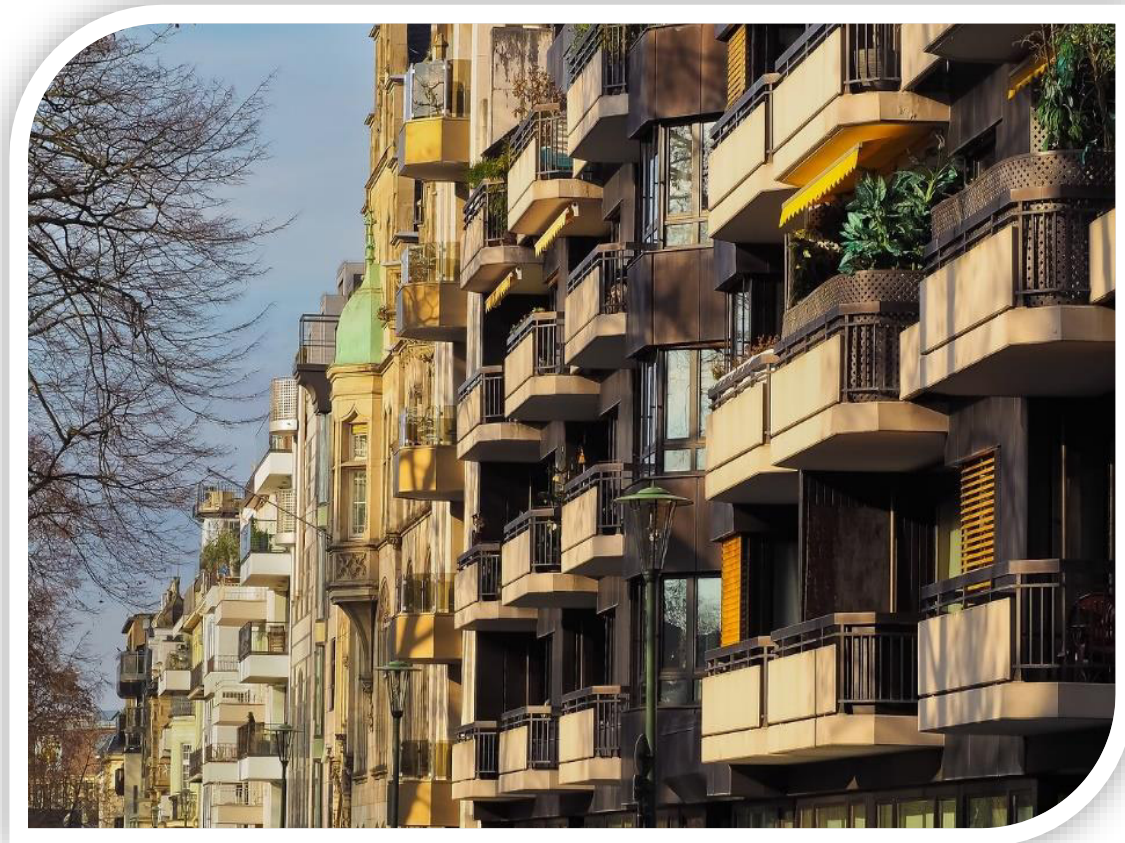


# LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

Bericht zu AP 2.2 und AP 4:

## **Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort und Luftqualität**



Der vorliegende Bericht ist Ergebnis der wissenschaftlichen Querspanne »LowEx-Bestand Analyse« des thematischen Projektverbunds »LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)«. In diesem Verbund arbeiten Forschungsinstitute mit Herstellern von Heizungs- und Lüftungstechnik und mit Unternehmen der Wohnungswirtschaft zusammen. Gemeinsam werden Lösungen entwickelt, analysiert und demonstriert, die den effizienten Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabesystemen und Lüftungssystemen bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden zum Ziel haben.

LowEx-Systeme arbeiten durch geringe Temperaturdifferenzen zwischen Heizmedium und Nutzwärme besonders effizient. Wärmepumpen haben dabei erhebliches Potenzial zur Absenkung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmebereitstellung. Für die energetische Modernisierung von Mehrfamiliengebäuden ist der Einsatz solcher Systeme mit besonderen Herausforderungen und Anforderungen an die Übergabe der Raumwärme, die Warmwasserbereitung und die Nutzung von Umweltwärme verbunden. Diese Herausforderungen werden in LowEx-Bestand adressiert.



# Projekt LowEx-Bestand Analyse

## Bericht zu AP 2.2 und AP 4

### Bewertung von Lüftungsstrategien im Hinblick auf Raumkomfort

Stand: 13.12.2021

Autoren: Dr.-Ing. Nicolas Carbonare (ISE und KIT), Dr.-Ing. Constanze Bongs (ISE),  
Prof. Andreas Wagner (KIT)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz- Gemeinschaft

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03SBE0001

[www.lowex-bestand.de](http://www.lowex-bestand.de)





## Kurzfassung

Da die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden zu einer erhöhten Luftdichtheit der Gebäudehülle führt, hat die Bedeutung der Nachrüstung von Lüftungstechnik auch im Gebäudebestand deutlich zugenommen. Dezentrale Lüftungsgeräte in alternierender Betriebsweise (Pendellüfter) werden hier aufgrund der einfachen Integrierbarkeit zunehmend eingesetzt. Gegenstand der hier vorgestellten Forschung ist die nutzerorientierte Regelung von Wohnungslüftungssystemen. Verschiedene Regelungsstrategien für die Lüftung in Wohngebäuden werden diskutiert und miteinander verglichen. Neuartige selbstlernende Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungsgeräte wurden entwickelt und in einer bewohnten Testwohnung umgesetzt und demonstriert.

Zuerst werden in dem Bericht die Anforderungen an die Wohnungslüftung identifiziert und analysiert. Die wichtigsten Zielsetzungen sind dabei die Energieeffizienz, der hygrothermische Komfort und die Raumluftqualität. Die Energieeffizienz wird durch die Wärmerückgewinnungseffizienz des Lüftungssystems und den Stromverbrauch des Ventilators bestimmt. Für die Performance-Bewertung von Wohnungslüftungssystemen hinsichtlich Komfort und Raumluftqualität werden Leistungsindikatoren auf der Grundlage von Akzeptanzgrenzen für die relevanten Variablen (relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration) definiert. Andere Anforderungen wie Lärm, Nutzerfreundlichkeit und äußere Einflüsse (Wetter und Gebäudeeigenschaften) werden kurz diskutiert.

Nach der Definition der Zielsetzungen für Lüftungssysteme werden drei innovative Regelungsstrategien für dezentrale Lüftungssysteme vorgestellt, bei denen die Nutzerorientierung im Mittelpunkt steht. Die ersten beiden Lösungen, die auf der Minimierung einer Kostenfunktion bzw. einer Fuzzy-Logik basieren, verwenden Standardwerte für die Raumklimaparameter, um ein generalisiertes Komfortprofil zu erhalten. Eine dritte Lösung nutzt das Feedback der Nutzer, um eine Individualisierung der Nutzerpräferenzen in Bezug auf relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erreichen. Diese Regelung basiert auf einem maschinellen Lernalgorithmus, der für jeden Nutzertyp ein individuelles Regelungsfeld erstellt.

Die selbstlernende Regelungsstrategie wurde anschließend in einem Living Lab prototypisch implementiert und getestet. Dies erfolgte im Energy Smart Home Lab auf dem Hauptcampus des Karlsruher Instituts für Technologie, wodurch eine möglichst reale Wohnsituation über drei Monate abgebildet werden konnte. Für diesen Versuch wurden dezentrale Lüftungsgeräte in der Wohnung installiert. Der Versuch bestätigte, dass eine nutzerorientierte Regelung ein gutes Niveau für alle drei Zielgrößen (Energieeffizienz, hygrothermischer Komfort und Luftqualität) erreichen kann. Zudem hat der Prototyp der Regelung weitestgehend fehlerfrei funktioniert und stellt damit eine solide Basis für zukünftige Entwicklungen dar.

## Abstract

Since the energy-related refurbishment of existing buildings leads to increased air tightness of the building envelope, the importance of retrofitting ventilation technology has also increased significantly in existing buildings. Decentralized ventilation units in alternating mode of operation (push-pull devices) are increasingly used here due to their ease of integration. The subject of the research presented here is the user-centered control of residential ventilation systems. Different control strategies for ventilation in residential buildings are discussed and compared. Novel self-learning control strategies for decentralized ventilation units were developed, implemented, and demonstrated in an occupied test apartment.

First, the report identifies and analyzes the requirements for residential ventilation. The most important objectives are energy efficiency, hygrothermal comfort and indoor air quality. Energy efficiency is determined by the heat recovery efficiency of the ventilation system and the power consumption of the fan. For the performance evaluation of residential ventilation systems in terms of comfort and indoor air quality, performance indicators are defined based on acceptance limits for the relevant variables (relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration). Other requirements such as noise, user-friendliness and external influences (weather and building characteristics) are briefly discussed.

After defining the objectives for ventilation systems, three innovative control strategies for decentralized ventilation systems are presented that focus on user orientation. The first two solutions, based on minimizing a cost function and fuzzy logic, respectively, use default values for indoor climate parameters to obtain a generalized comfort profile. A third solution uses user feedback to achieve individualization of user preferences in relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration. This control is based on a machine learning algorithm that creates an individual control field for each user type.

The self-learning control strategy was then prototypically implemented and tested in a real laboratory. This was done in the Energy Smart Home Lab on the main campus of the Karlsruhe Institute of Technology, which made it possible to reproduce as real a living situation as possible over a period of three months. For this experiment, decentralized ventilation units were installed in the home. The experiment confirmed that user-oriented control can achieve a good level for all three target variables (energy efficiency, hygrothermal comfort and air quality). In addition, the prototype of the control system functioned largely error-free and thus represents a solid basis for future developments.

# Inhalt

Kurzfassung.....	V
Abstract .....	VI
Inhalt.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Wohnungslüftung – Anforderungen und wichtige Aspekte im Hinblick auf die energetische Gebäudesanierung .....	3
2.1 Normen.....	3
2.2 Energie .....	4
2.2.1 Wärmerückgewinnung.....	4
2.2.2 Stromverbrauch des Ventilators .....	6
2.2.3 Primärenergie .....	6
2.2.4 Energielabel.....	7
2.3 Luftqualität.....	7
2.3.1 Schimmelpilzbildung.....	7
2.3.2 Gesundheitseffekte.....	8
2.3.3 Indikatoren.....	9
2.4 Hygrothermischer Komfort .....	11
2.4.1 Komfort im Sommer.....	11
2.4.2 Komfort im Winter.....	12
2.5 Akustik.....	13
2.6 Nutzerfreundlichkeit und Nutzerverhalten .....	14
2.7 Wetter und Gebäude .....	15
2.8 Zusammenfassung des Kapitels .....	15
3 Nutzerorientierte Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung .....	17
3.1 Einleitung.....	17
3.2 Regelung ohne Nutzerrückmeldung.....	18
3.2.1 Kostenfunktion.....	18
3.2.2 Fuzzy-basierte Regelung.....	19
3.3 Regelung mit Nutzerrückmeldung – Die selbstlernende Regelung .....	23
3.3.1 Simulation der Nutzerrückmeldung .....	24
3.3.2 Standardprofil .....	26
3.3.3 Auswahl des Algorithmus .....	27
3.3.4 Lernverfahren .....	29
3.3.5 Abweichungen des Regelungsfeldes mit den künstlichen Komfortprofilen.....	30
3.4 Zusammenfassung des Kapitels .....	32
4 Umsetzung der selbstlernenden Regelung in einem Demonstrationsgebäude.....	35
4.1 Einleitung - Das Energy Smart Home Lab .....	35

4.2	Lüftungskonzept .....	36
4.2.1	Auslegung und Installation der dezentralen Lüftungsgeräte .....	36
4.2.2	Monitoringkonzept und Nutzerinterface .....	39
4.2.3	Umsetzung der lernenden Regelung .....	41
4.3	Auswertung der Ergebnisse.....	42
4.3.1	Energieverbrauch, Komfort und Luftqualität .....	42
4.3.2	Performance der dezentralen Lüftung .....	44
4.3.3	Performance der selbstlernenden Regelung .....	45
4.3.4	Nutzerbefragung: Akzeptanz und Zufriedenheit .....	48
4.3.5	Praktische Erfahrungen aus dem Feldversuch.....	49
4.4	Zusammenfassung des Kapitels .....	50
	Literaturverzeichnis.....	51

# 1 Einleitung

In diesem Bericht werden verschiedene Regelungsstrategien für die Lüftung in Wohngebäuden diskutiert und miteinander verglichen. Laut dem Air, Infiltration, and Ventilation Centre (AIVC) [1] sollte die Untersuchung des Nutzerverhaltens in Bezug auf mechanische Lüftung in der Forschung eine hohe Priorität genießen. Dabei wurde die Bewertung neuer fortschrittlicher Lüftungsstrategien in Bezug auf Gesundheit und Komfort als vorrangig definiert. Das bedeutet, dass innovative nutzerorientierte Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung sofort in Angriff genommen werden sollten. Die in diesem Bericht vorgenommene Analyse gilt für zentrale und dezentrale Lüftungssysteme. Der dezentralen Lüftung muss jedoch besondere Aufmerksamkeit zukommen, da sie in den letzten zehn Jahren auf dem Wohnungsmarkt stark zugenommen hat. Das Verständnis des Nutzerverhaltens bei Fensteröffnungsprozessen ist entscheidend für die Entwicklung innovativer nutzerzentrierter Lösungen für die Wohnungslüftung.

In Kapitel 2 werden zunächst die Anforderungen an die Wohnungslüftung analysiert. Wohnungseigentümer (z.B. Unternehmen der Wohnungswirtschaft), Hersteller und Nutzer (Bewohner) spielen bei dieser Bewertung unterschiedliche Rollen. So sind Wohnungseigentümer in der Regel an zuverlässigen Systemen interessiert, die einen Mindestluftwechsel (zum Schutz des Gebäudes vor Schimmelpilzbildung) gewährleisten und gleichzeitig die Betriebs- und Wartungskosten minimieren. Dagegen wollen Nutzer hohen Komfort, frische Luft in ihrer Wohnung und gleichzeitig möglichst geringe Heizkosten. Es besteht also ein Zielkonflikt zwischen dem Energieverbrauch der Lüftung, dem hygrothermischen Komfort und der Raumluftqualität, der für mögliche Lösungsansätze berücksichtigt werden muss. Gemäß der deutschen Lüftungsnorm DIN 1946-6 [2] müssen sanierte Mehrfamilienhäuser ein dezidiertes Lüftungskonzept aufweisen, um ein gesundes Raumklima zu gewährleisten.

Kapitel 3 beschreibt die Entwicklung von drei innovativen, nutzerorientierten Regelungsstrategien für die dezentrale Lüftung. Ausgehend von den analysierten Anforderungen wird der Nutzer in den Mittelpunkt gestellt. Es werden verschiedene Lösungen für Systeme mit und ohne Nutzerrückmeldung untersucht. Die Untersuchung in diesem Bericht geht davon aus, dass der Volumenstrom jeweils raumweise bereitgestellt werden kann (dezentrale Lüftung). Die erste Lösung stellt insofern eine Innovation dar, als dass Normwerte verwendet werden, um ein verallgemeinertes Komfortprofil zu erhalten, während die zweite Lösung die Nutzerrückmeldung verwendet und so einen individualisierten Ansatz umsetzt. Die Individualisierung der technischen Gebäudeausrüstung (auch im Wohnbereich) ist ein primäres Ziel von nutzerzentrierten Ansätzen, die bereits in der Literatur beschrieben wurden [3]. Die beiden in diesem Bericht beschriebenen Lüftungsregelungsstrategien wurden auf Basis von Simulationsstudien entwickelt und validiert sowie in verschiedenen Demonstrationsprojekten des Projektverbundes LowEx-Bestand probeweise im realen Gebäudekontext umgesetzt.

Kapitel 4 befasst sich mit der Umsetzung einer der innovativen Regelungsstrategien in einem realen Gebäude. Die erfolgreiche Implementierung von nutzerzentrierten Lösungen in realen Gebäuden ist eine der größten Herausforderungen in der Forschung zu Nutzerverhalten in Gebäuden [4]. Die Implementierung wurde in einem Wohnlabor - dem Energy Smart Home Lab (ESHL) auf dem Hauptcampus des Karlsruher Instituts für Technologie – durchgeführt. In der Untersuchung wurde versucht, eine Wohnsituation möglichst real über drei Monaten abzubilden. Der selbstlernende Regler wurde unter Verwendung eines intelligenten Lüftungskonzepts mit dezentralen Lüftungsanlagen implementiert. Der Regler identifizierte unterschiedliche raumindividuelle Lüftungspräferenzen. Damit wurde dem Postulat Rechnung getragen, dass nutzerzentrierte Lösungen als einer der Schlüsselaspekte erachtet werden, um die Akzeptanz eines gebäudetechnischen Systems zu erhöhen.



## 2 Wohnungslüftung – Anforderungen und wichtige Aspekte im Hinblick auf die energetische Gebäudesanierung

Lüftungsanlagen sind in Wohngebäuden erforderlich, um einen ausreichenden Luftaustausch zu gewährleisten, insbesondere in Niedrigenergie- und Passivhaushäusern sowie in sanierten Bestandsgebäuden. Effiziente Regelungssysteme sind erforderlich, um den Innenraumkomfort und die Luftqualität sicherzustellen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu minimieren. Abbildung 1 bietet einen Überblick über die mit Regelungsstrategien für Wohnungslüftungssysteme verbundenen Ziele und externen Einflüsse.

