sich einerseits auf die Resultate der ProKilowatt-Programme «Proéla» und «Küchenlüftung hotelleriesuisse» und andererseits auf die Experten-Erfahrung der BKW-Energieberatung im Rahmen von konkreten Beratungsaufträgen für Kunden aus diversen Wirtschaftszweigen.

3.3.6 Massnahmenkatalog und Optimierungspotenzial

Die konkreten Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz von bestehenden Lüftungsanlagen werden in Massnahmenpaketen zusammengefasst. Für jede Massnahme wird das Optimierungspotenzial anhand von Daten zum aktuellen Anlagenbestand, zu der maximal erreichbaren Effizienz sowie aus eigener Praxiserfahrung geschätzt.

Das Optimierungspotenzial auf die unterschiedlichen Gebäudekategorien und das gesamtschweizerische Potenzial wird anhand von statistischen Flächenangaben hochgerechnet.

3.3.7 Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Wirtschaftlichkeit von Optimierungsmassnahmen ist in der Praxis von vielen Faktoren abhängig: jährliche Volllaststunden, Nennleistung, erwartete wirtschaftliche und technische Lebensdauer der Komponenten und Anlagen, Energiepreise (Strom sowie Brennstoffe), Investitionskosten sowie verwendete Methode zur Amortisationsrechnung.

In dieser Studie erfolgen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nach demselben Ansatz wie in der «Richtlinie Zielvereinbarungen mit dem Bund zur Steigerung der Energieeffizienz» [14]. Die Wirtschaftlichkeit von Optimierungsmassnahmen wird durch die statische Paybackdauer nach Abzug der Kosten für die Werterhaltung ermittelt. Massnahmen mit einer Paybackdauer bis zu acht Jahren werden als wirtschaftlich eingestuft.

Bei Ersatzinvestitionen und Neuanlagen werden nur die Mehrkosten für die energetische Optimierung in der Berechnung der Paybackdauer berücksichtigt.

3.4 DATENGRUNDLAGE

Diese Studie stützt sich hauptsächlich auf bereits vorhandenes Datenmaterial aus früheren Studien sowie aus statistischen Auswertungen. Der Ist-Zustand im aktuellen Gebäudebestand wurde mit einer Messkampagne abgebildet. Die gewählte Stichprobe ermöglicht eine Abschätzung des energetischen Optimierungspotenzials bei diversen Gebäudekategorien und technischen Generationen. Sie hat jedoch nicht den Anspruch, eine Hochrechnung des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs von raumlufttechnischen Anlagen mit einer angemessenen Genauigkeit zu ermöglichen.

Für die Abschätzung des gesamtschweizerischen Verbrauchs wurden normative, statistische und Modelldaten verwendet.

Die Abschätzung des energetischen Optimierungspotenzials der unterschiedlichen Massnahmen basiert insbesondere auf technischen Komponentendaten und auf normativen Anforderungen. Dieser theoretische Ansatz wurde mit Erfahrungswerten konsolidiert.

Die verwendeten Werte aus Modellen und Normen sowie die eigenen Erfahrungswerte können die Realität nur näherungsweise abbilden und sind entsprechend kritisch zu betrachten.

4 AKTUELLE SITUATION

4.1 GESAMTSCHWEIZERISCHER VERBRAUCH

Der gesamtschweizerische Stromverbrauch der Lüftungsanlagen beträgt je nach Berechnungsgrundlage zwischen 1.05 TWh/a (eigenes Berechnungsmodell) und 2.04 TWh/a (TEP Energy, Spezialauswertung Projekt GEPAMOD [3]). Aufgrund seiner breiten Abstützung und der niedrigen Granularität der Eingangsdaten werden für die Berechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials die Stromverbrauchswerte aus dem Gebäudeparkmodell verwendet.

4.1.1 Eigenes Berechnungsmodell

Ein eigenes Berechnungsmodell wurde anhand von statistischen Flächenangaben, Verbrauchsdaten aus dem Merkblatt SIA 2024:2015 sowie aus geschätzten Ausrüstungsgraden von Lüftungsanlagen erstellt. Es handelt sich um einen Bottom-up-Ansatz, der sich primär auf die gesamte belüftete Fläche sowie auf den mittleren spezifischen Energieverbrauch für jede Raumnutzung stützt.

Die Flächenangaben gemäss Tabelle 2 liegen dem Berechnungsmodell zugrunde:

Gebäudekategorie	Energiebezugsfläche [Mio. m ²]	Anteil
Haushalte	523.6	67.9 %
Verwaltung/Dienstleistung	106.6	13.8 %
Läden und Handel	19.4	2.5 %
Gesundheit	19.5	2.5 %
Gastgewerbe	12.3	1.6 %
Industrie	89.9	11.7 %
Summe	771.2	100.0 %

Tabelle 2: Energiebezugsfläche nach Gebäudekategorie. Quellen: Statistische Flächenangaben (Energiebezugsfläche) aus der «Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2015 nach Verwendungszwecken» [15]. Detaillierte Flächenaufteilung anhand der Studie «Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen – Perspektiven bis 2035» [16] interpoliert.

Die effektiv belüftete Energiebezugsfläche setzt sich aus der Gesamtfläche, dem Ausrüstungsgrad von Lüftungsanlagen sowie aus dem mittleren belüfteten Flächenanteil der jeweiligen Gebäudekategorien gemäss Tabelle 3 zusammen. Der belüftete Flächenanteil von Gebäuden wurde anhand des typischen Vorhandenseins einer Lüftungsanlage für jede Raumnutzung und für die Baujahre vor und nach 1980 nach SIA 2024:2015 berechnet. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass 60 % der Gebäude vor 1980 gebaut (Wertebereich SIA 2024: Bestand) und die restlichen Gebäude ab 1980 gebaut wurden (Wertebereich SIA 2024: Standardwerte).

Gebäudekategorie	Ausrüstungsgrad Lüftungsanlagen	Davon belüftete Fläche	Belüftete Fläche [Mio. m ² EBF]
Haushalte	8 %	41 %	17.2
Verwaltung/Dienstleistung	50 %	73 %	38.9
Läden und Handel	60 %	77 %	9.0
Gesundheit	60 %	47 %	5.4
Gastgewerbe	55 %	85 %	5.7
Industrie	25 %	62 %	16.7
Summe			92.9

Tabelle 3: Belüftete Energiebezugsfläche pro Gebäudekategorie. Schätzung Ausrüstungsgrad basierend auf der Studie «Potenzialschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik» [4] und Schätzungen für das ProKilowatt-Programm «Proéla» [17]. Anteil belüftete Fläche nach SIA 2024:2015 und angenommene Raumnutzungsaufteilung nach Anhang I.

Der mittlere Stromverbrauch pro belüftete Energiebezugsfläche wird für die unterschiedlichen Raumnutzungen im Merkblatt SIA 2024:2015 angegeben. Obwohl für neue Gebäude der Wertebereich «Standard» gilt, hat die Messkampagne gezeigt (Kap. 5.1), dass die Standard- oder Zielwerte in der Praxis selten erreicht werden. Aus diesem Grund wurde für den gesamten Gebäudepark der jährliche Stromverbrauch aus dem Wertebereich «Bestand» bzw. aus dem Wertebereich «Standard» mit einem Umrechnungsfaktor von 1.96⁷ bei fehlenden Bestandswerten verwendet. Der gesamtschweizerische Stromverbrauch der belüfteten Flächen beläuft sich nach Tabelle 4 für das Jahr 2015 auf ca. 1'049 GWh/a (ca. 1.8 % des schweizerischen Stromverbrauchs).

Gebäudekategorie	Stromverbrauch pro belüftete Fläche [kWh/(m ² · a)]	Belüftete Fläche [Mio. m ² EBF]	Stromverbrauch Lüftung Gebäudepark [GWh/a]	Anteil
Haushalte	4.0	17.2	69	6.5 %
Verwaltung/Dienstleistung	9.8	38.9	381	36.3 %
Läden und Handel	8.5	9.0	76	7.3 %
Gesundheit	12.7	5.4	68	6.5 %
Gastgewerbe	19.5	5.7	112	10.7 %
Industrie	20.5	16.7	343	32.7 %
Summe		92.9	1'049	100.0 %

Tabelle 4: Jährlicher Stromverbrauch für den gesamten Gebäudepark 2015. Quelle für den spezifischen Stromverbrauch pro belüftete Fläche: SIA 2024:2015 (Bestandeswerte) für den Raumnutzungsmix nach Anhang I.

4.1.2 Gebäudeparkmodell

Der gesamtschweizerische Stromverbrauch von Lüftungsanlagen in Gebäuden wurde im Gebäudeparkmodell von TEP Energy (Spezialauswertung Projekt GE-PAMOD [3]) modelliert und beträgt für das Jahr 2015 ca. 2.04 TWh (ca. 3.5 % des schweizerischen Stromverbrauch). Die Aufteilung nach Gebäudekategorien ist in der Tabelle 5 ersichtlich.

⁷ Mittlerer Faktor zwischen Standardwerten und Bestandswerten für den jährlichen Stromverbrauch von Lüftungsanlagen nach SIA 2024.

Gebäudekategorie	Stromverbrauch pro belüftete Fläche [kWh/(m ² · a)]	Belüftete Fläche [Mio. m ² EBF]	Stromverbrauch Lüftung Gebäudepark [GWh/a]	Anteil
Haushalte	1.3	23.3	29.8	1.5 %
Verwaltung/Dienstleistung	16.0	39.1	626.4	30.7 %
Läden und Handel	17.0	17.2	292.6	14.3 %
Gesundheit	18.6	11.4	212.8	10.4 %
Gastgewerbe	35.9	9.0	323.8	15.9 %
Industrie	25.0	22.3	557.0	27.3 %
Summe		122.2	2042.3	100.0 %

Table 5: Gesamtschweizerischer Stromverbrauch von Lüftungsanlagen im Jahr 2015. Quelle: TEP Energy, Spezialauswertung Projekt GEPAMOD [3].

4.1.3 Modellevergleich

Der spezifische Stromverbrauch pro belüftete Energiebezugsfläche aus dem Gebäudeparkmodell von TEP Energy liegt gemäss Abbildung 2 für alle Gebäudekategorien deutlich höher als die entsprechenden Werte für vergleichbare Gebäudekategorien aus dem Merkblatt SIA 2024:2015. Der Grund dafür ist, dass die verwendeten Kennwerte im Gebäudeparkmodell mit realen Auslegungswerten konsolidiert wurden, die teilweise stark von empfohlenen Planungswerten nach SIA 2024 abweichen. Die Erkenntnisse im Kapitel 5 bestätigen ebenfalls die Abweichung der Werte von realen Anlagen gegenüber den Planungswerten nach SIA 2024.

Das Gebäudeparkmodell basiert auch auf ca. 32 % mehr belüfteter Energiebezugsfläche für den gesamten Gebäudepark als das eigene Berechnungsmodell. Diese Abweichung ist auch ein weiterer Grund für den höheren Gesamtverbrauch beim Gebäudeparkmodell im Vergleich zum eigenen Berechnungsmodell. Diese Abweichung kann mit der Berechnungsmethode erklärt werden. Für das Gebäudeparkmodell wurde für jede Raumnutzung ein prozentualer Anteil der belüfteten Fläche angenommen und für jede Gebäudekategorie entsprechend dem gewählten Raumnutzungsmix berechnet. Beim eigenen Berechnungsmodell basiert der Anteil belüftete Fläche auf einer rein digitalen Angabe zum typischen Vorhandensein von Lüftungsanlagen für die jeweiligen Raumnutzungen in Gebäuden mit Baujahr vor bzw. nach 1980 und auf einer angenommenen Aufteilung der Gebäude mit Baujahr vor und nach 1980.

Eine weitere mögliche Abweichungsquelle zwischen beiden Modellen ist die Verwendung von unterschiedlichen Raumnutzungsmixen in der Definition der Gebäudekategorien.

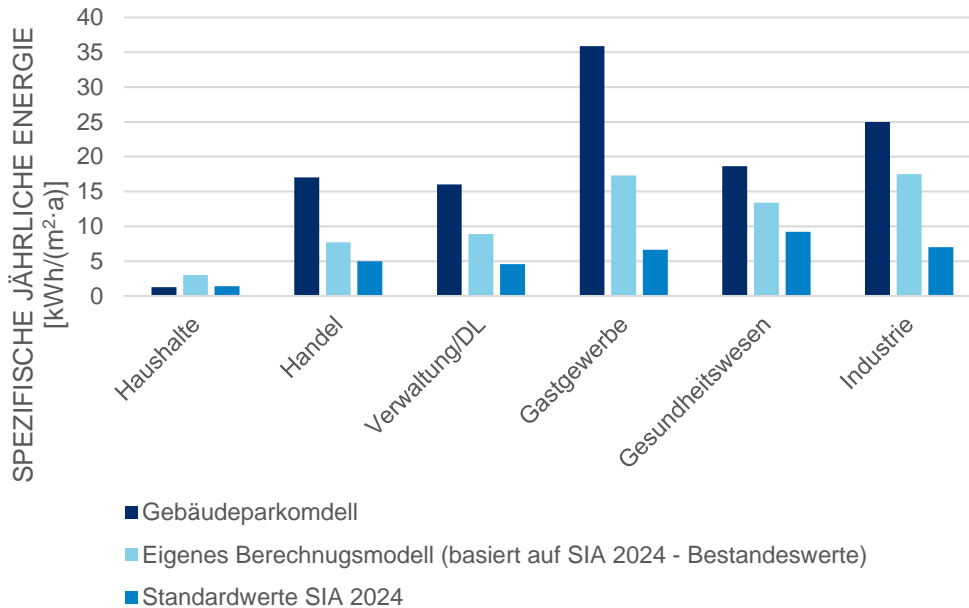


Abbildung 2: Spezifischer Stromverbrauch der belüfteten Energiebezugsfläche: nach Gebäudeparkmodell (TEP Energy, Spezialauswertung Projekt GEPAMOD [3]), nach eigenem Berechnungsmodell, basierend auf SIA 2024:2015 (Bestandeswerte und Standardwerte).

