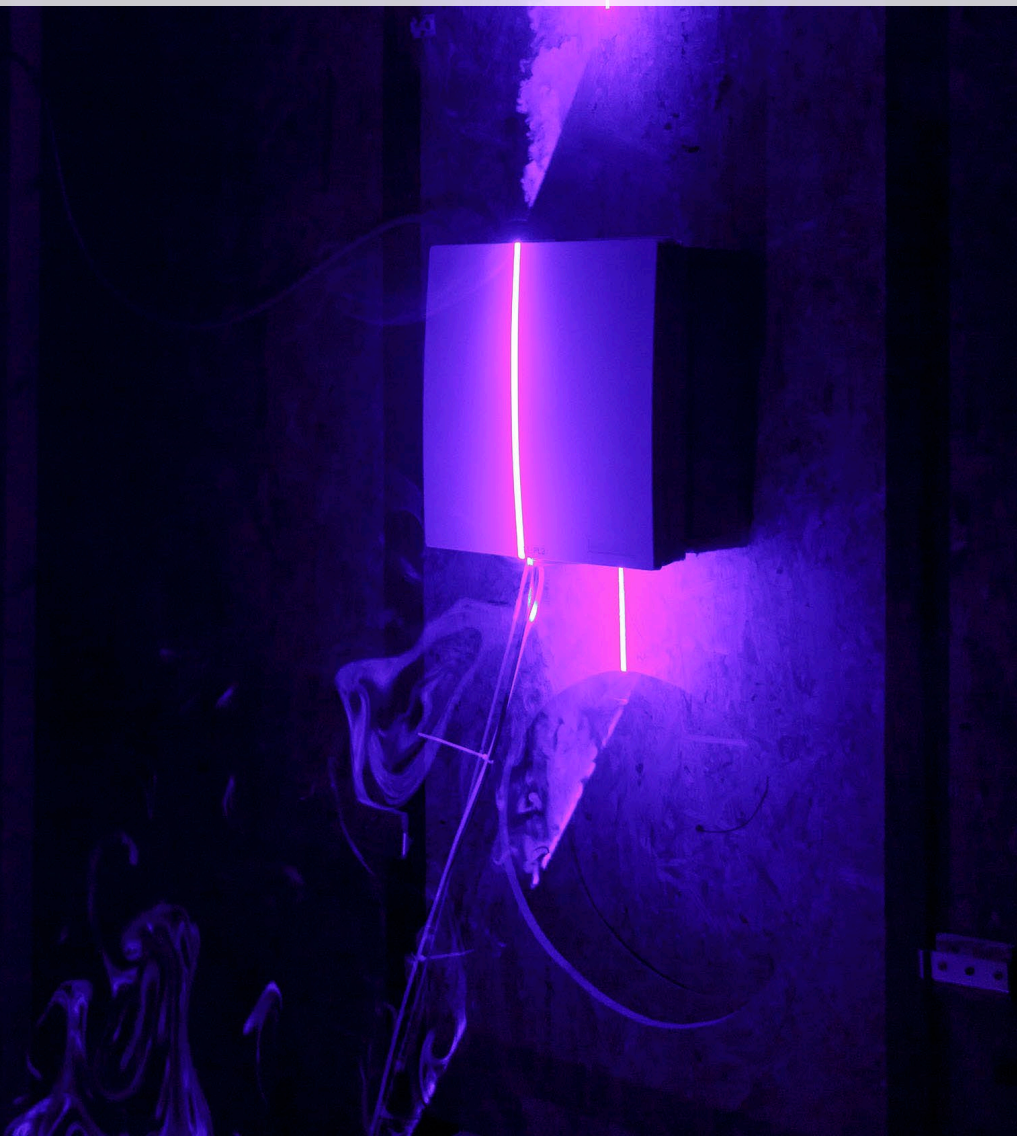


BBSR-  
Online-Publikation  
12/2021

# Untersuchung kostengünstiger Lüftungslösungen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau hinsichtlich Energieeffizienz, Lüftungseffektivität und Nutzerkomfort in gekoppelten Labor- und Simulationsumgebungen

Autorinnen und Autoren

Dominik Aimer  
Sarah Heiler  
Harald Krause  
Summe Park  
Markus Wirsberger



# Untersuchung kostengünstiger Lüftungslösungen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau hinsichtlich Energieeffizienz, Lüftungseffektivität und Nutzerkomfort in gekoppelten Labor- und Simulationsumgebungen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln der „ZukunftBau“.

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-18.24

Projektlaufzeit: 01.2019 - 02.2021

## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Wissenschaftliche Begleitung/Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
Andreas Windisch  
[andreas.windisch@zukunftbau.de](mailto:andreas.windisch@zukunftbau.de)

### Autorinnen und Autoren

Technische Hochschule Rosenheim  
Prof. Dr. rer. nat. Harald Krause (Projektleitung)  
[harald.krause@th-rosenheim.de](mailto:harald.krause@th-rosenheim.de)

Technische Hochschule Rosenheim  
Dominik Aimer, M. Sc.  
[dominik.aimer@th-rosenheim.de](mailto:dominik.aimer@th-rosenheim.de)

Technische Hochschule Rosenheim  
Markus Wirnsberger, M. Sc.  
[markus.wirnsberger@th-rosenheim.de](mailto:markus.wirnsberger@th-rosenheim.de)

Fraunhofer Institut für Bauphysik, Valley  
Sarah Heiler, M. Sc.  
[sarah.heiler@ibp.fraunhofer.de](mailto:sarah.heiler@ibp.fraunhofer.de)

Fraunhofer Institut für Bauphysik, Valley  
Dr. Summe Park  
[summe.park@ibp.fraunhofer.de](mailto:summe.park@ibp.fraunhofer.de)

### Projektpartner

CG Elementum AG  
Ruediger Buchheim (bis 02.2020)  
Steffen Guhlemann (ab 02.2020)

Maico GmbH  
Dipl.-Ing. (FH) Achim Grunschel

VELUX Deutschland GmbH  
Daniel Pauk, M.Eng.

Stand  
12 2021

Vervielfältigung  
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Harald Krause, Dominik Aimer, Markus Wirnsberger Sarah Heiler, Summe Park. Untersuchung kostengünstiger Lüftungslösungen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau hinsichtlich Energieeffizienz, Lüftungseffektivität und Nutzerkomfort in gekoppelten Labor- und Simulationsumgebungen . BBSR-Online-Publikation 12/2021, Bonn, 12 2021.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract in English	7
1 Ausgangslage	8
2 Bewertungsgrößen	10
Feuchte	10
Luftqualität	10
Lüftungswärmeverluste	11
Elektrischer Energiebedarf	12
Effizienz der Lüftungsanlage	13
Thermische Behaglichkeit	15
Wirtschaftlichkeit	16
3 Randbedingungen	17
Verwendete Grundrisse	17
Lüftungssysteme	19
CO <sub>2</sub> -, Feuchte- und Wärmeemissionen	39
Anwesenheitsprofile für die Grundrisse	40
4 Wirtschaftlichkeit	44
5 Vorstellung Simulationsmodelle	48
CONTAM	48
IESS	54
6 Versuchsaufbau in der Forschungswohnung der TH Rosenheim	56
Beschreibung der Forschungswohnung	56
Verwendete Lüftungsgeräte	58
Vorrichtungen für Stoff- und Wärmeeinbringung sowie Konditionierung von Innen und Außenraum	60
Messaufbau	63
Bestimmung der Luftdichtheit der Forschungswohnung	64
7 Validierung der Simulationsmodelle mit der Konzentrationsabklingmethode	66
Versuchsdurchführung	67
Ergebnisse	68
8 Validierung der Simulationsmodelle mit Tagesprofilen	71
Messungen mit Tagesprofilen	71
Ergebnisse und vergleichende Betrachtung	71
Schlussfolgerung zur Validierung des IESS-Modells	75
9 Jahressimulation	76



Verwendeter Klimadatensatz	76
Simulationsergebnisse mit CONTAM	78
Simulation von Varianten mit angepassten Volumenströmen mit CONTAM	95
Entscheidungsgrundlage bei der Wahl eines Lüftungssystems in Abhängigkeit des Grundrisses	108
10 Bewertung der Effizienz der Lüftungssysteme	110
11 Thermische Behaglichkeit der Lüftungssysteme	117
12 Studie zur Nutzerakzeptanz von Wohnraumlüftungssystemen	127
Ziele und Methode	127
Fokusgruppe	128
Online Panel-Umfrage	134
Zusammenfassung der Nutzerakzeptanzstudie	142
13 Abschließende Bewertung der Lüftungssysteme	144
Bewertungsschema	144
Bewertung der Varianten mit alternativer Volumenstromauslegung in der Jahressimulationen	149
14 Zusammenfassung	151
15 Empfehlungen für die Auslegung von Systemen und die Normungsarbeit	152
16 Ausblick	154
17 Abbildungsverzeichnis	157
18 Tabellenverzeichnis	161
19 Anhang	164
Kosten für Investition und Filterwechsel der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse	164

## Kurzfassung

Die DIN 1946 Teil 6: Lüftung von Wohnungen wurde 2019 novelliert. Konnte nach der bisherigen Norm für eine Nutzungseinheit nur eine Art von Lüftungssystem verwendet werden, ist in der Neuauflage nun auch die Kombination unterschiedlicher Lüftungssysteme in einer Nutzungseinheit zulässig. Bisher stehen hierfür allerdings keine Auslegungsgrundlagen zur Verfügung. Die einzelnen Lüftungssysteme können nach Norm ausgelegt werden, jedoch werden hierbei nicht die Wechselwirkungen zwischen den Systemen berücksichtigt.

Solche Auslegungsgrundlagen wurden im vorliegenden Forschungsprojekt erarbeitet. Da die Effektivität und die Akzeptanz von Wohnungslüftungssystemen von vielen Faktoren abhängig sind, wurden neben den lüftungstechnischen Leistungskriterien, wie Luftqualität und Lüftungswärmeverluste, auch noch weitere Aspekte betrachtet. Für die Bewertung der Lüftungskonzepte wurde sowohl eine Analyse der Gesamtkosten für einen Zeitraum von 30 Jahren als auch eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit durchgeführt. In einer Nutzerakzeptanzstudie wurden die Akzeptanz der Nutzer von unterschiedlichen Lüftungssystemen, als auch das allgemein verfügbare Wissen über Wohnungslüftung ermittelt.

Für die Untersuchung der Lüftungseigenschaften und der Wechselwirkungen der unterschiedlichen Lüftungssysteme untereinander wurden sowohl ein Multizonen-, als auch ein zonales Simulationsmodell mithilfe von Messergebnissen validiert. Diese Messungen wurden in der Forschungswohnung an der Technischen Hochschule Rosenheim durchgeführt. Mit den Simulationsmodellen wurde mit einer Jahressimulation das Verhalten der Lüftungssysteme für drei verschiedene Grundrisse ermittelt und mit zuvor festgelegten Kriterien das Lüftungsverhalten bzgl. Luftqualität und Energieeffizienz bewertet. Es konnten so Dimensionierungsempfehlungen für überlagerte Lüftungskonzepte erarbeitet werden. Zusätzlich wurden die in Deutschland üblicherweise verwendeten Lüftungskonzepte anhand von weiteren Kriterien bewertet.

## Abstract in English

In 2019, a new version of DIN 1946 Part 6: Ventilation of dwellings was released. Whereas the previous standard only allowed one type of ventilation system to be used for a dwelling, the new version now also permits the combination of different ventilation systems. Up to now, however, no design basis has been available for this. The ventilation systems can be designed according to the standard, but interaction between the systems are not taken into account.

In the research project, design principles for ventilation systems were developed in accordance with DIN1946-6:2019. Since the effectiveness and acceptance of residential ventilation systems depend on many factors, other aspects were considered in addition to ventilation performance criteria, such as air quality and ventilation heat losses. For the evaluation of the ventilation concepts, both an analysis of the total costs for a period of 30 years and an evaluation of the thermal comfort were carried out. In a user acceptance study, the user acceptance of different ventilation systems as well as the generally available knowledge about residential ventilation were determined.

To investigate the ventilation performance and the interaction between the different ventilation systems, both a multizone and a zonal simulation model were validated with the use of measurement results. These measurements were performed in the research apartment at the Rosenheim Technical University of Applied Sciences. The simulation models were used to determine the behavior of the ventilation systems for three different floor plans using an annual simulation. The ventilation behavior in terms of air quality and energy efficiency was evaluated using previously defined criteria. In this way, dimensioning recommendations for superimposed ventilation concepts could be developed. In addition, the ventilation concepts commonly used in Germany were evaluated on the basis of further criteria.

## Ausgangslage

Lüftungssysteme für Wohnungen dienen zum einen zur Sicherstellung des Feuchteschutzes zum anderen aber auch zur Gewährleistung einer guten Luftqualität für die Bewohner. Im Hinblick auf den Feuchteschutz soll verhindert werden, dass durch einen zu geringen Luftaustausch, die Luftfeuchte im Gebäude kritische Werte überschreitet und so zur Beeinträchtigung der Gesundheit von Bewohnern und zu Schäden an Gebäuden führen kann. Ein zu geringer Luftwechsel kann unterschiedliche Ursachen haben. Grundsätzlich werden Gebäude jedoch immer dichter gebaut, um den unkontrollierten Luftaustausch zwischen Gebäude und Umgebung zu verringern und Feuchteschäden in Bauteilen zu vermeiden. Um Feuchteschäden zu verhindern, muss deshalb ein nutzerunabhängiger Mindestluftwechsel gewährleistet sein. Wird dieser Mindestluftwechsel nicht durch Infiltrationsvolumenströme durch die Gebäudehülle abgedeckt, muss der Luftwechsel über eine Lüftungstechnische Maßnahme sichergestellt werden. Diese kann nach DIN 1946-6:2019 [1] dimensioniert werden. In der DIN 1946-6:2019 [1] werden verschiedene Typen von Lüftungssystemen aufgeführt (s. Abbildung 1). Es wird zwischen zwei Hauptgruppen „Freie Lüftung“ und „Ventilatorgestützte Lüftung“ unterschieden. Dies werden wiederum in Untergruppen unterteilt. Bei der ventilatorgestützten Lüftung wird zwischen den folgenden Typen „Abluftsystem“, „Zuluftsystem“ und „Zu-/ Abluftsystem“ differenziert.

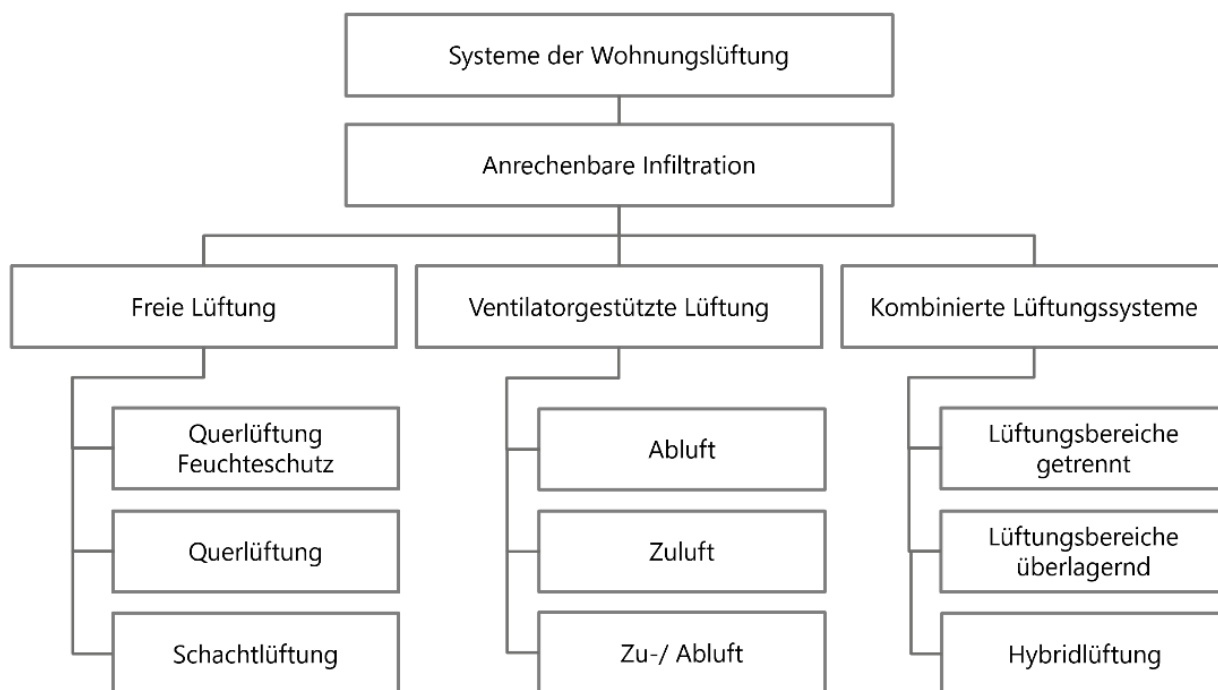


Abbildung 1 Systeme der Wohnungslüftung nach DIN1946-6:2019 [1] (eigene Darstellung)

Nach vorheriger DIN 1946-6:2009 [2] wurde für eine Nutzungseinheit ein Lüftungssystem verwendet. Die DIN 1946-6:2009 [2] wurde 2019 novelliert und durch die DIN 1946-6:2019 [1] ersetzt. Nach neuer Norm können nun auch mehrerer Lüftungssysteme innerhalb einer Wohneinheit kombiniert werden. Dies bietet neue Möglichkeiten bei der Be- und Entlüftung von Räumen. Bspw. können Einzelraumlüftungsgeräte (Zu- und Abluftsystem) in den Aufenthaltsräumen (Wohnzimmer, Schlafzimmer) mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen (Bad, Küche) kombiniert werden. Bisher stehen noch keine Planungs- und Entscheidungsgrundlagen für Planer und Bauherren für kombinierte Lüftungssysteme zur Verfügung.

Eine korrekte Dimensionierung der Luftvolumenströme und somit der Anlagenbestandteile hat einen entscheidenden Einfluss auf die Investitions- und Betriebskosten von Wohnungslüftungsanlagen. Um die Akzeptanz und somit die Verbreitung von Wohnungslüftungsanlagen zu fördern, ist es von Interesse, diese Kosten möglichst gering zu halten.



## Bewertungsgrößen

Im Vergleich zu Lüftungsanlagen in Nicht-Wohngebäuden, in denen Lüftungsanlagen zur Aufrechterhaltung der Mitarbeiterproduktivität beitragen [3], lässt sich in Wohngebäuden der Mehrnutzen schwer quantifizieren. Eine Wohnungslüftungsanlage hat unterschiedliche Aufgaben. Entsprechend müssen die Bewertungsgrößen gewählt werden. Die Auswahl der im Projekt verwendeten Bewertungsgrößen wird im Folgenden vorgestellt.

### Feuchte

Eine wesentliche Funktion einer Wohnungslüftungsanlage ist die Sicherstellung des Feuchteschutzes. Konkret bedeutet das die Verhinderung von Gesundheitsbeeinträchtigung und Schäden an der Bausubstanz infolge zu hoher Feuchtigkeit. Der Feuchteschutz muss daher von jedem Lüftungssystem erfüllt werden. Eine Lüftungsanlage soll durch einen beständigen und nutzerunabhängigen Luftwechsel für den notwendigen Luftaustausch sorgen, um die relative Feuchte unter einem kritischen Wert zu halten. Schimmelwachstum an Bauteiloberflächen findet vermehrt ab einer relativen Luftfeuchte von 80% statt [4]. Die geringste Temperatur im Raum und somit die höchsten relativen Luftfeuchten sind gewöhnlich an Außenbauteilen und dort im Bereich von Wärmebrücken zu finden. Die relative Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche ist von der Luftfeuchtigkeit im Raum, der Innen- und Außentemperatur und dem Wärmedurchgangswiderstand der Wand abhängig. Nach DIN4108-2:2013 [5] wird die kritische Oberflächenfeuchte von 80 % bei einer Oberflächentemperatur von 12,6 °C ab einer Raumlufffeuchte von 50 % überschritten. Ein Grenzwert von 50 % r.F. scheint daher ein mögliche Bewertungsgröße für die Bewertung des Feuchteschutzes zu sein. Kurzzeitige Überschreitungen des Grenzwertes sind jedoch unkritisch. Deshalb ist eine Bewertungsgröße, welche die Dauer der Überschreitung mit einbezieht, sinnvoll. Zur Bewertung der Dauer der Überschreitung des Grenzwertes können die Feuchteüberstunden nach Formel (1) berechnet werden.

$$T_{\text{Überschreitung, RH} > 50\%} = \sum_{t=0}^T t \quad (1)$$

$T_{\text{Überschreitung, RH} > 50\%}$  Feuchteüberstunden (Zeit in der die relative in h Luftfeuchte über 50 % liegt.)

### Luftqualität

Die Qualität der Luft hängt von der Konzentration der unterschiedlichen Schadstoffe ab. Dabei kann unterschieden werden zwischen Schadstoffen, die vom Menschen emittiert werden und solche die nicht direkt vom Menschen stammen. Dazu zählen Ausdünstungen aus Möbeln, Baustoffen und Feinstaub. Während menschliche Quellen den Raum nur während der Aufenthaltsdauer mit Schadstoffen belasten, findet eine Belastung durch Emissionen aus Möbel und Baustoffen kontinuierlich statt. Eine entsprechende Unterscheidung der zwei Emissionsarten wird erst bei intermittierendem Betrieb von Lüftungsanlagen relevant [6]. Intermittierender Betrieb bedeutet, dass die Lüftungsanlage zeitweise abgeschaltet wird. Da in der DIN1946-6:2019 [1] von einem kontinuierlichen Betrieb der Lüftungsanlage ausgegangen wird, wird im vorliegenden Projekt auf eine entsprechende Differenzierung verzichtet. Es werden weiter die menschlichen Emissionen zur Bewertung der Luftqualität verwendet.

Personen geben unter anderem CO<sub>2</sub> an ihre Umgebung ab. CO<sub>2</sub> hat in den in Innenräumen üblichen Konzentrationen keine gesundheitsbeeinträchtigende Wirkung auf den Menschen. Jedoch korreliert die Qualität der Luft und die damit verbundenen Einflüsse auf den menschlichen Organismus gut mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum, vorausgesetzt der Ursprung der Emissionen ist überwiegend menschlich

[7]. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration eignet sich daher gut für die Bewertung der Luftqualität. In der DIN1946-6:2019 [1] sind jedoch keine Grenzwerte für die Bewertung der Luftqualität in Wohnräumen, wie z.B. anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration, festgelegt. Mit der DIN EN 16798-1:2015 [8] werden voraussichtlich Kriterien für die Bewertung der Luftqualität in Wohngebäuden eingeführt, diese liegt seit 2015 jedoch nur in der Entwurfsfassung vor.

Max von Pettenkofer [9] hat eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm als Grenze bezeichnet, ab der die Qualität der Luft als unzureichend bezeichnet werden sollte. Diese findet auch heutzutage noch Anwendung, wie beispielsweise in Spanien für die Bewertung von bedarfsgeführten Wohnungslüftungssystemen [10]. Das Umweltbundesamt bezeichnet eine CO<sub>2</sub>-Konzentration geringer als 1000 ppm als hygienisch unbedenklich [11].

Die Bewertung der Luftqualität nur anhand von Grenzwerten vorzunehmen erscheint nicht zielführend. Analog zur Bewertung der Feuchte, sind kurzfristige Überschreitungen von Grenzwerten tolerierbar. Eine aussagekräftige Bewertungsgröße zum Vergleich von Lüftungssystemen sollte sowohl die Dauer als auch Höhe der Überschreitung beinhalten. Für die Bewertung der Luftqualität kann die kumulierte Grenzwertüberschreitung berechnet werden. Analog zu den Übertemperaturgradstunden bei der Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013 [5]. Mit dieser Kennzahl wird neben der Dauer der Überschreitung auch die Höhe der Überschreitung mitberücksichtigt. Dieses Verfahren wird unter anderem in Spanien [10] für die Bewertung von bedarfsgeführten Regelstrategien für Lüftung in Wohngebäuden verwendet. Berechnet werden die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden nach Formel (2). Als Schwellenwert wurde in dieser Formel 1000 ppm gewählt. Dieser Wert kann an jeweilige Erfordernisse oder Normen angepasst werden.

$$E_{CO_2 > 1000} = \int (C_{CO_2 > 1000}(t) - 1000) dt \quad (2)$$

$E_{CO_2 > 1000}$	CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	in	ppm*h
$C_{CO_2 > 1000}(t)$	CO <sub>2</sub> -Konzentration im Raum über 1000 ppm	in	ppm
t	Zeit	in	h

## Lüftungswärmeverluste

Lüftungswärmeverluste entstehen beim Austausch der Raumluft durch Außenluft mit niedrigerer Temperatur. Die warme Raumluft wird in der Heizperiode durch kältere Außenluft ausgetauscht. Zur Aufrechterhaltung der Raumtemperatur muss dieser Energieverlust ausgeglichen werden. Die hierzu benötigte Energie wird als Lüftungswärmeverlust bezeichnet und kann nach DIN 18599-2:2018 [12] berechnet werden (s. Formel (3)). Eine wichtige Rolle spielt dabei die Rückwärmezahl des Lüftungsgerätes. Im vorliegenden Projekt wurde diese für alle Systeme mit Wärmerückgewinnung auf 80 % festgelegt, da bei der Vielzahl der Produkte und Werte keine sinnvolle Auswertung möglich wäre. Den Autoren ist bewusst, dass insbesondere zentrale Wohnungslüftungsgeräte höhere Wärmerückgewinnung als die meisten Einzelraumgeräte aufweisen. Als Innentemperatur der Räume wird nach DIN 1946-6:2019 [1] für das Bad 24 °C und für alle anderen Räume 21 °C angesetzt.

$$Q_{v\_loos} = \int_{t=0}^{T_{HP}} \sum_{i=1}^{I_{Räume}} \dot{V}_{ab,i}(t) * \rho_L * c_p * (\theta_{ausseen} - \theta_{innen,i}(t)) * \eta_{WRG} dt \quad (3)$$

$Q_{v\_loos}$	Lüftungswärmeverluste der Wohnung	in	kWh
$\dot{V}_{ab,i}$	Abluftvolumen im Raum i	in	m <sup>3</sup> /h
$\rho_L$	Dicht der Luft	in	kg/m <sup>3</sup>
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität der Luft	in	kJ/kg/K
$\theta_{ausseen}$	Temperatur der Luft außen	in	°C
$\theta_{innen,i}$	Temperatur der Luft innen im Raum i	in	°C
$\eta_{WRG}$	Rückwärmezahl des Lüftungsgerätes	in	-
$I_{Räume}$	Anzahl der Räume in der Nutzungseinheit	in	-
$T_{HP}$	Dauer der Heizperiode	in	h

### Elektrischer Energiebedarf

Eine weitere Kenngröße, die zur Bewertung der Qualität eines Lüftungssystems verwendet werden kann, ist der elektrische Energiebedarf des Lüftungssystems. In der europäischen Ecodesign Richtlinie für Lüftungsgeräte [13] ist hierfür die spezifische Leistungsaufnahme (SPI1) definiert. Diese beschreibt das Verhältnis von Leistungsaufnahme zu gefördertem Volumenstrom. Die SPI wird per Definition bei 70 % des maximalen Volumenstroms ermittelt. Bei Lüftungsgeräten mit Kanal, in der Regel also zentrale Lüftungssysteme, wird das Kanalnetz mit einem externen Druckverlust von 50 Pa angenommen. Bei Lüftungssystemen mit aktiven Überströmern ist das Kanalnetz reduziert. Die externen Druckverluste werden dann mit der Hälfte des Druckverlustes eines konventionellen zentralen Lüftungssystems angenommen. Bei dezentralen Lüftungsgeräten ohne Kanal beträgt der externe Druckverlust 0 Pa bei der Ermittlung der SPI. Der SPI hat die Einheit W/(m<sup>3</sup>/h) und muss im ErP2-Datenblatt eines Lüftungsgerätes aufgeführt sein. In Tabelle 1 sind die SPI-Werte der in dem Projekt verwendeten Lüftungsgeräte aufgeführt.

Tabelle 1 SPI-Werte für Lüftungsgeräte die im Zuge des Projekts verwendet wurden

Lüftungsgeräte Typ	Lüftungsgerät	SPI in W/(m <sup>3</sup> /h)
Einzelraumlüftungsgerät mit rekuperativem Wärmetauscher	Maico WRG 35	0,165
Einzelraumlüftungsgerät mit regenerativem Wärmetauscher "Pendellüfter"	Maico PP60	0,14
Abluftventilator	Maico ECA 100 ipro	0,095
Zentrales Lüftungsgerät	Maico Trio LZ	0,28
Aktiver Überströmer	bluMartin Free Air Plus	0,028

1 engl. Specific Power Input

2 engl. Energy-related Products

Der gesamte elektrische Energiebedarf wird nach Formel (4) berechnet.

$$Q_{el} = \int_{t=0}^{T_{HP}} \sum_{j=1}^{J_{\text{Anzahl Lüftungsgeräte}}} SPI_{j} * \dot{V}_{RLT,j}(t) dt \quad (4)$$

$Q_{el}$	Elektrische Energie	in Wh
$SPI_{j}$	Spezifische Leistungsaufnahme des Lüftungsgerätes	in W/(m <sup>3</sup> /h)
$\dot{V}_{RLT,j}(t)$	Volumenstrom des Lüftungsgerätes zum Zeitpunkt t	in m <sup>3</sup> /h
$J_{\text{Anzahl Lüftungsgeräte}}$	Anzahl der Lüftungsgeräte	in -

### Effizienz der Lüftungsanlage

Der Nutzen einer Lüftungsanlage besteht in erster Linie darin, für frische Luft zu sorgen. Die warme, schadstoffbelastete Raumluft wird (während der Heizperiode) durch kältere Außenluft ausgetauscht, welche dann wieder auf Raumtemperatur aufgeheizt werden muss. Es besteht ein gewisser Interessenskonflikt, will man zugleich die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Lüftungswärmeverluste möglichst gering halten, da eine Erhöhung des Luftwechsels (und damit eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden) auch zu höheren Lüftungswärmeverlusten führt. Ein effizientes Lüftungssystem hält gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und die Lüftungswärmeverluste gering. Zur Bewertung der Effizienz wird die relative Lüftungsaufwandszahl verwendet (s. (5)). Relativ, weil die Werte ins Verhältnis zu den Werten des Referenzsystems gesetzt wurden. Als Referenzsystem wird das System 1 – Zentrales Lüftungssystem verwendet. Als Aufwand wird die Energie betrachtet, welche für das Aufheizen der kalten Außenluft benötigt wird, also die Lüftungswärmeverluste  $Q_{v_{100s}}$ . Wie auch die elektrische Energie  $Q_{el}$  die für den Betrieb des Lüftungssystems benötigt wird. Da für den Betrieb von Heizung und Lüftungsanlage unterschiedliche Energieträger verwendet werden können, müssen für die Vergleichbarkeit der Energien die jeweiligen Primärenergiefaktoren berücksichtigt werden. In Deutschland werden 49,3 % (Stand 2019) der Wohngebäude [Quelle] mit Erdgas beheizt. Es wird daher Erdgas für die weiteren Betrachtung verwendet. Die Primärenergiefaktoren für die Energieträger sind im Gebäudeenergiegesetz (GEG) – Anlage 4 gegeben [14]. Der Primärenergiefaktor für Erdgas ist 1,1, für Strom beträgt dieser 1,8.

$$\varepsilon_{L,rel} = \frac{1}{2} \left( \frac{f_{p,Heizung} * \frac{Q_{v_{loos}}}{Q_{v_{loos,ref}}} + f_{p,Strom} * \frac{Q_{el}}{Q_{el,ref}}}{f_{p,Heizung} + f_{p,Strom}} + \frac{E_{CO_2>1000}}{E_{CO_2>1000,ref}} \right) \quad (5)$$

$\varepsilon_{L,rel}$	Relative Lüftungsaufwandszahl	in -
$Q_{v_{loos}}$	Lüftungswärmeverluste	in Wh
$Q_{v_{loos,ref}}$	Lüftungswärmeverluste des Referenzsystems	in Wh
$Q_{el}$	Elektrische Energieaufnahme für den Betrieb des Lüftungssystems	in Wh
$Q_{el,ref}$	Elektrische Energieaufnahme für den Betrieb des Referenz-Lüftungssystems	in Wh
$f_{p,Heizung}$	Primärenergiefaktor des Heizmediums, hier Erdgas mit Primärenergiefaktor von 1,1	in -
$f_{p,Strom}$	Primärenergiefaktor von Strom, hier 1,8	in -
$E_{CO_2>1000}$	CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	in ppmh
$E_{CO_2>1000,ref}$	CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden des Referenzsystems	in ppmh



## Thermische Behaglichkeit

Als Vergleichsmaß für den Einfluss der verschiedenen Lüftungssysteme auf die thermische Behaglichkeit werden nach DIN EN ISO 7730 [15] die folgenden Indikatoren verwendet:

- PMV (engl.: predicted mean vote)
- PPD (engl.: predicted percentage of dissatisfied) → Anteil der unzufriedenen Personen aufgrund der Raumtemperatur, Strahlungstemperatur, relativer Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit
- DR (engl.: draught rating) → vorausgesagter Prozentsatz an Menschen, die sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlen
- PD (engl.: percentage of dissatisfied) → Anteil der unzufriedenen Personen allein aufgrund vertikaler Temperaturgradienten

In der DIN EN ISO 7730 wird zwischen den drei Behaglichkeitskategorien A, B und C unterschieden. Jede der drei Kategorien stellt unterschiedliche Anforderungen an die zuvor aufgeführten Bewertungsindikatoren. Diese werden im Folgenden in Tabelle aufgeführt. Nach DIN 1946-6:2019 gibt es keine vorgeschriebenen Grenzwerte für die thermische Behaglichkeit in Wohnräumen. Jedoch wird die Einhaltung der Kategorie empfohlen.

Alle Größen beziehen sich zunächst auf einen bestimmten Ort und auf eine bestimmte Höhe im Raum. Eine Ausnahme bildet PD: Hier fließt ausschließlich der Temperaturunterschied zwischen 0,1 und 1,7 m Höhe ein. Eine Zuordnung zu nur einer bestimmten Höhe ist daher nicht sinnvoll.

Zur Bestimmung von PMV, PPD, DR und PD werden die Temperatur, Strahlungstemperatur, relative Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit gemessen. Die verwendeten Sensoren sind in Kapitel Messaufbau beschrieben. Die Anordnung der Messtechnik im Raum und der Luftdurchlässe sind in Abbildung 17 in Kapitel Verwendete Lüftungsgeräte schematisch beschrieben. Gemessen wurden alle Werte für einen Zeitraum von mindestens 10 min und in einer Auflösung > 1 Hz. Pro Lüftungssystem erfolgten die Messungen gleichzeitig im Zuluftbereich und im Aufenthaltsbereich. Pro Messort wurde auf den Höhen 0,1 sowie 1,1 und 1,7 m gemessen. Der Zuluftbereich wurde bei ausreichendem Abstand zu den Wänden so gewählt, dass beim jeweiligen Lüftungssystem von der größtmöglichen Zuluftexposition ausgegangen werden kann, ohne jedoch die Höhe des Messaufbaus zu variieren. Der Aufenthaltsbereich blieb konstant über alle Messungen und wurde so gewählt, dass keine direkte Zuluftexposition besteht.

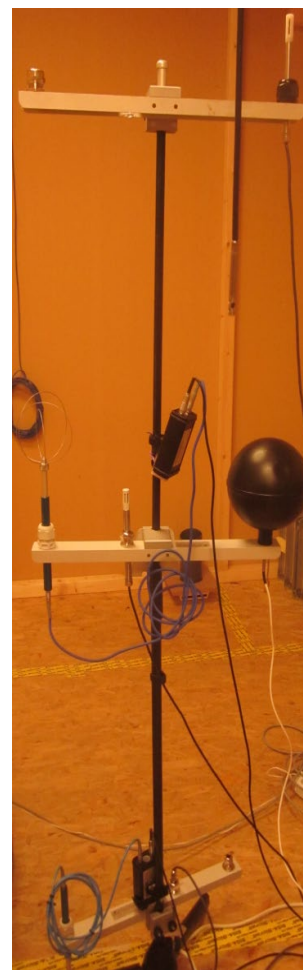


Abbildung 2 Für die Behaglichkeitsmessung verwendeter Messbaum mit Sensoren auf 0,1 m, 1,1 m und 1,7

Tabelle 2 Behaglichkeitskategorien und Grenzwerte nach DINEN ISO 7730

Kategorie	PPD in %	PMV in -	DR in %	PD in %
				vertikales $\Delta T$
A	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	<10	< 3
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	<20	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	<30	< 10

Die Messgrößen werden wie folgt auf den drei Höhen erfasst (siehe Abbildung 2):

- 0,1 m (Knöchelbereich): Temperatur, rel. Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit (nur 2., ergänzende Messreihe im Schlafzimmer)
- 1,1 m (für eine sitzende Person): Temperatur, rel. Luftfeuchte, Strahlungstemperatur
- 1,7 m (Nackebereich): Temperatur, rel. Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit (nur 1. Messreihe im Wohnzimmer)

## Wirtschaftlichkeit

Die Investitionskosten einer Lüftungsanlage können grundsätzlich nicht durch eingesparte Lüftungswärmeverluste wieder erwirtschaftet werden. Deshalb erscheint eine Lüftungsanlage aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht zunächst nicht rentabel. Hierbei werden jedoch andere, teils nicht direkt bezifferbare Vorteile wie erhöhter Nutzerkomfort, erhöhte Behaglichkeit und Sicherstellung von guter Raumluftqualität außer Acht gelassen [16]. Außerdem bleiben geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund ggf. eingesparter Lüftungswärmeverluste und damit auch geringere gesamtgesellschaftliche Folgekosten, die trotzdem für die Anschaffung einer Lüftungsanlage sprechen, unberücksichtigt. Das Umweltbundesamt gibt als Kostensatz für CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Berechnung der Klimafolgeschäden (bei Gleichgewichtung der Wohlfahrt zukünftiger Generationen) aktuell (Dezember 2020) 680 €/t CO<sub>2</sub> an [17].

Da hier nur der betriebswirtschaftliche Aspekt betrachtet werden soll und die anderen Punkte teils schon an anderer Stelle betrachtet werden, fließen hier nur die direkt bezifferbaren Kosten in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit ein.

Um alle Einflussgrößen in einer Größe zu repräsentieren, wurde die Annuitätenmethode nach VDI 2067 [18] angewendet. Hierbei ergibt sich die Annuität der Jahresgesamtzahlungen aus den Ausgaben (anfängliche Investition, Wartungskosten, Kosten für elektrische Energie) und den Erlösen (Energieeinsparung gegenüber Abluftsystem als Referenz ohne Wärmerückgewinnung) als sich regelmäßig wiederholende, gleich hohe Rückzahlung aus der Investition. Elektrischer Energieverbrauch sowie Lüftungswärmeverluste der Lüftungsanlagen wurden aus den Ergebnissen der Jahressimulationen (siehe Kapitel Jahressimulation entnommen). Eine positive Annuität würde daher bedeuten, dass die Anlage gewinnbringend ist. Im Fall der Lüftungsanlagen ist die Annuität jedoch in der Regel negativ. Die günstigste Anlage ist daher, welche die geringsten Ausgaben (negative Annuität) verursacht (vgl. [18]). Das in Kapitel Bewertungsgrößen verwendete Bewertungsschema vergleicht die Lüftungssysteme auch anhand von anderen Bewertungsgrößen, wie Lüftungswärmeverluste oder elektrischer Energieverbrauch, etc. Diese Größen bewerten ein Lüftungssystem umso günstiger, je niedriger sie ausfallen. Um in diesem Sinne eine ähnliche, zweckmäßige Größe aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu erhalten, wurde als geeignetes Maß zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit die annuitätischen Ausgaben als Negativwert der Annuität deklariert.

## Randbedingungen

### Verwendete Grundrisse

Um allgemeine Schlussfolgerungen treffen und die Ergebnisse auf in Deutschland übliche Wohnsituation im mehrgeschossigen Wohnbau übertragen zu können, wurde jeweils ein Grundriss für einen Ein-, Zwei-, und einen Drei-Personen-Haushalt gewählt. Die Grundrisse für den Ein- und den Drei-Personen-Haushalt entsprechen den in der DIN 1946-6:2019 Beiblatt 1 [19] für die Beispielrechnungen verwendeten Grundrisse. Für den Zwei-Personen-Haushalt wurde der Grundriss der Forschungswohnung der Technischen Hochschule Rosenheim verwendet (s. Kapitel Beschreibung der Forschungswohnung).

### Studentenapartment

Das Studentenapartment besteht aus einem kombinierten Wohn- und Schlafraum, in welchem auch eine Kochnische integriert ist. Das Apartment verfügt über ein innenliegendes Bad, was den Grundriss von den anderen unterscheidet. Bad und Kochnische verfügen jeweils über einen separaten Abluftdurchlass. Die Gesamtfläche beträgt  $32,2 \text{ m}^2$ , bei einer Raumhöhe von  $2,5 \text{ m}$  ergibt sich ein Raumvolumen von  $80,5 \text{ m}^3$ .

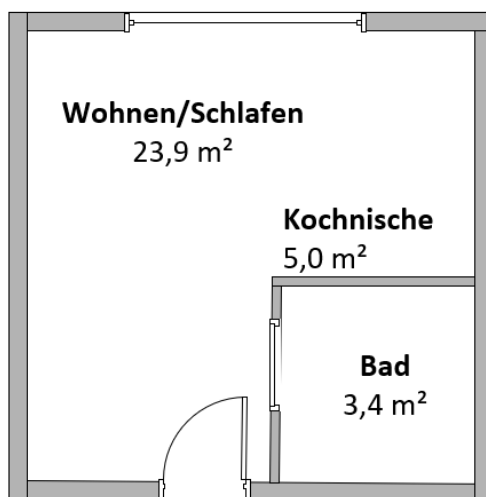


Abbildung 3 Grundriss Studentenapartment [16]

### Zwei-Zimmer-Wohnung

Die Zwei-Zimmer-Wohnung besteht aus den zwei Zuluft-Räumen Schlaf- und Wohnzimmer, sowie zwei Ablufträumen Küche und Bad. Alle Räume sind über den Flur miteinander verbunden. Dieser wird als Überströmbereich zwischen den Räumen verwendet. Die Zwei-Zimmer-Wohnung hat eine Grundfläche von  $68,6 \text{ m}^2$ . Da für die Zwei-Zimmer-Wohnung die Maße der Forschungswohnung der Technischen Hochschule Rosenheim verwendet wurden, beträgt die Raumhöhe hierbei  $2,8 \text{ m}$ . Dies resultiert in ein Raumvolumen von  $192 \text{ m}^3$ .

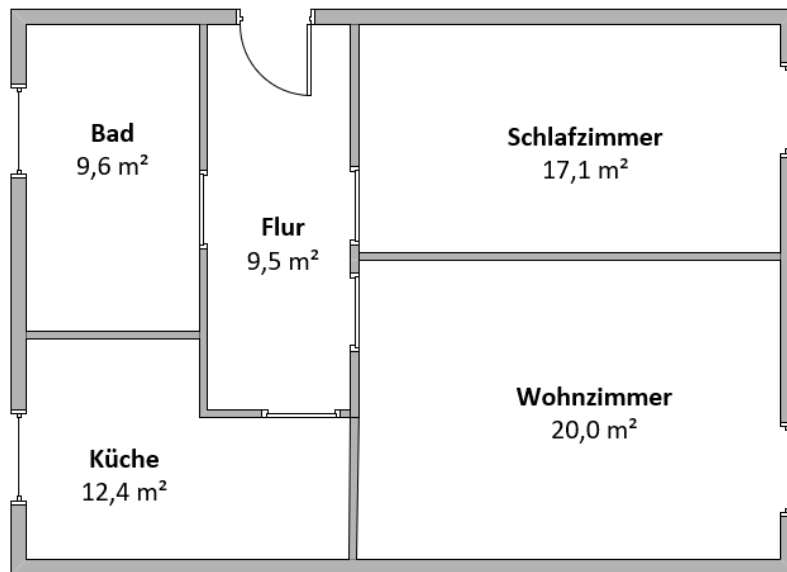


Abbildung 4 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung (eigene Darstellung)

### Drei-Zimmer-Wohnung

Die Drei-Zimmer-Wohnung besteht aus den drei Zuluft-Räumen Kinder-, Wohn- und Schlafzimmer, sowie den zwei Ablufträumen Küche und Bad. Zwischen den Räumen befindet sich ein Flur. Das Schlafzimmer verfügt über keinen eigenen Zugang zum Flur, sondern muss über das Wohnzimmer betreten werden. Bei Lüftungssystemen mit Luftaustausch zwischen den Räumen dient daher das Wohnzimmer, neben dem Flur, zusätzlich als Überströmbereich. Die Drei-Zimmer-Wohnung hat eine Grundfläche von 63,8 m<sup>2</sup>. Bei einer Raumhöhe von 2,5 m entspricht dies einem Raumvolumen von 159,5 m<sup>3</sup>.

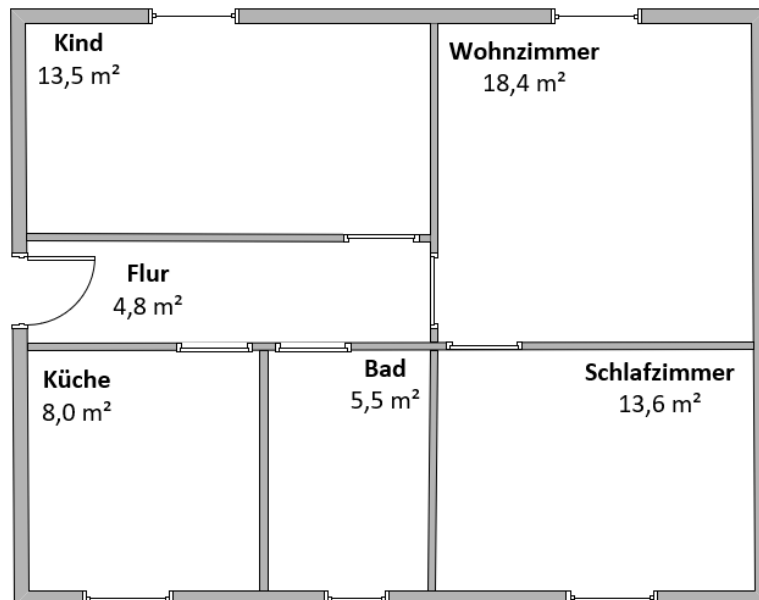


Abbildung 5 Grundriss Drei-Zimmer-Wohnung nach [16]

In Tabelle 3 sind die Kennzahlen der drei Grundrisse zusammengefasst.

Tabelle 3 Kennzahlen der drei Grundrisse

	Anzahl Räume	Gesamtfläche in m <sup>2</sup>	Gesamtvolumen in m <sup>3</sup>
Studentenapartment	Wohnbereich + Küche, Bad	32,2	80,5
Zwei-Zimmer-Wohnung	Wohn-, Schlafzimmer Bad, Küche	68,6	192
Drei-Zimmer-Wohnung	Wohn-, Schlaf-, Kinderzimmer Bad, Küche	63,8	159,5

## Lüftungssysteme

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Lüftungseigenschaften unterschiedlicher Wohnungslüftungssysteme untersucht. Dabei wurden einerseits bisher nach DIN 1946-6:2009 [2] zugelassene Wohnungslüftungssysteme betrachtet, als auch Lüftungssysteme mit überlagerten Lüftungstechnischen Maßnahmen, welche erst seit der Einführung der DIN 1946-6:2019 [1] möglich sind. In der DIN 1946-6:2019 [1] ist festgelegt, dass die Volumenströme für die Belüftung von innenliegenden Bädern und Toilettenräumen ohne Fenster nach DIN 18017-3:2020 [20] auszulegen sind. Diese Auslegung kann auch für entsprechende Küchen angewandt werden. Das Studentenapartment ist von den verwendeten Grundrissen der einzige mit innenliegendem Bad. Für das Studentenapartment wurde deshalb eine Fallunterscheidung zwischen Auslegung mit Berücksichtigung und ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] vorgenommen. Es ist hier anzumerken, dass bei der Zwei- und Drei-Zimmer-Wohnung die Volumenströme bei Auslegung nach DIN 18017-3:2020 [20] (bei konstantem Betrieb und DIN 1946-6:2019 [1]) identisch sind. Daher wurde hier auf eine Fallunterscheidung verzichtet.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der im Projekt untersuchten Lüftungssysteme. Die Volumenströme wurden nach DIN 1946-6:2019 [1], bzw. nach DIN 18017-3:2020 [20], ausgelegt. Eine detaillierte Erklärung, sowie die Auslegung der Systeme folgen in diesem Kapitel.



Tabelle 4 Untersuchte Lüftungssysteme

	Bezeichnung Lüftungssystem	Kombination von
1	Zentrales Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung	Keine
2	Zentrales Lüftungssystem mit WRG und aktiven Überströmern	Semi-Zentrales-Lüftungsgerät + Aktive Überströmer
3	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte	Keine
4	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen (Betrieb nach DIN1946-6)	Rekuperative ERLG + Abluftventilatoren
5a	Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen (Betrieb nach DIN1946-6)	Regenerative ERLG + Abluftventilatoren
5b	Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen (Betrieb nach DIN18017-3)	Regenerative ERLG + Abluftventilatoren
6	Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen	Regenerative ERLG + Rekuperative ERLG
7	Abluftanlage nach DIN1946-6	Keine
8a	Abluftanlage nach DIN18017-3 in Bad und Küche (Reduzierter Betrieb)	Keine
8b	Abluftanlage nach DIN18017-3 in Bad und Küche (Anwesenheitsgeführt)	Keine
9	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Auslegung reduzierter Betrieb) + idealisierte Fensterlüftung	Dezentrale Lüftungsgeräte + Freie Lüftung

#### Bestimmung der benötigten Außenluftvolumenströme und der wirksamen Infiltrationsvolumenströme

Der Außenluftvolumenstrom für die einzelnen Lüftungsstufen nach DIN 1946-6:2019 [1] wird mit Formel (6) berechnet. Dieser ist abhängig von der Fläche der Nutzungseinheit, der Belegungsichte und des Wärmedämmstandards. Im mehrgeschossigen Wohnungsbau ist nach DIN 1946-6:2019 [1] von einer hohen Belegungsichte auszugehen. Der n50-Wert für Nutzungseinheiten mit ventilatorgestützter Lüftung kann laut DIN 1946-6:2019 [1] mit  $1 \text{ h}^{-1}$  angenommen werden.

$$q_{v,ges,NE} = f_{Lst} * (-0,002 * A_{NE}^2 + 1,15 * A_{NE} + 11) \quad (6)$$

$q_{v,ges,NE}$	Volumenstrom für die Lüftungsstufe	in $\text{m}^3/\text{h}$
$A_{NE}$	Fläche der Nutzungseinheit	in $\text{m}^2$
$f_{Lst}$	Faktor zur Berücksichtigung der Lüftungsstufe	in -

In Tabelle 5 sind die Volumenströme für die Grundrisse und Lüftungsstufen aufgeführt. Im Folgenden werden die Umsetzung der Außenluftvolumenströme bei den unterschiedlichen Lüftungssystemen erläutert.

Tabelle 5 Außenluftvolumenströme  $q_{v,ges,NE}$  der unterschiedlichen Grundrisse in Abhängigkeit der Lüftungsstufe  $f_{LSt}$

		Volumenstrom $q_{v,ges,NE}$ nach Formel (6) in $m^3/h$ , für hohe Belegung		
		Studenten- apartment $A_{NE}=32,3m^2$	Zwei-Zimmer- Wohnung $A_{NE}=68,6m^2$	Drei-Zimmer- Wohnung $A_{NE}=63,8m^2$
Lüftung zum Feuchteschutz, $q_{v,ges,NE,FL}$ (Wärmeschutz hoch)	$f_{LSt} = 0,3$	14	24	23
Lüftung zum Feuchteschutz, $q_{v,ges,NE,FL}$ (Wärmeschutz niedrig)	$f_{LSt} = 0,4$	18	32	30
Nennlüftung, $q_{v,ges,NE,NL}$	$f_{LSt} = 1,0$	46	80	76

Bei Lüftungssystemen mit unausgeglichene Luftvolumenströmen, wie z.B. bei Abluftsystemen, kann der durch Unter- oder Überdruck entstandene In- oder Exfiltrationsvolumenstrom bei der Auslegung von ALD's angesetzt werden. Der wirksame Infiltrationsvolumenstrom kann mit der in der DIN 1946-6:2019 [1] gegebenen Formel (7) berechnet werden. Der Volumenstromkoeffizient  $e_z$  ist hierbei für Nutzungseinheiten ohne raumluftabhängige Feuerstätten für Abluftsysteme nach DIN 1946-6:2019 [1] und DIN 18017-3:2020 [20] jeweils mit 0,21 anzunehmen. Für Lüftungssysteme mit ausgeglichenen Zu- und Abluftvolumenströmen (z.B. zentrales Lüftungssystem) beträgt der Volumenstromkoeffizient  $e_z$  gleich 0.

$$q_{inf,Wirk} = e_z * V_{NE} * n_{50} \quad (7)$$

$q_{inf,Wirk}$	Wirksamer Luftvolumenstrom durch Infiltration	in $m^3/h$
$e_z$	Volumenstromkoeffizient	in $m^2$
$V_{NE}$	Luftvolumen der Nutzungseinheit	in $m^3$
$n_{50}$	Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck	in $h^{-1}$

Tabelle 6 zeigt die für die o.g. Annahmen berechneten wirksamen Infiltrationsvolumenströme für die einzelnen Grundrisse.

Tabelle 6 Nach DIN 1946-6:2019 [1] berechnete wirksame Infiltrationsvolumenströme  $q_{inf,Wirk}$

	Studentenapartment $V_{NE} = 80,8\text{m}^3$	Zwei-Zimmer-Wohnung $V_{NE} = 192\text{m}^3$	Drei-Zimmer-Wohnung $V_{NE} = 160\text{m}^3$
$q_{inf,Wirk}$ in $\text{m}^3/\text{h}$	17	40	34

Für die Festlegung der raumweisen Volumenströme eines Lüftungssystems muss zunächst der Gesamt-Außenluftvolumenstrom  $q_{v,ges,NL}$  nach Formel (8) bestimmt werden. Im Unterschied zum Volumenstrom der Nutzungseinheit für eine spezifische Lüftungsstufe  $q_{v,ges,NE}$  (s. Formel (6)), werden bei der Berechnung des Gesamt-Außenluftvolumenstroms  $q_{v,ges,NL}$  auch die Abluftvolumenströme der Räume  $q_{v,ges,R,ab,NL}$  berücksichtigt. Alle Grundrisse umfassen genau die zwei Ablufträume Küche ( $q_{v,ges,R,ab,NL} = 40\text{m}^3/\text{h}$ ) und Bad ( $q_{v,ges,R,ab,NL} = 40\text{m}^3/\text{h}$ ). Die Summe  $\sum_{R,ab} q_{v,ges,R,ab,NL}$  der Abluftvolumenströme beträgt daher für alle Grundrisse  $80\text{m}^3/\text{h}$ .

$$q_{v,ges,NL} = \max \left( q_{v,ges,NE,NL}; \min \left( \sum_{R,ab} q_{v,ges,R,ab,NL}; 1,2 * q_{v,ges,NE,NL} \right) \right) \quad (8)$$

$q_{v,ges,NL}$  Gesamt-Außenluftvolumenstrom bei Nennlüftung in  $\text{m}^3/\text{h}$

$q_{v,ges,R,ab,NL}$  Abluftvolumenströme der Räume bei Nennlüftung in  $\text{m}^3/\text{h}$

In Tabelle 7 sind die Volumenströme die für die Berechnung des Gesamt-Außenluftvolumenstroms  $q_{v,ges,NL}$  notwendig sind, sowie der  $q_{v,ges,NL}$  für alle Grundrisse aufgeführt.

Tabelle 7 Zusammenfassung der Volumenströme für die Berechnung des Gesamt-Außenluftvolumenstroms  $q_{v,ges,NL}$

	Studentenapartment	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
$q_{v,ges,NE,NL}$	46	80	76
$q_{v,ges,NE,NL} * 1,2$	55	96	91
$\sum_{R,ab} q_{v,ges,R,ab,NL}$	80	80	80
$q_{v,ges,NL}$	55	80	80

Der tatsächliche Volumenstrom der jeweiligen LtM wird bei ventilatorgestützten LtM nach Formel (9) berechnet. Für die Auslegung von ALD's in Kombination mit Abluftsystemen wird der wirksame Infiltrationsvolumenstrom (s. Formel (7)) angerechnet.

$$q_{v,LtM,vg} = q_{v,ges,NL} - (q_{inf,Wirk} + q_{v,Fe,wirk}) \quad (9)$$

$q_{v,LtM,vg}$  Außenluftvolumenstrom durch LtM in  $m^3/h$

$q_{v,Fe,wirk}$  Außenluftvolumenstrom durch Infiltration in  $m^3/h$

#### Festlegung der raumweisen Volumenströme der Lüftungssysteme

Der durch ermittelte Außenluftvolumenstrom durch die LtM  $q_{v,LtM,vg}$  wird nun auf die Räume aufgeteilt. Hierfür wird unterschieden zwischen Zu- und Ablufträumen. Die Aufteilung des gesamt Außenluftvolumenstroms auf die Ablufträume erfolgt nach Formel (10). Die Ergebnisse für die jeweiligen Lüftungssysteme sind in Tabelle 8 - Tabelle 20 aufgeführt.

$$q_{v,LtM,R,ab} = \frac{q_{v,ges,R,ab,NL}}{\sum_{R,ab} q_{v,ges,R,ab,NL}} * q_{v,LtM,vg,NL} \quad (10)$$

$q_{v,LtM,R,ab}$  Abluftvolumenstrom durch Lüftungstechnische Maßnahmen für den Abluftraum in  $m^3/h$

$q_{v,LtM,vg,NL}$  Außenluftvolumenstrom durch LtM bei Nennlüftung nach Formel (9) in  $m^3/h$

Die raumweisen Zuluftvolumenströme werden nach Formel (11) bestimmt. Für die Faktoren zur Aufteilung der Zuluftvolumenströme  $f_{R,ZU}$  wurden folgende Werte verwendet: Schlafzimmer 2,5, Wohnzimmer 2,5, Kinderzimmer 2. Die Ergebnisse für die jeweiligen Lüftungssysteme sind in Tabelle 8 - Tabelle 20 aufgeführt.

$$q_{v,LtM,R,ZU} = \frac{f_{R,ZU}}{\sum_{R,ZU} f_{R,ZU}} * q_{v,LtM,vg,NL} \quad (11)$$

$q_{v,LtM,R,ZU}$  Zuluftvolumenstrom durch Lüftungstechnische Maßnahmen für den Zulufttraum in  $m^3/h$

$f_{R,ZU}$  Faktor zur Aufteilung der Zuluftvolumenströme in  $m^3/h$

In der DIN 18017-3:2020 [20] wird zwischen unterschiedlichen Betriebsmodi (präsenzgeführt oder zeitabhängig) differenziert. Wird der Abluftvolumenstrom zeitabhängig gesteuert, wird für die Ablufträume Bad und Küche jeweils ein Volumenstrom von  $40 m^3/h$  angesetzt. Dieser darf für maximal 50 % der Zeit auf  $20 m^3/h$  reduziert werden. Bei einer präsentgeführten Steuerung des Abluftvolumenstroms, wird die Anlage ständig mit einem Mindestvolumenstrom von  $15 m^3/h$  pro Abluftraum betrieben. Bei Anwesenheit einer Person wird der Volumenstrom im entsprechenden Raum auf  $60 m^3/h$  erhöht. Eine entsprechende Fallunterscheidung wurde durchgeführt in dem die einzelnen Betriebsmodi als eigene Lüftungssysteme untersucht wurden.

### 1. Zentrales Lüftungssystem

Beim zentralen Lüftungssystem wird die Wohneinheit über ein zentrales Lüftungsgerät mit Luft versorgt. Die Luft wird über Luftleitungen in die Räume verteilt. Die Lüftung erfolgt im Kaskadenlüftungsprinzip. Dabei wird die Luft in die Zulufräume eingebracht und strömt über die Überströmbereich in die Ablufträume. Durch die sog. Doppel- oder Mehrfachnutzung der Luft können die Außenluftvolumenström im Vergleich zu anderen Lüftungssystemen reduziert werden. Als Zulufräume werden Aufenthaltsräume wie Wohn-, Arbeits-, und Schlafzimmer definiert. Ablufträume sind Räume, in denen vermehrt Feuchtigkeit, schlechte Gerüche oder Schadstoffe emittiert werden, wie z.B. in Bad oder Küche. Abbildung 6 zeigt schematisch die Umsetzung eines zentralen Lüftungssystems in der Zwei-Zimmer-Wohnung. In Tabelle 8 sind die raumweise aufgeteilten Volumenströme für die Lüftungssysteme dargestellt.

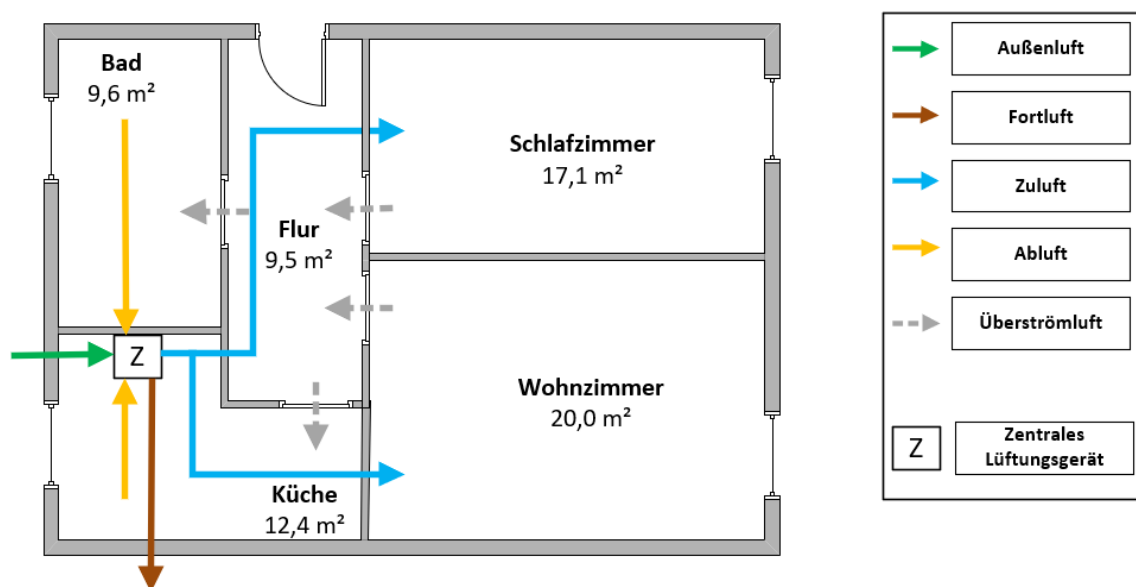


Abbildung 6 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung zentrales Lüftungssystem

Für das Studentenapartment wurde zusätzlich zwischen einer Auslegung mit und ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] unterschieden. Bei der Auslegung mit Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] wird für das Bad ein Abluftvolumenstrom von 40 m³/h (anstatt den 27,5 m³/h die bei einer Auslegung nur nach DIN 1946-6:2019 [1] verwendet werden). Der zusätzliche Abluftvolumenstrom von 12,5 m³/h (40 – 27,5 m³/h) müssen beim Zuluftvolumenstrom mit berücksichtigt werden.



Tabelle 8 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für Nennlüftung nach DIN 1946-6:2019 [1] für das Lüftungssystem: zentrales Lüftungssystem

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Abluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche	27,5	27,5	40	40
Zuluft	Schlafzimmer	67,5	55	40	28,5
	Wohnzimmer	-	-	40	28,5
	Kinderzimmer	-	-	-	23

## 2. Zentrales Lüftungssystem mit aktiven Überströmern

Die Luft wird von einem semizentralen Lüftungssystem in der Wohnung verteilt. Unterschied zum zentralen Lüftungssystem ist, dass die Zuluftleitungen nicht bis in die Zulufräume geführt werden, sondern im Flur enden. Die im Flur eingebrachte Luftmenge entspricht der Summe der für die Zulufräume ermittelten Außenluftvolumenströme. Von dort wird die Luft mit aktiven Überströmern in die Zulufräume verteilt. Je nach Förderrichtung der aktiven Überströmer strömt die Luft über passive Überströmer, wie z.B. ein Spalt unter der Tür, in oder aus dem Raum. Im Flur, der als Überströmzone dient, vermischen sich Zu- und Abluft aus den Räumen. Die Zuluft, die in die Räume gefördert wird, hat daher meistens schon eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration als die Außenluft. Als aktive Überströmer werden Axiallüfter in der Zwischenwand oder Radiallüfter über dem Türsturz verwendet [21]. Die Abluft wird wie beim zentralen Lüftungssystem in den Ablufträumen abgesaugt. Eine schematische Darstellung der Luftströme zeigt Abbildung 7.