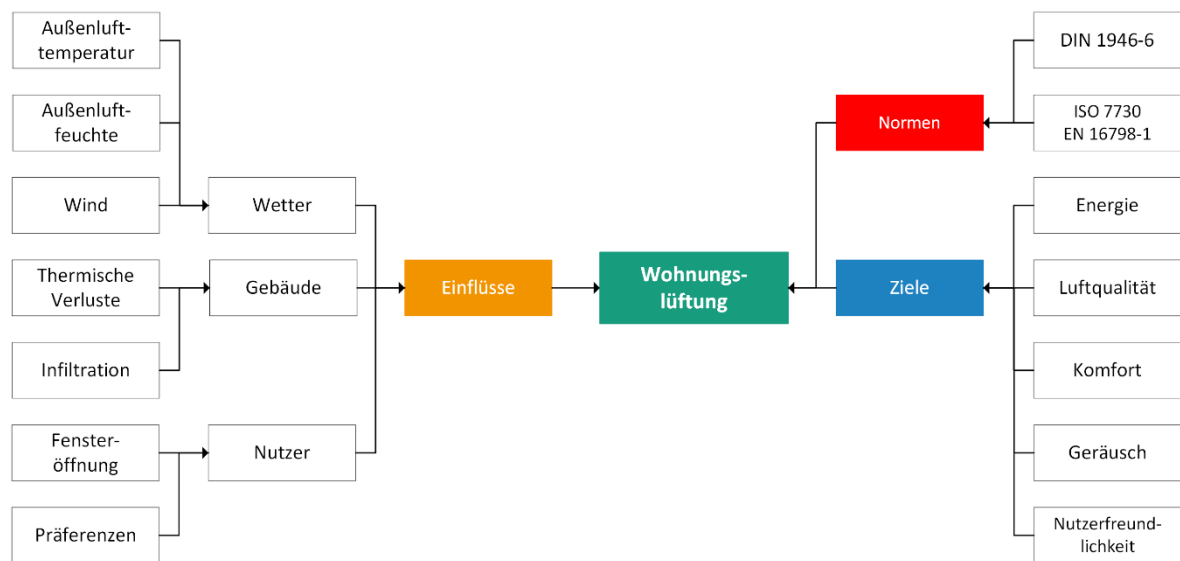


Abbildung 1 – Übersicht zu verschiedenen Einflussgrößen auf die Wohnungslüftung und deren Ziele

### 2.1 Normen

In Deutschland legt die Norm DIN 1946-6 [2] die Anforderungen an die Wohnungslüftung fest. Diese Norm beschreibt u.a. verschiedene Szenarien, in denen der Außenluftbedarf sowohl durch natürliche Lüftung als auch durch mechanische Lüftung und durch Gebäudeinfiltration gedeckt werden kann. Definitionsgemäß ist der gesamte Zuluftvolumenstrom die Summe der drei vorgenannten Quellen. Um mechanische Lüftungsanlagen auszuwählen und zu dimensionieren, muss der nutzerabhängige Volumenstrom (Fensteröffnung) vernachlässigt werden. Die Auslegung und Inbetriebnahme von Wohnungslüftungsanlagen wird in weiteren Normen adressiert, die vornehmlich Behaglichkeits- und Luftqualitätsstandards im Fokus haben und daher in Rahmen dieses Berichts zusätzlich starke Berücksichtigung finden [5–7].

Im Hinblick auf die Dimensionierung von mechanischen Lüftungsanlagen besteht einer der wichtigsten Vorgaben dieser Norm (DIN 1946-6) darin, dass sie vier verschiedene Lüftungsstufen und deren entsprechende Außenluftversorgung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen festlegt:

1. Lüftung zum Feuchteschutz: Das Lüftungsniveau ist eine Funktion der thermischen Eigenschaften des Gebäudes und der Wohnfläche. Ziel ist es, Bauschäden durch Schimmelbildung zu vermeiden. Diese Lüftungsrate muss zu jeder Zeit nutzerunabhängig gewährleistet sein.
2. Reduzierte Lüftung: Diese Stufe deckt die hygienischen Mindestanforderungen ab, teilweise unter Berücksichtigung reduzierter Feuchtelasten (zeitweise Abwesenheit der Nutzer). Diese Lüftungsrate muss weitestgehend nutzerunabhängig gewährleistet sein.
3. Nennlüftung: Diese Lüftung stellt die hygienischen Anforderungen sowie den Gebäudeschutz bei Anwesenheit von Personen sicher. Der Nutzer kann hierzu teilweise mit aktiver Fensterlüftung herangezogen werden.

4. Intensivlüftung: Dieses Lüftungsniveau ist erforderlich, um die internen Spitzenlasten (menschliche Aktivitäten) abzudecken, die in Wohnräumen auftreten können. Der Nutzer kann hier ebenfalls teilweise mit aktiver Fensterlüftung herangezogen werden.

Die Berechnung des erforderlichen Außenluftstroms berücksichtigt den Luftaustausch aufgrund von Infiltration und natürlicher Lüftung. Das heißt, der von einer mechanischen Lüftungsanlage gelieferte Außenluftstrom ist die Differenz des erforderlichen Außenluftstroms und der Summe aus Außenluftströmen durch Infiltration und Fensterlüftung. Für die Abschätzung der Infiltrationen werden Annahmen zur Windlast und deren jahreszeitlichen Schwankungen getroffen.

*Tabelle 1 – Mindestluftvolumenströme in Abhängigkeit von der Fläche der Nutzungseinheit für hohe Belegung nach DIN 1946-6 (S. 26, T. 7)*

Fläche der Wohnung [m <sup>2</sup> ]	30	50	70	90	110	130	150
Lüftung zum Feuchteschutz (hohe Wärmedämmung) [m <sup>3</sup> /h]	15	20	25	30	35	40	40
Lüftung zum Feuchteschutz (geringe Wärmedämmung) [m <sup>3</sup> /h]	20	25	35	40	45	50	55

Darüber hinaus definiert die Norm verschiedene Regelungsstrategien für raumspezifische Lüftungsanlagen [2]: Dauerbetrieb, zeitgesteuert oder gesteuert durch einen bestimmten Sensor, z. B. Temperatur oder relative Feuchte. Ein Dauerbetrieb garantiert nicht zwangsläufig die Abfuhr hoher Feuchtelasten. Auch eine zeitabhängige Regelstrategie garantiert üblicherweise nicht den Gebäudeschutz und ist daher unerwünscht. Nach der Norm stellt nur eine Regelungsstrategie in Abhängigkeit der relativen Feuchte sicher, dass hohe Feuchtelasten aus dem Innenraum abgeführt werden. Auch andere Aspekte der Raumluftqualität werden in der Norm berücksichtigt, wie z. B. die zulässige Kohlendioxidkonzentration (CO<sub>2</sub>), die zulässige VOC-Konzentration und Anforderungen an Filter.

## 2.2 Energie

Ein vorrangiges Ziel der EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) [8] ist die Minimierung des Energieverbrauchs im Zusammenhang mit raumlufttechnischen-Anlagen (RLT). Nimmt der Luftwechsel in einem Wohngebäude zu, steigen die Lüftungswärmeverluste. Wird keine Wärmerückgewinnung eingesetzt, so wird die Fortluft annähernd bei Raumtemperatur abgegeben. Die Außenluft tritt in diesem Fall auch annähernd mit Außentemperatur ein, wodurch es im Winterfall zunächst zu einer Abkühlung im Raum kommt. Um diese zu kompensieren und die Raumtemperatur einzuhalten, werden die Lüftungswärmeverluste üblicherweise über die Raumheizung ausgeglichen. Die zum Ausgleich der Lüftungswärmeverluste aufzubringende Wärme wird als lüftungsbedingter Wärmebedarf bezeichnet. Im Vergleich zum Energiebedarf für den Lufttransport ist dieser meist dominierend. Um diesen Energiebedarf zu reduzieren, werden Lüftungsanlagen typischerweise mit Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) ausgestattet, die über einen Wärmeübertrager oder eine Speichermasse Wärme vom warmen auf den kalten Luftstrom übertragen. Im Winterfall bedeutet dies eine Übertragung von Wärme aus der Abluft auf die Zuluft. Bei Anwendung eines Enthalpietauschers kann auch Feuchtigkeit ausgetauscht werden, um den hygrothermischen Komfort zu verbessern. Die zweite Komponente des Energieverbrauchs der mechanischen Lüftung ist die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren zur Gewährleistung des Lufttransports. In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie diese berechnet wird.

### 2.2.1 Wärmerückgewinnung

Wärmerückgewinnungssysteme (WRG) werden für die verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Lüftungssysteme konzipiert, um die Wärmeverluste durch die Lüftung zu reduzieren. So sind kontinuierlich arbeitende Lüftungssysteme typischerweise mit rekuperativen Wärmeübertragern ausgestattet, die über die Kanalwände Wärme direkt von dem warmen an den kalten Luftstrom übertragen und gleichzeitig den Kontakt zwischen den Luftvolumenströmen vermeiden. Die meisten

dezentralen Lüftungssysteme arbeiten in alternierender Betriebsweise und verfügen über ein regeneratives Wärmespeichersystem. In einer Speichermasse (typische Materialien sind Keramik, Kunststoff oder Metall) wird die Wärme in der Abluftphase gespeichert und in der Zuluftphase wieder abgegeben.

Für die Effizienz der Systeme werden unterschiedliche Definitionen angewandt. Wärmerückgewinnungssysteme für Lüftungsanlagen sind bei der Passivhaus-Zertifizierung zwingend vorgeschrieben [9] und müssen eine Mindesteffizienz von 75% erreichen. Die Definition der WRG des Passivhaus Instituts ( $\eta_{WRG,PHI}$ ) ergibt sich aus der Addition der durch Lüftungsverluste benötigten Heizenergie und der Wärmeabgabe des Ventilators an die Zuluft. Es werden die Außen- ( $T_{aussen}$ ), die Abluft- ( $T_{abl}$ ) und die Fortlufttemperaturen ( $T_{fort}$ ) verwendet, zusammen mit der elektrischen Leistung des Ventilators ( $P_{el,v}$ ), dem maximalen Volumenstrom ( $\dot{m}_{max}$ ) und der spezifischen Wärmekapazität der Luft ( $c_{p,Luft}$ ).

$$\eta_{WRG,PHI} = \frac{T_{abl} - T_{fort} + \frac{P_{el,v}}{\dot{m}_{max} c_{p,Luft}}}{T_{abl} - T_{aussen}}$$

Ein vollständiger Vergleich der Unterschiede zwischen den Definitionen der Wärmerückgewinnungseffizienz ist in der Literatur bereits verfügbar (PHI, Deutsches Institut für Bautechnik, EN 13141-7 und DIN EN 308) [10]. Bei kontinuierlich betriebenen Lüftungsanlagen wird üblicherweise der Temperaturänderungsgrad  $\eta_{WRG,kont}$  verwendet, wie er in der DIN EN 308 [5] definiert ist. Dieser Indikator berücksichtigt nur die Heizenergieverluste durch die Lüftung und vernachlässigt andere, wie z. B. die Enthalpie oder die Leistungsaufnahme der Ventilatoren. Diesem Indikator liegt die Annahme zugrunde, dass die Zu- und Abluftmassenströme ausgeglichen und die durchschnittlichen Temperaturen gleich sind. Obwohl dieser Indikator zunächst nur für balancierte mechanische Lüftungssysteme gilt, ist diese Definition der Wärmerückgewinnungseffizienz aufgrund fehlender normativer Grundlagen für alternierende Systeme und der Einfachheit des Berechnungsverfahrens die am meisten akzeptierte unter den Herstellern [11]. Es werden wieder die Außen- ( $T_{aussen}$ ), die Abluft- ( $T_{abl}$ ) und die Zulufttemperaturen ( $T_{zul}$ ) verwendet.

$$\eta_{WRG,kont} = \frac{T_{zul} - T_{aussen}}{T_{abl} - T_{aussen}}$$

Coydon [10] entwickelte ein regelbasiertes Modell zur Berechnung der Wärmerückgewinnungseffizienz für alternierende dezentrale Lüftungssysteme. Um diesen Wirkungsgrad zu berechnen, sind Informationen über den Zustand des Heizungssystems im Haus erforderlich, weshalb sich dieses Modell für Labormessungen und Hersteller als unpraktisch erweist. Diese Bewertungsmethode für die alternierende dezentrale Lüftung wurde hauptsächlich in Simulationsstudien angewendet. Danach kann für diesen Gerätetyp folgende Regel angewendet werden (gegeben:  $\dot{Q}_{WRG}$  als die durch die Wärmerückgewinnung zurückgewonnene Wärme,  $\dot{Q}_{loss}$  als die Wärmeverluste in der Abluft nach der Wärmerückgewinnung und  $\dot{Q}_h$  als die Heizleistung der Anlage ohne Wärmerückgewinnung):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_h > \dot{Q}_{loss} & \quad \eta_{WRG,Alt} = \frac{\dot{Q}_{WRG}}{\dot{Q}_{loss}} \\ \dot{Q}_h < \dot{Q}_{loss} & \quad \eta_{WRG,Alt} = \frac{\dot{Q}_{WRG}}{\dot{Q}_h} \\ \dot{Q}_h = 0 & \quad \eta_{WRG,Alt} = 100 \% \end{aligned}$$

Der gesamte Heizenergieverlust aufgrund von Lüftung  $Q_{heat,v}$  wird durch die Integration der lüftungsbedingten Wärmeverluste nach Wärmerückgewinnung über die Zeit berechnet.

$$Q_{heat,v} = \int \rho_{luft} \cdot \dot{V}_{luft} \cdot c_{p,luft} (T_{raum} - T_{umg}) (1 - \eta_{WRG}) dt$$

### 2.2.2 Stromverbrauch des Ventilators

Die Lüfterleistung ist in der Regel systemspezifisch und daher schwer zu verallgemeinern. Die Norm DIN 1946-6 definiert den Indikator für die spezifische Lüfterleistung (SFP –  $\text{Ws/m}^3$ ) wie folgt:

$$SFP = \frac{P_{v,nom}}{\dot{V}_{luft,nom}}$$

$P_{v,nom}$  ist die Nennleistung des Ventilators, und  $\dot{V}_{luft,nom}$  ist der Nennvolumenstrom des Ventilators. Dieser Indikator wird von verschiedenen Herstellern verwendet, um die Energieeffizienz der ausgewählten Ventilatoren zu definieren. Nach dem Gerätezertifizierungsverfahren des Passivhaus-Instituts [9] sollte der SFP nicht höher als 0,45 sein. Laut Literatur liegen die Werte bei dezentralen Lüftungsanlagen zwischen 0,1 und 0,35 [10]. In diesen Geräten sind die Ventilatoren in der Regel klein und es kann ein konstanter SFP für unterschiedliche Ventilator Drehzahlen angenommen werden. Diese Annahme gilt nicht bei der Betrachtung von zentralen Lüftungsanlagen.

Im Idealfall variiert die hydraulische Leistung eines Ventilators mit der dritten Potenz der Drehzahl, gemäß den Affinitätsgesetzen von Fördermaschinen, wenn ein konstanter Ventilatorwirkungsgrad angenommen wird. Dies ist in der Realität nicht der Fall und es gibt Modelle, um den Wirkungsgrad für Ventilatoren in zentralen Systemen zu berechnen [12]. Dabei hängt die Leistungsaufnahme des Ventilators vom Wirkungsgrad und der hydraulischen Leistung des Ventilators ab:

$$P_{el,v} = \frac{P_{h,fan}}{\eta_{el}} = \frac{\dot{V}_{luft} \Delta p_{fan}}{\eta_{el}}$$

mit:

- $P_{el,v}$  elektrische Leistung des Ventilators [W]
- $P_{h,fan}$  hydraulische Leistung des Ventilators [W]
- $\dot{V}_{luft}$  Luftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\Delta p_{fan}$  Druckerhöhung des Ventilators [Pa]
- $\eta_{el}$  elektrischer Wirkungsgrad des Ventilators [-]

Anschließend wird die elektrische Energieaufnahme des Ventilators ( $E_{el,v}$ ) berechnet, indem die Ventilatorleistung über die Zeit integriert und der Einfluss der Ventilatorwärmeverluste auf die Zuluft vernachlässigt wird.

$$E_{el,v} = \int P_{el,v} \cdot dt$$

### 2.2.3 Primärenergie

Der Primärenergieverbrauch durch die Lüftung ( $Q_{pe,v}$ ) wird in  $\text{kWh}_{pe}$  angegeben und entsprechend der Beschreibung in den Normen DIN 18599-1 [13] definiert. In verschiedenen Bewertungsszenarien wird der Primärenergieverbrauch unter Berücksichtigung der Wärmeverluste durch die Lüftung ( $Q_{heat,v}$ ) und des elektrischen Energieverbrauchs des Ventilators ( $E_{el,v}$ ) mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren berechnet. Diese Faktoren sind abhängig von dem angenommenen Heizungsreferenzsystem und der Entwicklung des regenerativen Anteils der Stromerzeugung und werden hier nicht weiter behandelt.

$$Q_{pe,v} = f_{p,h} Q_{heat,v} + f_{p,el} E_{el,v}$$

## 2.2.4 Energielabel

Die Europäische Kommission hat durch die Verordnung 1254/2014 der Kommission zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates [14] die Schaffung einer Energiekennzeichnungsmethode für Wohnungslüftungsgeräte umgesetzt. Um den Energieverbrauch eines bestimmten Produktes zu klassifizieren, wird der spezifische Energieverbrauch (SEC) gemäß Anhang VIII der Verordnung berechnet. Der SEC gibt den durchschnittlichen Energieverbrauch des Lüftungsgeräts in kWh/m<sup>2</sup>a an. Die Wertebereiche liegen im Negativen (z.B. Effizienzklasse A+: SEC < -42 kWh/m<sup>2</sup>a), d.h. der SEC gibt hier die Einsparung im Verhältnis zu einer Referenz an. Bestimmte Wertebereiche weisen diesem Indikator ein Energielabel von A+ (am effizientesten) bis G (am wenigsten effizient) zu. Die Berechnung umfasst drei Hauptkomponenten: den Stromverbrauch des Ventilators, die Heizenergieeinsparung der geregelten Luftwechselrate im Vergleich zu einem Referenzwert und die erforderliche Abtauenergie (Frostschutz). Das Energieeffizienzlabel wird in der Regel zusammen mit dem maximalen Zuluftvolumenstrom und dem Schalleistungspegel bei 70% des maximalen Volumenstroms auf dem Produktetikett mitgeteilt.

In der Berechnungsmethode der Verordnung gibt es einen dimensionslosen Regelungsfaktor *CTRL*, der je nach Regelsystem (von manueller Regelung bis zu lokaler Bedarfsregelung) einen bestimmten Wert annimmt. Dieser Regelungsfaktor kann unter bestimmten Bedingungen die Schwankung des SEC signifikant beeinflussen und somit entscheiden, ob ein Gerät mit einer höheren Energieeffizienzklasse versehen wird, indem es eine innovative Regelungsstrategie bietet. Für Hersteller können energieeffiziente Regelungsstrategien daher nicht nur ein Werkzeug zur Senkung der Betriebskosten sein, sondern auch ein schlagkräftiges Argument für Marketingzwecke. Zum Beispiel hat eine „manuelle Regelung“ einen Koeffizienten von 1, während einer „vollautomatischen Regelung“ ein Koeffizient von 0,65 zugewiesen wird, was eine potenzielle Energiereduzierung von 35% ermöglicht und das Energielabel eines einzelnen Geräts um eine oder zwei Kategorien aufwertet. Zusätzlich wird ein Faktor *x* berücksichtigt, der von den verfügbaren Lüfterstufen für den manuellen Betrieb abhängt. Der höchste Wert wird für Systeme mit variabler Lüfterdrehzahl erreicht. Letztlich berücksichtigt der Faktor *MISC* kanalgeführte oder nicht kanalgeführte (fassadenintegrierte) Geräte. Fassadenintegrierte Geräte haben nach diesem *MISC* Wert einen 10% höheren Energieverbrauch.