4.1.4 Vergleich mit weiteren Studien

Die Studie «Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik» [4] weist einen gesamtschweizerischen Stromverbrauch von 1.5 TWh/a für den Verwendungszweck «Lüftung» im Jahr 2010 aus. Die Abweichung zum Gesamtverbrauch aus der Tabelle 5 liegt vor allem an unterschiedlichen Daten- und Modellständen des Gebäudeparkmodells.

Gemäss dem Merkblatt «Luftförderung» von topmotors.ch [18] verbrauchen sämtliche Ventilatoren in der Schweiz 7.5 TWh/a. Dieses Merkblatt umfasst jedoch auch Ventilatoren, die nicht Bestandteil der vorliegenden Studie sind, wie zum Beispiel Lüfter in Verkehrsinfrastrukturen, in Fahrzeugen, in Geräten oder in Produktionsanlagen.

5 AKTUELLER BESTAND

5.1 AUFGENOMMENE ANLAGEN

Die energetische Situation beim aktuellen Anlagenbestand wurde anhand einer Messkampagne ermittelt. Die Altersstruktur, die Leistungsklassen sowie die Branchenaufteilung der aufgenommenen Anlagen sind im Anhang II aufgeführt. Aufgenommen wurden die Motor- und Ventilatoraten, Anlagentypen, Angaben zu den belüfteten Räumen, elektrische Leistungsaufnahmen, Volumenströme sowie Betriebszeiten. Die Luftgeschwindigkeit wurde mit einem Thermo-Anemometer gemessen und der Luftvolumenstrom anhand der Kanalfläche berechnet. Die ermittelte aufgenommene elektrische Leistung basiert auf einer Strommessung sowie auf Typenschild-Angaben. Die Anlagen wurden im «normalen Betriebszustand» gemessen (bei zweistufigen Motorleistungen meistens auf Stufe I, bei Küchenlüftungen und weiteren Einzelfällen auf Stufe II).

Anhand der erhobenen Daten wurden für jede Zu- und Abluftanlage die spezifische Ventilatorleistung, der Motorwirkungsgrad und der spezifische Aussenvolumenstrom pro Nettogeschossfläche ausgewertet.

5.1.1 Motorwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der aufgenommenen Motoren wurde anhand der Typenschild-Angaben berechnet. Aufgrund von teilweise fehlenden Typenschild-Angaben wurde der Leistungsfaktor nicht bei allen Anlagen. Bei fehlenden Angaben wurde er anhand von Daten aus vergleichbaren Motoren abgeschätzt. Die Abbildung 3 zeigt, dass 11 von 40 aufgenommenen Motoren die Effizienzklasse IE1 oder höher erreichen.

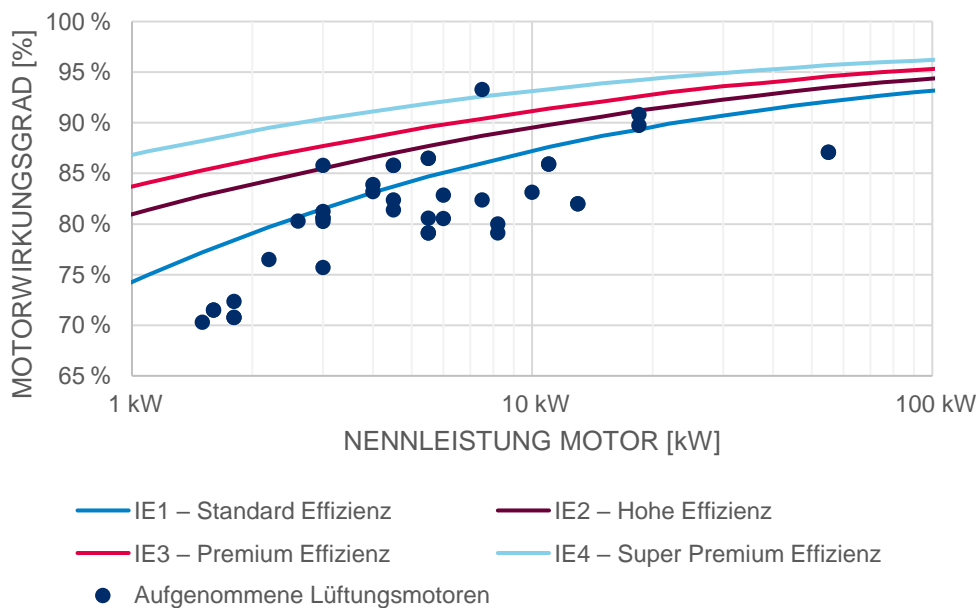


Abbildung 3: Motorwirkungsgrad der aufgenommenen Anlagen.

5.1.2 Spezifische Ventilatorleistung (SFP)

Die spezifische Ventilatorleistung der gemessenen Anlagen wird anhand von Messwerten und von Typenschild-Angaben gemäss Formel 1 und Tabelle 6 ermittelt.

$$P_{SFP} = \frac{P_e}{q_v} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}{q_v}$$

Formel 1: Berechnung der spezifischen Ventilatorleistung von einem Ventilator mit einem dreiphasigen Motor.

Symbol	Grösse	Ermittlungsmethode
U	Motorspannung	Typenschild-Angabe
I	Motorstrom	Messung (Stromzange) oder Anzeige Frequenzumrichter
cos φ	Leistungsfaktor Motor	Typenschild-Angabe oder Annahme bei fehlenden Angaben
q _v	Volumenstrom	Messung (Thermo-Anemometer)

Tabelle 6: Ermittlungsmethoden für die Berechnung der spezifischen Ventilatorleistung.

Die SFP-Werte in Abhängigkeit des Volumenstroms sind in Abbildung 4 ersichtlich. Eine Korrelation zwischen dem Volumenstrom und der spezifischen Ventilatorleistung ist nicht ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass

die tendenziell geringeren Druckverluste bei Anlagen mit tiefen Volumenströmen die niedrige Motoreffizienz im tieferen Leistungsbereich kompensieren.

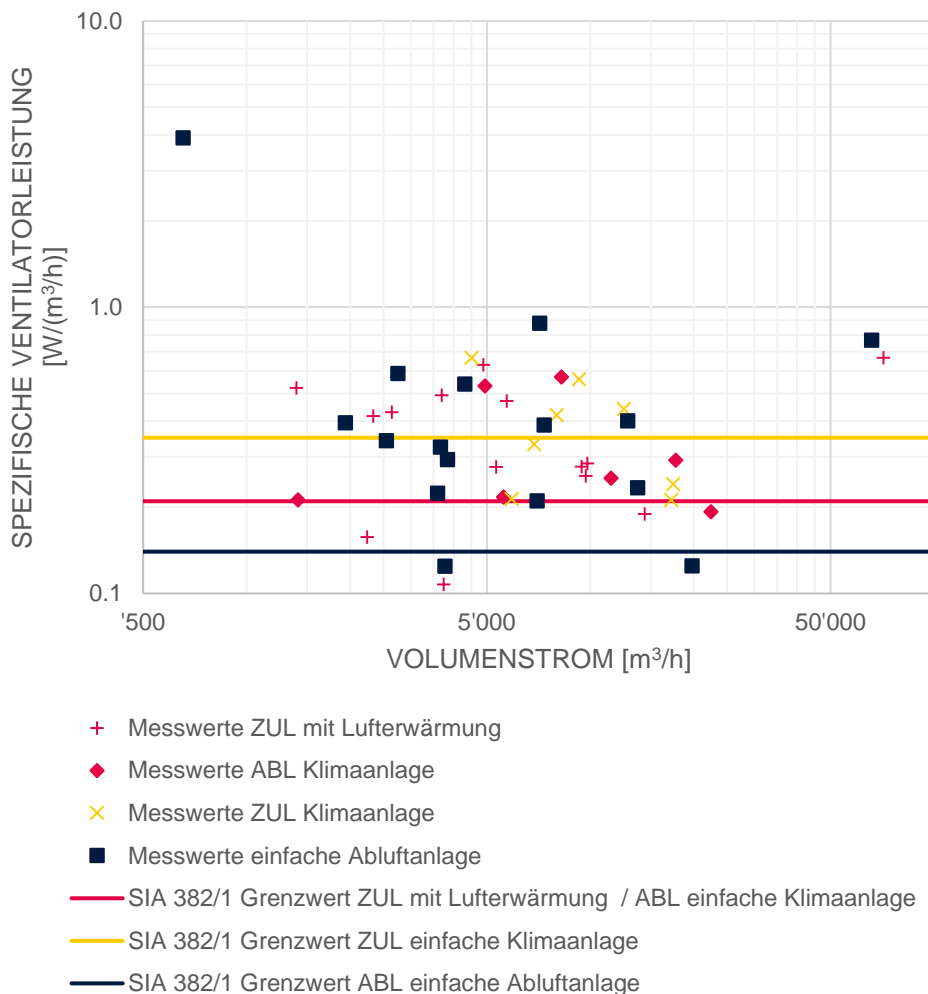


Abbildung 4: Gemessene spezifische Ventilatorleistungen und Grenzwerte nach SIA 382/1:2014.

Die aktuellen normativen Vorgaben für die spezifische Ventilatorleistung stammen aus der Ausgabe 2007 der Norm SIA 382/1. In der Ausgabe von 2014 wurden diese Grenzwerte nicht angepasst. Die Abbildung 5 zeigt, dass je nach Anlagekategorie 50 bis 88 % der gemessenen Anlagen die SFP-Grenzwerte aus der aktuellen Norm SIA 382/1:2014 nicht einhalten. Zu beachten ist jedoch einerseits, dass die Filter in den gemessenen Anlagen nicht neu und sauber waren, was die gemessenen SFP-Werte entsprechend erhöht. Andererseits wurden die meisten gemessenen Anlagen vor Inkrafttreten der aktuell geltenden Vorgaben gebaut. Die Studie EFFILUFT [12] hebt jedoch hervor, dass die normativen Grenzwerte auch bei neueren Anlagen oft überschritten werden.

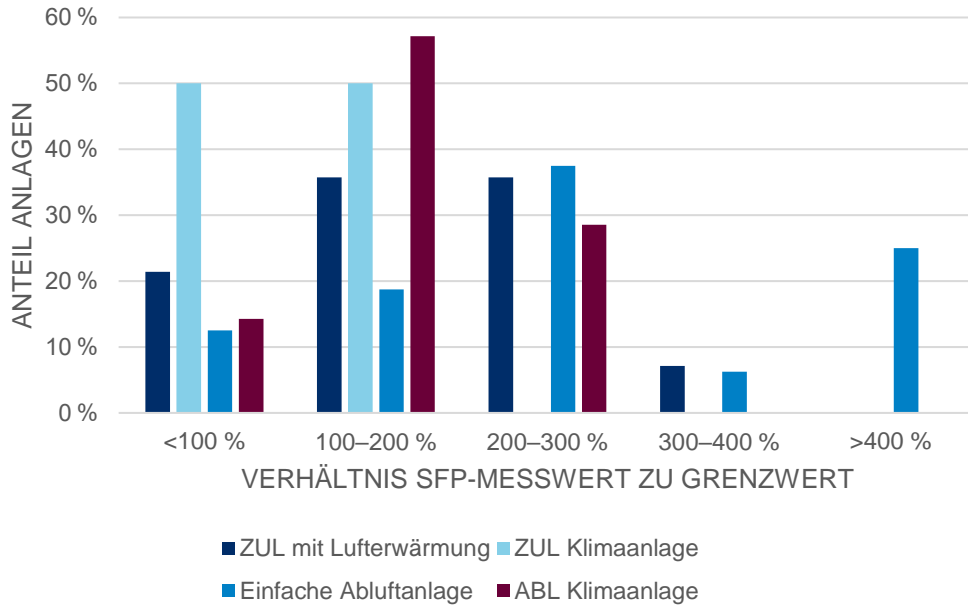


Abbildung 5: Einhaltung der SFP-Grenzwerte bei den gemessenen Anlagen, nach Anlagekategorie.

Die Abbildung 6 zeigt die Abweichung der SFP-Messwerte zu den Grenzwerten nach SIA 382/1:2014, in Abhängigkeit vom Baujahr. Im Durchschnitt liegen bei Zuluftanlagen die SFP-Messwerte 54 % über dem Grenzwert und bei Abluftanlagen 139 % über dem Grenzwert. Bei neueren Anlagen ist jedoch die Grenzwert-Überschreitung durchschnittlich geringer als bei älteren Anlagen.