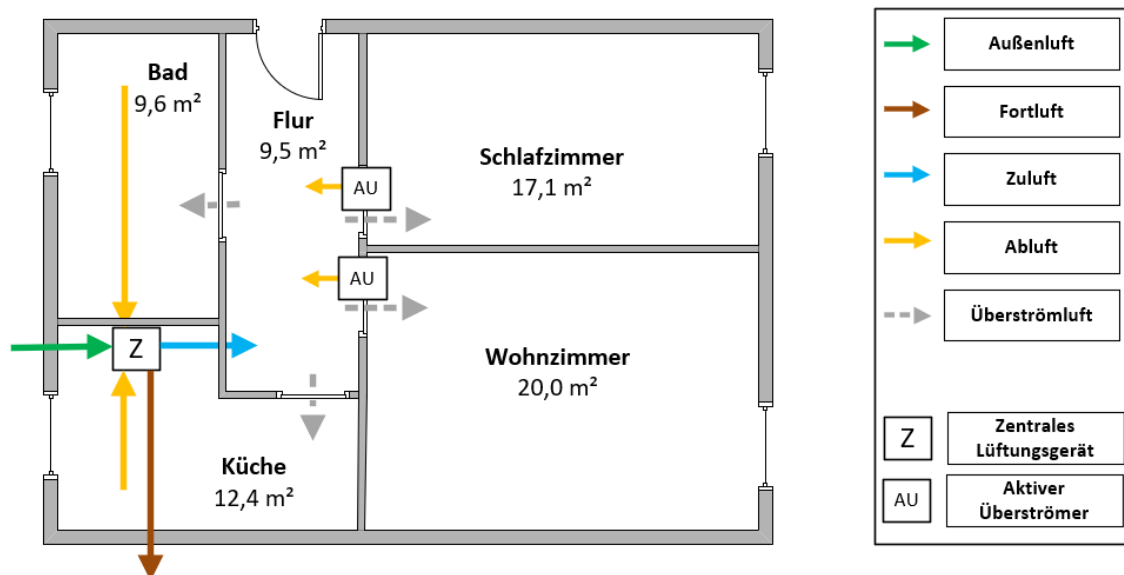


Abbildung 7 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung zentrales Lüftungssystem mit aktiven Überströmern

Das Lüftungssystem mit aktiven Überströmern wurde durch die geometrischen Gegebenheiten (fehlender Flur) im Studentenapartment nicht umgesetzt. Bei der Ermittlung des Volumenstroms für die Drei-Zimmer-Wohnung muss berücksichtigt werden, dass das Schlafzimmer über das Wohnzimmer mit

Luft versorgt wird. Der Volumenstrom des aktiven Überströmers des Schlafzimmers addiert sich daher zu dem des Wohnzimmers. In Abstimmung mit der Projektgruppe wurde der Volumenstrom des aktiven Überströmers für den Abgleich von Mess- und Simulationsergebnissen gleich dem Zuluftvolumenstrom nach DIN 1946-6:2019 [1] angesetzt. Erhöhte Volumenströme wurden später in den Simulationsrechnungen berücksichtigt.

Tabelle 9 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: aktive Überströmer

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h	
		Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Abluft	Bad	40	40
	Küche	40	40
Zuluft	Schlafzimmer	40	28,5
	Wohnzimmer	40	57 (SZ: 28,5 + WZ: 28,5)
	Kinderzimmer	-	23

### Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte

Es werden Einzelraumlüftungsgeräte mit rekuperativem Wärmetauscher und stationärer Betriebsweise in jedem Raum verwendet. Die Einzelraumlüftungsgeräte haben ausgeglichene Zu- und Abluftvolumenströme. Ein planmäßiger Luftaustausch zwischen den Räumen findet bei diesem Lüftungssystem nicht statt.

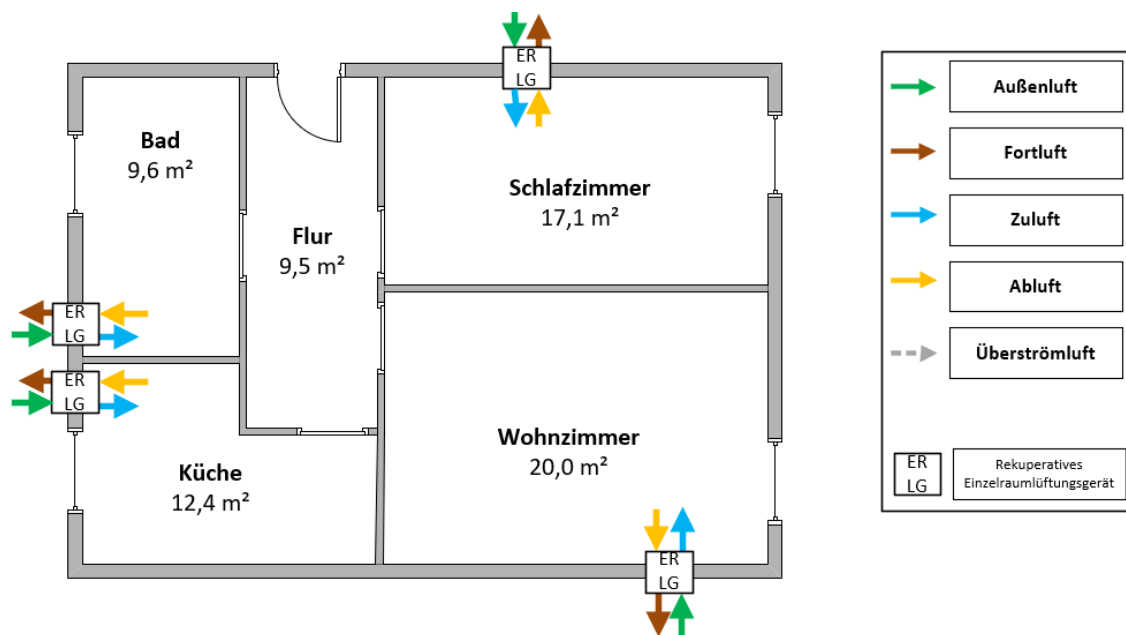


Abbildung 8 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen

Die Volumenströme sind überwiegend identisch mit denen des zentralen Lüftungssystems. Nur bei der Auslegung für das Studentenapartment nach DIN 18017-3:2020 [20] ergibt sich eine abweichender Zuluftvolumenstrom für das Schlafzimmer. Weil die Räume lüftungstechnisch bei der Verwendung von Einzelraumlüftungsgeräten unabhängig voneinander sind, muss der zusätzliche Volumenstrom des Bads nicht beim Zuluftvolumenstrom des Schlafzimmers mit berücksichtigt werden. Da sich beim

Studentenapartment die Küche im Wohnraum befindet, wird hier ein gemeinsames Einzelraumlüftungsgerät verwendet. Die Zuluft wird dann dem Schlaf-/Wohnbereich zugerechnet, die Abluft der Küche.

Tabelle 10 Ermittlung der raumweisen Volumenströme nach DIN 1946-6:2019 [1] bzw. DIN 18017-3:2020 [18] für das Lüftungssystem: Einzelraumlüftungsgeräte

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer- Wohnung	Drei-Zimmer- Wohnung
Abluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche	27,5	27,5	40	40
	Schlafzimmer			40	28,5
	Wohnzimmer			40	28,5
	Kinderzimmer				23
Zuluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche			40	40
	Schlafzimmer	27,5	27,5	40	28,5
	Wohnzimmer	-	-	40	28,5
	Kinderzimmer	-	-	-	23

### 3. Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen (Betrieb nach DIN 1946-6)

In den Zulufräumen werden rekuperative Lüftungsgeräte verwendet. In den Ablufträumen werden, statt Einzelraumlüftungsgeräten, Abluftventilatoren verwendet. Beim Studentenapartment wurde nur im Bad ein Abluftventilator verwendet. Die Abluft der Kochnische wird über das Einzelraumlüftungsgerät im Wohnzimmer geliefert. Durch den Einsatz von Abluftventilatoren kommt es zu unausgeglichenen gesamt Zu- und Abluftvolumenströmen. Der zusätzlich von den Abluftventilatoren geförderte Volumenstrom strömt über Leckagen oder die Einzelraumlüftungsgeräte in die Wohnung.

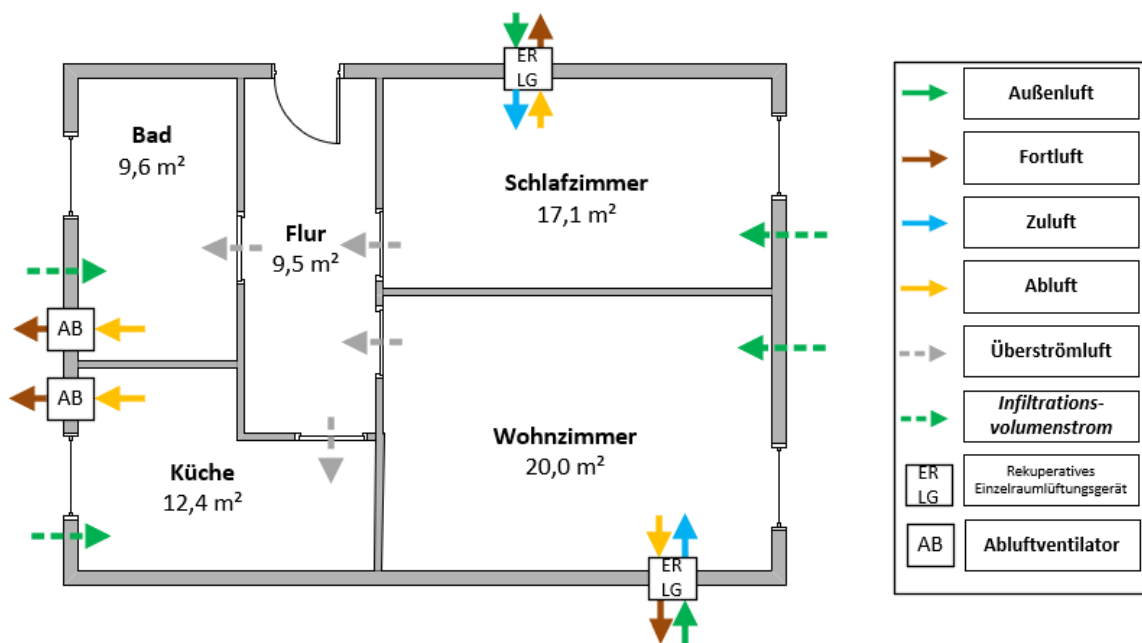


Abbildung 9 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung reiner Luftströmung in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Tabelle 11 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: reiner Luftströmung in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Abluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche	27,5	27,5	40	40
	Schlafzimmer			40	28,5
	Wohnzimmer			40	28,5
	Kinderzimmer				23
Zuluft	Schlafzimmer	27,5	27,5	40	28,5
	Wohnzimmer	-	-	40	28,5
	Kinderzimmer	-	-	-	23

#### 4. Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen

In der Zuluft werden Einzelraumlüftungsgeräte mit regenerativem Wärmetauscher eingesetzt. Diese werden auch als Pendellüfter bezeichnet. Diese arbeiten im intermittierenden Betrieb, dabei wird periodisch zwischen Zu- und Abluftbetrieb gewechselt. Um balancierte Zu- und Abluftvolumenströme zu gewährleisten werden die Geräte paarweise betrieben. In Bad und Küche werden Abluftventilatoren eingesetzt. Durch die Abluftventilatoren kommt es zu einem Luftaustausch zwischen den Räumen. Bei

den regenerativen Einzelraumlüftungsgeräten wurde zwischen den zwei folgenden Betriebsmodi unterschieden.

a) Betrieb nach DIN 1946-6

Die Pendellüfter werden balanciert betrieben, d.h. Zu- und Abluftventilatoren werden mit der gleichen Drehzahl betrieben. Die Abluftventilatoren werden nach DIN 1946-6:2019 [1] auf Nennlüftung kontinuierlich betrieben. Der zusätzlich von den Abluftventilatoren geförderte Volumenstrom strömt dabei über Leckagen oder die Pendellüfter in die Wohnung.

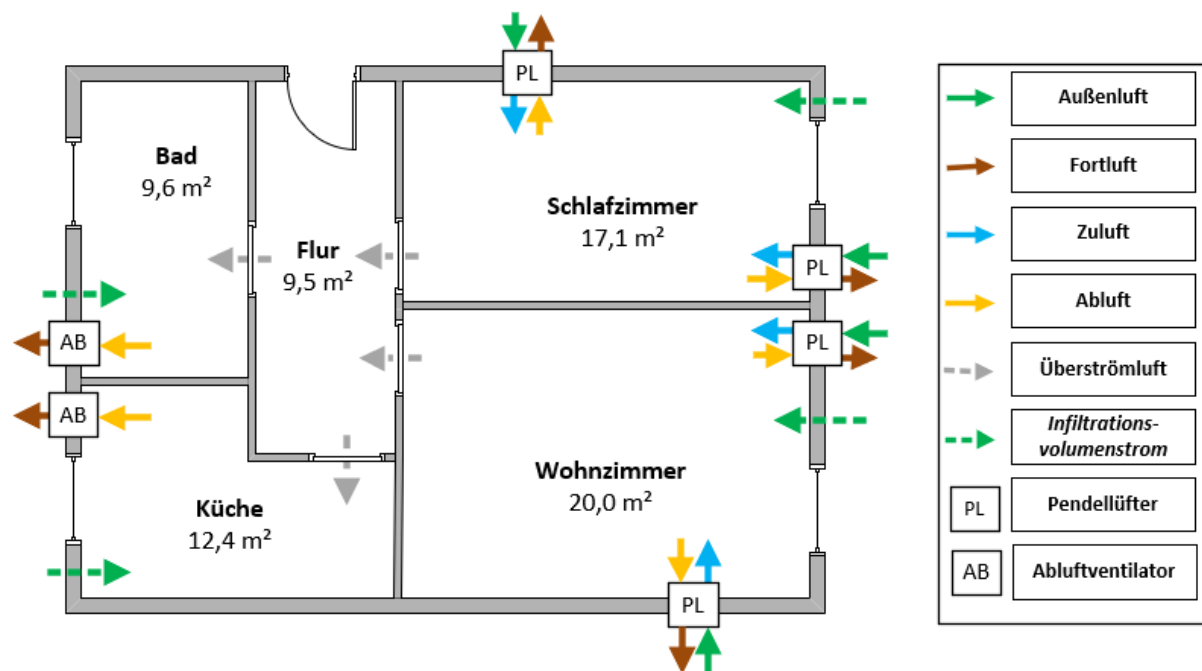


Abbildung 10 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Tabelle 12 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN1946-6

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer- Wohnung	Drei-Zimmer- Wohnung
Abluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche	27,5	27,5	40	40
	Schlafzimmer			40	28,5
	Wohnzimmer			40	28,5
	Kinderzimmer				23
Zuluft	Schlafzimmer	27,5	27,5	40	28,5
	Wohnzimmer	-	-	40	28,5
	Kinderzimmer	-	-	-	23

b) Betrieb nach DIN 18017-3 (Bedarfsgeführt)

Die Abluftventilatoren werden nach DIN 18017-3:2020 [20] bedarfsgeführt betrieben. Die Abluftventilatoren laufen ständig mit einem minimalem Volumenstrom von 15 m<sup>3</sup>/h. Beim Überschreiten einer relativen Feuchte von 80 % in einem Ablufträumen wird der Volumenstrom im jeweiligen Raum auf 40 m<sup>3</sup>/h erhöht. Der erhöhte Volumenstrom wird wieder reduziert, sobald eine relative Feuchte von 50 % unterschritten wird. Erhöht ein Abluftventilator seinen Volumenstrom, erhöhen alle rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräte gleichzeitig ihren Zuluftvolumenstrom, um den zusätzlichen Abluftvolumenstrom auszugleichen. Die Einzelraumlüftungsgeräte sind dann in Dysbalance. Somit soll verhindert werden, dass die zusätzlich benötigte Luftmenge unkontrolliert über Leckagen in die Wohneinheit gelangt.

Für Lüftungssystem 5b sind grundsätzlich unterschiedliche Kombinationen von Betriebszuständen möglich. Die in diesem Projekt untersuchten Betriebszustände und -abläufe sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 14 zeigt die Volumenströme für das Lüftungssystem 5b. In der DIN 18017-3:2020 [20] sind Volumenströme für den reduzierten und den Betrieb im Bedarfsfall angegeben. Die linke Spalte eines Grundrisses gibt die raumweisen Volumenströme im reduzierten Betrieb an. Solange kein Grenzwert überschritten wird laufen die Abluftventilatoren im reduzierten Betrieb. Die rechte Spalte steht für den Volumenstrom im Bedarfsfall, daher bei Überschreiten eines festgelegten Grenzwertes.

Tabelle 13 Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18]

<b>1. Betriebszustand</b>	<b>Reduzierter Betrieb</b>	
	Alle Abluftventilatoren	15 m <sup>3</sup> /h
	Alle Einzelraumlüftungsgeräte ausgeglichenen Zu- und Abluft	
	Infiltrationsvolumenstrom	15 m <sup>3</sup> /h * Anzahl Ablufträume

<b>2. Betriebszustand</b>	<b>Grenzwertüberschreitung in einem Abluftraum (Bedarfsfall)</b>	
	Abluftventilator in den Räumen ohne Grenzwertüberschreitung	15 m <sup>3</sup> /h
	Abluftventilator im Raum mit Grenzwertüberschreitung	40 m <sup>3</sup> /h
	Alle Einzelraumlüftungsgeräte erhöhen Zuluftvolumenstrom um die Erhöhung des Abluftvolumenstroms (40 -15 m <sup>3</sup> /h)	25 m <sup>3</sup> /h / Anzahl Zulufräume
	Infiltrationsvolumenstrom	15 m <sup>3</sup> /h * Anzahl Ablufträume

<b>3. Betriebszustand</b>	<b>Grenzwertüberschreitung in einem + X Ablufträumen (Bedarfsfall)</b>	
	Abluftventilator in den Räumen ohne Grenzwertüberschreitung	15 m <sup>3</sup> /h
	Abluftventilator im Raum mit Grenzwertüberschreitung	40 m <sup>3</sup> /h
	Alle Einzelraumlüftungsgeräte erhöhen Zuluftvolumenstrom um die Erhöhung des Abluftvolumenstroms (40 -15 m <sup>3</sup> /h)	25 m <sup>3</sup> /h / Anzahl Zulufräume

	Infiltrationsvolumenstrom	$15 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{Anzahl Ablufträume}$ $+ 25 \text{ m}^3/\text{h} \cdot (\text{Anzahl Ablufträume mit Grenzwertüberschreitung} - 1)$
--	---------------------------	--

Tabelle 14 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18]

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h					
		Studentena. mit DIN 18017-3		Zwei-Zimmer-Wohnung		Drei-Zimmer-Wohnung	
		Reduzierter Betrieb	Bedarfsfall r.F. > 80%	Reduzierter Betrieb	Bedarfsfall r.F. > 80%	Reduzierter Betrieb	Bedarfsfall r.F. > 80%
Abluft	Bad	s. Tabelle 13					
	Küche						
	Schlafzimmer	27,5	27,5	40	40	28,5	28,5
	Wohnzimmer			40	40	28,5	28,5
	Kinderzimmer					23	23
Zuluft	Schlafzimmer	27,5	52,5	40	52,5	28,5	36,5
	Wohnzimmer			40	52,5	28,5	36,5
	Kinderzimmer					23	31

5. Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen

Es werden regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen und rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen verwendet. Durch die ausgeglichenen Zu- und Abluftvolumenströme in den Räumen findet planmäßig kein Luftaustausch zwischen den Räumen statt.

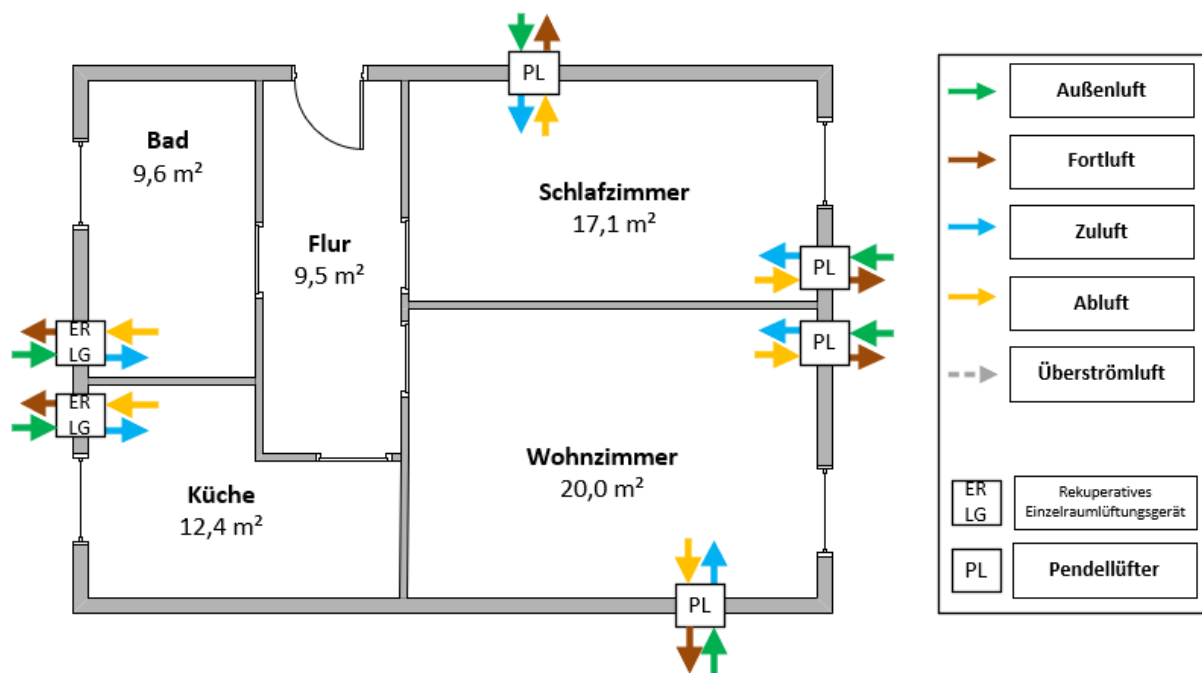


Abbildung 11 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen

Tabelle 15 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Abluft	Bad	40	27,5	40	40
	Küche	27,5	27,5	40	40
	Schlafzimmer			40	28,5
	Wohnzimmer			40	28,5
	Kinderzimmer				23
Zuluft	Schlafzimmer	27,5	27,5	40	28,5
	Wohnzimmer			40	28,5
	Kinderzimmer				23



6. Abluft nach DIN 1946-6

Es werden Abluftventilatoren in Bad und Küche verwendet. Diese werden nach DIN 1946-6:2019 [1] betrieben, laufen daher konstant auf der Stufe Nennlüftung. Die Luft strömt von außen über ALD's in den Zulufräumen in die Wohneinheit, von dort über den Flur in die Ablufträume.

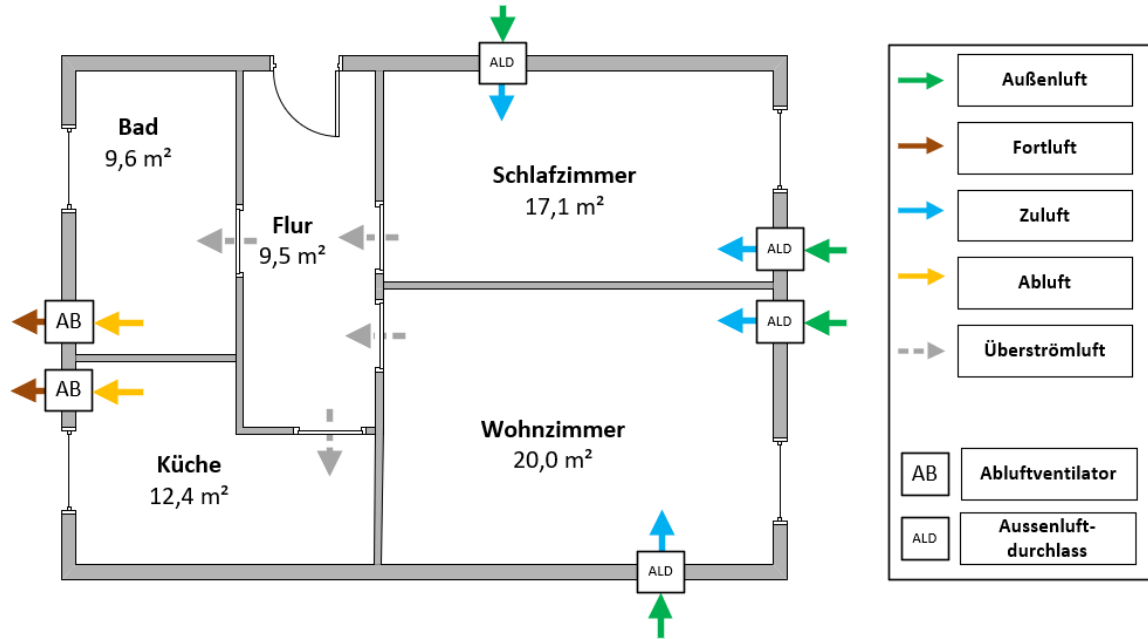


Abbildung 12 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung Abluft-Lüftungssystem

Tabelle 16 zeigt die Volumenströme für das Lüftungssystem mit Abluftventilatoren in Kombination mit ALD's in den Zulufräumen. Die Auslegung der ALD's erfolgt unter der Berücksichtigung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms (inf. Wirk).

Tabelle 16 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft-Lüftungssystem

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h							
		Studentena. mit DIN 18017-3		Studentena. ohne DIN 18017-3		Zwei-Zimmer-Wohnung		Drei-Zimmer-Wohnung	
		Lüftungs-gerät / ALD	inf. Wirk	Lüftungs-gerät / ALD	inf. Wirk	Lüftungs-gerät / ALD	inf. Wirk	Lüftungs-gerät / ALD	inf. Wirk
Abluft	Bad	40		27,5		40		40	
	Küche3	27,5		27,5		40		40	
Zuluft	Bad		8,5		8,5		10		7
	Küche						10		7
	Schlaf-zimmer	50	8,54	38	8,5 <sup>4</sup>	20	10	21,5	7
	Wohn-zimmer					20	10	21,5	7
	Kinder-zimmer							16	7

7. Abluft nach DIN 18017-3 in Bad und Küche

Die Anordnung der Lüftungsgeräte erfolgt analog zu Lüftungssystem 7. Die Auslegung und der Betrieb Volumenströme erfolgt nach DIN 18017-3:2020 [20]. Es wird zwischen zwei Betriebsmodi unterschieden.

a) Reduzierter Betrieb

Beim Betriebsmodus reduzierter Betrieb kann der Abluftvolumenstrom für maximal 12 h am Tag um 50 % reduziert werden. Für die anderen 12 h wird ein konstant hoher Abluftvolumenstrom von 40 m<sup>3</sup>/h gefördert. Bei der Auslegung der ALD's wurde der wirksame Infiltrationsvolumenstrom berücksichtigt.

Tabelle 17 führt die raumweisen Volumenströme für den reduzierten und den normalen Betrieb auf. Der normale Betrieb wurde auf Zeiten mit erhöhten Feuchteemissionen gelegt. Normaler Betrieb findet statt zwischen 06:00 – 12:00 Uhr und 17:00 – 23:00 Uhr.

---

3 Die Kochnische im Studentenapartment verfügt über einen eigenen Abluftventilator

4 Im Studentenapartment werden der Wohn-/Schlafbereich inkl. Kochnische als ein Raum gesehen. Es wird ein gemeinsamer Leckagevolumenstrom für den Raum angenommen.

---

Tabelle 17 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft nach DIN 18017-3, Reduzierter Betrieb

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h								
		Studentena. mit DIN 18017-3			Zwei-Zimmer- Wohnung			Drei-Zimmer-Wohnung		
		Reduzierter Betrieb	Normaler Betrieb	Inf. Wirk.	Reduzierter Betrieb	Normaler Betrieb	Inf. Wirk.	Reduzierter Betrieb	Normaler Betrieb	Inf. Wirk.
Abluft	Bad	20	40		20	40		20	40	
	Küche	20	40		20	40		20	40	
Zuluft	Bad			8,5			10			7
	Küche						10			7
	Schlafzimmer	235	63	8,5 <sup>4</sup>	0 <sup>5</sup>	10	10	14 <sup>5</sup>	22	7
	Wohnzimmer				0 <sup>5</sup>	10	10	14 <sup>5</sup>	22	7
	Kinderzimmer							115	16	7

b) Anwesenheitsgeführt

Beim anwesenheitsgeführten Betriebsmodus nach DIN 18017-3:2020 [20] wird bei Anwesenheit einer Person in einem Abluftraum der Volumenstrom erhöht. Treten in der Wohneinheit erhöhte Feuchtelasten (z.B. bei freier Wäschetrocknung) auf, ist bei Abwesenheit ein konstanter verminderter Volumenstrom zu fördern. In

---

<sup>5</sup> Für die Berechnung der Volumenströme der ALD's wurden die wirksamen Infiltrationsvolumenströme verwendet. Für die Berechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme nach Formel (7) werden nur die Art des Lüftungssystems, das Volumen und die Luftdichtheit der Nutzungseinheit berücksichtigt, jedoch nicht der tatsächliche (Abluft-)Volumenstrom des Lüftungssystems. Die Volumenströme der ALD's die in der Tabelle angegeben sind, sind daher unter Umständen geringer als im realen Betrieb. Die Auslegung der ALD's erfolgt nach dem maximalen Volumenstrom.

Tabelle 18 sind die unterschiedlichen Betriebsmodi des Lüftungssystems 8b aufgeführt. Der maximale Außenluftvolumenstrom ergibt sich aus Anzahl der Ablufträumen \* Abluftvolumenstrom bei Grenzwertüberschreitung (60 m<sup>3</sup>/h). Für die Auslegung der ALD's wird der maximale Außenluftvolumenstrom abzüglich des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms auf die ALD's aufgeteilt.

Tabelle 18 Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18]

<b><u>1. Betriebszustand</u></b>	<b>Reduzierter Betrieb</b>	
	Alle Abluftventilatoren	15 m <sup>3</sup> /h

<b><u>2. Betriebszustand</u></b>	<b>Anwesenheit einer Person in einem Abluftraum</b>	
	Abluftventilator in den Ablufträumen ohne Anwesenheit	15 m <sup>3</sup> /h
	Abluftventilator im Raum mit Grenzwertüberschreitung	60 m <sup>3</sup> /h

1. Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Auslegung reduzierter Betrieb) + Fensterlüftung

In allen Räumen befinden sich rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte. Diese werden auf die Lüftungsstufe „reduzierte Lüftung“ nach DIN 1946-6:2019 [1] ausgelegt. Bei Überschreiten eines Grenzwertes sowie Anwesenheit einer wachen Person wird zusätzlich ein Fenster im jeweiligen Raum geöffnet. Damit wird ein idealer Nutzer, der sich z.B. an CO<sub>2</sub>-Werten im jeweiligen Raum orientiert, simuliert. Für die Zulufräume wurde eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1200 ppm als oberer und 750 ppm als unterer Grenzwert festgelegt. Die Ablufträume werden über die Feuchte geregelt. Der obere Grenzwert liegt bei 80 %, der unterer bei 50 %. Das Fenster wird bei Überschreiten des oberen Grenzwertes geöffnet, und geschlossen sobald der unterer Grenzwert unterschritten wird. Tabelle 19 zeigt die unterschiedlichen Betriebszustände des Lüftungssystems 9. In Tabelle 20 sind die raumweisen Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte aufgeführt.

Tabelle 19 Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18]

<b>1. Betriebszustand</b>	<b>Reduzierter Betrieb – keine Grenzwertüberschreitung</b>	
	Fenster geschlossen	-
	Alle Einzelraumlüftungsgeräte ausgeglichenen Zu- und abluftbluftvolumenströme	Volumenstrom reduzierte Lüftung nach DIN 1946-6:2019 [1]

<b>2. Betriebszustand</b>	<b>Grenzwertüberschreitung in einem Raum</b>	
	Grenzwertüberschreitung in einem Zulufräum Voraussetzung für Fensteröffnung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Konzentration &gt; 1200 ppm</li> <li>• Anwesenheit einer Person</li> <li>• Anwesende Person muss wach sein</li> </ul> Voraussetzung für Fensterschließung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Konzentration &gt; 750 ppm</li> </ul>	Fenster offen
	Grenzwertüberschreitung in einem Abluftraum Voraussetzung für Fensteröffnung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relative Feuchte &gt; 80 %</li> <li>• Anwesenheit einer Person</li> </ul> Voraussetzung für Fensterschließung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relative Feuchte &lt; 50 %</li> </ul>	Fenster offen
	Alle Einzelraumlüftungsgeräte ausgeglichenen Zu- und Abluft	Volumenstrom reduzierte Lüftung nach DIN 1946-6:2019 [1]

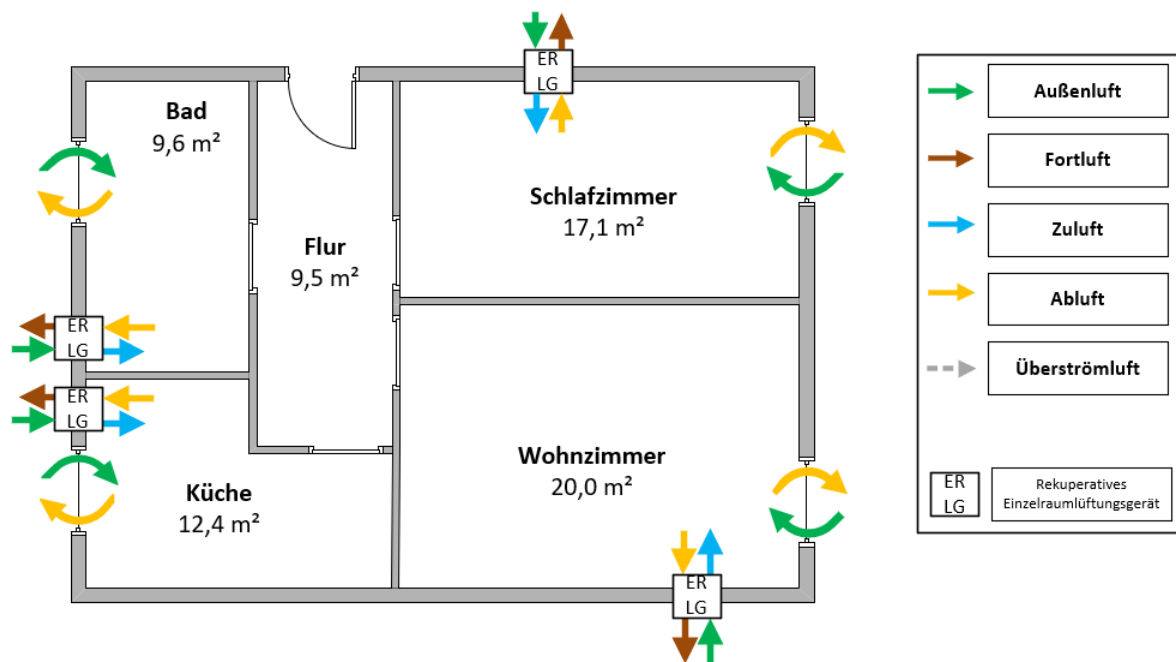


Abbildung 13 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen, ergänzt durch bedarfsgeführte Fensterlüftung

Tabelle 20 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft nach DIN 18017-3, rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen, ergänzt durch bedarfsgeführte Fensterlüftung

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Abluft	Bad	40	19,3	28	28
	Küche	19,3	19,3	28	28
	Schlafzimmer	19,3	19,3	28	20
	Wohnzimmer	-	-	28	20
	Kinderzimmer	-	-	-	16
Zuluft	Bad	40	19,3	28	28
	Küche	19,3	19,3	28	28
	Schlafzimmer	19,3	19,3	28	20
	Wohnzimmer	-	-	28	20
	Kinderzimmer	-	-	-	16

## CO<sub>2</sub>-, Feuchte- und Wärmeemissionen

Für die Messungen und Simulationen, unter Berücksichtigung von realitätsnahen Tagesprofilen für die verschiedenen Emissionen, wurde auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen. Diese wurden wie im Folgenden beschrieben an die untersuchten Wohneinheiten angepasst.

### CO<sub>2</sub>- und Wärmeemission

Da Menschen die Hauptquellen für CO<sub>2</sub> in Wohnräumen sind und die CO<sub>2</sub>-Abgabe gut mit der Emission von sonstigen Schadstoffen korreliert [6], eignet sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Raum gut zur Bewertung der Raumluftqualität. Diese Annahme gilt, wenn die Schadstoffe in einem Raum überwiegend aus menschlichen Emissionen stammen [22]. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsrate einer Person ist von einer Vielzahl von Faktoren wie z.B. Alter, Geschlecht, Aktivitätsgrad, Körperversorgung, usw. abhängig. Von Persilly 1997 [23] wurden 18 l/h/Person für eine Person im wachen Zustand und leichter Betätigung gemessen. Für schlafende Personen wurde eine CO<sub>2</sub>-Abgabe von 15 l/h/Person festgestellt.

Es wird nicht zwischen den Emissionswerten von Kindern und Erwachsenen unterschieden, da die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kindern je nach Alter gleich oder gering höher sind als die von Erwachsenen [24].

Die Wärmeabgabe einer Person ist in gleichen Maß vom Aktivitätsgrad abhängig wie die CO<sub>2</sub>-Emission. In [25] wurde der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Abgabe und körperlicher Aktivität untersucht. In diesem Zusammenhang wurde ein Wärmeumsatz von 5,57 W/l CO<sub>2</sub> ermittelt. Dies ergibt für die o.g. CO<sub>2</sub>-Emissionswerte eine gesamt Gesamtwärmeabgabe (sensible und latente Wärme) von 84 W pro schlafender Person und 100 W pro wacher Person.

### Feuchteemission

Wasserdampf in einer Wohnung wird sowohl direkt von Menschen emittiert als auch bei entsprechenden Aktivitäten (z.B. Kochen und Körperhygiene) freigesetzt. Die Feuchteemission des Menschen, ist wie die CO<sub>2</sub>-Abgabe, von unterschiedlichen äußeren und inneren Faktoren abhängig. In der DIN EN 15665:2009 [26] wird eine Wasserdampfabgabe von 55 g/h für eine wache und 40 g/h für eine schlafende Person angegeben. Guyot hat in [10] Feuchteemissionen für unterschiedliche Tätigkeiten in Wohnräumen aufgelistet. Diese sind in Tabelle 21 aufgeführt. Es wird ein Duschvorgang pro Person und Tag angenommen. Bei mehreren Personen im Haushalt werden die Duschvorgänge auf morgens und abends aufgeteilt (eine Person: 1x morgens, zwei Personen: 1x morgens, 1x abends, drei Personen: 1x morgens, 2x abends). Nach dem Duschen wird für drei Stunden durch die Restfeuchte in der Dusche und das Trocknen eines Handtuchs, Feuchte emittiert. Beim Kochen wird zwischen Lang- und Kurzzeitgerichten unterschieden. Wobei ein Kurzzeitgericht am Morgen zubereitet wird und Langzeitgerichte jeweils mittags und abends [27].

Tabelle 21 Feuchteemissionen unterschiedlicher häuslicher Tätigkeiten

Art der Tätigkeit		Feuchteemission	Dauer
Duschen	Vorgang	250 g	
	Trocknungsphase	50 g/h	3 h
Kochen	Kurzzeitgericht	500 g	
	Langzeitgericht	600 g	
Abspülen		47 g	20 min
Waschmaschine		100 g/h	2 h
Freies Wäschetrocknen		140 g/h	18 h
		1 x WM/Person/Woche	

## Anwesenheitsprofile für die Grundrisse

Normierte Anwesenheitsprofile für die Simulation und Bewertung von Wohnungslüftungssystemen stehen nicht zur Verfügung. In [6] wurde ein Anwesenheitsprofil für multizonale Wohnungslüftungssimulationen auf Basis unterschiedlicher Studien entwickelt, bei denen die Verhaltensweisen von Bewohnern in Wohngebäuden dokumentiert wurden. Die in diesem Projekt verwendeten Anwesenheitsprofile basieren auf diesen Erkenntnissen und wurden für die verwendeten Grundrisse entsprechend angepasst. Grundsätzlich liegt die zeitliche Auflösung der Aktivitäten im Ein-Stunden-Bereich. Für den Aufenthalt im Bad wurde allerdings je Person nur eine halbe Stunde angesetzt. Die Person im Bad wechselt nach einer halben Stunde ihren Platz mit einer anderen Person. Unterschieden wird bei den Tagen zwischen Wochentag und Wochenende, sowie Washtag und Nicht-Washtag. Da die Wäsche abends gewaschen wird, reicht die Trocknungsphase bis in den nächsten Tag. Für das Studentenapartment wird eine Belegung von einer erwachsenen Person angenommen. Die Zwei-Zimmer-Wohnung wird von zwei berufstätigen Erwachsenen bewohnt. Diese befinden sich untertags nicht in der Wohnung. Für die Drei-Zimmer-Wohnung wird eine Belegung von zwei Erwachsenen und einem Kind angenommen. Die Personen befinden sich tagsüber, außer für Mahlzeiten, außer Haus.

Tabelle 22 und Tabelle 23 listen CO<sub>2</sub>- bzw. Feuchteemissionen in den Räumen aller Grundrisse an Wochentagen, Wochenende sowie bzgl. Feuchteemission mit oder ohne Wäschetrocknung auf. Im Anschluss folgen kurze Erläuterungen zu den Grundrissen.



Tabelle 22: Tagesverlauf Anwesenheit Werktage und Wochenende für alle Grundrisse und Räume; Interne Wärmequellen und CO<sub>2</sub>-Emission lassen sich hieraus durch Multiplikation der Werte mit den entsprechenden, personenspezifischen Werten ableiten

	Uhrzeit	Zwei-Zimmer-Wohnung				Drei-Zimmer-Wohnung				Studenten-- appartement				
		Schlafz.	Küche	Wohnz.	Bad	Kinderz.	Schlafz.	Küche	Wohnz.	Bad	Wohnen	Schlafen	Kochn.	Bad
<b>Montag bis Freitag</b>	0-1	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	1-2	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	2-3	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	3-4	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	4-5	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	5-6	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	6-7	0	1	0	1	0	0	2	0	1	0	0,5	0,5	
	7-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11-12	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
	12-13	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
	13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	17-18	0	1	1	0	0	0	1	2	0	1	0	0	
	18-19	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	
	19-20	0	0	1	1	0	0	0	2	1	0,5	0,5	0	
	20-21	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0,5	0	0,5	
	21-22	0	0	2	0	1	0	0	2	0	1	0	0	
	22-23	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	23-24	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
<b>Samstag bis Sonntag</b>	0-1	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	1-2	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	2-3	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	3-4	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	4-5	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	5-6	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	6-7	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	
	7-8	0	1	0	1	0	0	2	0	1	0	0,5	0,5	
	8-9	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	
	9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11-12	0	1	1	0	0	0	2	1	0	0,5	0,5	0	
	12-13	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	
	13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	17-18	0	1	1	0	0	0	1	2	0	1	0	0	
	18-19	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	
	19-20	0	0	1	1	0	0	0	2	1	0,5	0,5	0	
	20-21	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0,5	0	0,5	
	21-22	0	0	2	0	0	0	0	3	0	1	0	0	
	22-23	0	0	2	0	1	0	0	2	0	1	0	0	
	23-24	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	

Tabelle 23: Tagesverlauf Feuchtemission Werktag und Wochenende für alle Grundrisse und Räume, inkl. Spalte für Wäschetrocknung (Start an Waschtagen jeweils um 17 Uhr und Ende um 13 Uhr am nächsten Tag)

Uhrzeit	Zwei-Zimmer-Wohnung (Waschtage Dienstag und Donnerstag)					Drei-Zimmer-Wohnung (Waschtage Montag, Mittwoch und Freitag)					Studentenappart- ment (Waschtage Mittwoch)				
	Schlafzimmer	Küche	Wohnzimmer	Bad	Bad Wäsche- trocknung	Kinderzimmer	Schlafzimmer	Küche	Wohnzimmer	Bad	Bad Wäsche- trocknung	Wohnen/Schlafe	Kochnische	Bad	Bad Wäsche- trocknung
<b>Montag bis Freitag</b>															
0	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
1	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
2	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
3	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
4	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
5	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
6	0	606	36	355	494	0	0	661	36	355	494	32	575	28	167
7	0	4	36	50	189	0	0	4	36	50	189	32	0	0	139
8	0	4	36	50	189	0	0	4	36	50	189	32	0	0	139
9	0	4	36	0	139	0	0	4	36	0	139	32	0	0	139
10	0	4	36	0	139	0	0	4	36	0	139	32	0	0	139
11	0	4	36	0	139	0	0	661	36	0	139	32	0	0	139
12	0	4	36	0	139	0	0	114	36	0	139	32	0	0	139
13	0	4	36	0	0	0	0	4	36	0	0	32	0	0	0
14	0	4	36	0	0	0	0	4	36	0	0	32	0	0	0
15	0	4	36	0	0	0	0	4	36	0	0	32	0	0	0
16	0	4	36	0	0	0	0	4	36	0	0	32	0	0	0
17	0	706	91	0	100	0	0	706	146	0	100	87	0	0	100
18	0	114	36	0	100	0	0	169	36	0	100	32	655	0	100
19	0	4	91	355	494	0	0	4	146	355	494	60	75	0	139
20	0	4	146	50	189	0	0	4	146	405	544	60	0	328	467
21	0	4	146	50	189	40	0	4	146	100	189	87	0	50	217
22	80	4	36	0	139	40	80	4	36	50	189	72	0	50	189
23	80	4	36	0	139	40	80	4	36	0	139	72	0	0	139
<b>Samstag bis Sonntag</b>															
0	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
1	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
2	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
3	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
4	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
5	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
6	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-
7	0	606	36	300	-	0	0	661	36	300	-	32	28	28	-
8	0	114	36	50	-	0	0	169	36	50	-	32	602	0	-
9	0	4	36	50	-	0	0	4	36	50	-	32	0	0	-
10	0	4	36	0	-	0	0	4	36	0	-	32	0	0	-
11	0	606	91	0	-	0	0	661	76	0	-	60	28	0	-
12	0	114	36	0	-	0	0	169	36	0	-	32	602	0	-
13	0	4	36	0	-	0	0	4	36	0	-	32	0	0	-
14	0	4	36	0	-	0	0	4	36	0	-	32	0	0	-
15	0	4	36	0	-	0	0	4	36	0	-	32	0	0	-
16	0	4	36	0	-	0	0	4	36	0	-	32	0	0	-
17	0	706	91	0	-	0	0	706	146	0	-	87	0	0	-
18	0	114	36	0	-	0	0	169	36	0	-	32	655	0	-
19	0	4	91	355	-	0	0	4	146	355	-	60	75	0	-
20	0	4	146	350	-	0	0	4	146	405	-	60	0	328	-
21	0	4	146	100	-	0	0	4	201	100	-	87	0	50	-
22	0	4	146	50	-	40	0	4	146	50	-	87	0	50	-
23	80	4	36	0	-	40	80	4	36	0	-	72	0	0	-

### Studentenapartment

Das Studentenapartment wird von einer Person bewohnt. Wie in Kapitel Studentenapartment festgelegt findet pro Person ein (Wäsche-)Waschtag pro Woche statt. Gewaschen wird im Studentenapartment am Mittwoch, die Wäsche trocknet daraufhin bis Donnerstag. Ein Kurzzeitgericht wird jeden Tag in der Früh zubereitet. Ein Langzeitgericht wird abends sowie am Wochenende auch mittags zubereitet.

### Zwei-Zimmer-Wohnung

Die Zwei-Zimmer Wohnung wird von zwei berufstätigen Personen bewohnt. Es werden für zwei Personen zwei Waschtage pro Person und Woche angesetzt. Diese finden am Dienstag- und Donnerstagabend statt, sodass die Wäsche bis zum nächsten Tag Feuchte an die Umgebung abgibt. Analog zum Studentenapartment wird unter der Woche nur in der Früh ein Kurzzeitgericht und abends ein Langzeitgericht zubereitet. Am Wochenende wird zusätzlich mittags ein Langzeitgericht zubereitet. Die Duschvorgänge teilen sich auf morgens und abends auf.

### Drei-Zimmer-Wohnung

Die Drei-Zimmer-Wohnung wird von drei Personen bewohnt. Dementsprechend finden pro Woche drei Waschtage statt. Diese werden aufgeteilt auf Montag, Mittwoch und Freitag. In der Früh wird ein Kurzzeitgericht, sowie abends ein Langzeitgericht zubereitet. Unter der Woche befinden sich mittags zwei Personen in der Wohnung und bereiten ein Langzeitgericht zu. Eine Person duscht morgens, die anderen zwei Personen duschen am Abend.

## Wirtschaftlichkeit

„Das Annuitätsverfahren gestattet es, einmalige Zahlungen/Investitionen und laufende Zahlungen mithilfe des Annuitätsfaktors  $a$  während eines Betrachtungszeitraums  $T$  zusammenzufassen.“ [18]. Die Wirtschaftlichkeit der Lüftungssysteme soll hier, wie bereits in Kapitel Bewertungsgrößen dargelegt, mithilfe der annuitätischen Ausgaben verglichen werden. Diese errechnen sich mithilfe der Annuität der Jahresgesamtzahlungen des Annuitätenverfahrens aus [18] wie in Gleichung (12) folgt.

Für die Annuitätenmethode werden Parameter wie in Tabelle 24 angenommen. Eine Sensitivitätsstudie für die Parameter wurde nicht durchgeführt. Insbesondere höhere Energiepreisteigerungen z.B. auch durch die CO<sub>2</sub>-Bepreisung können die Ergebnisse zugunsten energieeffizienter Systeme verschieben. Der Gaspreis steht stellvertretend für die Heizkosten, womit die kWh Heizenergie mit ca. 6 Cent angesetzt wird.

Der elektrische Energieverbrauch sowie die Lüftungswärmeverluste (zur Berechnung der Einsparungen gegenüber Referenzsystem) der Lüftungsanlagen wurden aus den Ergebnissen der Jahressimulationen (siehe Kapitel Jahressimulation entnommen).

Für jede Grundriss-Lüftungssystem-Kombination wurden vom Projektpartner CG-Elementum zudem eigene Anschaffungskosten aufgestellt, die sich aus den jeweiligen Materialmengen, den Komponenten sowie dem jeweiligen Arbeitsaufwand ergeben. Für eine entsprechende Auflistung siehe Anhang 0. Die Preise sind somit Kalkulationspreise eines Bauträgers (Einkauf) ohne Umsatzsteuer. Zudem wurden Kosten für Filterwechsel der jeweiligen Systeme angegeben. Als übrige Wartungsmaßnahmen wurde eine Kanalreinigung alle 10 Jahre bei der dezentralen Lüftung sowie ein Austausch der Lüftungsgeräte alle 20 Jahre angesetzt.

$$A_{N, Ausgaben} = -A_N \quad (12)$$

$$A_N = a(A_0 + c(i) \sum_{i=1}^T A_{Wartung}(i) + A_{Strom}(i) + A_{Gas}(i) - A_{Gas, Referenz}(i))$$

$$A_{Gas}(i) = A_{Gas}(0)(1+0,035)^i$$

$$A_{Gas, Referenz}(i) = A_{Gas, Referenz}(0)(1+0,035)^i$$

$$A_{Strom}(i) = A_{Strom}(0)(1+i_z)^i$$

$$A_{Wartung}(i) = A_{Wartung,0}(i)(1+0,019)^i$$

$$c(i) = q^{-i}$$

$$a = \frac{q-1}{q-q^{-T}}$$

$$q = i_z + 1$$

Mit				
$i$	als aktuelles Jahr		in	-
$A_0$	als Anfangsinvestitionskosten des Lüftungssystems		in	€
$A_{N,Ausgaben}$	als annuitätische Ausgaben		in	€/a
$A_N$	als Annuität der Jahresgesamtzahlungen		in	€/a
$c(i)$	als Kapitalwertfaktor im Jahr $i$		in	-
$A$	als Annuitätsfaktor		In	-
$q$	als Zinsfaktor		in	-
$i_z$	als Kalkulationszinssatz		in	%
$T$	als Laufzeit (Jahre) der Investition		in	in a; in der Formel ohne Einheit verwendet
$A_{Gas(i)}$	als durch Lüftungswärmeverluste entstandene Zusatzkosten für Gas im Jahr $i$			€/a
$A_{Gas,Referenz(i)}$	als durch Lüftungswärmeverluste entstandene Zusatzkosten für Gas im Jahr $i$ beim Referenzsystem			€/a
$A_{Strom(i)}$	Als Kosten für elektrische Energie zum Betrieb der Lüftungsanlage im Jahr $i$			€/a
$A_{Wartung(i)}$	Als Kosten für Filterwechsel und ggf. Kanalreinigung oder in Geräteausch im Jahr $i$			€/a
$A_{Wartung,0(i)}$	Als Kosten für Filterwechsel und ggf. Kanalreinigung oder in Geräteausch im Jahr $i$ ohne Berücksichtigung der Inflation			€/a

Tabelle 24 Parameter der Annuitätenmethode

Laufzeit	30 a
Gaspreis	0,06 €/kWh
Strompreis	0,21 €/kWh
Kalkulationszinssatz	0,6 %
Inflationsrate	1,9 %
Gaspreissteigerung	3,5 %
Strompreissteigerung	6 %

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse in Form der annuitätischen Ausgaben. Generell wird deutlich, dass diese maßgeblich von den Geräte- bzw. Investitionskosten abhängen. Ist also ein Lüftungssystem in der Anschaffung teurer, so sind die annuitätischen Ausgaben auch in aller Regel höher. Der Einfluss der Kosten für elektrischen Energieverbrauch sowie zusätzliche Heizkosten (Verbrauchskosten) fällt bei den derzeitigen Energiepreisen vergleichsweise gering aus. In Abbildung 15 sind die Anteile der Anschaffungskosten sowie der jährlichen Verbrauchskosten an den annuitätischen Ausgaben für die Drei-Zimmer-Wohnung dargestellt. Der Einfluss des Volumenstroms auf die Strom- und Heizkosten kann durch einen Vergleich der Varianten von (2) Akt. Über., (3) ERLG, (4) ERLG+AB und (5b) PL Zul+AB, ermittelt werden. Der Einfluss der Strom- und Heizkosten auf die annuitätischen Ausgaben ist dabei gering. Anders ist der Zusammenhang bei den Lüftungssystemen Abluftsystem ((7) AB 1946, (8a) Abluft nach DIN18017-3 (Nachtabsenkung) und (8b) Abluft nach DIN18017-3 (Präsenzgeführt)). Hier ist der Einfluss auf die annuitätischen Ausgaben aufgrund der niedrigen Anschaffungskosten vergleichsweise hoch.

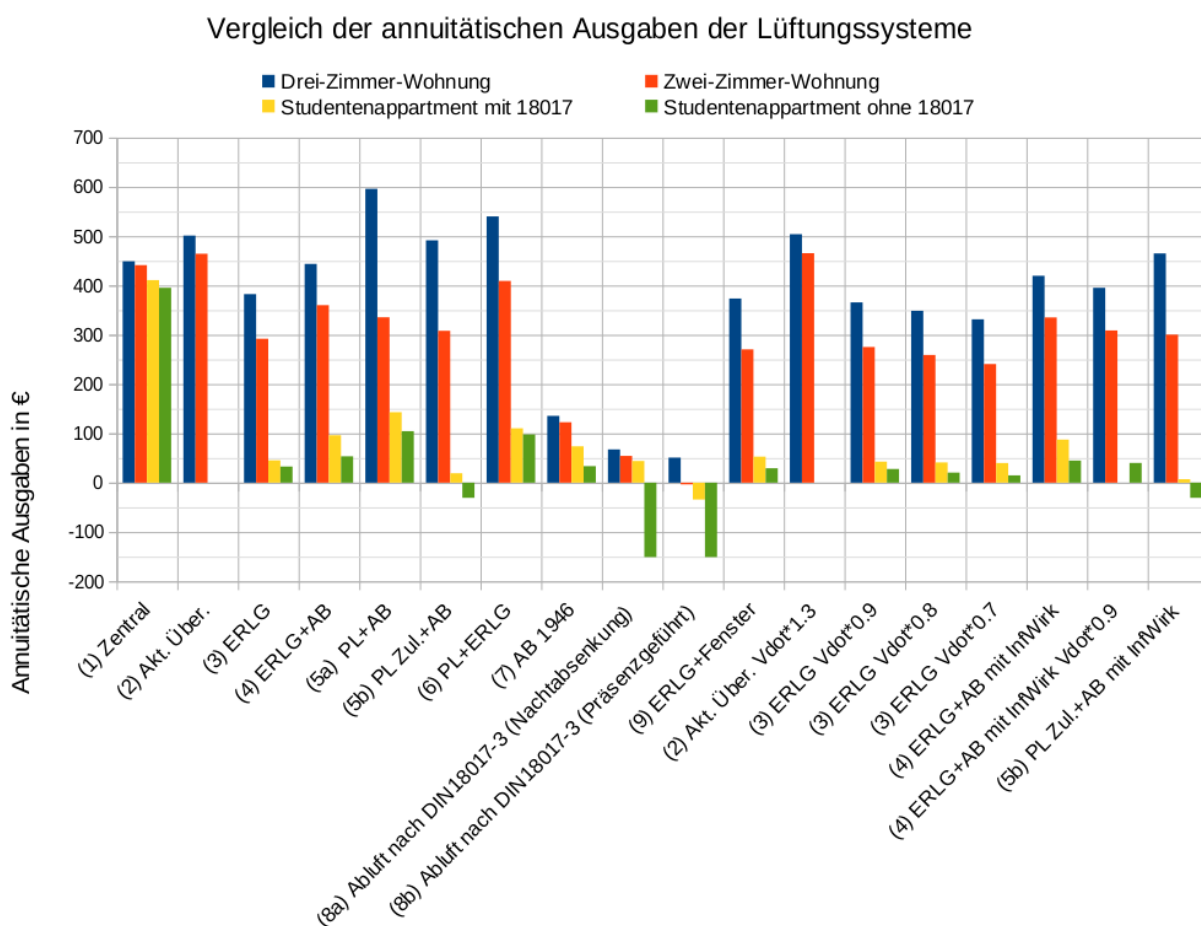


Abbildung 14 Annuitätischen Ausgaben aller Grundrisse und Systeme mit Varianten

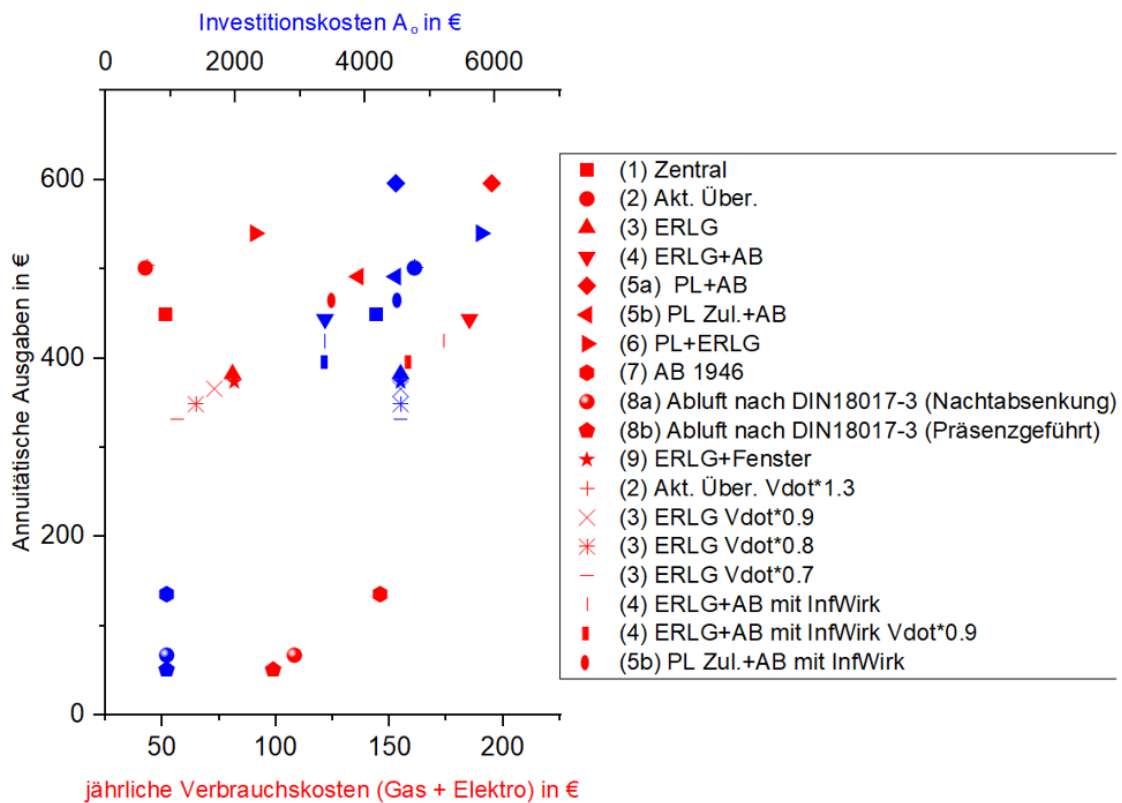


Abbildung 15: Vergleich der linearen Zusammenhänge zwischen  $A_{N,Ausgaben}$  und den Anschaffungskosten  $A_0$  (stark) sowie Lüftungswärmeverlusten (schwach)

Wie schon Anfangs in Kapitel Bewertungsgrößen erwähnt, ist eine rein betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise einer Lüftungsanlage nicht zielführend. Dies wird deutliche bei der Gegenüberstellung mit den Ergebnissen anderer Betrachtungen zur Bewertung der Lüftungssysteme in Kapitel Jahressimulation.

## Vorstellung Simulationsmodelle

Ein Modell erlaubt eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit und ermöglicht so eine Nachstellung physikalischer Zusammenhänge am Computer. Für die Simulation von Lüftungssystemen ist vor allem der Stofftransport zwischen Räumen von Interesse. Hier sind die folgenden Detaillierungsstufen verbreitet:

- 1-Knoten-Modell / Multizonenmodell, eine Zone pro Raum, Beispiel: CONTAM [28]
- Zonales Modell, mehrere Zonen pro Raum, Beispiel: IESS [29]
- CFD (computational fluid dynamics), viele Zonen pro Raum, ggf. variable Zonengröße, Beispiel: ANSYS CFX, OpenFOAM [30]

In der Wohnungslüftung kann meist von einer relativ guten Durchmischung der Luft in den Räumen ausgegangen werden [28]. Somit liefern im Allgemeinen 1-Knoten-Modelle bereits gute Ergebnisse. Da der enorme Rechen- und Zeitaufwand bei der CFD-Simulation eines ganzen Jahresverlaufs durch den Zugewinn an Genauigkeit nicht gerechtfertigt erscheint, wird CONTAM als einfach zu konfigurierendes, graphisches Werkzeug für die Jahressimulation verwendet. Vergleichend hierzu kommt die am Fraunhofer Institut in Holzkirchen entwickelte Indoor Environment Simulation Suite (IESS) als ein zonales Simulationsmodell zum Einsatz. Beide verwendeten Anwendungen werden im Folgenden bzgl. der Modellierung genauer erläutert.

### CONTAM

CONTAM wird vom NIST (engl.: National Institute of Standards and Technology) seit 2005 entwickelt [28]. CONTAM ist ein Computerprogramm zur Simulation von Lüftungssystemen, welches unter anderem die Ausgabe der Volumenströme, Differenzdrücke und Stoffkonzentrationen verschiedener Stoffe erlaubt. Als Eingangsdaten sind eigene Wetterdaten (inklusive Daten über Windrichtung und Geschwindigkeit zur Berechnung von Staudrücken an der Fassade) verwendbar.