## 2.3 Luftqualität

### 2.3.1 Schimmelpilzbildung

Einer der wichtigsten Gründe für die mechanische Wohnungslüftung ist die Sicherstellung des Gebäudeschutzes gegen mögliche Schimmelbildung. Die Norm DIN 1946-6 [2] legt einen Mindestluftaustausch für den Feuchteschutz in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Gebäudes fest, um Schimmelwachstum zu verhindern. Das Wachstum verschiedener Pilzarten in Wohngebäuden hat schwerwiegende negative Auswirkungen sowohl auf die Baumaterialien als auch auf die Gesundheit der Bewohner und eine Gebäudesanierung beseitigt Schimmelpilze nicht zwangsläufig. Aus Sicht der Gebäudeeigentümer ist der Schutz vor Schimmelpilzbildung das wichtigste Merkmal einer Wohnungslüftungsanlage.

Es gibt unterschiedliche Methoden, um den kritischen Feuchtwert für Schimmelpilzwachstum in Baumaterialien zu bestimmen. In den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation für die Luftqualität in Innenräumen [15] sind mehrere Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum in Innenräumen aufgeführt. In diesen Studien wurden sowohl Vor-Ort- als auch Laborexperimente durchgeführt, um das Wachstum mehrerer Pilzarten in verschiedenen Baumaterialien zu charakterisieren. In allen Fällen wurde deutlich, dass das Auftreten von Schimmel mit der Oberflächentemperatur des Materials und der Luftfeuchte zusammenhängt. Dadurch wird die Bedeutung eines angemessenen Luftaustauschs in Wohngebäuden hervorgehoben. Schimmelpilze wachsen nicht unterhalb einer relativen Luftfeuchtigkeit (RF) von 75% in einem Temperaturbereich von 5-40°C [16]. Dieser Wert wird als Grenzwert angenommen, um potenzielles Schimmelwachstum in feuchten Räumen in Wohngebäuden (wie z. B. Bädern oder Küchen) zu beurteilen.

### 2.3.2 Gesundheitseffekte

Die Verhinderung von Schimmelbildung ist eines von mehreren gesundheitsrelevanten Themen im Zusammenhang mit Lüftungsanlagen. In den letzten vierzig Jahren berichteten mehrere Studien, dass die Veränderung der Innenraumqualität unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Bewohner haben kann.

In einer der ersten Studien, die Gesundheit und Innenraumluftqualität in Beziehung setzten, kamen Arundel et al. [17] zu dem Schluss, dass die indirekten negativen Auswirkungen der relativen Luftfeuchtigkeit in Gebäuden auf die Gesundheit minimiert werden, wenn die relative Luftfeuchte zwischen 40 und 60% gehalten wird. Dies scheint vor allem im Winter entscheidend zu sein, wenn durch höhere Luftwechselraten die relative Luftfeuchte im Innenraum häufig auf Werte unter 30% sinkt. Abbildung 2 fasst verschiedene gemeldete gesundheitliche Auswirkungen und deren Abhängigkeit von der relativen Innenraumluftfeuchtigkeit zusammen. Diese Ergebnisse waren in den letzten 30 Jahren die Grundlage für viele Studien über Auswirkungen der Innenraumluftfeuchte auf die Gesundheit.

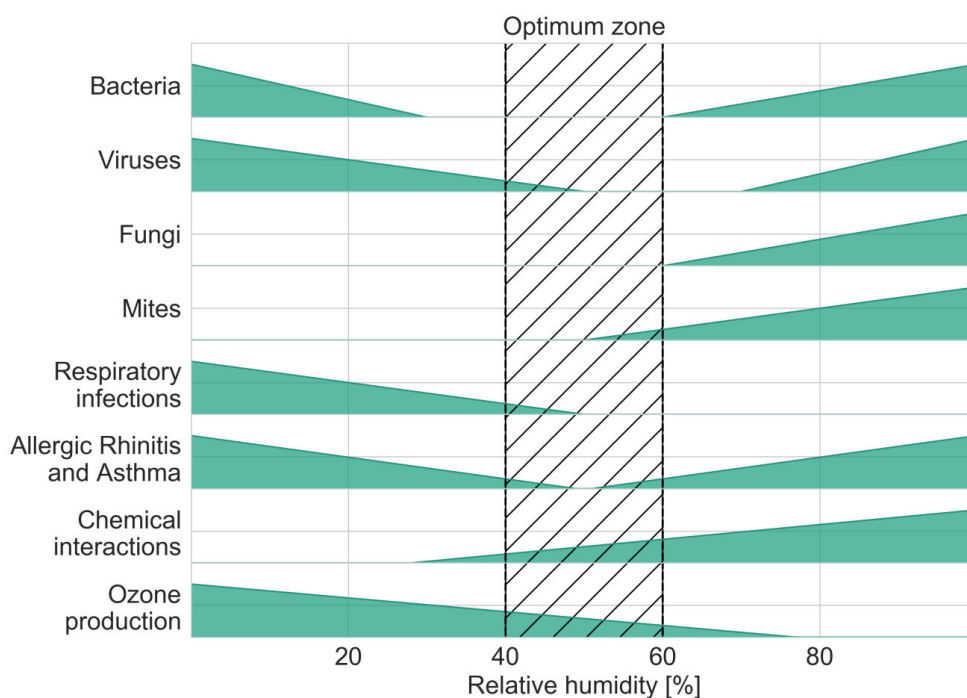


Abbildung 2 – Relative Feuchte und gesundheitliche Auswirkungen – adaptiert von [17]

Die Beziehung zwischen Bakterien und Viren und niedrigen relativen Luftfeuchten wird seit mehr als 70 Jahren untersucht. Die Verstärkung des Abtötungsprozesses von Bakterien in der Luft wird stark von der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst. In einer Innenraumumgebung mit 50% RF sterben die Luftmikroorganismen viel schneller ab als in einer Umgebung mit 20 oder 80%. Die meisten Viruspartikel sind stabil, wenn die relative Luftfeuchtigkeit unter 30% liegt, während die Übertragungsrate bei 50% RH stark abfällt. Es wurde auch festgestellt, dass eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen wesentlich zur luftgetragenen Übertragung des SARS-CoV-2 Virus beiträgt [18].

Darüber hinaus wird oft berichtet, dass Innenraumumgebungen mit schlechter Luftqualität die Raten von Atemwegserkrankungen (wie Allergie- und Asthmasymptome) und des Sick-Building-Syndroms (SBS) erheblich beeinflussen können. Beim SBS handelt es sich in der Regel um eine „Ansammlung von unspezifischen Symptomen, einschließlich Augen-, Nasen- und Rachenreizungen, geistiger Ermüdung, Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel und Hautreizungen, die mit dem Aufenthalt an bestimmten Arbeitsplätzen verbunden zu sein scheinen“ [19]. Neben der relativen Luftfeuchtigkeit korreliert auch die Kohlendioxidkonzentration (CO<sub>2</sub>) typischerweise mit dem Auftreten des SBS. So untersuchten Erdmann et al. [20] den Zusammenhang zwischen der Kohlendioxidkonzentration und

SBS in Bürogebäuden. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 100 ppm signifikant mit einer 10 bis 20% höheren Wahrscheinlichkeit von Halsschmerzen und Hustensymptomen verbunden ist. Zusammenhänge zwischen schlechter Raumluftqualität (repräsentiert durch CO<sub>2</sub> und andere Schadstoffe) und anderen Symptomen, wie Müdigkeit und Erschöpfung, Kopfschmerzen, Stimmungsschwankungen oder Angstzuständen wurden auch identifiziert.

Darüber hinaus wurde eine große Anzahl potenzieller Schadstoffe untersucht, um ihren Beitrag zu schlechter Raumluftqualität (RLQ) zu ermitteln. Neben der bereits erwähnten Luftfeuchtigkeit und dem CO<sub>2</sub> wurde über weitere gefährliche Substanzen berichtet, wie z. B. flüchtige organische Verbindungen (VOC), Feinstaub, Formaldehyd, Benzol, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Radon. Zu den verschiedenen Schadstoffquellen in Innenräumen gehören sowohl die Bewohner mit ihren verschiedenen Aktivitäten als auch Bau- oder Möbelmaterialien. Die Konzentration der aufgeführten Schadstoffe in Innenräumen korrekt zu überwachen, erfordert meist komplexe Messsysteme und modernste Sensoren. Aus diesem Grund wird CO<sub>2</sub> aufgrund der vergleichsweise geringeren Kosten für dessen Messung und seiner hohen Korrelation mit anderen menschenbezogenen Schadstoffen als RLQ-Indikator akzeptiert.

### 2.3.3 Indikatoren

Das Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC) [21] hat CO<sub>2</sub> aufgrund seiner hohen Korrelation mit anderen Schadstoffen als RLQ-Indikator anerkannt. Der vorhergesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (*Predicted percentage dissatisfied* PPD) oder einfacher der Prozentsatz an Unzufriedenen (*Percentage dissatisfied* – PD) wird in den meisten Modellen verwendet, um die Zufriedenheit der Nutzer mit der Raumluftqualität zu bewerten. Dieses Konzept wurde zuerst von Fanger zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit eingeführt und danach auf die Raumluftqualität erweitert [22]:

**Prozentsatz der Unzufriedenheit (PD):** „Eine Schätzung, wie viele Personen die thermischen Komfortbedingungen als zufriedenstellend empfinden. In Bezug auf die Raumluftqualität sind die Unzufriedenen diejenigen, die die Luftqualität als inakzeptabel empfinden“.

Die europäische Norm DIN EN 16798-1, in der Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden behandelt werden, berücksichtigt die Außenluftverschmutzung und schlägt vier RLQ-Kategorien vor, die auf der CO<sub>2</sub>-Konzentration über dem Außenniveau, der Fläche und des Raumtyps (Schlafzimmer und Wohnzimmer) basieren. Tabelle 2 zeigt diese Kategorien. Die Luftqualitätskategorien entsprechen dabei einem zugehörigen erwarteten Prozentsatz an unzufriedenen Nutzern, basierend auf verschiedenen Studien. Kategorie IV wird als unzulässig angesehen. Die Kategorien gelten für kontinuierlich arbeitende Lüftungssysteme, bei denen Zu- und Ablufträume vordefiniert sind.

$$\Delta CO_2 = C_{CO_2,indoor} - C_{CO_2,outdoor}$$

Tabelle 2 – Kategorien der Luftqualität laut DIN EN 16798-1 (S. 51, T.B.2.1.4-2) [7]

Kategorie	$\Delta CO_2$ Wohnzimmer [ppm]	$\Delta CO_2$ Schlafzimmer [ppm]	Erwartete PD [%]
I	550	380	15
II	800	550	20
III	1350	950	30
IV	>1350	>950	40

Der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsgrenzwert variiert je nach Literaturquelle. 100.000 ppm führen zum Tod. Für die Arbeitshygiene sind 5000 ppm der absolute Grenzwert, während für die RLQ ein Wert zwischen 1000 und 1500 empfohlen wird. Die Expertenkommission des IEA EBC Annex 68 [23] schätzt eine Kurzzeitexposition von 1250 ppm als akzeptabel ein. Die DIN EN 16798-1 [7] schlägt vor, 1350 ppm in Schlafzimmern und 1750 ppm in Wohnräumen als Akzeptanzschwelle zu verwenden (unter Annahme von 400 ppm als Außenkonzentration).

Nichtsdestotrotz hängt ein Unbehagen von Nutzern gegenüber der Innenraumumgebung häufig mit der subjektiven Wahrnehmung zusammen und nicht mit gemessenen ungesunden Bedingungen; CO<sub>2</sub> z.B. wird vom Menschen gar nicht wahrgenommen. Dies bedeutet, dass ein Indikator, der sich auf diese subjektive Wahrnehmung bezieht, bei der Betrachtung von Lüftungsregelungsstrategien berücksichtigt werden sollte. In diesem Sinne hat Fanger [22] einen Indikator für die wahrgenommene RLQ in Verbindung mit Bioeffluenten und menschlichen Gerüchen entwickelt. Die verwendete Maßeinheit ist der *decipol* (ein Zehntel des *pol*, abgeleitet von *pollution*) und wurde definiert als „die Luftbelastung, die von einer Standardperson (...) verursacht wird, bei einem Luftdurchsatz von 10 l/s unbelasteter Luft“. Fanger verknüpfte diese wahrgenommene Luftbelastung mit der Unzufriedenheit am Arbeitsplatz (in PD), der Lüftungsrate (in l/s) und der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft.

Jokl [24] setzte menschliche Geruchsintensitäten mit der menschlichen CO<sub>2</sub>-Produktion in einer neuen Einheit namens *decicarbdiox* in Beziehung. Seine Skala ist ebenfalls logarithmisch, in Anlehnung an die Erkenntnisse Fangers [22]. Jokl führte das Konzept der Anpassung des Nutzers an die Umgebung ein, indem er zwei verschiedene Funktionen erstellte, die den Prozentsatz der Unzufriedenheit und die CO<sub>2</sub>-Konzentration miteinander verbinden. Eine Zusammenfassung der überprüften Funktionen ist in Abbildung 3 dargestellt. Für unangepasste Personen sind die optimalen (PD=20%) und zulässigen (PD=30%) Werte 1015 ppm und 1570 ppm. Für angepasste Personen liegen die optimalen (PD=20%) und zulässigen (PD=30%) Werte bei 2420 ppm und 4095 ppm. Auf diese Modelle, die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Benutzerunzufriedenheit miteinander ins Verhältnis setzen, wird in Kapitel 3 weiter Bezug genommen.

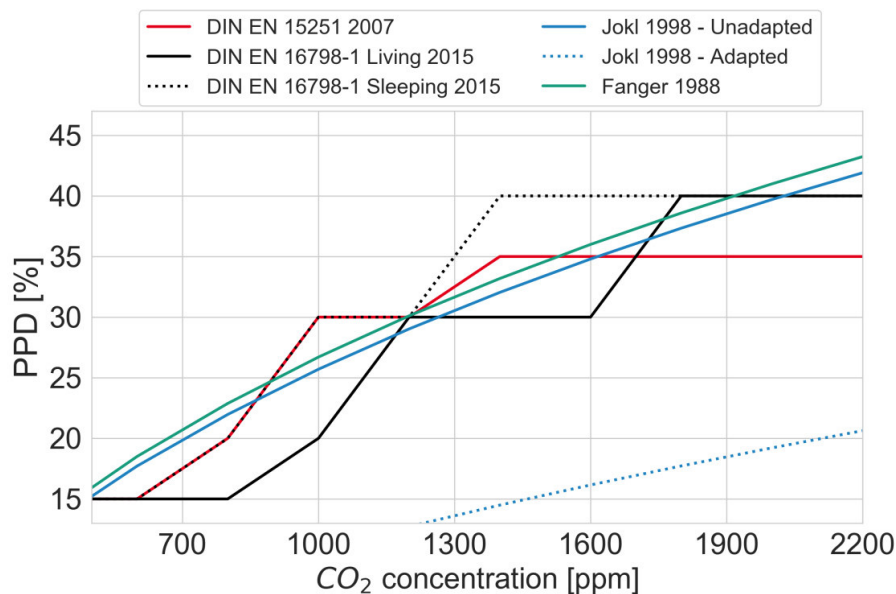


Abbildung 3 – Vergleich der bestehenden Unzufriedenheitsmodelle anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration

Zusammenfassend wird hier ein allgemeiner Grenzwert von 1250 ppm festgelegt, der der Empfehlung der Expertengruppe im IEA EBC Annex 68 entspricht [23]. Dieser Wert entspricht dem Schnittpunkt, an dem fast jedes untersuchte Modell den Schwellenwert von 30% Unzufriedenheit überschreitet, der üblicherweise als zulässiger Grenzwert anerkannt wird. Diese Grenze ist nur relevant, wenn ein Raum von einer Person belegt wird, da CO<sub>2</sub> ein Indikator ist, der mit menschlichen Bioeffluenten korreliert. Die relative Raumluftfeuchtigkeit tritt als zusätzliche gesundheitsrelevante Größe auf. Die Definition der Zulässigkeitsgrenzen wird im nächsten Abschnitt erläutert, wo auch der Zusammenhang mit der hygrothermischen Behaglichkeit beschrieben wird.

## 2.4 Hygrothermischer Komfort

Hinsichtlich der hygrothermischen Behaglichkeit in Innenräumen stellen die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit die wesentlichen Indikatoren dar. Wohnungslüftungssysteme sind jedoch nicht für die Regulierung der Raumtemperatur im Winter verantwortlich, sondern können lediglich im Sommer die Raumtemperatur (in einem gewissen Rahmen) beeinflussen. Zur Bewertung von Lüftungskonzepten wird daher im Winter die relative Feuchte als Hauptindikator betrachtet, während im Sommer die Raumtemperatur bei der Planung von Lüftungsstrategien entscheidend ist.

### 2.4.1 Komfort im Sommer

Hohe Innenraumtemperaturen verursachen nicht nur thermischen Diskomfort, sondern werden auch mit SBS-Symptomen in Verbindung gebracht. Bei der Lüftung im Sommer besteht deswegen das Ziel für ein Wohnungslüftungssystem neben der Erhaltung der Luftqualität im Innenraum darin, überschüssige Wärme aus dem Gebäude abzuführen, um die thermische Behaglichkeit der Bewohner zu gewährleisten. Dies gelingt immer dann (ohne weitere technische Maßnahmen wie aktive Kühlung oder Erdreichwärmetauscher), wenn die Außentemperatur unter der Innenraumtemperatur liegt. Dies ist im Sommer meist nachts der Fall, so dass dann mit einem erhöhten Luftaustausch tagsüber entstandene und in der Bausubstanz gespeicherte Wärme abtransportiert werden kann. Bei entsprechenden Temperaturdifferenzen während des Tages kann auch tagsüber direkt gekühlt werden.

Zur Bewertung des Komforts schlägt die DIN EN 16798-1 für Gebäude ohne Heiz- oder Kühlsysteme die Verwendung des adaptiven thermischen Komfortmodells vor, das komfortable operative Temperaturbereiche definiert. Die operative Temperatur (oder Empfindungstemperatur, siehe ISO 7730 [6]) ist die gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung. Die komfortable operative Temperatur ergibt sich aus

$$T_{o,comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 + k$$

- $T_{o,comf}$  ist die komfortable operative Temperatur
- $T_{rm}$  ist der gleitende Mittelwert der Umgebungstemperatur über die letzten sieben Tage
- $k$  ist ein zusätzlicher Koeffizient, der die Zufriedenheitsgrenzen (obere/untere Grenze) der Komforttemperatur bestimmt (siehe DIN EN 16798-1):
  - +2 / -3 für Kategorie I
  - +3 / -4 für Kategorie II
  - +4 / -5 für Kategorie III

Weiterhin können hohe operative Temperaturen die Wahrnehmung der Raumluftqualität beeinflussen. Clausen et al. [25] fanden einen logarithmischen Zusammenhang zwischen der operativen Temperatur und der wahrgenommenen Luftqualität. Die Umsetzung in reale Regelungssysteme ist jedoch nicht praktikabel, da die messtechnische Ermittlung der operativen Temperatur kompliziert ist. Aus diesem Grund basieren Lüftungsregelungsstrategien meist auf der Messung der Raumlufttemperatur, die je nach Ort der Messung und Sensortyp der operativen Temperatur in der Regel ausreichend nahekommt.