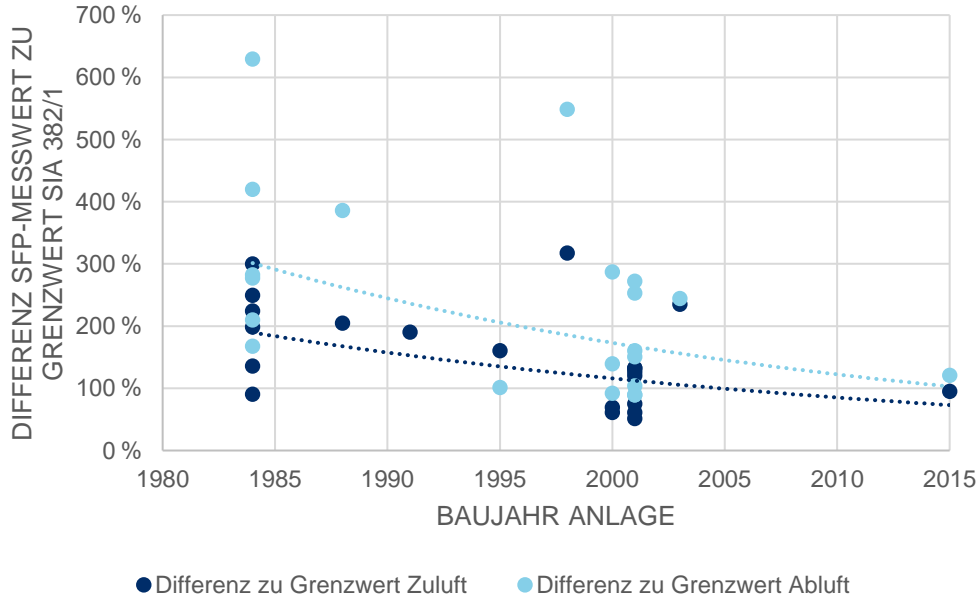


Abbildung 6: Abweichung der SFP-Messwerte zu den Grenzwerten nach SIA 382/1:2014, nach Baujahr.

5.1.3 Luftvolumenströme

Das Merkblatt SIA 2024:2015 definiert für jede Raumnutzung und Gebäudekategorie Standard-Auslegungswerte für den Aussenluftvolumenstrom pro Nettogeschossfläche. Diese Standardwerte werden hier als Referenzwerte für die Beurteilung der Dimensionierung der aufgenommenen Lüftungsanlagen verwendet. Die Abbildung 7 zeigt die Streuung der Messwerte in Relation zu den

SIA-Auslegungswerten. Dabei ist zu beachten, dass die Anlagen mit zweistufigem Betrieb entweder auf Stufe I oder auf Stufe II gemessen wurden. Es wird davon ausgegangen, dass die gemessene Betriebsstufe dem «normalen Betriebszustand» entspricht. Die gemessenen Werte bei einer reduzierten Betriebsstufe sind jedoch tiefer als die effektiven Auslegungswerte. Der Vergleich mit den Auslegungswerten nach SIA 2024:2015 kann aus diesem Grund für die Identifikation von groben Abweichungen nicht als strenge quantitative Beurteilung der Normeneinhaltung verwendet werden.

Besonders auffällig ist, dass der gemessene Volumenstrom insbesondere bei kleineren Anlagen und trotz Anlagen im Teillastbereich (Betrieb stufenlos oder auf Stufe I) bis zu einem Mehrfach des Auslegungswertes nach SIA 2024:2015 beträgt. Die Abbildung 8 zeigt ausserdem, dass die gemessenen Volumenströme durchschnittlich 134 % der entsprechenden Auslegungswerte nach SIA 2024:2015 betragen. Auch ersichtlich ist, dass die festgestellte Abweichung mit dem Baujahr der Anlagen tendenziell abnimmt.

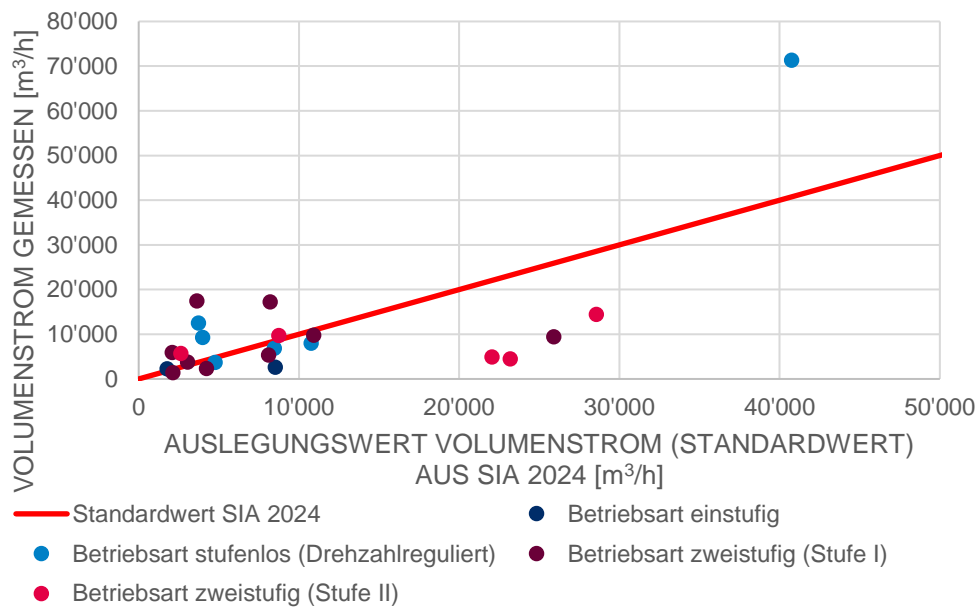


Abbildung 7: Gemessene Luftvolumenströme im Normalbetrieb, in Relation zu den Auslegungswerten nach SIA 2024:2015.

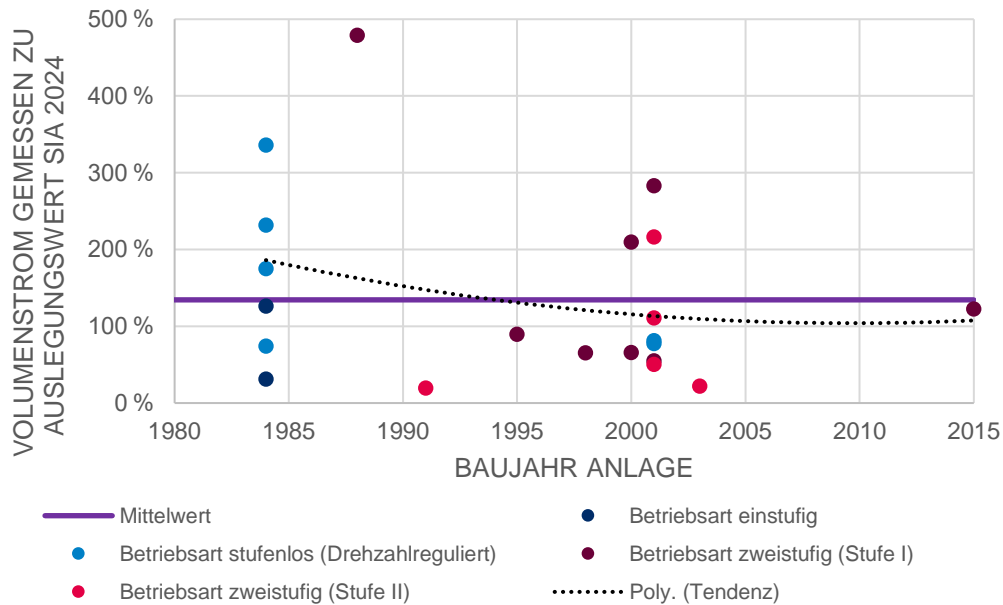


Abbildung 8: Abweichung der gemessenen Volumenströme zu den Auslegungswerten nach SIA 2024:2015 in Relation zum Baujahr der Anlage.

5.1.4 Betriebszeiten und Volllaststunden

Die Betriebszeiten der gemessenen Anlagen wurden vor Ort aufgenommen. Bei Anlagen mit zweistufigen Motoren wurde die Aufteilung der Betriebsstunden pro Stufe anhand von Erfahrungswerten aus vergleichbaren Anlagen geschätzt. Die Volllaststunden wurden anhand der Betriebsstunden und des Reduktionsfaktors gemäss Formel 2 für den Teillastbereich (Betriebsart zweistufig) berechnet. In der Theorie reduziert sich die aufgenommene Leistung zwar mit der dritten Potenz des Volumenstromes. Die Potenz 2.5 berücksichtigt jedoch nach SIA 382/1:2015 auch die Abnahme des Wirkungsgrads im Teillastbereich. Dabei wird für den Betrieb auf Stufe I bei einem zweistufigen Betrieb ein Ratio $q_{V,PL}/q_V$ von 0.67 gemäss SIA 382/1:2014 angenommen.

$$\frac{P_{PL}}{P} = \left(\frac{q_{V,PL}}{q_V} \right)^{2.5}$$

Formel 2: Reduktion der Motor-Aufnahmeleistung im Teillastbereich in Bezug auf die Volumenstrom-Anpassung gemäss SIA 382/1:2014. P_{PL} : aufgenommene Leistung im Teillastbereich; P : aufgenommene Nennleistung Motor; $q_{V,PL}$: Volumenstrom im Teillastbereich; q_V : Nenn-Volumenstrom.

Das Merkblatt SIA 2024:2015 definiert für jede Raumnutzung und Gebäudekategorie Zielwerte für die jährlichen Volllaststunden einer Lüftung.

In Abbildung 9 werden die aufgenommenen jährlichen Betriebsstunden in Relation zu den vorgeschriebenen Betriebsstunden für die entsprechende Raumnutzung nach SIA 2024:2015 dargestellt. Aufgenommene Volllaststunden oberhalb der roten Gerade befinden sich über den entsprechenden Zielwerten nach SIA. Im Durchschnitt betragen die aufgenommenen Volllaststunden 311 % der entsprechenden SIA-Zielwerte. Bezogen auf die Standardwerte (typische Planungswerte) betragen die aufgenommenen Volllaststunden 257 % der Vorgaben nach SIA 2024:2015. Diese markante Abweichung ist auch ein Grund für die tieferen berechneten Verbrauchswerte nach eigenem Berechnungsmodell (Kap. 4.1.1).

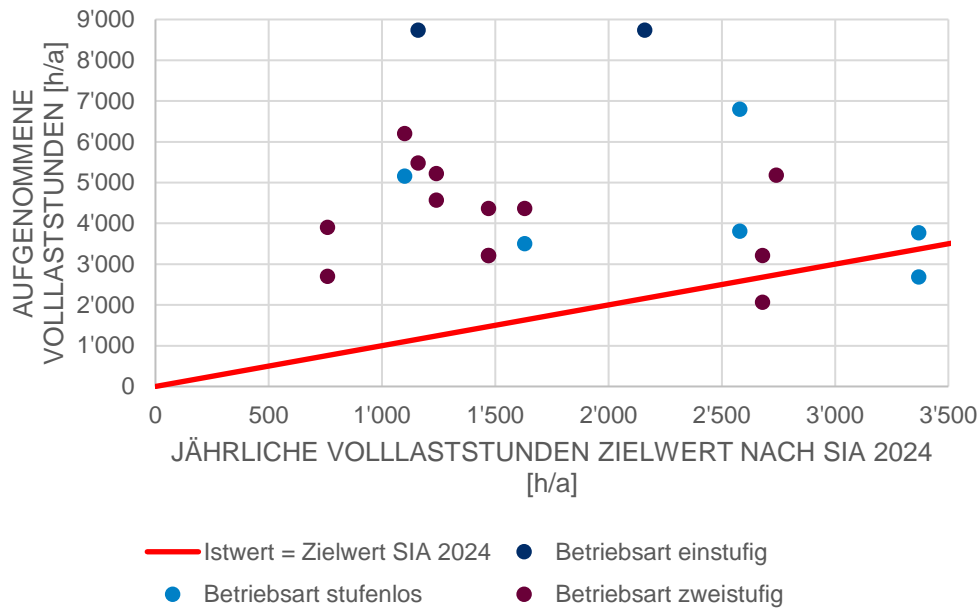


Abbildung 9: Aufgenommene Volllaststunden, in Relation zu den Zielwerten für die entsprechende Raumnutzung nach SIA 2024:2015.

6 STAND DER TECHNIK

Die Dimensionierung von Neuanlagen und von Retrofit-Anlagen richtet sich nach den geltenden gesetzlichen und normativen Rahmenbedingungen sowie nach dem heutigen Stand der Technik. Die in diesem Kapitel aufgeführten Rahmenbedingungen und Informationen zum aktuellen Technologiestand dienen als Orientierung für die Ermittlung des Optimierungspotenzials im gesamten Gebäudepark.

6.1 GESETZLICHE UND NORMATIVE ANFORDERUNGEN

Grundsätzlich werden gesetzliche Anforderungen auf kantonaler und nationaler Ebene definiert. Die kantonale Gesetzgebung setzt Anforderungen im Bereich des Energieverbrauchs in Gebäuden. Die Bundesgesetzgebung setzt Anforderungen im Bereich des Inverkehrbringens von serienmässig hergestellten Anlagen oder Geräten wie Motoren, Ventilatoren oder kompletten Monoblocs.