CONTAM verwendet für die Berechnung der Stoffkonzentrationen in jedem Raum einen 1-Knoten-Ansatz bzw. ein Multizonenmodell. Bei diesem Vorgehen wird jeder Raum als optimal durchmischt betrachtet, so dass die Stoffkonzentrationen (hier CO<sub>2</sub> und Wasser relevant) an jedem Punkt im Raum gleich sind und damit durch jeweils einen Wert, den mittleren Wert, pro Stoff ausgedrückt werden können. Zudem besitzt jeder Raum einen bestimmten Zu- und Abluftvolumenstrom sowie gegebenenfalls interne Stoffquellen. Beides wirkt sich auf die aktuelle Stoffkonzentration im Raum aus. Diese Zusammenhänge werden in Formel (13) am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgedrückt.



$$\sigma = \sigma_{\text{aus}} = \int Q_{\text{CO}_2, \text{Raum}} + \sigma_{\text{ein}} Q_{\text{Lüftung}} - \sigma Q_{\text{Lüftung}} dt \frac{1}{V_{\text{Raum}}} + \sigma_{\text{init}} \quad (13)$$

i.d.R. gilt  $\sigma_{\text{init}} = \sigma_{\text{außen}}$

$\sigma$	als CO <sub>2</sub> -Konzentration	in	ppm
$\sigma_{\text{aus}}$	als CO <sub>2</sub> -Konzentration der Luft im Raum	in	ppm
$\sigma_{\text{init}}$	als Anfangs-CO <sub>2</sub> -Konzentration der Luft im Raum	in	ppm
$\sigma_{\text{außen}}$	als CO <sub>2</sub> -Konzentration der Außenluft	in	ppm
$\sigma_{\text{ein}}$	als nach den Volumenströmen gewichtetes Mittel der CO <sub>2</sub> -Konzentrationen der in den Raum einströmenden Luft	in	ppm
$Q_{\text{Lüftung}}$	als Volumenstrom der Luft, die den Raum durchströmt	in	m <sup>3</sup> /h
$Q_{\text{CO}_2, \text{Raum}}$	als CO <sub>2</sub> -Volumenstrom, der im Raum emittiert wird	in	m <sup>3</sup> /h
$V_{\text{Raum}}$	als Raumvolumen	in	m <sup>3</sup>

#### Einfluss von Winddruck

Der Winddruck auf eine Fassade kann mit dem in Formel (14) gegebenen Zusammenhang berechnet werden. Der Winddruck und der damit verbundene Luftaustausch zwischen dem Gebäude und der Umgebung ist maßgeblich von der Windgeschwindigkeit und dem Druckbeiwert der Fassade abhängig.

$$W_D = c_p * \frac{\rho_L}{2} * v^2 \quad (14)$$

$W_D$	Winddruck	in	Pa
$c_p$	Druckbeiwert	in	-
$\rho_L$	Dichte Luft	in	kg/m <sup>3</sup>
$v$	Windgeschwindigkeit	in	m/s

Der Druckbeiwert wiederum ist von der Gebäudegeometrie, seiner Exposition und der Windrichtung abhängig. In Tabelle 25 sind die verwendeten  $c_p$ -Werte in Abhängigkeit der Windrichtung angegeben [30]. Diese gelten für ein Gebäude mit einem Seitenverhältnis von 1:1, welches von Hindernissen (Bäume, Häuser) umgeben ist. Die Werte gelten für die Nordfassade, für anders orientierte Fassaden müssen die Winkel dementsprechend angepasst werden.

Tabelle 25 Druckbeiwert in Abhängigkeit der Windrichtung für ein Haus einem Seitenverhältnis 1:1 [29]

	Windrichtung							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
C <sub>p</sub>	0,4	0,4	-0,3	-0,35	-0,2	-0,35	-0,3	0,1

#### Modellierung von Infiltration, Außen- und Überströmluftdurchlässe

Folgend werden die Modellierung der unterschiedlichen Luftein- und auslässe bzw. Überströmöffnungen in CONTAM beschrieben. Luftaustausch findet aufgrund von Druckunterschieden statt. Der resultierende Volumenstrom lässt sich bei bekannten Koeffizienten mithilfe des Potenzgesetzes (s. Formel (15)) in CONTAM abbilden.

$$\dot{V} = C * \Delta p^n \quad (15)$$

$\dot{V}$	Volumenstrom	in m <sup>3</sup> /h
C	Strömungskoeffizient	in m <sup>3</sup> /h/Pa <sup>-n</sup>
$\Delta p$	Differenzdruck	in Pa
n	Exponent	in -

#### Infiltration

Der Exponent n beschreibt die Strömungsform, d.h. ob die Strömung turbulent (n=0,5) oder laminar (n=1,0) ist. Strömungen durch Gebäudeleckagen finden häufig in einer Strömungsform zwischen turbulent und laminar statt. Ohne genauere Kenntnis der einzelnen Leckagen wird deshalb häufig ein Wert von n=2/3 verwendet [1]. Für die Ermittlung der Strömungskoeffizient C der Gebäudeleckagen wurde ein n50-Wert von 1 h<sup>-1</sup> angenommen. Mithilfe der Formel (15) kann der Strömungskoeffizient C für die Leckage für jeden Raum bestimmt werden, so dass bei einer Druckdifferenz von 50 Pa ein 1-facher Luftwechsel stattfindet. Die so bestimmten Koeffizienten der Räume werden nachfolgend in Tabelle 26 aufgeführt. Für die Zwei-Zimmer-Wohnung wurden die unter (Kapitel Bestimmung der Luftdichtheit der Forschungswohnung) messtechnisch bestimmten Werte verwendet.

Tabelle 26 Raumweise Strömungskoeffizienten für Leckagen für alle Grundrisse

	Strömungskoeffizient C in m <sup>3</sup> /h/Pa		
	Studentenapartment	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
Bad	5,8	3,2	1,5
Küche	-	2,6	1,0
Schlafzimmer	-	3,1	3,3
Wohnzimmer	-	3,5	2,5
Kinderzimmer	-	-	2,5

#### Außenluftdurchlässe

Im Projekt wurden die Außenluftdurchlässe ALD100 der Firma Maico verwendet. Die Daten aus der im Datenblatt gegebenen Druck-Volumenstrom-Kennlinie wurden verwendet um den Druckexponenten zu bestimmen.

#### Überströmdurchlässe

Die Überströmdurchlässe wurden nach DIN 1946-6:2019 [1] ausgelegt, sodass diese bei Nennvolumenstrom eine Druckdifferenz kleiner 1,5 Pa aufweisen. Die Koeffizienten wurden in gleicher Weise wie bei den Leckagen ermittelt.

### Fenstermodell

In CONTAM kann der Luftaustausch über Fenster mit einem "Two-way Flow Model" abgebildet werden [27]. Hierbei wird sowohl der Winddruck auf der Fassade als auch die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen berücksichtigt. Als Parameter werden die Fläche der Öffnung (daher bei geöffnetem Fenster die ganze Fläche, bei gekipptem Fenster entsprechend weniger) sowie ein Druckverlustbeiwert benötigt. Die Fensterfläche kann mit der Formel (16) berechnet werden. Für das Fenstermodell werden die Maße der Fenster der Forschungswohnung verwendet. Die Fenster haben eine Breite von 1,0 m und eine Höhe von 1,2 m. Im gekippten Zustand haben die Fenster eine Spaltbreite von 11 cm angenommen. Somit ergibt sich eine Öffnungsfläche von 0,242 m<sup>2</sup>. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Fensterlaibung zu keiner weiteren Reduktion des freien Querschnittes führt.

$$A_{\text{Kipp}} = a * (B + H) \quad (16)$$

$A_{\text{Kipp}}$	Öffnungsquerschnitt eines gekippten Fensters	in	m <sup>2</sup>
a	Spaltbreite	in	m
B	Breite des Fensters	in	m
H	Höhe des Fensters	in	m

Der Volumenstrom bei einseitiger Fensterlüftung wird in der DIN16798-7:2017 [31] beschrieben und kann mit Formel (17) berechnet werden. Für die Ermittlung des Druckverlustbeiwerts wurde der transiente Volumenstrom für o.g. Fenster über einen Tag berechnet und mit den Ergebnissen aus CONTAM verglichen (s. Abbildung 16). Es wurde dann der Druckverlustbeiwert mit der kleinsten Abweichung gewählt, in diesem Fall der Beiwert mit 0,73.

$$q_{v,arg,in} = 3600 * \frac{\rho_{a,ref}}{\rho_a} * \frac{A_{w,tot}}{2} * \max(c_{wnd} * u_{10,site}^2; C_{st} * h_{w,st} * \text{abs}(T_z - T_e))^{0,5} \quad (17)$$

$q_{v,arg}$	Durch Lüftungsöffnung ein- oder austretende Luftvolumenstrom		
$\rho_{a,ref}$	Luftdichte auf Höhe des Meeresspiegels, bei 293K und trockener Luft	in	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	Dichte Luft (innen o. außen je nach Strömungsrichtung)		
$A_{w,tot}$	Gesamte Fensteröffnungsfläche	in	m <sup>2</sup>
$c_{wnd}$	Koeffizient zur Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit in Berechnungen der Fensterlüftung	in	-
$u_{10,site}^2$	Windgeschwindigkeit am Standort in einer Höhe von 10 m	in	m/s
$C_{st}$	Koeffizient zur Berücksichtigung des thermischen Auftriebs in Berechnungen der Fensterlüftung	in	-
$h_{w,st}$	Wirksame Höhe für den thermischen Auftrieb bei Fensterlüftung	in	m
$T_z$	Lüftungszonentemperatur	in	K
$T_e$	Außentemperatur	in	K

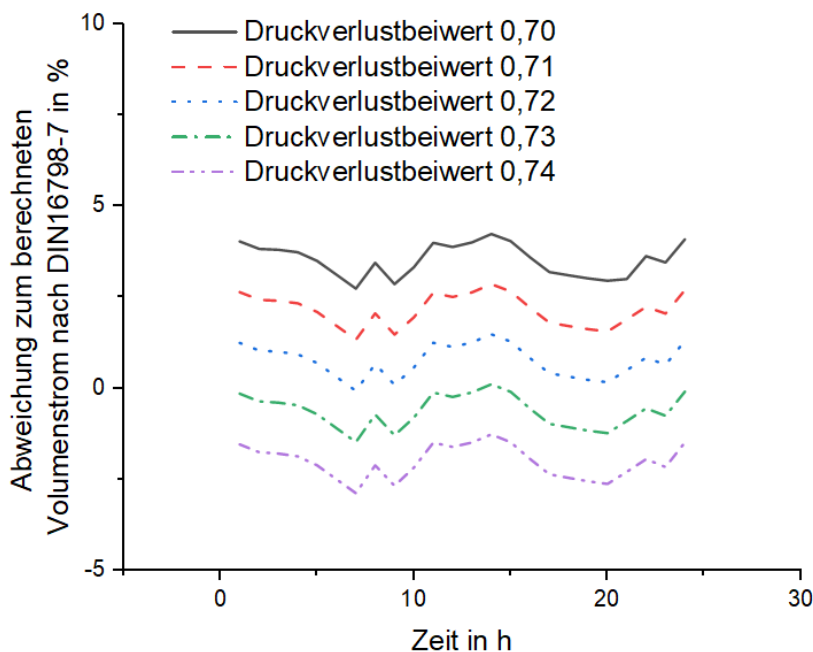


Abbildung 16 Abweichung des Volumenstrom der Fensterlüftung zwischen Simulation und Berechnung nach DIN16798-7

### Feuchteadsorption

Abhängig von der Luftfeuchte, können Boden und Wände sowie Einrichtungsgegenstände als wasserad- bzw. -desorbierende Feuchtesenken den Feuchteverlauf mehr oder minder stark beeinflussen. CONTAM bietet zur Simulation dieses Effektes verschiedene Umsetzungen an. Für die Jahressimulationen wurde das *boundary layer diffusion model* gewählt, welches eine raumweise Ad- bzw. Desorptionsrate in Abhängigkeit der Zeit sowie der Feuchtekonzentration in der Luft, wie in Gleichung (18) modelliert [27].

$$S_{H_2O}(t) = ctrl \cdot h \cdot d \cdot A_s \left( C_{H_2O}(t) - \frac{C_s(t)}{k} \right) \quad (18)$$

h	als Massentransferkoeffizient des Films über der Senke	in	m/s
d	als Luftdichte des Films	in	kg/m <sup>3</sup>
A <sub>s</sub>	als Oberfläche des Adsorbers	in	m <sup>2</sup>
C <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	als Konzentration in der Luft	in	kg/kg
C <sub>s</sub>	als Konzentration in Adsorber	in	kg/kg
k	als Henry-Adorptionskonstante	in	kg/kg
ctrl	als boolesche Kontrollvariable zur Zustandssteuerung (Dimensionslos)	in	-

Für die Eingabeparameter A<sub>s</sub>, k und h wurden Werte aus [9], wie in Tabelle 27 verwendet. Als stark adsorbierende Räume sollen hier Zulufräume und als schwach adsorbierende Räume die Ablufträume und der Überströmräume gelten.

Tabelle 27: Verwendete Eingabeparameter des Adsorptionsmodells von CONTAM

Parameter	Stark adsorbierender Raum	Schwach adsorbierender Raum
h in m/s	0,0051	0,0066
k in kg/kg	331,6	300
A in % Raumvolumen	12,3	2,4

CO<sub>2</sub>-Konzentration und des Luftdrucks innerhalb und außerhalb der Wohnung vor. Dabei dienen die Außenbedingungen als Einflussgrößen auf die Innenraumkonditionen. Sie werden tabellarisch im Modell abgebildet und mit den Zuluft-Systemen als Input-Parameter verknüpft. Für jeden dieser Parameter werden zudem Startwerte für die Innenraumkonditionen im Modell definiert. Darüber hinaus werden diese Parameter von den vorgesehenen Wärme-, Feuchte-, und CO<sub>2</sub>-Quellen beeinflusst. Diese werden analog zu den festgelegten Abgabeprofilen (siehe Kapitel Anwesenheitsprofile für die Grundrisse) tabellarisch im Modell integriert und passend zum Versuchsaufbau mit den entsprechenden Zonen verknüpft.

Das hier verwendete IESS Modell berücksichtigt weder die Absorption von CO<sub>2</sub> oder Feuchte noch eine Kondensation bei hohen Luftfeuchten. Daraus können sich besonders bei der Betrachtung der relativen Luftfeuchte höhere maximale Werte ergeben als in der Realität vorhanden. Diese Tatsache muss bei der Interpretation der Werte berücksichtigt werden. Die Leckagen der Außenwände werden über die mittels des Blowerdoor-Tests bestimmten Luftwechselraten in der Forschungswohnung abgebildet (siehe Kapitel Bestimmung der Luftdichtheit der Forschungswohnung). Die passiven Überströmer der Innentüren werden, analog zum Versuchsaufbau, als Öffnungen zwischen den Räumen mit einem definierten Querschnitt von 175 cm<sup>2</sup> abgebildet.

Je Lüftungsszenario wurde ein eigenes Modell erstellt. Dieses enthält jeweils die vorgesehenen Lüftungssysteme, verknüpft mit den entsprechenden Zonen analog zum Messaufbau, vgl. Abbildung 18. Hierbei werden die mechanisch geregelten Lüftungssysteme über einen definierten Massenstrom modelliert. Die Außenluftdurchlässe werden als Außenwandöffnungen mit definiertem

Öffnungsquerschnitt und Strömungswiderstand abgebildet. Die Pendellüfter mit zyklisch wechselnder Volumenstromrichtung und einer Umschaltpause von 10 Sekunden werden über eine entsprechende Funktionskomponente berücksichtigt. Bei Lüftungsszenarien mit variierendem Volumenstrom werden diese über Tabellen berücksichtigt. Die Lufttemperatur der Räume ist im IESS Modell neben den Wärmequellen auch von der Temperatur der einströmenden Zuluft abhängig und kann demnach unter die vorgegebenen Sollwerte der Raumlufttemperatur fallen.

## IESS

Die Indoor Environment Simulation Suite (IESS) basiert auf einem zonalen Simulationsmodell, dem VELOCITY Propagating ZONal-Modell (VEPZO Modell), entwickelt am Fraunhofer IBP [28]. Das Ziel eines zonalen Modells ist es, schnelle Simulationen der Luftströmungsmuster und Temperaturverteilungen in einem Innenraum durchzuführen. Dazu wird ein Raumvolumen in mehrere miteinander im Luftaustausch befindliche Zonen unterteilt. Zonale Modelle sind ein Kompromiss zwischen den komplexeren CFD-Berechnungen und der Näherung eines perfekt durchmischten Luftvolumens wie im Fall von CONTAM (Kapitel Vorstellung Simulationsmodelle). Das VEPZO-Modell verwendet die Luftstromgeschwindigkeit als Eigenschaft einer Zone und ein viskoses Verlustmodell um der Physik von Luftströmungen besser zu entsprechen. Zwei Hauptkomponenten des VEPZO-Modells sind ein Volumenmodell und ein Strömungsmodell. Das Volumenmodell berücksichtigt die Massenerhaltung und Enthalpieerhaltung, während das Strömungsmodell den Massendurchsatz aus der Druckdifferenz berechnet. Das VEPZO-Modell zeichnet sich dadurch aus, dass nur eine sehr geringe Menge an Informationen über die Randbedingungen notwendig ist und die Erstellung lokaler Auflösungen von Lufttemperaturen, Stoffkonzentrationen und Luftströmungen innerhalb einer Domäne möglich sind. Darüber hinaus ist eine parametrische Variation auch für instationäre Situationen möglich [32].

Ziel der hier erstellten Simulationen mittels IESS ist es, das Simulationsmodell anhand der Messungen in der Zwei-Zimmer-Wohnung zu validieren (s. Kapitel Versuchsaufbau in der Forschungswohnung der TH Rosenheim). Zudem soll evaluiert werden, inwiefern sich dieser Ansatz zur Bewertung der Lüftungseffektivität unterschiedlicher Lüftungssysteme eignet. Hierfür wurde basierend auf dem Grundriss der Zwei-Zimmer-Wohnung und den zugehörigen Messungen je Lüftungssystem ein IESS-Modell erstellt und simuliert.

## Modellgenerierung

Die IESS beinhaltet ein Pre-Processing Tool, IESS Model Generator genannt. Basierend auf einem CAD Modell, welches als .stl-Datei vorliegt, wird ein zonales Modell für die Modelica-Simulationsumgebung generiert [33].

Vom Projektpartner CG Elementum wurde ein 3D Modell der Zwei-Zimmer-Wohnung erstellt, welches als Grundlage zur Generierung des zonalen Modells der Zwei-Zimmer-Wohnung mittels des IESS Model Generator diente. Auf dieser Basis wurde je Lüftungsszenario ein eigenständiges Simulationsmodell erstellt. Das verwendete Raster orientiert sich an der Geometrie der Wohnung und an den Positionen der Messstellen. Daraus ergibt sich eine Unterteilung der Raumhöhe in 3 Ebenen, der Wohnungsbreite in 7 Ebenen und der Wohnungstiefe in 6 Ebenen. Jeder Raum stellt eine zunächst in sich geschlossene Domäne dar, welche zum Luftaustausch mittels Domain Connections verbunden werden können. Insgesamt ergeben sich aus diesen Randbedingungen 5 Domänen mit insgesamt 186 Zonen.

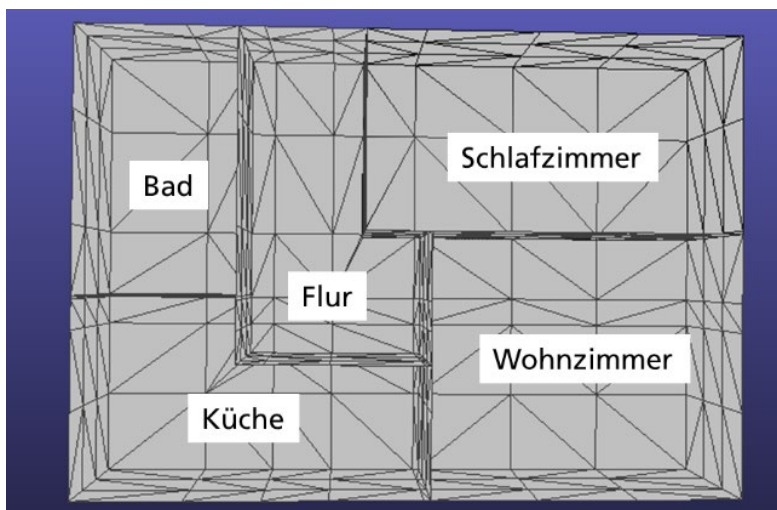


Abbildung 17 Durch IESS Model Generator erzeugtes zonales Modell der Zwei-Zimmer-Wohnung  
Zum Vergleich der Simulationsergebnisse der IESS mit den Messergebnissen, bzw. den Simulationsergebnissen aus CONTAM werden jeweils die Zonen verwendet, welche jeweils an der gleichen Position im Raum sind wie die zur Auswertung verwendeten Messpunkte, siehe Abbildung 25.

#### Modellkomponenten

Der Versuchsaufbau zum Vergleich der verschiedenen Lüftungssysteme sieht die Berücksichtigung der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, der CO<sub>2</sub>-Konzentration und des Luftdrucks innerhalb und außerhalb der Wohnung vor. Dabei dienen die Außenbedingungen als Einflussgrößen auf die Innenraumkonditionen. Sie werden tabellarisch im Modell abgebildet und mit den Zuluft-Systemen als Input-Parameter verknüpft. Für jeden dieser Parameter werden zudem Startwerte für die Innenraumkonditionen im Modell definiert. Darüber hinaus werden diese Parameter von den vorgesehenen Wärme-, Feuchte-, und CO<sub>2</sub>-Quellen beeinflusst. Diese werden analog zu den festgelegten Abgabeprofilen (siehe Kapitel Anwesenheitsprofile für die Grundrisse) tabellarisch im Modell integriert und passend zum Versuchsaufbau mit den entsprechenden Zonen verknüpft.

Das hier verwendete IESS Modell berücksichtigt weder die Absorption von CO<sub>2</sub> oder Feuchte noch eine Kondensation bei hohen Luftfeuchten. Daraus können sich besonders bei der Betrachtung der relativen Luftfeuchte höhere maximale Werte ergeben als in der Realität vorhanden. Diese Tatsache muss bei der Interpretation der Werte berücksichtigt werden. Die Leckagen der Außenwände werden über die mittels des Blowerdoor-Tests bestimmten Luftwechselraten in der Forschungswohnung abgebildet (siehe Kapitel Bestimmung der Luftdichtheit der Forschungswohnung). Die passiven Überströmer der Innentüren werden, analog zum Versuchsaufbau, als Öffnungen zwischen den Räumen mit einem definierten Querschnitt von 175 cm<sup>2</sup> abgebildet.

Je Lüftungsszenario wurde ein eigenes Modell erstellt. Dieses enthält jeweils die vorgesehenen Lüftungssysteme, verknüpft mit den entsprechenden Zonen analog zum Messaufbau, vgl. Abbildung 18. Hierbei werden die mechanisch geregelten Lüftungssysteme über einen definierten Massenstrom modelliert. Die Außenluftdurchlässe werden als Außenwandöffnungen mit definiertem Öffnungsquerschnitt und Strömungswiderstand abgebildet. Die Pendellüfter mit zyklisch wechselnder Volumenstromrichtung und einer Umschaltpause von 10 Sekunden werden über eine entsprechende Funktionskomponente berücksichtigt. Bei Lüftungsszenarien mit variierendem Volumenstrom werden diese über Tabellen berücksichtigt. Die Lufttemperatur der Räume ist im IESS Modell neben den Wärmequellen auch von der Temperatur der einströmenden Zuluft abhängig und kann demnach unter die vorgegebenen Sollwerte der Raumlufttemperatur fallen.

## Versuchsaufbau in der Forschungswohnung der TH Rosenheim

### Beschreibung der Forschungswohnung

Die Forschungswohnung an der TH Rosenheim besteht aus Schlafzimmer, Wohnzimmer als Zulufräume, Flur als Überstromraum sowie Küche und Bad als Ablufträume. In den Decken der Räume sind verschließbare Luftdurchlässe angebracht, an denen über eine zentrale Lüftungsanlage Luft ein- bzw. ausgebracht werden kann. In den Wänden der Räume können, bei Bedarf, verschiedene dezentrale Lüftungsgeräte eingebaut werden (siehe Grundrissplan in Abbildung 18). Der Luftaustausch der Räume erfolgt über einstellbare Türüberströmer. Zwischen den Zulufräumen und dem Überstromraum sind zudem aktive Überströmer verbaut, die bei Bedarf verwendet werden können.

In jeden Raum können zudem zeitabhängig bestimmte CO<sub>2</sub>- und Feuchte- und Wärmemengen eingebracht werden, um beispielsweise die Emissionsprofile im Tagesverlauf aus Kapitel Anwesenheitsprofile für die Grundrisse umzusetzen. Zudem ist es möglich über eine Heizung die Temperatur in jedem Raum zu regeln. Das Klima vor der gemeinsamen Außenwand der Zu- sowie der Ablufträume (Außenwände mit Fenstern) kann jeweils mit einer Klimaschale konditioniert werden, wobei vor der Außenwand der Druck, die Temperatur und die relative Luftfeuchte geregelt werden kann.

### Zentrale Steuerung

Die Ansteuerung aller Lüftungsgeräte (Ausnahme: Abluftventilatoren) und der Vorrichtungen zur CO<sub>2</sub>-, Feuchte- und Wärmeeinbringung sowie die Weiterleitung mancher Messwerte an eine Datenbank übernimmt eine mit Node-RED entwickelte, webbasierte, zentrale Anwendung, die gleichzeitig auch eine Benutzeroberfläche zur manuellen Ansteuerung stellt. Node-RED ist ein auf JavaScript basierendes, graphisches, Entwicklungswerkzeug, um Aufgabenstellungen aus der Kategorie Internet der Dinge zu realisieren. Es bietet neben der Integration eigener Skripte eine Vielzahl an Schnittstellen aus der Gebäudeautomation, die zum Einsatz kommen, um mit den an den jeweiligen Mess- oder Steuergeräten eingesetzten Einplatinencomputern (RaspberryPi oder ESP8266) sowie mit der Datenbank zu kommunizieren. Die Ansteuerung von Geräten kann einzeln oder gruppenweise erfolgen. Mit den zur Verfügung stehenden Geräten können alle Anforderungen bzgl. der Randbedingungen der durchgeführten Versuche erfüllt werden.



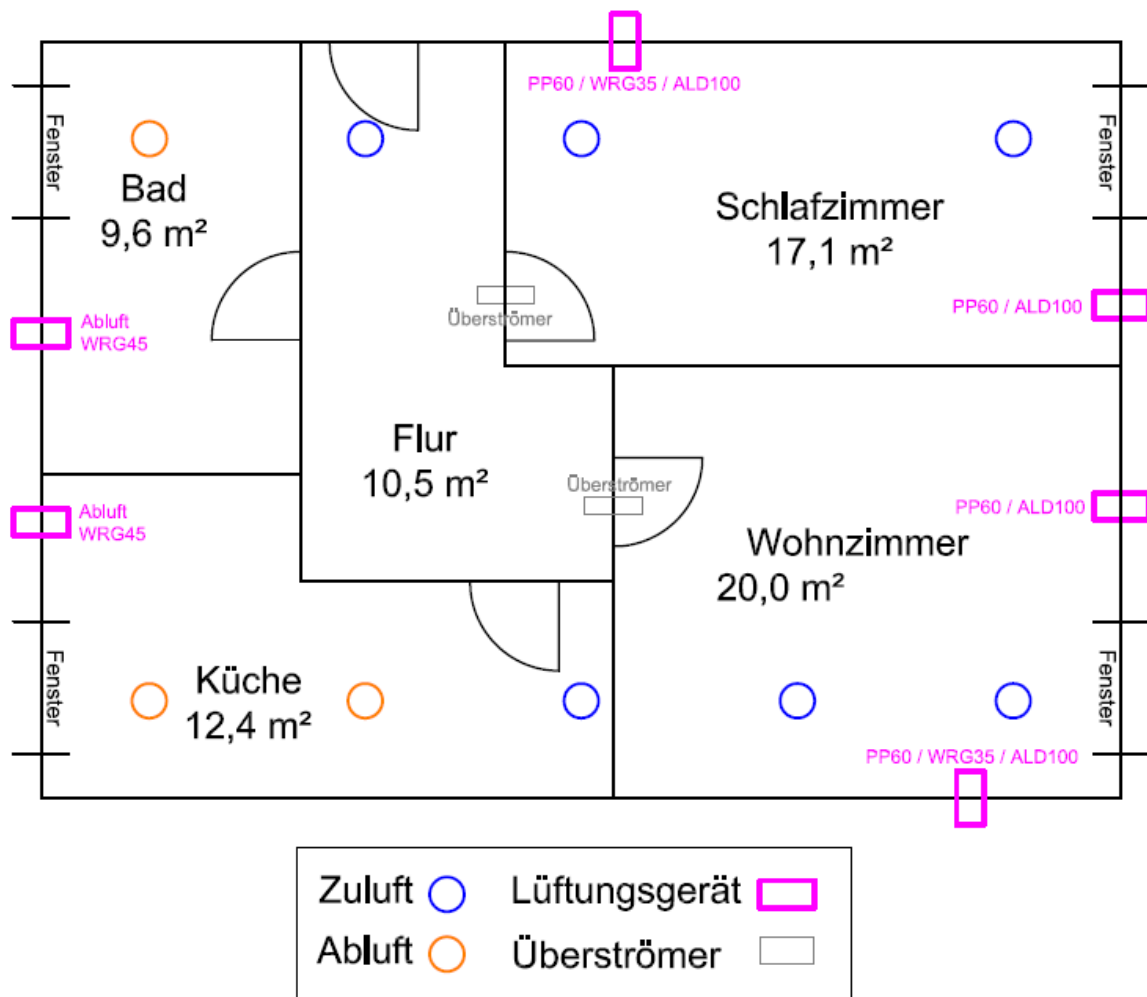


Abbildung 18 Grundrissplan der Forschungswohnung inkl. Positionen der Lüftungsgeräte

## Verwendete Lüftungsgeräte

### Zentrales Lüftungsanlage

Für das zentrale Lüftungssystem kommt die Lüftungsanlage KG Top.eco 21 der Firma Wolf zum Einsatz. Möglich ist hier Einstellung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte der Zuluft. Zu- bzw. Abluftvolumenströme sind zusätzlich über Reglerklappen einstellbar (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Reglerklappen zur Einstellung der Volumenströme der zentralen Lüftungsanlage

### Dezentrales Einzelraumlüftungsgerät (ERLG rekuperativ)

Das Einzelraumlüftungsgerät (siehe Abbildung 20) verfügt über zwei entgegengesetzt laufende Lüfter sowie einen Kreuzstromwärmetauscher. In den Versuchen wird pro Raum maximal ein Einzelraumlüftungsgerät benötigt. Die Lüfter können unabhängig voneinander angesteuert werden. Somit ist es auch möglich, für beide Lüfter den exakt gleichen Volumenstrom einzustellen. Die Ansteuerung der Drehzahl erfolgt über den ESP8266 durch PWM (Pulsweitenmodulation). Da die verwendeten Einzelraumlüftungsgeräte aber über keinen PWM-Eingang verfügen, wurde hierfür eine Platine entworfen, um den Tastgrad des PWM-Ausgangs in einen für die Lüfter geeigneten Spannungsbereich von 0-24 V zu übertragen.



Abbildung 20 Dezentrales Lüftungsgerät mit Abdeckung; In der Wand verbaut

#### Dezentrales Lüftungsgerät mit regenerativem Wärmetauscher

Der verwendete Pendellüfter (Maico PP 60 K-SE) (siehe Abbildung 21) verfügt über einen Lüfter, der Luft in beide Richtungen befördern kann, sowie eine Wabenstruktur, die als Wärmespeicher dient und durch die die Luft stets strömt und der der Wärmerückgewinnung aus der Abluft dient. In den Versuchen werden pro Raum (bis auf Abluft + Pendellüfter im Zuluftbetrieb) zwei Pendellüfter eingebaut. Die Pendellüfter werden (über PWM) in den meisten Versuchen so angesteuert, dass sie alle 70 s die Strömungsrichtung wechseln. Dabei wird darauf geachtet, dass dieser Wechsel bei allen Pendellüftern, die in der Wohnung verbaut sind, synchron stattfindet, um einem ungewollten Druckausgleich über den Flur, oder die Außenwände vorzubeugen.



Abbildung 21 li. Pendellüfter mit wabenförmigem Wärmespeicher, ohne Abdeckung; re.: Pendellüfter mit Ansteuerungselektronik

### Aktive Überströmer

Die aktiven Überströmer (siehe Abbildung 22) dienen dem Luftaustausch zwischen Überstrom- und Zulufräumen. Sie werden über PWM angesteuert und können in beide Richtungen blasen.



Abbildung 22: Aktiver Überströmer mit Ansteuerung und CO<sub>2</sub>-Sensor

## Vorrichtungen für Stoff- und Wärmeeinbringung sowie Konditionierung von Innen und Außenraum

### Klimaschalen

Die Klimaschalen schließen einen Bereich von ca. 70. cm vor der Nord- bzw. Südseite der Forschungswohnung ein, in dem relative Luftfeuchte, Temperatur und Druck eingestellt werden können. Außerdem wird durch Zirkulation für einen ständigen Luftaustausch gesorgt. Die Klimaschalen sind luftdicht an die Außenwand angebracht. Ein Wärme- bzw. Kältebezug erfolgt über externe Wärmepumpen. Die Feuchtigkeit kann über Vernebler eingestellt werden, die in der Klimakammer platziert sind. Zusätzlicher Druck kann bei Bedarf über einen ansteuerbaren Lüfter aufgebaut werden. Die Ansteuerung der Klimaschalen erfolgt nicht über Node-RED, sondern über ein separates System.

### Feuchteemissionsregelung

Die Wasseremission wird mit Wasser gefüllte Behälter statt die in jedem Raum stehen. In diesen Behältern wird das Wasser durch einen Ultraschallvernebler vernebelt und dann mit einem Lüfter im Raum verteilt (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23 Vorrichtung geregelter Feuchteemission, Bildmitte: Behälter (steht auf einer Waage), aus dem Nebel austritt; links unten: Messung, Regelung, Ansteuerung und Stromversorgung

Soll keine Feuchteemission stattfinden, so werden Vernebler und Ventilator gestoppt. Zur Einstellung eines bestimmten Massenstroms, der aus dem Behälter in die Luft eines Raumes übergehen soll, werden die Vernebler periodisch jeweils eine entsprechende Zeitspanne ein- sowie ausgeschaltet. Das Verhältnis der Zeit, die die Vernebler eingeschaltet sind zur Gesamtzeit der Periode (10 s haben hier als geeignet erwiesen) wird als Tastgrad bezeichnet und ist die Stellgröße des Reglers. Die automatische Berechnung eines für den aktuell benötigten Massenstrom geeigneten Tastgrads übernimmt somit der Regler. Beim Regler handelt es sich um einen PI-Regler mit Anti-Windup (verhindert, dass der Regler nach längerem Über- oder Unterschreiten des Sollwertes verzögert reagiert). Der Regler benötigt den aktuellen Massenstrom zur Bildung der Regelabweichung. Dieser Massenstrom wird durch Bildung der ersten Ableitung des Behältergewichts bestimmt. Das Behältergewicht wird über eine Wägezelle ermittelt, welche mit einem Dehnungsmessstreifen ausgestattet ist, der je nach Belastung einen bestimmten Widerstand aufweist, dem dann ein Gewicht zugeordnet werden kann. Der Massenstrom wird in einem Intervall von ca. 10 s ermittelt. Da in dieser relativ kurzen Zeit die Messschwankungen sehr ausgeprägt gegenüber dem in dieser Zeit ausgebrachten Wassermasse sind, wird ein sinnvoller und somit für den Regler annehmbarer Wert für den Massenstroms (in g/h) erst durch Tiefpassfilterung der Messwerte möglich. Der Regler, sowie die Ansteuerung der Vernebler und des Ventilators sowie die Bestimmung des Massenstroms läuft auf einem Raspberry Pi. Die Vorrichtungen zu Feuchteemissionsregelung ermöglichen Massenströme bis über 1 kg/h (je nach Anzahl gleichzeitig angesteuerter Vernebler) und decken somit die Anforderungen aus Kapitel Anwesenheitsprofile für die Grundrisse ab.

#### CO<sub>2</sub>-Volumenstromregelung

Die CO<sub>2</sub>-Volumenstromregelung basiert auf für jeden Raum separat ansteuerbaren Massenstromreglern. Diese werden über eine CO<sub>2</sub>-Flasche gespeist und bringen das Gas mittels kleiner Schläuche in die jeweiligen Räume. Mit dieser Vorrichtung ist es möglich, mit zeitlicher Variation die CO<sub>2</sub>-Menge auszustoßen, die einer oder mehreren Personen entsprechen würde. Somit können, analog zur Feuchteemissionsregelung die Tagesprofile aus Kapitel abgefahren werden. Es ist ebenfalls möglich, bei Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf eine bestimmte Konzentration zu regeln.

Thermische Dummies – Wärmestromregelung



Über die thermischen Dummies (siehe Abbildung 24) können durch separate Ansteuerung Personenaufenthalte (variable Anzahl in unterschiedlichen Räumen) bzgl. der Wärmeemission nachgestellt werden. Die mit Glühlampen ausgestatteten Dummies entsprechen dabei der mittleren Wärmeemission einer Person im Ruhezustand. Durch die zeitliche Ansteuerung (an/aus) kann die An- oder Abwesenheit von Personen entsprechend der Tagesprofile simuliert werden.

### Heizungsregelung

Zum Einstellen der Temperatur ist jeder der Zu- und Ablufträume mit einer Elektroheizung ausgestattet. Eine Regelung der Temperatur findet durch Erfassung der Raumtemperatur in der Raummitte statt. Die Heizkörper verfügen über eine maximale Leistung von 800 W und werden mit 230 V Wechselstrom betrieben. Eine Ansteuerung erfolgt daher über eine Thyristorsteuerung mit Phasenanschnitt.



Abbildung 24 Zwei thermische Dummies mit Steuerungselektronik, im Vordergrund Vorrichtung zur Feuchteemission

### Messaufbau

Abbildung 25 zeigt die Platzierungen der Messstellen für CO<sub>2</sub>-Konzentration und relative Luftfeuchte, die bei den Messungen der Abklingvorgänge und Tagesprofilen verwendet wurden.

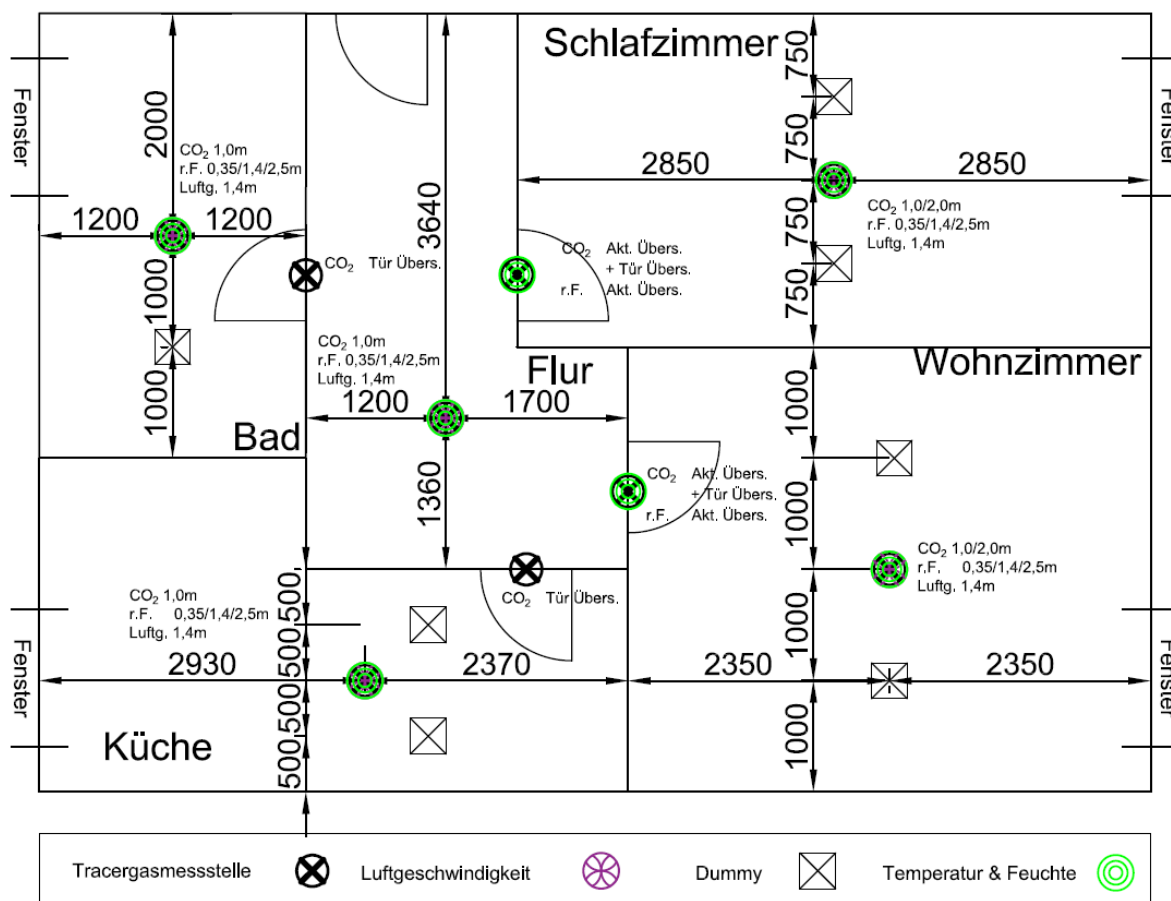


Abbildung 25 Zeichnung der Forschungswohnung mit Messstellen (inkl. unterschiedlicher Höhen) während der Abklingversuche und Tagesprofilmessungen

Für die Behaglichkeitsmessungen wurden zusätzlich Luftgeschwindigkeit, Temperatur sowie Strahlungstemperatur an einem ausgewählten Aufenthaltsort und einem variablen, vom Lüftungssystem abhängigen, Zuluftort ausgewertet. Eine Skizze hierzu befindet sich in Kapitel Thermische Behaglichkeit. In Tabelle 28 sind die verwendeten Sensoren mit dazugehörigen Messgrößen aufgelistet.

Tabelle 28 Im Messaufbau verwendete Sensoren

Bezeichnung	Art	Messbereich	Messgrößen
LumaSense Photoacoustic Gas Monitor 1412i	Photoakustische Infrarotspektroskopie	dynamisch	CO <sub>2</sub> -Konzentration
Digitaler Fühler für Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck FHAD 46-Cx	CMOSens® Technologie CMOSens® Technologie	5 bis 98 % r.F. 5 bis 60 °C	Relative Luftfeuchte, Temperatur
Globe-Thermometer	Pt100 4-Leiter, mittig angeordnet	-40 °C bis 200 °C	Strahlungstemperatur
Thermoanemometer FV A605-TA1	Thermoanemometer	0,01 m/s bis 1 m/s	Luftgeschwindigkeit

### Bestimmung der Luftdichtheit der Forschungswohnung

Je nach Luftdichtheit der Gebäudehülle beeinflussen Leckagen das Lüftungsverhalten einer Wohnung mehr oder weniger. Besonders bei Lüftungssystemen mit unausgeglichene Zu- und Abluftvolumenströmen können Leckagen zu einem abweichendem Lüftungsverhalten führen [10].

Um eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulationsmodell und Messung zu erhalten wurden die Leckagen in der Forschungswohnung mithilfe eines Blowerdoor-Tests ermittelt. Die Leckage wurde raumweise nach der „Guarded Zone“-Methode [31] bestimmt. Mit dieser Vorgehensweise kann der Leckage-Wert der Außen- und Innenwände separat bestimmt werden. In unterschiedlichen Messschritten werden die angrenzenden Räume auf den gleichen Über- oder Unterdruck gebracht wie der zu messende Raum. Die einzelnen Messschritte sind in Abbildung 26 – 34 schematisch dargestellt. Abbildung 35 zeigt die zwei Blowerdoor-Messaufbauten bei einer Messung eingebaut in die Bad- und Haustür. Mit dieser Messmethode kann nur ein kumulierter Wert für die Außenhülle (Boden, Decke, Wände) bestimmt werden.

Die Leckagen werden mithilfe des Potenzgesetzes (Formel (15)) beschrieben. Die Werte für den Koeffizienten C und den Exponenten n für alle Innenwände, sowie kumuliert für die Außenwände jedes Raumes sind in Tabelle 18 aufgeführt.

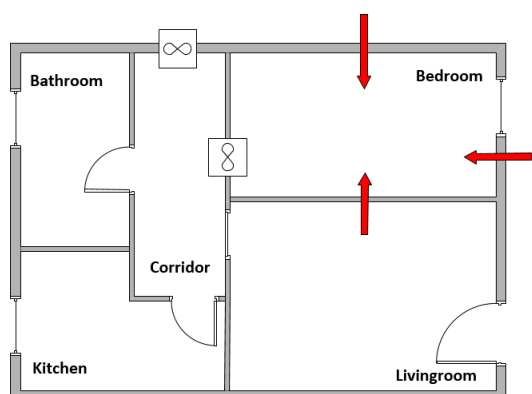


Abbildung 26 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 1.Messung: Messung der Außenwände und der Wand zwischen Schlaf- und Wohnzimmer

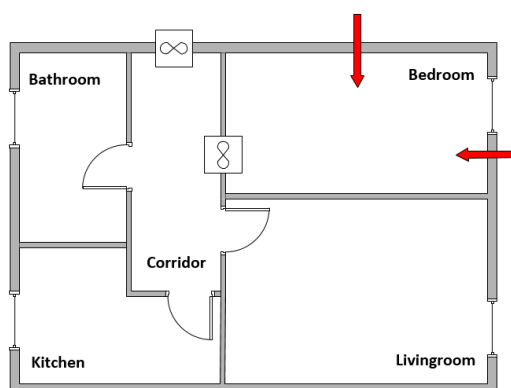


Abbildung 27 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 2.Messung: Messung der Außenwände



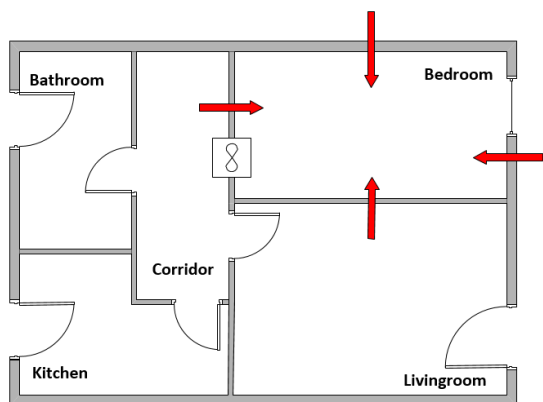


Abbildung 28 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 3.Messung: Messung aller Raumumschließungsflächen



Abbildung 29 Leckage Messung in der Forschungswohnung, hier eingebaute Blowerdoor in Haustür und Badezimmer-Tür

Tabelle 18 Ergebnisse raumweise Luftdichtheitsmessung Forschungswohnung

Raum	Wand	C	n
Schlafzimmer	Außenwände	3,60	0,76
	Innenwand zum Flur	4,54	0,43
	Innenwand zum Wohnzimmer	0,009	1,73
Wohnzimmer	Außenwände	3,07	0,77
	Innenwand zum Flur	3,71	0,59
	Innenwand zum Schlafzimmer	0,25	0,92
	Innenwand zur Küche	0,21	0,72
Küche	Außenwände	3,23	0,70
	Innenwand zum Flur	1,73	0,68
	Innenwand zum Wohnzimmer	0,32	0,70
	Innenwand zum Bad	1,78	0,70
Bad	Außenwände	0,87	0,79
	Innenwand zum Flur	2,58	0,69
	Innenwand zur Küche	1,54	0,67

## Validierung der Simulationsmodelle mit der Konzentrationsabklingmethode

Für eine erste Validierung der Simulationsmodelle wurde die Konzentrationsabklingmethode nach [32] gewählt. Dazu werden CO<sub>2</sub>-Abklingkurven gemessen, welche die Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration von einem erhöhten Niveau auf Zuluftniveau bei konstanter Lüftung (und fehlendem weiteren CO<sub>2</sub>-Eintrag) beschreiben. Parallel dazu wurden die Szenarios in beiden Simulationsumgebungen simuliert.

Die Wahl dieser Methode erfolgte, da der Versuchsaufbau leicht einfach wiederholbar ist, wenig Fehlereinflüsse vorhanden sind (im Vergleich zur Validierung mit den Tagesprofilen) und zudem der Verlauf der Abklingkurven jeweils charakteristisch für die jeweilige Lüftungssituation ist. Das heißt, dass in einem bestimmten Raum bei einer bestimmten Flusskonfiguration (Tritt Luft beispielsweise von außen oder von einem benachbarten Raum ein?) und einem bestimmten Zuluftvolumenstrom zu einem bestimmten Verlauf der CO<sub>2</sub>-Abklingkurve führt.

So wurden für jede Basis-Variante (Systeme (1) Zentral, (2) Akt. Über., (3) ERLG, (4) ERLG+AB, (5) PL+AB, (6) PL+ERLG und (7) AB 1946) drei Kurven, jeweils durch Messung sowie Simulation mit CONTAM und mit IESS ermittelt.

Die in beiden Simulationen ermittelten Abklingkurven einer Basis-Variante sollten zur Überprüfung der Validität des Simulationsmodells mit den entsprechenden Abklingkurven der Messung verglichen werden. Dabei erwies sich der RMSE (engl.: root mean squared error) zwischen Messung und Simulation als ein Maß der mittleren Abweichung mit besonderer Gewichtung starker Ausreißer als sinnvoll.

Zur Überprüfung, ob die Simulation einer Basis-Variante valide ist, wurde um den jeweils aktuellen Messwert eine Abweichung von ±10% als 95 %-Konfidenzintervall angesetzt. Es wird also angenommen, dass dieses Intervall von ±10% um den Messwert zu 95 % den wahren Wert der CO<sub>2</sub>-Konzentration einschließt.

Ist der zuvor ermittelte RMSE zwischen Messung und Simulation kleiner, als der RMSE, der sich zwischen Messung und der Grenze (obere oder untere) des Konfidenzintervalls ergibt, so wird der Validierungstest als bestanden angesehen.

Anders ausgedrückt lässt sich dieser Test wie in Formel (19) an der Überprüfung des Vorzeichens von ΔRMSE durchführen. ΔRMSE ist ebenfalls ein Maß, das Auskunft über die Übereinstimmung der Simulation mit der Messung gibt: Je höher ΔRMSE, desto höher ist die Übereinstimmung und je geringer ΔRMSE, desto geringer auch die Übereinstimmung mit der Messung.

$$\Delta RMSE_{10\%} = RMSE_{\text{Messung}, \pm 10\%} - RMSE_{\text{Simulation}, \text{Messung}} \begin{cases} < 0 & \text{nicht bestanden} \\ \geq 0 & \text{bestanden} \end{cases}$$

mit

$$RMSE_{\text{Messung}, \pm 10\%} = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_{\text{Messung}, i} - 1,1\sigma_{\text{Messung}, i})^2}{n}}$$

und

$$RMSE_{\text{Simulation}} = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_{\text{Messung}, i} - \sigma_{\text{Simulation}, i})^2}{n}}$$
(19)

## Versuchsdurchführung

Die Vorgehensweise zur Messung der Basis-Varianten lässt sich allgemein in fünf Schritte untergliedern:

1. Einschalten der Lüftung, Einstellen der gewünschten Volumenströme und Ermittlung der zugehörigen Konfigurationsparameter
2. Ausschalten der Lüftung, öffnen der Innentüren und schließen der Außentüre der Forschungswohnung
3. Raumweises Einbringen von CO<sub>2</sub> in die Forschungswohnung gleichzeitigem Umwälzen mit Standventilatoren, sodass sich in jedem Raum eine Konzentration von mindestens 4000 ppm einstellt
4. Stopp der CO<sub>2</sub>-Einbringung, der Umwälzung und schließen der Innentüren
5. Einschalten der Lüftung mit den zuvor ermittelten Konfigurationsparametern (es herrschen jetzt annähernd gleiche Bedingungen, wie zuvor bei Punkt 1. beim Einstellen der Volumenströme)

Die Messungen der Abklingkurven wurden jeweils mindestens für 2 h vorgenommen.

## Ergebnisse

Zum besseren Verständnis der berechneten  $\Delta$ RMSE-Werte veranschaulicht Abbildung 30 am Beispiel der Werte des 1. Lüftungssystems im Schlafzimmer auf 1,0 m Höhe den Vergleich der CO<sub>2</sub>-Abklingkurven der Messung mit eingezeichnetem Konfidenzintervall mit den Simulationsergebnissen aus IESS und CONTAM.

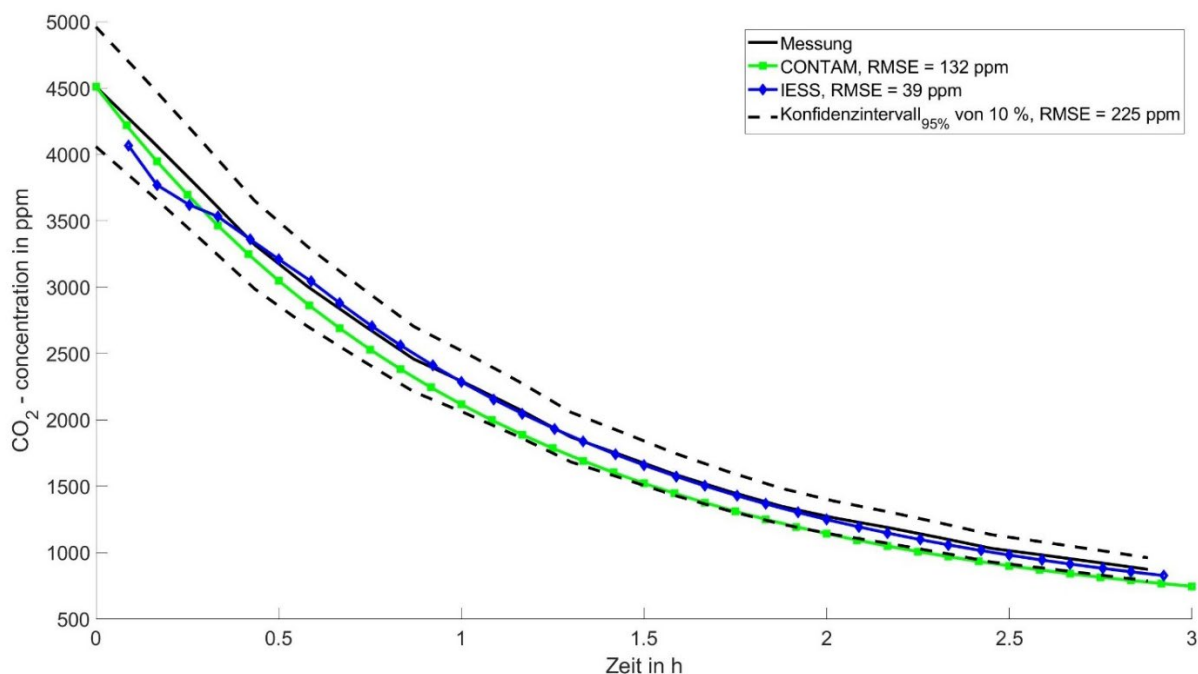


Abbildung 30 Vergleich der Abklingkurven aus der Messung sowie Simulation mit CONTAM und IESS für das 1. Lüftungssystem im Schlafzimmer

Aus dieser Abbildung 30 geht hervor, dass die simulierten Kurven von CONTAM und IESS für das 1. Lüftungssystem im Schlafzimmer innerhalb der Grenzen des Konfidenzintervalls liegen. Die berechneten  $\Delta$ RMSE-Werte sind daher für diesen Fall bei beiden Simulationsmodellen positiv. Daraus kann geschlossen werden, dass die Modelle für diese Teilbetrachtung valide sind.

Analog zu diesem Vorgehen fasst die Abbildung 31 die weiteren Ergebnisse der  $\Delta$ RMSE-Wertberechnung für die Simulationsergebnisse von IESS und CONTAM je Lüftungssystem und Raum für alle Basisvarianten zusammen.

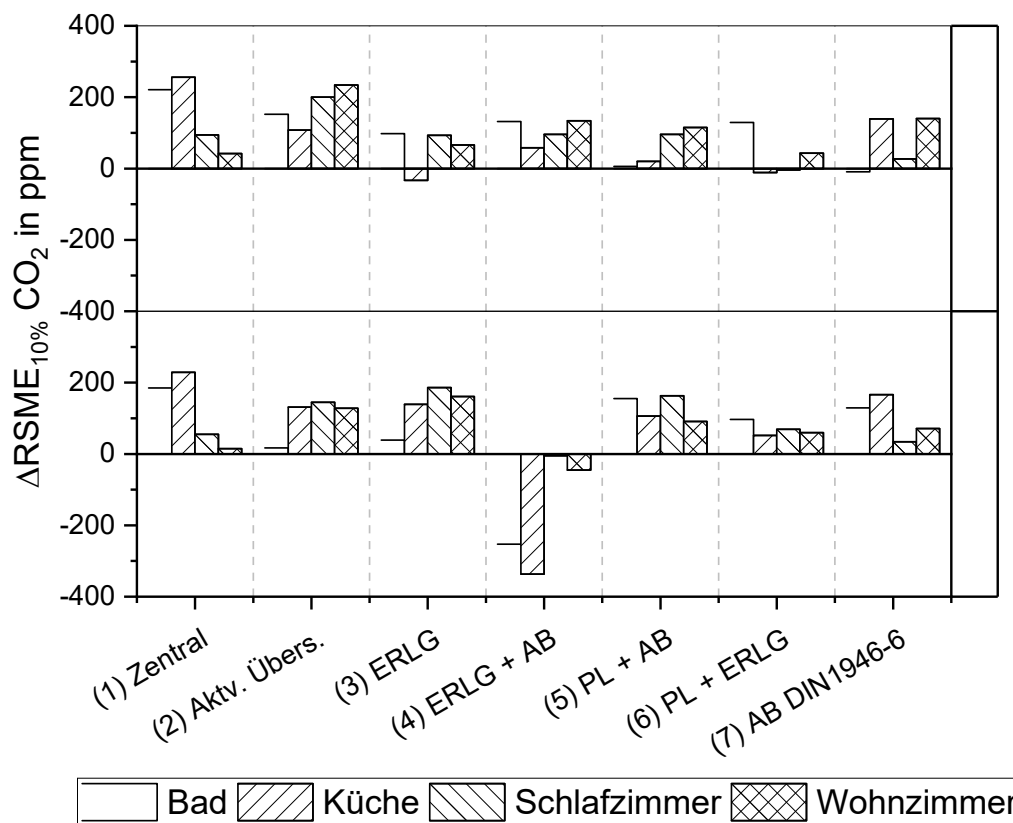


Abbildung 31 Vergleich CONTAM und IEES:  $\Delta RMSE_{10\%}$ -Werte der Basisvarianten für alle Räume

Es wird deutlich, dass in der Mehrheit der Fälle die Simulationen von IEES und CONTAM positive  $\Delta RMSE$ -Werte aufweisen und demnach nach dem oben aufgestellten Kriterium als valide gelten können. Eine Ausnahme bildet hier die Simulation des 4. Lüftungssystem mit IEES. In diesem Fall sind vor allem die Werte für das Bad und die Küche stark negativ, was auf eine schlechte Übereinstimmung mit den Messwerten hinweist. Der graphische Vergleich in Abbildung 29 zeigt, dass die simulierte Kurve der IEES eine zeitliche Verschiebung aufweist. In den ersten 60 Minuten der Simulation verändert sich die  $CO_2$ -Konzentration nur gering.

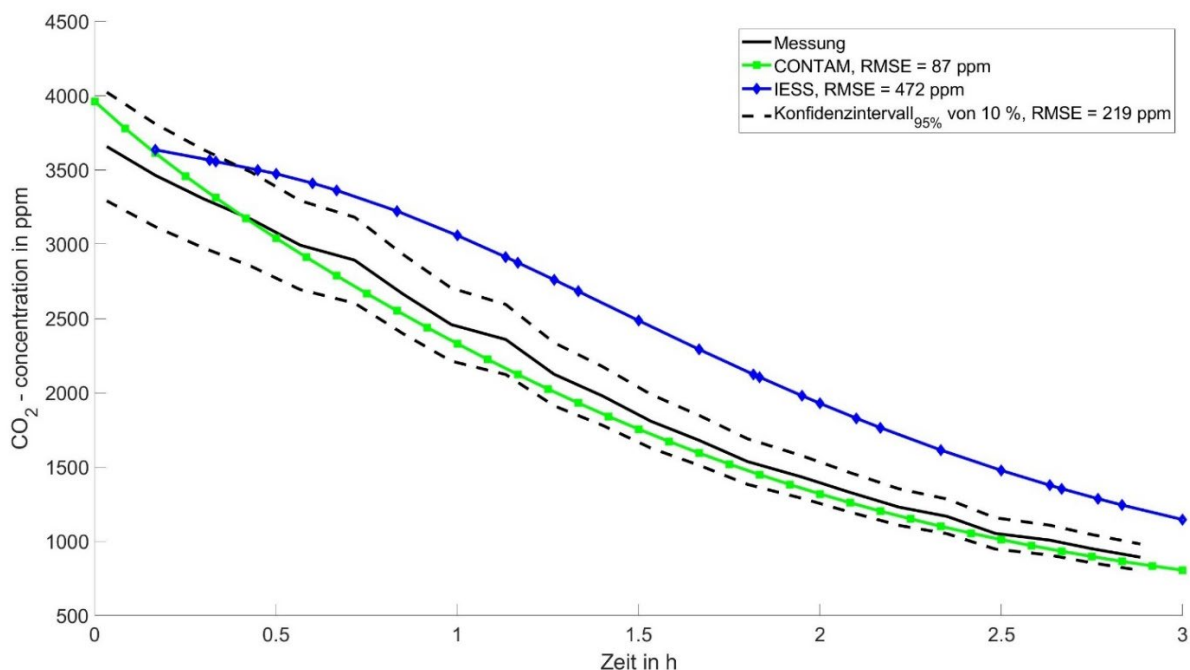


Abbildung 32 Vergleich der Abklingkurven aus der Messung sowie Simulation mit CONTAM und IESS für das 4. Lüftungssystem im Bad

Dies deutet darauf hin, dass sich das Simulationsmodell der IESS für dieses Lüftungssystem träger verhält als das CONTAM Modell und die Messung. Ein Grund hierfür kann sein, dass in dem IESS-Modell eine längere Phase zum Aufbau des endgültig resultierenden Volumenstroms benötigt wird. Dies könnte daran liegen, dass das 4. Lüftungssystem einen Zuluft- und Abluftvolumenstrom von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  in Schlafzimmer und Wohnzimmer, sowie einen zusätzlichen Abluftvolumenstrom von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  in Küche und Bad vorsieht, woraus sich ein komplexes Strömungsverhalten ergibt. Zur Validierung des IESS-Modells für das 4. Lüftungssystem ist demnach eine weitere Simulation mit einer längeren Simulationszeit notwendig, um jeweils ungestörte Werte vergleichen zu können. Diese Schlussfolgerung über das 4. Lüftungssystem soll über die Validierung mit Tagesprofilen im Kapitel Validierung der Simulationsmodelle mit der Konzentrationsabklingmethode evaluiert werden.

## Validierung der Simulationsmodelle mit Tagesprofilen

Die Analysen der Basis-Varianten zeigen bereits eine überwiegend gute Übereinstimmung der Simulationen von CONTAM und IESS mit den Messwerten. Um darüber hinaus die Simulation einer realen Nutzung der Wohnung mit schwankenden Lastprofilen zu validieren, wurden für die Lüftungssysteme 1, 2 und 4 mehrtägige Messungen durchgeführt. Aus diesen Messungen wurden jeweils die Messwerte eines vollständigen Tagesverlaufs zum Vergleich mit den Simulationen herangezogen. Bei diesen Betrachtungen werden repräsentative Wärme-, Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Lastprofile berücksichtigt. Das Ziel hierbei ist, die Validität der Simulationen auch über längere Zeiträume und bei dynamischen Wechseln von CO<sub>2</sub>-, Feuchte- oder Wärmeemissionsraten (Abfahren der Tagesprofile) zu überprüfen, um so die Grundlage für die Jahressimulationen zu legen.

Hinsichtlich der Simulation der relativen Feuchte in der Wohnung wurden bei den Simulationsmodellen unterschiedliche Ansätze gewählt. Während in der IESS keine Absorption oder Kondensation der Feuchte berücksichtigt wird, ist im Modell von CONTAM eine Feuchteabsorption integriert. Daher ist davon auszugehen, dass die Werte der relativen Feuchte der IESS deutlich über den Werten von CONTAM liegen. Dieser Unterschied ist bei dem Vergleich der Ergebnisse zu berücksichtigen.

### Messungen mit Tagesprofilen

Zur Nachstellung der Tagesprofile in der Forschungswohnung wurde zunächst die Lüftung eingeschaltet, die gewünschten Volumenströme eingestellt und die Wohnung von außen geschlossen. Anschließend wurden bei laufender Messung durch die, eigens entwickelten Anwendungen automatisch die CO<sub>2</sub>-Wasser- und Wärmeemissionen entsprechend den Tagesprofilen angepasst. Ein manueller Eingriff von außen, um die Werte anzupassen, war somit überflüssig. Die Startzeit des Tagesprofils war immer 0 Uhr zur Zeit des jeweiligen Versuchsbeginns. Da die relative Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentration zu Beginn der Messung nahe an den Werten der Außenluft liegen und daher von Werten abweichen, die sich bei unmittelbar wiederholenden Tagesverläufen ergeben, wurden mindestens zwei Tage gemessen und immer der letzte Tag zur Auswertung herangezogen. Die Werte waren dabei schon ab dem zweiten Tag weitgehend konstant.

### Ergebnisse und vergleichende Betrachtung

Je Lüftungssystem wurden Simulationen über 48 Stunden durchgeführt und die Werte der letzten 24 Stunden zum Vergleich mit den Messwerten herangezogen. Die Lastprofile der Messungen und Simulationen stimmen hierbei überein. Im Fall der IESS wurden darüber hinaus jedoch einige Input-Parameter logisch ergänzt, da diese nicht über die Messwerte dokumentiert sind. Dabei handelt es sich um den äußeren Luftdruck sowie die relative Feuchte und teilweise die Lufttemperatur der Außenluft. Da diese Ergänzungen auf Annahmen beruhen, können sie zu leicht abweichenden Ergebnissen zwischen Simulation und Messung führen. Dies betrifft vor allem die jeweiligen Zulufräume. Im Folgenden werden je Lüftungssystem die  $\Delta RMSE_{10\%}$ -Werte der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der relativen Feuchte präsentiert und diskutiert.