Zusätzlich kann eine hohe relative Feuchte die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen in einem Wohngebäude erhöhen. Der Unterschied in den Komforttemperaturen zwischen Umgebungen mit hoher und niedriger Luftfeuchtigkeit beträgt bis zu 4°C. Darüber hinaus untersuchten Toftum et al. [26] die oberen Luftfeuchtigkeitsgrenzen zur Vermeidung von Atembeschwerden bei den Bewohnern. Ihr Modell beinhaltet die Lufttemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit (als Dampfdruck), um die Anzahl Unzufriedener vorherzusagen. Entwickelt wurde es aus Labortests mit Probanden und deren Exposition gegenüber verschiedenen Bedingungen. Es zeigte sich, dass eine Änderung von 1°C den gleichen Effekt auf die Akzeptanz hatte wie eine Änderung von 130 Pa Dampfdruck. Abbildung 4 veranschaulicht den Einfluss der relativen Raumluftfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Anzahl Unzufriedener – sowohl für den Sommer- wie auch für den Winterfall.

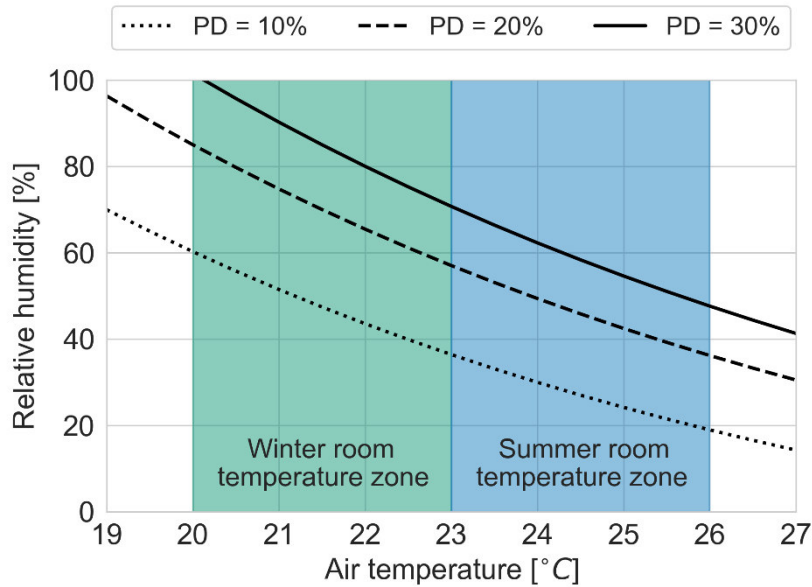


Abbildung 4 – Relative Luftfeuchtigkeit und Unzufriedenheit – adaptiert von [26]

### 2.4.2 Komfort im Winter

Lüftungsanlagen ohne Heizregister sind nicht für die Regelung der Innenraumtemperatur im Winter verantwortlich, sondern können mithilfe einer Wärmerückgewinnung lediglich den Energieaufwand zur Raumheizung verringern. Der Luftaustausch wegen Lüftung wird als zusätzlicher Wärmeverlust betrachtet und nicht als Regelung der Innentemperatur. Die mechanische Lüftung kann jedoch den hygrothermischen Komfort negativ beeinflussen.

Erstens sind sehr niedrige Werte der relativen Raumluftheuchtigkeit oft mit Unbehagen verbunden. Aufgrund des geringen Wasserdampfgehalts der Außenluft kann der Luftaustausch im Winter nach dem Erwärmen im Innenraum zu einer zu geringen relativen Raumluftheuchte führen, wenn keine Befeuchtungsgeräte vorhanden sind. So untersuchten Sunwoo et al. [27] die physiologische Reaktion auf niedrige Luftfeuchtigkeitswerte und kamen zu dem Ergebnis, dass eine relative Luftfeuchte von unter 30% die Befindlichkeit von Menschen erheblich beeinträchtigt und bei 10% kritisch wird. Außerdem fühlten sich die Bewohner bei 10% RF kälter als bei 30 oder 50%, obwohl die Raumluftheuchtigkeit gleich blieb. Dies könnte eine direkte Auswirkung auf die manuelle Bedienung von Heizungsthermostaten haben.

Coydon [10] definierte zwei Grenzen für die hygrothermische Behaglichkeit: 70% als Obergrenze und 40% als Untergrenze. Außerdem muss der Einfluss der relativen Feuchte auf die Gesundheit (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) berücksichtigt werden, um die Grenzwerte zu definieren. Unter Berücksichtigung der Schimmelbildung und gesundheitlicher Probleme, die mit den Werten der relativen Luftfeuchtigkeit in Innenräumen verbunden sind, liegen die zulässigen Grenzwerte für die untere und obere relative Luftfeuchtigkeit bei 25 und 75%. Idealerweise sollte die relative Luftfeuchtigkeit das ganze Jahr zwischen 40 und 60% gehalten werden. Die Norm DIN EN 16798-1 definiert drei Raumluftheukategorien für die Luftbe- bzw. entfeuchtung in zentralen RLT-Anlagen (Tabelle 3). Die Kategorie IV gilt als unzulässig. Ebenso muss die absolute Feuchte unter 0,012 g/kg gehalten werden (sog. Schwülegrenze).

Tabelle 3 – Empfohlene Auslegungskriterien für die relative Luftfeuchtigkeit (RF) in genutzten Räume laut DIN EN 16798-1 (S. 52, T. B2.2.1) [7]

Kategorie	Auslegungswert der RF für Entfeuchtung [%]	Auslegungswert der RF für Befeuchtung [%]
I	30	50
II	25	60
III	20	70

Darüber hinaus kann die falsche Auslegung von Lüftungsanlagen im Winter, wo zu niedrige Zulufttemperaturen zu Zugerscheinungen führen können, zu thermischem Unbehagen bei den Bewohnern führen. Jokl untersuchte dieses Phänomen und definierte es als „unerwünschte lokale Abkühlung des Körpers. (...) Die Empfindlichkeit gegenüber Zugluft ist dort am größten, wo die Haut am Kopf und an den Knöcheln exponiert ist“ [28]. Zugluft hängt im Wesentlichen von der Zulufttemperatur, der mittleren Luftgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad ab. Daher besitzt die Zulufttemperatur hohe Bedeutung, um lokale Unbehaglichkeitsprobleme zu vermeiden. So wurde das Auftreten von Zugluft in hochluftdichten Gebäuden (oder auch Passivhäusern) bereits mehrfach registriert. Sie kann nicht nur den Komfort der Bewohner beeinflussen, sondern auch wirtschaftliche Folgen für die Vermieter haben [29].

In anderen Berichten wurde der Einfluss verschiedener Konfigurationen von fassadenintegrierten dezentralen Lüftungssystemen auf das Zugluftisiko untersucht. Merckx et al. [30] verglichen das Zugluftverhalten von drei dezentralen Lüftungsgeräten mittels CFD-Simulationen. Sie kamen zu dem Schluss, dass das Zugluftisiko aufgrund der geringen Luftgeschwindigkeiten im Raum fast immer gering ist. Wu et al. [31] untersuchten ebenfalls den Einfluss der Zulufttemperatur. Sie fanden heraus, dass es keinen signifikanten vertikalen Raumtemperaturunterschied für mechanische Lüftungssysteme gibt, und bestätigten, dass Zugluft nur am Hals zu erwarten ist. Daraus lässt sich schließen, dass das Zugluftisiko bei dezentralen Lüftungssystemen auch bei niedrigen Zulufttemperaturen gering ist. Eine adäquate Platzierung des Geräts ist entscheidend für dessen Erfolg. Die Zugluffterfassung ist schwierig in die Lüftungsregelung zu integrieren, da die Bestimmung der Luftgeschwindigkeiten im Raum und eine Zuluftvolumenstrommessung in Echtzeit anspruchsvolle Aufgaben sind.

## 2.5 Akustik

Ein weiteres zentrales Thema in Bezug auf Wohnungslüftungssysteme ist die Schallemission. Manz et al. [32] kamen zu dem Schluss, dass „(...) die kritischsten für den erfolgreichen Einsatz von Einzelraumlüftungsgeräten die akustischen Eigenschaften sind. Die Innenraum-Schalldruckpegel der untersuchten Geräte sind für viele Anwendungen zu hoch. Außerdem sind die Anwendungen der untersuchten Geräte wegen der Übertragung von Außengeräuschen durch die Geräte auf Fälle beschränkt, in denen ein niedriger Außenschalldruckpegel und/oder eine geringe Empfindlichkeit der Gebäudenutzer gegenüber Lärm besteht. Sind die Anforderungen höher, muss die Schalldämmung der Geräte erhöht werden“. Mahler et al. [33] untersuchten die Leistung dezentraler Lüftungssysteme in 50 Bürogebäuden. Dabei konnten die meisten erfassten Beschwerden auf zu hohe wahrgenommene Schallemissionen zurückgeführt werden.

Schallemission in Wohngebäuden kann verschiedene Quellen haben. Zum einen gibt es Schall, der direkt von den Ventilatoren eines Lüftungsgerätes erzeugt wird. Dieser ist meist auf eine hohe Luftgeschwindigkeit in den Kanälen oder eine falsche Position der Ventilatoren zurückzuführen. Bei fassadenintegrierten Lüftungsanlagen befindet sich der Ventilator in unmittelbarer Nähe der Bewohner, so dass die Gefahr einer akustischen Beeinträchtigung deutlich höher ist als bei zentralen Lüftungsgeräten. Insbesondere wenn diese Ventilatoren periodisch ihre Richtung ändern, ist der Vorgang für das menschliche Ohr oft störend. Jedoch wird durch den Einsatz von mechanischer Belüftung in der Regel die Fensteröffnung reduziert, die vor allem in Großstädten oft mit Lärmbelastung durch Geräusche im Freien verbunden ist.

Rasmussen et al. [34] entwickelten ein Modell, das den Schallpegel der Wohnungslüftung mit dem Prozentsatz der Unzufriedenheit in Verbindung bringt. Lärmpegel über 30 dB(a) verursachen mehr als 20% Unzufriedene (Tabelle 4). Das Passivhaus Institut definiert einen Grenzwert von 25 dB(a) in Schlafräumen und von 30 dB(a) in Wohnräumen für die Zertifizierung von Lüftungsanlagen [9]. Die Norm DIN EN 16798-1 gibt 40 dB(a) in Wohnräumen und 35 dB(a) in Schlafräumen als zulässige Grenzwerte an [7].

Tabelle 4 – Grenzen der Klassen für Schall von HLK in Wohngebäuden [34]

Klasse des Raumes	A	B	C	D	E	F
Lärm von HLK [dB(a)]	<20	<24	<28	<32	<36	<40
Erwartete PD [%]	<5	5	10	20	35	>50

Einige Studien ermittelten signifikante Unterschiede in der Schlafstörung mit und ohne Lüftungssystemen. Boerstra et al. [35] maßen in 86% der untersuchten Schlafzimmer mit mechanischer Lüftungsanlage Schallpegel über 30 dB(a). Der Schalldruckpegel eines Ventilators ist proportional zum Logarithmus des Volumenstroms. Dieser Zusammenhang stimmt mit den Geräuschmessungen von Manz et al. [32] überein. Aktive Geräuschkontrolle ist eine Aufgabe, die zunächst mit der Produktentwicklung (Design, Form, Materialauswahl usw.) zusammenhängt. Mit einem intelligenten Regelungssystem kann dann die Geräuschentwicklung über eine Volumenstromsteuerung beeinflusst werden. In der vorliegenden Studie wird die Akustik indirekt über die Steuerung des Volumenstroms berücksichtigt, jedoch kein eigener Indikator für die Schallemissionen definiert. Eine intelligente Regelung zielt darauf ab, unnötige Luftwechselraten zu reduzieren, was sich auf alle damit zusammenhängenden Indikatoren (wie Energieverbrauch und Schallemission) auswirkt.

## 2.6 Nutzerfreundlichkeit und Nutzerverhalten

Eine weitere wesentliche Anforderung an Lüftungssysteme ist die Nutzerfreundlichkeit. In einem Beitrag des AIVC [36] wurden einige wichtige Punkte zur Berücksichtigung der Bedürfnisse der Bewohner bei Wohnungslüftungsgeräten skizziert:

- Das Gerät darf nicht nur eine Lösung (z. B. gegen Schimmelpilzbildung) bieten, sondern muss vom Nutzer als nützlich empfunden werden.
- Vollautomatische Systeme müssen sich an die jeweilig vorherrschenden Wohn(ungs)bedingungen anpassen. Serviceausfälle, Systemfehler oder unerwünschtes Verhalten sind klare Ausschlusskriterien für den Einsatz.
- Auch die fortschrittlichsten Systeme müssen bedienbar sein. Wenn ein Benutzer beispielsweise das Gerät ausschalten möchte und es läuft weiter, wird er es höchstwahrscheinlich blockieren.
- Eine geeignete Benutzeroberfläche und Rückmeldungen sind entscheidend. Eine andere Studie [37] legt nahe, dass mit angemessenem Benutzerfeedback zusätzliche Energieeinsparungen induziert werden können.

Die Industrie konzentriert sich darauf, die Anforderungen der Gebäudenorm zu erfüllen, und ist typischerweise technologieorientiert. Daher besteht Potential hinsichtlich der Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit von Lüftungssystemen. Generell gibt es nur wenige Studien über die Beziehung zwischen Nutzer und Lüftungssystemen in Wohngebäuden [36]. Der Bewohner wird in der Regel nicht gehört und seine Bedürfnisse können sich von den Normvorgaben unterscheiden. Maier [38] führte eine Umfrage zur Wohnungslüftung in Deutschland durch und fand heraus, dass mehrere Aspekte dazu beitragen, die Benutzerfreundlichkeit zu verbessern: Einstellbarkeit, Multifunktionalität, Effizienz, Geräuscharmheit und angemessene Benutzerschnittstellen. Die Annäherung der Technologie an den Alltagsnutzer ist somit eine Herausforderung, die weiter vorangetrieben werden sollte.

Wie bereits erwähnt, beeinflusst das Nutzerverhalten bei der Bedienung von mechanischen Lüftungssystemen stark deren Leistung. Dennoch liegen kaum Studien über die Bedienung von mechanischen Lüftungssystemen vor. Es gibt nur eine Publikation, in der das Nutzerverhalten im Zusammenhang mit mechanischen Lüftungssystemen in Wohnräumen explizit gemessen und untersucht wurde. Ren et al. [39] haben in zehn Wohnungen in den Niederlanden aus der messtechnischen Erfassung der Lüfterleistung über zwei Jahre die Wahl der Lüfterstufe durch den Nutzer abgeleitet. Sie führten eine explorative Analyse unter Verwendung von Clustering-Techniken durch, um die Haupttreiber zu verstehen, die die Bewohner bei der Bedienung von mechanischen Lüftungssystemen motivieren. Die Ergebnisse zeigten, dass es vier Hauptgruppen gibt: zeitbezogene Operationen, innenraum- und außenraumbezogene sowie gemischte Faktoren. Ihre Schlussfolgerungen stehen in engem Zusammenhang mit den Ergebnissen, die aus ähnlichen

explorativen Analysen für das Fensteröffnungsverhalten in Wohngebäuden stammen [40]. Vor diesem Hintergrund ist es interessant, das Fensteröffnungsverhalten mit dem Betrieb von mechanischen Lüftungssystemen in Wohngebäuden zu vergleichen, da beides das Nutzerverhalten zur Regulierung der einströmenden Frischluft in einen Raum widerspiegelt.

## 2.7 Wetter und Gebäude

Weitere Faktoren, die die Leistung von Wohnungslüftungssystemen beeinflussen können, sind das Wetter und die Gebäudeeigenschaften. In der Regel ist die Berücksichtigung des Einflusses des Wetters und der Gebäudeeigenschaften jedoch eher eine Aufgabe des Planers, als dass sie die Lüftungsregelungsstrategie betreffen. Gebäudetyp (Neubau, Bestand, Nutzungsart, Größe etc.) und Klimazonen sind dabei entscheidend für die Systemauswahl.

Der Einfluss der Klimazone wurde für verschiedene Ziele einer Lüftungsanlage untersucht, insbesondere hinsichtlich der Außentemperaturen. Artmann et al. [41] betrachteten das lüftungstechnische Kühlpotenzial – insbesondere Nachtlüftung – in ganz Europa und kamen zu dem Schluss, dass kältere Klimazonen zu einem höheren Kühlpotenzial im Sommer führen, während in mediterranen Klimazonen die Nachtlüftung nicht ausreicht, um Gebäude abzukühlen. Gruner [42] bestätigte das Potenzial von fassadenintegrierten Lüftungssystemen in nordischem Klima, um die Anforderungen an die RLQ zu gewährleisten, ohne die Energieeinsparungen im Winter zu konterkarieren. Rojas et al. [43] führten eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Simulationsparameter für balancierte und alternierende Wohnungslüftungssysteme durch. Sie beobachteten, dass an Standorten mit kalten und trockenen Wintern lange Perioden mit trockener Innenraumlufte (RH unter 30%) auftreten.

Neben den thermischen Eigenschaften eines Wohngebäudes wurde auch der Einfluss der Luftdichtheit und der Windgeschwindigkeit auf die Leistung von Lüftungsanlagen untersucht. In diesem speziellen Fall liegt der Fokus auf fassadenintegrierten dezentralen Systemen, da diese kanallös sind, so dass der Druckunterschied zwischen Innen- und Außenraum für die resultierende Luftwechselrate signifikant wird. Mikola et al. [44] untersuchten die Auswirkung von Druckunterschieden bei dezentraler Lüftung, hauptsächlich in Wohnhochhäusern. Hohe Druckdifferenzen zwischen Räumen und Außenfassade haben einen starken Einfluss auf die resultierenden Luftströme und damit auf die sich ergebende Luftwechselrate. Dies kann die Schadstoffabfuhr und die Effizienz der Wärmerückgewinnung in diesen Geräten untergraben. Merzkirch et al. [45] beobachteten ebenfalls diese Strömungsungleichgewichte. Außerdem war laut ihrer Publikation der Einfluss der Durchlässigkeit der Gebäudehülle auf die Leistung der verschiedenen mechanischen Lüftungssysteme gering. Im Hinblick auf die Sommerlüftung nutzten Baldini et al. [46] durch Windlasten hervorgerufene Strömungsungleichgewichte in dezentralen Ventilatoren für energiesparende Regelungsstrategien.