Folgende gesetzlichen und normativen Anforderungen haben eine Auswirkung auf die Energieeffizienz von raumluftechnischen Anlagen:

Anforderungsdokument	Beschreibung
Schweizerische Energieverordnung SR 730.01 [6]	Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen von Ventilatoren, von Elektromotoren und von Raumlüftungsgeräten. Verweis auf die entsprechenden EU-Verordnungen Nr. 327/2011, Nr. 640/2009 und Nr. 1253/2014.
EU-Verordnung Nr. 327/2011 [7]	Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen Eingangsleistung von 125 W bis 500 kW angetrieben werden. Anforderungen an die Gesamteffizienz von Ventilatoren in Abhängigkeit mit der Laufradtechnologie.
EU-Verordnung Nr. 640/2009 [8]	Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren. Mindesteffizienz von Elektromotoren.
EU-Verordnung Nr. 1253/2014 [9]	Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen. Anforderungen an die spezifische Ventilatorleistung.
Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014) [1]	Mustervorschriften der kantonalen Energiedirektoren für die kantonalen Gesetzgebungen im Energiebereich. Anforderungen an die Luftgeschwindigkeit in Lüftungsapparaten und Kanälen sowie an den jährlichen Energiebedarf oder an die spezifische Leistung von Lüftungsanlagen. Verweis auf die Norm SIA 380/4:2006 [11] und SIA 382/1:2014 [10].
Norm SIA 382/1:2014 [10]	Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen. Detaillierte Anforderungen an die Auslegung von Lüftungsanlagen unter Berücksichtigung der Nutzungsbedingungen gemäss SIA 2024:2015 [2], der Druckverluste und der spezifischen Ventilatorleistung.
Norm SIA 380/4:2006 [11]	Anforderungen an die elektrische Energie im Hochbau. Anforderungen an die spezifische Ventilatorleistung und an die Regelung (Einzelanforderungen) oder an den spezifischen Energiebedarf (Systemanforderung). Verweis auf das Merkblatt SIA 2024:2015 [2].
Merkblatt SIA 2024:2015 [2]	Standardisierte Nutzungsbedingungen von Gebäuden/Raumnutzungen.

Tabelle 7: Übersicht über die geltenden gesetzlichen und normativen Anforderungen im Lüftungsbereich.

6.2 TECHNOLOGIEN

Um eine hohe Effizienz zu erreichen, braucht es einerseits den Einsatz von hocheffizienten Technologien und andererseits eine bedarfsgerechte Dimensionierung und Regelung. Die in diesem Kapitel aufgeführten Technologien sind die aktuell besten verfügbaren Techniken. Die entsprechenden Effizienzangaben stammen aus geltenden Ökodesign-Richtlinien sowie aus Hersteller-Angaben.

6.2.1 Ventilator

Die aktuell effizienteste Ventilorttechnologie basiert hauptsächlich auf Laufrädern mit rückwärts gekrümmten Flügeln und erreicht am Energieeffizienzoptimum einen statischen Wirkungsgrad von über 75 %, je nach Hersteller und Leistungsklasse.⁸ Bei Anwendungen mit kleiner Druckerhöhung können Axialventilatoren ähnliche Wirkungsgrade erreichen.

6.2.2 Motor und Motorsteuerung

Aktuell sind im hocheffizienten Marktsegment drei Technologien zu finden:

⁸ Beispiele aus dem Produktkatalog «RLM Evo» von Nicotra Gebhardt [25] weisen statische Wirkungsgrade von bis zu 77 % auf. Der Hersteller «ebmpapst» kündigt in einer Präsentation [24] einen statischen Laufradwirkungsgrad von bis zu 75 % an.

- Klassische Asynchronmotoren mit der Effizienzklasse IE3 oder IE4 nach IEC 60034-30-1. Asynchronmotoren im tieferen Leistungsbereich (typischerweise unter 2 kW) erreichen jedoch die Effizienzklasse IE4 nicht.
- EC-Motoren (elektronisch gesteuerte DC-Motoren mit Permanentmagneten). Hocheffiziente EC-Motoren erreichen die IE4-Klasse und haben eine bereits integrierte Steuerelektronik. Aus diesem Grund benötigen sie für eine stufenlose Steuerung keinen externen Frequenzumrichter. EC-Motoren sind im tieferen Leistungsbereich bis ca. 10 kW vertreten. Aufgrund ihrer höheren Komplexität (integrierte Elektronik) weisen sie jedoch statistisch eine tiefere Zuverlässigkeit und Lebensdauer als Asynchronmotoren auf.
- PMAC-Motoren (Permanentmagnet-AC-Motoren). Im Vergleich zu Asynchronmotoren laufen PMAC-Motoren synchron und weisen eine höhere Effizienz auf, analog zu den EC-Motoren. Diese hohe Effizienz ist ebenfalls auf den Einsatz von Permanentmagneten anstelle von einem Käfigläufer und somit auf die Vermeidung von Verlusten im Rotorbereich zurückzuführen. Herkömmliche PMAC-Motoren können nur in Kombination mit einer Steuerelektronik gestartet werden, was eine negative Auswirkung auf die Zuverlässigkeit hat. Eine Unterkategorie der Permanentmagnet-Motoren, die PMLS-Motoren (Permanentmagnet-Line-Start-Motor), basiert jedoch auf einer Hybridlösung mit Permanentmagneten und Käfigläufer, die das Netzstartverhalten eines Asynchronmotors mit der hohen Energieeffizienz des PM-Motors, jedoch ohne Steuerelektronik für den Startvorgang, vereint (Quelle: [19]). PMAC- bzw. PMLS-Motoren erreichen auch im tieferen Leistungsbereich die Effizienzklasse IE4.

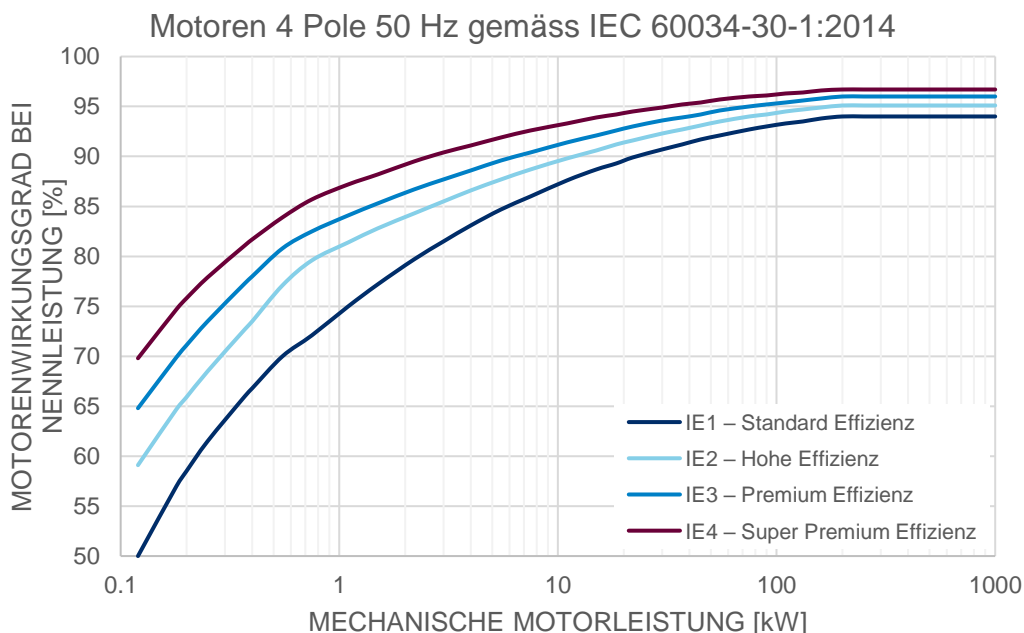


Abbildung 10: Wirkungsgrad von 4-poligen Asynchronmotoren. Daten aus IEC 60034-30-1:2014.

6.2.3 Frequenzumrichter

Eine stufenlose Steuerung von Asynchronmotoren wird durch den Einsatz eines Frequenzumrichters ermöglicht. Aktuelle hocheffiziente Frequenzumrichter besitzen die Effizienzklasse IE2 nach EN 50598-2. Typische Kennlinien von IE2-Frequenzumrichtern im Teillastbereich sind in Abbildung 11 dargestellt.

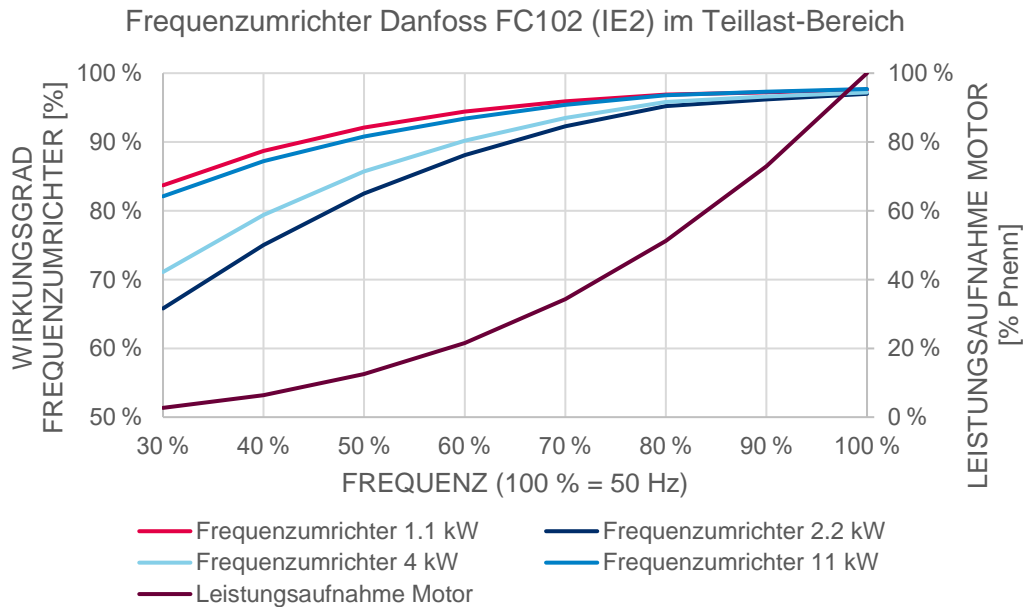


Abbildung 11: Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern der Marke Danfoss, Serie F102. Daten aus dem Ersteller-Planungstool «ecoSmart».

6.2.4 Transmission

Hocheffiziente Ventilatoren verzichten auf riemenbasierte Transmissionssysteme. Mit einem Direktantrieb wird ein Transmissionseffizienzgrad von ca. 100 % erreicht. Riemenantriebe verursachen gemäss Richtlinie VDI 6014 [20] Verluste von zwischen 2 % (Flachriemen im Leistungsbereich über 10 kW) und 20 % (mehrrillige Antriebe kleiner Leistungen <1 kW).

6.2.5 Regelung

Eine bedarfsabhängige Regelung ist in den Räumen mit schwankender Belegung und somit variablem Lüftungsbedarf eine Voraussetzung für einen energiesparenden Betrieb. Für die Regelung der Raumluftqualität werden je nach Situation CO₂-, CO-, VOC-, Rauch- oder Dampf-Sensoren angewendet. Die höchste Energieeffizienz für die Luftförderung wird mit dem kombinierten Einsatz von Sensoren und einem frequenzgeregelten Antrieb erreicht. Somit wird durch die stufenlose Regelung eine genaue Bedarfsregelung ermöglicht. Im Vergleich zu einer reinen Zeitprogramm-gesteuerten Lüftungsanlage bewirkt eine bedarfsgeregelte Lüftung eine Energiekosteneinsparung von 20 bis 70 % (Quelle: Siemens – Bedarfsgeregelte Lüftung [21]).

Neben der bedarfsabhängigen Regelung ermöglicht die Integration der Volumenstromregler im Regelalgorithmus eine Druckoptimierung, die gemäss der Studie EFFILUFT von der Hochschule Luzern [22] zu einer zusätzlichen Effizienzsteigerung von über 20 % bei der Luftförderung führen kann.

6.2.6 Filter

Zur Bestimmung der Energieeffizienz von Filtern dient die Richtlinie EURO-VENT 4/21 [23]. Diese Richtlinie bietet die Berechnungsgrundlagen für die Bestimmung der Energieverluste, die durch einen Filter unter definierten Bedingungen verursacht werden. Filter der besten Energieklasse A+ verursachen einen jährlichen Energieverlust von max. 450 kWh (Filterklasse M5) bis 1'250 kWh (Filterklasse F9); siehe dazu Abbildung 12. Nach Norm

SIA 382/1:2014 sollten für Zuluftanlagen mindestens Filter der Klasse F7 eingesetzt werden. Bei Abluftanlagen, die einen Filter benötigen, sind mindestens Filter der Klasse M5 einzusetzen.

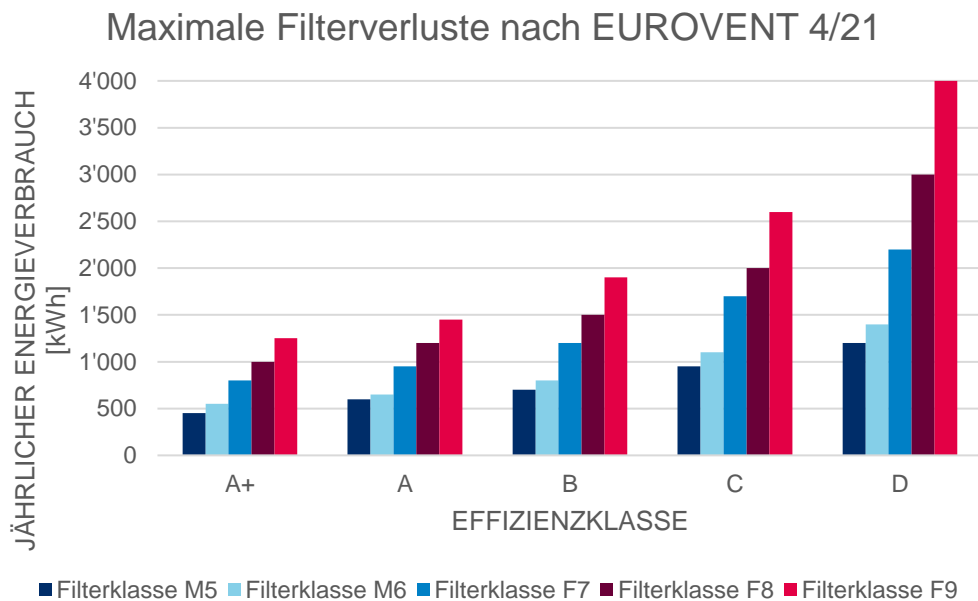


Abbildung 12: Energieverbrauch von Filtern. Filterklassen aus EN 779, Effizienzklassen und Jahresverbrauch aus EUROVENT 4/21 (6'000 h/a, 3'400 m³/h).