CO<sub>2</sub>-Konzentration

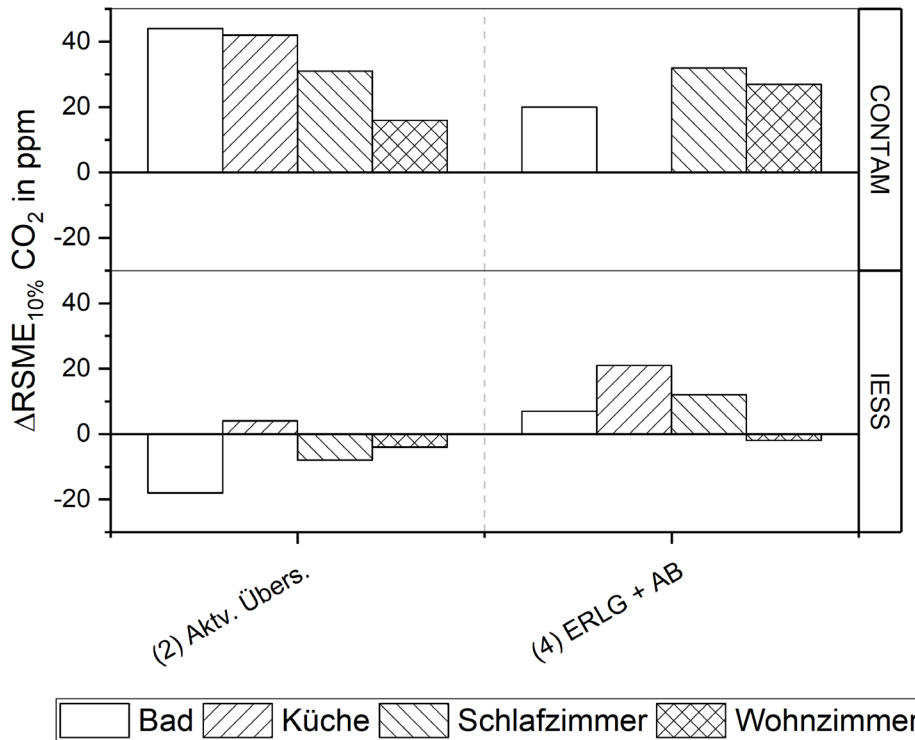


Abbildung 33 Bewertung der Übereinstimmung der Messungen und Simulationen mit Tagesprofil für CONTAM und IESS: ΔRMSE<sub>10%</sub>-Werte für die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, positive Werte bedeuten eine gute Übereinstimmung.

Die ΔRMSE<sub>10%</sub>-Werte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der CONTAM Simulationen weisen durchwegs positive Werte auf. Dies bedeutet eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse von CONTAM mit den Messwerten. Die CONTAM-Modelle für die Abbildung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen werden deshalb als validiert angesehen und werden so für die Jahressimulationen weiterverwendet.

Die ΔRMSE-Werte der IESS-Simulationen sind dagegen weniger eindeutig und werden daher im Folgenden näher betrachtet.

2. Lüftungssystem

Die Werte der IESS weisen besonders in den Phasen der ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration je Raum eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten auf. Eine Ausnahme bilden die Werte für das Schlafzimmer. Hier übersteigt die CO<sub>2</sub>-Kurve der IESS die Messwerte um etwa 170 ppm. In den Abklingphasen verhält sich das Simulationsmodell etwas Träger als die Messung.



## 2. Lüftungssystem: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Wohnung

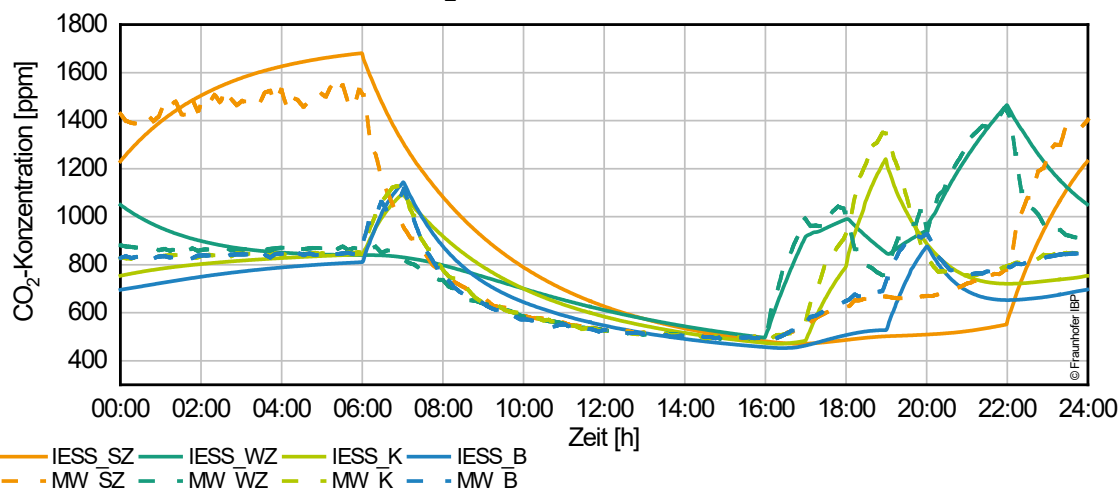


Abbildung 34 Messungen und IESS-Simulationen mit Tagesprofil für das 2. Lüftungssystem: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Kurven je Raum, Diskussion siehe Text

## 4. Lüftungssystem

Bereits aus dem Vergleich der  $\Delta RMSE_{10\%}$ -Werte für das 4. Lüftungssystem geht eine weitgehend gute Übereinstimmung mit den Messwerten hervor. Lediglich für das Wohnzimmer liegen die Werte der IESS etwas außerhalb des Konfidenzintervalls. Wie aus der Abbildung 35 hervorgeht, überschreiten die Simulationen der IESS die Messwerte im Wohnzimmer in den Abendstunden um maximal 150 ppm. Auch hier verhält sich das Simulationsmodell etwas träger als die Messung in den Abklingphasen.

## 4. Lüftungssystem: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Wohnung

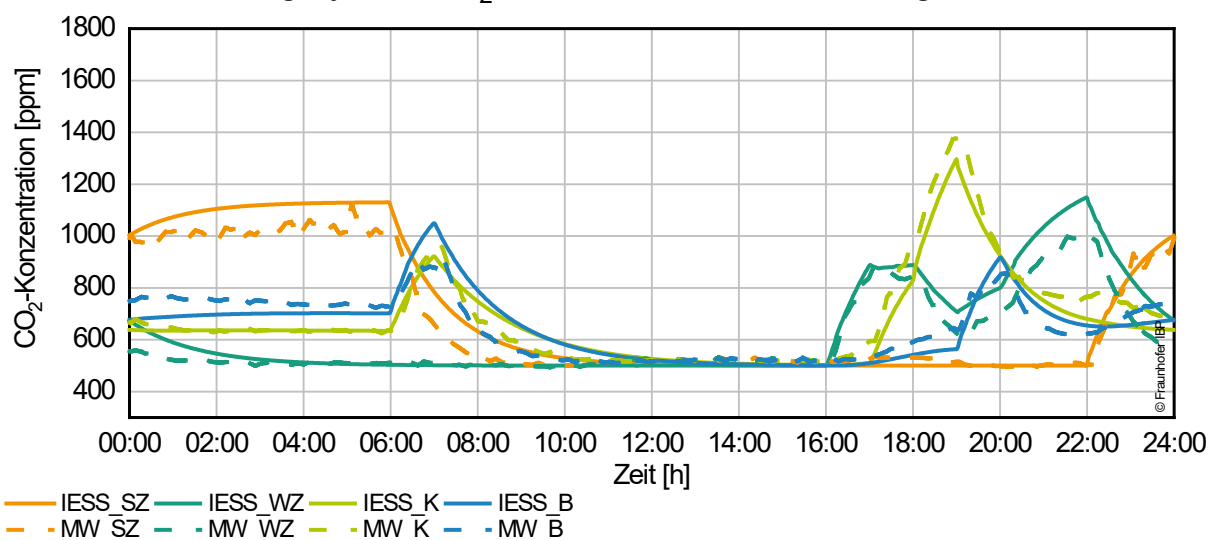


Abbildung 35 Messungen und IESS-Simulationen mit Tagesprofil für das 4. Lüftungssystem: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Kurven je Raum, Diskussion siehe Text

## Zusammenfassung

Das Verhältnis der IESS Werte zueinander entspricht in etwa den Verhältnissen der Messwerte. Die beschriebenen Unterschiede könnten durch Abweichungen bei den Infiltrationsvolumenströmen verursacht werden. Diese wurden zwar analog zu den Ergebnissen der Blowerdoor-Messungen

abgebildet, könnten jedoch noch weitere Anpassungen der Strömungswiderstände benötigen. Hierfür wären weitergehende detaillierte Untersuchungen nötig. Eine abschließende Klärung der Ursache der Abweichungen und deren Behebung war innerhalb des Projektes nicht mehr möglich.

Relative Feuchte

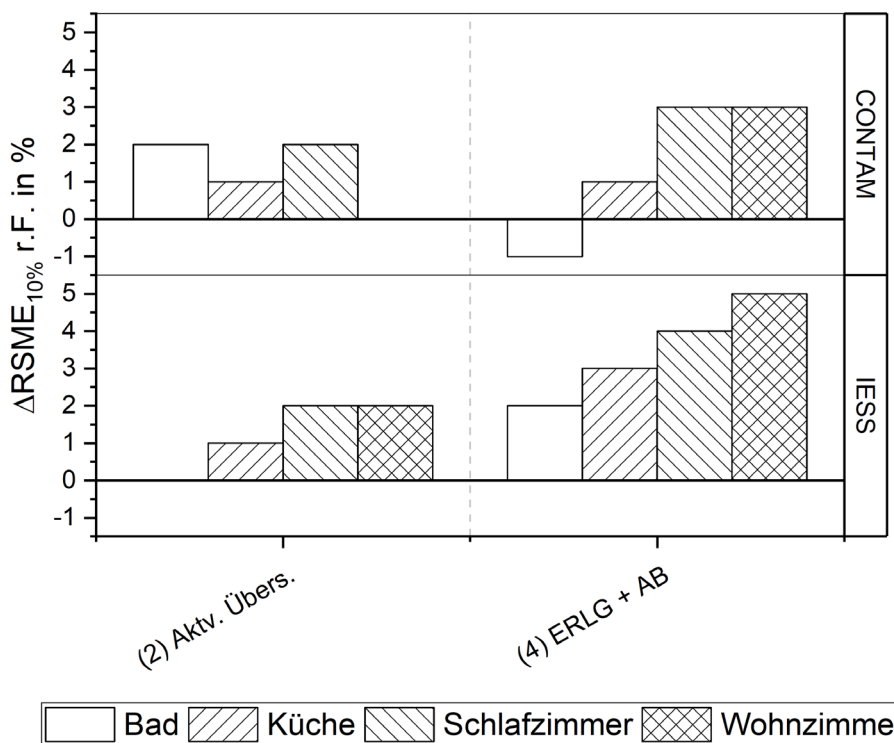


Abbildung 36 Tagesprofil - Vergleich CONTAM und IEES: ΔRSMSE10%-Werte der relativen Feuchte der Tagesprofile

Hinsichtlich der Abbildung der relativen Feuchte weisen die Simulationsergebnisse von CONTAM und IEES durchwegs gute Übereinstimmungen mit den Messwerten auf. Einzig der ΔRSMSE10%-Werte von CONTAM liegt für das 4. Lüftungssystem im Bad leicht im negativen. Allerdings liegt der Wert bei weniger als -1. Daher können beide Simulationsmodelle für diese Betrachtung als validiert angesehen werden.

## Schlussfolgerung zur Validierung des IESS-Modells

Die beschriebenen Abweichungen können zum einen auf unterschiedliche Randbedingungen zwischen Messungen und Simulationen zurückgeführt werden, da die benötigten Inputparameter für Außenluftdruck und Luftfeuchte nicht direkt dokumentiert wurden und daher für die Simulation abgeschätzt werden mussten. Zum anderen werden in der IESS die Sollwerte der Volumenströme verwendet. Jedoch haben bereits die Messungen für die Basis-Varianten Abweichungen bei den realen Volumenströmen festgestellt, welche ihrerseits die Messwerte beeinflussen.

Das IESS-Modell kann im Gegensatz zum CONTAM-Modell auch die veränderlichen Wärmelasten in den Räumen, sowie die variierende Lufttemperatur der einströmenden Außenluft abbilden. Dies ermöglicht eine realistische Abbildung der Schwankungen der Innenraumtemperatur, ist aber auch die Ursache für kleinere Abweichungen bei den Ergebnissen von IESS und CONTAM.

Durch diesen Validierungsschritt konnte außerdem festgestellt werden, dass das zu Beginn dieses Projektes verwendete Volumenmodell in der IESS nur auf die Berechnung der Konzentration von einer Stoffkonzentration ausgelegt ist. Um sowohl die Konzentration der relativen Feuchte als auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration je Zone berechnen zu können musste dieses Modell erweitert werden. Hierbei müssen die unterschiedlichen Dichten der Stoffe in der Massenbilanzierung berücksichtigt werden.

Für die hohen Abweichungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer konnte auch nach eingehender Untersuchung des Simulationsmodells bisher kein entscheidender Grund gefunden werden. Zur Klärung wären daher weitere Messungen nötig. Darüber hinaus weisen die überwiegend gute Übereinstimmung in den anderen Räumen auf eine valide Abbildung der Lüftungsszenarien hin. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Feuchte sollten in dem Modell noch die entsprechenden Modelle für hygrothermische Prozesse ergänzt bzw. entwickelt werden. Davon abgesehen kann anhand der vorliegenden Kurven geschlossen werden, dass die IESS die Veränderung der Feuchte im Raum in ihrer Tendenz richtig abbildet. Für weitere Beurteilungen werden ein ergänztes Modell und weitere Messungen benötigt. Die in diesem Projekt entwickelten und validierten IESS-Modelle eignen sich demnach gut für Simulationen von Lüftungsszenarien bei verbundenen Räumen. Bei der Modellierung ist der Infiltrationsvolumenstrom möglichst genau zu berücksichtigen, da dieser einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat. Darüber hinaus ist das IESS-Modell in der Lage die Lasten aus Wärme-, CO<sub>2</sub>- und Feuchtequellen adäquat abbilden zu können.

Der Mehrwert des zonalen Simulationsmodells für die detaillierte Untersuchung des Strömungsgeschehens in der Wohnung wurde in diesem Projekt dagegen nicht genutzt, birgt aber weitere Vorteile des IESS-Modells. Dies trifft besonders auf die Betrachtung möblierter Wohnungen zu.

## Jahressimulation

In den bisherigen Kapiteln wurden die Simulationsmodelle schrittweise aufgebaut, von einfachen Modellen in den Basismessungen mit konstanten Randbedingungen, zu den Tagesprofilen bei denen CO<sub>2</sub>- und Feuchteemissionen veränderlich über einen Tag simuliert wurden. In den bisherigen Untersuchungen wurden jedoch keine transienten äußeren Randbedingungen betrachtet, jedoch kann das Wetter je nach Lüftungssystem einen Einfluss auf die Lüftungseigenschaften haben. Eine Temperatur- und Druckabhängigkeit besteht vor allem bei natürlich angetriebenen Lüftungssystemen, somit bei Fenster- und Querlüftung. Die tatsächliche Außentemperatur wird für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste verwendet. Auch besteht eine Abhängigkeit zwischen Außenluftfeuchte und dem Feuchtegehalt der Innenraumluft. Da Lüftungswärmeverluste und zu hohe Luftfeuchtigkeit nur während der Heizperiode relevant sind, wurde in der Jahressimulation nur dieser Zeitbereich des Jahres betrachtet. In CONTAM können sowohl der Einfluss des Winddrucks auf den Luftaustausch durch Leckagen und Fensteröffnungen als auch der Einfluss der Temperaturdifferenzen berücksichtigt werden. IESS kann einzelne Tage betrachten, hat jedoch durch seinen höheren Detaillierungsgrad einen deutlich höheren Rechenaufwand, wodurch es für die Simulation größerer Zeitbereiche nicht geeignet ist. Daher wurden im Folgenden die Jahressimulationen mit CONTAM durchgeführt.

Alle Simulationsmodelle sind unter [www.fh-rosenheim.de/aircosim](http://www.fh-rosenheim.de/aircosim) verfügbar.

### Verwendeter Klimadatensatz

Für die Jahressimulationen wurde ein Testreferenzjahre (TRY) des Standorts Rosenheim verwendet. Das TRY wurde mit den Daten aus den Jahren 2007 – 2016 mithilfe des Tools PVGIS des europäischen Joint Research Centre [33] erstellt. Die Daten liegen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vor und enthalten folgende Informationen:

- Luftdruck
- Lufttemperatur
- Absolute Luftfeuchte
- Windrichtung und -geschwindigkeit (10 m über Grund)

Nachfolgend wurden die Wochenmittelwerte der einzelnen Parameter des verwendeten Testreferenzjahres visualisiert. Abbildung 37 zeigt die absoluten mittleren Luftfeuchten. In Abbildung 38 sind die Wochenmittelwert der Temperaturen abgebildet. Die mittleren Windrichtungen und -geschwindigkeiten sind in Abbildung 39 dargestellt.

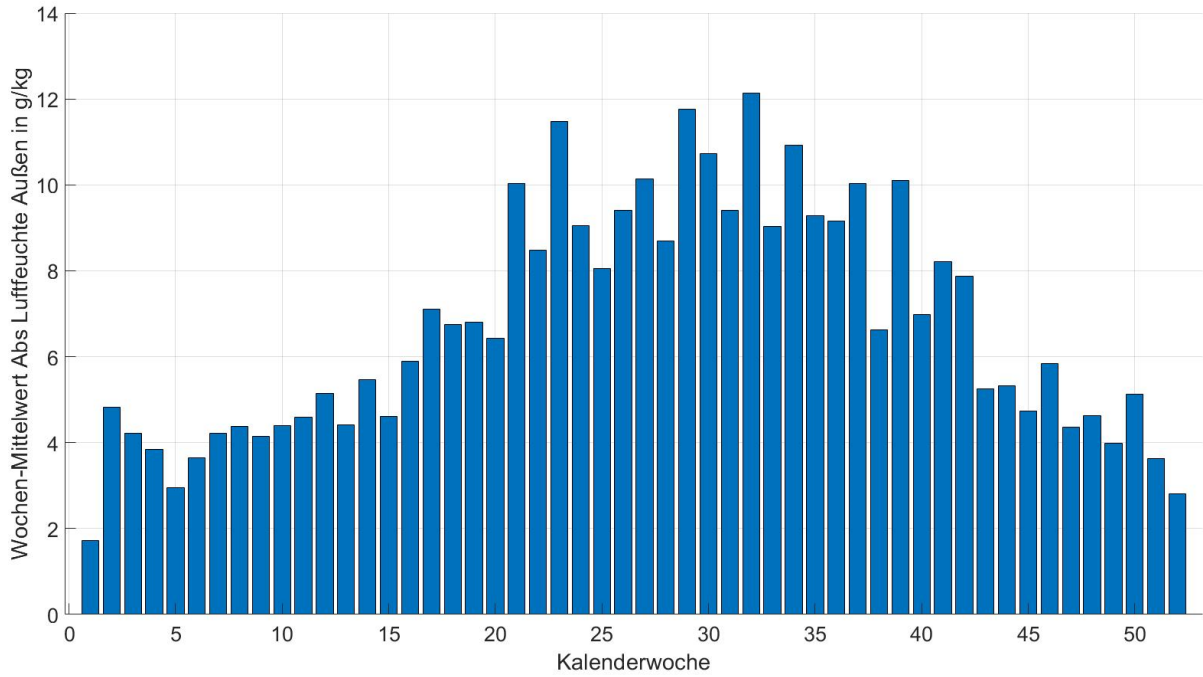


Abbildung 37 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, mittlere relative und absolute Feuchte je Kalenderwoche

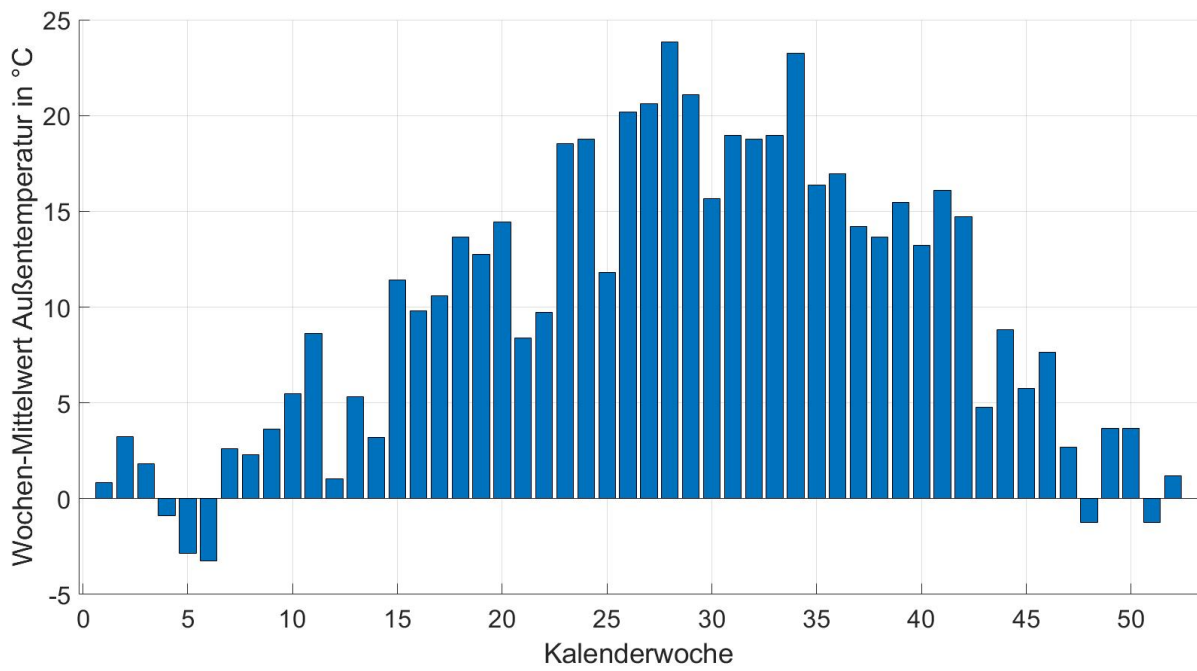


Abbildung 38 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, mittlere Außentemperatur je Kalenderwoche

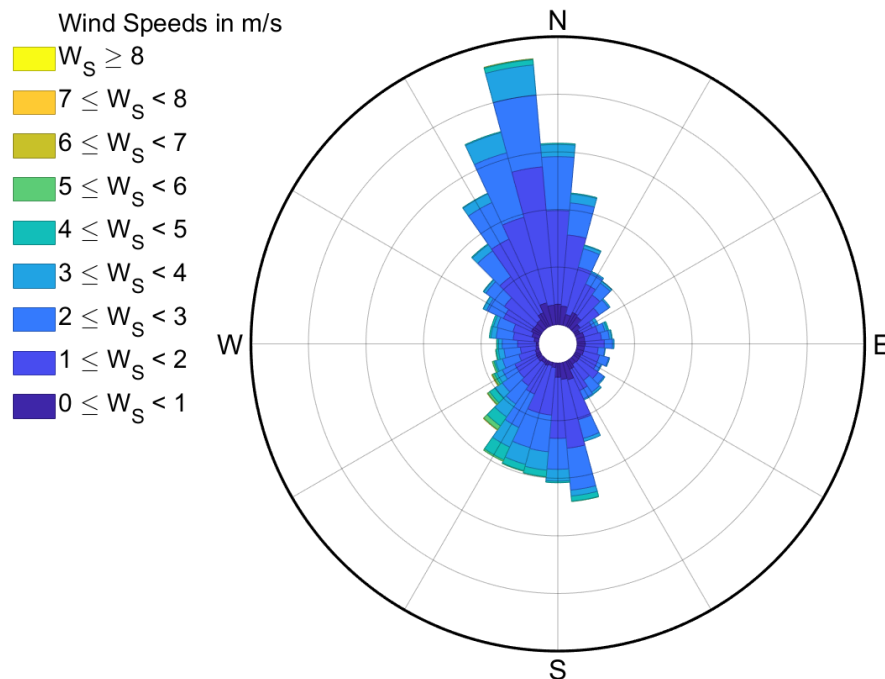


Abbildung 39 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, Häufigkeitsverteilung Windgeschwindigkeit und -richtung

### Simulationsergebnisse mit CONTAM

In CONTAM wurden die Simulationen aller drei Grundrisse (Studentenapartment, Zwei-Zimmer-Wohnung, Drei-Zimmer-Wohnung) für ein ganzes Jahr durchgeführt. Die Auswertung erfolgte jeweils nur für die Heizperiode von 01. Oktober bis 30. April. Im Folgenden werden die Ergebnisse der CONTAM Jahressimulationen für jeden Grundriss vorgestellt. Die Ergebnisse werden dabei auf das System 1 (zentrales Lüftungssystem) mit zeitlich konstanten Volumenströmen bezogen, da die absoluten Werte schwer einordenbar sind. Dies setzt die Annahme voraus, dass dieses System als bewährtes Lüftungssystem sowohl bezüglich Luftqualität als auch Luftfeuchte als Stand der Technik angesehen werden kann. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)-Stunden sowie die Feuchteüberstunden wurden für alle Räume einzeln ermittelt und in den zusammenfassenden Diagrammen über alle Räume aufsummiert. Da die jeweiligen Überstunden vor allem bei Anwesenheit von Personen im Raum auftreten, erscheint diese Vereinfachung gerechtfertigt. Exemplarisch werden auch Ergebnisse für einzelne Räume präsentiert.

### Studentenapartment – Mit Berücksichtigung der DIN 18017-3

Beim Studentenapartment wird zwischen den Varianten mit und ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] unterschieden. Erläuterungen zu den Unterschieden der zwei Varianten sind in Kapitel Lüftungssysteme zu finden. Zunächst wird die Variante mit Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] diskutiert. Die Kennwerte aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 sind in Abbildung 40 zusammengefasst. Die absoluten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind separat in Abbildung 41 dargestellt.

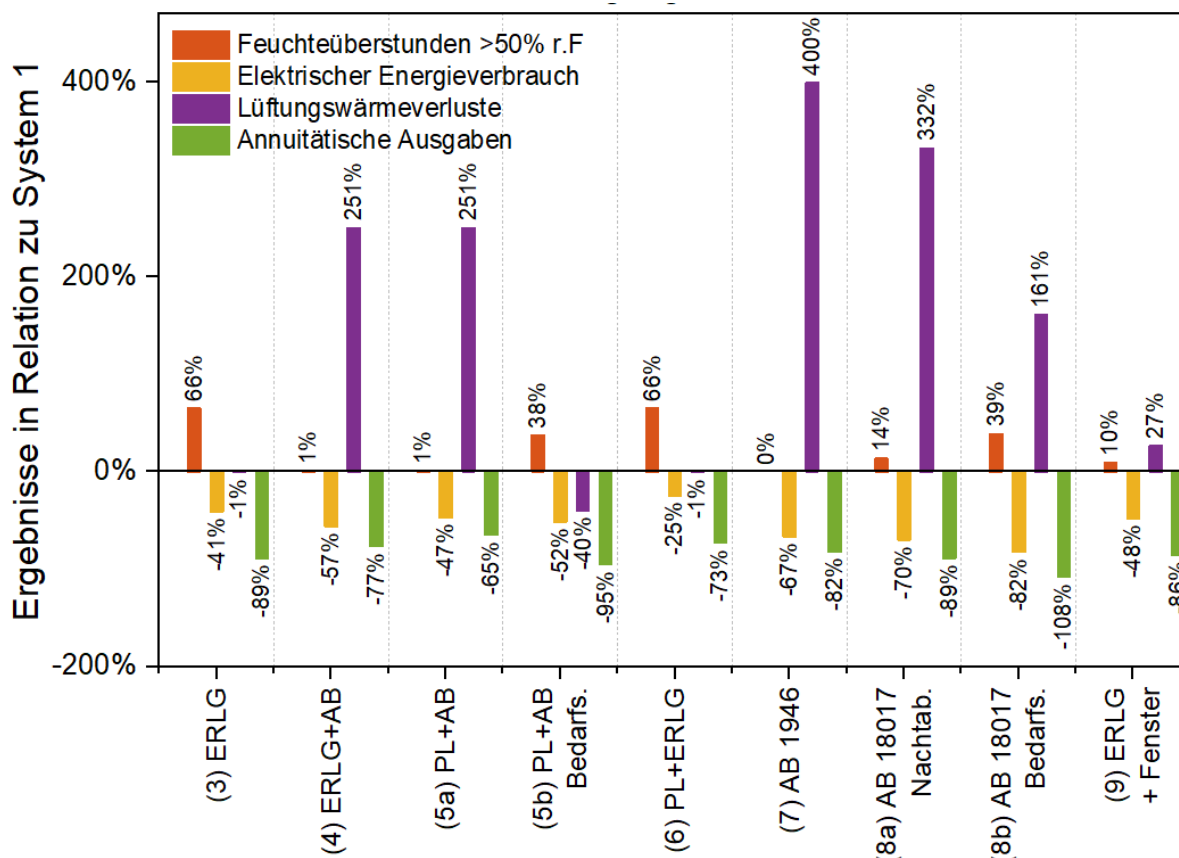


Abbildung 40 Studentenapartment, mit Berücksichtigung der DIN18017-3, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät

### System 1 – zentrales Lüftungssystem

Tabelle 30 zeigt die ermittelten Kenngrößen für das zentrale Lüftungssystem. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind mit 290 ppmh sehr gering. In Abbildung 42 [20] ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration für das Studentenapartment dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohnraum beständig gering ist und die Marke von 1000 ppm jeweils nur im Bad überschritten wird. Im Bad treten dann höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf, wenn sich die Person vorher schon in der Wohnung aufhält und dann das Bad betritt. Dann ist die Überström-Luft, die vom Wohnraum ins Bad strömt, schon vorbelastet, sodass sich dann im Bad höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ergeben können. Jedoch sind die Überschreitungen sehr gering.

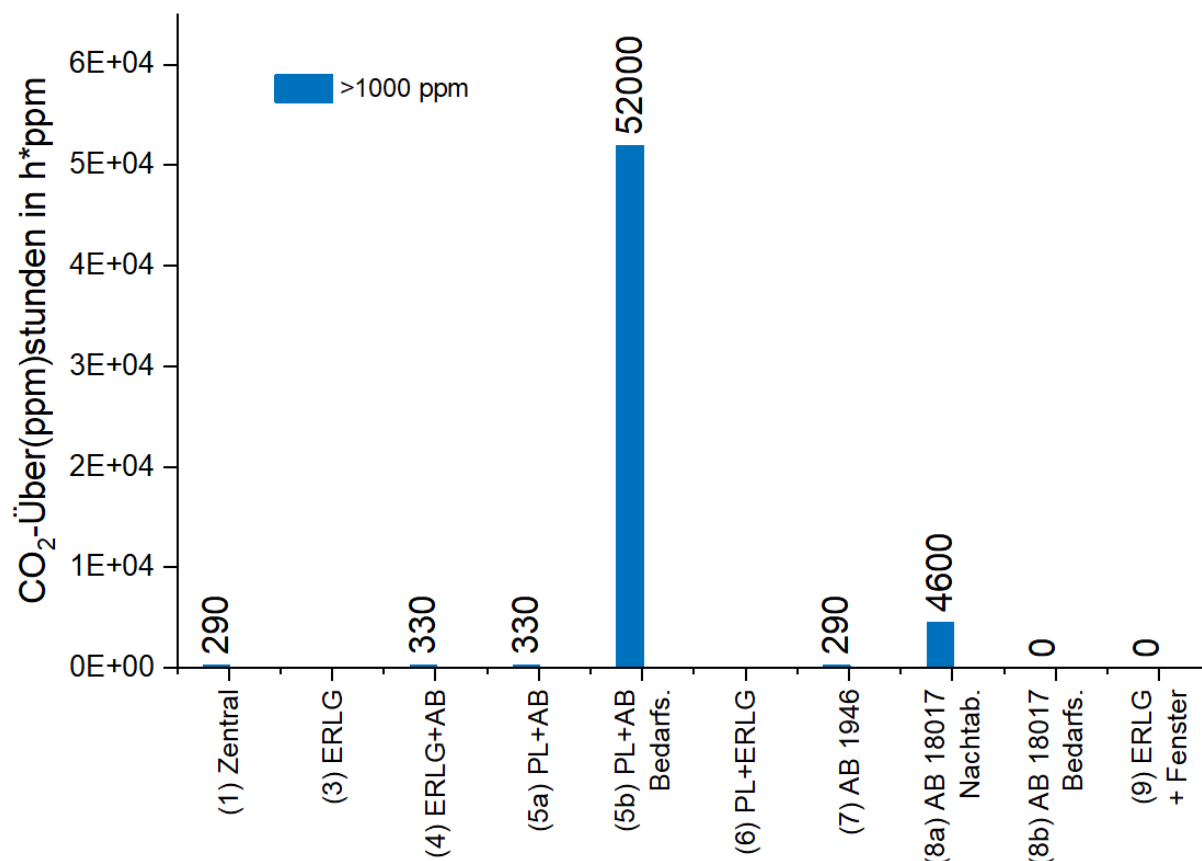


Abbildung 41 Studentenapartment, mit Berücksichtigung der DIN 18017-3, CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden aller Lüftungssysteme

### System 3 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte

Das Lüftungssystem mit den rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten weist um 66 % höhere Feuchteüberstunden auf als das zentrale Lüftungssystem. Der Grenzwert von 1000 ppm wird hingegen nicht überschritten. Beim zentralen Lüftungssystem wird die gesamte Zuluft von 68 m<sup>3</sup>/h im Wohnzimmer eingebracht, wodurch hier die Luft in den kalten Monaten stärker austrocknet als bei der Belüftung mit Einzelraumlüftungssystemen. Bei der Verwendung von Einzelraumlüftungssystemen wird die Außenluft durch die separate Belüftung der Räume auf Wohn-/Küchenbereich und das Bad aufgeteilt. Im Wohnzimmer wird dann nur die Hälfte an Außenluftvolumenstrom zugeführt, wodurch die Luft weniger stark austrocknet. Jedoch wird hierdurch der Wert von 50% r.F. Luftfeuchte auch schneller überschritten. Im Simulationsmodell findet aufgrund der ausgeglichenen Zu- und Abluftvolumenströme kein Luftaustausch zwischen den Räumen statt. In der Realität würde es selbst bei ständig geschlossenen Türen zumindest durch das Öffnen der Tür einen Luftaustausch geben, wodurch der Unterschied bei den Feuchteüberstunden zwischen System 1 und System 3 kleiner ausfallen würde. Die Lüftungswärmeverluste der beiden Systeme sind bei diesem Grundriss gleich. Jedoch sind die annuitätischen Ausgaben um 88% geringer als beim zentralen Lüftungssystem.



Tabelle 30 Ermittelte Kennwerte für das Studentenapartment mit Berücksichtigung der DIN18017-3 bei Verwendung eines zentralen Lüftungssystem (System 1)

CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	290 ppmh
Feuchteüberstunden	1809 h
Elektrischer Energiebedarf	97 kWh
Lüftungswärmeverluste	396 kWh
Annuitätische Kosten	411 €/a

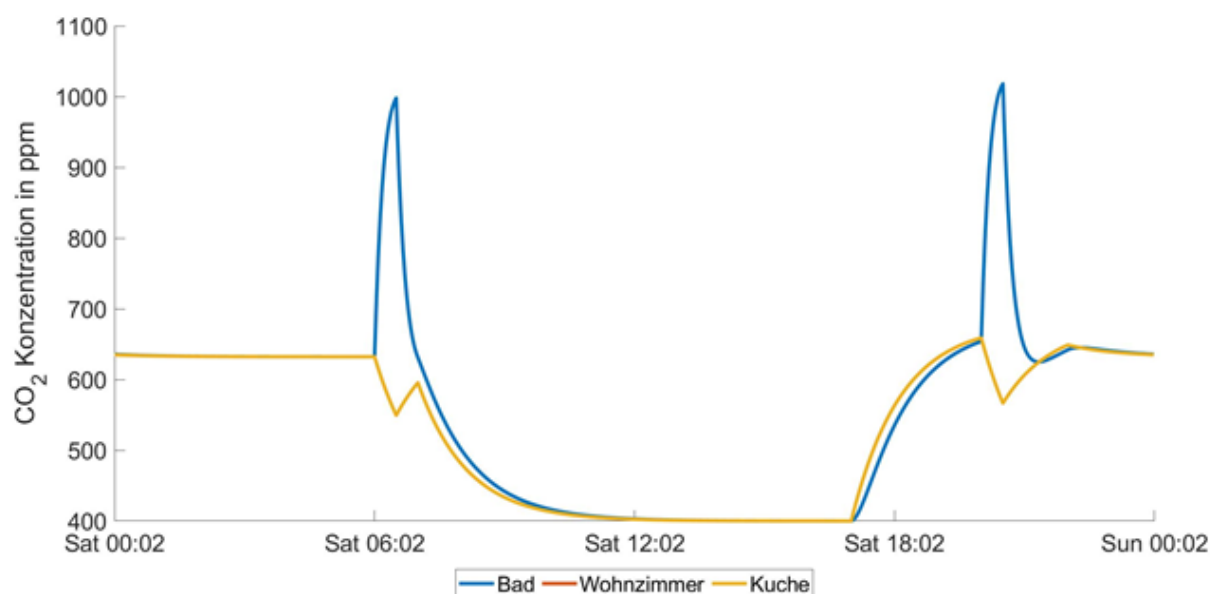


Abbildung 42 CO<sub>2</sub>-Konzentration im Studentenapartment für das zentrale Lüftungssystem bei Auslegung nach DIN 1946-6 und DIN 18017-3

System 4 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Mit dem Lüftungssystem 4 wurden dieselben Feuchteüberstunden sowie ähnliche CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden (330ppmh) wie beim zentralen Lüftungssystem erzielt. Der Grenzwert von 1000 ppm wird nur im Bad überschritten. Die Lüftungswärmeverluste sind jedoch um 251 % höher. Dies ist auf fehlende Wärmerückgewinnung im Bad zurückzuführen. Die annuitätischen Kosten sind um 77 % geringer als beim Referenzsystem. Die Feuchteüberstunden sind bei diesem System geringer als bei System 3. Jedoch sind Lüftungswärmeverluste und auch die annuitätischen Kosten höher als bei System 3.

System 5a – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN1946-6

System 5a ist lüftungstechnische vergleichbar mit System 4. Jedoch sind bei System 5a aufgrund der höheren Investitionskosten und des höheren elektrischen Energiebedarfs die annuitätischen Kosten höher, jedoch um 65 % geringer als bei einer zentralen Lüftungsanlage.

#### System 5b – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN 18017-3 (Bedarfsgeführt)

Das System 5b hat 40 % geringe Lüftungswärmeverluste und mit 95 % geringeren annuitätischen Kosten die geringsten Kosten der Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung. Die Feuchteüberstunden sind jedoch um 46 % höher als beim Referenzsystem. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind mit 52.000 ppmh die höchsten für alle Lüftungssysteme des Grundrisses. Die Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte finden jedoch nur im Bad statt, da hier nach der Luftfeuchte und nicht anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration geregelt wird (s. Abbildung 43).

#### System 6 – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten in den Ablufträumen

System 6 ist vergleichbar mit System 3. Jedoch sind die annuitätischen Kosten aufgrund der höheren Investitionskosten und elektrischen Leistungsaufnahme der regenerativen Einzelraumlüftungsgeräte höher als bei System 3, bei dem nur rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte verwendet wurden.

#### System 7 – Abluftventilatoren nach DIN 1946-6

System 7 ist ein konstant betriebenes Abluftsystem. Die Luftqualität gemessen an den Feuchteüberstunden und den CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden ist gleich wie beim zentralen Lüftungssystem. Die Lüftungswärmeverluste sind aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung um 400 % höher. Die annuitätischen Kosten sind um 89% geringer als beim zentralen Lüftungssystem.

#### System 8a – Abluftventilatoren nach DIN 18017-3, Absenkung

System 8a ist ebenfalls ein reines Abluftsystem. Der Abluftvolumenstrom wird nach einem Zeitplan in Zeiten mit geringer Feuchteemission in der Wohnung um 50 % reduziert. Die Lüftungswärmeverluste sind deshalb mit 332 % etwas niedriger als bei System 7, jedoch immer noch höher als die des zentralen Lüftungssystems. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind mit 4600ppmh höher als bei den anderen Systemen.

#### System 8b – Abluftventilatoren nach DIN 18017-3, Anwesenheitsgeführt

Bei System 8b wird der Abluftvolumenstrom nur bei Anwesenheit erhöht. Die Feuchteüberstunden sind um 39 % höher als beim zentralen Lüftungssystem. Die Lüftungswärmeverluste sind mit 161 % deutlich geringer als die der Systeme 7 und 8a. Dieses System hat mit 108 % geringer annuitätische Ausgaben als das zentrale System, die geringsten Kosten der Lüftungssysteme dieses Grundrisses.

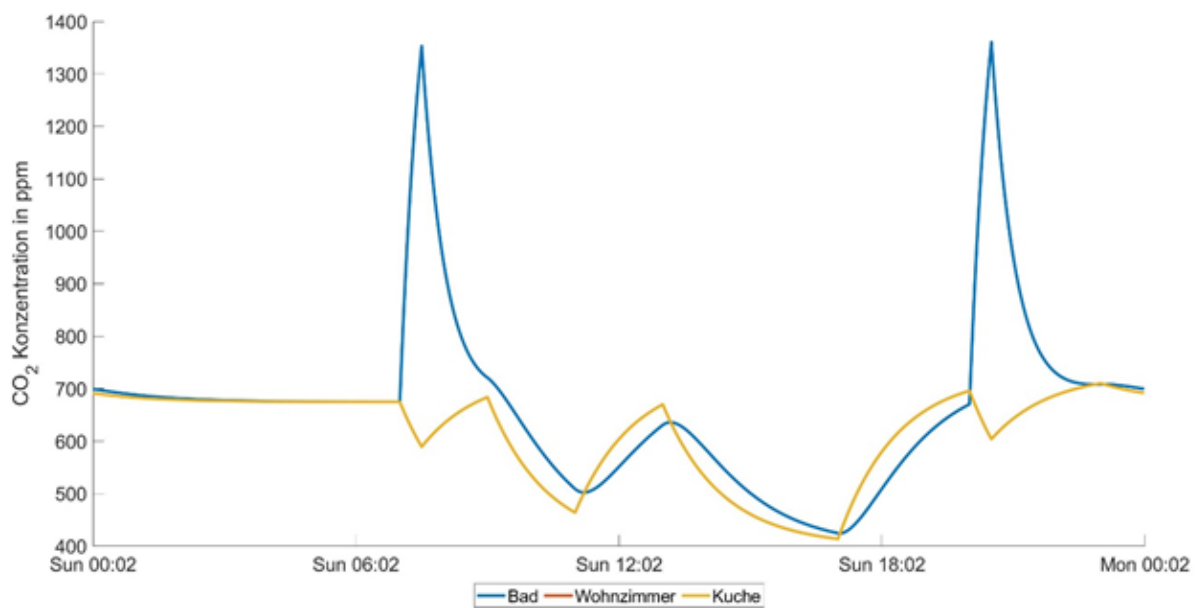


Abbildung 43 CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im Studentenapartment für System 5b - regenerative Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluft nach DIN 18017-3 bedarfsgeführt

### System 9 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte, Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch Fensterlüftung

Bei System 9 wird die mechanische Lüftung durch natürliche Lüftung ergänzt. Ein Fenster befindet sich nur im Wohnraum. Dies wird geöffnet, wenn entweder eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1200 ppm oder eine relative Feuchte von 50 % überschritten wird. Das System 9 hat 10 % mehr Feuchteüberstunden, bei 27 % höheren Lüftungswärmeverlusten als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind 83 % geringer als die des zentralen Lüftungssystems.

#### Studentenapartment - Ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3

Bei der Auslegung der Volumenströme für das Studentenapartment nach DIN 18017-3:2020 [20] sind, im Vergleich zur Auslegung nach DIN 1946-6:2019 [1], die Abluftvolumenströme höher. In einer zweiten Variante wurde eine reine Auslegung nach DIN 1946-6:2019 [1] untersucht (s. 0). In Abbildung 44 sind die ermittelten Kennwerte aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 zusammengefasst. Abbildung 45 zeigt die absoluten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden der Lüftungssysteme.

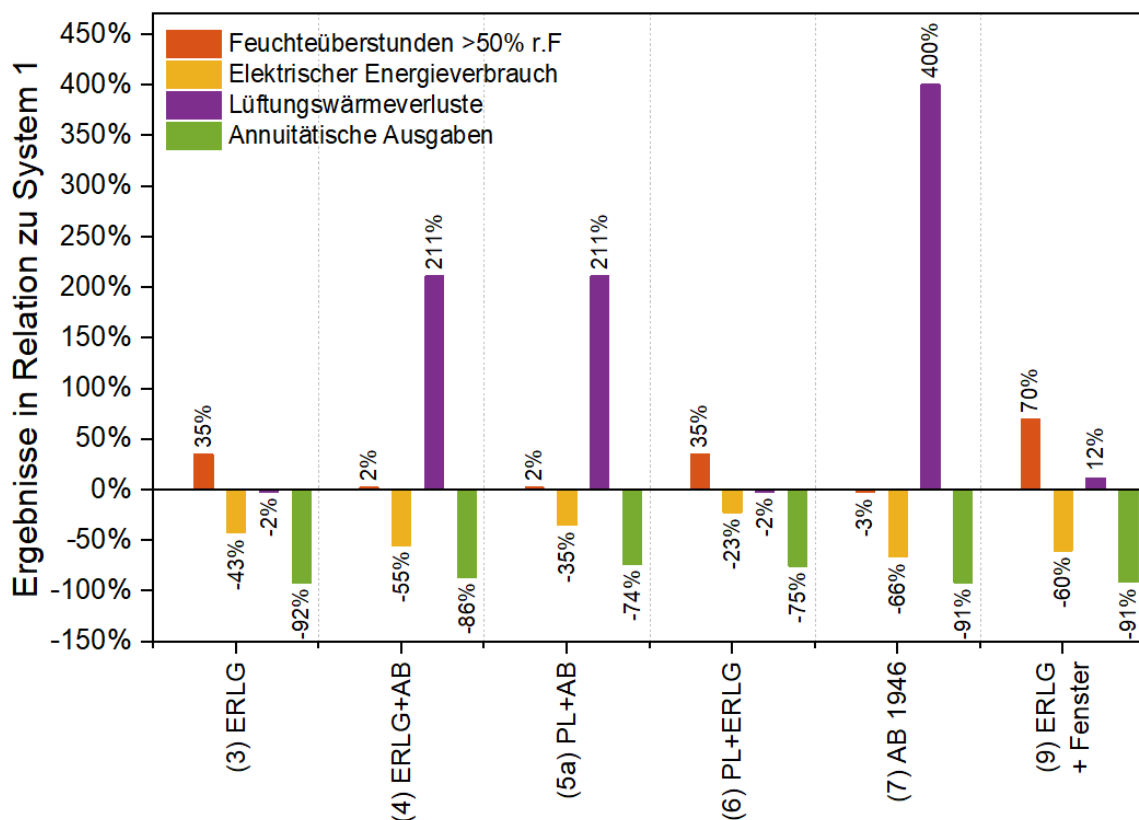


Abbildung 44 Studentenapartment, ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät

### System 1 – zentrales Lüftungsgerät

In Tabelle 31 sind die für das Studentenapartment bei Verwendung eines zentralen Lüftungssystems ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] ermittelten Kennwerte aufgeführt. Durch die geringeren Volumenströme sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchteüberstunden höher als bei Auslegung nach DIN 18017-3:2020 [20]. Die Feuchteüberstunden betragen 3622 h und sind damit 100 % höher als bei Auslegung nach DIN 18017-3:2020 [20]. Der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf in der Wohnung ist in Abbildung 46 dargestellt. Wie auch bei der Variante mit Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] wird der Wert von 1000 ppm ausschließlich im Bad überschritten.

Tabelle 31 Ermittelte Kennwerte Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3

CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	16.000 ppmh
Feuchteüberstunden	2.325 h
Elektrischer Energieverbrauch	80 kWh
Lüftungswärmeverluste	321 kWh
Annuitätische Ausgaben	395 €/a

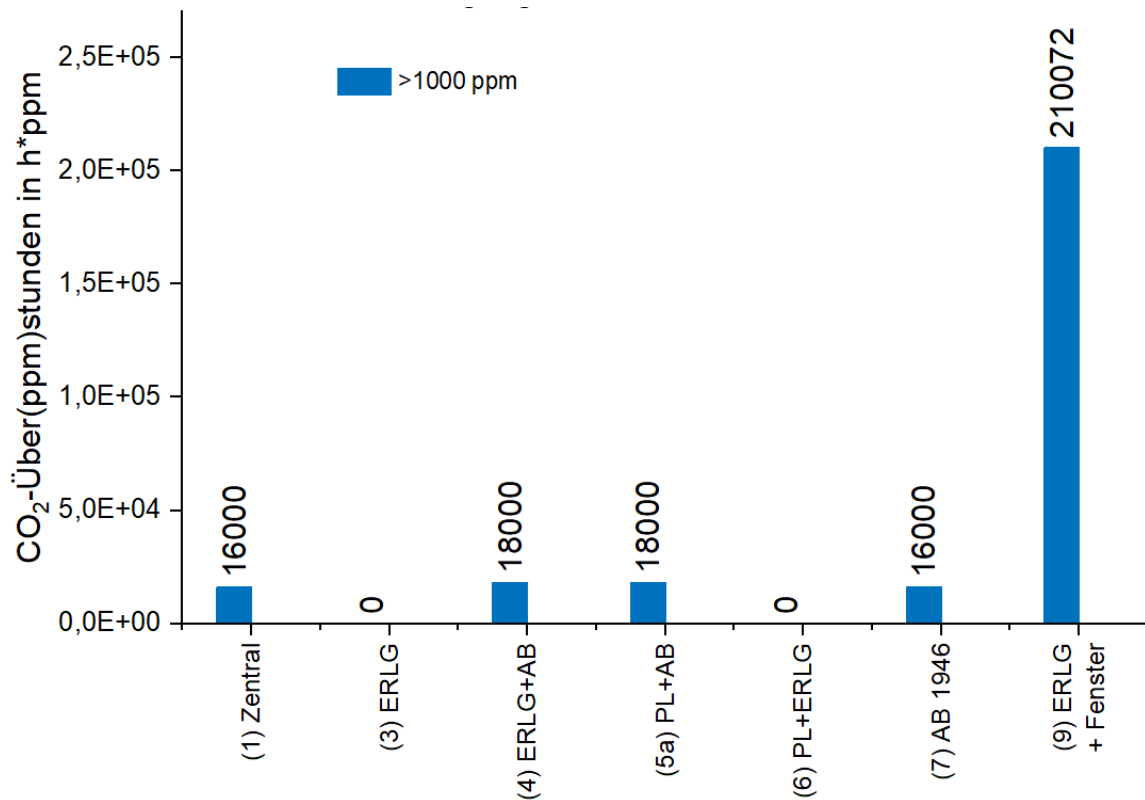


Abbildung 45 Studentenapartment, ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden aller Lüftungssysteme

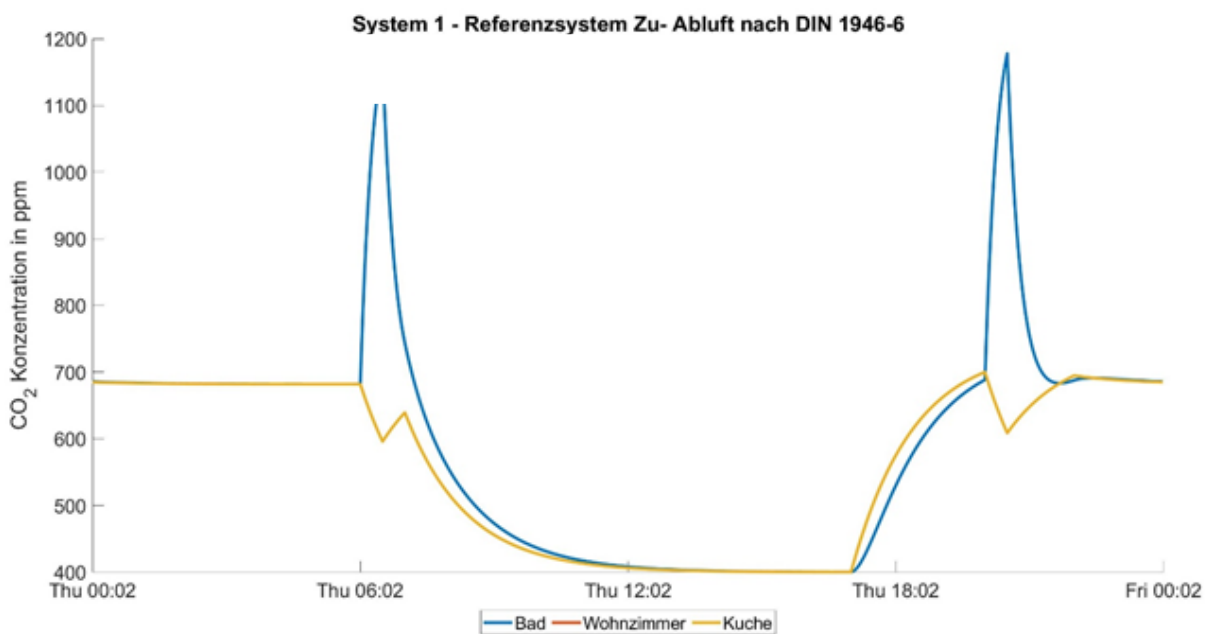


Abbildung 46 Studentenapartment, Ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, Zentrales Lüftungssystem: CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf, Hinweis: Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Küche und Wohnzimmer sind identische

### System 3 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte

Bei der Verwendung von rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten sind die Feuchteüberstunden im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem um 35% höher. Aufgrund des höheren Außenvolumenstroms im Wohnbereich beim zentralen Lüftungssystem ist dort die Luft trockener als bei System 3. Bei der Verwendung von Einzelraumlüftungsgeräten wird jeder Raum separat mit Außenluft versorgt. Der Grenzwert von 1000 ppm wird bei diesem System nicht überschritten. Die Lüftungswärmeverluste sind gleich wie beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind aufgrund geringerer Investitionskosten und elektrischer Energieaufnahme um 80% geringer als beim zentralen Lüftungssystem.

### System 4 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Feuchteüberstunden und CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind bei System 4 gleich wie bei dem zentralen Lüftungssystem, da durch die Verwendung des Abluftventilators auch hier die Außenluft des Bads durch den Wohnraum strömt. Die Lüftungswärmeverluste sind aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung um 211 % höher als die des zentralen Lüftungssystems. Trotzdem sind die annuitätischen Ausgaben um 79 % geringer als bei System 1.

### System 5a – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN 1946-6

System 5a ist lüftungstechnische vergleichbar mit System 4. Die annuitätischen Ausgaben sind um 67 % geringer als beim zentralen Lüftungssystem. Aufgrund des höheren elektrischen Energiebedarfs und der höheren Investitionskosten sind die Ausgaben jedoch höher als bei System 4.

### System 6 – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten in den Ablufträumen

System 6 ist ähnlich zu System 3. Jedoch aufgrund des höheren Strombedarfs und der höheren Investitionskosten sind die annuitätischen Ausgaben höher als bei System 3. Diese liegen 75 % unter den Ausgaben des zentralen Lüftungssystems.

### System 7 – Abluftventilatoren nach DIN 1946-6

System 7 erreicht bei diesem Grundriss die gleiche Luftqualität wie ein zentrales Lüftungssystem. Jedoch sind die Lüftungswärmeverluste um 400 % höher als bei System. Aufgrund der geringen Investitionskosten und der niedrigen Betriebs- und Wartungskosten sind die annuitätischen Ausgaben um 91 % geringer als bei einem zentralem Lüftungssystem.

### System 9 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte, Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch Fensterlüftung

Die Feuchteüberstunden sind bei diesem System um 70 % höher als bei dem Referenzsystem. Auch die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen mit 210.072 ppmh, über dem des zentralen Lüftungssystems. Abbildung 47 zeigt den CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im Studentenapartment für System 9. Hier ist zusehen, dass der Grenzwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohnzimmer ausschließlich nachts überschritten wird, da dann das Fenster nicht geöffnet wird. Nachts stellt sich eine maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1200 ppm ein. Die Lüftungswärmeverluste sind 12 % höher als bei System 1. Die annuitätischen Ausgaben sind um 91 % geringer als die des zentralen Lüftungssystems.

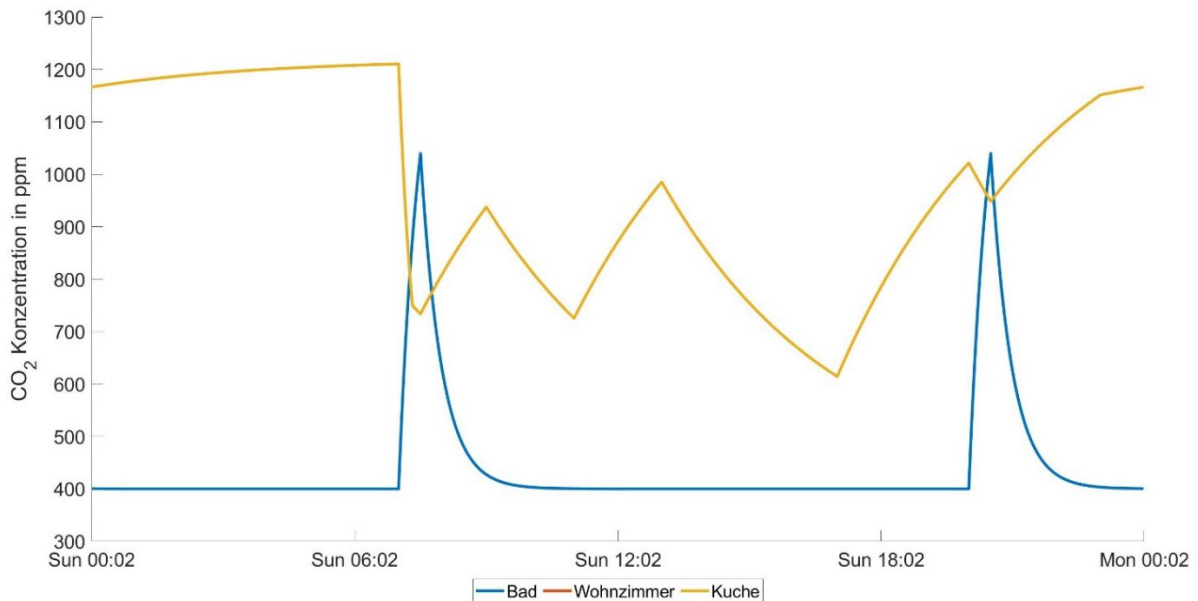


Abbildung 47 CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im Studentenapartment Lüftung mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten mit Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch bedarfsgeführte Fensterlüftung

### Zwei-Zimmer-Wohnung

Nachfolgenden werde die Ergebnisse der Zwei-Zimmer-Wohnung diskutiert. In Abbildung 48 sind die ermittelten Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungssystem dargestellt.

### System 1 – zentrales Lüftungsgerät

Nachfolgend in Tabelle 32 sind die absoluten Kennwerte von System 1 aufgeführt, auf die sich im weiteren Verlauf die Darstellung bezieht. Die meisten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden werden mit 200.000 ppmh im Schlafzimmer generiert. Diese haben einen Anteil von 67 % an den gesamt CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden.

Tabelle 32 Ermittelte Kennwerte Zwei-Zimmer-Wohnung

CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	299.300 ppmh
Feuchteüberstunden	3.622 h
Elektrischer Energieverbrauch	114 kWh
Lüftungswärmeverluste	459 kWh
Annuitätische Ausgaben	441 €/a

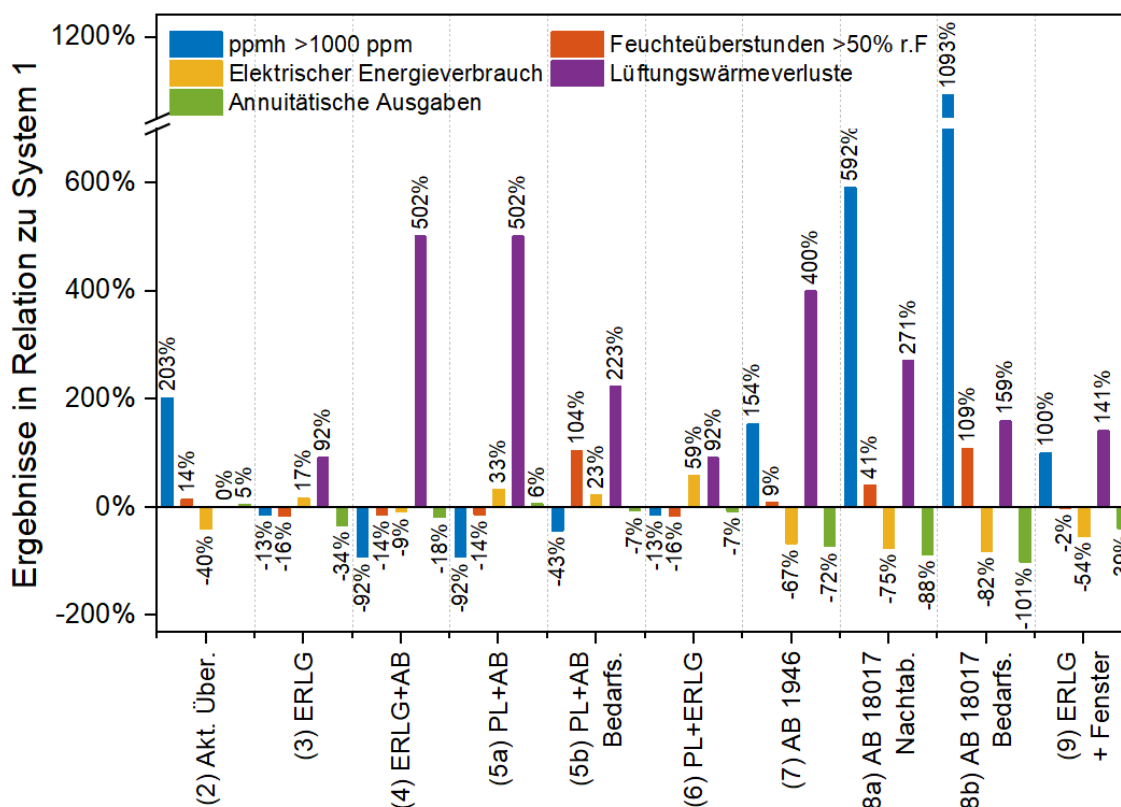


Abbildung 48 Zwei-Zimmer-Wohnung, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät

### System 2 – aktive Überströmer

Das System mit aktiven Überströmern hat 203 % höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als das zentrale Lüftungssystem. Die höchste Anzahl an CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden fällt mit 720.000 ppmh im Schlafzimmer an. Diese haben einen Anteil von 79 % an den Gesamt- CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Die durch die aktiven Überströmer belüfteten Räume werden, anders als beim zentralen Lüftungssystem, nicht direkt mit Außenluft versorgt, sondern mit einer Mischluft aus der Überstrom-Zone. Da die Volumenströme der aktiven Überströmer in einem ersten Ansatz genauso wie bei der konventionellen Auslegung des zentralen Lüftungssystems angesetzt wurden, ergeben sich so höher CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Die um 14 % höheren Feuchteüberstunden sind ebenfalls auf diesen Umstand zurückzuführen. Die Lüftungswärmeverluste sind dieselben wie beim zentralen Lüftungssystem, da die Summe der Außenluftvolumenströme ebenfalls dieselbe ist. Die annuitätischen Ausgaben sind aufgrund der höheren Investitionskosten um 5% höher als beim zentralen Lüftungssystem.



### System 3 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte

Das Lüftungssystem 3 mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten erzielt mit 13 % geringeren CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und 16 % geringeren Feuchteüberstunden eine bessere Luftqualität als das zentrale Lüftungsgerät. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden im Schlafzimmer haben mit 210.000 ppmh einen Anteil von 80 % an den Gesamt- CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Dabei sind die Lüftungswärmeverluste jedoch um 92 % höher. Dies ist den in Summe höheren Außenluftvolumenströmen geschuldet, da der Doppelnutzen der Luft, anders als beim zentralen Lüftungssystem, nicht besteht. Die annuitätischen Ausgaben sind dennoch um 34% geringer als die des zentralen Lüftungssystems.

### System 4 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

System 4 erreicht mit 92 % niedrigeren CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als beim zentralen Lüftungssystem die geringsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Lüftungssystems dieses Grundrisses. Eine Überschreitung von 1000 ppm fand ausschließlich in der Küche statt. Dies liegt an den durch die Abluftventilatoren zusätzlich induzierten Infiltrationsvolumenströmen bzw. erhöhten Zuluftvolumenströmen der Einzelraumlüftungsgeräte. Die Lüftungswärmeverluste sind mit 502 % über denen des zentralen Lüftungssystems die größten. Dies ist auf die fehlende Wärmerückgewinnung der Abluftventilatoren und den (im Vergleich zu einem reinen Abluftsystem wie z.B. System 7) zusätzlichen Außenluftvolumenströmen in den Zulufräumen durch die Einzelraumlüftungsgeräte zurückzuführen. Die annuitätischen Ausgaben sind 18 % geringer als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind damit trotz geringerer Investitionskosten höher als bei System 3.