## 2.8 Zusammenfassung des Kapitels

Lüftungssysteme und deren Regelungsstrategien müssen mehrere Anforderungen in Bezug auf den hygrothermischen Komfort, die Raumluftqualität und die Gesundheit erfüllen. Weiterhin ist bei der Entwicklung dieser Systeme auf Energieeffizienz zu achten. Ein energieeffizientes System ist nicht nur für den Nutzer aufgrund der möglichen Einsparungen interessant, sondern auch für den Hersteller als zusätzliches Verkaufsargument.

Im Hinblick auf die Gesundheit und die Raumluftqualität sind die relative Luftfeuchtigkeit und Kohlendioxid weithin akzeptierte Indikatoren. Die relative Luftfeuchtigkeit wird nicht nur mit dem Gebäudeschutz in Verbindung gebracht (Schimmelpilzrisiko), sondern es wurde auch festgestellt, dass sie die Vermehrung von Viren und Bakterien signifikant beeinflusst. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration taucht aufgrund ihrer hohen Korrelation mit menschlichen Bioeffluents als gängige Regelgröße für die bedarfsgesteuerte Lüftung auf (in der Regel in Verbindung mit der wahrgenommenen RLQ). Die Raumtemperatur wird im Winter nicht durch ein mechanisches Lüftungssystem geregelt, wird aber im Sommer zu einer relevanten Variablen für den thermischen Komfort, um den Erfolg der (Nacht-) Lüftung zur Abfuhr von Kühllasten zu überprüfen. Das dazu anzuwendende adaptive Behaglichkeitsmodell

beruht auf der operativen Temperatur, die jedoch im realen Gebäudekontext nicht messbar ist und durch die Messung der Raumlufttemperatur angenähert wird.

Die Akzeptanzgrenzen für die beiden erstgenannten Größen liegen

- für die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 25% und 75%,
- für die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei 1250 ppm.

Konzentrationen anderer Schadstoffe könnten weitere geeignete Variablen für Lüftungsregelungsstrategien sein. Es besteht jedoch noch Bedarf an der Entwicklung kostengünstiger Sensoren, die verschiedene Schadstoffe einbeziehen, was in naher Zukunft neue Regelungsstrategien erschließen könnte.

Aspekte wie Akustik, Nutzerfreundlichkeit und Kosten sollten auf keinen Fall vernachlässigt werden, damit die potentiellen Nutzer die Technologie einsetzen. Das Geräusch ist proportional zum Logarithmus des Volumenstroms und spielt eine Schlüsselrolle für die Akzeptanz von Wohnungslüftungssystemen. Der Erfolg innovativer mechanischer Wohnungslüftungssysteme hängt weiterhin von der Wahrnehmung des Nutzers ab. Einstellbarkeit, Multifunktionalität, Effizienz, Geräuscharmheit und adäquate Nutzerschnittstellen wurden als kritische Punkte erkannt. Der Einfluss von Klima und Gebäudeeigenschaften betrifft eher den Planer als die Regelung. Im nächsten Kapitel werden die hier analysierten Anforderungen als Grundlage für die Entwicklung nutzerorientierter Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung verwendet.

## 3 Nutzerorientierte Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung

### 3.1 Einleitung

Dieses Kapitel befasst sich mit innovativen nutzerorientierten Regelungsstrategien für Wohnungslüftungssysteme. Es werden drei nutzerzentrierte Regelungsstrategien vorgeschlagen: eine Regelung auf Basis einer Kostenfunktion, ein Fuzzy-basiertes sowie ein selbstlernendes Schema, um die individualisierten Bedürfnisse von Bewohnern einzubeziehen. Die entwickelten Regelungsstrategien werden simuliert und im Feld getestet.

Eine zentrale Annahme dieses Kapitels ist, dass eine raumweise Anpassung des Luftvolumenstroms erforderlich ist, um das System an die Bedürfnisse der Nutzer anzupassen. Dies deckt sich mit der aktuellen Marktentwicklung der Wohnungslüftung in Deutschland, wo der Absatz dezentraler Lüftungssysteme aufgrund ihrer einfachen Installierbarkeit auch bei der Sanierung von Mehrfamilienhäusern sehr stark gestiegen ist. Eine Marktrecherche der verfügbaren Regelungsstrategien im Bereich der Wohnungslüftung zeigt, dass fast alle Geräte auf dem Markt einen manuell einstellbaren Luftvolumenstrom anbieten, der auf vordefinierte Stufen festgelegt ist und folgende Merkmale aufweist:

- Drei bis acht Stufen. Die maximalen Volumenströme liegen zwischen 30 und 60 m<sup>3</sup>/h.
- Vollautomatische Modi als Zusatzausstattung. Die Regelgrößen sind meist die relative Luftfeuchtigkeit (Grenzwert zwischen 65 und 80%) und die CO<sub>2</sub>-Konzentration (1000-1500 ppm). Raumtemperaturen werden oft gemessen, aber nicht als Regelgröße berücksichtigt.
- Weitere Betriebsmodi:
  - Sommerlüftung (Bypass ohne Wärmerückgewinnung)
  - „Party“-Modus (intensive Lüftung)
  - Lange Abwesenheit oder Urlaubsmodus (minimale Lüftung)
  - Schlafmodus (minimale Lüftung oder ausgeschaltet, mit dem Ziel der Geräuschreduzierung)

Die auf dem Markt angebotenen automatischen Regelstrategien stellen fast immer einen Zusatz zu dezentralen Lüftungssystemen dar. Sie werden meist unter Bezeichnungen wie „smart control“ und in Verbindung mit Smart-Home-Geräten vermarktet. In ihrem Fokus steht meist der Bedarf an Einzelraumluft in Abhängigkeit von den aktuellen Raumbedingungen, d.h. eine „bedarfsgeregelte Lüftung“ (oder auf Englisch „Demand-controlled ventilation“ – DCV).

**Bedarfsgeregelte Lüftung (DCV):** Die bedarfsgeregelte Lüftung ist eine Regelungsstrategie zur Aufrechterhaltung der Raumluftqualität, bei der die einem Raum zur Verfügung gestellte Lüftungsrate automatisch an veränderte Bedingungen wie die relative Luftfeuchtigkeit oder die Kohlendioxidkonzentration angepasst wird.

Der Hauptvorteil der DCV ist, dass sie den Volumenstrom durch die Drehzahl der Ventilatoren reguliert, während bei den meisten zentralen Wohnungslüftungssystemen Klappen vorhanden sind, über die der Volumenstrom durch Drosselung eingestellt wird. Diese Eigenschaft der DCV erhöht die Energieeffizienz. In der Regel ist ein Hysteresesyklus enthalten, um plötzliche Änderungen um einen Grenzwert herum zu vermeiden. Es gibt auch andere DCV-Lösungen, wie z. B. lineare Beziehungen zwischen dem Volumenstrom und der Zielgröße (z.B. relative Raumluftfeuchte oder CO<sub>2</sub>). Derzeit mangelt es an Innovationen bei den Lüftungsregelungsstrategien. Die meisten Hersteller verkaufen DCV-Strategien immer noch als intelligente Lüftung, obwohl sie schon seit mehr als zehn Jahren auf dem Markt sind. Abbildung 5 zeigt eine typische DCV, wie sie heute in Wohnungslüftungsanlagen vorhanden ist, basierend auf der relativen Raumluftfeuchte und der CO<sub>2</sub>-Konzentration.

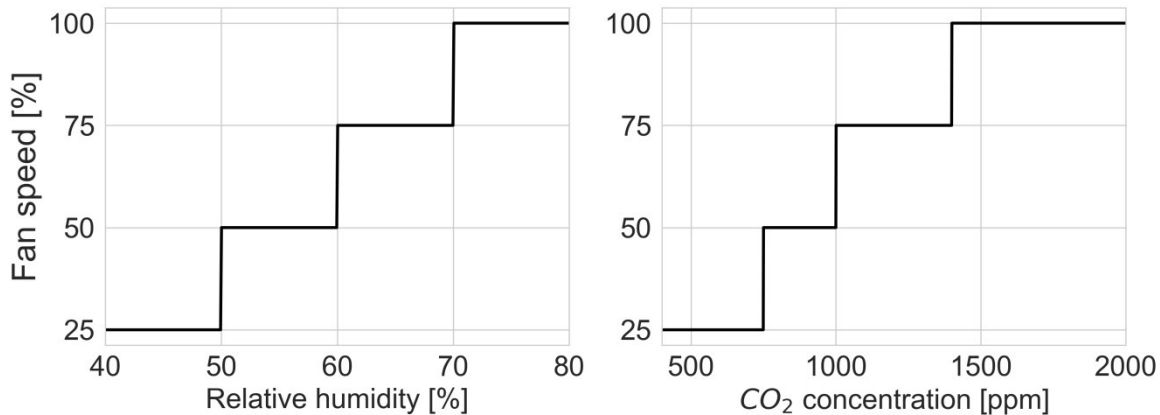


Abbildung 5 – Stufenweise Regelung für Wohnungslüftungsanlagen

Zusammenfassend lassen sich aufgrund der Recherche marktüblicher Regelungsstrategien zwei Hauptlücken identifizieren [47]:

- Die verfügbaren intelligenten DCV-basierten Regelung behandeln jeweils nur eine Variable.
- Nutzerorientierte Lösungen sind in zwei Formen vertreten: In Form von 'Demand Response' als Reaktion auf eine bestimmte Last (relative Luftfeuchte oder CO<sub>2</sub>) oder als eine vorprogrammierte Strategie (wie „Party“- oder „Schlaf“-Modus). Bei der Wohnraumlüftung gibt es einen deutlichen Mangel an nutzerorientierten Lösungen.

## 3.2 Regelung ohne Nutzerrückmeldung

### 3.2.1 Kostenfunktion

Der erste Versuch, eine Lüftungsregelungsstrategie auf die Bedürfnisse der Bewohner abzustimmen, besteht darin, die Unzufriedenheit mit der relativen Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> mit der Ventilatorleistung der Anlage zu verknüpfen. Im Abschnitt 2.3.2 wurde gezeigt, dass die gesundheitlichen Folgen von extremen Werten der relativen Luftfeuchtigkeit signifikant sind und dass das Risiko im Bereich von Werten zwischen 40 und 60% minimiert wird. Die Norm DIN EN 16798-1 [7] gibt (gemäß den Komfortkategorien) einzuhaltende Werte für beide Größen in Bezug auf Lüftungsanlagen vor. Für die relative Luftfeuchtigkeit definiert die Norm Idealwerte zwischen 30 und 50%, wobei die Spitzenwerte unter 20% und über 70% liegen. Diese Vorgabe wird mit einer quadratischen Funktion angenähert. Hinsichtlich CO<sub>2</sub> nehmen die Akzeptanzwerte bei höheren Konzentrationen ab und lassen sich mit einer Logarithmusfunktion darstellen. Diese Approximation stimmt auch gut mit der CO<sub>2</sub>-Unzufriedenheit bei Jokl überein [24], siehe Abbildung 6.

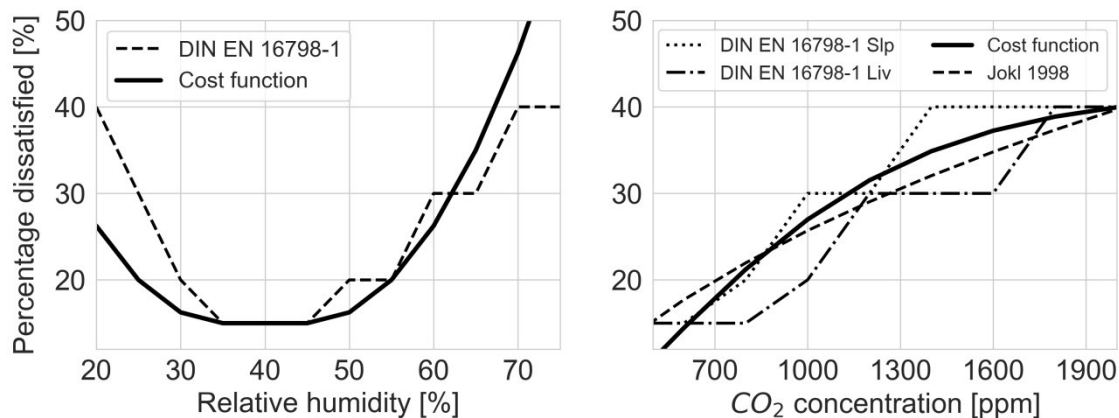


Abbildung 6 – Prozentsatz der Unzufriedenheit (PD) – Funktionen für die relative Feuchte (links) und CO<sub>2</sub>-Konzentration (rechts). Vergleich der vorgeschlagenen Kostenfunktion mit Modellen aus der Literatur und Normen.

Diese Unzufriedenheitsfunktionen werden in ein DCV-Schema umgewandelt. Die folgenden Gleichungen definieren die vorgeschlagene Bewertung und Abbildung 6 vergleicht den Stand der Technik mit den neuen Funktionen. In diesen Gleichungen wird RF in % und CO<sub>2</sub> in ppm verwendet. Die Koeffizienten sind so gewählt, dass die Unzufriedenheitskurven die gleiche Form haben wie in Abbildung 6.

$$D_{RH}(RH) = 0.05 \max(0; (\text{abs}(RF - 40) - 5)^2)$$

$$D_{CO_2}(CO_2) = -24 + \frac{66}{1 + \exp\left(1 - \frac{CO_2}{450}\right)}$$

$$D(RF, CO_2) = \max(D_{RH}(RF), D_{CO_2}(CO_2))$$

Diese Näherungen werden in ein bedarfsgeregeltes Lüftungsschema integriert. Die Regelstrategie in jedem Raum wird von der Variablen mit der höchsten Unzufriedenheit angeführt. Wenn z. B. die Unzufriedenheit aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit höher ist als aufgrund der CO<sub>2</sub>-Konzentration, wird die DCV über RF geregelt und umgekehrt. Dieser Regler wird als Kostenfunktionsstrategie (*Costfun* in den folgenden Abbildungen) bezeichnet, da die Lüfterdrehzahl nach den höchsten Unzufriedenheitskosten berechnet wird. Abbildung 7 zeigt einen Vergleich dieser Strategie mit der zuvor definierten Referenzstufenfunktion. Weitere Eigenschaften dieses Reglers sind:

- 100% Unzufriedenheit wird bei 20% relativer Luftfeuchtigkeit erreicht, um die Relevanz von gesundheitlichen Problemen bei trockenen Umgebungen zu verdeutlichen. Bei Erreichen dieses Wertes läuft der Ventilator mit minimaler Geschwindigkeit.
- Über 100% Unzufriedenheit wird erreicht, wenn diese Grenzwerte überschritten werden. Dies wurde speziell entwickelt, um zu verdeutlichen, wie wichtig es ist, die relative Luftfeuchtigkeit zu kontrollieren, wenn sie außerhalb der zulässigen Grenzwerte liegt, wodurch die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Hintergrund tritt.
- 0% Unzufriedenheit wird registriert, wenn der CO<sub>2</sub>-Wert unter 750 ppm liegt.

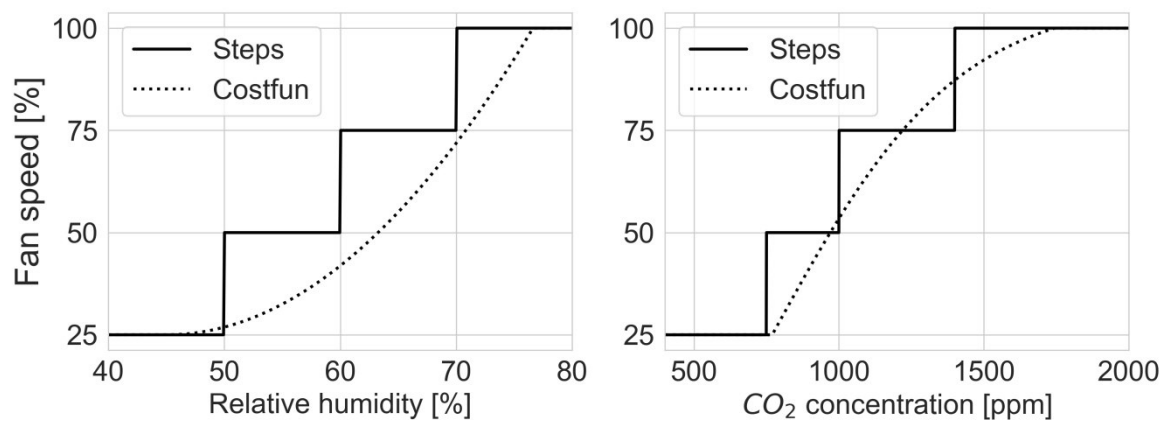


Abbildung 7 – Kostenfunktion DCV-Strategien für RH (links) und CO<sub>2</sub> (rechts)

### 3.2.2 Fuzzy-basierte Regelung

Eine weitere Möglichkeit ist die Regelung der Lüfterdrehzahl durch Kombination der Werte von relativer Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> in einer einzigen Strategie. Fuzzylogik ist ein Ansatz zur Eingangsverarbeitung, die es ermöglicht, mehrere Variablen gleichzeitig zu verarbeiten und eine einzige Ausgangsvariable zu erzeugen. Regler, die auf Fuzzylogik basieren, erscheinen als geeignete Lösung, wenn das System aufgrund der Modellierungskomplexität nicht einfach mit klassischen Regelungsmethoden modelliert oder geregelt werden kann. Es wird daher ein Fuzzy-Ansatz vorgeschlagen.

Einige Studien haben bereits Fuzzy-Regler in der Gebäudetechnik implementiert. Kolokotsa et al. [48] entwarfen ein multivariablen Fuzzy-System zur gleichzeitigen Optimierung des thermischen und visuellen Komforts. Molina-Solana et al. [49] steuerten ein ganzes Smart Home System mit Fuzzylogik. Jaradat et al. [50] entwickelten eine auf Fuzzylogik basierende Regelungsstrategie für Lüftungssysteme in kommerziellen Gebäuden mit mehreren Schadstoffen. Für Wohnungslüftungsgeräte wurden Fuzzy-Regler bisher jedoch noch nicht berücksichtigt.