In Situationen mit besonders geruchsbelasteter Zuluft bzw. Aussenluft (z. B. bei Flughäfen) werden oft Aktivkohlefilter eingesetzt. Eine höhere Effizienz kann jedoch durch die Zuluft-Ionisation erreicht werden. Trotz Eigenverbrauch kann somit eine Effizienzerhöhung durch die Reduktion der Druckabfälle erreicht werden.⁹

6.3 GESAMTEFFIZIENZ NACH AKTUELLEM STAND DER TECHNIK

Die maximal erreichbare Gesamteffizienz für einen Ventilator mit hocheffizienten Komponenten (Laufrad, Motor, Transmission) kann anhand der Wirkungsgradangaben von Einzelkomponenten bestimmt werden. Ein anderer Ansatz ist die Berechnung der maximal erreichbaren Gesamteffizienz anhand des Berechnungsmodelles aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011 (Referenzwerte).

6.3.1 Normative Zielwerte

Die Systemeffizienz und damit die spezifische Ventilatorleistung werden massgeblich durch die Betriebsart und durch den Gesamtdruckverlust bestimmt. Die Norm SIA 382/1:2014 definiert Anforderungen an die spezifische Ventilatorleistung, an die Steuerung und an den Gesamtdruckverlust einer Lüftungsanlage.

Die europäische Verordnung Nr. 327/2011 [7] enthält Referenzwerte für die Berechnung der Gesamteffizienz von Ventilatoren mit der besten der zur Zeit der Verabschiedung der Verordnung auf dem Markt verfügbaren Technik. Die

⁹ Gemäss Aussage der Firma «ionair».

Wirkungsgradkurve in Abhängigkeit der aufgenommenen elektrischen Leistung für einen Ventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln berechnet sich anhand der Formel 3.

$$\eta_{Ges} [\%] = \begin{cases} 4.56 \cdot \ln P [kW] - 10.5 + 72, & 0.125 \leq P \leq 10 \text{ kW} \\ 1.1 \cdot \ln P [kW] - 2.6 + 72, & 10 < P \leq 500 \text{ kW} \end{cases}$$

Formel 3: Gesamtwirkungsgrad (statisch) eines Radialventilators mit rückwärts gekrümmten Schaufeln in Abhängigkeit der aufgenommenen elektrischen Leistung. Effizienzgrad mit der besten auf dem Markt verfügbaren Technik. Formel und Konstanten aus EU-VO Nr. 327/2011.

Die Norm SIA 382/1:2014 definiert Zielwerte für die spezifische Ventilatorleistung in Abhängigkeit des Anlagentyps. Die angegebenen spezifischen Ventilatorleistungen gelten für den gesamten Leistungsbereich. Es wird dabei angenommen, dass die tendenziell geringeren Druckverluste bei Anlagen mit tiefen Volumenströmen die niedrige Motoreffizienz im tieferen Leistungsbereich kompensieren. Die Abbildung 13 zeigt einen Vergleich der Zielwerte bzw. Referenzwerte für die spezifische Ventilatorleistung nach SIA 382/1:2014 und nach EU-Verordnung Nr. 327/2011 für unterschiedliche Anlagentypen und Druckverluste. Die Berechnung der spezifischen Ventilatorleistung P_{SFP} anhand der Wirkungsgrad-Kennlinie aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011 und für unterschiedliche Druckverluste Δp erfolgt dabei anhand der Formel 4.

$$P_{SFP} [W \cdot s/m^3] = \frac{P}{\frac{P \cdot \eta_{Ges}}{\Delta p}} = \frac{\Delta p [Pa]}{\eta_{Ges} [-]}$$

Formel 4: Spezifische Ventilatorleistung in Abhängigkeit des gesamten Druckverlustes.

Es wird ersichtlich, dass die Gesamteffizienz eines Ventilators nach EU-Verordnung Nr. 327/2011 massgeblich von seiner elektrischen Aufnahmeleistung abhängig ist. Bei tieferer Leistung ist die Gesamteffizienz eines Ventilators nach EU-Verordnung Nr. 327/2011 deutlich tiefer und somit der berechnete SFP-Wert für einen gegebenen Druckverlust deutlich höher als bei höheren Leistungen. Auch bemerkenswert ist, dass die Systemanforderungen bzw. die spezifische Ventilatorleistung nach SIA 382/1:2014 auch mit der zurzeit besten verfügbaren Technik nur bedingt und bei sehr tiefen Druckverlusten erreicht werden können.

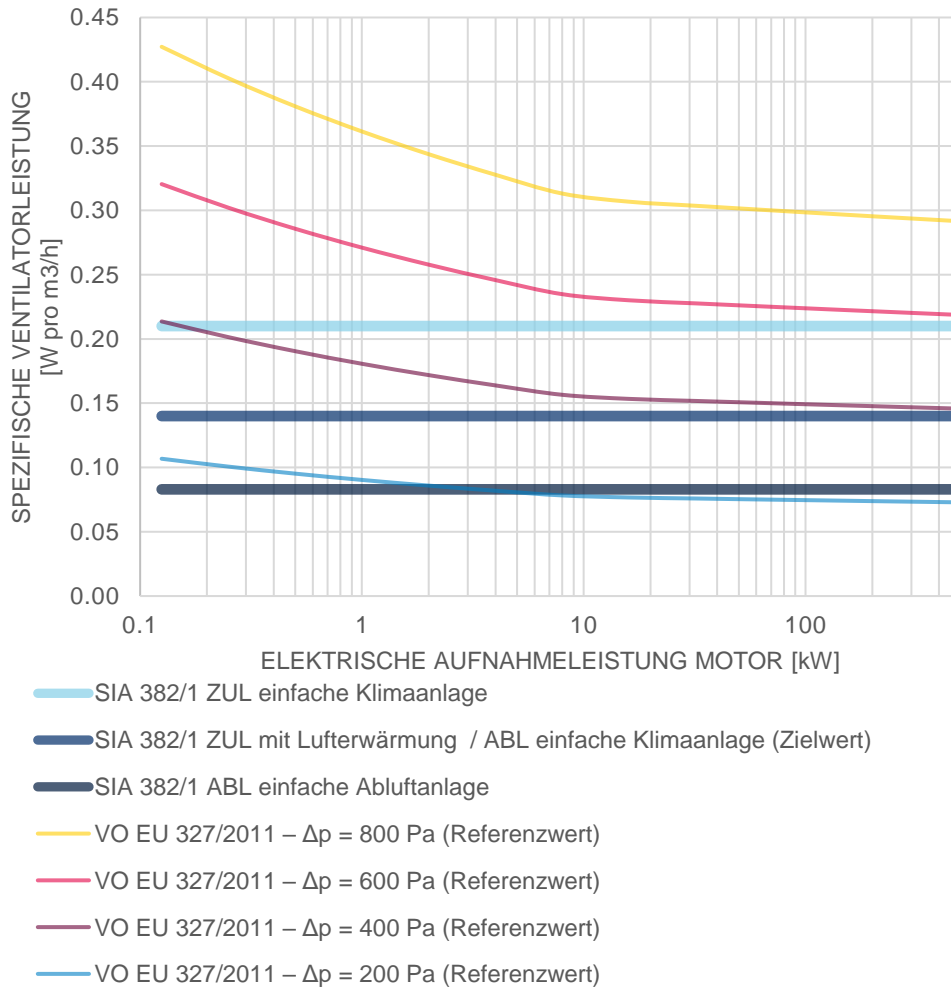


Abbildung 13: Spezifische Ventilatorleistung nach Norm SIA 382/1:2014 (Zielwerte) und berechnet aus den Referenzwerten in der EU-Verordnung Nr. 327/2011 nach Formel 4.

Die Studie «Elektroeffizienz von mittleren und grossen Lüftungsanlagen» [12] von der Hochschule Luzern zeigt, dass die Einzel- und Systemanforderungen in der Norm SIA 382/1:2014 nur bedingt untereinander abgestimmt sind und dass diese Anforderungen in der Praxis oft nicht erreicht werden. Die Zielwerte aus dieser Norm können aus diesem Grund nicht alleine für die Bestimmung einer realistischen Zieleffizienz mit dem heutigen Stand der Technik in der Praxis angewendet werden. Insbesondere bei Retrofit-Anlagen kann der Druckverlust nur teilweise optimiert werden, was das Erreichen der normativen Zielwerte besonders erschwert.

6.3.2 Hocheffiziente Komponenten

Die im Kapitel 6.2 aufgeführten Ventilator-Komponenten und angenommenen Maximaleffizienzzahlen führen zu einer Gesamteffizienz der Ventilatoreinheit gemäss Tabelle 8. Angenommen werden integrierte Ventilatoren mit perfekt untereinander abgestimmten Bauteilen. Ein Vergleich mit der Wirkungsgradkurve nach Referenzwerten aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011 für Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Flügeln ist in Abbildung 14 ersichtlich. Eine Abweichung von bis zu vier Prozentpunkten wird im tieferen Leistungsbereich festgestellt. Der Eigenverbrauch der allfälligen Steuerelektronik wird jedoch hier bei der Berechnung der Gesamteffizienz mit hocheffizienten

Komponenten nicht berücksichtigt, was die Abweichung zu den Referenzwerten aus der EU-Verordnung Nr. 327/2011 im kleineren Leistungsbereich erklären kann. Bei höheren Leistungen sind die berechneten Wirkungsgrade mit beiden Methoden beinahe identisch.

Motor		Effizienz	Laufrad	Transmission	Effizienz	System
Mech. Leistung	Effizienzklasse		Effizienz	Art		Gesamteffizienz
0.25 kW	IE4	77.9 %	76 %	Direktantrieb	100 %	59.2 %
1.1 kW	IE4	87.2 %	76 %	Direktantrieb	100 %	66.3 %
4.0 kW	IE4	91.1 %	77 %	Direktantrieb	100 %	70.1 %
11.0 kW	IE4	93.3 %	77 %	Direktantrieb	100 %	71.8 %
30.0 kW	IE4	94.9 %	77 %	Direktantrieb	100 %	73.1 %

Abbildung 8: Effizienz von Ventilatoreinheiten (ohne Frequenzumrichter) mit hocheffizienten Bauteilen.

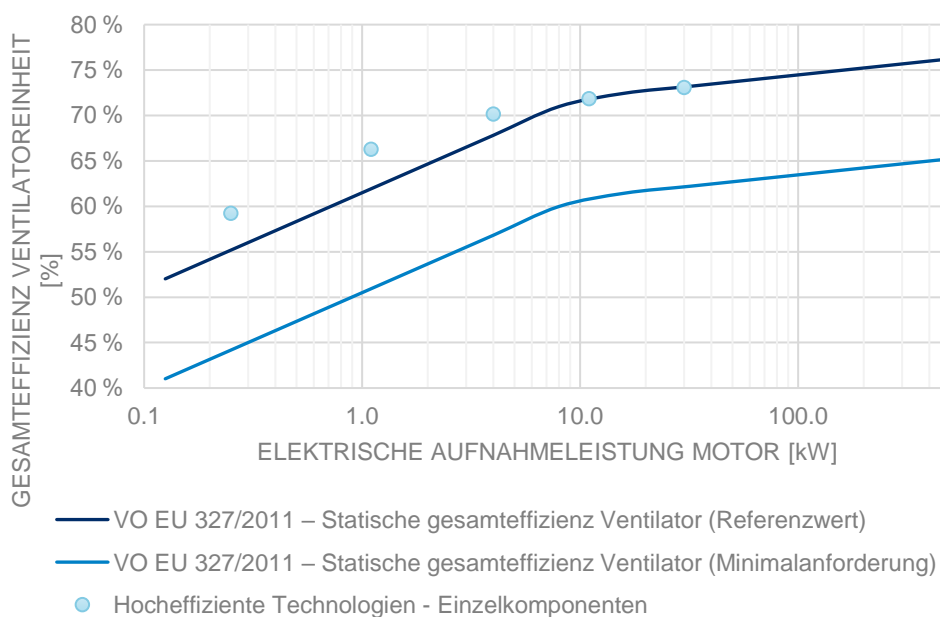


Abbildung 14: Vergleich theoretische Systemeffizienz mit hocheffizienten Bauteilen, Referenzwerten und Minimalanforderungen nach EU-Verordnung Nr. 327/2011.