### System 5a – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN 1946-6

System 5a ist lüftungstechnisch vergleichbar mit System 4. Die annuitätischen Kosten sind aufgrund höherer Investitionskosten und höherem elektrischen Energiebedarf der Pendellüfter um 6 % höher als beim zentralen Lüftungsgerät und höher als die Ausgaben von System 4.

### System 5b – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN 18017-3 (Bedarfsgeführt)

Durch die Bedarfsführung der Abluftventilatoren in den Ablufträumen bei System 5b konnten die Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Diese liegen 183 % über den Lüftungswärmeverlusten des zentralen Lüftungssystems. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind 28 % höher als bei System 1. Wobei jeweils 29 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden in Bad und Schlafzimmer anfallen. 35 % entfallen auf die Küche, der Rest auf das Wohnzimmer. Die Feuchteüberstunden sind 83 % höher. Die Luftqualität ist daher schlechter als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind 32 % niedriger als die des Referenzsystems.

### System 6 – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten in den Ablufträumen

System 6 ist lüftungstechnisch vergleichbar mit System 3. Durch die höheren Investitionskosten und elektrischen Energiebedarf der Pendellüfter ergeben sich höhere annuitätischen Ausgaben. Diese sind 7% geringer als die des zentralen Lüftungssystems.

### System 7 – Abluftventilatoren nach DIN1946-6

Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden des System 7 sind 154 % höher als die des zentralen Lüftungssystems. Die Feuchteüberstunden des Abluftsystems sind 9% höher. Zur Erläuterung sind die raumweisen Außenluftvolumenströme für beide System in Tabelle 33 aufgeführt. Bei System 7 kommt es durch die unausgeglichene Volumenströme zu höheren Infiltrationsvolumenströmen in den Ablufträumen und

zu niedrigeren Außenluftvolumenströmen in den Zulufräumen. Im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem findet in den Zulufräumen ein geringerer Luftwechsel statt. Dies führt zu insgesamt schlechterer Luftqualität. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind im Schlafzimmer mit 5,6\*10<sup>5</sup> ppmh am höchsten. Dies entspricht einem Anteil von 74 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Durch die fehlende Wärmerückgewinnung sind die Lüftungswärmeverluste um 400 % höher als die des zentralen Lüftungssystems. Die annuitätischen Ausgaben sind durch die um 67 % niedrigeren elektrische Leistungsaufnahme und die niedrigeren Investitionskosten um 72 % geringer als beim zentralen Lüftungssystem.

Tabelle 33 Vergleich raumweiser Außenluftvolumenströme der Zwei-Zimmer-Wohnung System 1 & System 7

	System 1 – zentrales Lüftungssystem		System 7 – Abluftsystem nach DIN1946-6	
	Volumenstrom durch Lüftungsventil in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom durch Infiltration in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom über ALD o. Abluftventilator in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom durch Infiltration in m <sup>3</sup> /h
Schlafzimmer	40	≈1	12	17,5
Wohnzimmer	40	≈1	17	10,2
Bad	40	≈1	40	10
Küche	40	≈1	40	7,5

#### System 8a – Abluftventilatoren nach DIN 18017-3, Absenkung

Bei System 8a werden im Gegensatz zum konstant betriebenen System 7, die Abluftvolumenströme 50 % der Zeit reduziert. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind bei diesem System um 592 % höher als beim zentralen Lüftungssystem. 76 % der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden fallen im Schlafzimmer an. Die Feuchteüberstunden übersteigen die des System 1 um 41 %. Die Lüftungswärmeverluste jedoch sind mit 271 % Überschreitung des Systems 1, geringer als beim konstanten Betrieb. Die annuitätischen Kosten sind um 88 % geringer als beim zentralen System.

#### System 8b – Abluftventilatoren nach DIN18017-3, Präsenzgeführt

Bei System 8b wurde eine präsenzgeführte Steuerung implementiert, welche den Volumenstrom erhöht, sobald sich eine Person in einem der Ablufträume befindet. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind um 1093 % höher als die des zentralen Lüftungssystems. Die höchsten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden treten mit 67 % im Schlafzimmer auf. Die Feuchteüberstunden sind mit 109 % über denen des System 1 auch sehr hoch. Da diese Regelstrategie für den Feuchteschutz der Ablufträume ausgelegt ist werden die Grenzwerte in den Zulufräumen überschritten (s. Abbildung 49). Die Lüftungswärmeverluste liegen 159 % über den des zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind 101 % unter denen des Systems 1.

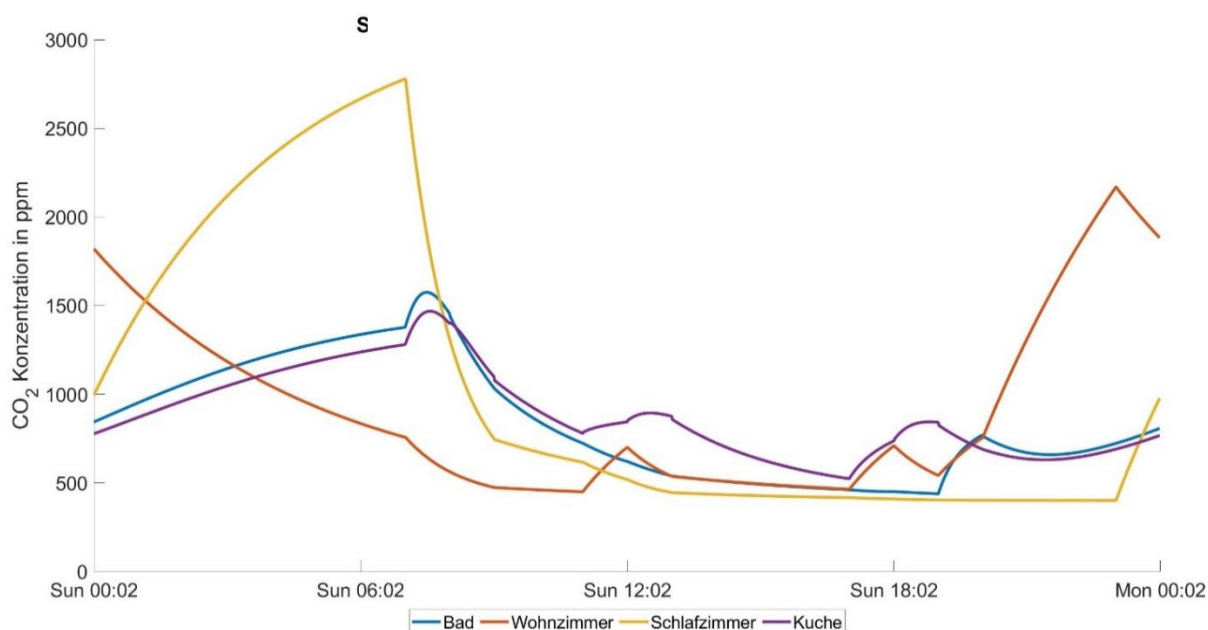


Abbildung 49 Zwei-Zimmer-Wohnung, Abluftsystem nach DIN 18017-3 Präsenzgeführt: CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf

### System 9 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte, Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch Fensterlüftung

Bei System 9 wurden rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte auf „reduzierte Lüftung“ ausgelegt und bei der Überschreitung eines Grenzwertes durch Fensterlüftung unterstützt. Die Lüftung mit Fenster kann allerdings nur stattfinden, wenn sich eine Person im Raum befindet und diese nicht schläft. Dies führt insbesondere im Schlafzimmer zu einer hohen Überschreitung der 1000 ppm Grenze, da dort nachts nicht gelüftet wird. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen 101 % über denen des zentralen Lüftungsgerätes. Im Schlafzimmer werden mit 5,3\*10<sup>5</sup> ppmh, 88 % der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden erzielt. Die Feuchteüberstunden sind 2 % geringer als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind 39 % geringer als die von System 1.

### Drei-Zimmer-Wohnung

Es werden nachfolgend die Ergebnisse der Jahressimulation der Drei-Zimmer-Wohnung vorgestellt. In Abbildung 50 sind die Ergebnisse aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungssystem dargestellt.

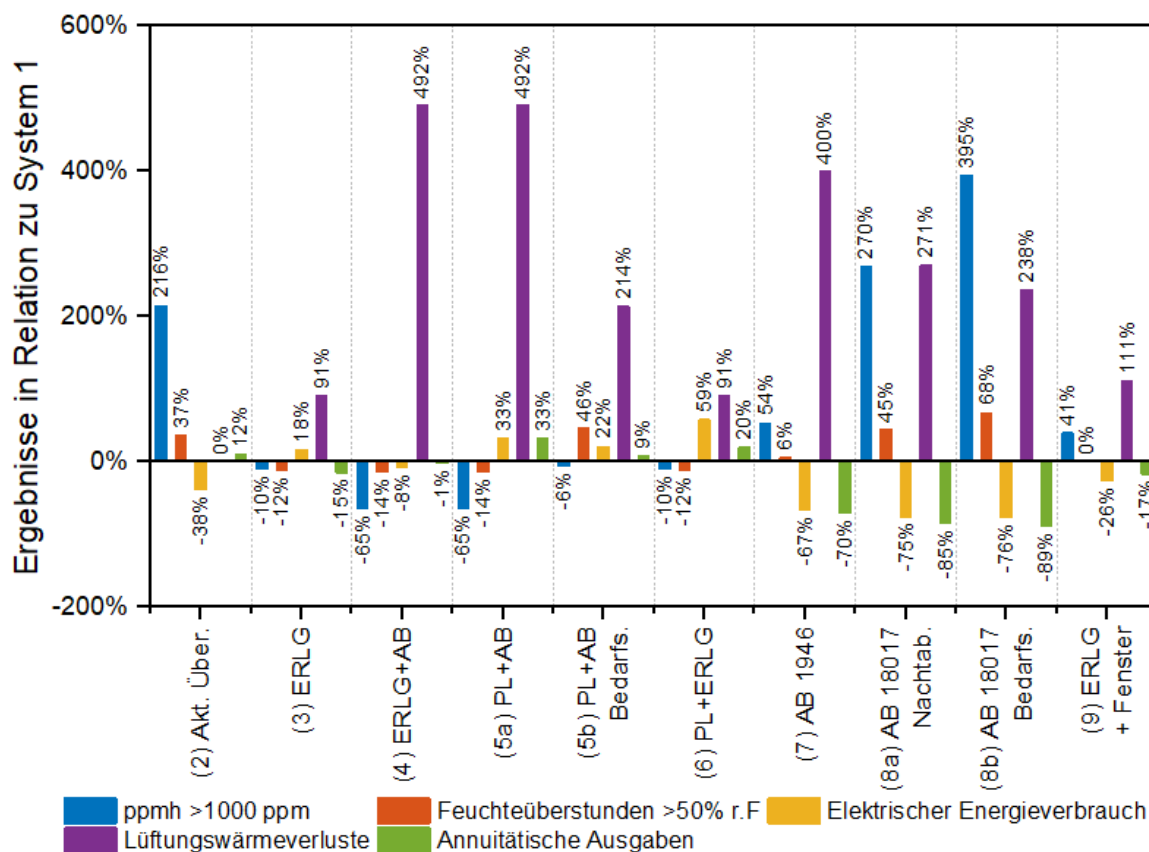


Abbildung 50 Drei-Zimmer-Wohnung, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungskonzepte in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät

### System 1 – zentrales Lüftungsgerät

In der folgenden Tabelle 34 sind die ermittelten absoluten Kennwerte für System 1 dargestellt. Die Darstellung der Kennwerte der anderen Systeme erfolgt nachfolgend in Relation zu System 1.

Tabelle 34 Ermittelte Kennwerte Drei-Zimmer-Wohnung für das zentrale Lüftungsgerät – System 1

CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden	1.280.000 ppmh
Feuchteüberstunden	5050 h
Elektrischer Energieverbrauch	114 kWh
Lüftungswärmeverluste	459 kWh
Annuitätische Ausgaben	449 €/a

### System 2 – aktive Überströmer

Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden des Lüftungssystems mit aktiven Überströmer sind 216 % höher als beim Referenzsystem. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden betragen 2,2\*<sup>106</sup> ppmh und haben einen Anteil von 55 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden Auch die Feuchteüberstunden sind 37 % über denen von System 1. Die Lüftungswärmeverluste der zwei System sind gleich. Die annuitätische Ausgaben des System 2 sind ebenfalls höher als die des zentralen Lüftungssystems.

### System 3 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte

Bei System 3 sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden um 10 % und die Feuchteüberstunden um 12 % niedriger als beim zentralen Lüftungssystem. Die meisten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden fallen mit 5,8\*10<sup>5</sup> ppmh im Schlafzimmer an. Dies entspricht 53 % der gesamt CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Die Lüftungswärmeverluste sind hierbei aber um 91 % höher als beim System 1. Trotz der höheren Investitions- und Betriebskosten bei der Verwendung von Einzelraumlüftungsgeräten, sind die annuitätischen Ausgaben des zentralen Lüftungssystems um 15 % höher. Die Wartungskosten liegen beim zentralen Lüftungsgerät aufgrund der alle 10 Jahre notwendigen Kanalreinigung auf 30 Jahre betrachtet höher.

### System 4 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Die rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren erzielen nur 65 % der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden im Vergleich zu System 1. In der Küche fallen 74 % der gesamt CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden an. Dies entspricht 3,3\*10<sup>5</sup> ppmh. Die Lüftungswärmeverluste sind jedoch um 492 % höher als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind aufgrund der geringeren Investitions- und Wartungskosten, gleich mit denen des Referenzsystems.

### System 5a – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN1946-6

System 5a ist lüftungstechnisch vergleichbar mit System 4. Jedoch ist die elektrische Leistungsaufnahme mit 33 % über denen des zentralen Lüftungssystem, höher. Ebenfalls höher sind die annuitätischen Ausgaben mit 33 %.

### System 5b – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Betrieb nach DIN18017-3 (Bedarfsgeführt)

Durch die Bedarfsführung in System 5b wurden die Lüftungswärmeverluste im Vergleich zu System 5a reduziert. Diese liegen 214 % über denen des zentralen Lüftungssystems. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden sind 6 % geringer als beim zentralen System. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden verteilen sich anteilig wie folgt auf die Räume: Bad 24 %, Wohnzimmer 7 %, Schlafzimmer 28 %, Küche 38 %, Kinderzimmer 0 %. Die annuitätischen Kosten sind 9 % höher als bei System 1.

### System 6 – regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten in den Ablufträumen

Die Lüftungseigenschaften von System 6 sind identisch mit System 3. Aufgrund der höheren elektrischen Leistungsaufnahme der regenerativen Einzelraumlüftungsgeräte und der höheren Investitionskosten sind die annuitätischen Ausgaben um 20 % höher als beim zentralen Lüftungssystem und somit auch höher als die des System 3.

### System 7 – Abluftventilatoren nach DIN 1946-6

System 7 basiert auf einem reinen Abluftsystem mit gleichen Abluftvolumenströmen wie beim zentralen Lüftungssystem. Dennoch sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden um 54 % höher. Dies liegt an der Verschiebung der Außenluftvolumenströmen durch die Infiltration. Tabelle 35 zeigt dazu im Vergleich die raumweisen Volumenströme für Lüftungssystem 1 und 7 im Vergleich. Die meisten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden werden im Schlafzimmer mit 1,2\*10<sup>6</sup> ppmh erreicht. Diese haben einen Anteil von 63 % an den gesamt CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Trotz der im Vergleich zu System 1 um 400 % höheren Lüftungswärmeverluste, weist das Abluftsystem um 70 % geringere annuitätische Ausgaben auf.

Tabelle 35 Vergleich raumweiser Außenluftvolumenströme der Drei-Zimmer-Wohnung System 1 & System 7

	System 1 – zentrales Lüftungssystem		System 7 – Abluftsystem nach DIN 1946-6	
	Volumenstrom durch Lüftungsventil in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom durch Infiltration in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom über ALD o. Abluftventilator in m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom durch Infiltration in m <sup>3</sup> /h
Kind	23	≈1	17	7
Schlafzimmer	29	≈3	13	6
Wohnzimmer	29	≈3	15	9
Bad	40	≈2	40	3
Küche	40	≈2	40	5

System 8a – Abluftventilatoren nach DIN 18017-3, Absenkung

System 8a ist ein Abluftsystem nach DIN 18017-3 mit Absenkung des Volumenstroms max. 50 % der Zeit. Die Luftqualität ist daher deutlich schlechter als bei System 7. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen 270 % über denen des zentralen Lüftungssystems. CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden im Schlafzimmer haben einen Anteil von 50 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden Die Lüftungswärmeverluste sind um 271 % höher als bei System 1 und daher geringer als beim konstant betriebenen Abluftsystem. Die annuitätische Ausgaben sind um 85 % geringer als bei System 1.

System 8b – Abluftventilatoren nach DIN18017-3, Präsenzgeführt

Bei dem Präsenzgeführten Abluftsystem sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden mit 395 % über dem des System 1 die höchsten aller Lüftungssysteme für diesen Grundriss. Da sich die Präsenzsteuerung nur auf die Ablufträume bezieht, werden in den Zulufräumen teilweise sehr hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen erreicht. Im Schlafzimmer werden 3,3\*106 ppmh erzielt. Dies entspricht einem Anteil von 50 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Die Lüftungswärmeverluste liegen bei 238 % der des zentralen Lüftungssystem. Die annuitätische Kosten sind um 89 % geringer.

System 9 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte, Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch Fensterlüftung

Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen bei diesem System 41 % über dem des System 1. Aufgrund der Restriktionen bezüglich der Fensteröffnung (Person muss anwesend und wach sein) kommen teilweise hohe Lüftungswärmeverluste zu Stande. Im Schlafzimmer werden 67% der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden generiert. Die Lüftungswärmeverluste sind aufgrund fehlender Wärmerückgewinnung 111 % höher als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben sind jedoch 17 % geringer.

### Simulation von Varianten mit angepassten Volumenströmen mit CONTAM

Im Rahmen des Projekts wurden kostengünstige Lüftungslösungen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau untersucht. Hierfür wurden unter anderem die im Kapitel Jahressimulation vorgestellten Jahressimulationen durchgeführt um unterschiedliche Kennzahlen zu den in Kapitel Lüftungssysteme vorgestellten Lüftungssystemen zu ermitteln. Als Referenz dient dabei das zentrale Lüftungssystem. Die Ergebnisse der Jahressimulation zeigen, dass eine Anpassung von Volumenströmen bei einigen Lüftungssystemen möglich ist, um Lüftungswärmeverluste zu reduzieren, ohne dabei eine geringere Luftqualität als beim Referenzsystem zu erreichen. In diesem Kapitel wird ermittelt, wie sich die Änderung von Volumenströmen auf die einzelnen Kennzahlen auswirkt.

#### Beschreibung der Varianten

Nachfolgend werden die Anpassung der Varianten der einzelnen Lüftungssysteme erläutert, bei denen die Auswirkungen von Volumenstromanpassungen untersucht wurden.

#### System 2 – Aktive Überströmer

Bei Lüftungssystemen mit aktiven Überströmern wird die Luft an einem zentralen Punkt eingebracht (z.B. Flur). Die Zulufräume haben selbst keine Verbindung zum (semi-)zentralen Lüftungsgerät. Um dennoch einen Luftaustausch in den Räumen gewährleisten zu können, werden aktive Überströmer verwendet, um die Luft aus dem Frischluftraum in den jeweiligen Raum zu befördern. Die Abluft strömt dann wieder in den Frischluftraum zurück und vermischt sich mit der Außenluft. Die von den aktiven Überströmern geförderte Luft hat daher keine Außenluftqualität. In der DIN 1946-6 wird die Auslegung von aktiven Überströmern nicht behandelt, sodass keine Auslegungsgrundlage besteht. Daher wurde bei der Auslegung im ersten Teil des Projekts zunächst die im Auslegungsprozess ermittelten Volumenströme verwendet. In der Jahressimulation wurden bei den mit aktiven Überströmern belüfteten Räumen deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als beim Referenzsystem festgestellt. In der Variante wird der Volumenstrom der aktiven Überströmer um 30% erhöht. In

Tabelle 36 sind die angepassten Volumenströme für die Zwei- und Drei-Zimmer-Wohnung aufgeführt. Die Volumenströme des zentralen Lüftungsgerätes wurden dabei konstant gehalten [34].

Tabelle 36 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 2 aktiver Überströmer

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h		
		Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung	
Abluft	Bad	40	40	Aktive Überströmer Volumenstrom + 30%
	Küche	40	40	
Zuluft	Schlafzimmer	52	74	
	Wohnzimmer	52	37	
	Kinderzimmer	-	30	

#### System 3 – Einzelraumlüftungsgeräte

Bei den Einzelraumlüftungsgeräten befindet sich in jedem Raum ein Einzelraumlüftungsgerät. Anders als beim zentralen Lüftungssystem, bei dem durch das Kaskadenlüftungsprinzip die Luft von den Zuluft- in die Ablufträume strömt, wird bei der Lüftung mit Einzelraumlüftungsgeräten jeder Raum mit Außenluftluft versorgt. Dies führt bei gleichen Volumenströmen dazu, dass die Luftqualität im Vergleich

mit dem zentralen Lüftungssystem besser ist. Da die Doppelnutzung der Luft entfällt, sind die gesamt Außenvolumenströme und damit die Lüftungswärmeverluste, höher. Um die Lüftungswärmeverluste zu reduzieren und dennoch eine vergleichbare Luftqualität wie beim zentralen Lüftungssystem zu erhalten, können die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte reduziert werden. In den Varianten wurde der Einfluss einer Volumenstromreduktion um 10 %, 20 % und 30 % untersucht. Die Auslegung nach DIN 18017-3 hat den Feuchteschutz als Ziel. Bei der Variante „Studentenapartment mit Berücksichtigung der DIN 18017-3“ wurde der Abluftvolumenstrom im Bad daher nicht reduziert. Da System 3 und System 6 (Einzelraumlüftungsgeräte mit Pendellüftern) vom Lüftungsprinzip identisch sind, wurde auf eine separate Untersuchung verzichtet. Die Volumenströme der einzelnen Grundrisse sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Tabelle 37 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 3 Einzelraumlüftungsgeräte

		Volumenstrom in m³/h					
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei- Zimmer- Wohnung	Drei-Zimmer- Wohnung		
Abluf	+	Bad	40	25	36	36	Volumenstrom -10%
		Küche	25	25	36	36	
Zuluft		Schlafzimmer	25	25	36	26	
		Wohnzimmer	-	-	36	26	
		Kinderzimmer	-	-	-	21	
Abluf	+	Bad	40	22	32	32	
		Küche	22	22	32	32	
Zuluft		Schlafzimmer	22	22	32	23	
		Wohnzimmer	-	-	32	23	
		Kinderzimmer	-	-	-	18	
Abluf	+	Bad	40	19	28	28	Volumenstrom -30%
		Küche	19	19	28	28	
Zuluft		Schlafzimmer	19	19	28	20	
		Wohnzimmer	-	-	28	20	
		Kinderzimmer	-	-	-	16	

System 4 – Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Bei Lüftungssystemen mit Abluftventilatoren wird in der Nutzungseinheit ein Unterdruck erzeugt, durch welche es zu zusätzlichen Infiltrationsvolumenströmen kommt. Bei der Verwendung von Abluftsystemen kann laut DIN 1946-6 der wirksame Infiltrationsvolumenstrom bei der Auslegung von ALD's berücksichtigt werden. Ob dies in selber Weise auch für die Kombination von Abluftsystemen mit anderen Lüftungssystemen gilt, ist in der Norm nicht geklärt. In der Auslegung im ersten Teil des Projekts wurden daher zunächst keine Infiltrationsvolumenströme bei der Auslegung der Einzelraumlüftungsgeräte berücksichtigt. Die Ergebnisse der Jahressimulationen zeigen, dass bei System 4 eine höhere Luftqualität, als auch höhere Lüftungswärmeverluste als beim zentralen Lüftungssystem erreicht werden. Daher wird in der ersten Variante die Auswirkung bei einer Anrechnung des wirksamen



Infiltrationsvolumenstrom auf die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte untersucht. In einem weiteren Schritt wird zusätzlich der Volumenstrom der Abluftventilatoren um 10 % reduziert. Die resultierenden Volumenströme sind in

Tabelle 38 aufgeführt. Da sich System 4 und System 5a vom Lüftungsprinzip ähneln, wird nur eins dieser Systeme weiter untersucht.

Tabelle 38 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 4 Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren

		Volumenstrom in m³/h				
		Studentena. mit DIN 18017-3	Studentena. ohne DIN 18017-3	Zwei- Zimmer- Wohnung	Drei- Zimmer- Wohnung	
Abluft	Bad	40	27,5	40	40	Anrechnung InfWirk
	Küche	19	19	40	40	
Zuluft	Schlafzimmer	19	19	30	21,5	
	Wohnzimmer	-	-	30	21,5	
	Kinderzimmer	-	-	-	16	
Abluft	Bad	-	25	36	36	
	Küche	-	19	36	36	
Zuluft	Schlafzimmer	-	19	30	21,5	
	Wohnzimmer	-	-	30	21,5	
	Kinderzimmer	-	-	-	16	

System 5b – Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Bedarfsführung nach DIN18017-3

Bei System 5b werden Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen betrieben. Die Abluftventilatoren werden hier bedarfsgeführt nach DIN 18017-3:2020 [20] betrieben. Daher fördern die Abluftventilatoren ständig einen Volumenstrom von 15 m³/h. Bei Überschreitung des festgelegten Grenzwertes in einem Abluftraum wird der Volumenstrom im betroffenen Raum auf 40 m³/h erhöht. Gleichzeitig erhöhen alle Einzelraumlüftungsgeräte ihren Zuluftvolumenstrom um die entsprechende Differenz, um den Volumenstrom auszugleichen. Da es sich wie bei System 4 und System 5a um eine Kombination zwischen einem Abluftsystem und einem anderen Lüftungssystem handelt, wird auch hier die Auswirkung bei der Anrechnung des Infiltrationsvolumenstroms untersucht. Der Infiltrationsvolumenstrom wurde dabei wiederum nur bei der Auslegung der Lüftungsgeräten in den Zulufräumen angerechnet. Beim Studentenapartment-Grundriss wurde nur die Varianten „mit DIN18017-3“ betrachtet, da die Abluftventilatoren nach DIN 18017-3:2020 [20] ausgelegt und betrieben werden.

Tabelle 39 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 5b regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit bedarfsgeführten Abluftventilatoren

		Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h			
		Studentena. mit DIN18017-3	Zwei-Zimmer- Wohnung	Drei-Zimmer- Wohnung	
Abluf	Bad	15 (+ 25)	15 (+ 25)	15 (+ 25)	Anrechnung InWirk
	Küche	15 (+ 25)	15 (+ 25)	15 (+ 25)	
Zuluft	Schlafzimmer	19 (+ 25)	30 (+ 12,5)	21,5 (+ 8,5)	
	Wohnzimmer	-	30 (+ 12,5)	21,5 (+ 8,5)	
	Kinderzimmer	-	-	16 (+ 8,5)	

System 7 Abluftanlage nach DIN1946-6 /

System 8a Abluftanlage nach DIN18017-3 in Bad und Küche (Reduzierter Betrieb) /

System 8b Abluftanlage nach DIN18017-3 in Bad und Küche (Anwesenheitsgeführt) /

System 9 Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Auslegung reduzierter Betrieb) + idealisierte Fensterlüftung

Die in Kapitel Jahressimulation vorgestellten Ergebnisse der Jahressimulationen zeigt für die die Systeme 7 / 8a / 8b / 9 schlechtere Luftqualität und gleichzeitig höhere Lüftungswärmeverluste verglichen mit System 1. Bei einer Erhöhung der Volumenströme steigen die Lüftungswärmeverluste. Bei einer Reduktion der Volumenströme nehmen die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden zu. Eine Anpassung der Volumenströme (Reduktion oder Erhöhung) ist daher nicht sinnvoll.

Ergebnisse der Varianten Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3:2020 [20] dargestellt. Für die Varianten des Studentenapartments werden die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als absolute Werte in Abbildung 52 abgebildet.

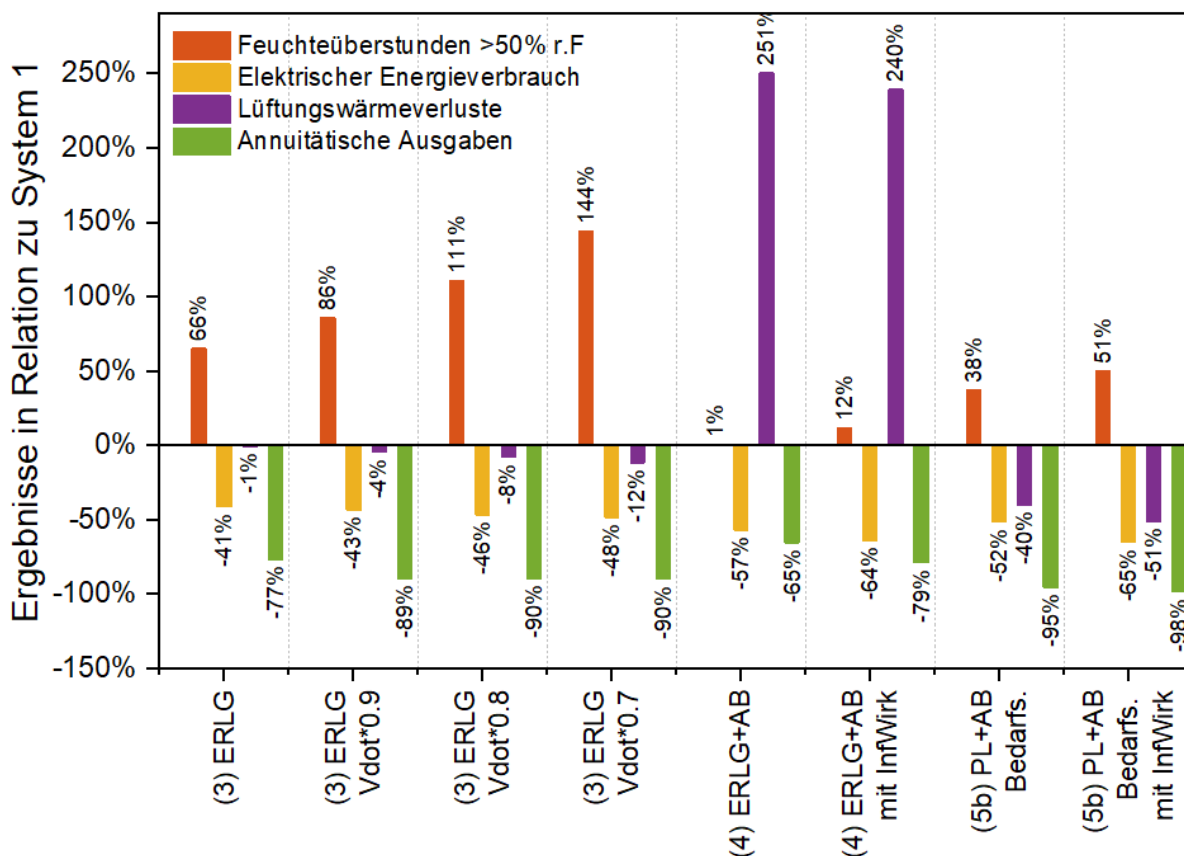


Abbildung 51 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN18017-3

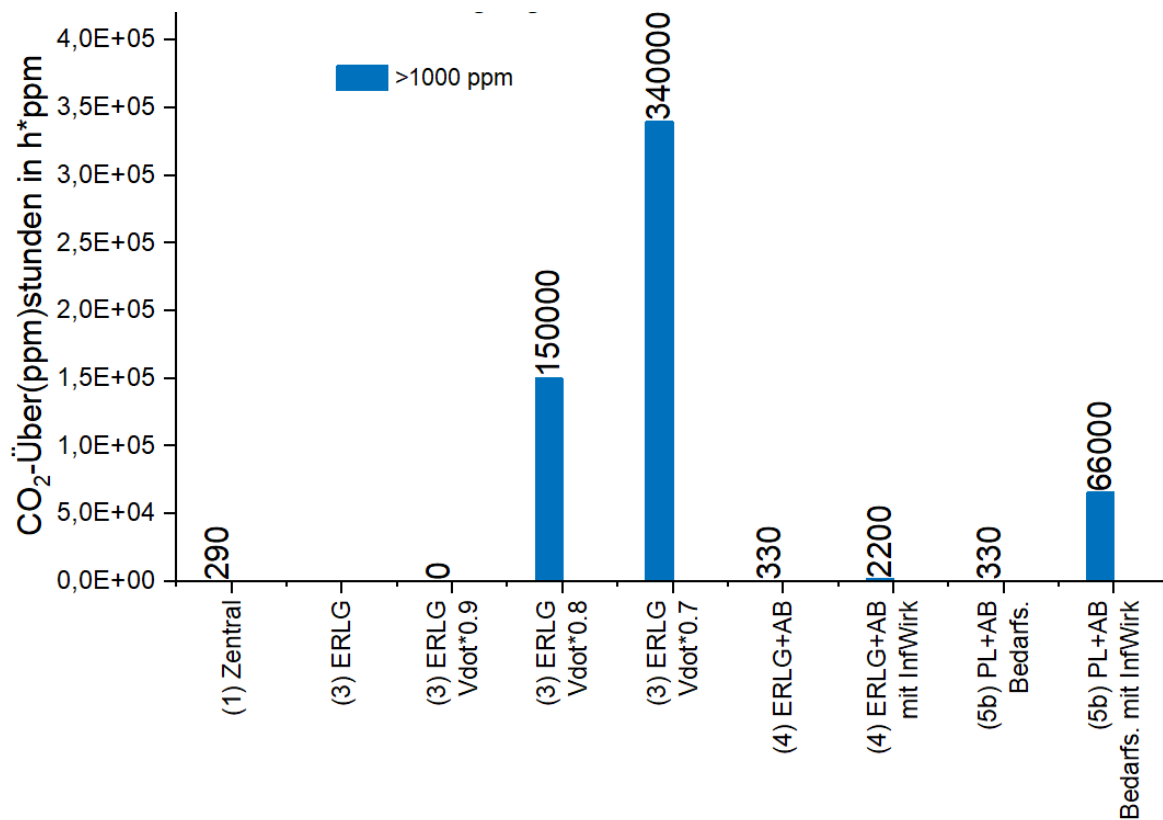


Abbildung 52 CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN18017-3

### System 3 – Einzelraumlüftungsgerät

Der Volumenstrom der Einzelraumlüftungsgeräte wurde im Vergleich zum Auslegungsvolumenstrom nach DIN1946-6 um 10 bis 30 % reduziert. Die Feuchteüberstunden >50 % r.F. steigen, im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem, von 66 % (ohne Volumenstromanpassung), auf 144 % höhere Feuchteüberstunden bei einer Reduktion des Volumenstroms um 30 %. Die Lüftungswärmeverluste, sind bei einer Reduktion des Volumenstroms um 30 %, um 12 % geringer als beim zentralen Lüftungssystem. Die annuitätischen Ausgaben verringern sich lediglich um 2 %. Bei einer Reduktion des Volumenstroms um 10 % wird der Grenzwert von 1000 ppm noch nicht überschritten. Ab einer Reduktion des Volumenstroms um 20 % werden 1000 ppm überschritten.

Durch die Anpassung verringern sich die Lüftungswärmeverluste, erst ab einer Verringerung von 20 % wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm überschritten. Da die Feuchteüberstunden jedoch schon vor der Anpassung der Volumenströme höher sind als die des zentralen Lüftungssystems wird eine entsprechende Anpassung als nicht sinnvoll erachtet.

### System 4 – Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Ohne Anpassung des Volumenstroms erreicht das System 4 die gleiche Luftqualität (gemessen an CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchteüberstunden) wie ein zentrales Lüftungssystem. Jedoch sind durch die fehlende Wärmerückgewinnung die Lüftungswärmeverluste deutlich höher. Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms wurde der Volumenstrom des Einzelraumlüftungsgerätes reduziert. Dies führt zu einer Erhöhung der Feuchteüberstunden auf 12 % über den des zentralen Lüftungssystems. Und einer Steigerung der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden von 330 ppmh auf 2200 ppmh. Die Lüftungswärmeverluste liegen nun 240 % über denen des System 1.

- Es konnte insgesamt eine Reduktion der Kosten bzw. Lüftungswärmeverluste erreicht werden, bei gleichzeitiger moderater Abnahme der Luftqualität. Die Feuchteüberstunden liegen 12 % höher als die des zentralen Lüftungssystems. Diese sind jedoch immer noch geringer als die von System 3 ohne Anpassung.

### System 5b – Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Bedarfsführung nach DIN18017-3

Die Luftqualität der unveränderten Variante des Systems 5b hat dieselben CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden wie das zentrale Lüftungssystem. Die Feuchteüberstunden sind jedoch um 38 % höher. Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms auf den Volumenstrom der regenerativen Lüftungsgeräte im Wohnbereich erhöht sich die Anzahl der Feuchteüberstunden auf 51 % über denen des System 1. Auch die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden steigen von ursprünglich 330 ppmh auf 66.000 ppmh. Die Lüftungswärmeverluste können auf 51 % unter denen des zentralen Lüftungssystem reduziert werden.

Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3

Folgend werden die Ergebnisse der Variante für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3 vorgestellt und diskutiert. In Abbildung 53 sind die Ergebnisse in Relation zu System 1 zusammengefasst. Abbildung 54 zeigt die absoluten CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden der einzelnen Varianten.

### System 3 – Einzelraumlüftungsgerät

Der Volumenstrom der Einzelraumlüftungsgeräte wurde um 10 % - 30 % reduziert. Ohne Anpassung liegen die Feuchteüberstunden des System 3 25 % unter denen des zentralen Lüftungssystems. Jedoch liegen die Lüftungswärmeverluste 44 % über denen von System 1. Durch die Reduktion der Volumenströme steigen die Feuchteüberstunden auf bis zu 111 % (bei 30 % Reduktion) über denen des zentralen Lüftungssystems. Die Lüftungswärmeverluste sind dann jedoch um 31 % geringer. Bei einer Reduktion des Volumenstroms der Einzelraumlüftungsgeräte um 10 % werden dieselben

Lüftungswärmeverluste wie beim zentralen Lüftungssystem erreicht. Die Feuchte stunden liegen jedoch um 51 % über den des System 1.

- Eine Reduzierung der Volumenströme führt zu geringeren Lüftungswärmeverlusten. Jedoch ebenfalls zu einem starken Anstieg der Feuchteüberstunden. Daher ist eine Reduktion der Volumenströme nicht zu empfehlen.

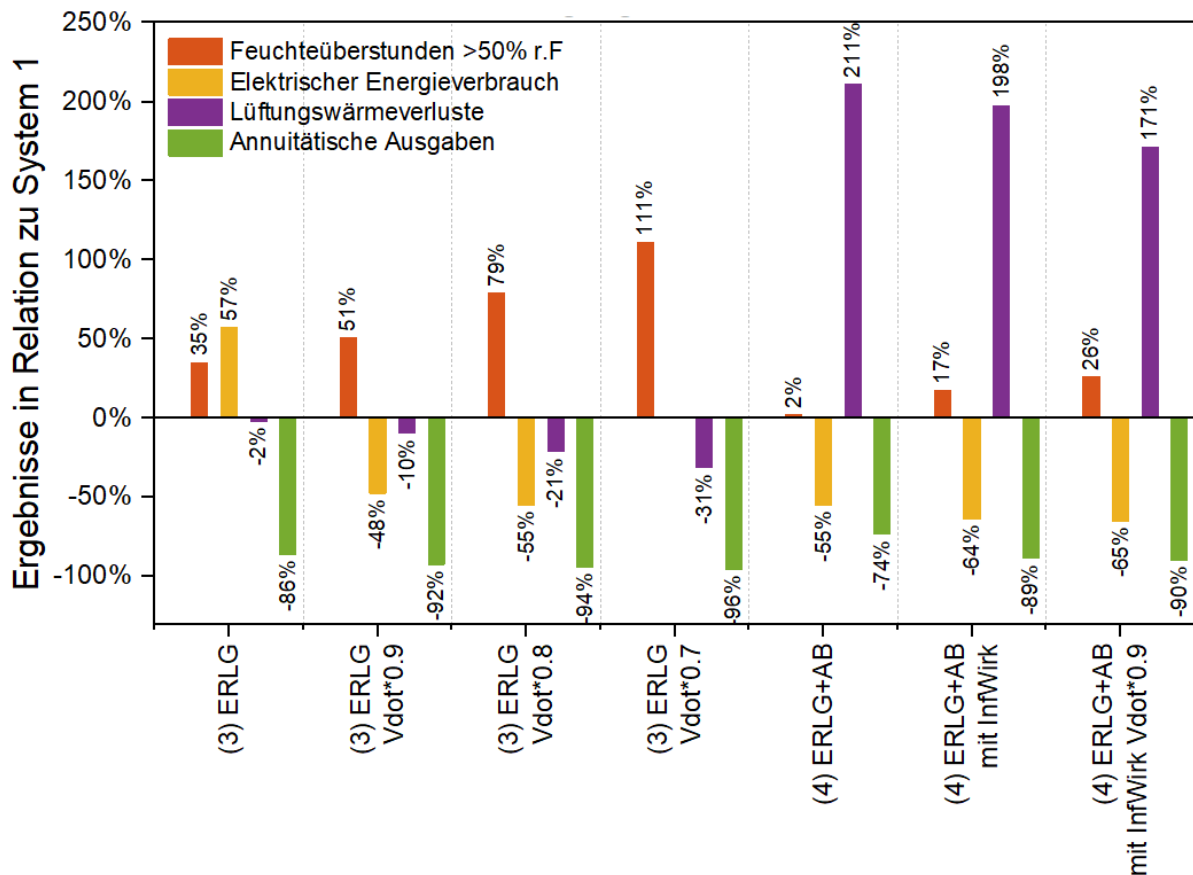


Abbildung 53 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3

#### System 4 – Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Beim System 4 finden zwei Stufen der Reduktion statt. In der ersten Stufe wird der wirksame Infiltrationsvolumenstrom angerechnet. In der zweiten Stufe wird zusätzlich der Abluftvolumenstrom der Abluftventilatoren um 10 % reduziert. Durch die Anrechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme steigen die Feuchteüberstunden auf 17 % über den des zentralen Lüftungssystems. Die Lüftungswärmeverluste sinken auf 198 %. Durch die zusätzliche Reduktion der Abluftvolumenströme erhöht sich die Zahl der Feuchteüberstunden auf 26 % mehr als bei System 1. Auch die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden steigen von 18.000 ppmh auf 37.000 ppmh.

- Aufgrund der erhöhten Feuchteüberstunden ist weder die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms noch eine weitere Absenkung der Abluftvolumenströme um 10% sinnvoll.

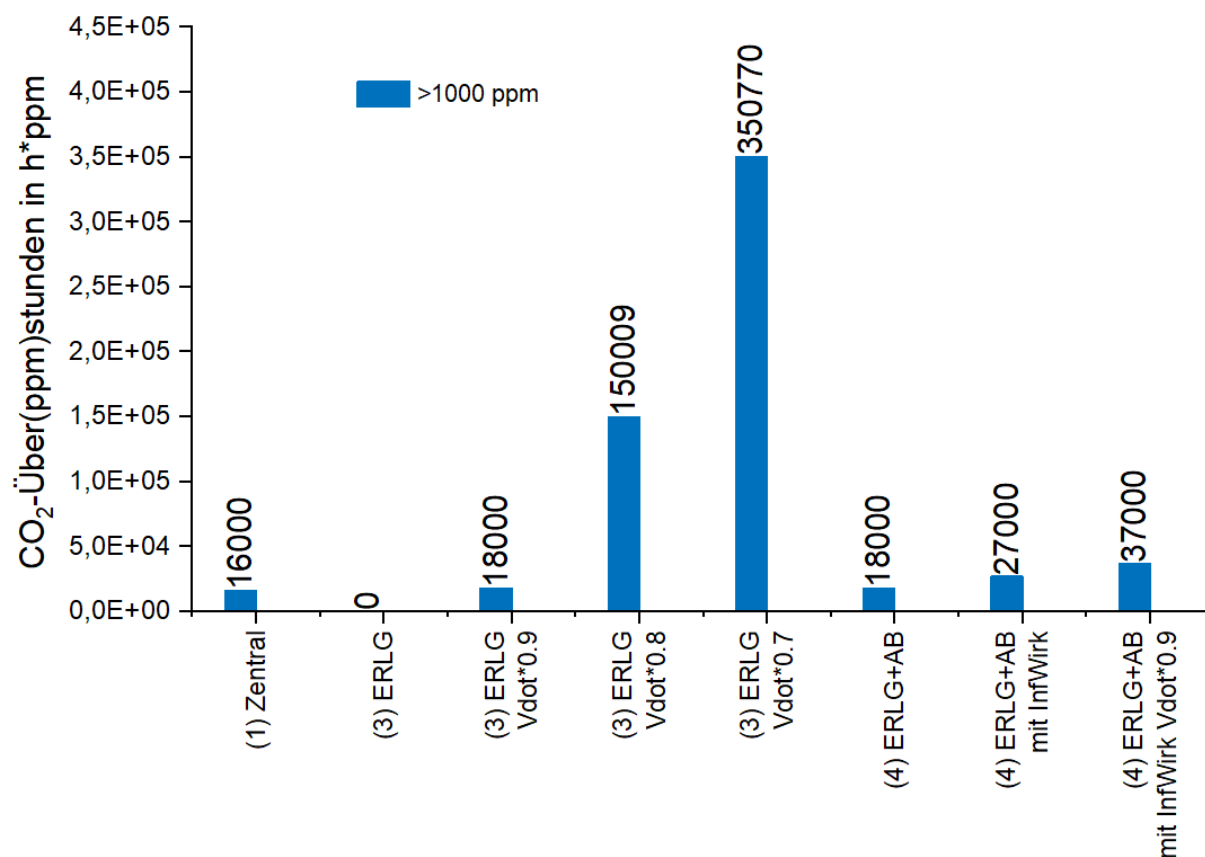


Abbildung 54 CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden der Varianten für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3

#### Ergebnisse der Varianten für die Zwei-Zimmer-Wohnung

Folgend werden die Ergebnisse der Varianten für die Zwei-Zimmer-Wohnung diskutiert. In Abbildung 55 sind hierfür die Ergebnisse aller Varianten zusammengefasst.

#### System 2 – Aktive Überströmer

Der Volumenstrom der aktiven Überströmer wurde äquivalent eines Lüftungssystems ausgelegt, bei dem die Zuluft Außenluftqualität entspricht. Da die aktiven Überströmer jedoch keine Außenluft, sondern Mischluft fördern sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden entsprechend hoch. Daher wurde der Volumenstrom der aktiven Überströmer um 30 % erhöht. Hierdurch verringern sich die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden von 203 % auf 111 % über den des zentralen Lüftungssystems. Auch die Feuchtestundestunden sinken von 14 % auf 9 % über den Feuchteüberstunden von System 1. Ein aktiver Überströmer hat aufgrund der niedrigen internen und externen Strömungswiderständen eine geringen SFP (ca. 0,028 W/m<sup>3</sup>/h [Quelle Blumartin]). Eine Erhöhung des Volumenstroms des aktiven Überströmers, hat daher nur einen geringen Einfluss auf den gesamten elektrischen Energiebedarf. Der elektrische Energieverbrauch, im Vergleich zum Referenzsystem, steigt bei einer Erhöhung des Volumenstroms des aktiven Überströmers um 30 % lediglich um 1 Prozentpunkt.

- Eine Erhöhung des Volumenstroms der aktiven Überströmer erhöht die Luftqualität. Gleichzeitig ist die zusätzlich Stromaufnahme gering. Eine Erhöhung ist daher empfehlenswert.

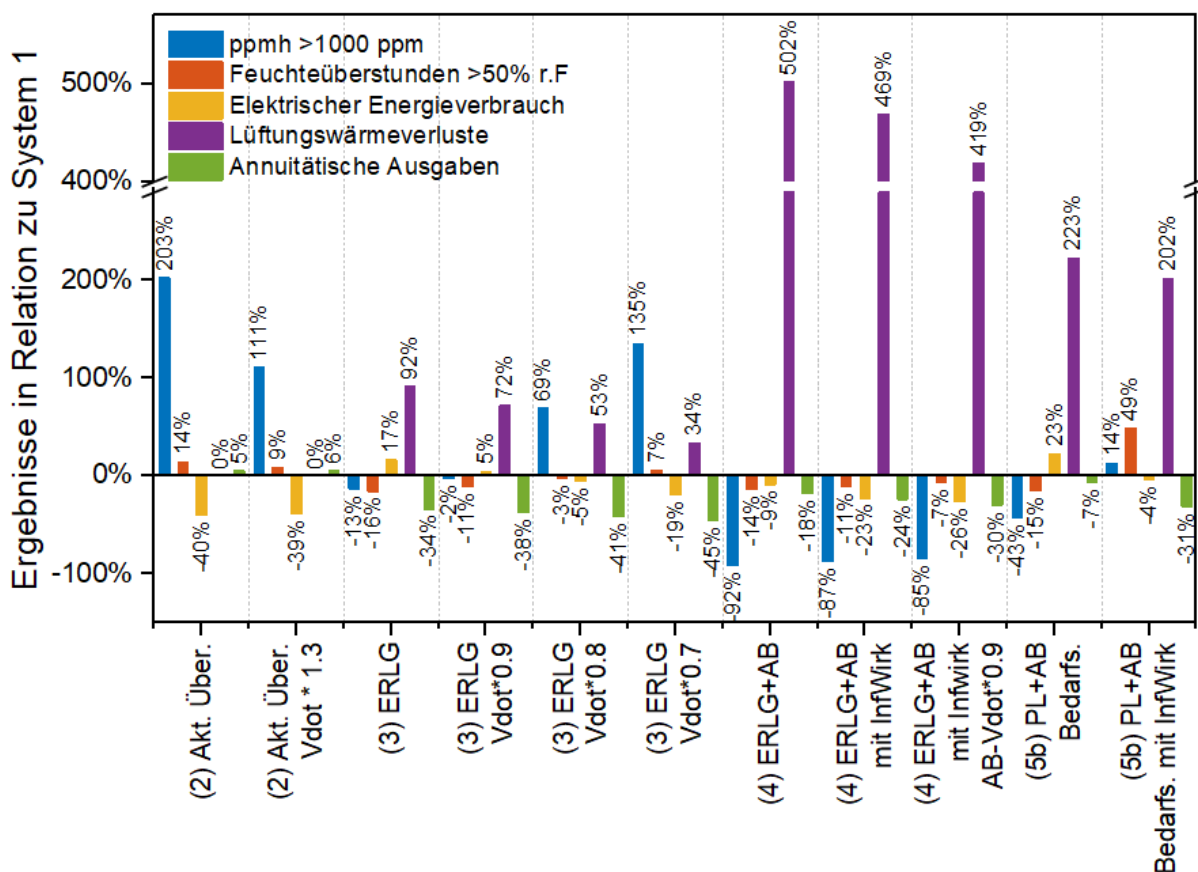


Abbildung 55 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für die Zwei-Zimmer-Wohnung

### System 3 – Einzelraumlüftungsgerät

Die Luftqualität (bewertet anhand CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchteüberstunden) ist ohne Anpassung besser als bei dem zentralen Lüftungssystem (geringere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchteüberstunden). Durch eine Reduktion des Volumenstroms der Einzelraumlüftungsgeräte um 10 % entsprechen die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden denen des zentralen Lüftungsgeräts, die Feuchteüberstunden sind immer noch 11 % geringer. Jedoch konnten die Lüftungswärmeverluste um 20 % gesenkt werden. Diese sind dann um 72 % höher als beim zentralen Lüftungsgerät. Die annuitätischen Kosten sind um 38 % geringer als beim System 1. Bei einer Reduktion des Volumenstroms um 20 % oder mehr wird die Luftqualität schlechter als beim zentralen System.

- Eine Reduktion des Volumenstroms um 10 % ist ohne Verschlechterung der Luftqualität (im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem) möglich. Da zusätzlich die Lüftungswärmeverluste sowie die annuitätischen Ausgaben sinken, kann eine Reduktion der Volumenströme um 10 % empfohlen werden.

### System 4 – Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

Ohne die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms ist die Luftqualität bei System 4 besser als bei System 1. Die Lüftungswärmeverluste sind ohne Anpassung 502 % höher als bei dem zentralen Lüftungssystem. Durch Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms und der Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren um 10 %, sinken die Lüftungswärmeverluste auf 419 % über denen des System 1. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen dann noch bei unter 85 % des zentralen Lüftungssystems. Die Feuchteüberstunden steigen auf 7 % unter denen des Referenzsystems.

- Die Anrechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme und die zusätzliche Reduktion der Volumenströme der Abluftvolumenströme um 10 % bewirkt eine Reduktion der Wärmeverluste

um 83 Prozentpunkte bezogen auf das Referenzsystem. Sowohl die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden, als auch die Feuchteüberstunden liegen trotz reduzierten Volumenströmen unter denen von System 1. Die Anrechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme und die zusätzliche Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren kann daher empfohlen werden.

#### System 5b – Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Bedarfsführung nach DIN18017-3

System 5b erreicht eine bessere Luftqualität als das Referenzsystem. Aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung im Bad sind die Lüftungswärmeverluste höher. Bei der Anpassung wurde nun der wirksame Infiltrationsvolumenstrom bei der Auslegung der Einzelraumlüftungsgeräte berücksichtigt. Hierdurch verschlechtert sich die Luftqualität. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden steigen dann von zunächst 43 % unter dem zentralen Lüftungssystem auf über 14 % an. Die Feuchteüberstunden liegen vor der Anpassung 15 % unter, nach der Anpassung 49 % über dem Wert des Referenzsystems. Die Lüftungswärmeverluste konnten auf 202% über dem des zentralen Lüftungssystems. Die annuitätischen Ausgaben sinken durch die Reduktion der Volumenströme von zunächst 7 % unter den Ausgaben von System 1, auf unter 31 %.

- Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms verschlechtert sich die Luftqualität, insbesondere die Feuchteüberstunden liegen nach der Anpassung über denen des zentralen Lüftungssystems. Deswegen erscheint eine Anrechnung hier nicht sinnvoll. Bei System 5b handelt es sich um ein bedarfsgeführtes Lüftungssystem, bei dem die Luftqualität letztendlich von den eingestellten Regelparametern und Grenzwerten abhängt. Ein Rückschluss auf die allgemeine Sinnhaftigkeit der Anrechenbarkeit des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms sollte daher nicht erfolgen.

#### Ergebnisse der Varianten für die Drei-Zimmer-Wohnung

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der alternativen Varianten der Drei-Zimmer-Wohnung aufgeführt. Diese werden im Folgenden diskutiert.

#### System 2 – Aktive Überströmer

Durch die Auslegung der Volumenströme äquivalent zu Zuluft mit Außenluftqualität ergeben sich hohe CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Durch Erhöhung des Volumenstroms der aktiven Überströmer um 30 % können die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden von zunächst 216 % über den des zentralen Lüftungssystems auf 138 % gesenkt werden. Auch die Feuchteüberstunden werden von über 37 %, auf unter 5 % im Vergleich zum Referenzsystem gesenkt. Aufgrund der geringen SFP von ca. 0,1 kW/m<sup>3</sup>/s erhöht sich der elektrische Energiebedarf bei einer Erhöhung des Volumenstroms um nur 5 Prozentpunkte. Da lediglich die Volumenströme der aktiven Überströmer erhöht wurden, sind die gesamt Außenluftvolumenströme identisch mit der Ausgangsvariante. Die Lüftungswärmeverluste bleiben daher unverändert. Die annuitätischen Ausgaben steigen durch die gering höhere Leistungsaufnahme der aktiven Überströmer, ebenfalls nur sehr gering.

- Eine Erhöhung des Volumenstroms der aktiven Überströmer verbessert die Luftqualität und hat einen sehr geringen Einfluss auf die Ausgaben. Eine Anpassung der Volumenströme ist daher zu empfehlen.



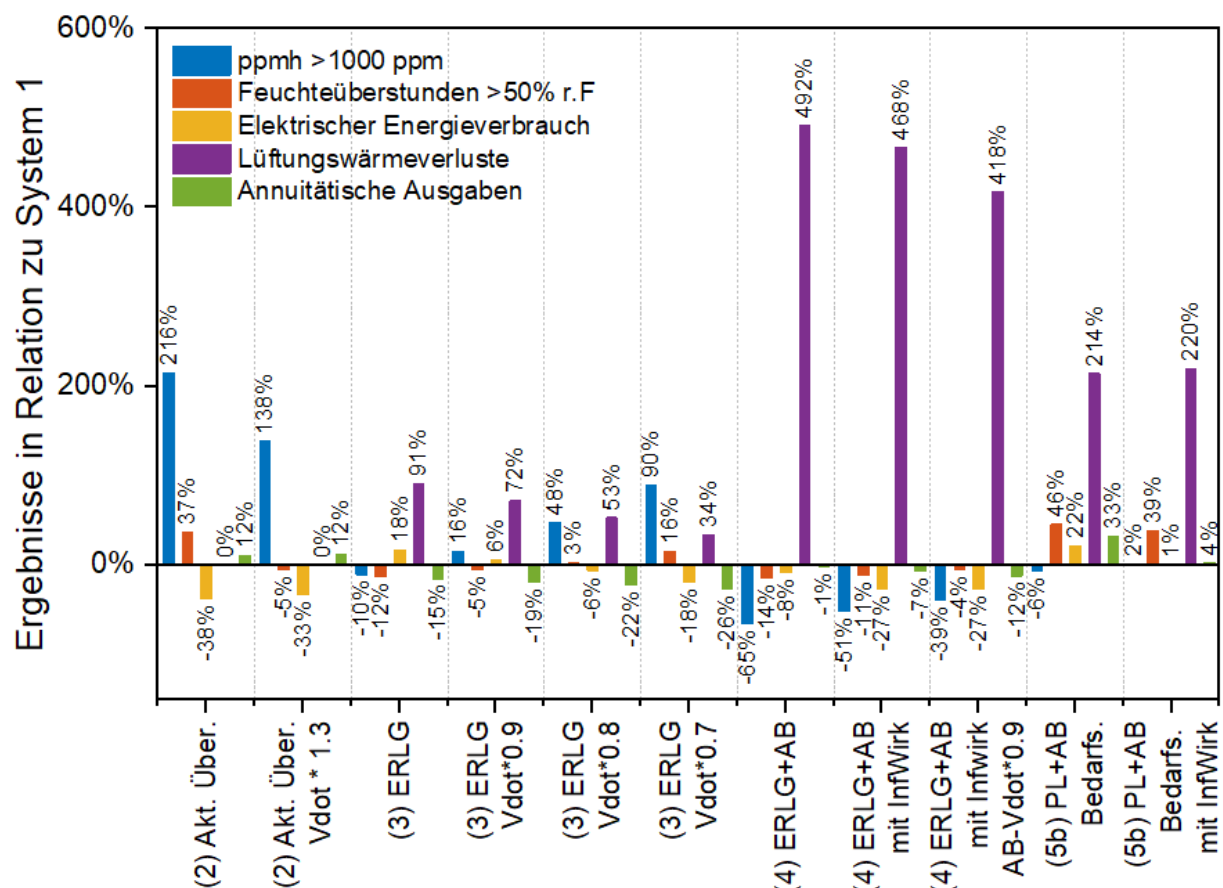


Abbildung 56 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für die Drei-Zimmer-Wohnung

### System 3 – Einzelraumlüftungsgerät

Das System mit Einzelraumlüftungsgeräten in allen Räumen weist für die Drei-Zimmer-Wohnung ohne Reduktion der Volumenströme eine höhere Luftqualität (bewertet an den CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und den Feuchteüberstunden) als das Referenzsystem auf. Allerdings sind auch die Lüftungswärmeverluste höher. Die Volumenströme werden um 10 % - 30 % reduziert. Bei einer Reduktion der Volumenströme um 10 % sind die Feuchteüberstunden noch 5 % niedriger als beim zentralen Lüftungssystem. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen dann 16 % über denen des Referenzsystems. Die Lüftungswärmeverluste sinken von 91 % über den des zentralen Lüftungssystem, auf 72 %. Die annuitätischen Kosten sind dann 19 % niedriger als die von System 1.

- Eine Reduktion des Volumenstroms um 10 % führt zu gleichen Feuchteüberstunden wie beim einem zentralem Lüftungssystem, jedoch sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden höher. Die Anpassung der Volumenströme führt zu einer Senkung der Lüftungswärmeverluste und der annuitätischen Ausgaben. Eine größere Senkung ist aufgrund der höheren Feuchteüberstunden nicht sinnvoll.

### System 4 – Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen

System 4 weist eine höhere Luftqualität als das Referenzsystem auf. Aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung in den Ablufträumen sind die Lüftungswärmeverluste um 492 % höher als beim Referenzsystem. Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms bei der Auslegung der Einzelraumlüftungsgeräte und einer Reduktion des Volumenstroms der Abluftventilatoren um 10 % sinken die Lüftungswärmeverluste auf 416 % über dem des zentralen Lüftungssystems. Die Feuchteüberstunden liegen 4 % unter dem Wert des System 1. Die CO<sub>2</sub>-Überstunden liegen 39 % unter denen des zentralen Lüftungssystems.

- Eine Anpassung der Volumenströme des System 4 durch Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms auf die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte und eine Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren um 10 %, resultiert in ähnlichen Feuchteüberstunden wie beim Referenzsystem und geringeren Lüftungswärmeverlusten. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen dabei immer noch deutlich unter denen des zentralen Lüftungssystems. Eine Anpassung wird daher als sinnvoll erachtet.

#### System 5b – Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Bedarfsführung nach DIN18017-3

System 5b weist ohne Anpassung CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden auf, die 6 % unter denen des zentralen Lüftungssystems liegen. Jedoch sind die Feuchteüberstunden 46 % höher als die des Referenzsystems. Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms erhöhen sich die Lüftungswärmeverluste auf 220 % über denen des zentralen Lüftungssystems. Die Feuchteüberstunden sinken auf 39 % über den von System 1.

- Das System 5b weist bei diesem Grundriss ohne Anpassung höhere Feuchteüberstunden als das Referenzsystem auf. Durch die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms sinken zwar die Feuchteüberstunden, allerdings steigen die Feuchteüberstunden CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und die annuitätischen Ausgaben.

#### Zusammenfassung Jahressimulation

Nachfolgend werden die Erkenntnisse der Jahressimulationen zusammengefasst. Die Ergebnisse lassen grundsätzlich darauf schließen, dass zwischen Grundrissen mit einem Raum (Studentenapartment) und Grundrissen mit mehreren Räumen (Zwei- & Drei-Zimmer-Wohnung) differenziert werden muss. So zeigten die Ergebnisse des Studentenapartments andere Tendenzen als die der anderen Grundrisse, wohingegen die Tendenzen von Zwei- & Drei-Zimmer-Wohnung übereinstimmten.

#### **Bewertung der Anpassung von Volumenströmen**

##### Anpassung beim Studentenapartment

Aufgrund der Geometrie ist das Studentenapartment besonders anfällig für zu hohe Feuchtwerte. Die untersuchten Varianten wiesen schon vor der Anpassung der Volumenströmen deutlich höhere Volumenströme als ein vergleichbares zentrales Lüftungssystem auf. Durch die Anpassung der Volumenströme konnten zwar die Lüftungswärmeverluste und die annuitätischen Ausgaben der Lüftungssysteme reduziert werden. Jedoch stiegen auch die Feuchteüberstunden weiter an, sodass eine Anpassung der Volumenströme nicht sinnvoll ist.

##### Anpassung bei der Zwei- & Drei-Zimmer-Wohnung

Bei beiden Grundrissen wurden bei Lüftungssystemen, bei denen Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen eingesetzt wurden und bei Lüftungssystemen, bei welchen Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit Abluftventilatoren verwendet wurden, geringere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als auch Feuchteüberstunden erzielt. Allerdings sind die Lüftungswärmeverluste bei diesen Lüftungssystemen immer höhere als bei einem vergleichbaren zentralen Referenzsystem. Bei den Lüftungssystemen, bei denen nur Einzelraumlüftungsgeräte zur Anwendung kommen, wird bei einer Reduktion der Volumenströme um 10 % dieselbe Luftqualität wie beim zentralen Lüftungssystem erreicht. Die Lüftungswärmeverluste sind dann immer noch höher als beim zentralen System, konnten aber reduziert werden. Wird eine Nutzungseinheit mit mehr als einem Zulufttraum ausschließlich durch Einzelraumlüftung belüftet, ist eine Reduktion der Volumenströme um 10 % gegenüber der Normvolumenströme empfehlenswert.

Bei Lüftungssystemen bei denen Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren kombiniert werden, kann sowohl der wirksame Infiltrationsvolumenstrom bei der Auslegung der Einzelraumlüftungsgeräte

angesetzt werden, als auch der Volumenstrom der Abluftventilatoren um 10% reduziert werden, ohne dass eine schlechtere Luftqualität als beim zentralen Lüftungssystem erzielt wird. Die Lüftungswärmeverluste und die annuitätische Ausgaben sinken, jedoch sind die Lüftungswärmeverluste immer noch größer als beim zentralen Lüftungssystem. Eine Anrechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme, als auch eine gleichzeitige Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren um 10 % ist aufgrund der zuvor aufgeführten Auswirkungen zu empfehlen.