Oberste Priorität des Reglers ist es, das Raumklima innerhalb der in Abschnitt 2 definierten akzeptablen Bereichswerte zu halten. Abbildung 8 zeigt einen Arbeitsablauf des vorgeschlagenen Controllers, bei dem die momentanen Messwerte mit den zuvor definierten Grenzwerten verglichen werden. Wenn die Messwerte außerhalb dieser Grenzwerte liegen, reagiert die Regelung und versucht, die Grenzwerte einzuhalten. Die Ausführungsbefehle sind:

- Wenn die relative Luftfeuchtigkeit > 80 % ist, läuft der Lüfter mit voller Drehzahl
- Wenn die relative Luftfeuchtigkeit < 20% ist, läuft der Lüfter mit minimaler Drehzahl
- Wenn CO<sub>2</sub> > 1800 ppm und die relative Luftfeuchtigkeit > 25%, dann läuft der Lüfter mit voller Drehzahl

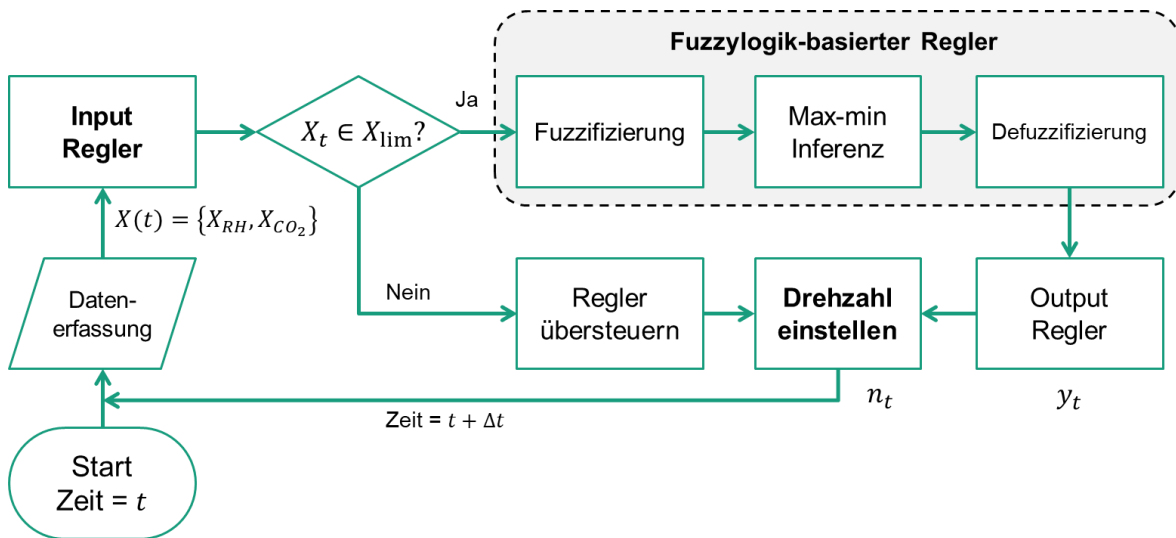


Abbildung 8 – Ablaufschema des Fuzzy-Reglers

Wenn die Werte innerhalb dieser Grenzen liegen, wird der Fuzzy-Regler ausgelöst. Denn obwohl es empfohlene Werte für die Akzeptanz der Raumklima-Variablen gibt, ist das Wohlbefinden des Bewohners subjektiv und individuell. Die zu regelnden Größen haben also einen unscharfen Charakter. Der Vorschlag eines Fuzzy-Reglers zielt darauf ab, eher eine mathematische Formulierung des Problems als eine eindeutige optimale Lösung zu liefern. Zugehörigkeitsfunktionen für jede Variable werden verwendet, um den Grad der Assoziation einer bestimmten Variable mit einem zuvor definierten linguistischen Begriff zu bestimmen (z. B. „warm“ oder „kalt“, wenn es um die Darstellung der thermischen Empfindung geht). Fuzzy-Inferenz-Regeln sind notwendig, um eine Beziehung zwischen den verschiedenen Zugehörigkeiten herzustellen. Diese und die entsprechenden Fuzzy-Regeln werden durch Expertenwissen über das dynamische Verhalten des Systems definiert. Die linguistischen Terme jeder Eingangsgröße (relative Feuchte oder CO<sub>2</sub>) werden über Fuzzy-Regeln mit der Regelgröße (Lüfterdrehzahl) verknüpft. Die gemessenen Eingangsgrößen (in diesem Fall relative Feuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentration) werden normiert (z.B. CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen 400 und 1800 ppm) und über die zuvor entwickelten Zugehörigkeitsfunktionen fuzzifiziert. Die Kreuzungspunkte der Zugehörigkeitsfunktionen werden ausgewählt:

- Relative Luftfeuchtigkeit: 30 und 70%
- CO<sub>2</sub>: 825 und 1250 ppm
- Lüfterdrehzahl: 33 und 67%

Jeder Bereich wird mit drei sprachlichen Bezeichnungen beschrieben: "zu niedrig", "akzeptabel" und "zu hoch" für die relative Feuchte, und "ausgezeichnet", "akzeptabel" oder "schlecht" für die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Das Fuzzifizierungsverfahren berechnet folglich den Zugehörigkeitsgrad (Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Kategorie für jede Eingangsmessung) unter Verwendung einer Sigmoidfunktion. Eine Sigmoidform ermöglicht ein glatteres Fuzzy-Regelungsfeld als die Verwendung scharfkantiger Formen, wie z. B. Trapeze. Die Lüfterzugehörigkeitsfunktion, die zur Berechnung der Lüfterdrehzahl erforderlich ist, ist trapezförmig und teilt den gesamten normierten Lüfterdrehzahlbereich in drei gleiche Teile (niedrig, mittel und hoch). Abbildung 9 stellt die drei Zugehörigkeitsfunktionen des Reglers dar.

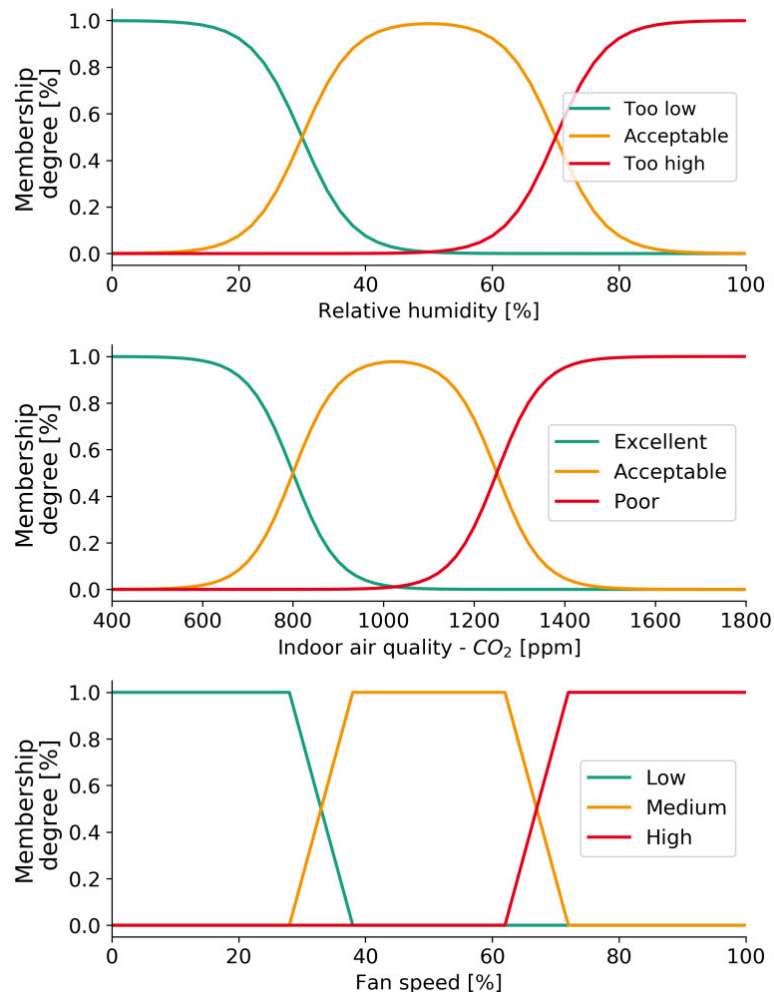


Abbildung 9 – Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Reglers. Die relative Luftfeuchtigkeit (RF) und CO<sub>2</sub> sind die Eingangsvariablen und die Lüfterdrehzahl die Ausgangsvariable.

Die unscharfen Eingaben werden auf der Grundlage eines Satzes von Regeln interpretiert, aus denen die Fuzzy-Inferenzmaschine besteht. Wie bereits erläutert, zielen Fuzzy-Regeln darauf ab, die Beziehung zwischen den fuzzifizierten linguistischen Begriffen der Eingangs- und Ausgangsvariablen zu beschreiben. Im Rahmen des Projektes wurde ein auf Expertenwissen basierendes Regelsystem implementiert, das in der Tabelle 5 zusammengefasst ist. Da es die erste Aufgabe des Reglers ist, die relative Feuchte innerhalb der gesundheitlich relevanten Grenzen einzuhalten, wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration vernachlässigt, wenn die relative Feuchte nicht in ihrem zulässigen Bereich liegt. Die Mindestanzahl der Regeln ist die Anzahl der linguistischen Begriffe, die zur Definition der Ausgangsvariablen verwendet werden. Der Detaillierungsgrad dieser Regeln hängt von der Anzahl der Kategorien ab, die zur Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsvariablen verwendet werden.

Tabelle 5 – Fuzzy-Regeln für jede Eingangsvariable (FS = Lüfterdrehzahl)

Wenn RF zu niedrig ist oder (OR) (RF akzeptabel und (AND) CO <sub>2</sub> ausgezeichnet sind) dann ist FS niedrig
Wenn RF akzeptabel ist und (AND) CO <sub>2</sub> akzeptabel ist dann ist FS mittel
Wenn RF zu hoch ist oder (OR) (RF akzeptabel und (AND) CO <sub>2</sub> schlecht sind) dann ist FS hoch

Außerdem interpretiert die Inferenzmaschine die Zugehörigkeiten der Eingänge ( $\alpha_{var,i}$ ) für jede Regel ( $\mu_R$ ) und berechnet die Zugehörigkeit jeder Ausgangsvariable (Lüfterdrehzahl). In diesem Fall ist die verwendete Inferenzmaschine die Mamdani-max-min-Methode [51]. Der AND-Operator wird mit dem Minimum und der OR-Operator mit dem Maximum dargestellt. Der Fuzzy-Ausgang jeder Regel ( $\mu_{O,R}$ ) und die endgültige Aggregation werden berechnet. Sobald der Ausgabegrad für die drei Lüfterdrehzahl-Kategorien erhalten wurde, wird die normalisierte Lüfterdrehzahl ( $y_o$ ) mit Hilfe der Centroid-Defuzzifizierungsmethode (Flächenintegration) berechnet. Abbildung 10 stellt den Arbeitsablauf des Reglers mit beispielhaften Ein- und Ausgängen dar. Das Ergebnis des gesamten Verfahrens lässt sich in einem 3D-Regelfeld (Abbildung 11) zusammenfassen. Dieses Feld kann im Prinzip vordefiniert werden, was den Fuzzy-Regler zu einer weiteren Variante eines DCV-Schemas macht und seine Robustheit und Zuverlässigkeit hervorhebt.

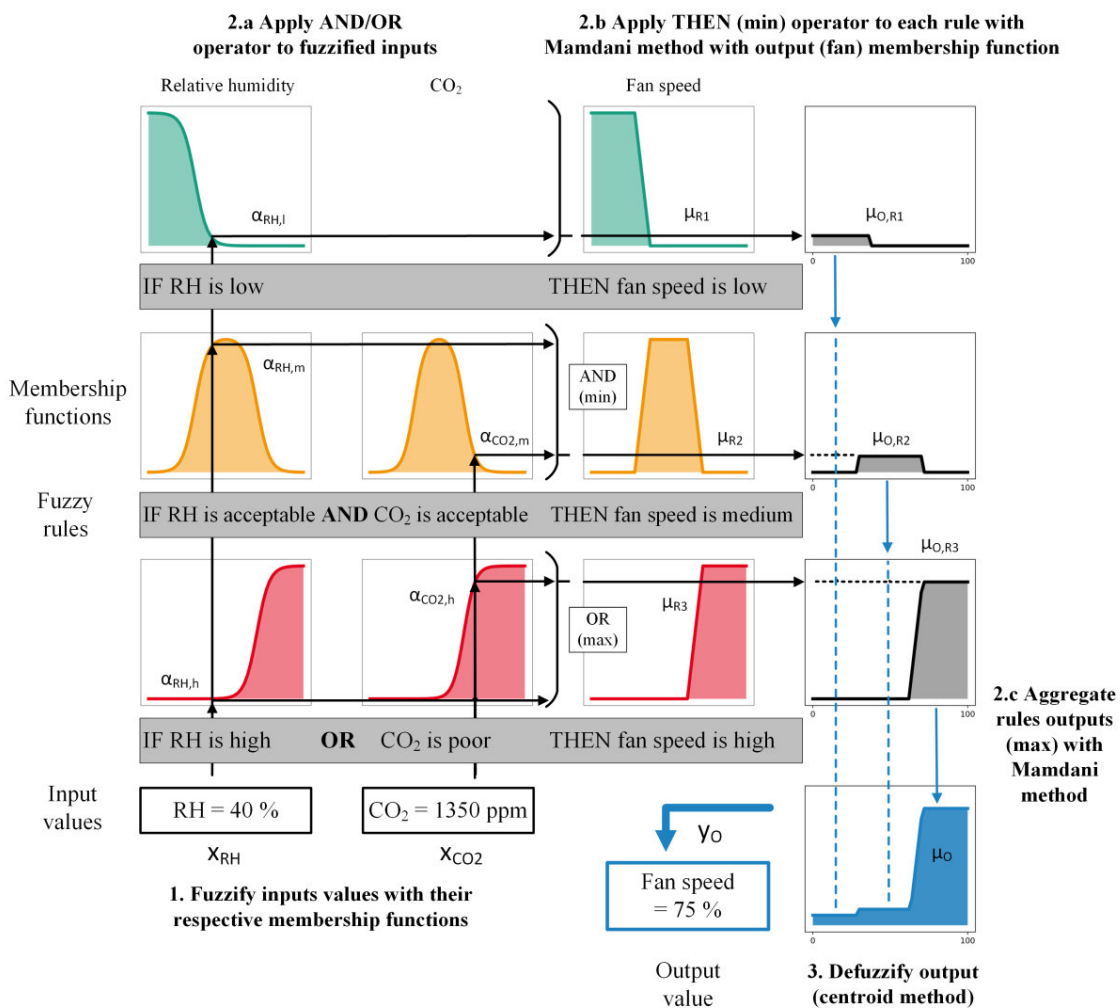


Abbildung 10 – Beispiel des Ablaufs einer Fuzzylogik

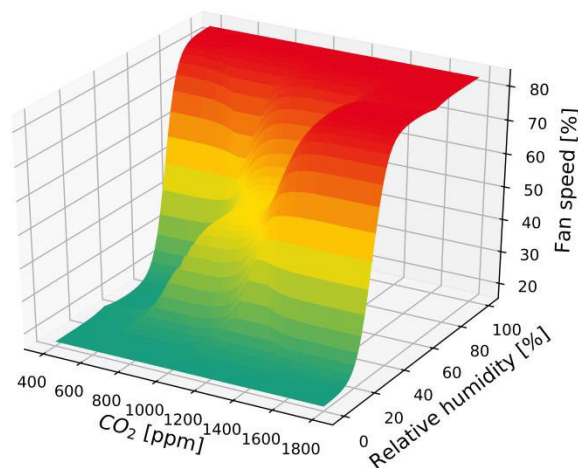


Abbildung 11 – Resultierendes 3D-Regelungsfeld des Lüfters

Fuzzy-basierte Systeme sind keine neue Technologie und sie haben sich in anderen Bereichen bereits weitgehend als Regler bewährt [52]. Daher ist die Implementierung des vorgeschlagenen Fuzzy-Reglers in einem realen Gebäude technisch machbar und sollte in zukünftigen Arbeiten behandelt werden.

### 3.3 Regelung mit Nutzerrückmeldung – Die selbstlernende Regelung

In diesem Abschnitt wird eine selbstlernende Regelungsstrategie für Wohnungslüftungssysteme vorgestellt. Diese Strategie basiert auf einem DCV-Schema, das sich an die Bedürfnisse eines Bewohners anpassen kann. Die Regelung verwendet ein Komfortprofil und einen überwachten Lernalgorithmus, um die Nutzerrückmeldung unter Berücksichtigung der Innenraumbedingungen vorherzusagen.

Lernende Systeme im Gebäudebereich haben in den letzten zehn Jahren in der wissenschaftlichen Welt stark an Popularität gewonnen. Das primäre Optimierungsziel war dabei der Heizenergieverbrauch. So ließen Kastner et al. [53] einen Belegungsplan für Bürogebäude erlernen und nutzten ihn zur Optimierung des Heizenergieverbrauchs mit einem künstlichen neuronalen Netz. Daum et al. [54] definierten eine neue Methode zur Darstellung der thermischen Nutzerpräferenz unter Verwendung von Kurven, die auf logistischer Regression basieren. Sie kamen zu dem Schluss, dass die thermische Präferenz innerhalb von 40 bis 60 Nutzerrückmeldungsstimmen erfolgreich erlernt werden konnte. Gunay et al. [55] entwickelten ein Lernschema, um den Temperatursollwert eines Heizungssystems zu optimieren. Kommerzielle Systeme, die die thermische Nutzerpräferenz lernen und den Heizungssollwert optimieren, sind bereits verfügbar.

Auch andere Gebäudesysteme wurden bereits untersucht und mit lernenden Algorithmen geregelt. Zum Beispiel erstellten Park et al. [56] eine Beleuchtungsregelung mit einem Schema, das aus dem Verhalten von Benutzern bzgl. Licht lernt. Vazquez Canteli et al. [57] verwendeten einen Lernalgorithmus zur Anpassung des Demand-Response-Verhaltens bzgl. des Stromverbrauchs in Wohngebäuden, um die Energiekosten zu senken. Schließlich ließen Ghahramani et al. [58] die Interaktionen von Nutzern mit ihrem Arbeitsbereich (z. B. allein oder mit anderen Personen) mithilfe einer Kombination aus personalisierten und Umgebungssensoren erlernen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts war keine Publikation bekannt, die sich mit der Anwendung von selbstlernenden Systemen in Wohnungslüftungssystemen beschäftigt. In den nächsten Abschnitten wird diese innovative Regelungsstrategie ausführlich beschrieben. Um die Entwicklung zu unterstützen und später die Fähigkeiten des Systems zu testen, muss ein Nutzerrückmeldungsmodell entwickelt werden, das im nächsten Abschnitt behandelt wird.