7 OPTIMIERUNGSPOTENZIAL

7.1 MASSNAHMENKATALOG

7.1.1 Ersatz Ventilatoreinheit

Bis 2012 waren in der Schweiz Elektromotoren einer tieferen Effizienzklasse als IE2 noch erlaubt. Aktuell ist ein Grossteil der bestehenden Lüftungsanlagen mit ineffizienten Motoren und mit Riemenantrieb ausgerüstet. Auch die Lauf- radtechnik hat sich weiterentwickelt. Bei einer energetischen Optimierung ist der Ersatz von einzelnen Komponenten möglich. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine nicht-optimale Abstimmung der Komponenten untereinander zu einem unerwünschten erhöhten Energieverbrauch führen kann, weil nicht alle Komponenten bei einem Betriebspunkt mit Maximalwirkungsgrad laufen. Auch zu beachten ist, dass effiziente Asynchronmotoren einen tieferen Schlupf aufweisen. Ein tieferer Schlupf erhöht jedoch die Drehzahl. Dies kann zu einer Erhöhung der Leistungsaufnahme von bis zu ca. 16 % (Quelle: [18]) führen, falls dieser Effekt nicht bewusst kompensiert wird. Die von der BKW-Energieberatung angenommenen Optimierungspotenziale beziehen sich auf den Ersatz von kompletten Ventilatoreinheiten mit untereinander abgestimmten Komponenten und mit Kompensation der allfälligen Schlupf-Verminderung des Asynchronmotors. Es wird somit davon ausgegangen, dass der Ersatz einer Ventilatoreinheit den Luftvolumenstrom nicht beeinflusst.

Quelle	Optimierungspotenzial
Erfahrung aus dem ProKilowatt-Programm Proéla ¹⁰	Ventilatoreinheit: bis 11 %
Technologische Betrachtung (siehe Kap. 6.2) ¹¹	Transmission: 0–20 % Motor: 3–20 %
Erfahrung aus der Messkampagne (siehe Kap. 5.1.1) ¹²	Nur Motor: 0–20 %
Annahme BKW-Energieberatung (Mittelwert, Ventilator mit >10 Jahren Lebensdauer beim heutigen Stand der Technik)	Ventilatoreinheit: 15 %

Table 9: Optimierungspotenzial Ersatz Ventilatoreinheit.

7.1.2 Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung

Die Effizienzerhöhung bei einer bedarfsabhängigen Regelung wird massgeblich durch das Mass der Bedarfsschwankungen bestimmt. In der Gastronomie weisen beispielsweise die Personenbelegung sowie die Dampfemissionen aus der Küche in der Regel starke Schwankungen auf, was das Potenzial einer bedarfsabhängigen Regelung stark erhöht. In einem Hallenbad beeinflusst die schwankende Personenbelegung hingegen den Lüftungsbedarf nicht massgeblich, was das Potenzial einer bedarfsabhängigen Regelung entsprechend minimiert. Dank einer stufenlosen Steuerung kann eine bestehende Lüftungsanlage am effektiven Lüftungsbedarf genau eingestellt werden. Die dadurch ausgelöste Einsparung ist von der Situation abhängig. Generell gilt jedoch, dass

¹⁰ Das Programm Proéla wurde für grössere Anlagen konzipiert. Entsprechend ist das Optimierungspotenzial bei einem Ventilator-Ersatz in diesem Leistungssegment tiefer als im kleineren Leistungsbereich.

¹¹ Transmission: Einsparpotenzial Riemenantrieb zu Direktantrieb. Worst Case: mehr- rilliger Antrieb bei kleineren Leistungen <1 kW (ca. 20 % Verluste). Motor: Einsparpo- tenziential IE1 zu IE4. Worst Case: Motor im tiefen Leistungsbereich <200 W.

¹² Vergleich gemessene Anlagen zu IE4-Leistungsklasse.

die aufgenommene Leistung in der Praxis mit der Potenz 2.5 der Drehzahl abnimmt (nach Formel 2).

Ein Frequenzumrichter (FU) weist Nennleistungsverluste von ca. 2 bis 5 % auf (siehe dazu Kap. 6.2.3). Diese internen Verluste sind im Teillastbereich im Vergleich zur erreichten Einsparung durch die Drehzahlreduktion vernachlässigbar. Beim Netzfrequenz-Betrieb sind die internen Verluste hingegen reine zusätzliche Verluste. Der Einsatz eines Frequenzumrichters ist deshalb nur bei effektiv schwankendem Lüftungsbedarf sinnvoll.

Nicht alle Motoren sind für eine Lastregelung durch einen Frequenzumrichter geeignet. Der Einsatz eines Frequenzumrichters setzt aus diesem Grund manchmal einen Motorersatz voraus. EC-Motoren haben die nötige Steuer-elektronik schon integriert, und ihre Geschwindigkeit kann innerhalb eines definierten Bereichs stufenlos gesteuert werden.

Quelle	Gesamt-Optimierungspotenzial
Siemens – Bedarfsgeregelte Lüftung [21]	Generell: 20–70 % - Hörsäle: 20–50 % - Grossraumbüros: 3–30 % - Foyers, Schalter, Flughafen: 20–60 % - Messe- und Sporthallen: 40–70 % - Versammlungsstätten, Konferenzräume, Theater, Kinos: 20–60 % - Restaurants und Kantinen: 30–70 %
Erfahrung aus dem ProKilowatt-Programm Küchenlüftung von hotelleriesuisse	- Küchenlüftungen: 39–55 %
Annahme BKW-Energieberatung (Mittelwerte, Anlage ohne bedarfsabhängige Regelung zu einer bedarfsgeregelten Anlage mit Frequenzumrichter und Sensorik nach aktuellem Stand der Technik)	- Verwaltung/Dienstleistung: 15 % - Läden und Handel: 45 % - Gesundheitswesen: 30 % - Gastgewerbe: 45 % - Industriesektor: 20 %

Tabella 10: Optimierungspotenzial Nachrüstung Frequenzumrichter.

7.1.3 Druckoptimierte Regelung

Im Vergleich zu einer Konstantdruckregelung führt eine druckoptimierte Regelung zu einer erheblichen Stromeinsparung. Diese Regelungsart setzt jedoch Volumenstromregler und die entsprechenden Stellungsrückmeldungen in der Steuereinheit voraus. Es wird angenommen, dass sich der Aufwand für die Nachrüstung von Volumenstromreglern in bestehenden Anlagen aus finanziellen und baulichen Gründen nicht rechtfertigen lässt und dass diese Massnahme nur bei bereits vorhandenen Volumenstromreglern mit Stellungsrückmeldungen sinnvoll ist.

Quelle	Gesamt-Optimierungspotenzial
Hochschule Luzern / BFE – Elektroeffizienz von mittleren und grossen Lüftungsanlagen [12]	23 %
Annahme BKW-Energieberatung (Mittelwerte, Konstantdruckregelung zu druckoptimierter Regelung)	20 %

Tabella 11: Optimierungspotenzial druckoptimierte Regelung

7.1.4 Filter-Ersatz

Der Einsatz von energieeffizienten Filtern führt zu einer Energieeinsparung durch die resultierende Druckverlust-Reduktion. Die relative Energieeinsparung wird jedoch massgeblich von der Filterkategorie und von den effektiven Druckverlusten der Gesamtanlage beeinflusst.

Quelle	Gesamt-Optimierungspotenzial
Erfahrung aus dem ProKilowatt-Programm Proéla	4.5 %
Annahme BKW-Energieberatung (Mittelwerte, herkömmliche zu hocheffizienten Filtern)	5 %

Tabelle 12: Optimierungspotenzial Filter-Ersatz.

7.1.5 Betriebsoptimierung

Die Betriebsoptimierung hat zum Ziel, anhand von Einstellungen und minimalen Hardware-Modifikationen an einer bestehenden Anlage, den Lüftungsbetrieb dem effektiven Bedarf anzupassen. Die Betriebsoptimierung kann je nach Situation im Wesentlichen folgende Massnahmen beinhalten:

- Anpassung der Betriebszeiten
- Statische Anpassung des Luftvolumenstromes (Anpassung Übersetzungsverhältnis mit Wechsel der Riemenschiebe bei Riemenantrieben, Frequenz-Anpassung bei Vorhandensein von Frequenzumrichtern)
- Zeitgesteuerte Anpassung des Luftvolumenstromes (mehrere Betriebsstufen, die anhand eines Zeitprogrammes gesteuert werden)

Die Anpassung der Betriebszeiten hat einen direkten Einfluss auf die Volllastzeit und bewirkt somit eine proportionale Anpassung des Energieverbrauchs für die Luftförderung. Eine Anpassung des Luftvolumenstromes bewirkt eine überproportionale Anpassung der aufgenommenen elektrischen Leistung gemäss Formel 2. Da die aufgenommenen Betriebszeiten bzw. Volumenströme oft um Faktoren von den SIA-Zielwerten abweichen (siehe Kap. 5.1.3 und 5.1.4), streuen die ermittelten Optimierungspotenziale von Anlage zu Anlage auch entsprechend. Die in der Tabelle 13 aufgeführten Mittelwerte können aus diesem Grund nicht als Pauschalwerte bei der Beurteilung einer konkreten Anlage verwendet werden. Sie sind jedoch als Grössenordnungen für die Hochrechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials (siehe Kap. 7.2) zu verstehen.

Quelle	Einsparung durch Reduktion Volllastzeit	Einsparung durch Reduktion Volumenstrom	Einsparung total
Erfahrung aus der Messkampagne: Vergleich aufgenommene Angaben zu Standard- bzw. Zielwerten nach SIA 2024:2015 (siehe Kap. 5.1.3 und 5.1.4)	0–87 % Mittelwert: 55 %	0–98 % Mittelwert: 33 %	0–99 % Mittelwert: 62 %
Erfahrung aus der Messkampagne: Optimierungspotenzial bei den untersuchten Anlagen anhand von eigenen Plausibilitätsüberlegungen	0–88 % Mittelwert: 33 %	0–95 % Mittelwert: 28 %	0–98 % Mittelwert: 45 %
Allgemeine Annahme BKW-Energieberatung, Mittelwert für sämtliche Anlagentypen und Raumnutzungen	Mittelwert: 30 %	Mittelwert: 30 %	– Verwaltung/Dienstleistung: 55 % – Läden und Handel: 55 % – Gesundheitswesen: 45 % – Gastgewerbe: 55 % – Industriesektor: 45 %

Tabelle 13: Optimierungspotenzial Betriebsoptimierung.

7.2 GESAMTSCHWEIZERISCHES POTENZIAL ENERGETISCHE OPTIMIERUNGEN

Für die Berechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials von bestehenden Anlagen im Rahmen von technischen Optimierungen wurden folgende Parameter definiert:

Parameter	Beschreibung	
K1	Optimierungspotenzial	Erwartete mittlere Stromeinsparung bei der Umsetzung einer Massnahme, bezogen auf eine einzelne Anlage.
K2	Anteil bereits umgesetzt	Anteil der Anlagen in einem gegebenen Gebäudepark, bei denen die Massnahme bereits umgesetzt wurde.
K3	Technische Realisierbarkeit	Anteil der Anlagen, bei denen die Massnahme technisch realisierbar ist und auch effektiv zu einer Energieeinsparung führt.
K4	Wirtschaftliche Realisierbarkeit	Anteil der Anlagen, bei denen die Umsetzung der Massnahme wirtschaftlich ist gemäss Kap. 3.3.7.
GOP	Globales Optimierungspotenzial	Erwartete mittlere Stromeinsparung bei der Umsetzung einer wirtschaftlichen Massnahme, auf den gesamten Gebäudepark betrachtet.

Tabelle 14: Parameter für die Hochrechnung des gesamtschweizerischen Optimierungspotenzials von bestehenden Anlagen.

$$GOP = K1 \cdot (1 - K2) \cdot K3 \cdot K4$$

Formel 5: Globales Optimierungspotenzial einer Massnahme.

Die eingesetzten Parameter bei den einzelnen Massnahmen und Gebäudekategorien sind im Anhang III.I ersichtlich. Sie basieren auf den Angaben aus dem Kapitel 7.1 sowie auf Erfahrungswerten der BKW-Energieberatung. Das resultierende globale Optimierungspotenzial für sämtliche Massnahmen beläuft sich je nach Branche auf 42 bis 50 % (siehe Tabelle 15 und Abbildung 15). Dabei wird für die Berechnung des Optimierungspotenzials unterschiedlicher miteinander kombinierter Massnahmen die Formel 6 verwendet.

$$GOP_{Ges} = 1 - \prod_{x=1}^n (1 - GOP_x)$$

Formel 6: Gesamtoptimierungspotenzial bei der Umsetzung unterschiedlicher Massnahmen.

In der Praxis kann die Umsetzung einer Massnahme das Optimierungspotenzial einer anderen Massnahme überproportional beeinflussen. So führt zum Beispiel die Nachrüstung eines Frequenzumrichters mit bedarfsabhängiger Regelung zu einer massiven Minimierung des Potenzials der Volumenstrom-Optimierung im Rahmen einer Betriebsoptimierung. Im Gegensatz dazu führt beispielsweise ein Motorersatz statistisch betrachtet zu einem höheren technischen Realisierbarkeitsgrad für den Einsatz eines Frequenzumrichters (ältere Motoren sind nicht immer für den Einsatz eines Frequenzumrichters geeignet). Diese gegenseitigen Beeinflussungen heben sich teilweise auf und werden vernachlässigt.

Massnahme	Globales Optimierungspotenzial				
	Verwaltung/DL	Läden und Handel	Gesundheit	Gastgewerbe	Industrie
Ersatz Ventilatoreinheit / Einsatz hocheffizienter Motor	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung	4 %	13 %	8 %	13 %	6 %
Druckoptimierte Regelung	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Filter-Ersatz	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %
Betriebsoptimierung	40 %	40 %	32 %	40 %	32 %
TOTAL (alle Massnahmen)	46 %	50 %	42 %	50 %	40 %

Abbildung 15: Globales Optimierungspotenzial nach Massnahme und Gebäudekategorie bei bestehenden Gebäuden.