## Entscheidungsgrundlage bei der Wahl eines Lüftungssystems in Abhängigkeit des Grundrisses

### Übersicht über alle Varianten

In Abbildung 57 ist eine Übersicht aller Parameter der untersuchten Lüftungssysteme und deren empfohlenen Varianten gegeben. Diese Übersicht kann als Unterstützung bei der Auswahl eines Lüftungssystems für einen gegebenen Grundriss verwendet werden. In der Aufstellung wurde im Gegensatz zu den bisher verwendeten Darstellungen die absoluten Zahlen der jeweiligen Parameter verwendet. Die farbliche Einteilung wurde für jede Zeile folgendermaßen vorgenommen:

- Kleinster Wert in der Zeile  $\triangleq$  grün
- Mittelwert  $\triangleq$  gelb
- Größter Wert in der Zeile  $\triangleq$  orange

Auflistung der Ergebnisse der Jahressimulation aller Lüftungssysteme und deren Varianten für die Grundrisse der 1-, 2- und 3-Zimmer-Wohnung.	1	2	2.1	3	3.1	4	4.1	5a	6	7	8a	8b	9
	Zentrales Lüftungssystem (Referenzsystem)	Zentrales Lüftungssystem + aktiven Überströmen	Zentrales Lüftungssystem + aktiven Überströmen Vdot*1,3	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte Vdot*0,9	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Zulufräumen) + Abluftventilatoren (Ablufräumen) (Betrieb nach DIN1946-6)	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Zulufräumen) + Abluftventilatoren (Ablufräumen) (Betrieb nach DIN1946-6) mit InMik + Vdot*0,9	Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte (Zulufräumen) + Abluftventilatoren (Ablufräumen) (Betrieb nach DIN1946-6)	Regenerative Einzelraumlüftungsgeräte (Zulufräume), Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Ablufräume)	Abluftanlage (DIN1946-6)	Abluftanlage (DIN18017-3 in Bad und Küche) (Reduzierter Betrieb)	Abluftanlage (DIN18017-3 in Bad und Küche) (Anwesenheitsgeführt)	Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte (Auslegung reduzierter Betrieb) + idealisierte Fensterlüftung
kleinster Wert													größter Wert
<b>1-Zimmer</b>													
CO2-Über(ppm)stunden in ppmh/a	16.000			-	18.000	18.000	27.000	18.000	-	16.000	4.600	-	210.000
Feuchteüberstunden in h/a	2.300			3.100	3.500	2.400	2.900	2.400	3.100	2.300	2.100	2.500	4.000
Elektrischer Energieverbrauch in kWh/a	80			46	42	36	28	52	62	27	29	17	32
Lüftungswärmeverluste in kWh/a	320			310	290	1.000	870	1.000	310	1.600	1.700	1.000	360
Annuitätische Kosten in €/a	400			32	32	55	40	100	99	36	7	6	36
<b>2-Zimmer</b>													
CO2-Über(ppm)stunden in ppmh/a	300.000	9,1E+05	6,3E+05	2,6E+05	2,9E+05	24.000	45.000	24.000	2,6E+05	7,6E+05	2,1E+06	3,6E+06	600.000
Feuchteüberstunden in h/a	3.600	4.100	3.900	3.000	3.200	3.100	3.400	3.100	3.000	3.900	5.100	7.600	3.500
Elektrischer Energieverbrauch in kWh/a	110	68	70	130	120	100	84	150	180	38	29	21	52
Lüftungswärmeverluste in kWh/a	460	460	460	880	790	2.800	2.400	2.800	880	2.300	1.700	1.200	1.100
Annuitätische Kosten in €/a	440	460	470	290	270	470	310	470	410	120	53	4	270
<b>3-Zimmer</b>													
CO2-Über(ppm)stunden in ppmh/a	1,3E+06	4,0E+06	3,0E+06	1,2E+06	1,5E+06	4,5E+05	7,8E+05	4,5E+05	1,2E+06	2,0E+06	4,7E+06	6,3E+06	1,8E+06
Feuchteüberstunden in h/a	5.100	6.900	4.800	4.400	4.800	4.300	4.800	4.300	4.400	5.400	7.300	8.500	5.100
Elektrischer Energieverbrauch in kWh/a	110	71	76	130	120	100	83	150	180	38	29	27	84
Lüftungswärmeverluste in kWh/a	460	460	460	880	790	2.700	2.400	2.700	880	2.300	1.700	1.600	970
Annuitätische Kosten in €/a	450	500	500	380	360	440	400	600	540	130	67	49	370

Abbildung 57 Übersicht über Kennwert aller Lüftungssysteme und Grundrisse, welche in der Jahressimulationen ermittelt wurden

### Anwendung der Übersichtsmatrix

Beim Betrachten der Abbildung 57 wird ersichtlich, dass ein Lüftungssystem welches alle Bedürfnisse zur Gänze befriedigt nicht existiert. Zusätzlich ist die Wahl eines Lüftungssystems nicht ausschließlich auf die hier dargestellten Parameter zu begründen. Neben den hier dargestellten Parametern fließen in die Entscheidung auch bspw. die Akustik, Design und Luftfilterung sowie persönliche Vorlieben mit ein (s. Kapitel Studie zur Nutzerakzeptanz von Wohnraumlüftungssystemen).

Die Matrix vermittelt einen vergleichenden Überblick der verschiedenen Systeme. Eine absolute Bewertung würde allgemein anerkannte Grenzwerte oder Kriterien zur Bewertung voraussetzen. Insbesondere für die in diesem Projekt eingeführten kumulierten Kenngrößen für die Luftqualität oder die Feuchte existieren solche Werte nicht. Die folgenden Ausführungen sollen eine mögliche Anwendung der Matrix vorstellen.

### 1-Zimmer

Für eine Wohnung mit einem Zimmer werden bei allen Lüftungssystemen bis auf System 9 vergleichbare Luftqualitäten erzielt. Die annuitätischen Kosten sind am höchsten für System 1 – zentrales Lüftungssystem und am niedrigsten für die Abluftanlage nach DIN 18017-3 mit Anwesenheitsführung. Die Lüftungswärmeverluste sind am niedrigsten bei System 1 und am höchsten bei den Abluftsystemen. Da das System 3 – rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte vergleichbare Luftqualität und Lüftungswärmeverluste wie das System 1, jedoch deutlich geringer annuitätische Kosten aufweist, ist dieses System für diesen Grundriss zu favorisieren. Die Systeme, bei denen Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftsystemen kombiniert werden (Systeme 4, 5a, 6) produzieren zwar dieselbe Luftqualität wie System 1 und 3, haben jedoch höhere Lüftungswärmeverluste.

### 2-Zimmer / 3-Zimmer

Hierbei weisen alle Lüftungssysteme eine ähnliche Luftqualität auf. Die Abluftanlagen nach DIN 18017-3 im reduzierten Betrieb und mit Anwesenheitsführung weisen im Vergleich zu den anderen Systemen höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden auf. Wie eingangs erwähnt ergeben sich je nach Priorisierung der verschiedenen Eigenschaften auch unterschiedliche Bewertungsergebnisse. Im Folgenden werden die für die jeweiligen Anforderungsbedürfnisse geeignetsten Lüftungssysteme vorgestellt.

### Niedrige annuitätische Kosten

Sind hauptsächlich die annuitätischen Kosten die Faktoren für die Auswahl eines Lüftungssystems, werden diese am besten durch die Abluftanlagen nach DIN 18017-3 erfüllt. Diese weisen im Vergleich zu den anderen Lüftungssystemen die niedrigsten annuitätischen Kosten auf.

### Niedrige annuitätische Kosten + gute Luftqualität

Wird zusätzlich zu niedrigen annuitätischen Kosten auch Wert auf Luftqualität gelegt, empfiehlt sich die Verwendung einer Abluftanlage nach DIN 1946-6.

### Gute Luftqualität + niedrige Lüftungswärmeverluste

Liegt der Fokus auf guter Luftqualität und gleichzeitig niedrigen Lüftungswärmeverlusten sind rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte mit einer Reduktion des Volumenstroms um 10 % (gegenüber des Auslegungsvolumenstrom nach DIN 1946-6) zu empfehlen. Als Alternative mit vergleichbaren Parametern können rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte im reduzierten Betrieb in Kombination mit Fensterlüftung zum Einsatz kommen.

## Bewertung der Effizienz der Lüftungssysteme

Die Luftqualität, die Lüftungswärmeverluste und die elektrische Leistungsaufnahme haben einen direkten Zusammenhang zueinander. Durch eine Erhöhung des Luftwechsels steigen die Lüftungswärmeverluste, die elektrische Leistungsaufnahme des Lüftungssystems und die Luftqualität. Während eine hohe Luftqualität erstrebenswert ist, sind Lüftungswärmeverluste und elektrischer Energieverbrauch zu vermeiden. Ein effizientes Lüftungssystem erreicht eine hohe Luftqualität bei möglichst geringen Lüftungswärmeverlusten und elektrischer Leistungsaufnahme. Für die Bewertung der Effizienz wurde in Kapitel Bewertungsgrößen die relative Lüftungsaufwandszahl eingeführt. In die Lüftungsaufwandszahl fließen die Lüftungswärmeverluste, die vom Lüftungssystem aufgenommene Energie, sowie die Luftqualität in Form von CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden ein. Diese werden ins Verhältnis zum Referenzsystem, dem zentralen Lüftungssystem, gesetzt. Das Referenzsystem hat daher eine Lüftungsaufwandszahl von 1. Ist die Lüftungsaufwandszahl kleiner als 1, ist das betrachtete System effizienter als das Referenzsystem. Eine Lüftungsaufwandszahl größer als 1 bedeutet ein ineffizienteres System. Nachfolgend werden die Lüftungsaufwandszahlen für alle bisher betrachteten Lüftungssysteme vorgestellt.

### Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3

In Abbildung 58 sind die relativen Lüftungsaufwandszahlen für die Lüftungssysteme des Studentenapartments aufgetragen. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden des Referenzsystems sind sehr gering, wodurch bei Lüftungssystemen mit deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden (z.B. System 5b) der Anteil der Luftqualität einen hohen Einfluss auf die relative Lüftungsaufwandszahl hat. Bei System 3 & 6 fallen keine CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden an. Die Lüftungswärmeverluste sind vergleichbar mit denen von System 1. Die elektrische Leistungsaufnahme liegt bei beiden Systemen unter der des Referenzsystems. Hieraus resultiert eine geringe Lüftungsaufwandszahl von 0,4.

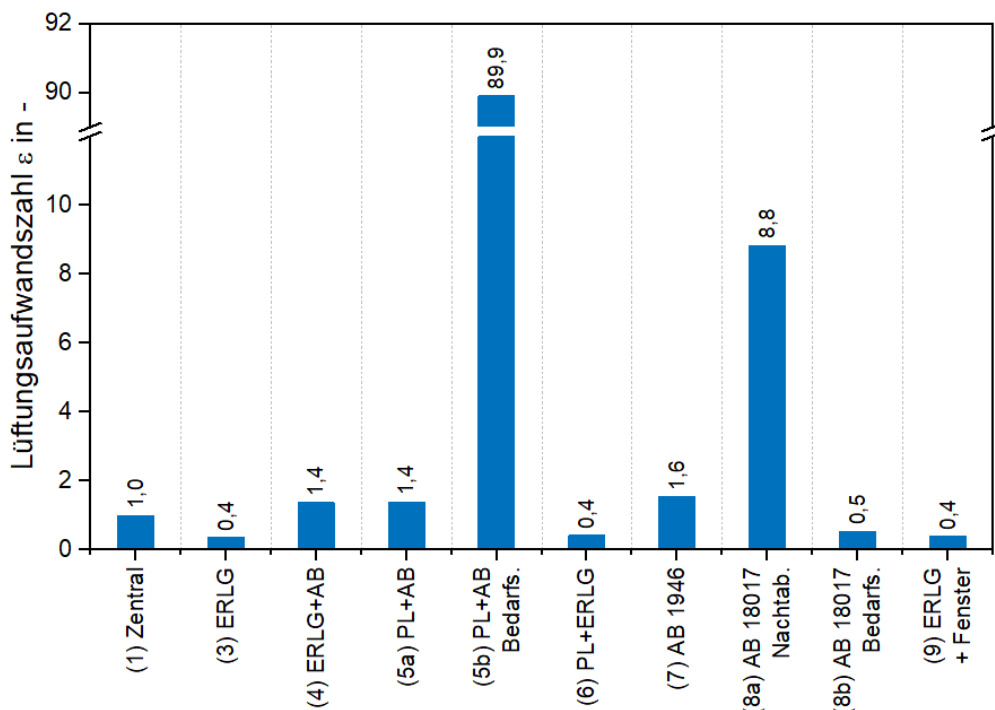


Abbildung 58 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme des Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3

System 4, 5a & 7 erreichen die gleichen CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden wie System 1, haben jedoch aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung des Abluftventilators höhere Lüftungswärmeverluste. Die

elektrische Leistungsaufnahme ist im Vergleich zum Referenzsystem geringer. Dies führt zu einer Lüftungsaufwandszahl von 1,4 für die Systeme 4 & 5a. Die Einzelraumlüftungsgeräte von System 4 & 5a nutzen Wärmerückgewinnung, System 7 hingegen verfügt über keine Wärmerückgewinnung. Die Lüftungswärmeverluste sind daher höher als bei System 4 oder 5a, dementsprechend ist auch die Lüftungsaufwandszahl mit 1,6 höher. Die Lüftungsaufwandszahl für System 5b & 8a tritt hier durch die eingangs erwähnte Verzerrung, aufgrund der stark abweichenden Werte der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden zwischen Referenzsystem und den betrachteten Systemen, auf. Die Systeme 8b & 9 sind aufgrund geringerer Lüftungswärmeverluste und geringen CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden effizienter als z.B. die Systeme 4 & 5b. System 9 ist mit einer Lüftungsaufwandszahl von 0,4 effizienter als das Referenzsystem.

Abbildung 59 zeigt die Lüftungsaufwandszahlen für die Varianten der Lüftungssysteme des Studentenapartments. Durch den Vergleich der Lüftungsaufwandszahlen der Varianten kann ermittelt werden, ob eine Variante eine Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen System erzielt. Für System 3 führt eine Reduktion des Volumenstroms von mehr als 10 % zu einer deutliche schlechteren Lüftungsaufwandszahl. Von einer Reduktion des Volumenstroms von mehr als 10 % sollte daher abgesehen werden. Ebenfalls führt eine Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms bei den Systemen 4 & 5b zu keiner Verbesserung und sollte daher nicht angewandt werden.

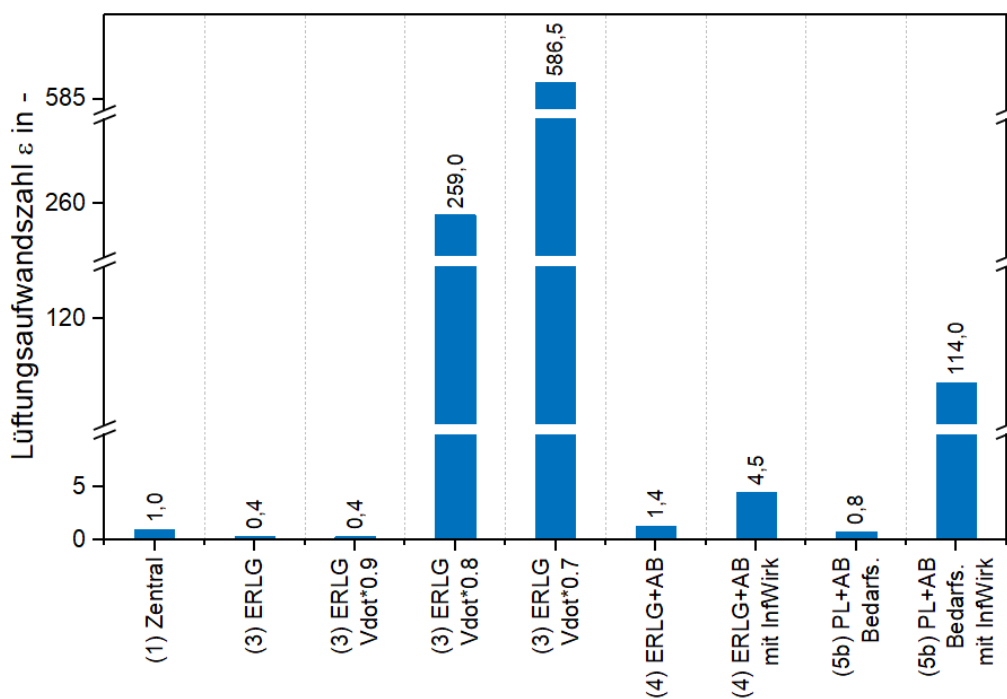


Abbildung 59 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme des Studentenapartments unter Berücksichtigung der DIN 18017-3

#### Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3

Die relative Lüftungsaufwandszahl für die Lüftungssysteme des Studentenapartments ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3 sind in Abbildung 60 aufgeführt. Für System 3 & 6 liegen die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden bei 0 ppmh. Die Lüftungswärmeverluste entsprechen denen des Referenzsystems. Hieraus resultiert eine Lüftungsaufwandszahl von 0,4. System 4, 5a & 7 haben ähnliche CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden wie System 1, jedoch sind die Lüftungswärmeverluste aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung höher. Die elektrische Leistungsaufnahme der Systeme ist geringer als die des Referenzsystems. Die Lüftungsaufwandszahl von 1,3 (System 4), 1,4 (System 5a) und 1,6 (System 7) zeigen, dass diese Systeme weniger effizient sind als das Referenzsystem. Da die Einzelraumlüftungsgeräte der System 4 & 5a über Wärmerückgewinnung verfügen, sind die

Lüftungswärmeverluste geringer als bei System 7, welches über keine Wärmerückgewinnung verfügt. Somit ist auch die Lüftungsaufwandszahl der Systeme 4 & 5a geringer als die des System 7. System 9 weist deutlich geringere Lüftungswärmeverluste als die Systeme 4, 5a oder 7 auf, jedoch sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden höher. Dies führt zu einer Lüftungsaufwandszahl von 6,9.

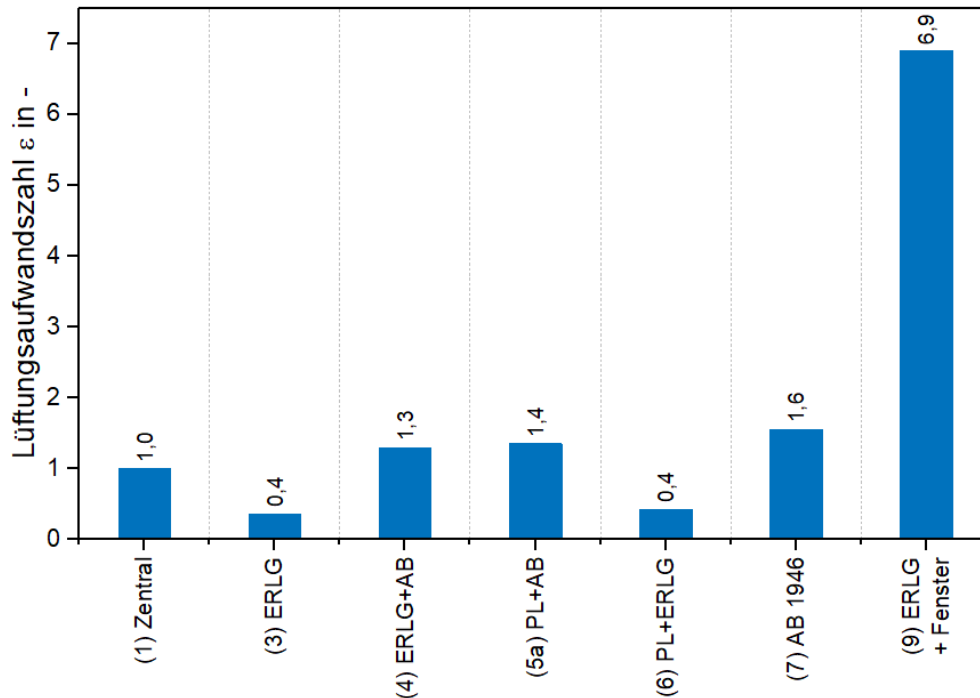


Abbildung 60 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 180017-3

Abbildung 61 zeigt die Lüftungsaufwandszahl der Varianten der Lüftungssysteme für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3. Die Lüftungsaufwandszahlen der Varianten sind dabei immer höher als die der Ausgangsvarianten. Dies bedeutet, dass keine der Varianten eine Verbesserung gegenüber der Auslegung nach DIN 1946-6 bewirkt.



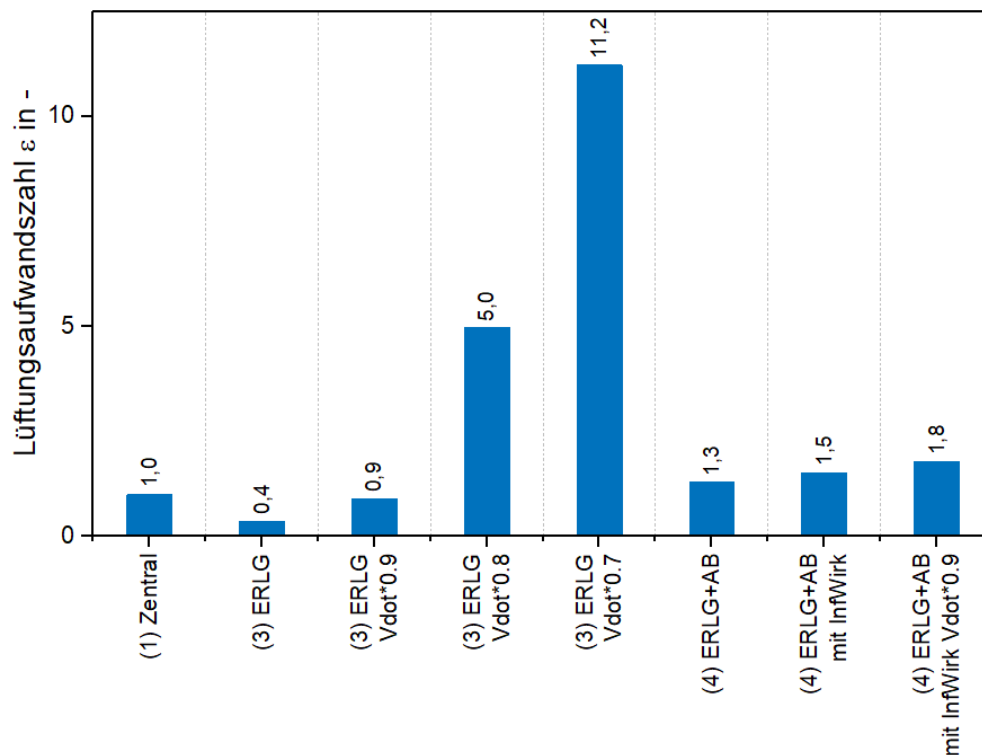


Abbildung 61 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme des Studentenapartments ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3

### Zwei-Zimmer-Wohnung

Die Lüftungsaufwandszahlen für die Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung sind in Abbildung 62 dargestellt. Für System 2 liegt die Lüftungsaufwandszahl bei 2,0. Die Lüftungswärmeverluste von System 2 sind identisch mit denen des Referenzsystems. Der elektrische Energiebedarf ist geringer als der des Referenzsystems. Jedoch sind die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden von System 2 höher. Die Lüftungsaufwandszahl von System 3 & 6 liegt trotz der geringeren CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden gering höher als die des Referenzsystems, da die Lüftungswärmeverluste höher sind. Die Systeme 4 & 5a weisen deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als System 1 auf. Aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung sind die Lüftungswärmeverluste höher. Die Lüftungsaufwandszahl liegt daher bei 1,8 bzw. 1,9. System 5b, 8a, 8b & 9 weisen höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchtestunden auf als das Referenzsystem und sind daher weniger effizient.

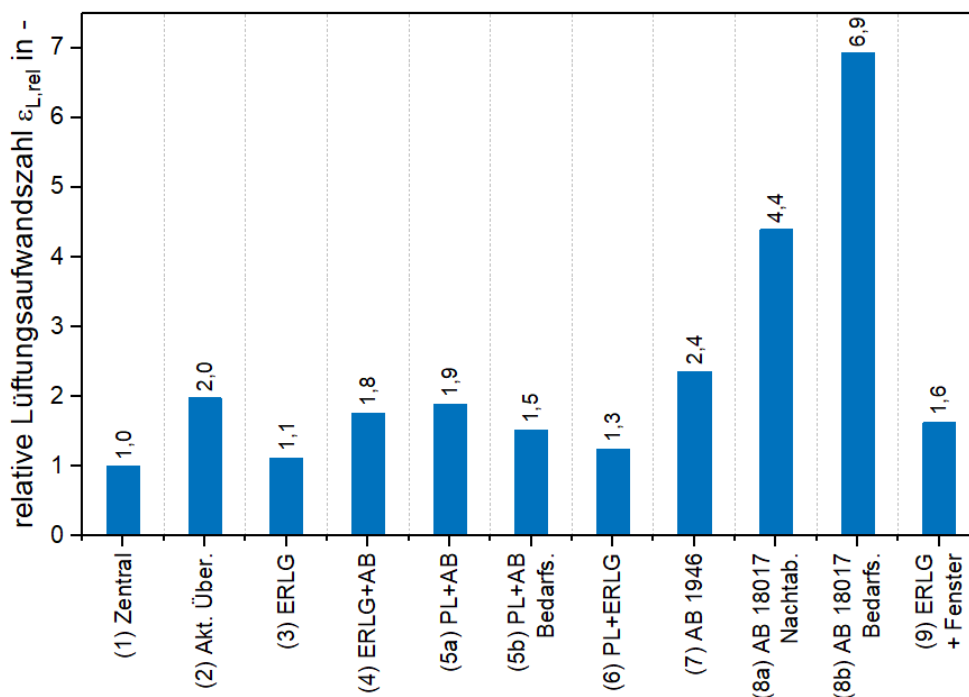


Abbildung 62 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung

In Abbildung 63 sind die Lüftungsaufwandszahlen von den Varianten der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung dargestellt. Eine Erhöhung des Volumenstroms bei System 2 zeigt eine Verbesserung der Lüftungsaufwandszahl von 1,9 auf 1,4. Eine Erhöhung ist daher zu empfehlen. Bei System 3 führt eine Reduktion des Volumenstroms bis zu 10 % zu einer Reduktion der Lüftungsaufwandszahl. Bei einer weiteren Reduktion des Volumenstroms steigt die Lüftungsaufwandszahl. Eine Reduktion des Volumenstroms um mehr als 10 % ist daher nicht empfehlenswert. Bei System 4 führt sowohl eine Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms, als auch eine weitere Reduktion des Volumenstroms um 10 % jeweils zu einer Reduktion der Lüftungsaufwandszahl. Beide Maßnahmen tragen daher zur Steigerung der Effizienz bei. Bei System 5b hat die Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms eine Erhöhung der Lüftungsaufwandszahl und somit eine Reduktion der Effizienz zur Folge.

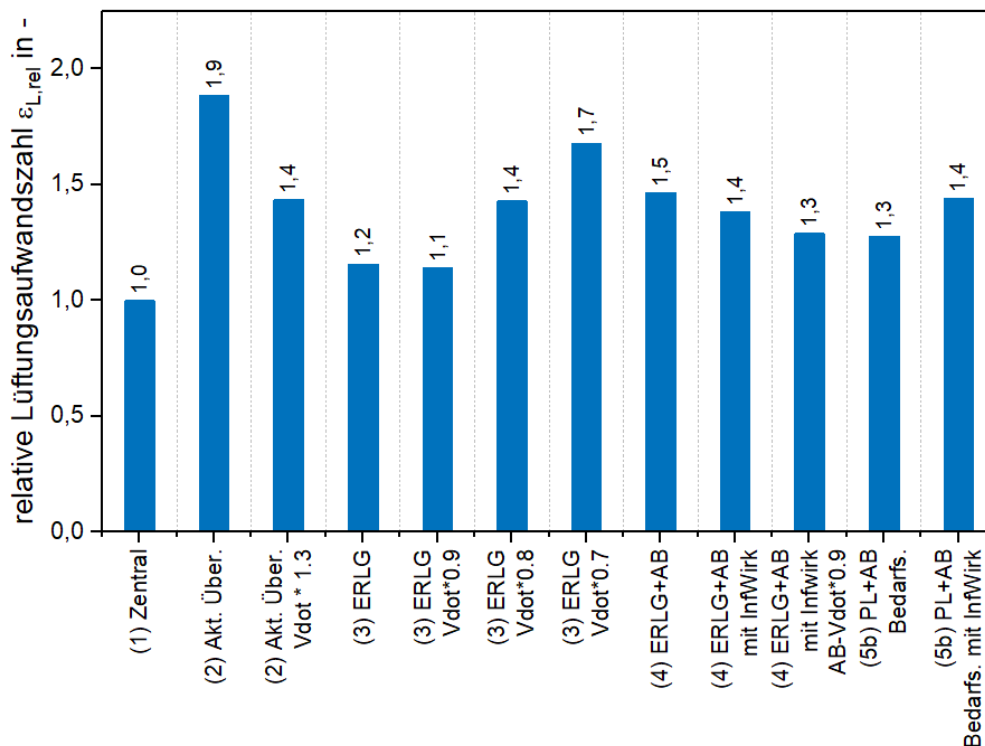


Abbildung 63 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung

### Drei-Zimmer-Wohnung

In Abbildung 64 sind die Lüftungsaufwandszahlen für die Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung aufgeführt. Die Lüftungsaufwandszahlen sind dabei vergleichbar mit denen der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung.

Abbildung 65 zeigt die Lüftungsaufwandszahlen für die Varianten der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung. Die Ergebnisse der Varianten sind gleich zu denen der Zwei-Zimmer-Wohnung.

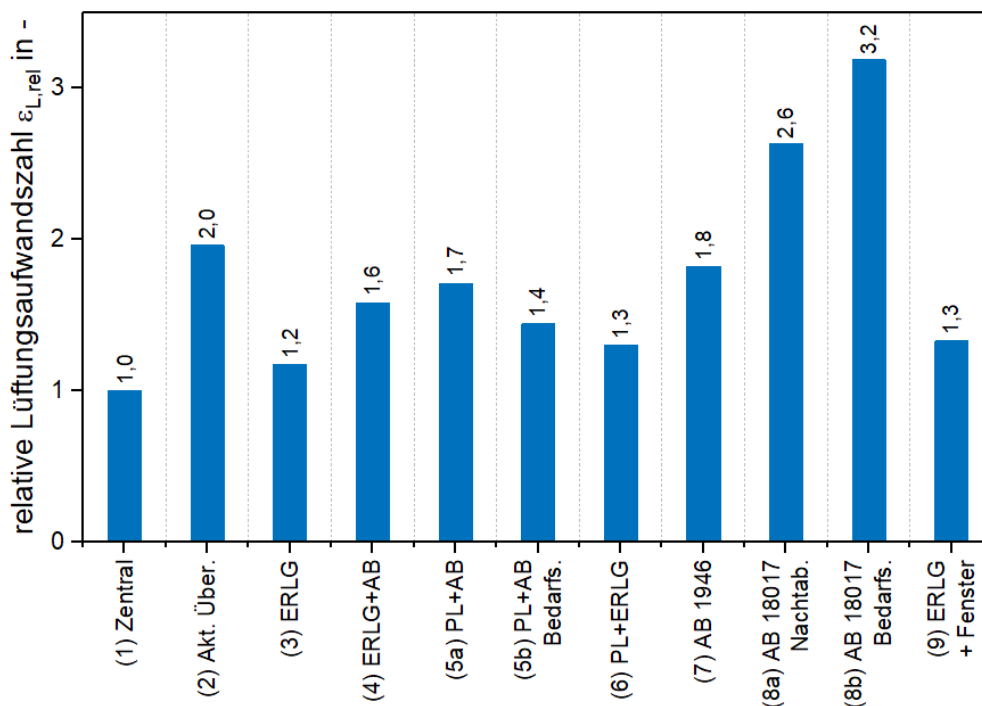


Abbildung 64 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung

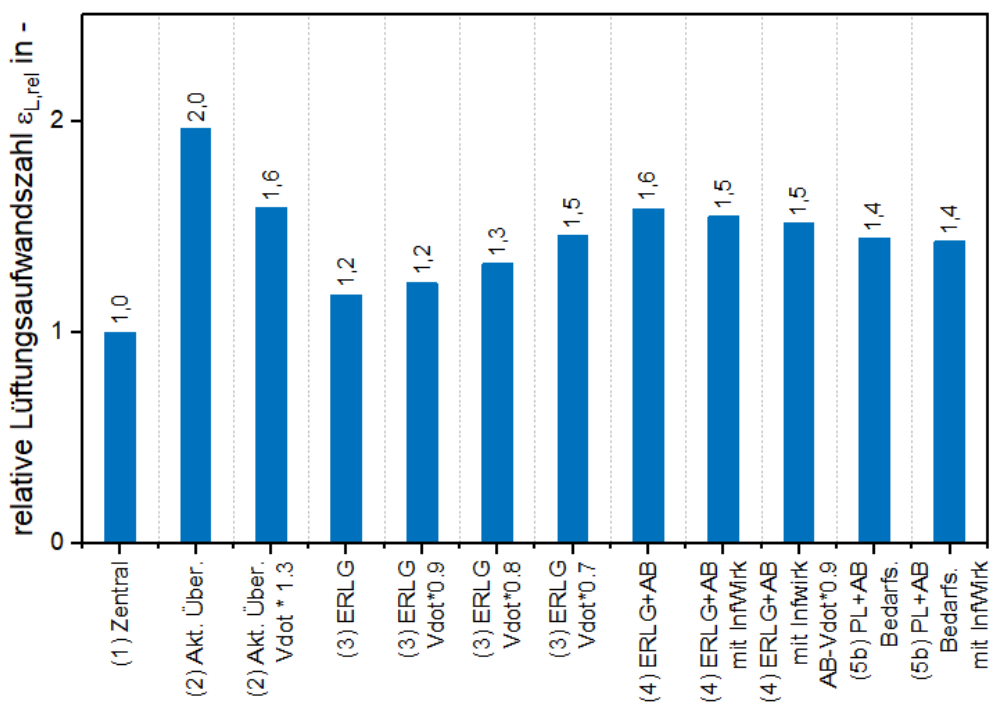


Abbildung 65 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung

## Thermische Behaglichkeit der Lüftungssysteme

Ziel der Behaglichkeitsmessungen war es, Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Lüftungssysteme bei winterlichen Außenbedingungen auf die Behaglichkeit zu erhalten. Daher wurde die an die Südwand angrenzende Klimakammer bereits mindestens 12 h vor dem Start der Messung auf  $-10^{\circ}\text{C}$  heruntergekühlt, sodass sich in der Außenwand ein Temperaturgefälle von innen nach außen einstellen kann und während der Messung ein möglichst stationärer Zustand herrscht. Gleichzeitig wurde die Innentemperatur durch einen Heizkörper auf  $20^{\circ}\text{C}$  geregelt. Beim zentralen Lüftungssystem wurde zudem die Zulufttemperatur auf  $20^{\circ}\text{C}$  gehalten.

Bei den Behaglichkeitsmessungen waren alle Luftdurchlässe mit den dazugehörigen Blenden versehen, sodass die Strömungsbedingungen, den der gängige Lüftungssysteme im Einsatz entsprechen. Die Lüftungsmaßnahme wurde aktiviert, sobald alle Randbedingungen zufriedenstellend waren. Die für die Auswertung relevanten Messdaten wurden ab diesem Zeitpunkt in Betracht gezogen. Technisch bedingt durch das verwendete Messsystem mussten die Messungen während der Hochfrequenzmessungen der Luftgeschwindigkeiten, für einen Zeitraum von bis zu 10 min unterbrochen werden. Diese Messung mit einer Frequenz von ca. 10 Hz wurde für die Berechnung des Turbulenzgrades herangezogen, der in die Berechnung von DR einfließt. Der Zeitraum der Hochfrequenzmessungen wurde so gewählt, dass die Messung erstens möglichst frei von Störeinflüssen ist und zweitens die Unterbrechung der Messung der anderen Größen vertretbar ist.

Die Messungen zur Behaglichkeit fanden zunächst im Wohnzimmer statt. Abbildung 66 soll dazu einen Überblick über die Position der beiden Messbäume sowie die verschiedenen, möglichen Luftdurchlässe geben. Gemessen wurden alle Systeme im Normalbetrieb (nach DIN 1946-6), also Systeme (1) Zentral, (2) Akt. Über., (3) ERLG, (4) ERLG+AB, (5a) PL+AB, (5b) PL Zul.+AB (hier: Abluftventilatoren konstant, ohne Präsenzführung), (6) PL+ERLG, (7) AB 1946, (9) ERLG+Fenster, sowie zusätzlich reine Fensterlüftung (im Folgenden auch als „Fenster“ oder „reine Fensterlüftung“ bezeichnet).

Im Anschluss wurden ergänzende Messungen von (7) AB 1946, (9) ERLG+Fenster und Fenster sowie als Referenzsystem (1) Zentral im Schlafzimmer vorgenommen (gekennzeichnet mit SZ, aus organisatorischen Gründen stand zum Zeitpunkt der Messungen nur dieser Raum zur Verfügung). Dies geschah unter annähernd gleichen Randbedingungen und unveränderter Betrachtung einer Wohnzimmersituation, aber mit Luftgeschwindigkeitsmessungen auf Knöchelhöhe (0,1 m) anstatt, wie zuvor im Wohnzimmer, auf Nackenhöhe (1,7 m). Der Grund für die zusätzlichen Messungen auf 0,1 m war, dass ausgewählte Systeme ohne Wärmerückgewinnung mit erwartbar starkem Temperaturgefälle nach unten gesondert betrachtet werden sollten. Im selben Zuge fanden deshalb auch die Messungen mit Fensterlüftung ((9) ERLG+Fenster und reine Fensterlüftung) statt. Dabei unterschieden sich die Messungen an (9) ERLG+Fenster und reiner Fensterlüftung auch bezüglich des gewählten Zuluftbereichs: Bei (9) ERLG+Fenster wurde der Messbaum für den Zuluftbereich vor dem Einzelraumlüftungsgerät aufgestellt, während er sich während der reinen Fensterlüftung vor dem Fenster befand.

### Bestimmung der Parameter zur Berechnung des PMV nach ISO 7730

Der Bekleidungsfaktor wurde entsprechend winterlicher Bekleidung im Innenraum zu  $cl_0=1$  angesetzt, was einem Isolationswert  $I_{cl}$  von  $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$  entspricht. Der Aktivitätsgrad wurde entsprechend einer entspannt sitzenden Person zu  $met=1$  angesetzt, was einem Energieumsatz von  $58 \text{ W}$  entspricht. Die abgegebene, wirksame mechanische Leistung wurde zu  $w_{me}=0$  angesetzt, was  $0 \text{ W}$  entspricht.

### Probleme bei der Innentemperaturregelung auf 20 °C und nachträgliche Anpassung der gemessenen Temperaturen

Die Temperatur im Raum wurde während den Messungen im Raum über eine Heizung auf 20 °C geregelt. Die Temperaturmessstelle befand sich hierbei in der Raummitte. Bei der Auswertung der Messungen stellte sich heraus, dass bei 20 °C schon kleinere lokale Abweichungen von der Solltemperatur an den Messbäumen ausreichen, um die Behaglichkeit so stark zu beeinträchtigen, dass diese Schwankungen in den Randbedingungen über den tatsächlich Lüftungssystemspezifischen Einfluss auf die Behaglichkeit dominieren. Um den spezifischen Einfluss der Lüftungssysteme besser hervorzuheben, wurde nachträglich die Messreihe der Strahlungstemperatur sowie der Lufttemperatur nach der Vorschrift in Formel (20) angepasst. Der Verlauf der gemessenen Temperaturen wurde dabei erhalten. Es wurden jedoch jeder Temperaturwert  $\vartheta_{ti}$  um die Differenz des Maximalwerts aller gemessenen Temperaturwerte der jeweiligen Messreihe ( $\max(\vartheta(t))$ ) zu 22°C verschoben.

$$\vartheta_{t_i,a} = \vartheta_{t_i} + (22^{\circ}\text{C} - \max(\vartheta(t))) \quad (20)$$

Mit

$\vartheta_{a,t_i}$	Als angepasste Temperatur zum Zeitpunkt i	in	°C
$\vartheta_{t_i}$	Als Temperaturwert vor der Anpassung zum Zeitpunkt i	in	°C
$\vartheta(t)$	Als Zeitreihe der gemessenen Temperaturen über den Messzeitraum	in	°C

Die Verschiebung des Temperaturverlaufs mit Orientierung am Maximalwert (und nicht etwa beispielsweise am Mittelwert) fand deshalb statt, weil so die Fensterlüftung, die einen ausgeprägten Temperaturabfall bei Beginn der Lüftungsmaßnahme aufweist, ebenfalls gut einbezogen werden kann. Ein Effekt dieser Maßnahme ist, dass Innentemperaturen so verändert werden, als ob die Innensolltemperatur der Heizungsregelung 22°C gewesen wäre. Analog dazu muss von einem ähnlichen Effekt, wie der Anhebung der Außensolltemperatur von -10°C auf -8°C ausgegangen werden. Auf eine zusätzliche Anpassung der relativen Luftfeuchten aufgrund des Zusammenhangs zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte wird hier verzichtet, da die Temperaturänderung relativ gering ist und sich die relative Luftfeuchte ebenfalls vergleichsweise gering auf die Größen zur Behaglichkeit auswirkt.

Bei der Temperaturanpassung wird außerdem eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Raum zu Beginn der Messung suggeriert. Obwohl dies tatsächlich aufgrund der ausschließlich konvektionsbedingten Luftströme und einer sich im Vorfeld ggf. eingestellten Temperaturschichtung nicht immer exakt zutrifft, wird hier angenommen, dass bei Aktivieren der Lüftungsmaßnahme der Einfluss dieser über die Temperaturverteilung im Raum überwiegt. Die Temperaturanpassung käme hier also einer perfekten Durchmischung der Luft im Raum und anschließendem Aktivieren der Lüftungsmaßnahme gleich.

In die Berechnung des PD fließt die Differenz zwischen der Temperatur auf 1,7 m und 1,1 m Höhe ein. Da ausschließlich die Temperaturdifferenz in den PD einfließt, ist eine Verschiebung der Temperaturverläufe hier nicht nötig. Da sich zudem die Anpassung der Temperaturen verfälschend auf die Temperaturdifferenz und somit auf das Ergebnis auswirken könnte, wird der PD mit den originalen Messwerten berechnet.

## Messaufbau Wohnzimmer

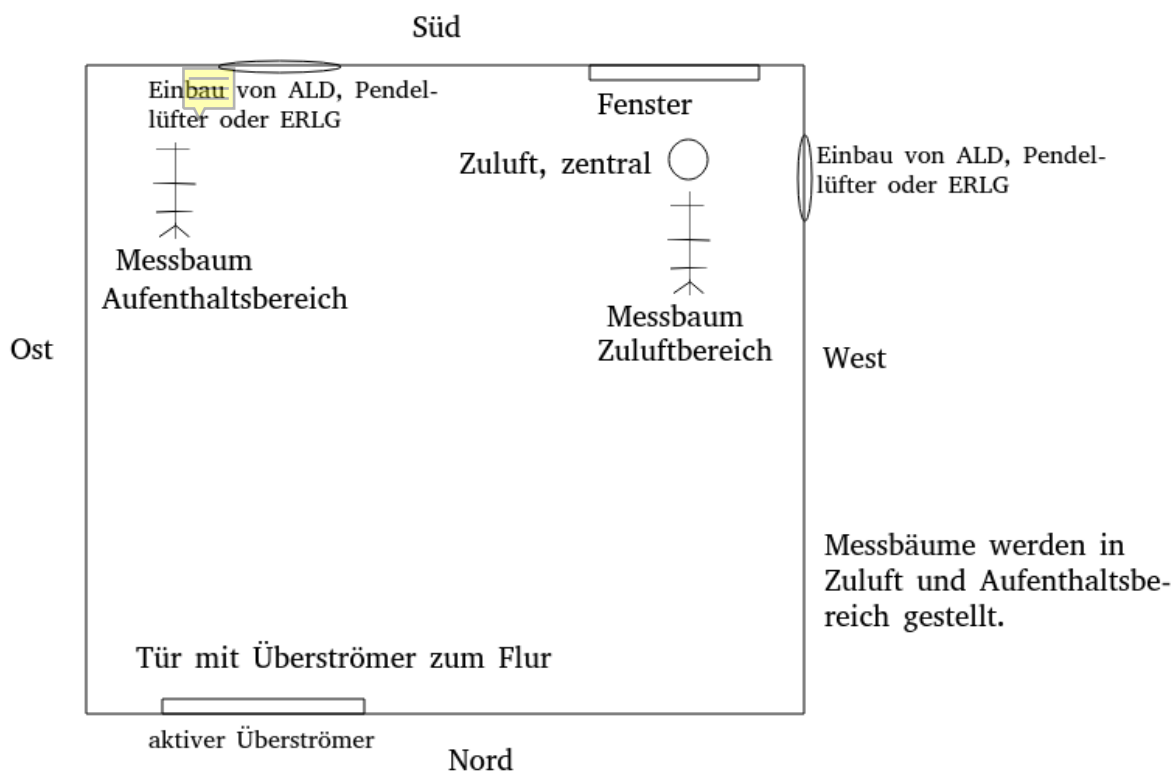


Abbildung 66 Anordnung der Messgeräte sowie der Luftdurchlässe bei der Behaglichkeitsmessung im Wohnzimmer (Position Messbaum Zuluftbereich variabel: Hier platziert für Messung an zentralem Lüftungssystem)

### Berechnung repräsentativer Werte für die instationäre Fensterlüftung am Beispiel des PPD-Wertes

Dieser Abschnitt beschreibt, wie verfahren wurde, um vergleichbare Größen zur Bewertung der Behaglichkeit bei den instationären Lüftungssysteme Fenster und (9) ERLG+Fenster zu erhalten. Dies geschieht hier am Beispiel von PPD, wurde aber auch analog hierzu für die Werte PD und DR gemacht. Abbildung 67 zeigt am Beispiel der Fensterlüftung im Zuluftbereich auf 0,1 m Höhe den zeitlichen Verlauf aller Messwerte sowie der Größen zur Behaglichkeit nach ISO 7730.

Für die Bewertung der Systeme und den Vergleich sollten die Mittelwerte über den Messzeitraum herangezogen werden. Bei den meisten Lüftungssystemen waren die Werte über den Betrachtungszeitraum weitgehend konstant. Da es sich bei der Fensterlüftung (Systeme Fenster, (9) ERLG+Fenster, im Folgenden auch als instationäre Lüftungssysteme bezeichnet) um keinen stationären Vorgang handelt, und diese außerdem in der Simulation an die Anwesenheit von Personen gekoppelt waren, stellte sich ein Vergleich dieser Systeme mit den anderen, stationär betriebenen Systemen zunächst als schwierig dar. Berücksichtigt man Auf-/Zu-Verhältnis und die mittlere Öffnungszeit der Fenster sowie die Anwesenheitszeit von Personen im Raum, während der eine Fensterlüftung meist auftritt und dann auch zu verminderter Behaglichkeit führt, so lässt sich über gewichtete Mittelung ein repräsentativer Ersatz-PPD-Wert  $PPD_{repr}$ , nach Gleichung (21) berechnen. Die benötigten Zeitwerte wurden aus den Ergebnissen der Jahressimulationen ermittelt und sind in Tabelle 40 aufgelistet.

Die PPD-Werte wurden graphisch aus den Ergebnissen der Behaglichkeitsmessungen zur reinen Fensterlüftung bestimmt (vgl. Abbildung 68), da hier über den nötigen Zeitraum gemessen wurde. Der Verlauf des PPD weicht hier im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe nicht wesentlich von (9) ERLG+Fenster ab (s. Abbildung 72).

Abbildung 67 Zeitlicher Verlauf aller Messwerte sowie der Größen zur Behaglichkeit nach ISO 7730 auf 0,1 m Höhe für das System 9 und für reine Fensterlüftung

$$PPD_{repr} = \frac{PPD_{Ende}t_{anwesend,auf} + PPD_{zu}t_{anwesend,zu}}{t_{anwesend}}$$

mit

$$t_{anwesend} = t_{anwesend,auf} + t_{anwesend,zu}$$

Annahme - in grober Näherung:

$$PPD_{Ende}t_{anwesend,auf} \approx \int PPD \, dt + \int PPD - PPD_{zu} \, dt$$

Mit

$t_{anwesend}$	als Zeit, in der mindestens eine Person im Raum anwesend ist	in	min
$t_{anwesend, zu}$	als Zeit, in der mindestens eine Person im Raum anwesend und das Fenster zu ist	in	min
$t_{anwesend, auf}$	als Zeit, in der mindestens eine Person im Raum anwesend und das Fenster auf ist	in	min
$PPD_{Ende}$	als höchster PPD-Wert, der zum Zeitpunkt des Fensterschließens nach der Lüftung herrscht	in	%
$PPD_{zu}$	als PPD-Wert, der nach längerer Zeit bei geschlossenem Fenster herrscht (stationärer Zustand)	in	%

Eine Vereinfachung wird hier bezüglich des Effekts der Fensteröffnung auf den PPD gemacht: Mit  $PPD_{Ende}$  wird angenommen, dass die alleinige Berücksichtigung der Zeit, die das Fenster auf ist (ohne die Zeit zu berücksichtigen, die anschließend benötigt wird, um den Raum wieder aufzuheizen dadurch kompensiert werden kann, indem der Endwert  $PPD_{Ende}$  als konstanter Wert über den Zeitraum der Fensteröffnung angesetzt wird. Dabei wird angenommen, dass Temperaturabnahme im Raum während der Fensterlüftung sowie anschließende Temperaturzunahme nach schließen des Fensters in etwa den gleichen, aber gegensätzlichen Verlauf haben. Die weiteren Parameter zur Abschätzung sowie die ermittelten, repräsentativen Werte für PPD sind in Tabelle 40 aufgelistet.

*Tabelle 40: Parameter zur Abschätzung des PPD für Fensterlüftung und (9) ERLG+Fenster, Zeitwerte aus den Jahressimulationen (insgesamt 525.600 Minuten)*

	$t_{auf,mittel}$ in min	$t_{anwesend,zu}$ in min	$t_{anwesend, auf}$ in min	$PPD_{zu}$ in %	$PPD_{Ende}$ in %	$PPD_{repr}$ in %
Fenster	46,3	56742	44293	7,9	30,8	17,9
(9) ERLG+Fenster	35,2	87157	13878	7,9	28,1	10,7

Da es sich bei  $PPD_{repr}$  um eine Mittelung handelt, wird die Möglichkeit nicht berücksichtigt, dass sich höhere Momentanwerte als der repräsentative PPD weiter negativ auf die individuelle Wahrnehmung bzgl. der Behaglichkeit auswirken können. Deshalb werden die beiden Systeme mit Fensterlüftung weiter unten ergänzend bzgl. des zeitlichen Verlaufs betrachtet.



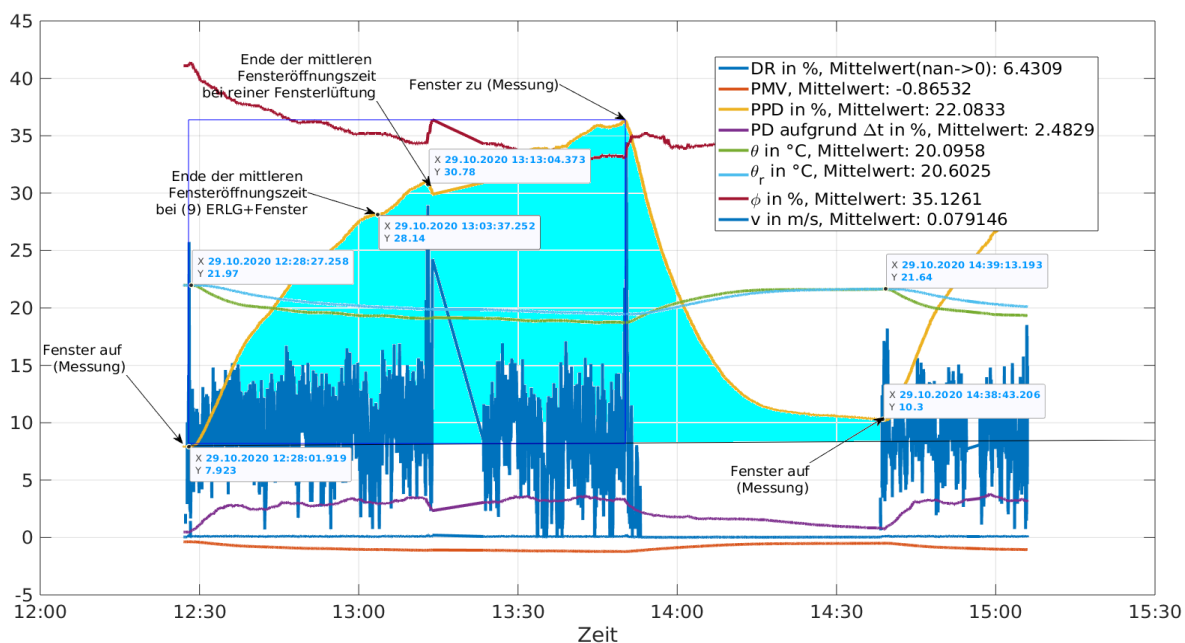


Abbildung 68 Behaglichkeitsmessungen bei Fensterlüftung, Messwerte und berechnete Momentanwerte zur Behaglichkeit nach ISO 7730

### Ergebnisse

Für den Vergleich der Systeme untereinander wurden bei den stationären Systemen jeweils die Mittelwerte der Größen über den betrachteten Zeitraum verwendet. Der DR kann erst ab einer Luftgeschwindigkeit von 0,05 m/s berechnet werden. Deshalb wurde hier bei der Mittelwertbildung  $DR:=0$  gesetzt, wenn die Luftgeschwindigkeit kleiner war und deshalb keine Werte für DR vorlagen. Als besonders relevant zur Bewertung und zum Vergleich der Lüftungssysteme wird der Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe herangezogen, da davon ausgegangen wird, dass sich eine sitzende Person im Wohnzimmer vorwiegend um diesen Punkt aufhält. Dazu stellt Abbildung 69 die gemessenen Systeme bezüglich des PPD gegenüber. Es wird an dieser Stelle erwähnt, dass der PMV über den der PPD berechnet wird bei allen Systemen an allen Orten negativ ist (wäre allein aus der Betrachtung des PPD nicht ersichtlich, da der PPD unabhängig vom Vorzeichen des PMV ist). Dies bedeutet, dass der Anteil unzufriedener, der durch PPD vorausgesagt wird, bei allen gemessenen Systemen tendenziell auf zu hohen Wärmeverlust bzw. Wahrnehmung als „zu kühl“ zurückzuführen ist, was bei den gegebenen Randbedingungen (Winterszenario) trotz der nachträglichen Temperaturanpassungen den Erwartungen entspricht.

Als zusätzliche Vergleichsgröße sind in Abbildung 69 die mittleren Lufttemperaturen sowie Strahlungstemperaturen abgebildet. Bei den instationären Systemen (Fenster und (9) ERLG+Fenster) wurde hier auf eine zusätzliche Abschätzung repräsentativer Temperaturen (wie weiter oben beschrieben) verzichtet. Es ist allerdings bei der reinen Fensterlüftung ein deutlich erhöhter PPD-Wert sichtbar. Dieser ist im Vergleich zu (9) ERLG+Fenster ausgeprägter, da hier deutlich öfter und auch länger gelüftet werden muss, um die Anforderungen einzuhalten.

Es ist ebenfalls ersichtlich, dass (9) ERLG+Fenster besser abschneidet als (3) ERLG. Dies ist vermutlich auf den veränderten Messaufbau zurückzuführen: Bei den Messungen im Wohnzimmer befand sich der Aufenthaltsbereich zwar in ein paar Metern Entfernung, aber immer noch im Ausblasbereich des nach vorne ausblasenden Einzelraumlüfters. Im Schlafzimmer befand sich der Aufenthaltsbereich hingegen

an anderer Stelle. Eine leichte Abnahme des PPD gegenüber (3) ERLG ist bei (4) ERLG+AB (rekuperative Einzelraumlüftung mit Abluft) sichtbar. Weil hier ein Teil des Luftstroms durch den Türüberströmer fließt, wird hier vermutlich der Luftstrom so abgelenkt, dass weniger der direkt eingeblasenen Luft am Messbaum des Aufenthaltsbereichs ankommt. Bei den stationären Systemen ist ein Zusammenhang zwischen PPD-Werten und Temperaturen gut erkennbar. Diese stellen die wichtigsten Einflussgrößen dar.

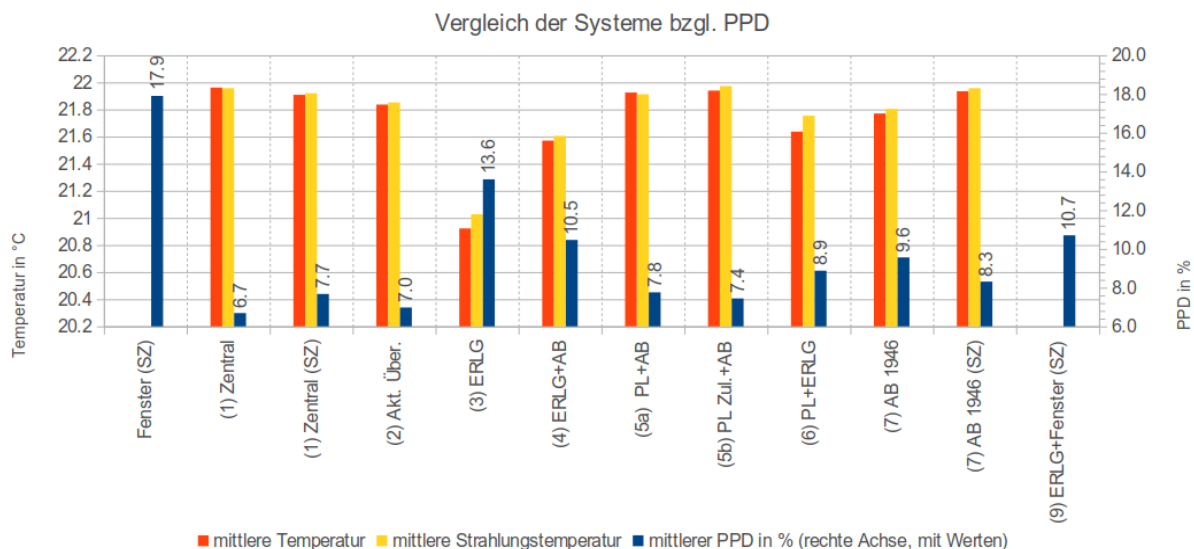


Abbildung 69: Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für alle gemessenen Systeme im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m

Die Werte für DR sowie PD sind bei allen Systemen niedrig (siehe Abbildung 70). Abbildung 71 bildet zusätzlich die mittleren Luftgeschwindigkeiten über den Lufttemperaturen für alle stationären Systeme im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe ab, vergleicht diese also direkt anhand der wichtigsten Messwerte. In dieser Grafik kann gelten: Je geringer die Luftgeschwindigkeit und je höher die Temperatur, desto positiver der Effekt auf die Behaglichkeit.

### Vergleich der Systeme bzgl. DR und PD

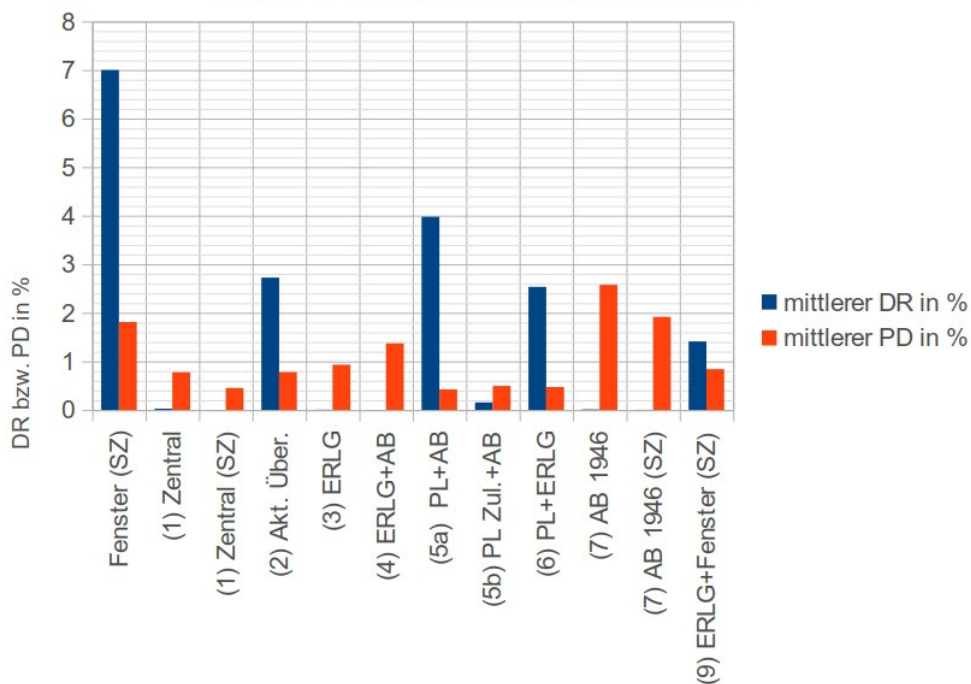


Abbildung 70 Risiko für Beeinträchtigung durch Zugluft (DR) und Prozentsatz Unzufriedener aufgrund vertikaler Temperaturunterschiede (PD) für alle gemessenen Systeme im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m, für stationäre Systeme: Mittelwerte, für instationäre

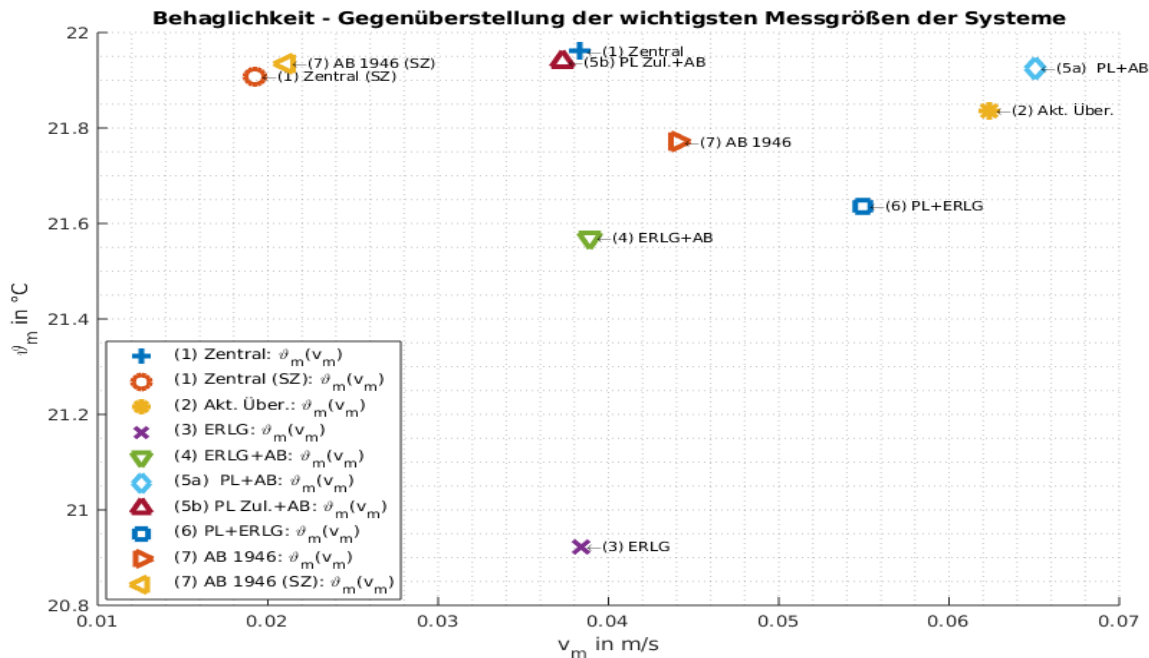


Abbildung 71 Gegenüberstellung der Systeme ohne Fensterlüftung (stationäre Systeme) bzgl. Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperatur im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe

Abbildung 72 stellt die zeitliche Veränderung des PPD-Wertes der beiden instationären Systeme für alle gemessenen Orte gegenüber. Der Verlauf des PPD-Wertes ist bei beiden Systemen an den meisten Orten

trotz des zusätzlichen Einzelraumlüftungsgeräts ähnlich. Der markante Unterschied im PPD-Verlauf im Zuluftbereich auf 1,1 m Höhe ist darauf zurückzuführen, dass bei (9) ERLG+Fenster der Zuluftbereich vor dem Einzelraumlüftungsgerät gewählt wurde und hier 1,1 m in etwa der Ausblashöhe entspricht. Im Vergleich mit der reinen Fensterlüftung, wo auf 1,1 m Höhe im Zuluftbereich eher die vom Heizkörper (der sich unter dem Fenster befindet) aufgeheizte Luft vorbeiströmt tritt daher eine deutlich stärkere Zunahme des PPD-Wertes auf. Es ist außerdem kein Einfluss des Ortes in 0,1 m Höhe auf den PPD-Wert sichtbar. Auf dieser Höhe steigt PPD im Zuluftbereich und im Aufenthaltsbereich gleichermaßen stark an.