### 3.3.1 Simulation der Nutzerrückmeldung

Zunächst wird ein neuartiges Nutzerinteraktionsmodell für mechanische Lüftungssysteme in Wohngebäuden entwickelt. Studien über den Betrieb von mechanischen Lüftungsanlagen sind in der Literatur nicht weit verbreitet. Dieses Modell zielt darauf ab, die Reaktion des Nutzers auf verschiedene Unbehaglichkeitssituationen zu simulieren, insbesondere um die Leistung von nutzerorientierten Regelungsstrategien zu testen.

Es wird ein Modell der Nutzerinteraktion mit der mechanischen Lüftung vorgeschlagen, das die Reaktion des Nutzers auf die Qualität der Innenraumumgebung so realistisch wie möglich darstellt. Das entwickelte Modell sollte dabei die Stochastizität des Nutzerverhaltens berücksichtigen. In der Literatur haben Ren et al. [39] zehn Wohnungen in den Niederlanden zwei Jahre lang untersucht und aus der Ventilatorleistung auf die Wahl der Lüftungsstufe geschlossen. Sie wendeten eine explorative Analyse unter Verwendung von Clustering-Techniken an, um die Haupttreiber zu verstehen, die die Bewohner motivieren, mechanische Lüftungssysteme zu betreiben. Die Ergebnisse zeigten, dass es vier Hauptgruppen für diese Treiber gibt: zeitbezogene Operationen, innenraumbezogene, innen- und außenraumbezogene sowie gemischte Faktoren.

Die Hauptannahme bei diesem Modell ist, dass der Nutzer nur unter unangenehmen Bedingungen reagiert. Das Modell vernachlässigt zeitgetriebene Faktoren. Außerdem ist dieses Modell für die Gebäudesimulation unter winterlichen Bedingungen entwickelt worden, enthält aber keine wetterabhängigen Variablen als Eingabe.

Anstatt ein verallgemeinertes, validiertes Nutzerverhaltensmodell bereitzustellen, soll mit diesem Modell ein Werkzeug zur Simulation der Stochastizität des Nutzers bezüglich der manuellen Bedienung von Lüftungsanlagen geschaffen werden, wobei der Schwerpunkt auf der Anwendbarkeit in der Gebäudesimulation liegt.

#### 3.3.1.1 Künstliche Nutzerkomfortprofile

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, sind die Hauptvariablen zur Regelung mechanischer Lüftungssysteme unter winterlichen Bedingungen die relative Raumluftfeuchte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Der erste Schritt der Modellentwicklung besteht darin, künstliche Komfortprofile zu erstellen, die mit diesen Variablen in Beziehung stehen. Tabelle 6 zeigt einen Vorschlag für vier Komfortprofile, inspiriert von den in Abschnitt 2 beschriebenen Ergebnissen. Die Profile folgen einer normalen Wahrscheinlichkeitsverteilung für die relative Feuchte und einer invertierten kumulativen Normalverteilung für den CO<sub>2</sub>-Wert.

*Tabelle 6 – Definition der künstlichen Nutzerkomfortprofile. Mittelwert ( $\mu$ ) und Standardabweichung ( $\sigma$ ) charakterisieren die Wahrscheinlichkeitsverteilung für jeden Nutzertyp.*

Nutzertyp	$\mu_{RF}$	$\sigma_{RF}$	$\mu_{CO_2}$	$\sigma_{CO_2}$
Norm	45	12	1300	25
Mehr Luft	60	8	1600	100
Weniger Luft	30	8	1000	1000
Unachtsam	45	35	1000	2000

Das „Norm“-Profil folgt den Behaglichkeitsprofilen, die hauptsächlich in der Norm DIN EN 16798-1 [7] vorgeschlagen werden. Die Profile „mehr Luft“ und „weniger Luft“ sind Abweichungen vom Normprofil innerhalb der gewünschten Grenzen (relative Feuchtwerte unter 25% und über 75% führen zu ungesunden Verläufen). Das Profil „unachtsam“ wird mit Bewohnern assoziiert, die kein klares Verhalten zeigen und sich meist in komfortablen Bedingungen befinden. Abbildung 12 zeigt diese Profile und die zugehörigen Komfortwahrscheinlichkeiten.

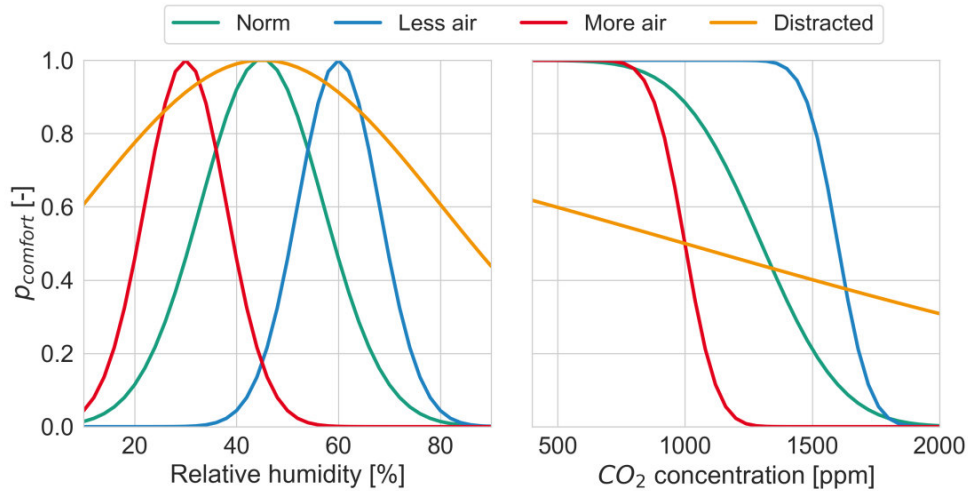


Abbildung 12 – Relative Feuchte und CO<sub>2</sub> künstliche Komfortprofile unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Tabelle 6

### 3.3.1.2 Algorithmus für die Nutzerinteraktion

Um das Nutzerinteraktionsmodell für mechanische Lüftung zu vervollständigen, müssen die Komfortwahrscheinlichkeiten mit den Wahrscheinlichkeiten der Interaktionshäufigkeit kombiniert werden. Dadurch wird das stochastische Verhalten des Nutzers in die Behaglichkeitsmodelle einbezogen. Die Interaktionswahrscheinlichkeiten werden aus den von Ren et al. [39] berichteten Werten definiert. Es werden drei Profile modelliert, die dem Schema von Yun et al. [59] folgen. Die Wahrscheinlichkeit einer Interaktion mit dem mechanischen Lüftungssystem wird berechnet, indem die gesamten Interaktionen, die in den vorliegenden Tagen erfasst wurden, verteilt werden (unter der Annahme von 35 Tagen Abwesenheit). Tabelle 7 fasst diese Werte zusammen.

Tabelle 7 – Gemessene Interaktionshäufigkeiten mit mechanischer Lüftung [39]

Interaktionshäufigkeit	Gesamte Rückmeldungen	Tägliche Rückmeldungen	10-min. Rückmeldungen
Passiv	30	0.0455	3.1566E-4
Mittel	200	0.3030	2.1043-3
Activ	1150	1.7424	1.2100E-2

Die Nutzerrückmeldung wird in Stimmen gesammelt, die positiv sind, wenn der Bewohner eine höhere Luftaustauschrate wünscht, und negativ, wenn der Bewohner eine niedrigere bevorzugt. Es werden fünf mögliche Ausgänge modelliert, wobei die Nutzerpräferenz mit einer Zahl verknüpft wird:

- „-2“: Der Nutzer wünscht einen deutlich geringeren Luftaustausch
- „-1“: Der Nutzer wünscht einen geringeren Luftaustausch
- „0“: Der Nutzer fühlt sich behaglich und er gibt keine Rückmeldung
- „+1“: Der Nutzer wünscht einen höheren Luftaustausch
- „+2“: Der Nutzer wünscht einen deutlich höheren Luftaustausch

Wenn ein Nutzer z. B. mit „-2“ abstimmt, wird angenommen, dass er eine Einstellung von zwei Lüftungsstufen niedriger wünscht, da der Luftvolumenstrom für ihn in dem Moment, in dem die Stimme abgegeben wird, zu hoch ist. Die Rückmeldung „0“ wird für das Verständnis mit einbezogen, aber nicht in die Regelungsstrategie aufgenommen, da die Hauptannahme ist, dass der Bewohner reagiert, wenn ein bestimmter Grad an Unbehagen auftritt.

Daraus wurde ein probabilistischer Ansatz entwickelt, der die Interaktionshäufigkeiten mit Zufallszahlen vergleicht, um die Interaktion in jedem Zeitschritt zu simulieren. Abbildung 13 zeigt die Struktur des Modells. Bei multivariablen Unbehagen wird für jede Variable eine einzelne Stimme gezogen, und dann wird eine Zufallszahl gezogen, um zu berücksichtigen, welche Stimme überwiegt (wobei jeder Stimme eine gleiche Wahrscheinlichkeit zugewiesen wird). Es wird ein Grenzwert von zwei

Standardabweichungen über dem Mittelwert gewählt, da 95% der Werte bei einer Normalverteilung innerhalb von zwei Standardabweichungen liegen.

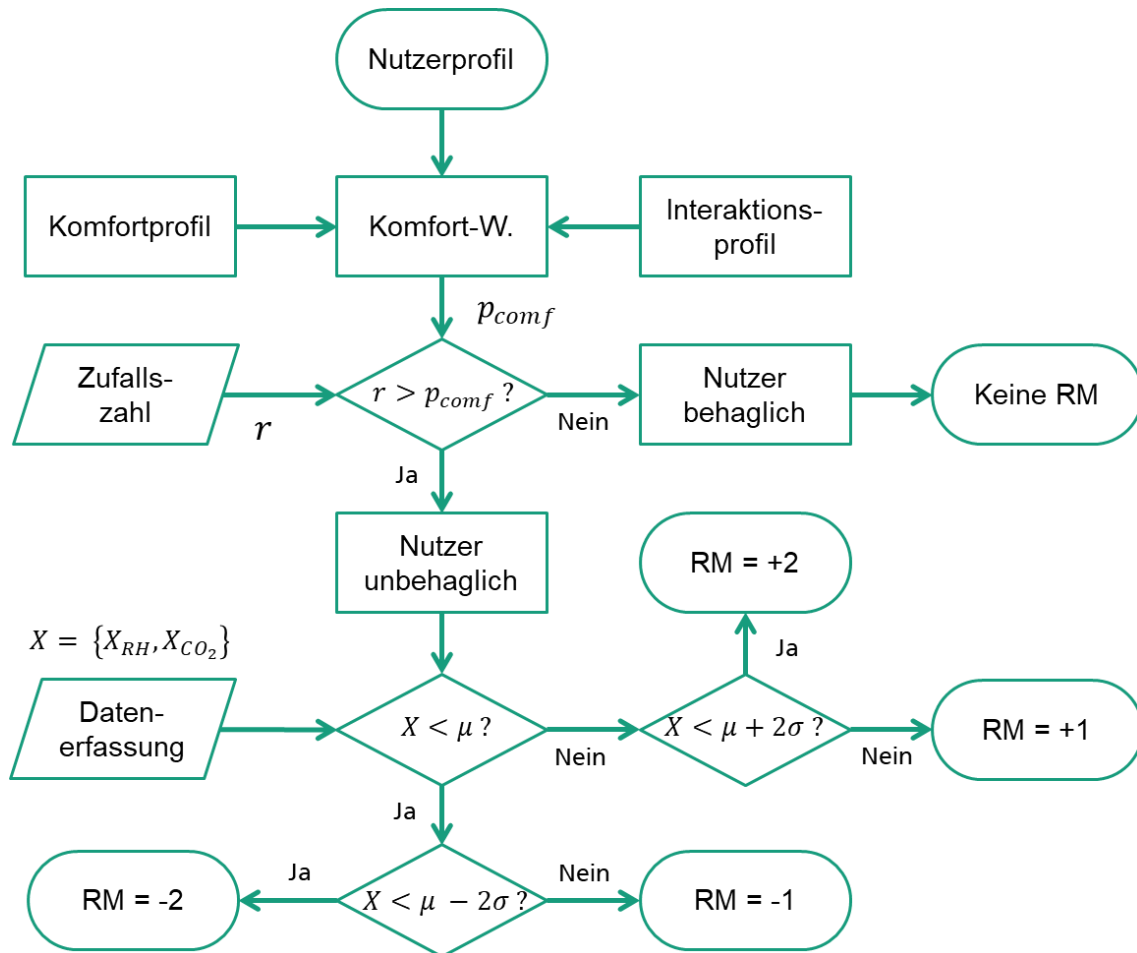


Abbildung 13 – Flussdiagramm des vorgeschlagenen Modells zur Simulation der Interaktion zwischen Nutzer und mechanischem Lüftungssystem. Komfort-W. = Komfortwahrscheinlichkeit. RM = Rückmeldung.

### 3.3.2 Standardprofil

Das Standard-Komfortprofil für das Regelungssystem wurde in Anlehnung an das Norm-Komfortprofil des Nutzerverhaltensmodells erstellt. Dieses Profil zielt darauf ab, ein durchschnittliches Komfortprofil sowohl für die relative Luftfeuchtigkeit als auch für CO<sub>2</sub> darzustellen. Gleichzeitig soll die Flexibilität bewahrt werden, sich an neu eingehende Datenpunkte aus den Nutzerstimmen (Rückmeldungen) anzupassen.

Zwölf Stimmen für jede Variable wurden beliebig definiert, um das Standard-Komfortprofil zu erstellen. Diese Stimmen ergeben eine Gesamtkombination von 144 künstlichen Stimmen. Diese sind in Abbildung 14 dargestellt. Dieses Profil wird als Ausgangspunkt für die selbstlernende Regelung betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Klassifizierungsalgorithmen untersucht, um die Lernfähigkeit des Reglers zu testen.

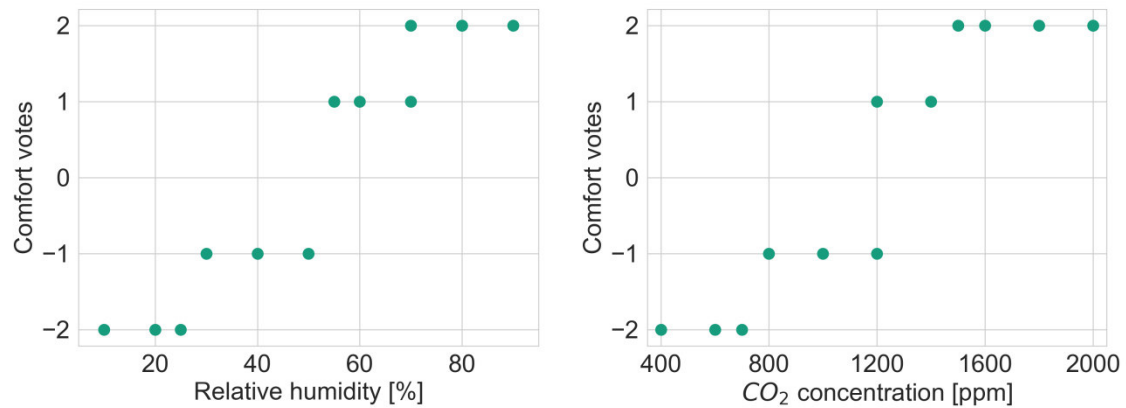


Abbildung 14 – Relative Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Nutzerstimmen für das Standard-Komfortprofil

Das resultierende Standard-Regelungsfeld ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Farben sind den Vorhersagen der Nutzerrückmeldung zugeordnet.

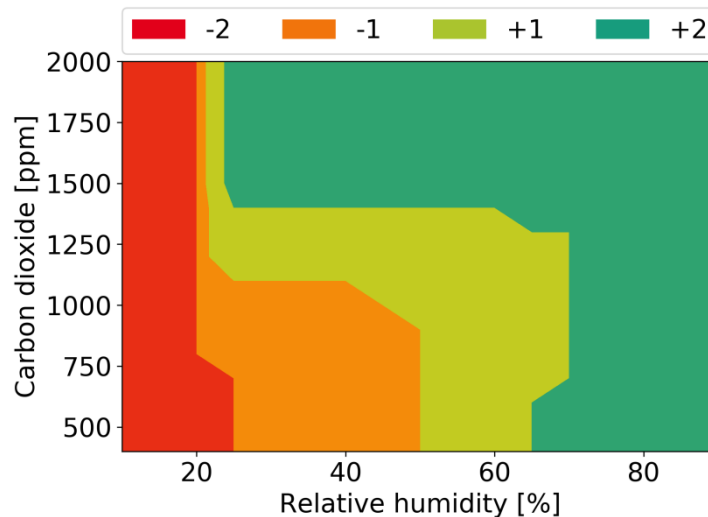


Abbildung 15 – Vorgegebenes Feld der selbstlernenden Regelung. Die farbigen Bereiche stellen die Vorhersage der Nutzerrückmeldung dar.

### 3.3.3 Auswahl des Algorithmus

Ein wichtiger Schritt für ein erfolgreich lernendes DCV ist die Auswahl des Algorithmus. Mit Hilfe von maschinellem Lernen können die Nutzerpräferenzen erfolgreich erfasst und daraus eine geeignete Lösung bereitgestellt werden, um einen besseren Komfort zu erreichen, die Akzeptanz zu erhöhen und die Energieeffizienzziele zu erfüllen.