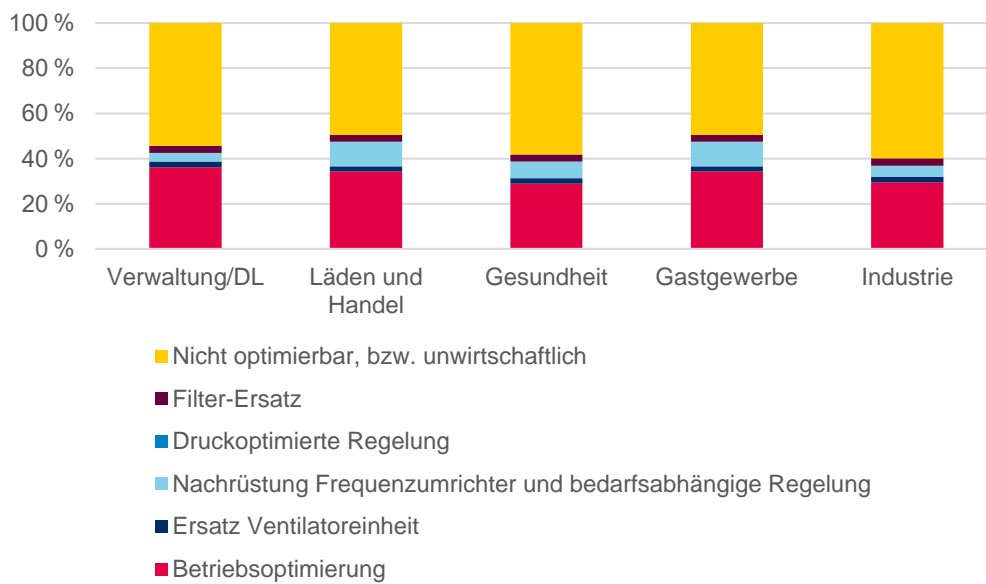


Abbildung 15: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmaßnahmen für bestehende Anlagen, prozentual.

Anhand des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs der Lüftungsanlagen in Gebäuden (siehe Kap. 4.1, Tabelle 5) wird das gesamte Stromeinsparpotenzial für den gesamten Gebäudepark (ausser Haushalte) berechnet. Siehe dazu Tabelle 16 und Abbildung 16. Die Umsetzung sämtlicher technisch möglicher und wirtschaftlicher Massnahmen bei den bestehenden Anlagen führt zu einer Einsparung von 909 GWh/a. Dies entspricht ca. 1.5 % des schweizerischen Stromverbrauchs. Die Betriebsoptimierung trägt zu über 70 % des gesamten Einsparpotenzials bei.

Massnahme	Globales Optimierungspotenzial [GWh/a]					Total
	Verwaltung/DL	Läden und Handel	Gesundheit	Gastgewerbe	Industrie	
Ersatz Ventilatoreinheit	15.3	6.8	5.1	7.5	13.5	48.1
Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung	24.0	31.8	15.9	35.2	28.3	135.3
Druckoptimierte Regelung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Filter-Ersatz	20.0	8.8	6.6	9.8	17.7	63.0
Betriebsoptimierung	226.6	100.1	61.4	110.8	163.7	662.6
TOTAL (alle Massnahmen)	286.0	147.5	89.0	163.3	223.2	909.0

Tabelle 16: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme für bestehende Anlagen.

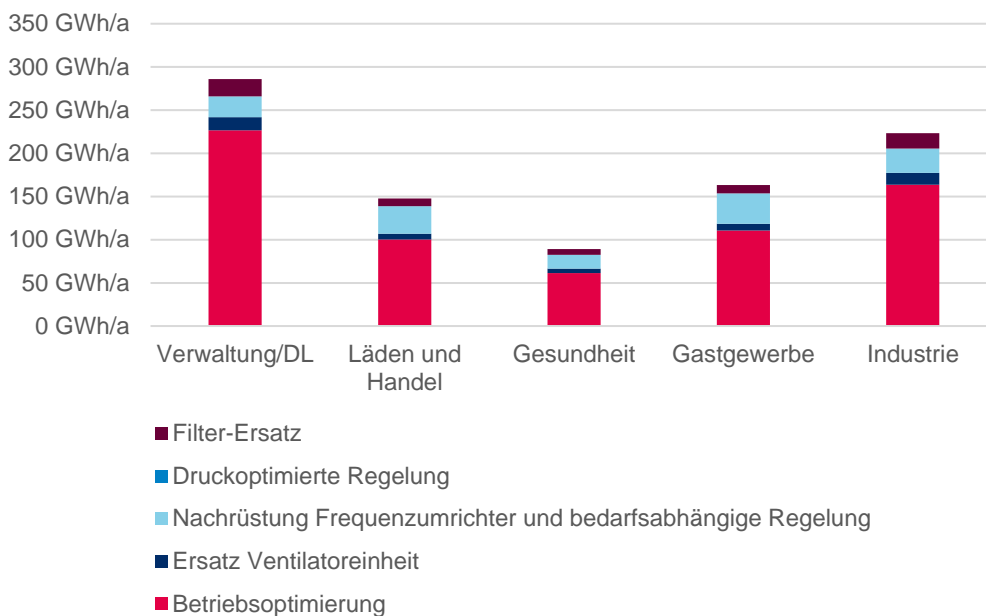


Abbildung 16: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme für bestehende Anlagen.

7.3 GESAMTSCHWEIZERISCHES POTENZIAL ERSATZINVESTITIONEN

Im Vergleich zu einer Investition im Rahmen einer energetischen Optimierung hat eine Ersatzinvestition nicht das Hauptziel, die Energieeffizienz einer Anlage zu erhöhen, sondern den Wert und die Funktionstüchtigkeit der Anlage zu erhalten. Analog zur Potenzialabschätzung bei energetischen Optimierungen (Kap. 7.2) wurde das gesamtschweizerische Potenzial bei Ersatzinvestitionen berechnet. Diese theoretische Betrachtung soll die Stromeinsparung durch einen kompletten Erneuerungszyklus aller raumlufttechnischen Anlagen hervorheben. In diesem Fall basiert die Wirtschaftlichkeitsabschätzung auf der Voraussetzung, dass die ersetzten Anlagenteile vollständig amortisiert sind. Die Tabelle 17 zeigt ein gesamtes Optimierungspotenzial von ca. 1'197 MWh/a. Dieses Szenario ist theoretisch, da Anlagen in der Praxis selten genau nach der effektiven Amortisierungsdauer ersetzt werden. Es zeigt aber auf, inwiefern der Amortisierungsgrad von Anlagen die Wirtschaftlichkeit von energetischen Optimierungen beeinflusst.

Die Unterschiede beim ermittelten Optimierungspotenzial bei Ersatzinvestitionen und bei reinen energetischen Optimierungen sind insbesondere bei materialintensiven Massnahmen (z. B. Ersatz Ventilatoreinheit) markant. Dies liegt daran, dass der vorzeitige Ersatz von Anlagekomponenten selten wirtschaftlich ist. Bei Ersatzinvestitionen sind hingegen die Anlagekomponenten bereits amortisiert, was die Wirtschaftlichkeit und somit die Wirksamkeit von Massnahmen bedeutend erhöht.

Die ermittelte Einsparung nach einem kompletten Erneuerungszyklus sämtlicher Anlagen ist als theoretischer Wert zu verstehen. In der Realität werden die gesamten Lebenszykluskosten bei der Beschaffung selten in den Vordergrund gestellt, was tendenziell zur Beschaffung von Anlagen niedriger Energieeffizienz führt.

Massnahme	Globales Optimierungspotenzial [GWh/a]					Total
	Verwaltung/DL	Läden und Handel	Gesundheit	Gastgewerbe	Industrie	
Ersatz Ventilatoreinheit	56.1	24.2	18.4	26.8	49.5	175.0
Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung	35.3	45.6	23.2	50.5	41.5	196.1
Druckoptimierte Regelung	5.0	2.1	1.6	2.4	4.4	15.6
Filter-Ersatz	18.4	7.9	6.0	8.8	16.2	57.3
Betriebsoptimierung	259.8	112.0	69.9	124.0	187.7	753.4
TOTAL (alle Massnahmen)	374.5	191.9	119.2	212.3	299.4	1'197.4

Tabelle 17: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme bei Ersatzinvestitionen.

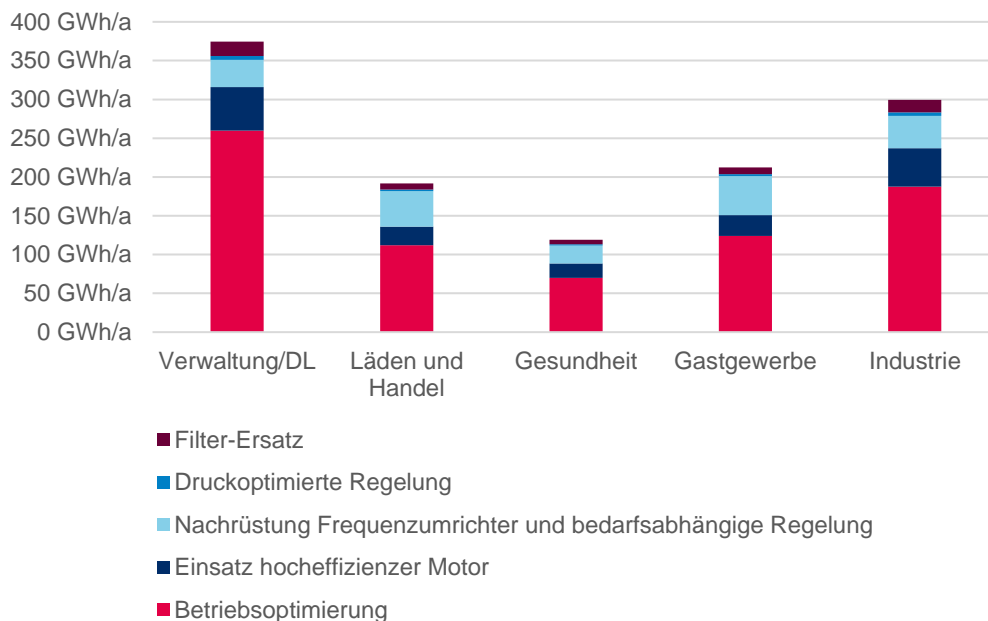


Abbildung 17: Optimierungspotenzial nach Branche und Optimierungsmassnahme bei Ersatzinvestitionen, absolute Zahlen.

8 CHANCEN UND HEMMNISSE

8.1 WIRTSCHAFTLICHE MASSNAHMEN OFT NICHT UMGESETZT

In der Praxis wird festgestellt, dass wirtschaftliche Energieoptimierungsmaßnahmen von den Eigentümern ohne externe Anreize oft nicht umgesetzt werden. Dies hat mehrere Ursachen:

- Viele Anlageneigentümer sind sich der Optimierungsmöglichkeiten nicht bewusst.
- Die Energiekosten spielen in vielen Betrieben eine untergeordnete Rolle in den Betriebskosten im Vergleich zum Jahresumsatz. Die Optimierung der haustechnischen Anlagen gehört nicht zum Kerngeschäft und generiert auch keinen direkten Kundenmehrwert und wird aus diesem Grund oft mit einer tiefen Priorität behandelt.

Ohne externe Anreize laufen somit die Anlagen oft bis zum technischen Lebensende und werden nicht allein aus Gründen der Energieeinsparung saniert oder erneuert.

8.2 ANLAGEDIMENSIONIERUNG

In der Planungsphase einer neuen Haustechnikanlage sind nicht alle Informationen vorhanden, die für eine exakte Dimensionierung nötig wären. Aus diesem Grund wird üblicherweise mit Sicherheitsmargen gearbeitet. Die Verlustminimierung von Kanalnetzen steht ausserdem im Widerspruch zur Minimierung des Platzbedarfs, was oft zu Kompromissen in Bezug auf die Energieeffizienz der Lüftungsanlagen führt.

Bei sich verändernden Betriebsbedingungen wird der Betrieb von Lüftungsanlagen auch nicht systematisch dem effektiven Lüftungsbedarf angepasst, was ebenfalls zu einem Mehrverbrauch führt.

In vielen Projekten spielen auch die Lebenszykluskosten in der Planungsphase eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu den Investitionskosten, was entsprechend auch tendenziell zu einer Vernachlässigung der Energiekosten bei der Beschaffung von Anlagen führt.

8.3 POLITISCHE UND NORMATIVE RAHMENBEDINGUNGEN

Die MuKE 2014 [1] verfügen über ein dediziertes Modul zur Betriebsoptimierung von Gebäudetechnikanlagen. Diese Betriebsoptimierungspflicht kann einen wichtigen Beitrag zur Stromsenkung im Lüftungsbereich sowie in anderen Gebäudetechnikbereichen leisten. Die Wirksamkeit der Betriebsoptimierungspflicht ist jedoch von folgenden potenziellen Hemmnissen betroffen:

- Anzahl Kantone, die das entsprechende Modul aus den MuKE in ihr Energiegesetz übernehmen.
- Ein konsequenter Vollzug zu gewährleisten ist anspruchsvoll.
- Ausreichende Anzahl von qualifizierten Fachkräften für die Umsetzung.

- Die Betriebe mit einem Stromverbrauch von weniger als 200 MWh/a und die Wohnbauten sind von der Betriebsoptimierungspflicht ausgeschlossen, obwohl eine energetische Betriebsoptimierung auch in diesem Segment oft wirtschaftlich wäre.