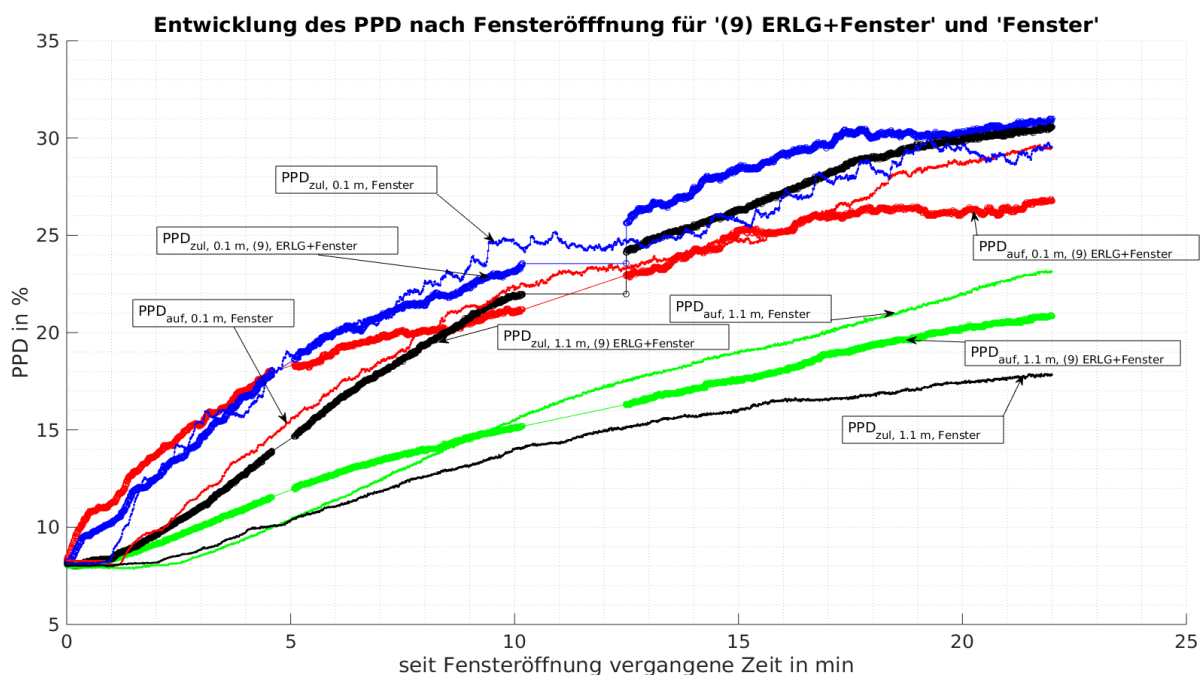


Abbildung 72 Entwicklung des PPD nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster'

Abbildung 73 stellt den zeitlichen Verlauf des DR-Wertes der beiden instationären Systeme für alle gemessenen Orte gegenüber. Da dieser Wert wegen der starken Abhängigkeit der aktuellen Luftgeschwindigkeit sehr stark schwankt, wurde hier zur besseren Sichtbarkeit der laufende Mittelwert über einen Bereich von 30 Messwerte gebildet (daher rührt das scheinbare Einschwingen der DR-Verläufe zu Beginn). Es ist ersichtlich, dass sich DR schnell auf einem stabilen Level einstellt. Zuglufterscheinungen treten daher schon unmittelbar nach öffnen des Fensters auf. Dies ist die Folge einer verstärkten Luftgeschwindigkeitsabhängigkeit durch DR – im Gegensatz zu PPD, wo sich langsam ändernde Temperaturen auch nur zu langsamen Änderungen der Größe führen.

**Entwicklung von DR nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster'**

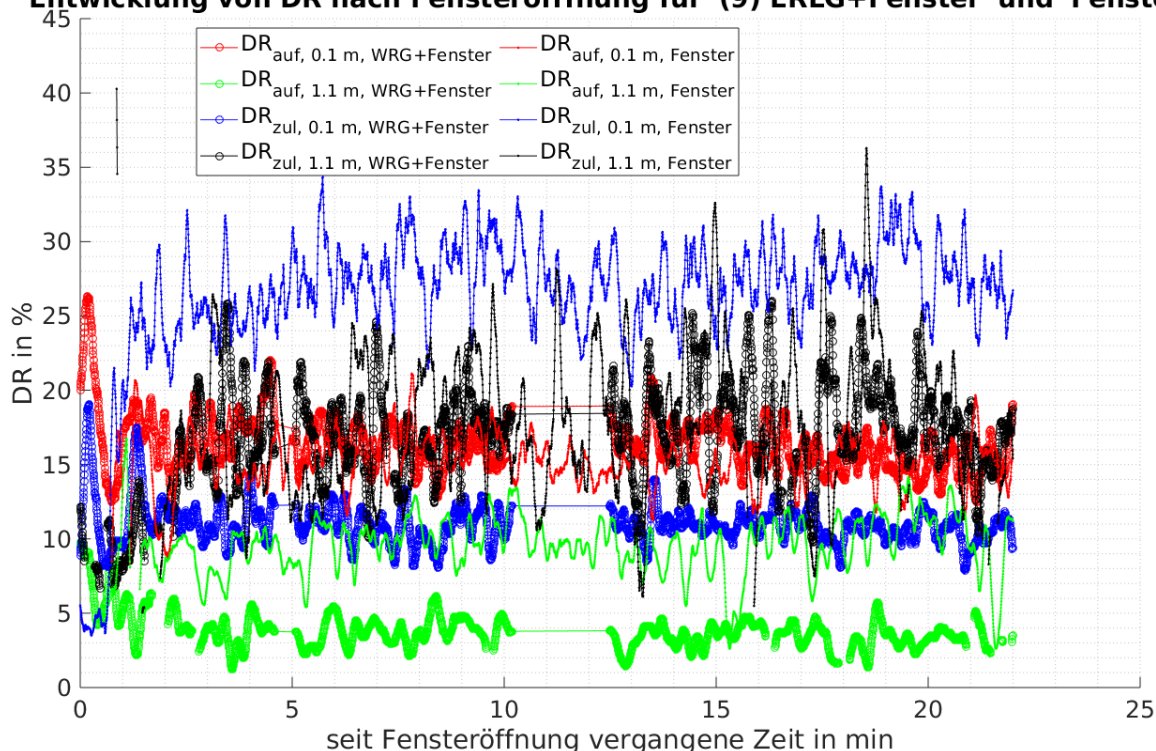


Abbildung 73: Entwicklung des DR (laufender Mittelwert über die 30 vorangegangenen Messwerte) nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster'

**Entwicklung des PD nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster'**

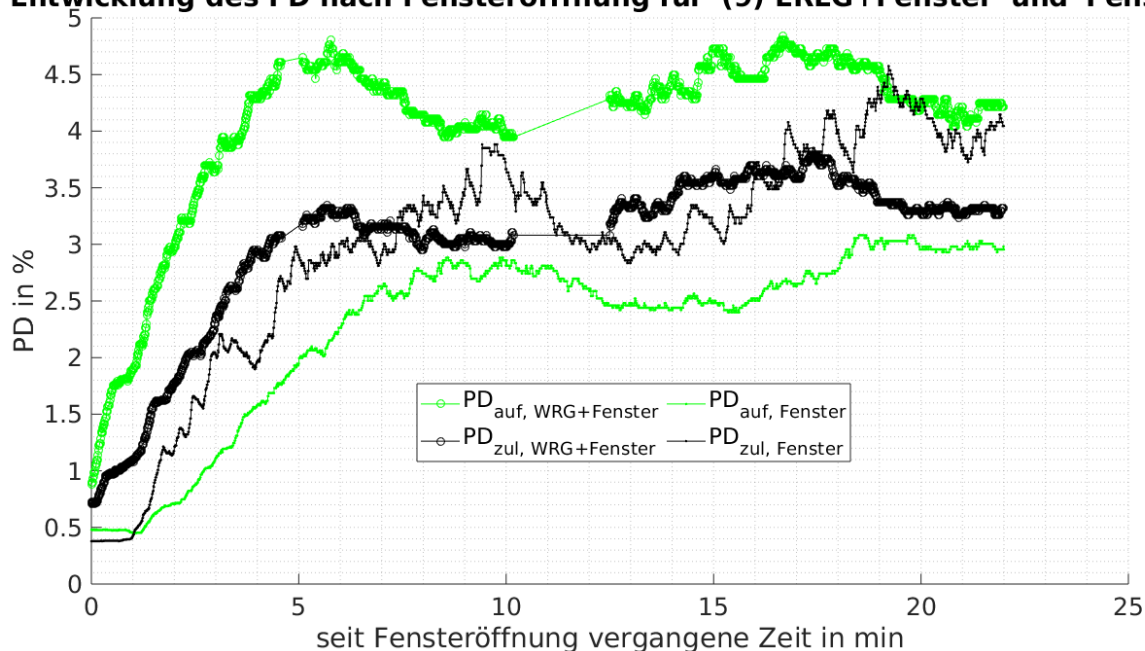


Abbildung 74: Entwicklung des PD nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster'

Abbildung 74 stellt den zeitlichen Verlauf des PD-Wertes der beiden instationären Systeme für Zu- und Aufenthaltsbereiche dar. Der PD-Wert wird ausschließlich vom Temperaturunterschied zwischen 0,1 m und 1,7 m Höhe beeinflusst. Somit gibt es für Zu- und Abluftbereich jeweils nur einen Momentanwert. PD stabilisiert sich sichtbar schneller als PPD (vgl. Abbildung 72). Die vertikalen Temperaturunterschiede

stellen sich also schnell nach Öffnen des Fensters ein. Das leichte Überschwingen von PD könnte auf die verzögerte Wärmezufuhr durch die temperaturgeregeltete Heizung zurückzuführen sein.

Betrachtet man die beiden PD-Verläufe für den Zuluftbereich, so lässt sich trotz unterschiedlich gewählter Orte für reine Fensterlüftung und (9) ERLG+Fenster nur eine sehr geringe Abweichung feststellen.

Als Grund für die Abweichung des PD-Verlaufs im Aufenthaltsbereich bei (9) ERLG+Fenster vom entsprechenden PD-Verlauf im Zuluftbereich sowie auch vom PD-Verlauf im Aufenthaltsbereich bei reiner Fensterlüftung kann hier nur der zusätzliche Einfluss des Einzelraumlüftungsgerätes oder ein Druckausgleich zwischen Klimakammer und ebendiesem vermutet werden. Es erschließt sich aus den Messungen jedoch nicht der erhöhte PD-Wert im Aufenthaltsbereich gegenüber dem Zuluftbereich bei (9) ERLG+Fenster. Die PD-Werte fallen jedoch insgesamt gering aus.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich bei den meisten Lüftungssystemen akzeptable Werte zur Behaglichkeit bzgl. Des PPD-Wertes ergeben. Eine Ausnahme bilden hier vor allem die Lüftungssysteme mit Fensterbeteiligung und ggf. mit Einzelraumlüftungsgerät. Beim Einzelraumlüftungsgerät (ERLG) wirkt sich die Ausblasrichtung nach vorne ggf. negativ auf die Behaglichkeit aus. Bei Systemen ohne Wärmerückgewinnung ist im Aufenthaltsbereich kein starker Anstieg der unzufriedenen aufgrund vertikaler Temperaturunterschiede (PD) bemerkbar. Die ermittelten PD- und DR-Werte sind insgesamt als niedrig einzustufen. Beim Vergleich der reinen Fensterlüftung mit (9) ERLG+Fenster wird deutlich, dass eine zusätzliche, kontinuierliche Lüftung die Notwendigkeit das Fenster zu öffnen, um gleiche Luftqualität zu erhalten deutlich verringert, was zu erhöhter Behaglichkeit führt. Die zeitlichen Verläufe der instationären Lüftungssysteme Fenster und (9) ERLG+Fenster zeigen sich langsam, aber deutlich erhöhende PPD-Werte im Zuluftbereich bzw. auf 0,1 m Höhe bis über 30 % und im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe bis über 20 %. DR-Verläufe zeigen hier einen sehr schnellen Anstieg nach der Fensteröffnung, gehen dabei im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe bis maximal ca. 10 %, während im Zuluftbereich auf 0,1 m Höhe Werte bis über 30 % erreicht werden. Die PD-Verläufe nach Fensteröffnung stabilisieren sich ebenfalls relativ schnell und bleiben dabei unter 5 %.



## Studie zur Nutzerakzeptanz von Wohnraumlüftungssystemen

### Ziele und Methode

Die Ziele dieses Arbeitspakets bestehen darin, die Nutzerakzeptanz für die untersuchten Lüftungssysteme hinsichtlich Inbetriebnahme, Nutzung, Instandhaltung und Wartung (z. B. Filterwechsel) zu untersuchen sowie Erkenntnisse zu „überzeugenden“ oder „hemmenden“ Aspekten bzw. Argumenten mit Blick auf das jeweilige Lüftungssystem zu gewinnen.

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Ansätze für die Testdesigns der Nutzerakzeptanzstudie: qualitative, quantitative und gemischte Ansätze [35]. In einer qualitativen Nutzerumfragestudie werden die Meinungen mit offenen Fragen ohne vorgegebene Antworten ermittelt. Dabei kann die Meinung des einzelnen Nutzers per Interview oder im Rahmen einer Gruppendiskussion über das untersuchte Thema herausgearbeitet werden.

Auf diese Weise können ein tiefes Verständnis über die Nutzer generiert, Einblicke in das Problem gewonnen oder Ansätze erzeugt werden, um Ideen für eine quantitative Studie zu entwickeln. Eine Schwierigkeit besteht dabei allerdings hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, zudem sind diese stark abhängig von der Qualität des / der Panels sowie der Interpretationen der Forscher\*innen. Dagegen stehen die Quantifizierung der zu untersuchenden Aspekte sowie die Verallgemeinerung der Ergebnisse aus einer größeren Stichprobenpopulation in einer quantitativen Studie im Vordergrund. Diese Methode nutzt Fragebögen mit geschlossenen Fragen und kann mit Hilfe von Online-, Papierfragebogen oder Telefoninterviews durchgeführt werden. Im Vergleich zur qualitativen Studie zeigt diese Methode eine hohe Reproduzierbarkeit bei einer großen Stichprobe und ist weniger abhängig von den Teilnehmer\*innen. Zudem basieren die Entscheidungen nicht auf der individuellen Beobachtung der Forscher\*innen, sondern auf Zahlen und Fakten. Allerdings hat hier das Fragebogendesign einen großen Einfluss – daher sollte die Bandbreite der zu untersuchenden Aspekte vor der Studie bekannt sein.

Das gemischte Studiendesign wiederum nutzt beide Methoden und verfolgt den Ansatz, dass eine kombinierte Methode eher ein vollständiges Verständnis für ein Untersuchungsthema liefern kann. Dabei können die qualitativen und quantitativen Untersuchungen etwa zur gleichen Zeit erhoben oder auch eine von beiden zuerst durchgeführt werden.

Die Ansätze können experimentell unterschiedlich gestaltet werden. Eine Möglichkeit ist hier die typische Probandenuntersuchung in einer Klimakammer, in der die Testpersonen die eingestellten Test-Szenarien selbst erleben und beurteilen können. Da der Aufwand für solche Untersuchungen groß ist, kann nur eine kleine Anzahl an Nutzer\*innen sowie Randbedingungen betrachtet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Nutzer\*innen die Situation auf Basis einer von Experten kurz gefassten Information beurteilen: Die Nutzer\*innen bilden sich ihre Meinung also nicht aus eigenem Erleben, sondern nur basierend auf der Erläuterung der Experten.

Im Anschluss an die Diskussion mit den Projektpartnern im Mai 2020 wurde der gemischte Ansatz basierend auf der Informationsweitergabe gewählt. Ein wesentlicher Grund dafür waren die aus der Corona-Pandemie resultierenden Bedingungen, die eine Untersuchung in der Klimakammer fast unmöglich machten. Ein weiteres relevantes Argument bestand darin, dass die Erhebung einer breiten Meinung zu den Lüftungssystemen als wichtiger angesehen wurde als die Ergebnisse einer kleinen Anzahl an Personen mit subjektiver Wahrnehmung.

Eine sehr spezifische Nutzerakzeptanz – z. B. wie die Nutzer\*innen ein zentrales Zu- und Abluftsystem in Verbindung mit aktiven Überströmern thermisch, akustisch sowie vom Betrieb her im Vergleich zu einem Pendellüfter in Kombination mit einem Abluftventilator bewerten –, lässt sich mit diesem Testdesign nicht ermitteln. Es können jedoch die Einstellungen der Nutzer\*innen und die Akzeptanz hinsichtlich verschiedener Aspekte von Wohnungslüftungssystemen untersucht werden.

Zunächst wurden die Nutzeraspekte bezogen auf die unterschiedlichen Wohnungslüftungssysteme in einer Diskussionsrunde mit den Proband\*innen, einer so genannten Fokusgruppe, betrachtet. Die hier gewonnenen Ergebnisse fanden anschließend bei der Erstellung des Online-Umfragedesign Berücksichtigung und wurden in der Breite überprüft. Als Ergebnis einer internen Diskussion wurden die folgenden vier Systeme für die Nutzerakzeptanzstudie herangezogen: zentrales und dezentrales System, Abluftsystem sowie Fensterlüftung.

Zur Prüfung, ob die Verteilung der Antworten aus der Online-Umfrage bzgl. bestimmter Merkmale (wie Alter) variiert, wurde der paarweise Chi-Quadrat-Test [36] angewendet.

Die Nullhypothese besagt, dass die Stichproben unabhängig von der Gruppe der gleichen Verteilung folgen. Sie wird in dieser Studie abgelehnt oder signifikant unterschiedlich bezeichnet, wenn die p-Werte kleiner als 0,05 sind. Die untersuchten Merkmale sind die personenbezogenen Größen wie Alter, Geschlecht, Einkommen sowie die aktuelle Wohnform (Miete oder Eigentum / Wohnung oder Haus) und die aktuelle Wohnungslüftungsart (Fensterlüftung oder mechanische Lüftung).

## Fokusgruppe

### Durchführung

Die Fokusgruppen-Diskussion fand am 24. Juli 2020 zwischen 13:00 und 17:30 in den Räumlichkeiten des Fraunhofer IBP statt; es haben vier Frauen und vier Männer im Alter zwischen 25 und 55 Jahren daran teilgenommen.

Nach einer kurzen Unterweisung zu den Hygiene- sowie allgemeinen Verhaltensregeln während der Veranstaltung wurde im ersten Schritt über die aktuelle Lüftungssituation im eigenen Zuhause diskutiert (Teil 1: „Diskussion IST-Situation“): Die Teilnehmer\*innen wurden dazu in drei Gruppen aufgeteilt und an drei Stationen bezüglich ihrer Zufriedenheit mit der aktuellen Lüftungssituation sowie zu den Gründen für Zufriedenheit bzw. Unzufriedenheit (1. Station) befragt, zu ihren Meinungen über die mechanischen Lüftungssysteme (2. Station) sowie zu einem idealen Lüftungssystem (3. Station). Dieser Teil diente dem Projektteam dazu, die von den Inhalten der Veranstaltung „unbelasteten“ Meinungen bzw. Einschätzungen der Teilnehmenden zu erhalten.

Im zweiten Teil der Veranstaltung (Teil 2: „Information über die Lüftungssysteme“) wurden die durch das Projektteam im Vorfeld erstellten Informations-Videos über drei Lüftungssysteme (zentrales Lüftungssystem, dezentrales Lüftungssystem, Abluftsystem ohne Wärmerückgewinnung) gezeigt. Jedes Video enthielt Informationen zu Funktionsweise, Bedienung, Wartung (z. B. Filterwechsel), Vor- und Nachteilen hinsichtlich Luftqualität, Komfort, Energieeffizienz sowie eine grobe Kostenschätzung (Dauer: ca. 1,5 Minuten). Anschließend konnten die Teilnehmer\*innen dem Projektteam Fragen zu den Systemen stellen. Nach deren Klärung wurde der dritte Teil (Teil 3: „Diskussion über einzelne Lüftungssysteme“) in vier Gruppen durchgeführt. Dabei beurteilten und diskutierten die Teilnehmer\*innen, welche Aspekte des jeweiligen Lüftungssystems sie als überzeugend bzw. nicht überzeugend bewerten.

Am Ende der Veranstaltung (Teil 4: „Fragebogen Entwurf und Feedback“) füllten die Teilnehmer\*innen den für die spätere Online-Panel-Umfrage vorbereiteten Fragebogen testweise aus und gaben



Rückmeldung zur Verständlichkeit sowie zu weiteren Nutzeraspekten, die bei der weiteren Entwicklung des Fragebogens für die Online-Panel-Umfrage berücksichtigt wurden.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus „Teil 1: Diskussion IST- Situation“ und „Teil 3: Diskussion über einzelne Lüftungssysteme“ im Detail dargestellt.



Abbildung 75: Fokusgruppen-Diskussionsrunde mit acht Teilnehmer\*innen zum Thema Wohnraumlüftung

## Ergebnisse

### Teil 1: Diskussion IST-Situation

#### 1. Station: Zufriedenheit mit aktueller Situation

Die meistens Teilnehmer\*innen lüften zu Hause hauptsächlich per Fensterlüftung. Keiner der acht Teilnehmenden verfügt über ein mechanisches Lüftungssystem, mit Ausnahme von einem unterstützenden Abluftsystem in Bad und Küche. Die Teilnehmer\*innen zeigen einen hohen Zufriedenheitsgrad mit der Fensterlüftung; drei Personen zeigen sich mit der aktuellen Situation (Fensterlüftung) „zufrieden“ und vier Personen „etwas zufrieden“. Als Gründe für die Zufriedenheit wurden genannt: einfache Bedienung, kostengünstig, frische Luft, Wartungsfreiheit, schnelle und zuverlässige Wirkung sowie freies Gefühl.

Obwohl die Teilnehmer\*innen grundsätzlich mit der Fensterlüftung zufrieden waren, wurden gleichzeitig viele Faktoren der Unzufriedenheit in punkto Fensterlüftung erwähnt. Mehrfach genannt wurde dabei die fehlende Regelbarkeit des Luftvolumens. Dadurch werde die Wohnung entweder zu viel (was zu trockene Luft oder Auskühlung der Wände zur Folge hat) oder zu wenig (mit der Folge von Feuchteproblem) gelüftet. Die Wetterabhängigkeit, Zugluft im Winter, Lärmbelastung durch Straßenverkehr sowie durch die Fensterlüftung ins Haus gelangenden Fremdkörper wie Insekten oder Laub störten die Teilnehmer\*innen.

Mit dem Abluftsystem in Bad und Küche sind die Teilnehmer\*innen etwas unzufriedener als mit der ausschließlichen Fensterlüftung. Dabei hoben sie v. a. die Einfachheit der Bedienung und den leisen

Betrieb des vorhandenen Abluftsystems hervor. Gleichzeitig bemängelten sie, dass die Feuchtigkeit im Bad nicht schnell genug entfernt werden kann. Außerdem wurde der unabhängig von der Nutzung ständig laufende Betrieb im Mietshaus als Unzufriedenheitsfaktor genannt.

## 2. Station: Meinung zu mechanischer Lüftung

An dieser Station wurde gefragt, ob die Teilnehmer\*innen bereits Erfahrung mit einem mechanischen Lüftungssystem haben, was sie unter „mechanischer Wohnungslüftung“ verstehen und ob sie ein solches System positiv oder negativ beurteilen.

Die Hälfte der Teilnehmenden hat bereits Berührungspunkte mit einem mechanischen Lüftungssystem gehabt und stellt sich unter einem mechanischen Lüftungssystem ein zentrales Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung oder eine Klimaanlage im Hotel oder im Ausland vor. Sie beurteilten ein mechanisches System dabei deutlich positiver als solche ohne Erfahrung mit einem mechanischen Lüftungssystem. Als Gründe für die positive Beurteilung wurden erhöhter Komfort mit einstellbarer Temperatur, gute Luftqualität und Schutz der Bausubstanz angeführt. Negative Beurteilungen des mechanischen Lüftungssystems wurden mit Zugluft, Lärm und Abhängigkeit von der Technik begründet.

## 3. Station: Ideale Lüftung

An dieser Station wurde diskutiert, welche Vorstellungen bzw. Erwartungen die einzelnen Teilnehmer\*innen hinsichtlich einer idealen Wohnungslüftung haben.

Oft genannt wurden dabei Komfortfaktoren wie angenehme Temperatur, Feuchte, kein Luftzug, gute Luftqualität (ohne Gerüche und keimfrei) und ruhiger Betrieb (gelb in Abbildung 76). Dazu kommt die individuelle, automatische Regelbarkeit auch mit der Möglichkeit der manuellen Steuerung (blau in Abbildung 76). Die Energieeffizienz wurde hingegen nur einmal genannt (grün in Abbildung 76).



Abbildung 76: Zusammenstellung der Vorstellungen zur idealen Wohnungslüftung

### Teil 3: Diskussion über einzelne Lüftungssysteme

#### 1. Zentrales Lüftungssystem

Die Teilnehmer\*innen waren infolge der Information zum zentralen Lüftungssystem hauptsächlich von der guten Luftqualität sowie vom hohen Komfort überzeugt (siehe Abbildung 77). Im Zuge der weiterführenden Diskussion wurde klar, dass die gute Luftqualität verbunden mit dem Filter und die Bequemlichkeit (ich muss mich um nichts kümmern) neben den typischen Raumklimakomfortaspekten als große Vorteile eines zentralen Lüftungssystems angesehen wurde. Den Mehraufwand für den Betrieb (wie Filterwechsel) beurteilen sie als annehmbar. Dagegen sehen die Teilnehmer\*innen einen großen Nachteil in den hohen Kosten des Systems sowie im Montageaufwand. Insgesamt finden sechs von acht Teilnehmer\*innen das System „etwas überzeugend“.

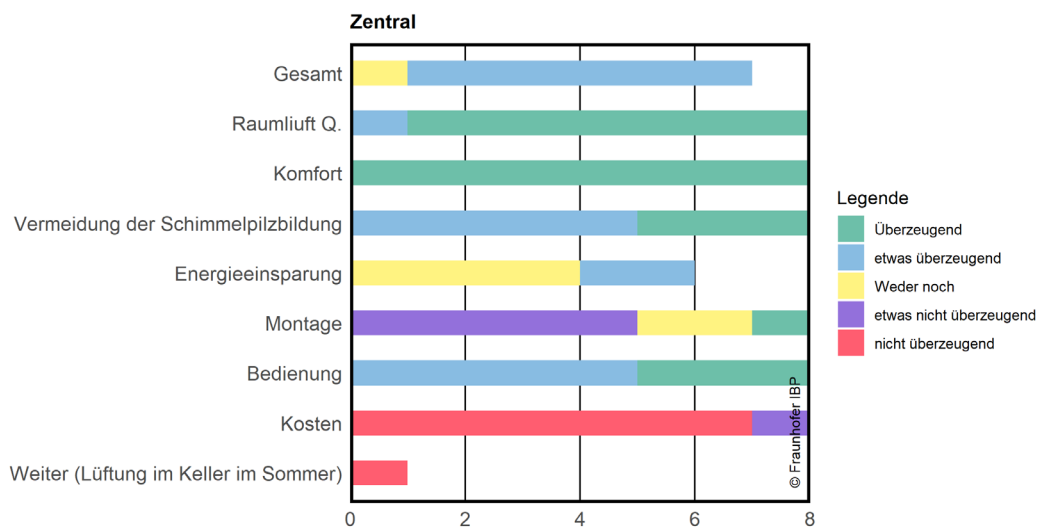


Abbildung 77: Beurteilung „zentrales Lüftungssystem“ nach dem Informationsaustausch

#### 2. Dezentrales Lüftungssystem

Beim dezentralen Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung waren die Teilnehmer\*innen – ähnlich wie beim zentralen Lüftungssystem – von Raumluftqualität, Komfort und Bedienung überzeugt – wobei der Anteil der Überzeugung in diesen Aspekten eher zurückhaltender ausfiel als beim zentralen Lüftungssystem. Besonders die Nachrüstbarkeit sowie die Anwendbarkeit in einzelnen Räumen wurden bei der Diskussion positiv beurteilt. Dagegen bewerteten sie den Montageaufwand und die Kosten immer noch als zu hoch – obwohl sie im Vergleich zum zentralen System eher positiv eingeschätzt wurden. Optik im Raum, Größe der Geräte, Durchbruch in der Wand und damit entstehende Wärmebrücke wurden wiederum als Nachteile gesehen – das gilt auch für die Bedingung, dass ein solches System nur in außenliegenden Räumen realisierbar ist.

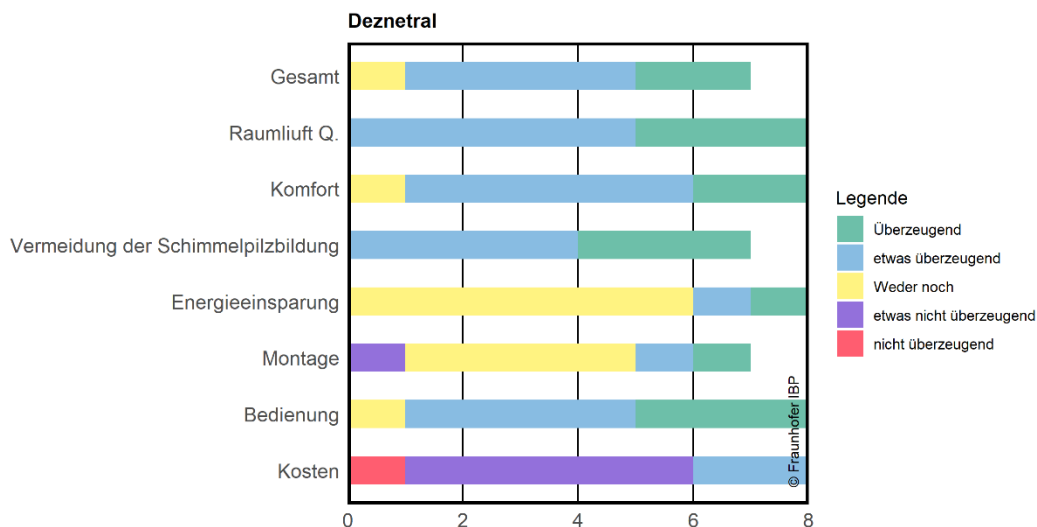


Abbildung 78: Beurteilung „dezentrales Lüftungssystem“ nach dem Informationsaustausch

### 3. Abluftsystem

Obwohl die Teilnehmer\*innen den geringen Aufwand beim Abluftsystem positiver als beim zentralen bzw. dezentralen Lüftungssystem beurteilten, waren sie insgesamt vom Abluftsystem deutlich weniger überzeugt als von den beiden anderen Systemen (siehe Abbildung 80). Die Gründe dafür sind: kein Mehrwert bei der Luftqualität aufgrund des fehlenden Filtersystems, Diskomfort in Folge von Zugluft und fehlende Wärmerückgewinnung in einem Abluftsystem. Darüber hinaus empfanden sie die eventuelle zusätzliche Lärmbelastung durch die Wandöffnung und die störende Optik als nachteilig. Dessen ungeachtet wurde das minimale Außenluftvolumen zur Unterstützung der Vermeidung von Schimmelpilzbildung sowie die lokale Anwendung positiv bewertet.

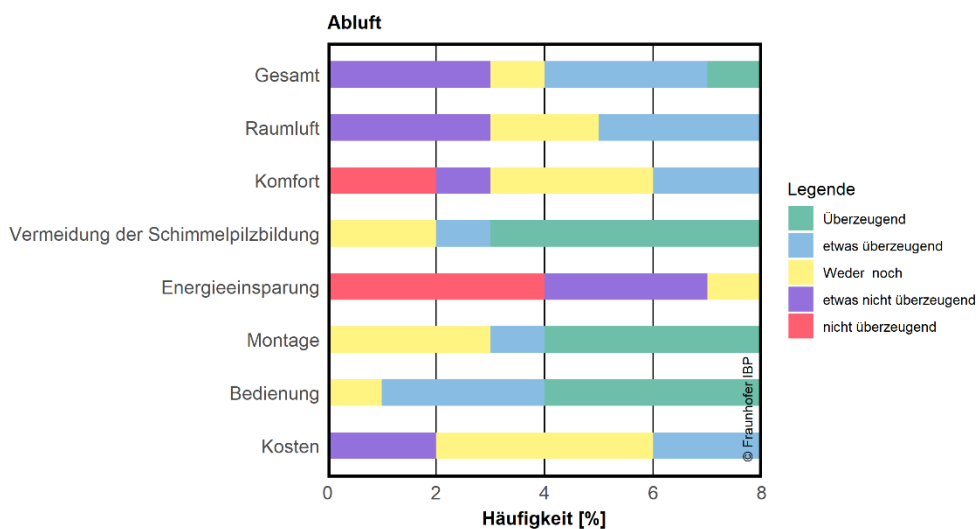


Abbildung 79: Beurteilung „Abluftsystem“ nach dem Informationsaustausch

#### 4. Fensterlüftung

Die anfängliche Überzeugung der Teilnehmer\*innen hinsichtlich der Fensterlüftung reduzierte sich nach dem Informationsaustausch in Teil 2 und Teil 3 etwas. Die positiven Aspekte – wie niedrige Kosten und Einfachheit sowie schnelle Wirkung – stand dem reduzierten Komfort sowie erhöhten Lüftungswärmeverlusten gegenüber. Darüber hinaus bewerteten die Teilnehmer\*innen die Abhängigkeit der Fensterlüftung von der Lage der Wohnung sowie die Unbequemlichkeit (man muss sich selbst darum kümmern) als nachteilig. Auch die Angst vor Schimmelpilzbildung und das Argument, dass die Fensterlüftung keinen Filter und Insektenschutz bietet, wurden als negative Aspekte benannt.

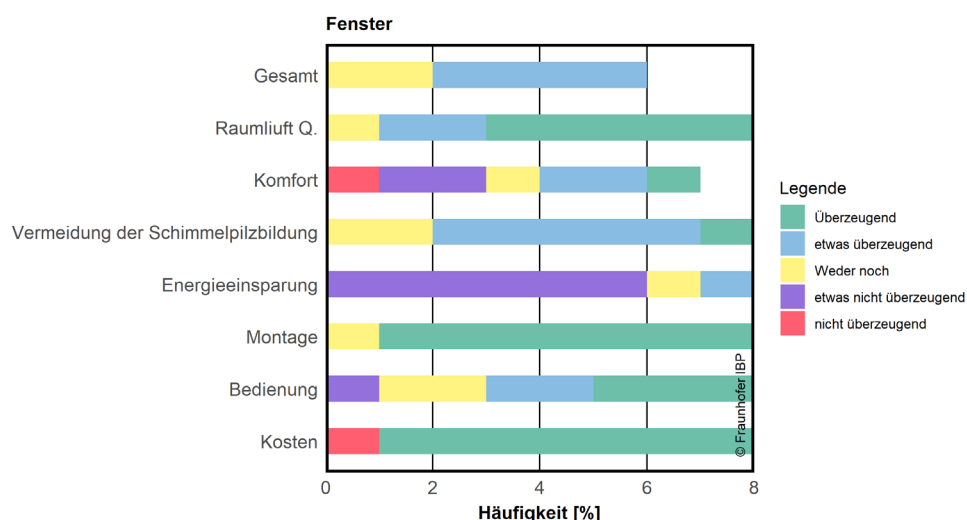


Abbildung 80: Beurteilung „Fensterlüftung“ nach dem Informationsaustausch

#### Zusammenfassung der Diskussion mit acht Nutzer\*innen zur Wohnungslüftung

Alle acht Teilnehmer\*innen lüften den Wohnraum mittels Fensterlüftung, ein Teil nutzt zusätzlich ein Abluftsystem in Küche und Bad. Sie sind mit der Fensterlüftung insgesamt zufrieden, etwa die Hälfte beurteilt ein mechanisches Lüftungssystem aufgrund des niedrigen Komforts eher negativ. Diese Einstellung änderte sich nach dem Informationsaustausch und der anschließenden Diskussion: Der Komfort wurde neben der erhöhten Luftqualität als ein überzeugender Faktor für ein zentrales oder dezentrales Lüftungssystem bewertet. Dagegen wurden die hohen Kosten beim mechanischen System als das größte Hemmnis angesehen. Die Bedienung des technischen Systems oder den Filterwechsel beurteilten die Teilnehmer hingegen nicht als Hindernis. Besonders schätzten sie die Regelbarkeit des mechanischen Lüftungssystems und die damit verbundene Bequemlichkeit, da die Nutzer\*innen sich nicht mehr um die Lüftung kümmern müssen und diese unabhängig von der Lage der Wohnung oder dem Wetter durchgeführt werden kann.

Nach der Veranstaltung sagten die Teilnehmer\*innen, dass sie sich bisher noch nicht mit dem Thema „Wohnungslüftung“ auseinandergesetzt und infolgedessen auch noch nicht mit den Vor- und Nachteilen des jeweiligen Lüftungssystems inklusive der Fensterlüftung intensiver beschäftigt haben. Bei der nächsten Gelegenheit, bei der es um eine Entscheidung zur Wohnungslüftung geht, würden sie diese mit dem erworbenen Wissen bewusster treffen, meinten sie abschließend.

## Online Panel-Umfrage

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Diskussionsgruppe mit acht Teilnehmern auf die Allgemeinheit zu untersuchen, wurde eine Online-Panel-Umfrage durchgeführt: Dazu wurden Personen / Einwohner\*innen zwischen 18 Jahren und 69 Jahren in Deutschland eingeladen, die sich die bereitgestellten Videos mit eigenen Endgeräten anschauen können.

Bei der Strichprobenwahl wurden Geschlecht und Bruttoeinkommen sowie Alter ab 18 Jahren nach deutscher Bevölkerungsverteilung [37] berücksichtigt. Die 10%-Abweichung der jeweiligen Gruppen wurde akzeptiert.

Die Umfrage wurde im November 2020 durchgeführt, über 1.700 Einwohner\*innen haben daran teilgenommen. Mittels Qualitätsfragen (z. B. einfache Fragen zu den Inhalten der Videos oder einfache Aufmerksamkeitsfragen) wurden die Teilnehmer\*innen gefiltert. Zur endgültigen Datenanalyse wurden die Antworten von 1.045 Teilnehmer\*innen herangezogen.

Der Online-Fragenbogen gliedert sich ähnlich wie bei der Fokusgruppen-Untersuchung wie folgt:

1. Fragen zur aktuellen Lüftungssituation sowie zu Einstellungen über ein mechanisches Lüftungssystem
2. Informationsvideos zu einzelnen Lüftungssystemen
  - i. Unter folgenden Links können die Informationsvideos abgerufen werden, die im Online-Fragenbogen integriert waren.
3. [https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master\\_Zentrales\\_LS\\_1.mp4](https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master_Zentrales_LS_1.mp4)
4. [https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master\\_Dezentrales\\_LS\\_1.mp4](https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master_Dezentrales_LS_1.mp4)
5. [https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master\\_Abluft\\_System\\_1.mp4](https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master_Abluft_System_1.mp4)
6. [https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master\\_Fensterlueftung.mp4](https://db.ibp.fraunhofer.de/videos/Master_Fensterlueftung.mp4)
7. Fragen bzgl. überzeugender Aspekte bzw. Hindernissen bei einer Kaufentscheidung zu den einzelnen Lüftungssystemen
8. Gesamtbewertung der Wohnungslüftungssysteme: Entscheidung über ein Lüftungssystem bei einem eventuellen Neubau

## Ergebnisse

### Teil 1. Aktuelle Situation

Über 50% der Teilnehmer\*innen wohnen in einer Mietwohnung, ca. 33% im eigenem Haus. Über 75% der Teilnehmer\*innen lüften aktuell den Wohnraum ausschließlich per Fensterlüftung und ca. 22% zusätzlich mit einem Abluftsystem im Bad oder in Küche. Nur 24 Personen (ca. 2,4%) verfügen über ein dezentrales Lüftungssystem mit WRG und nur acht Personen besitzen ein zentrales Lüftungssystem.

Der Anteil über die Lüftungsart variiert in Relation zum Bruttoeinkommen: Bei Nutzer\*innen mit einem Bruttoeinkommen unter 20.000 Euro ist der Anteil derer, die die Fensterlüftung nutzt, mit 81% deutlich größer als die 63% bei Nutzer\*innen mit einem höheren Einkommen von über 75.000 Euro (Anzahl der Antworten = 82). 12% dieser gut verdienenden Gruppe und 7% der Gruppe mit einem Bruttoeinkommen zwischen 50.000 und 75.000 Euro nutzen entweder ein dezentrales oder zentrales Lüftungssystem, während in der niedrigen Einkommensgruppe nur 1% der Nutzer\*innen über ein mechanisches Lüftungssystem zu Hause verfügt. Die anderen persönlichen Merkmale zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Lüftungsart zu Hause.

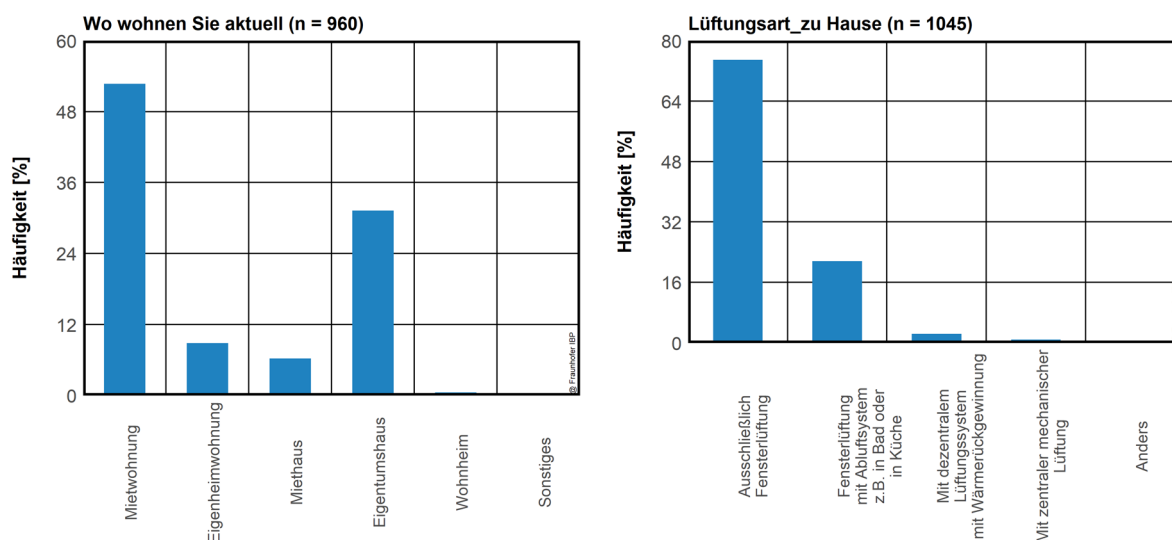


Abbildung 81: (links) Wohnsituation der Teilnehmer\*innen; (rechts) aktuelle Lüftungsart

Das folgende Bild zeigt die Meinungen der Teilnehmer\*innen zur eigenen Wohnungslüftungssituation: Über 80% der Befragten sind insgesamt mit der aktuellen Wohnungslüftungssituation zufrieden. Sie bewerten auch die Luftqualität in der Wohnung als gut. Knapp 30% haben Bedenken hinsichtlich eventueller Feuchteprobleme.

Dabei sind ältere Personen über 40 Jahre deutlich signifikant zufriedener als Personen aus der jüngeren Gruppe und haben weniger Angst vor einem Feuchteproblem. Frauen (im Vergleich zu Männern) empfinden eher mehrheitlich den Geruch in der Wohnung als angenehm. Die anderen persönlichen Merkmale oder die Wohnungslüftungsart beeinflussen die Antwort nicht signifikant.

Die Beurteilung hinsichtlich des Geruchs fällt bei den Personengruppen mit einem dezentralen Lüftungssystem schlechter aus als bei den Gruppen mit anderen Lüftungsarten.

Im Rahmen weiterer Fragen sollten die Teilnehmer\*innen mindestens einen Aspekt und maximal die drei wichtigsten Zufriedenheits- und Unzufriedenheitsfaktoren in Bezug auf die Ist-Lüftungssituation der Reihenfolge nach wählen (Ranking).

Auf die Frage zu den Zufriedenheitsfaktoren bezogen auf die aktuelle Lüftung nannten die Teilnehmer\*innen oft die gute Luftqualität, geringe Kosten und einfache Bedienung. Nach der Betrachtung der Gewichtung (Ranking) sind sie meist mit niedrigen Kosten und guter Luftqualität zufrieden.

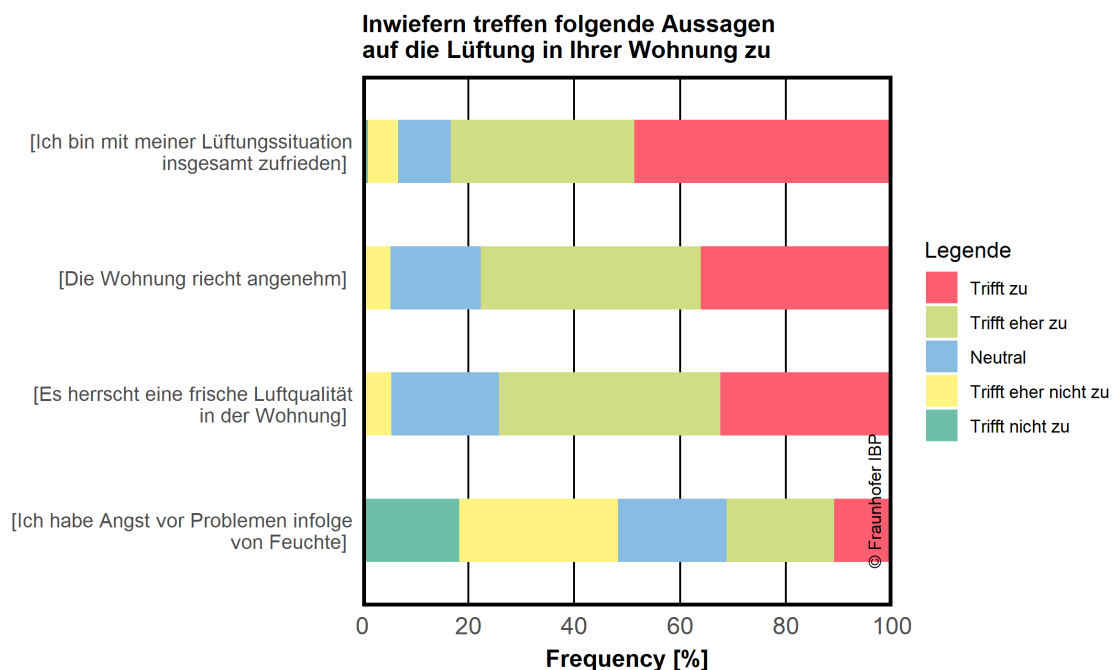


Abbildung 82: Meinungen zur aktuellen Lüftungssituation

Tabelle 41: Anzahl der Antworten zur Frage „Mit welchen Aspekten Ihrer jetzigen Lüftungssituation sind Sie am meisten zufrieden? Bitte ordnen Sie die 3 wichtigsten Faktoren in absteigender Reihenfolge (1: am besten)“. „Mit Gewichtung“ in der Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Einfache Bedienung	Kostengünstig	Funktioniert sofort	Ruhig	Energieeffizienz	Guter Filter	Gute Luftqualität
Rank1	187	236	175	99	59	34	255
Rank2	209	202	212	114	101	35	164
Rank3	211	187	200	137	85	38	160
Mit Gewichtung	1190	1299	1149	662	464	210	1253

Dagegen stellen die Auskühlung im Winter, Fremdkörper wie Insekten und Laub im Haus und Straßenlärm häufig genannte Unzufriedenheitsfaktoren dar. Das Ranking gestaltet sich signifikant unterschiedlich in Abhängigkeit von der Altersgruppe: So beschweren sich ältere Personen ab 60 Jahren eher über die Auskühlung, während Personen aus der jüngeren Gruppe eher die Fremdkörper in der Wohnung oder das Feuchtigkeitsproblem bemängeln.



Tabelle 42: Anzahl der Antworten zur Frage „Mit welchen Aspekten Ihrer jetzigen Lüftungssituation sind Sie am wenigsten zufrieden? (1: am schlechtesten)“. „Mit Gewichtung“ in der Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Hohe Kosten	Auskühlung im Winter	Straßenlärm	Das Lüftungssystem ist zu laut	Fremdkörper (Insekten, Laub) im Haus	Unkontrollierte Lüftung (manchmal zu viel, manchmal zu wenig)	Feuchtigkeitsproblem
Rank1	57	287	182	69	239	130	81
Rank2	47	233	163	57	192	168	71
Rank3	58	158	152	39	178	127	87
Mit Gewichtung	323	1485	1024	360	1279	853	472

Obwohl die Gruppe der Teilnehmer\*innen, die über ein mechanisches Lüftungssystem (Dezentrales und Zentrales Lüftungssystem) verfügt, mit weniger als 4% sehr klein ist, zeigt sie eine deutlich andere Tendenz im Vergleich zum Gesamtergebnis: So gaben 45% aus dieser Gruppe die gute Luftqualität als ersten Zufriedenheitsfaktor an, danach die gute Filterwirkung gefolgt von der einfachen Bedienung. Unzufrieden zeigten sie sich hingegen mit der unkontrollierten Lüftung und den hohen Kosten.

Anhand weiterer Fragen wurden die Meinungen zur mechanischen Lüftung erfragt (siehe Abbildung 83). Sie wurde als ein mit hohen Kosten verbundenes System wahrgenommen, mit dem man Feuchtproblemen vorbeugen kann (fast 60%). Etwa die Hälfte der Teilnehmer\*innen denkt, dass mechanische Lüftungsanlagen laut sind (50%) und es in mechanischen Lüftungsanlagen zu Keimwachstum kommen kann (45%). 44% bzw. 43% sind der Ansicht, dass eine mechanische Lüftung ein Mehrwert für ein Gebäude darstellt und für eine gute Luftqualität sorgt. 27% glauben, dass die mechanische Lüftung energieeffizienter ist als Fensterlüftung.

Männer und besserverdienende Personen beurteilen die mechanische Lüftung tendenziell als energieeffizienter und besser für eine gute Luftqualität als Frauen oder Personen aus der Gruppe mit niedrigem Einkommen. Außerdem sehen Besserverdienende in der mechanischen Lüftung eher einen Mehrwert (Wertsteigerung) für ein Haus – ebenso Personen aus der jüngeren Gruppe unter 40 Jahre im Vergleich zu älteren Personen.

Verfügen die Teilnehmer\*innen bereits über ein dezentrales oder zentrales System, beurteilen sie die mechanische Lüftung eher energieeffizienter als die Fensterlüftung und sehen eher einen Mehrwert für ein Haus im Vergleich zu anderen Gruppen. Sie schätzen auch die mit der mechanischen Lüftung verbundenen Kosten als weniger relevant ein als andere Gruppen.

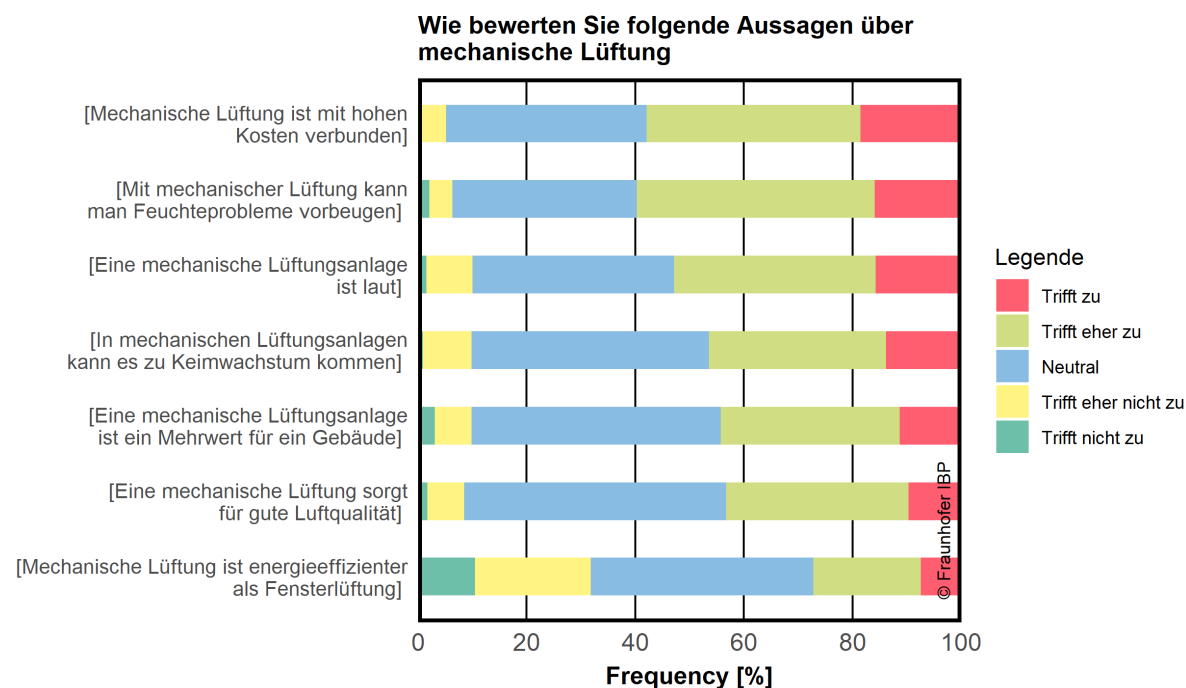


Abbildung 83: Beurteilungen der mechanischen Lüftung vor Erhalt der Information

### Teil 2. Informationsvideo und Teil 3. Bewertung der jeweiligen Lüftungssysteme

Nach dem Abspielen der Videos wurden die Meinungen bezüglich der am meisten überzeugenden Aspekte und der größten Hindernisse bei einer eventuellen Kaufentscheidung erhoben. Wie bei den Fragen zur Ist-Lüftungssituation durften die Teilnehmer\*innen mindestens einen und maximal drei wichtigste Punkte der Reihenfolge nach wählen.

Tabelle 43: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugen Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle ist „Rank1\*3 + Rank2\*2 + Rank3\*1“ berechnet.

	Gute Luftqualität	Leiser Betrieb	Bequem (ich muss mich um nichts kümmern)	Hoher thermischer Komfort auch im Winter	Einfache Bedienung	Kein Schimmelpilzwachstum
Rank1	340	175	131	146	123	130
Rank2	240	205	104	152	133	130
Rank3	175	152	121	158	144	131
Mit Gewichtung	1675	1087	722	900	779	781

#### 1. Zentrales Lüftungssystem

Vom zentralen Lüftungssystem sind die Teilnehmer deutlich von guter Luftqualität und leisem Betrieb und hohem Komfort überzeugt. Dagegen stellen die zu hohen Kosten das größte Hindernis beim Kaufentscheidung gefolgt vom benötigten Platz und zusätzlichem Aufwand dar. Nur wenige Leute sehen die Zugerscheinung oder die unsichere Technik als Hemmnis.

Tabelle 44: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Zu hohe Kosten	Benötigter Platz	Akustik (zu laut)	Wartungsarbeit (mehr Aufwand)	Unsichere Technik	Diskomfort (z.B. Zugerscheinung)	Sonstige
Rank1	570	188	26	152	43	26	40
Rank2	196	309	30	267	52	36	23
Rank3	165	172	45	215	53	42	53
Mit Gewichtung	2267	1354	183	1205	286	192	219

## 2. Dezentrales Lüftungssystem

Ähnlich wie beim zentralen Lüftungssystem sind die Teilnehmer\*innen am meisten von der guten Luftqualität des Systems überzeugt. Die einfache Bedienung wird beim dezentralen System jedoch deutlich besser eingeschätzt als beim zentralen System, bei dem Komfort und leiser Betrieb eher überzeugend waren. Besonders vom leisen Betrieb des dezentralen Systems waren die Teilnehmer\*innen am wenigsten überzeugt.

Obwohl im Vergleich zum zentralen System nicht so stark ausgeprägt, empfinden die Teilnehmer\*innen die Kosten als das größte Hemmnis bei der Kaufentscheidung, gefolgt vom zu lauten Betrieb. Verglichen mit dem zentralen System nannten deutlich mehr Personen den Diskomfort wie Zugerscheinung als Hemmnis.

Tabelle 45: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugt Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Gute Luftqualität	Leiser Betrieb	Bequem (ich muss mich um nichts kümmern)	Hoher thermischer Komfort auch im Winter	Einfache Bedienung	Kein Schimmelwachstum
Rank1	362	67	99	122	221	174
Rank2	251	43	93	130	223	154
Rank3	152	59	78	135	185	138
Mit.Gewichtung	1740	346	561	761	1294	968

Tabelle 46: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Zu hohe Kosten	Benötigter Platz	Akustik (zu laut)	Wartungsarbeit (mehr Aufwand)	Unsichere Technik	Diskomfort (z. B. Zegerscheinung)	Sonstiges
Rank1	359	120	271	130	41	59	65
Rank2	220	123	209	169	44	54	37
Rank3	119	107	127	140	46	67	61
Mit Gewichtung	1636	713	1358	868	257	352	330

### Abluftsystem

Beim regelbaren Abluftsystem wurde die Vorbeugung des Schimmelwachstumes als der am meisten überzeugende Faktor beurteilt. Danach folgten die einfache Bedienung und die gute Luftqualität. Der Komfortaspekt hingegen überzeugt am wenigsten und wurde auch als das größte Hemmnis dargestellt.

Tabelle 47: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugt Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Gute Luftqualität	Leiser Betrieb	Bequem (ich muss um nichts kümmern)	Hoher thermischen Komfort auch im Winter	Einfache Bedienung	Kein Schimmelwachstum
Rank1	217	133	92	56	242	305
Rank2	198	136	80	42	188	183
Rank3	124	97	85	43	165	128
Mit Gewichtung	1171	768	521	295	1267	1409

Tabelle 48: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.

	Zu hohe Kosten	Benötigter Platz	Akustik (zu laut)	Wartungsarbeit (mehr Aufwand)	Unsichere Technik	Diskomfort (z.B. Zugerscheinung)	Sonstige
Rank1	280	59	64	105	54	398	85
Rank2	177	67	93	148	58	179	56
Rank3	106	65	53	86	61	120	71
Mit Gewichtung	1300	376	431	697	339	1672	438

### Kaufentscheidung

Auf die Frage, für welche Art der Wohnungslüftung sie sich beim möglichen Neubau eines Hauses entscheiden würden, spricht sich ein ähnlich großer Anteil von Teilnehmer\*innen für die Fensterlüftung wie für das zentrale Lüftungssystem aus. Nur 12% würden ein dezentrales Lüftungssystem wählen und 3% ein Abluftsystem (siehe Abbildung 84).

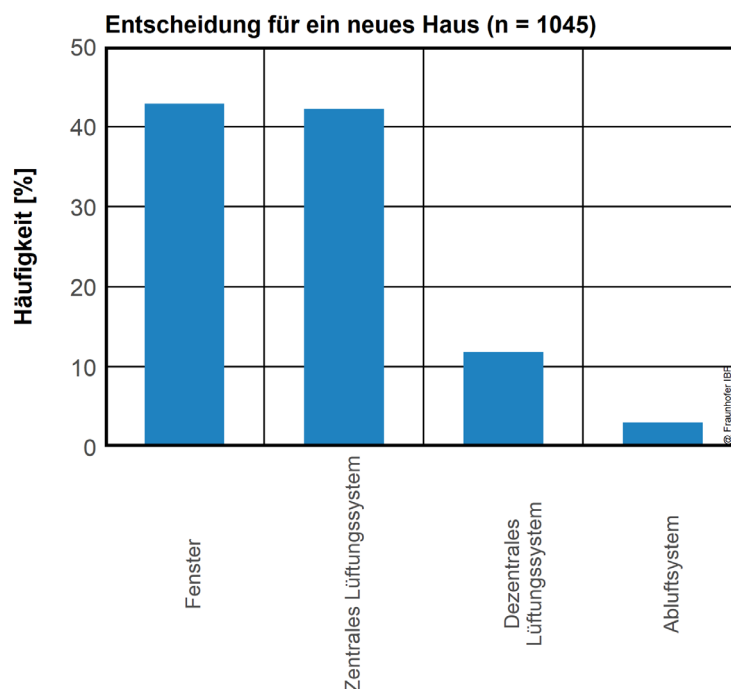


Abbildung 84 Entscheidung der Wohnungslüftung im Fall von neuen Hausbauten

Die Durchführung der paarweisen Chi-Quadrat-Tests hat gezeigt, dass die persönlichen Merkmale wie Alter, Geschlecht und Einkommen sowie die Wohnform die dargestellte beabsichtigte Kaufentscheidung nicht signifikant beeinflussen. Lediglich die Gruppe mit einem Bruttoeinkommen über 50.000 Euro tendiert verstärkt zu einem zentralen System (50%) als zu Fensterlüftung (37%), während sich die Gruppe mit einem Bruttoeinkommen unter 30.000 Euro eher für die Fensterlüftung (45%) als für ein zentrales System (40 %) ausspricht.

Signifikante Unterschiede zeigen sich unter Berücksichtigung der aktuellen Wohnungslüftungsart: Verfügen die Teilnehmer\*innen bereits über ein dezentrales Lüftungssystem, wählen sie in über 80% der

Fälle das zentrale Lüftungssystem (niemand entscheidet sich für die Fensterlüftung). Obwohl der Anteil der Gruppe mit einem dezentralen Lüftungssystem sehr klein (2,5 %) ist, ist der Unterschied signifikant ( $p < 0,01$ ) im Vergleich zu der Gruppe mit der Fensterlüftung.

Tabelle 49: Entscheidung für zukünftige Wohnungslüftung nach aktueller Wohnungslüftungsart Entscheidung für zukünftige Wohnungslüftung nach aktueller Wohnungslüftungsart

	Fenster	Zentrales Lüftungssystem	Dezentrales Lüftungssystem	Regelbares Abluftsystem
Ausschließlich Fensterlüftung (n= 783)	47%	40%	11%	3%
Fensterlüftung mit Abluftsystem z.B. in Bad oder in Küche (n= 226)	36%	46%	14%	4%
Mit dezentralem Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung (n=25)	0%	80%	16%	4%
Mit zentraler mechanischer Lüftung (n=9)	0%	56%	33%	11%

### Zusammenfassung der Nutzerakzeptanzstudie

Die vorliegende Nutzerakzeptanzstudie zeigt, dass der überwiegende Teil der Wohnräume in Deutschland ausschließlich per Fensterlüftung oder mit Hilfe eines Abluftsystems in Bad und Küche gelüftet wird. Der Anteil an mechanischen Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung ist mit unter 4% noch sehr klein. Da die Nutzer\*innen im Wesentlichen mit der Fensterlüftung zufrieden sind und wenig andere Möglichkeiten kennen, setzen sie sich mit dem Thema „Wohnungslüftung“ kaum auseinander. Die Diskussion über die Vor- und Nachteile der aktuellen Lüftungssituation sowie über die ideale Wohnungslüftung weist jedoch darauf hin, dass die Fensterlüftung viele Wünsche der Nutzer\*innen offenlässt: Folgen wie insbesondere die Auskühlung im Winter und das Eindringen von Fremdkörpern im Sommer sowie die Abhängigkeit von der Wohnlage oder dem Wetter stören die Nutzer\*innen dabei besonders.

Die Nutzer\*innen haben kaum Berührungspunkte mit mechanischen Wohnungslüftungssystemen außer bei kurzfristigen Aufenthalten in Hotels oder im Ausland beispielsweise. Negative Einstellungen (Vorurteile) in Bezug auf hohe Kosten, Akustik, Zugserscheinung oder Keimwachstum in den Geräten sind tendenziell stärker ausgeprägt als positive Einstellungen hinsichtlich guter Luftqualität, einem Mehrwert für ein Haus oder der Energieeffizienz. Lediglich der positive Aspekt der Vorbeugung von Feuchtheitproblemen wird stark geschätzt.

Bereits nach der kurzen Bereitstellung von Informationen durch Experten sind die Nutzer\*innen von den technischen Lösungen, dem thermischen Komfort und der guten Luftqualität der mechanischen Lüftungssysteme überzeugt. Das größte Hemmnis für die beiden mechanischen Lüftungssysteme – zentrales und dezentrales Lüftungssystem mit der Wärmerückgewinnung – liegt indes in den hohen Kosten begründet. Die Unsicherheit hinsichtlich der Wartung (z. B. Filterwechsel) oder Bedienung ist sehr niedrig bzw. wird die automatische Regelung sogar als großer Vorteil gegenüber der Fensterlüftung gesehen. Das regelbare Abluftsystem schätzen die Nutzer\*innen eher als vorbeugendes System (präventiv) gegen eventuelle Feuchtheitprobleme (hier haben fast 30% der Nutzer\*innen einschlägige Bedenken). Den möglichen Diskomfort empfinden sie als größten Nachteil dieses Systems.

Bei einem eventuellen Neubau würden sich die Nutzer\*innen hauptsächlich für die Fensterlüftung oder ein zentrales Lüftungssystem entscheiden.

## Abschließende Bewertung der Lüftungssysteme

### Bewertungsschema

Alle Systeme werden nach folgendem Schema abschließend bewertet.

#### **Luftqualität anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (siehe Kapitel Luftqualität)**

Die Bewertung erfolgt anhand der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden über 1000 ppm, die mit den Jahressimulationen ermittelt wurden. Verwendet werden dabei nur die Daten aus der Heizperiode von 01. Oktober bis 30. April. Die Werte wurden für alle Räume einzeln ermittelt und werden für die Bewertung über alle Räume aufsummiert. Grundlage sind die in Kapitel 0 beschriebenen Tagesprofile für die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

#### **Raumluftfeuchten (siehe Kapitel Feuchte)**

Raumluftfeuchten werden mittels der Feuchteüberstunden mit dem Grenzwert 50 % r.F. bewertet, diese wiederum wurden mit den Jahressimulationen ermittelt. Bei relevant hohen Werten wäre zusätzlich eine Bewertung des Schimmelrisikos über die jeweilige zusammenhängende Dauer der Überschreitung sinnvoll. Dies würde jedoch eine thermo-hygrische Simulation erfordern, die im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt wurde.

#### **Kosten (siehe Kapitel Wirtschaftlichkeit)**

Die Bewertung basiert auf einer Kostenermittlung durch den Projektpartner CG Elementum AG. Dabei handelt es sich um die Kalkulationskosten des Bauträgers. Steuerliche Aspekte, Einflüsse auf Verkaufspreise von Wohnungen sowie Fördermittel wurden dabei nicht berücksichtigt. Die Kosten dienen somit lediglich einer relativen Betrachtung.

#### **Effizienz der Lüftungssysteme (siehe Kapitel Effizienz der Lüftungsanlage)**

Als Effizienz wird allgemein das Verhältnis von Nutzen und Aufwand bezeichnet. Bei einem Lüftungssystem besteht der Nutzen in einer guten Luftqualität, der Aufwand sind dabei die Lüftungswärmeverluste und die elektrische Energie. Eine effizientes Lüftungssystem ist daher ein System, das für eine gute Luftqualität sorgt und dabei möglichst geringe Lüftungswärmeverluste verursacht, sowie eine geringe elektrische Leistungsaufnahme hat. Zur Bewertung dieses Verhaltens wurde in Kapitel 0 die Lüftungsaufwandszahl eingeführt. Diese setzt die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden, die Lüftungswärmeverluste und die elektrische Energieaufnahme eines Lüftungssystems ins Verhältnis zu einem Referenzsystem. Ein Lüftungssystem mit einer Lüftungsaufwandszahl kleiner 1 ist effizienter als das Referenzsystem, eine Lüftungsaufwandszahl größer ein bedeutet ein weniger effizientes System. Als Referenzsystem wurde das System 1 – zentrales Lüftungssystem verwendet.

#### **Behaglichkeit (siehe Kapitel Thermische Behaglichkeit)**

Eine absolute Bewertung von möglicher Beeinträchtigung der Behaglichkeit ist aufgrund der Vielzahl der nicht betrachteten Parameter, wie z.B. Art des Heizsystems, Dämmstandard etc., nicht möglich. Es wird deshalb lediglich auf Systeme hingewiesen, die nach den Messungen im Projekt zu einer Beeinträchtigung führen können. Als Volumenströme wurden die nach DIN 1946-6:2019 in Kapitel 0 ermittelten Volumenströme verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweisen der Lüftungssysteme, stellen sich bei realem Betrieb unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Luftfeuchten ein. Bei einer Auslegung der Volumenströme auf gleiche Randbedingungen, sodass sich



bei allen Lüftungssystemen im realen Betrieb die gleichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Luftfeuchten einstellen, wäre eine bessere Vergleichbarkeit gegeben.

Eine deutliche Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit wurde bei der betrachteten Raumgeometrie nur für die Systeme mit Fensterlüftung sowie mit Einzelraumlüftungsgerät (ERLG) festgestellt. Grund dafür sind der periodisch auftretende, relativ hohe Luftaustausch ohne Wärmerückgewinnung bei der Fensterlüftung sowie die frontale Ausblasrichtung beim Einzelraumlüftungsgerät. Alle anderen Systeme führen zu keiner relevanten Beeinträchtigung. Die Messungen zur thermischen Behaglichkeit ergaben somit für die meisten Lüftungssysteme positive Ergebnisse im Aufenthaltsbereich: Der vorhergesagte Anteil an Unzufriedenen aufgrund Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte (PPD) lag bei den meisten Lüftungssystemen ohne Fensterlüftung im Mittel bei maximal 10 - 11 %. Der Grenzwert zur Einhaltung der Behaglichkeitskategorie B nach DIN EN ISO 7730 liegt bei < 10 %. Für Kategorie C liegt der Wert bei < 15 % (s. Kapitel 0). Die Lüftungssysteme fallen daher in die Kategorie C.

Bei Lüftungssystemen mit Fensterlüftung (reine Fensterlüftung bei Bedarf oder rekuperative Einzelraumlüftung mit reduziertem Volumenstrom mit bedarfsweise unterstützender Fensterlüftung) kommen deutlich höhere Maximalwerte für PPD zustande: Diese lagen bei beiden Systemen um 30 %. Weil die Fensterlüftung aber ein nichtstationärer Vorgang ist, bei dem das Fenster mal geschlossen und mal geöffnet ist, wurde eine erweiterte Betrachtung angestellt, die unter anderem die Häufigkeit des Fensteröffnens berücksichtigt. Dabei resultiert für die reine Fensterlüftung ein mittlerer PPD-Wert von ca. 18 %. Der Grenzwert von PPD < 15 % wird hier überschritten. Bei zusätzlicher Lüftung durch das regenerative Einzelraumlüftungsgerät verbessert sich der Wert auf ca. 11 %, da deutlich seltener gelüftet werden muss.

Einen wichtigen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit hat zudem die in der Regel blendenbedingte Ausströmrichtung der Zuluftdurchlässe. So wirkt sich die nahezu frontale Einbringung der Zuluft bei den Einzelraumlüftungsgeräten auch noch im Aufenthaltsbereich negativ auf die thermische Behaglichkeit aus: Hier betrug der vorhergesagte Anteil Unzufriedener im Mittel bis zu 13,6 %.

### **Probandenbewertung (siehe Kapitel Studie zur Nutzerakzeptanz von Wohnraumlüftungssystemen)**

Im Rahmen der Probandenstudie wurde unabhängig von der Wohnungsgröße vier verschiedene Lüftungssysteme durch eine online Umfrage bewertet. Eine detaillierte Unterscheidung der in diesem Projekt untersuchten Lüftungssysteme war im Rahmen der Studie nicht möglich.

Die meisten der ca. 1700 befragten Personen nutzen bisher keine ventilatorgestützten Systeme. Durch Videos wurde allgemeines Wissen zu den verschiedenen Systemen vermittelt. Einige entscheidende Aussagen können aus der Tabelle 49 gewonnen werden. Die wenigen Befragten, die bereits über eine ventilatorgestützte Lüftung verfügen, würden in zukünftigen Wohnungen nicht mehr zur reinen Fensterlüftung zurückkehren. Die Befragten, die bisher mit Fenstern lüften, würden zu mehr als 50 % ein ventilatorgestütztes System bevorzugen, wobei zentrale Systeme den Einzelraumssystemen vorgezogen werden. Zentralen Systemen werden dabei vor allem eine hohe Luftqualität, geringe Geräuschentwicklung und hoher thermischer Komfort zugeschrieben. Dezentrale Systeme punkten neben der guten Luftqualität vor allem mit der einfachen Bedienbarkeit. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Wohnungslüftungssysteme nach entsprechender Aufklärung eine hohe Nutzerakzeptanz genießen. Dies gilt sowohl für Nutzer, die noch keine Erfahrung damit haben als auch im Besonderen für diejenigen, die bereits über solche Anlagen verfügen.

### **Bewertung der Jahressimulationen**

Im Folgenden wird das zuvor genannte Bewertungsschema auf die in Kapitel 0 vorgestellten Ergebnisse angewandt. Die Systeme mit Bedarfsführung (System 5b, 8a, 8b, 9) wurden nicht bewertet, da die

Ergebnisse von den verwendeten Regelalgorithmen bzw. Grenzwerten abhängig sind. Für diese Regelalgorithmen gibt es in Deutschland keine normativen Vorgaben, sodass eine einfache Bewertung nicht möglich ist. Für System 9, bei dem Fensterlüftung als unterstützende Maßnahme verwendet wurde, wurde ein idealer Nutzer angenommen, der beim Über- oder Unterschreiten eines Grenzwertes das Fenster schließt oder öffnet. In einer realen Wohnsituation wird in der Regel deutlich weniger gelüftet. Aufgrund unterschiedlicher Luftqualitäten sind die dann resultierenden Lüftungswärmeverluste schwer zu vergleichen. Eine mögliche Lösung könnten elektrische Fenster darstellen, die sich bei Bedarf nutzerunabhängig öffnen.

### **Studentenapartment – Mit Berücksichtigung der DIN18017-3**

#### **Luftqualität anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen**

Aufgrund der hohen Volumenströme (siehe Lüftungssysteme) durch die Berücksichtigung der DIN 18017-3 in Bezug auf die Personenzahl 1 ergeben sich für alle Systeme geringe CO<sub>2</sub>-Über(ppm) Stunden. Die Luftqualität ist daher bei allen Systemen als gut zu bewerten.

#### **Raumluftfeuchten**

Bei dem Grundriss des Studentenapartments liegen die Feuchteüberstunden von dezentralen Lüftungssystemen, welche nicht mit Abluftventilatoren kombiniert wurden (System 3 & 6), immer über denen des zentralen Lüftungssystems, da dann der zusätzliche Außenluftvolumenstrom des Bads nicht über den Wohnbereich geführt wird. Bei konstant betriebenen mit Abluftventilatoren kombinierten Systemen (System 4 & 5a) sind die Feuchteüberstunden äquivalent zu denen des System 1. Aufgrund der, im Vergleich zu den für den Feuchteschutz benötigten Volumenströmen, hohen Volumenströmen sind die Lüftungssysteme trotzdem als hygienisch unbedenklich einzustufen. Es ist zu berücksichtigen, dass höhere Volumenströme im Winter zu unbehaglich niedrigen Raumluftfeuchten führen können.

#### **Kosten**

Im Vergleich zum System 1 weisen alle anderen Systeme geringere annuitätische Kosten auf. Hauptgrund dafür sind die hohen Investitionskosten für System 1. Es ist jedoch anzumerken, dass für diesen Grundriss in der Praxis auf ein Einzelraumlüftungsgerät mit Zweitraumanschluss zurückgegriffen werden kann und meist auch wird. Somit ist der Vergleich von System 3 mit dem Rest die interessantere Fragestellung. Dabei zeigt sich, dass das Einzelraumgerät mit Wärmerückgewinnung nur unwesentlich schlechter abschneidet als Systeme ohne Wärmerückgewinnung, wie z.B. ein reines Abluftsystem wie System 7.

#### **Effizienz des Lüftungssystems**

Die Systeme 3 & 6 mit Einzelraumlüftungsgeräten weisen eine geringer Lüftungsaufwandszahl als das Referenzsystem auf und sind daher effizienter. Auch System 9 bei dem die Einzelraumlüftungsgeräte durch Fensterlüftung ergänzt werden ist effizienter als System 1. Die Systeme 4 und 5a bei dem Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren kombiniert werden, sind aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung und den damit verbundenen höheren Lüftungswärmeverlusten, weniger effizient als das Referenzsystem. Dies gilt ebenfalls für System 7. Die Systeme 5b und 8b weisen im Vergleich zu den anderen Systemen höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm) Stunden auf. Durch die sehr geringen CO<sub>2</sub>-Über(ppm) Stunden des Referenzsystems wird die Effizienz dieser Systeme als sehr schlecht bewertet. Tatsächlich hat System 5b geringere Lüftungswärmeverluste als System 1. Die Anwendung der Lüftungsaufwandszahl auf die Varianten der Lüftungssysteme zeigt, dass keine der Varianten eine Steigerung der Effizienz bewirkt.

## **Studentenapartment – Ohne Berücksichtigung der DIN18017-3**

### **Luftqualität anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen**

Ohne Berücksichtigung der DIN18017-3 sind die Personen bezogenen Volumenströme niedriger als bei der Variante mit Berücksichtigung der DIN18017-3. Der Grenzwert wird wieder jeweils nur im Bad für kurze Zeit überschritten, sodass auch mit geringerem Volumenstrom mit allen Systemen eine gute Luftqualität gewährleistet wird.

### **Raumluftfeuchten**

Die Feuchteüberstunden des zentralen Lüftungssystems sind mit 2325 h, um 516 h höher als bei der Variante mit Berücksichtigung der DIN18017-3. Bei den Überschreitungen des Grenzwerts handelt es sich jeweils um kurze Überschreitungen bei Spitzenlasten wie Kochen oder Duschen. Die Differenz der Feuchteüberstunden zwischen den Systemen im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem hat sich im Vergleich zu der Variante mit Berücksichtigung der DIN18017-3 verringert. Dezentrale Systeme, welche nicht mit Abluftventilatoren kombiniert sind (System 3 & 6) liegen 35% über den Feuchteüberstunden von System 1.

### **Kosten**

Bei den Investitionskosten wurden für beide Varianten (mit und ohne Berücksichtigung der DIN18017-3) dieselben Werte angenommen. Differenzen sind daher auf die unterschiedlichen Betriebskosten zurückzuführen. Für die Systeme ohne Kombination mit Abluftventilatoren (Systeme 1, 3, & 6) sinken die annuitätischen Ausgaben um ca. 2 € im Vergleich zur Variante mit Berücksichtigung der DIN18017-3. Bei Systemen mit Abluftventilatoren liegen die Einsparungen mit ca. 7 € etwas höher. Jedoch ist die Einsparung gegenüber der Variante mit Berücksichtigung der DIN18017-3 bei allen Systemen in keinem relevanten Bereich.

### **Effizienz des Lüftungssystems**

Die Lüftungssysteme 3 & 6 mit Einzelraumlüftungsgeräten haben eine Lüftungsaufwandszahl von 0,5 und sind daher effizienter als das Referenzsystem. Systeme mit Abluftventilatoren 4, 5a & 7 sind weniger effizient als System 1. Die höheren CO<sub>2</sub>-Über(ppm) Stunden von System 9 bei dem Einzelraumlüftungsgeräte durch Fensterlüftung ergänzt werden, führen zu einer Lüftungsaufwandszahl von 7,1. Die Lüftungsaufwandszahlen der Varianten zeigen das diese nicht zu einer Steigerung der Effizienz führen.

## **Zwei-Zimmer-Wohnung**

### **Luftqualität an Hand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen**

Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden liegen bei System 2 mit aktiven Überströmern und System 7 reines Abluftsystem über den des zentralen Lüftungssystems. Bei beiden Systemen ist die Luftqualität verglichen mit System 1 schlechter, da der Grenzwert öfter und höher überschritten wird. Dies zeigt, dass a) bei System 2 eine normative Auslegung der Volumenströme (daher keine Erhöhung) nicht ausreichend ist, um eine äquivalente Luftqualität wie bei Systemen ohne aktive Überströmer zu erreichen und b) Leckagen bei abluftbasierten Systemen einen signifikanten Einfluss auf die Luftqualität haben können. Die dezentralen Lüftungssysteme, die nicht mit Abluftventilatoren kombiniert sind (System 3 & 6), haben gering niedrigere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und daher besser Luftqualität als System 1. Werden diese Systeme mit Abluftventilatoren kombiniert (System 4 & 5a) nimmt die Luftqualität weiter zu. Die Lüftungswärmeverluste der Systeme 3, 4, 5a liegen über denen des zentralen Lüftungssystems. Um eine vergleichbare Luftqualität zu erreichen und die Lüftungswärmeverluste und den elektrischen

Energieverbrauch zu senken wurden im Kapitel 0 unterschiedliche Anpassungen der Volumenström untersucht. Diese werden nachfolgenden diskutiert.

### **Raumluftfeuchten**

System 2 mit den aktiven Überströmern hat gering höhere Feuchteüberstunden, jedoch eine deutlich geringere Differenz zum System 1 als bei den CO<sub>2</sub>-Überstunden. Auch bei System 7 dem Abluftsystem nach DIN1946-6 liegen die Feuchteüberstunden nur geringfügig über denen des zentralen Lüftungssystems. Die dezentralen Lüftungssysteme mit und ohne kombinierten Abluftventilator liegen mit den Feuchteüberstunden unter denen des zentralen Lüftungssystems.

### **Kosten**

Die geringsten annuitätischen Ausgaben hat System 7 das Abluftsystem nach DIN1946-6. Bei den Systemen mit Wärmerückgewinnung weist System 3 mit Einzelraumlüftungsgeräten ohne Kombination mit Abluftventilatoren mit 34 % die geringsten annuitätischen Ausgaben auf. System 4 hat trotz geringerer Anschaffungskosten als System 3, aufgrund der höheren Lüftungswärmeverluste, höhere annuitätische Ausgaben. Bei Systemen mit Pendellüftern fallen die Kostenvorteile gegenüber dem zentralen Lüftungssystem noch geringer aus.

### **Effizienz des Lüftungssystems**

Für die Zwei-Zimmer-Wohnung ist keins der Lüftungssysteme effizienter als System 1. Das System 2 mit aktiven Überströmern weist dieselben Lüftungswärmeverluste auf wie das Referenzsystem. Jedoch sind die Lüftungswärmeverluste höher. Dies führt zu einem weniger effizienten System. Die Lüftungssysteme mit Einzelraumlüftungsgeräten sind im Vergleich zu den restlichen Lüftungssystemen, mit einer Lüftungsaufwandszahl von 1,4, am effizientesten. Danach folgen System 5b bei dem Pendellüfter mit bedarfsgeführten Abluftventilatoren kombiniert werden, sowie System 9 bei dem Einzelraumlüftungsgeräte durch Fensterlüftung ergänzt werden. Die Systeme 4 und 5a bei denen Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren kombiniert wurden, haben aufgrund der höheren Lüftungswärmeverluste eine Lüftungsaufwandszahl von 3,3. System 7 erreichen aufgrund der höheren CO<sub>2</sub>-Über(ppm) Stunden nur eine Lüftungsaufwandszahl von 3,8. Die Lüftungsaufwandszahlen der Varianten zeigen, dass eine Reduktion des Volumenstroms der Einzelraumlüftungsgeräte um 10 % zu einer Effizienzsteigerung führt. Eine weitere Reduktion führt zu einer geringeren Effizienz. Für Lüftungssysteme bei denen Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren kombiniert werden, hat eine Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms, als auch eine gleichzeitig Reduktion der Volumenströme um 10 %, eine Steigerung der Effizienz zur Folge.

## **Drei-Zimmer-Wohnung**

### **Luftqualität an Hand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen**

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Lüftungssystemen verhalten sich analog wie bei der Zwei-Zimmer-Wohnung. Jedoch sind die Differenzen zum zentralen Lüftungssystem geringer.

### **Raumluftfeuchten**

Die Unterschiede der Feuchteüberstunden sind im Verhältnis zum zentralen Lüftungssystem gleich wie bei der Zwei-Zimmer-Wohnung.

## **Kosten**

Die Relation der annuitätischen Ausgaben der Systeme zu Lüftungssystem 1 ist ebenfalls gleich wie bei der Zwei-Zimmer-Wohnung. Jedoch ist zu erkennen, dass der Kostenvorteil der dezentralen Lüftungssystemen gegenüber dem zentralen Lüftungssystem mit zunehmender Wohnungsgröße abnimmt.

## **Effizienz des Lüftungssystems**

Die Lüftungsaufwandszahlen der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung verhalten sich analog zur Zwei-Zimmer-Wohnung. Auch die Varianten der Lüftungssysteme führen zu einer gleichen Steigerung der Effizienz wie bei der Zwei-Zimmer-Wohnung.

## **Bewertung der Varianten mit alternativer Volumenstromauslegung in der Jahressimulationen**

Aufgrund der im vorhergehenden Kapitel identifizierten Nach- bzw. Vorteilen (Schlechtere oder bessere Luftqualität, höhere Lüftungswärmeverluste, usw.) wurden zu ausgewählten Lüftungssystemen alternative Auslegungsvarianten betrachtet, welche im Folgenden diskutiert werden.

### **Studentenapartment**

#### **System 3 – ERLG**

Die Reduktion der Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte hat zur Folge, dass die ohnehin schon erhöhten Feuchteüberstunden (im Vergleich zu System 1) weiter ansteigen. Da die Lüftungswärmeverluste auch ohne Reduktion der Volumenströme nicht höher als die des zentralen Lüftungssystems sind, wird eine Reduktion als nicht sinnvoll erachtet.

#### **System 4 – ERLG + AB**

Durch die Anrechnung der Infiltrationsvolumenströme auf die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte werden die Lüftungswärmeverluste leicht reduziert. Die Feuchteüberstunden liegen dann mit 12 % gering über denen des zentralen Lüftungssystems. Diese liegen damit aber in einem vertretbaren Rahmen, sodass eine Anrechnung der Infiltrationsvolumenströme als sinnvoll erachtet werden kann.

### **Zwei-Zimmer-Wohnung**

#### **System 2 – aktive Überströmer**

Die Erhöhung der Volumenströme der aktiven Überströmer um 30 % führt zu einer deutlichen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden. Die Feuchteüberstunden werden hierdurch ebenfalls reduziert. Die annuitätischen Ausgaben steigen hingegen kaum. Eine Erhöhung der Volumenströme wird daher empfohlen. Ob eine weitere Steigerung sinnvoll ist, hängt von den Schallemissionen des aktiven Überströmers ab.

#### **System 3 – ERLG**

Die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte wurden zwischen 10 % - 30 % reduziert. Eine Reduktion führt zu einer äquivalenten Luftqualität verglichen mit dem zentralen Lüftungssystem. Die Feuchteüberstunden bleiben unter denen des System 1. Die Lüftungswärmeverluste werden durch die Reduktion vermindert. Die annuitätischen Ausgaben können weiter reduziert werden. Eine weitere Reduktion des Volumenstroms führt zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden, sodass diese die Werte vom zentralen Lüftungssystem übersteigen. Eine Reduktion um mehr als 10 % ist daher nicht empfehlenswert.

### System 5 – ERLG + AB

Wird das System nach DIN1946-6 ausgelegt, werden die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden im Vergleich zum zentralen Lüftungssystem deutlich unterschritten. Durch Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms auf die Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte und die Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren um 10 % konnten die Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und die Feuchteüberstunden liegen dabei immer noch unter denen des zentralen Lüftungsgeräts. Eine Reduktion der Volumenströme wird daher als sinnvoll erachtet.

### **Drei-Zimmer-Wohnung**

#### System 2 – Aktive Überströmer

Wird der Volumenstrom der aktiven Überströmer nach Norm ausgelegt, werden deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als beim zentralen System erreicht. Durch eine Erhöhung des Volumenstroms um 30 % können die die CO<sub>2</sub>-Überstunden, als auch die Feuchteüberstunden reduziert werden. Die annuitätischen Kosten nehmen gleichzeitig kaum zu. Eine Anpassung der Volumenströme ist daher zu empfehlen.

#### System 3 – ERLG

Bei Auslegung der Einzelraumlüftungsgeräte nach Norm werden geringere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden und Feuchteüberstunden als beim zentralen Lüftungssystem erreicht. Jedoch liegen die Lüftungswärmeverluste über denen von System 1. Durch eine Reduktion der Volumenströme der Einzelraumlüftungsgeräte um 10 % werden gering höhere CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden als beim zentralen Lüftungssystem erreicht, die Feuchteüberstunden werden jedoch nicht überschritten. Die Lüftungswärmeverluste, als auch die annuitätischen Ausgaben sinken durch die Volumenstromreduktion. Bei einer weiteren Reduktion des Volumenstroms um 10 % bis 20 % steigen die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden weiter an. Die Feuchteüberstunden liegen dann über denen des zentralen Lüftungssystems. Eine Reduktion des Volumenstroms um 10 % wird daher als sinnvoll erachtet, eine weitere Reduktion nicht.

#### System 4 – ERLG + AB

Bei einer Anrechnung des wirksamen Infiltrationsvolumenstroms und einer Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren sinkt die Luftqualität und die Feuchteüberstunden nehmen zu. Jedoch können die Lüftungswärmeverluste, sowie die annuitätischen Ausgaben durch die Reduktion gesenkt werden. Die CO<sub>2</sub>-Überstunden und die Feuchteüberstunden überschreiten trotz der Reduktion die des zentralen Lüftungssystems nicht. Eine Anpassung ist daher empfehlenswert.

## Zusammenfassung

In Deutschland wird für die Auslegung von Lüftungssystemen die DIN 1946-6:2019 verwendet. Diese wurde im Jahr 2019 novelliert. Seit der Novellierung ist es möglich mehrerer Lüftungssysteme in einer Nutzungseinheit zu verwenden. In diesem Projekt wurden Auslegungsgrundlagen für die Dimensionierung solcher sich überlagernden Systeme erarbeitet und mit anderen Lüftungssystemen verglichen.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die annuitätischen Ausgaben für alle Lüftungssysteme für die drei Grundrisse ermittelt. Dabei wurden die Investitionskosten, als auch die Wartungs- und Betriebskosten, wie Kosten für Filterwechsel und Kanalreinigung berücksichtigt. Der Vergleich der annuitätischen Ausgaben zeigt, dass die zusätzlichen Heizkosten durch die höheren Lüftungswärmeverluste der Lüftungssysteme ohne oder mit nur teilweise vorhandener Wärmerückgewinnung die höheren Investitionskosten der Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung nicht aufwiegen.

Eine Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit wurde bei den Behaglichkeitsmessungen lediglich für die Systeme mit Fensterlüftung sowie mit Einzelraumlüftungsgerät festgestellt. Dies war auf den periodisch auftretenden, hohen Luftaustausch bei der Fensterlüftung und der damit einhergehenden starken Abkühlung des Raumes zurückzuführen. Bei den Einzelraumlüftungsgeräten wirkte sich die frontale Ausblasrichtung in Aufenthaltshöhe negativ auf die Behaglichkeit aus.

Für die Bewertung der Lüftungseigenschaften der Lüftungssysteme wurden multizonale Simulationsmodelle für drei verschiedene Grundrisse erstellt. Das Simulationsmodell für die Zwei-Zimmer-Wohnung wurde mit Messungen in der Forschungswohnung der Technischen Hochschule Rosenheim validiert. In den Simulationsmodellen wurden die CO<sub>2</sub>-Über(ppm)stunden, die Feuchteüberstunden, der elektrische Energiebedarf, sowie die Lüftungswärmeverluste ermittelt. Untersucht wurden konservative Lüftungssysteme (ohne Überlagerung von mehreren Lüftungssystemen), als auch Systeme mit überlagerten Lüftungssystemen. Diese Ergebnisse (Lüftungswärmeverluste und elektrische Energiebedarf) wurden wiederum bei der Berechnung der annuitätischen Kosten berücksichtigt. Aufgrund fehlender Bewertungsgrundlagen bzw. Grenzwerten für Schadstoffe im Wohnbereich wurden die Ergebnisse im Verhältnis zu einem vergleichbaren zentralen Lüftungssystem betrachtet. Für einige Lüftungssysteme wurde dabei ein Optimierungspotential festgestellt.

## Empfehlungen für die Auslegung von Systemen und die Normungsarbeit

Mögliche Anpassungen der normativen Auslegung der Volumenströme wurden in unterschiedlichen Varianten untersucht. Folgende Erkenntnisse wurden dabei erarbeitet.

### Systeme mit aktiven Überströmern

Werden die aktiven Überströmer nach den raumweisen Volumenströmen der DIN1946-6:2019 ausgelegt, werden diese mit dem gleichen Volumenstrom betrieben wie ein System, das frische Außenluft fördert. Jedoch arbeiten die aktiven Überströmer mit einer Art Mischluft z.B. aus dem Flur, die eine etwas höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration als die Außenluft aufweist. Somit führt diese Auslegung zu einer deutlich schlechteren Luftqualität im belüfteten Raum im Vergleich zu einer Belüftung durch ein zentrales Lüftungssystem. Durch die Erhöhung des Volumenstroms der aktiven Überströmer um ca. 30 % konnte eine Verbesserung der Luftqualität erzielt werden [34].

### Dezentrale Lüftungssysteme

Bei dezentralen Lüftungssystemen kann das sog. Kaskaden-Lüftungs-Prinzip nicht verwendet werden, da jeder Raum separat belüftet wird und somit kein Luftaustausch zwischen den Räumen stattfindet. Hierdurch wird zwar in den Ablufträumen geringfügig bessere Luftqualität erreicht, andererseits sind jedoch die Wärmeverluste höher als bei einem vergleichbaren zentralen Lüftungssystem, bei dem die Luft mehrfach genutzt wird. Wird der Volumenstrom des dezentralen Lüftungsgerätes um 10 % reduziert werden vergleichbare Werte wie bei einer zentralen Anlage erreicht. Dies gilt jedoch nicht für das Studentenapartment. Die Reduktion des Volumenstroms erfolgt deshalb abhängig von der Raumfläche bzw. der Raumanzahl.

### Dezentrale Lüftungssysteme in Kombination mit Abluftsystemen

Die erste Auslegung der Volumenströme erfolgte nach DIN 1946-6:2019 (s. Abbildung 85). Hierbei wurde der wirksame Infiltrationsvolumenstrom (abgebildet durch grüne, unterbrochene Pfeile) (wie es bei der Auslegung von ALD's möglich ist) nicht berücksichtigt. Hierdurch werden deutlich höhere Außenluftvolumenströme als bei einer vergleichbaren zentralen Lüftungsanlage erreicht. Dies führt zu einer besseren Luftqualität. Aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung der Abluftventilatoren sind die Wärmeverluste jedoch deutlich höher. Durch die Anrechnung der wirksamen Infiltrationsvolumenströme bei der Auslegung der dezentralen Lüftungssysteme und der Reduktion der Volumenströme der Abluftventilatoren um 10 % (s. Abbildung 86) kann eine ähnliche Luftqualität wie bei einem vergleichbaren zentralen Lüftungssystem erreicht werden. Die Lüftungswärmeverluste sind immer noch höher, jedoch konnten diese durch die Reduktion der Volumenströme ebenfalls gesenkt werden. Dies gilt wiederum nicht für das Studentenapartment. Daher sollte, wie bei den reinen dezentralen Lüftungssystemen, die Anpassung abhängig von der Fläche oder der Raumanzahl erfolgen.

Grundsätzlich sollte das Thema bedarfsgeführte Systeme in der Normung detaillierter betrachtet werden, siehe dazu auch die Vorschläge im abschließenden Ausblick. In der Praxis kommen Bedarfsführungen (z.B. über CO<sub>2</sub>-Konzentrationen) häufiger zum Einsatz. Die der Energiebilanzierung nach DIN V 18599 wird dies mit einem pauschal reduzierten mittleren Luftwechsel berücksichtigt. Die Auslegung der Systeme erfolgt aber dennoch nach den Kriterien für unregelmäßige Systeme. Insbesondere bei Systemen mit möglicher Einzelraumregelung können somit mögliche Kostenreduktionen durch geringere Volumenstromdimensionierung nicht angemessen umgesetzt werden.



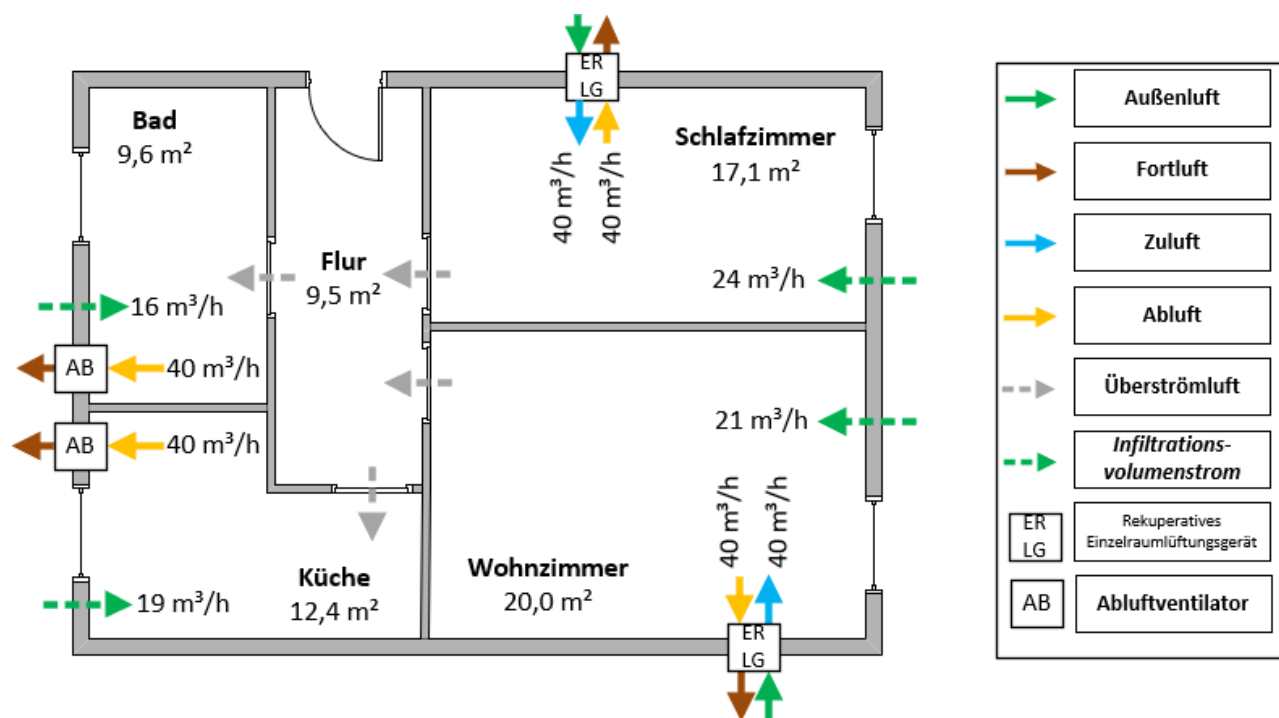


Abbildung 85 Zwei-Zimmer-Wohnung, Einzelraumlüftungsgeräte kombiniert mit Abluftventilatoren, Auslegung nach DIN1946-6 ohne Anpassung der Volumenströme

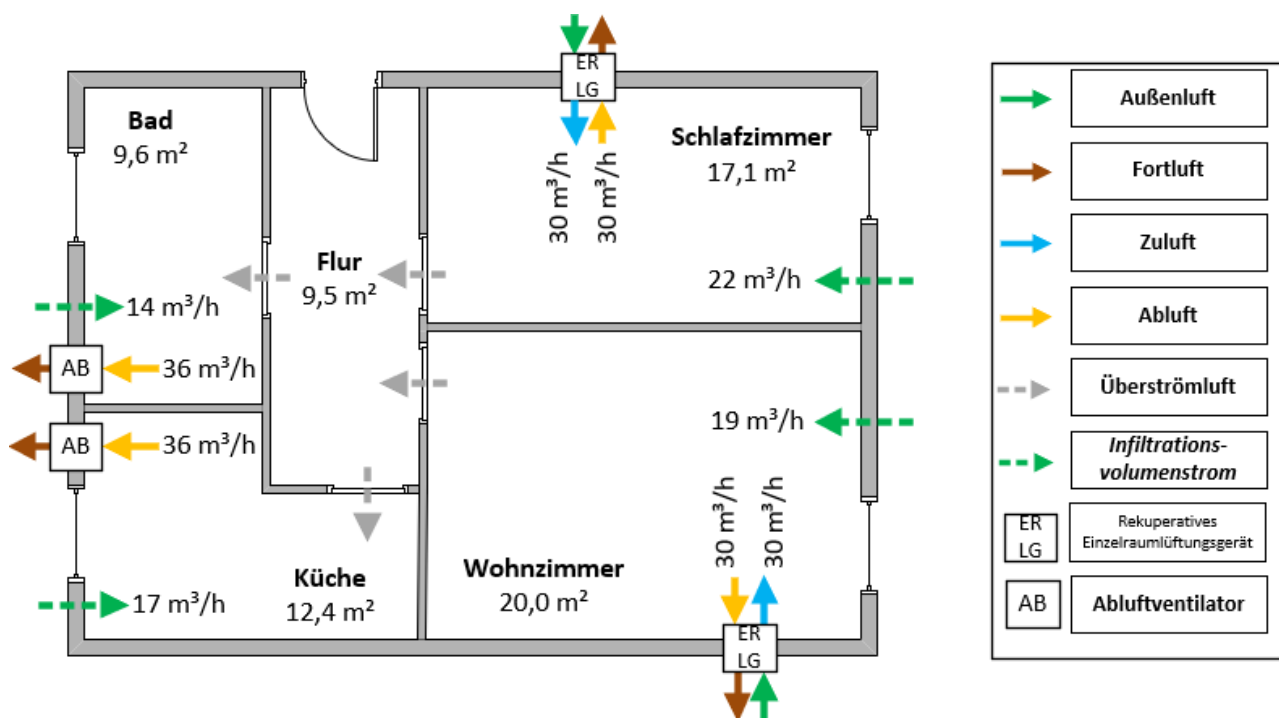


Abbildung 86 Zwei-Zimmer-Wohnung, Einzelraumlüftungsgeräte kombiniert mit Abluftventilatoren, Auslegung nach DIN1946-6 mit Reduktion der Abluftvolumenströme um 10 % und Anrechnung der (berechneten) wirksamen Infiltrationsvolumenströme

## Ausblick

In diesem Forschungsprojekt lag der Fokus auf der Ermittlung von Dimensionierungslösungen für kombinierter Lüftungssysteme in derselben Nutzungseinheit. Daher wurden bedarfsgeführte Lüftungssysteme nur am Rand betrachtet. Zusätzlich fehlen für die Bewertung von bedarfsgeführten Lüftungssystemen jegliche Normierungs- und Bewertungsgrundlage zur Parametrisierung der Regelstrategien. Jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass durch eine bedarfsgeführte Betriebsweise, bei gleicher oder besserer Luftqualität, die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert werden können. Allerdings können falsche Parametrisierung und Betriebsweise auch zu höheren Lüftungswärmeverlusten und schlechterer Luftqualität führen [38]. In künftigen Forschungsvorhaben sollte daher der Fokus auf der Entwicklung von Bewertungs- und Zertifizierungsverfahren für bedarfsgeführte Lüftungssysteme liegen.

Wünschenswert wäre außerdem eine systemabhängige flexiblere Auslegung von Wohnungslüftungsanlagen, welche die Kriterien Raumluftfeuchte, Luftqualität und Energieeffizienz realitätsnah ermöglichen. Simulationstools wie das hier verwendete CONTAM sind dafür aufgrund der Vielzahl der Parameter nicht praxistauglich. Überlegungen gehen daher in Richtung eines einfachen Werkzeuges, das z.B. auf Basis von Gebäudemodellen aus üblicher Energieberatersoftware, dem Planer eine Auslegung auch für bedarfsgeführte Systeme ermöglicht.

## Literaturangaben

- [1] *DIN 1946-6:2019-12, Raumluftechnik\_ - Teil\_6: Lüftung von Wohnungen\_ - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*
- [2] *DIN 1946-6:2009-05, Raumluftechnik\_ - Teil\_6: Lüftung von Wohnungen\_ - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung*
- [3] Mujan, I., Anđelković, A. S., Munćan, V., Kljajić, M. u. Ružić, D.: Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review. *Journal of Cleaner Production* 217 (2019), S. 646–657
- [4] Brandhorst, J. u. Willems, G.: Schimmelpilzschäden. Erkennen, bewerten, sanieren. Paxiswissen Bauwesen. 2016
- [5] *DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden\_ - Teil\_2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*
- [6] Gaëlle Guyot, Max Sherman, Iain Walker u. Jordan D Clark: Microsoft Word - LBNLSVACH Smart ventilation review.docx
- [7] Zhang, X., Wargocki, P. u. Lian, Z.: Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor air* 27 (2017) 1, S. 65–77
- [8] *DIN EN 16798-1:2015-07, Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden\_ - Teil\_1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik;\_ - Module M1-6; Deutsche und Englische Fassung prEN\_16798-1:2015*
- [9] Pettenkofer, M. von: Über den Luftwechsel in Wühng Gebäuden. 1858
- [10] Guyot, G.: Towards a better integration of indoor air quality and health issues in low-energy dwellings: Development of a performance-based approach for ventilation
- [11] Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 51 (2008) 11, S. 1358–1369
- [12] *DIN V 18599-2:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden\_ - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung\_ - Teil\_2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*
- [13] Office, P.: 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
- [14] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: „Wie heizt Deutschland?“. Studie zum Heizungsmarkt, 2019.  
[https://www.bdew.de/media/documents/BDEW\\_Heizungsmarkt\\_final\\_30.09.2019\\_3ihF1yL.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Heizungsmarkt_final_30.09.2019_3ihF1yL.pdf)
- [15] *DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung\_ - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO\_7730:2005); Deutsche Fassung EN\_ISO\_7730:2005*
- [16] Greml, A., Kapferer, R. u. Leitzinger, W.: Wirtschaftlichkeit von Komfortlüftungen. *Komfortlüftungsinfo* Nr. 25, 2014. [www.komfortluftung.at](http://www.komfortluftung.at), abgerufen am: 11.01.2021
- [17] Matthey, A. u. Bünger, B.: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze, 2020. [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de), abgerufen am: 11.01.2021
- [18] *VDI 2067 Blatt 1:2012-09. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*

- [19] DIN 1946-6 Beiblatt 1:2012-09, *Raumlufttechnik\_ - Teil\_6: Lüftung von Wohnungen\_ - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung\_ - Beiblatt\_1: Beispielberechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme*
- [20] DIN 18017-3:2020-05, *Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster\_ - Teil\_3: Lüftung mit Ventilatoren*
- [21] Elisabeth Sibilli: Optimized integration of ventilation with heat recovery in residential buildings through the implementation of innovative air distribution strategies and pre-fabricated components, Universität Innsbruck Dissertation 2015
- [22] DIN EN 15251:2012-12, *Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden\_ - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN\_15251:2007*
- [23] Persily, A. K.: Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. ASHRAE Transactions (1997)
- [24] Bienfait, D., Fitzner, K., Lindvall, T., Seppanen, O., Wollscroft, M., Fanger, P., Jantunen, M. J., Skaret, E. u. Schlatter, J.: Report No.11. Guidelines for ventilation requirements in buildings. 1992
- [25] Seifert, J., Schinke, L. u. Beyer, M.: Grundlagen der Wärmephysiologie. Theoretische Grundlagen, stationäre und instationäre Modelle. Edition Recknagel. 2019
- [26] DIN EN 15665:2009-07, *Lüftung von Gebäuden\_ - Bestimmung von Leistungskriterien für Lüftungssysteme in Wohngebäuden; Deutsche Fassung EN\_15665:2009*
- [27] Künzel, H. u. Bischof, W.: Wohnungslüftung und Raumklima. Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen. 2009
- [28] CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2, Dols, W. S. u. Polidoro, B. J., 2015
- [29] Pathak, A., Norrefeldt, V. u. Grün, G.: Modelling of Radiative Heat Transfer in Modelica with a Mobile Solar Radiation Model and a View Factor Model. Proceedings of the 9th International MODELICA Conference, September 3-5, 2012, Munich, Germany. Linköping Electronic Conference Proceedings. Linköping University Electronic Press 2012, S. 271–278
- [30] Orme, M. u. Leksmono, N.: Ventilation Modelling Data Guide. 2002
- [31] Roulet, C.-A.: Ventilation and airflow in buildings. Methods for diagnosis and evaluation. Buildings, energy, solar technology. Sterling: Earthscan 2008
- [32] DIN EN ISO 12569 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren2
- [33] European Commission: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). [re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#TMY](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY), abgerufen am: 11.01.2021
- [34] Strobl, T., Wirnsberger, M. u. Krause, H.: Einfache Lüftungssysteme für Wohngebäude – Untersuchungen in einer Forschungswohnung. International Passivehouse Conference 2018. München: PHI Darmstadt 2018, S. 8
- [35] Creswell, J. W.: Research design. Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Los Angeles, Calif.: SAGE 2014
- [36] Fahrmeir, L.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 2011
- [37] Zensus 2011. Bevölkerung: Ergebnisse des Zensus am 9.Mai. 2011, Statistische Ämter des Bundes und der Länder
- [38] Aimer, D., Wirnsberger, M. u. Krause, H.: Simulation von Lüftungssystemen und Entwurf verschiedener Regler für optimierte Luftqualität und Energieeffizienz. BauSIM 2020. 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, 23-25 September 2020, Graz University of Technology, Austria : proceedings. 2020, S. 152–159

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Systeme der Wohnungslüftung nach DIN1946-6:2019 [1] (eigene Darstellung) .....	8
Abbildung 2 Für die Behaglichkeitsmessung verwendeter Messbaum mit Sensoren auf 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m .....	15
Abbildung 3 Grundriss Studentenapartment [16] .....	17
Abbildung 4 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung (eigene Darstellung) .....	18
Abbildung 5 Grundriss Drei-Zimmer-Wohnung nach [16] .....	18
Abbildung 6 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung zentrales Lüftungssystem	24
Abbildung 7 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung zentrales Lüftungssystem mit aktiven Überströmern .....	25
Abbildung 8 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen.....	26
Abbildung 9 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, Schematische Darstellung rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen .....	28
Abbildung 10 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen .....	29
Abbildung 11 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen.....	32
Abbildung 12 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung Abluft-Lüftungssystem ...	33
Abbildung 13 Grundriss Zwei-Zimmer-Wohnung, schematische Darstellung rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen, ergänzt durch bedarfsgeführte Fensterlüftung .....	38
Abbildung 14 Annuitätischen Ausgaben aller Grundrisse und Systeme mit Varianten .....	46
Abbildung 15: Vergleich der linearen Zusammenhänge zwischen $A_{N,Ausgaben}$ und den Anschaffungskosten $A_0$ (stark) sowie Lüftungswärmeverlusten (schwach).....	47
Abbildung 16 Abweichung des Volumenstrom der Fensterlüftung zwischen Simulation und Berechnung nach DIN16798-7 .....	52
Abbildung 17 Durch IESS Model Generator erzeugtes zonales Modell der Zwei-Zimmer-Wohnung.....	55
Abbildung 18 Grundrissplan der Forschungswohnung inkl. Positionen der Lüftungsgeräte .....	57
Abbildung 19: Reglerklappen zur Einstellung der Volumenströme der zentralen Lüftungsanlage.....	58
Abbildung 20 Dezentrales Lüftungsgerät mit Abdeckung; In der Wand verbaut.....	59
Abbildung 21 li. Pendellüfter mit wabenförmigem Wärmespeicher, ohne Abdeckung; re.: Pendellüfter mit Ansteuerungselektronik .....	59
Abbildung 22: Aktiver Überströmer mit Ansteuerung und CO <sub>2</sub> -Sensor .....	60
Abbildung 23 Vorrichtung geregelten Feuchteemission, Bildmitte: Behälter (steht auf einer Waage), aus dem Nebel austritt; links unten: Messung, Regelung, Ansteuerung und Stromversorgung .....	61
Abbildung 24 Zwei thermische Dummies mit Steuerungselektronik, im Vordergrund Vorrichtung zur Feuchteemission.....	62

Abbildung 25 Zeichnung der Forschungswohnung mit Messstellen (inkl. unterschiedlicher Höhen) während der Abklingversuche und Tagesprofilmessungen.....	63
Abbildung 26 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 1.Messung: Messung der Außenwände und der Wand zwischen Schlaf- und Wohnzimmer.....	64
Abbildung 27 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 2.Messung: Messung der Außenwände .....	64
Abbildung 28 Bestimmung der raumweisen Leckagewerte, 3.Messung: Messung aller Raumumschließungsflächen.....	65
Abbildung 29 Leckage Messung in der Forschungswohnung, hier eingebaute Blowerdoor in Haustür und Badezimmer-Tür.....	65
Abbildung 30 Vergleich der Abklingkurven aus der Messung sowie Simulation mit CONTAM und IESS für das 1. Lüftungssystem im Schlafzimmer.....	68
Abbildung 31 Vergleich CONTAM und IESS: $\Delta RMSE10\%$ -Werte der Basisvarianten für alle Räume .....	69
Abbildung 32 Vergleich der Abklingkurven aus der Messung sowie Simulation mit CONTAM und IESS für das 4. Lüftungssystem im Bad .....	70
Abbildung 33 Bewertung der Übereinstimmung der Messungen und Simulationen mit Tagesprofil für CONTAM und IESS: $\Delta RMSE10\%$ -Werte für die $CO_2$ -Konzentrationen, positive Werte bedeuten eine gute Übereinstimmung.....	72
Abbildung 34 Messungen und IESS-Simulationen mit Tagesprofil für das 2. Lüftungssystem: Vergleich der $CO_2$ -Kurven je Raum, Diskussion siehe Text .....	73
Abbildung 35 Messungen und IESS-Simulationen mit Tagesprofil für das 4. Lüftungssystem: Vergleich der $CO_2$ -Kurven je Raum, Diskussion siehe Text .....	73
Abbildung 36 Tagesprofil - Vergleich CONTAM und IESS: $\Delta RMSE10\%$ -Werte der relativen Feuchte der Tagesprofile.....	74
Abbildung 37 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, mittlere relative und absolute Feuchte je Kalenderwoche .....	77
Abbildung 38 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, mittlere Außentemperatur je Kalenderwoche .....	77
Abbildung 39 Verwendeter Klimadatensatz, TRY - Standort Rosenheim, Häufigkeitsverteilung Windgeschwindigkeit und -richtung .....	78
Abbildung 40 Studentenapartment, mit Berücksichtigung der DIN18017-3, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät .....	79
Abbildung 41 Studentenapartment, mit Berücksichtigung der DIN 18017-3, $CO_2$ -Über(ppm)stunden aller Lüftungssysteme .....	80
Abbildung 42 $CO_2$ -Konzentration im Studentenapartment für das zentrale Lüftungssystem bei Auslegung nach DIN 1946-6 und DIN 18017-3.....	81
Abbildung 43 $CO_2$ -Konzentrationsverlauf im Studentenapartment für System 5b - regenerative Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluft nach DIN 18017-3 bedarfsgeführt.....	83
Abbildung 44 Studentenapartment, ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät .....	84
Abbildung 45 Studentenapartment, ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, $CO_2$ -Über(ppm)stunden aller Lüftungssysteme .....	85

Abbildung 46 Studentenapartment, Ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3, Zentrales Lüftungssystem: CO <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf, Hinweis: Die CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in Küche und Wohnzimmer sind identische.....	85
Abbildung 47 CO <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf im Studentenapartment Lüftung mit rekuperativen Einzelraumlüftungsgeräten mit Auslegung auf reduzierte Lüftung, Ergänzung durch bedarfsgeführte Fensterlüftung.....	87
Abbildung 48 Zwei-Zimmer-Wohnung, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungssysteme in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät.....	88
Abbildung 49 Zwei-Zimmer-Wohnung, Abluftsystem nach DIN 18017-3 Präsenzgeführt: CO <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf.....	91
Abbildung 50 Drei-Zimmer-Wohnung, Zusammenfassung der Kennzahlen aller Lüftungskonzepte in Relation zu System 1 – zentrales Lüftungsgerät.....	92
Abbildung 51 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN18017-3.....	99
Abbildung 52 CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden der Varianten für das Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN18017-3.....	99
Abbildung 53 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3.....	101
Abbildung 54 CO <sub>2</sub> -Über(ppm)stunden der Varianten für das Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN18017-3.....	102
Abbildung 55 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für die Zwei-Zimmer-Wohnung.....	103
Abbildung 56 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianten für die Drei-Zimmer-Wohnung.....	105
Abbildung 57 Übersicht über Kennwert aller Lüftungssysteme und Grundrisse, welche in der Jahressimulationen ermittelt wurden.....	108
Abbildung 58 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme des Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3.....	110
Abbildung 59 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme des Studentenapartment unter Berücksichtigung der DIN 18017-3.....	111
Abbildung 60 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 180017-3.....	112
Abbildung 61 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme des Studentenapartments ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3.....	113
Abbildung 62 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung.....	114
Abbildung 63 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme der Zwei-Zimmer-Wohnung.....	115
Abbildung 64 Lüftungsaufwandszahl der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung.....	116
Abbildung 65 Lüftungsaufwandszahl für die Varianten der Lüftungssysteme der Drei-Zimmer-Wohnung.....	116
Abbildung 66 Anordnung der Messgeräte sowie der Luftdurchlässe bei der Behaglichkeitsmessung im Wohnzimmer (Position Messbaum Zuluftbereich variabel: Hier platziert für Messung an zentralem Lüftungssystem).....	119

Abbildung 67 Zeitlicher Verlauf aller Messwerte sowie der Größen zur Behaglichkeit nach ISO 7730 auf 0,1 m Höhe für das System 9 und für reine Fensterlüftung.....	120
Abbildung 68 Behaglichkeitsmessungen bei Fensterlüftung, Messwerte und berechnete Momentanwerte zur Behaglichkeit nach ISO 7730 .....	121
Abbildung 69: Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für alle gemessenen Systeme im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m .....	122
Abbildung 70 Risiko für Beeinträchtigung durch Zugluft (DR) und Prozentsatz Unzufriedener aufgrund vertikaler Temperaturunterschiede (PD) für alle gemessenen Systeme im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m, für stationäre Systeme: Mittelwerte, für instationäre .....	123
Abbildung 71 Gegenüberstellung der Systeme ohne Fensterlüftung (stationäre Systeme) bzgl. Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperatur im Aufenthaltsbereich auf 1,1 m Höhe .....	123
Abbildung 72 Entwicklung des PPD nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster' .....	124
Abbildung 73: Entwicklung des DR (laufender Mittelwert über die 30 vorangegangenen Messwerte) nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster' .....	125
Abbildung 74: Entwicklung des PD nach Fensteröffnung für '(9) ERLG+Fenster' und 'Fenster' .....	125
Abbildung 75: Fokusgruppen-Diskussionsrunde mit acht Teilnehmer*innen zum Thema Wohnungslüftung.....	129
Abbildung 76: Zusammenstellung der Vorstellungen zur idealen Wohnungslüftung .....	130
Abbildung 77: Beurteilung „zentrales Lüftungssystem“ nach dem Informationsaustausch .....	131
Abbildung 78: Beurteilung „dezentrales Lüftungssystem“ nach dem Informationsaustausch.....	132
Abbildung 79: Beurteilung „Abluftsystem“ nach dem Informationsaustausch.....	132
Abbildung 80: Beurteilung „Fensterlüftung“ nach dem Informationsaustausch.....	133
Abbildung 81: (links) Wohnsituation der Teilnehmer*innen; (rechts) aktuelle Lüftungsart.....	135
Abbildung 82: Meinungen zur aktuellen Lüftungssituation .....	136
Abbildung 83: Beurteilungen der mechanischen Lüftung vor Erhalt der Information.....	138
Abbildung 84 Entscheidung der Wohnungslüftung im Fall von neuen Hausbauen.....	141
Abbildung 85 Zwei-Zimmer-Wohnung, Einzelraumlüftungsgeräte kombiniert mit Abluftventilatoren, Auslegung nach DIN1946-6 ohne Anpassung der Volumenströme.....	153
Abbildung 86 Zwei-Zimmer-Wohnung, Einzelraumlüftungsgeräte kombiniert mit Abluftventilatoren, Auslegung nach DIN1946-6 mit Reduktion der Abluftvolumenströme um 10 % und Anrechnung der (berechneten) wirksamen Infiltrationsvolumenströme .....	153



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	SPI-Werte für Lüftungsgeräte die im Zuge des Projekts verwendet wurden.....	12
Tabelle 2	Behaglichkeitskategorien und Grenzwerte nach DINEN ISO 7730.....	15
Tabelle 3	Kennzahlen der drei Grundrisse .....	19
Tabelle 4	Untersuchte Lüftungssysteme.....	20
Tabelle 5	Außenluftvolumenströme $q_{v, ges, NE}$ der unterschiedlichen Grundrisse in Abhängigkeit der Lüftungsstufe $f_{LSt}$ .....	21
Tabelle 6	Nach DIN 1946-6:2019 [1] berechnete wirksame Infiltrationsvolumenströme $q_{inf, Wirk}$ .....	22
Tabelle 7	Zusammenfassung der Volumenströme für die Berechnung des Gesamt-Außenluftvolumenstroms $q_{v, ges, NL}$ .....	22
Tabelle 8	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für Nennlüftung nach DIN 1946-6:2019 [1] für das Lüftungssystem: zentrales Lüftungssystem .....	24
Tabelle 9	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: aktive Überströmer ....	26
Tabelle 10	Ermittlung der raumweisen Volumenströme nach DIN 1946-6:2019 [1] bzw. DIN 18017-3:2020 [18] für das Lüftungssystem: Einzelraumlüftungsgeräte .....	27
Tabelle 11	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen .....	28
Tabelle 12	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN1946-6.....	29
Tabelle 13	Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18] .....	30
Tabelle 14	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18].....	31
Tabelle 15	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in den Ablufträumen.....	32
Tabelle 16	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft-Lüftungssystem .....	34
Tabelle 17	Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft nach DIN 18017-3, Reduzierter Betrieb.....	35
Tabelle 18	Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18] .....	36
Tabelle 19	Möglich Betriebszustände der Lüftungsgeräte für das Lüftungssystem: regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in den Zulufräumen, Abluftventilatoren in den Ablufträumen, Auslegung und Betrieb nach DIN18017-3:2020 [18] .....	37

Tabelle 20 Ermittlung der raumweisen Volumenströme für das Lüftungssystem: Abluft nach DIN 18017-3, rekuperative Einzelraumlüftungsgeräte in allen Räumen, ergänzt durch bedarfsgeführte Fensterlüftung.....	38
Tabelle 21 Feuchteemissionen unterschiedlicher häuslicher Tätigkeiten.....	39
Tabelle 22: Tagesverlauf Anwesenheit Werktag und Wochenende für alle Grundrisse und Räume; Interne Wärmequellen und CO <sub>2</sub> -Emission lassen sich hieraus durch Multiplikation der Werte mit den entsprechenden, personenspezifischen Werten ableiten.....	41
Tabelle 23: Tagesverlauf Feuchteemission Werktag und Wochenende für alle Grundrisse und Räume, inkl. Spalte für Wäschetrocknung (Start an Waschtagen jeweils um 17 Uhr und Ende um 13 Uhr am nächsten Tag).....	42
Tabelle 24 Parameter der Annuitätenmethode.....	45
Tabelle 25 Druckbeiwert in Abhängigkeit der Windrichtung für ein Haus einem Seitenverhältnis 1:1 [29].....	50
Tabelle 26 Raumweise Strömungskoeffizienten für Leckagen für alle Grundrisse.....	50
Tabelle 27: Verwendete Eingabeparameter des Adsorptionsmodells von CONTAM.....	53
Tabelle 28 Im Messaufbau verwendete Sensoren.....	64
Tabelle 18 Ergebnisse raumweise Luftdichtheitsmessung Forschungswohnung.....	65
Tabelle 30 Ermittelte Kennwerte für das Studentenapartment mit Berücksichtigung der DIN18017-3 bei Verwendung eines zentralen Lüftungssystem (System 1).....	81
Tabelle 31 Ermittelte Kennwerte Studentenapartment ohne Berücksichtigung der DIN 18017-3.....	84
Tabelle 32 Ermittelte Kennwerte Zwei-Zimmer-Wohnung.....	88
Tabelle 33 Vergleich raumweiser Außenluftvolumenströme der Zwei-Zimmer-Wohnung System 1 & System 7.....	90
Tabelle 34 Ermittelte Kennwerte Drei-Zimmer-Wohnung für das zentrale Lüftungsgerät – System 1....	92
Tabelle 35 Vergleich raumweiser Außenluftvolumenströme der Drei-Zimmer-Wohnung System 1 & System 7.....	94
Tabelle 36 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 2 aktiver Überströmer.....	95
Tabelle 37 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 3 Einzelraumlüftungsgeräte.....	96
Tabelle 38 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 4 Einzelraumlüftungsgeräte mit Abluftventilatoren.....	97
Tabelle 39 Lüftungssystem nach DIN 1946-6: Varianten des System 5b regenerative Einzelraumlüftungsgeräte in Kombination mit bedarfsgeführten Abluftventilatoren.....	98
Tabelle 40: Parameter zur Abschätzung des PPD für Fensterlüftung und (9) ERLG+Fenster, Zeitwerte aus den Jahressimulationen (insgesamt 525.600 Minuten).....	120
Tabelle 41: Anzahl der Antworten zur Frage „Mit welchen Aspekten Ihrer jetzigen Lüftungssituation sind Sie am meisten zufrieden? Bitte ordnen Sie die 3 wichtigen Faktoren in absteigender Reihenfolge (1: am besten)“. „Mit Gewichtung“ in der Tabelle als „Rank1 *3 + Rank2*2 +Rank3*1“ berechnet.....	136
Tabelle 42: Anzahl der Antworten zur Frage „Mit welchen Aspekten Ihrer jetzigen Lüftungssituation sind Sie am wenigsten zufrieden? (1: am schlechtesten)“. „Mit Gewichtung“ in der Tabelle als „Rank1 *3 + Rank2*2 +Rank3*1“ berechnet.....	137

Tabelle 43: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugen Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle ist „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....138

Tabelle 44: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....139

Tabelle 45: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugt Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....139

Tabelle 46: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....140

Tabelle 47: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems überzeugt Sie am meisten? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem überzeugendsten Aspekt (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....140

Tabelle 48: Anzahl der Antworten auf die Frage „Welche Aspekte des vorgestellten Lüftungssystems stellen das größte Hindernis bei Ihrer Kaufentscheidung dar? Bitte ordnen Sie die drei wichtigsten Punkte in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem größten Hindernis (1)“. „Mit Gewichtung“ in Tabelle als „Rank1 \*3 + Rank2\*2 +Rank3\*1“ berechnet.....141

*Tabelle 49: Entscheidung für zukünftige Wohnungslüftung nach aktueller Wohnungslüftungsart Entscheidung für zukünftige Wohnungslüftung nach aktueller Wohnungslüftungsart.....142*

Tabelle 51 Investitionskosten der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse.....164

Tabelle 52 Kosten für Filterwechsel der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse.....165

## Anhang

### Kosten für Investition und Filterwechsel der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse

Tabelle 50 Investitionskosten der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse

System	Studentenapartment	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
System 1	3.005,40 €	3.958,40 €	4.172,30 €
System 2	-	4.299,12 €	4.755,08 €
System 3	1.871,70 €	3.664,32 €	4.543,81 €
System 4	1.510,85 €	4.560,34 €	3.379,83 €
System 5a	1.875,00 €	3.250,00 €	4.470,00 €
System 5b	1.875,00 €	3.250,00 €	4.470,00 €
System 6	2.505,85 €	4.560,34 €	5.780,34 €
System 7	555,00 €	825,00 €	940,00 €
System 8a	555,00 €	825,00 €	940,00 €
System 8b	555,00 €	825,00 €	940,00 €
System 9	1.905,34 €	3.664,32 €	4.543,81 €
System 2 $\dot{V}^*1.3$		4.299,12 €	4.755,08 €
System 3 $\dot{V}^*0.9$	1.871,70 €	3.664,32 €	4.543,81 €
System 3 $\dot{V}^*0.8$	1.871,70 €	3.664,32 €	4.543,81 €
System 3 $\dot{V}^*0.7$	1.871,70 €	3.664,32 €	4.543,81 €
System 4 mit InfWirk	1.510,85 €	4.560,34 €	3.379,83 €
System 4 mit InfWirk $\dot{V}^*0.9$	1.510,85 €	4.560,34 €	3.379,83 €
System 5b mit InfWirk	1.875,00 €	3.250,00 €	4.470,00 €

Tabelle 51 Kosten für Filterwechsel der Lüftungssysteme für die drei Grundrisse

System	Studentenapartment Berücksichtigung DIN 18017	Zwei-Zimmer-Wohnung	Drei-Zimmer-Wohnung
System 1	92,42 €	92,42 €	92,42 €
System 2	-	92,42 €	92,42 €
System 3	41,72 €	83,44 €	104,30 €
System 4	31,29 €	62,58 €	83,44 €
System 5a	52,15 €	104,30 €	146,02 €
System 5b	52,15 €	104,30 €	146,02 €
System 6	62,58 €	125,16 €	166,88 €
System 7	20,86 €	41,72 €	52,15 €
System 8a	20,86 €	41,72 €	52,15 €
System 8b	20,86 €	41,72 €	52,15 €
System 9	41,72 €	83,44 €	104,30 €
System 2 $\dot{V}^*1.3$	-	92,42 €	92,42 €
System 3 $\dot{V}^*0.9$	41,72 €	83,44 €	104,30 €
System 3 $\dot{V}^*0.8$	41,72 €	83,44 €	104,30 €
System 3 $\dot{V}^*0.7$	41,72 €	83,44 €	104,30 €
System 4 mit InfWirk	31,29 €	62,58 €	83,44 €
System 4 mit InfWirk $\dot{V}^*0.9$	31,29 €	62,58 €	83,44 €
System 5b mit InfWirk	52,15 €	104,30 €	146,02 €