Die Einführung einer Mindesteffizienz für Ventilatoren in der schweizerischen Energieverordnung ermöglicht gemäss dem Erläuterungsbericht [5] eine Einsparung von 200 GWh/a im Vergleich zu einem Referenzszenario. Diese Massnahme gilt für sämtliche Ventilatoren mit einer elektrischen Eingangsleistung ab 125 W und leistet einen wesentlichen Beitrag zum Einsatz von effizienten Ventilatoreinheiten bei Neuanlagen und bei Ersatzinvestitionen.

Die SIA-Normen sowie teilweise die kantonalen Energieverordnungen stellen hohe Anforderungen an die Dimensionierung von Lüftungsanlagen bei Neu- und Umbauten. In der Praxis werden diese Anforderungen jedoch selten eingehalten und auch selten von den Behörden kontrolliert.

9 FAZIT UND EMPFEHLUNG

Bezogen auf den bestehenden Gebäudepark im Jahr 2015 führen die wirtschaftlichen Energieoptimierungsmassnahmen zu einer Stromeinsparung von ca. 909 GWh/a. Das ermittelte Einsparpotenzial liegt in derselben Grössenordnung wie die in der Studie «Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik» [4] (Effizienzscenario) berechnete Energieeinsparung im Lüftungsbereich. Gemäss [4] kompensieren diese Massnahmen in etwa die Auswirkung des erhöhten Stromverbrauchs durch mehr Lüftungsanlagen in der Zukunft.

Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf dem Einsparpotenzial der elektrischen Energie. In einem Gesamtkontext ist es jedoch erwähnenswert, dass die Massnahmen, die zu einer Reduzierung des Luftvolumenstromes oder der Volllaststunden führen, auch zu einer wesentlichen Einsparung der verbrauchten thermischen Energie führen.

Die grösste Wirkung wird durch die energetische Betriebsoptimierung mit ca. 663 GWh/a erreicht. Die wirtschaftliche Nachrüstung der bestehenden Anlagen für eine bedarfsabhängige Regelung führt zu einer zusätzlichen Einsparung von 135 GWh/a. Der Ersatz von Ventilatoreinheiten ist bei bestehenden Anlagen selten wirtschaftlich. Der Einsatz von hocheffizienten Ventilatoren ist hingegen bei Ersatz- und Neuinvestitionen meistens rentabel und auch gesetzlich gefordert. Der Einsatz von effizienten Filtern ist bei der Betrachtung sämtlicher Lebensdauerkosten wirtschaftlich, in den meisten Fällen sind jedoch in der Praxis Filter einer niedrigen Effizienzklasse zu finden.

Die aktuell geltenden gesetzlichen und normativen Anforderungen bilden eine Grundlage für das Inverkehrbringen von energieeffizienten Anlagenteilen und für die Planung und den Betrieb von Lüftungsanlagen nach energieeffizienten Kriterien. Ein wesentlicher Teil der in dieser Studie erwähnten Massnahmen kann durch den Vollzug der geltenden gesetzlichen und normativen Anforderungen umgesetzt werden. Entscheidend ist jedoch einerseits, dass die MuKEn

in den kantonalen gesetzlichen Grundlagen übernommen werden, und andererseits, dass die zuständigen Behörden organisatorische Massnahmen treffen, um einen konsequenten Vollzug zu gewährleisten.

Zusätzlich können folgende politische Massnahmen die Umsetzung von weiteren energetischen Optimierungen ermöglichen:

- Regulatorische Rahmenbedingungen oder Anreize für die Betriebsoptimierungen in Betrieben mit einem jährlichen Stromverbrauch von weniger als 200 MWh/a.
- Förderung von nicht-wirtschaftlichen Massnahmen bzw. des vorzeitigen Ersatzes von energierelevanten Anlagenteilen.

Die Förderung von nicht-wirtschaftlichen Massnahmen ist allerdings volkswirtschaftlich betrachtet nur zu rechtfertigen, wenn die Umsetzung von wirtschaftlichen Massnahmen und die Einhaltung der geltenden gesetzlichen und normativen Anforderungen durch die Privatwirtschaft auch konsequent erfolgt und wenn die Kosteneffizienz (CHF pro eingesparte kWh) sich in einem ähnlichen Rahmen bewegt wie die Förderung von Effizienzmassnahmen in anderen Bereichen.

10 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Konferenz Kantonaler Energiefachstellen: *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE)*. Bern, 2014.
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich: SIA 2024, 2015.
- [3] TEP Energy: *Stromverbrauch von Lüftungsanlagen in der Schweiz – Spezialauswertung Projekt GEPAMOD*, 2017.
- [4] Bundesamt für Energie BFE: *Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik*. Bern, 2016.
- [5] Bundesamt für Energie BFE: *Erläuternder Bericht zur Revision der Energieverordnung: Vorschriften Elektrogeräte (EnV; SR 730.01)*. Bern, 2013.
- [6] Schweizerischer Bundesrat: *Energieverordnung*. Bern: Energieverordnung (EnV) 730.01, 2017.
- [7] Europäische Kommission: *Ventilatoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW*. Verordnung (EU) Nr. 327/2011, 2011.
- [8] Europäische Kommission: *Umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren*. Verordnung (EG) Nr. 640/2009, 2009.
- [9] Europäische Kommission: *Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen*. Verordnung (EU) Nr. 1253/2014, 2014.
- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: *Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: SIA 382/1, 2014.
- [11] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: *Elektrische Energie im Hochbau*. Zürich: SIA 380/4, 2006.
- [12] Hochschule Luzern: *EFFILUFT - Elektroeffizienz von mittleren und grossen Lüftungsanlagen*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016.
- [13] M. Jakob, G. Catenazzi, R. Forster, T. Egli, T. Kaiser, R. Looser, M. Melliger, C. Nägeli, U. Reiter, M. Soini und B. Sunarjo: *Erweiterung des Gebäudeparkmodells gemäss SIA-Effizienzpfad Energie*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016.
- [14] Bundesamt für Energie BFE: *Richtlinie Zielvereinbarungen mit dem Bund zur Steigerung der Energieeffizienz*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2014.

- [15] Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH: *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2015 nach Verwendungszwecken*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016.
- [16] D. Marmet, M. Haag, B. Pavlu, D. Matter und M. Merkli: *Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen – Perspektiven bis 2035*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2004.
- [17] Bundesamt für Energie BFE: «Erfahrungsaustausch: Best Practice und Feedback» in *ProKilowatt Programme*. Bern, 2015.
- [18] S.A.F.E (topmotors.ch): *Luftförderung in Gebäuden und bei industriellen Anlagen*. Zürich, 2012.
- [19] VSE/Electrosuisse: «IE4-Produktlücke bei AC-Line-Start-Motoren» in *Bulletin.ch*, Nr. 3, S. 36–40, 2017.
- [20] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *Energieeinsparung durch Einsatz drehzahlsteuerbarer Antriebe in der technischen Gebäudeausrüstung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [21] Siemens Schweiz AG: *Bedarfsgeregelte Lüftung - Regelstrategie und Applikationen für einen energieeffizienten Betrieb*. Zug, 2009.
- [22] Bundesamt für Energie BFE: *Damit Klimaanlage Luft effizient bewegen*. Bern, 2017.
- [23] EUROVENT: *Eurovent 4/21 – Energy Efficiency Evaluation of Air Filters for General Ventilation Purposes*. Brüssel, 2016.
- [24] ebmpapst: *Energieeffiziente Ventilatoren*. 2014.
- [25] Nicotra Gebhardt GmbH: *High Performance Plug Fans RLMEvo*.

ANHANG

I. FLÄCHENANTEILE DER RAUMNUTZUNGEN NACH SIA 2024:2015

Raumnutzung	Haushalte	Verwaltung/Dienstleistung	Läden und Handel	Gesundheit	Gastgewerbe	Industrie
1.1	Wohnen MFH	43%				
1.2	Wohnen EFH	47%				
2.1	Hotelzimmer				23%	
2.2	Empfang, Lobby				2%	
3.1	Einzel-, Gruppenbüro	6%	5%	5%	5%	5%
3.2	Grossraumbüro					
3.3	Sitzungszimmer					
3.4	Schalterhalle, Empfang					
4.1	Schulzimmer					
4.2	Lehrerzimmer					
4.3	Bibliothek					
4.4	Hörsaal					
4.5	Schulfachraum					
5.1	Lebensmittelverkauf		20%			
5.2	Fachgeschäft		20%			
5.3	Verkauf Möbel, Bau, Garten		20%			
6.1	Restaurant				35%	
6.2	Selbstbedienungsrestaurant		1%			
6.3	Küche zu Restaurant				10%	
6.4	Küche zu Selbstbedienungsrestaurant		1%			
7.1	Vorstellungsraum					
7.2	Mehrzweckhalle					
7.3	Ausstellungshalle					
8.1	Bettzimmer			45%		
8.2	Stationszimmer			5%		
8.3	Behandlungsraum			10%		
9.1	Produktion (grobe Arbeit)					8%
9.2	Produktion (feine Arbeit)					47%
9.3	Laborraum					5%
10.1	Lagerhalle					10%
11.1	Turnhalle		7%			
11.2	Fitnessraum		1%			
11.3	Schwimmbhalle		6%			
12.1	Verkehrsfläche		12%	10%	5%	10%
12.2	Verkehrsfläche 24h			5%		5%
12.3	Treppenhaus	5%	4%	5%	5%	5%
12.4	Nebenraum		7%	15%	10%	10%
12.5	Küche, Teeküche		1%			
12.6	WC, Bad, Dusche	5%		5%		
12.7	WC		4%	5%		
12.8	Garderobe, Dusche		2%	5%	5%	
12.9	Parkhaus					
12.10	Wasch- und Trockenraum					
12.11	Kühlraum					
12.12	Serverraum		1%			

II. AUFGENOMMENE ANLAGEN

II.I BAUJAHR

Baujahr	Anzahl Zuluftventilatoren	Anzahl Abluftventilatoren
1984	6	6
1988	1	0
1991	1	0
1995	1	0
1998	1	1
2000	2	3
2001	7	6
2002	0	1
2003	1	1
2015	1	1
Keine Angaben	4	6
TOTAL	25	25

Tabella 18: Baujahr der gemessenen Anlagen.

II.II MOTORENLEISTUNG

Motorenleistung	Anzahl Zuluftventilatoren	Anzahl Abluftventilatoren
1.50 kW	0	1
1.60 kW	1	1
1.80 kW	1	2
1.80 kW	1	2
2.20 kW	0	1
2.60 kW	1	0
3.00 kW	3	3
4.00 kW	1	1
4.50 kW	3	1
5.50 kW	3	2
6.00 kW	0	2
7.50 kW	1	1
8.20 kW	0	2
10.00 kW	0	0
11.00 kW	1	1
13.00 kW	2	0
18.50 kW	1	1
55.00 kW	1	1
Keine Angaben	5	3
TOTAL	25	25

Tabella 19: Motorleistung der gemessenen Anlagen.

II.III BRANCHEN

Branche	Anzahl Standorte	Anzahl Lüftungsanlagen
Haushalte	0	0
Verwaltung/Dienstleistung	2	4
Läden und Handel	0	0
Gesundheit	3	9
Gastgewerbe	3	5
Industrie	3	7
TOTAL	11	25

Tabella 20: Branchenaufteilung der gemessenen Anlagen.

II.IV PRIMÄRE RAUMNUTZUNG

Primäre Raumnutzung nach SIA 2024	Anzahl Lüftungsanlagen
Ausstellung	3
Empfang, Lobby	3
Garderobe, Dusche	3
Grossraumbüro	2
Küche zu Restaurant	2
Küche zu Selbstbedienungsrestaurant	3
Produktion (feine Arbeit)	2
Produktion (grobe Arbeit)	2
Restaurant	1
Schwimmhalle	1
Selbstbedienungsrestaurant	1
Verkehrsfläche	2
TOTAL	25

Tabelle 21: Primäre Raumnutzung der gemessenen Anlagen.

III. POTENZIALBERECHNUNG

III.1 EINGESETZTE BERECHNUNGSPARAMETER

Massnahme	Einsparpotenzial Mittelwert der wirt. Massnahmen (K1)					Anteil bereits umgesetzt (K2)	Technische Realisierbarkeit (K3)	Wirtschaftliche Realisierbarkeit (PBZ < 8a) Bei Ersatzinvestitionen	Energetische Optimierung (K4)	Bemerkung
	Verwaltung/DL	Läden und Handel	Gesundheit	Gastgewerbe	Industrie					
Ersatz Ventilatoreinheit / Einsatz hocheffizienter Motor	15%	15%	15%	15%	15%	5%	75%	100%	25%	Nur wirtschaftlich bei sehr tiefem Kostenanteil Energie (alter Ventilator).
Nachrüstung Frequenzumrichter und bedarfsabhängige Regelung	15%	45%	30%	45%	20%	30%	80%	80%	50%	Nur technisch realisierbar bei schwankendem und messbarem Lüftungsbedarf. Frequenzumrichter nicht mit allen bestehenden Motoren einsetzbar.
Druckoptimierte Regelung	20%	20%	20%	20%	20%	5%	10%	50%	0%	Volumenstromregler und Stellungsrückmeldungen in Steuereinheit selten vorhanden oder nachrüstbar.
Filter-Ersatz	5%	5%	5%	5%	5%	30%	100%	100%	100%	Filter müssen sowieso periodisch ersetzt werden. Nur die Preisdifferenz zwischen den Effizienzklassen berücksichtigt.
Betrieboptimierung	55%	55%	45%	55%	45%	10%	100%	100%	80%	Potenzial stark von der Raumnutzung abhängig.