In diesem Abschnitt werden sechs populäre Klassifizierungsalgorithmen ausgewählt und verglichen. Es wird die Performance in Bezug auf die Rechenressourcen und die Fähigkeit, die gewünschten Profile zu lernen, getestet. Der beste Algorithmus wird dann ausgewählt und im lernenden DCV-Schema angewendet. Die vorgewählten Algorithmen sind

- Logistische Regression (LogR)
- Support vector machines mit radial basis function kernel (SVM)
- Gaussian naive Bayes (NB)
- Gaussian process Klassifikator mit Matérn kernel (GPC)
- Entscheidungsbäume (DT)
- Random forests (RFo)

Der Vergleich wurde mit Hilfe des Python-Pakets scikit-learn [60] durchgeführt. Der erste Ansatz war, das Standard-Komfortprofil zu erlernen und die resultierenden Vorhersagen nach dem Lernen zu beobachten. In dieser Anwendung ist die resultierende Form der vorhergesagten Klassen entscheidend, da sie die Grenzwerte des Regelungsfeldes bestimmt. Die Performance-Indikatoren sind *Accuracy* (ACC), *Precision* (PRC) und *Recall* (REC), die in der Literatur für die Bewertung von Lernalgorithmen empfohlen werden [58]. *Accuracy* bewertet den allgemeinen Grad der Übereinstimmung der Vorhersagen mit den tatsächlichen Labels. Bei der Abstimmung und Auswahl von Algorithmen im Kontext des Nutzerverhaltens ist es jedoch das Ziel, die *Precision* zu maximieren und gleichzeitig den *Recall* in einem akzeptablen Bereich zu halten. Tabelle 8 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 8 – Auswahl des Algorithmus: Vergleich der Indikatoren für jeden Klassifizierungsalgorithmus

	ACC	PRC	REC
LogR	0.7783	0.7701	0.7525
SVM	0.9022	0.9011	0.8875
NB	0.7918	0.8138	0.8150
GPC	0.8694	0.8832	0.8825
DT	0.9000	0.8985	0.8825
RFo	0.8856	0.8945	0.8875

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Support Vector Machines (SVM) im Vergleich zu den anderen fünf Algorithmen die beste Leistung zeigen. Der Unterschied in den Werten zwischen SVM und anderen Klassifizierungsalgorithmen ist jedoch marginal. Die logistische Regression und der Naive Bayes-Klassifikator scheiden aufgrund ihrer schlechten Leistung aus. Es wurde ein zweiter Vergleich durchgeführt. Daum et al. [54] schlagen vor, die Überlappungsfläche als Lernindikator zu verwenden, wobei dieser Indikator nur für eine Lernvariable gilt. Dieser Indikator wird Lernrate (LR) genannt und wird durch die nächsten Gleichungen definiert. Ein Wert von eins zeigt ein perfektes Lernen des Komfortprofils an. Der Durchschnitt der Lernrate wird berechnet, um beide Variablen zu kombinieren. Vor Eintritt in das Berechnungsverfahren werden die gelernten Profile umskaliert, so dass die maximale Komfortwahrscheinlichkeit immer eins ist.

$$LR(X) = 1 - \int |p_{comf,user}(X) - p_{comf,learn}(X)| dX$$

$$LR = \frac{\sum LR(X_i)}{n}$$

Es wurde eine Simulation mit den vier künstlichen Nutzerkomfortprofilen für die relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> durchgeführt. Das Ziel war es, die Lernrate für die vier vorausgewählten Algorithmen zu berechnen und sie zu vergleichen. Die Simulation wurde bis zur 150. Abstimmung durchgeführt, da dies als sinnvolle Grenze für ein stabilisiertes gelerntes Profil angenommen wurde [54]. Tabelle 9 zeigt die Werte der Lernrate für die Nutzerkomfortprofile (die relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>) sowie den Zeitverbrauch des Algorithmus.

Tabelle 9 – Auswahl des Algorithmus: Kombinierte Lernratenergebnisse für jeden getesteten Klassifizierungsalgorithmus des selbstlernenden DCV-Reglers

	Norm	Less air	More air	Distracted	Zeit (s)
SVM	0.8499	0.7334	0.7530	0.7374	9.95
RFo	0.8472	0.6119	0.6436	0.6024	3.92
DT	0.6974	0.7611	0.6298	0.6003	1.70
GPC	0.7835	0.6796	0.7487	0.8153	234.45

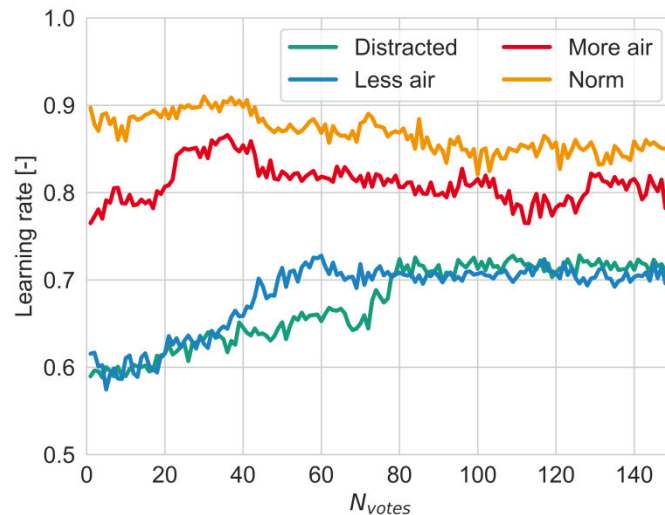


Abbildung 16 – Entwicklung der kombinierten Lernrate mit SVM

Zwei von vier Indikatoren waren am besten bei der Verwendung von SVM. Dieses Ergebnis verwirft die Verwendung von Random Forests (RFo) und Entscheidungsbäumen (DT) als mögliche Lernalgorithmen, da ihre Lernrate deutlich niedriger ist als die der anderen beiden. Beim Vergleich der Rechenressourcen benötigten die SVM fast zehn Sekunden, um das Profil zu lernen, während das Verfahren des Gaussian Process Classifier (GPC) fast vier Minuten dauerte. Daher wurde die SVM ausgewählt, um das selbstlernende DCV-Schema zu entwickeln. Abbildung 16 zeigt die kombinierte Lernrate für diesen Algorithmus bei der Simulation der vier künstlichen Profile. Die Stabilisierung (der Punkt, an dem der Wert der Lernrate fast konstant bleibt) tritt zwischen 60 und 80 Nutzerstimmen auf. Dieses Ergebnis stimmt mit den Ergebnissen von Daum et al. [54] überein. Eine ausführliche Erläuterung der Mathematik hinter dem SVM-Algorithmus ist in [61] verfügbar.

### 3.3.4 Lernverfahren

Nach der Auswahl des Klassifizierungsalgorithmus und dem Startprofil wird der Lernprozess ausgeführt. Abbildung 17 zeigt ein Flussdiagramm des Lernschemas.

Der Algorithmus wird initialisiert und dann betreibt der Regler den Ventilator mit einem bedarfsgeregelten Lüftungsschema, das dem Regelungsfeld folgt. Das Startregelungsfeld wurde in Abbildung 15 dargestellt. Wenn der Nutzer eine Rückmeldung an die Lüftungsanlage gibt, wird diese Regelung für 20 Minuten übersteuert, und die Lüftungsstufe wird durch die Wahl des Nutzers bestimmt. Andernfalls versucht die Regelung den Nutzerkomfort gemäß den gelernten Profilen vorherzusagen und passt die Lüftungsstufen entsprechend an. Der gesamte Ablauf wird in vier Schritten beschrieben:

1. RF und  $\text{CO}_2$ -Werte erfassen
2. Das Votum des Nutzers gemäß den gelernten Komfortprofilen vorhersagen
3. Die Lüftungsstufe entsprechend dieser Abstimmung anpassen
4. Wenn der Nutzer abstimmt, die Lüftungsstufe für 20 Minuten an die gewünschte Lüfterstufe anpassen

Zusätzlich werden analog zum Fuzzy-Regler gesundheitlich relevante Grenzen vorgegeben, um zu vermeiden, dass in der Wohnung Umgebungsbedingungen auftreten, die von den Normen und der Literatur als inakzeptabel eingestuft werden:

- Wenn  $\text{RF} > 80\%$ , wird die Stimme auf +2 korrigiert und der Lüfter läuft mit voller Drehzahl
- Wenn  $\text{RF} < 20\%$ , wird die Stimme auf -2 korrigiert und der Lüfter läuft mit minimaler Drehzahl
- Wenn  $\text{CO}_2 > 1800 \text{ ppm}$  und  $\text{RF} < 25\%$ , wird die Stimme auf +2 korrigiert und der Lüfter läuft mit voller Drehzahl

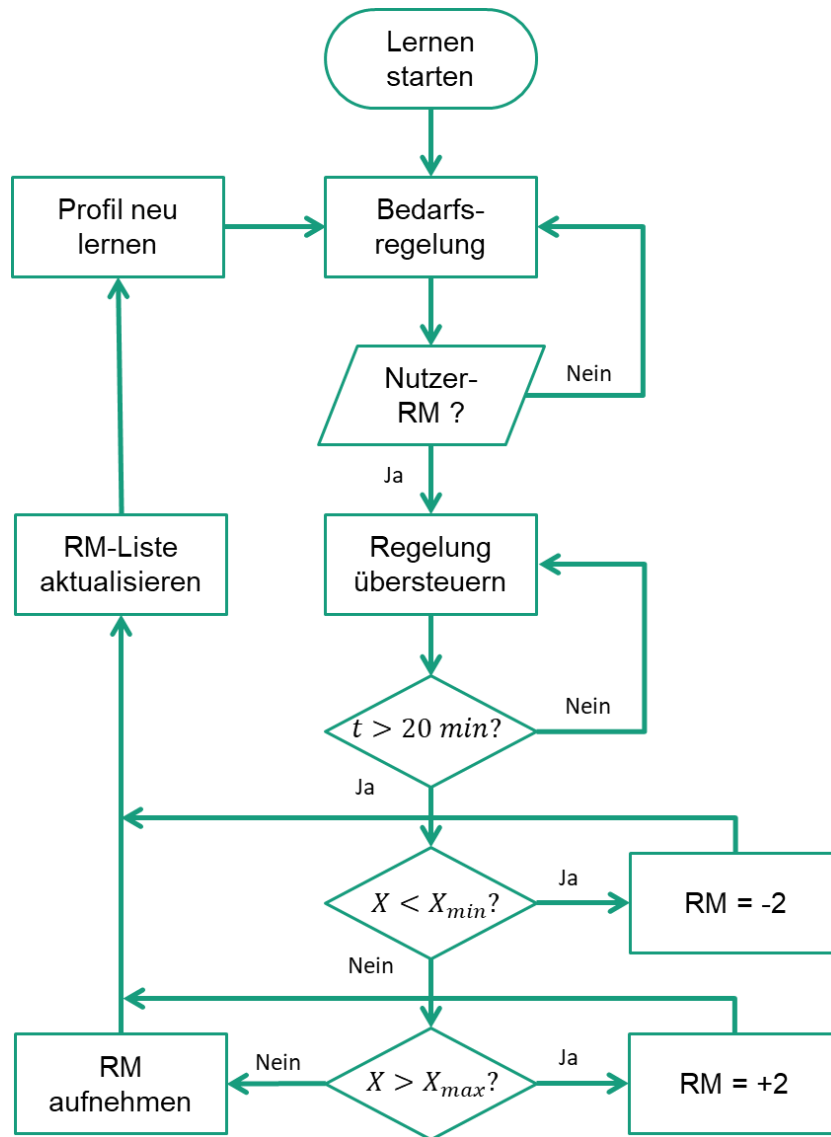


Abbildung 17 – Ablauf der selbstlernenden Regelung

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts wurde eine Rückmeldungsgrenze von 150 Stimmen festgelegt. Die Begrenzung der Anzahl der Stimmen führt dazu, dass das System langsamer auf den Lernprozess reagiert, wenn die Anzahl der Stimmen das Limit erreicht. Da die ältesten Rückmeldungen bei Erreichen des Limits gelöscht werden, wird der Lernprozess nie dazu führen, dass die Komfortzone extrem weit vom Standardprofil entfernt ist. Einerseits wird dadurch die mögliche Individualisierung der Regelung auf „extreme“ Nutzerpräferenzen reduziert. Andererseits werden dadurch mögliche Inkonsistenzen der Nutzerstimmen aufgrund ihres stochastischen Charakters und nicht gewünschte Komfortzonen (wie zu trockene Luft oder zu feuchte Luft, was zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen oder Schimmelbildung in der Wohnung fördern kann) begrenzt.

### 3.3.5 Abweichungen des Regelungsfeldes mit den künstlichen Komfortprofilen

In diesem Abschnitt werden das Lernen der künstlichen Nutzerprofile und ihre Auswirkungen auf das Regelungsfeld beschrieben. Als Beispiel wurde der Nutzertyp „weniger Luft“ gewählt, um die Entwicklung des Regelungsfeldes zu veranschaulichen. Abbildung 18 stellt den Lernprozess für diesen Nutzertyp von 10 bis 110 Stimmen dar. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, stabilisiert sich die Form des Kontrollfeldes nach 60 Abstimmungen.

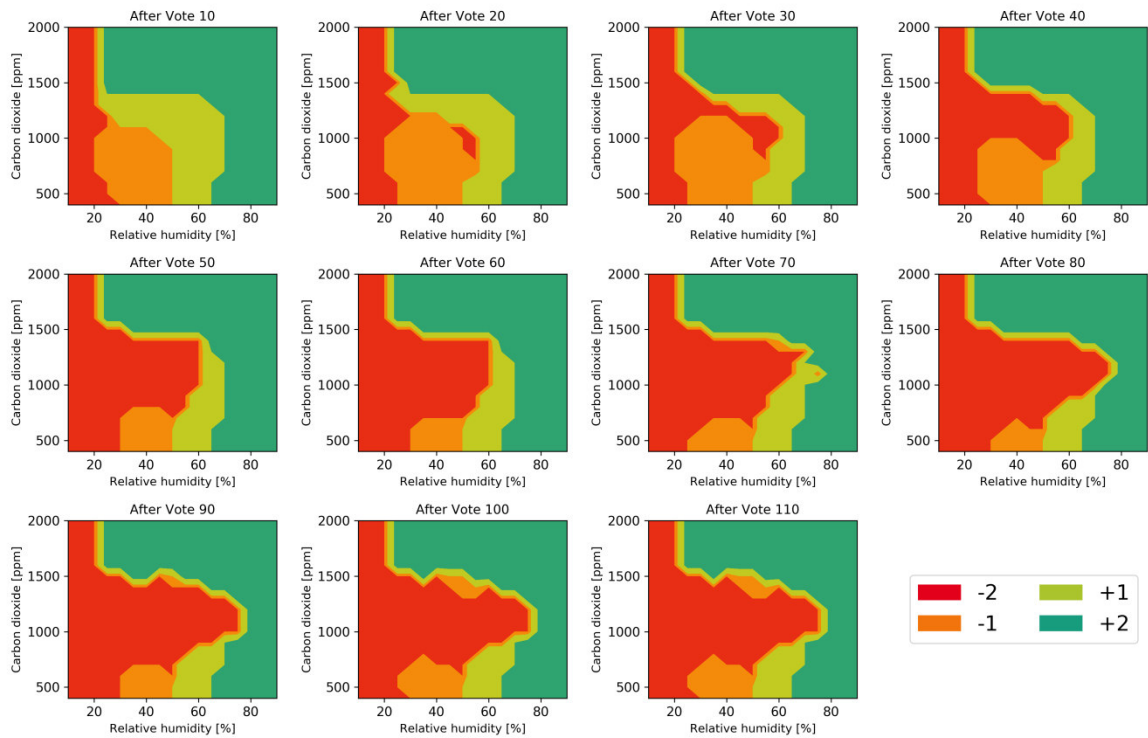


Abbildung 18 – Entwicklung des Regelungsfeldes für den Nutzertyp „weniger Luft“ nach jeweils 10 Rückmeldungen. Die farbigen Bereiche stellen die Vorhersage der Nutzerrückmeldung dar.

Die folgenden Abbildungen zeigen das verschobene Regelungsfeld nach 100 Nutzerrückmeldungen für jedes verbleibende Profil. Außerdem wird ein zusätzliches komplettes Zufallsprofil simuliert, um die Widerstandsfähigkeit des Lernens gegenüber zufälligen Nutzerprofilen zu zeigen und die Fähigkeit des Reglers hervorzuheben, die vordefinierte Form beizubehalten.

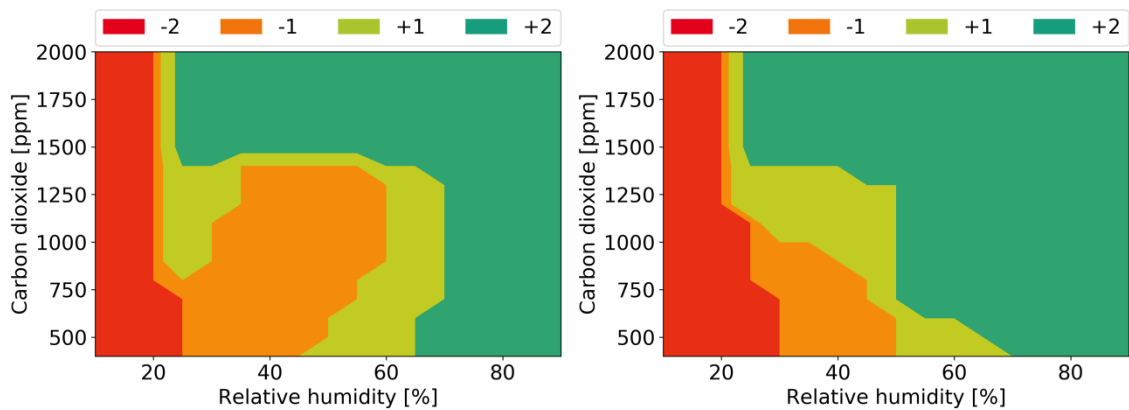


Abbildung 19 – Regelungsfeld nach 100 Rückmeldungen für den „unachtsamen“ Nutzer (links) und den „mehr Luft“- Nutzer (rechts). Die farbigen Bereiche stellen die Vorhersage der Nutzerrückmeldung dar.

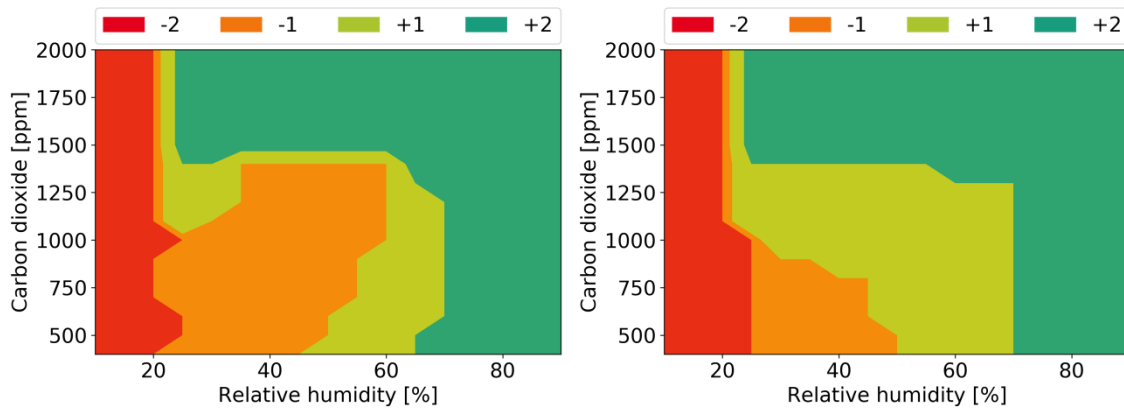


Abbildung 20 – Regelfeld nach 100 Rückmeldungen für den „Norm“-Nutzer (links) und den „zufälligen“ Nutzer (rechts). Die farbigen Bereiche stellen die Vorhersage der Nutzerrückmeldung dar.

Mit der vorgestellten Vorgehensweise wurden die Möglichkeiten eines selbstlernenden Reglers zur Erreichung der gewünschten Individualisierung der Nutzerpräferenzen und deren Umsetzung in der Gebäudetechnik (in diesem Fall dezentrale Wohnungslüftung) aufgezeigt. Weitere Simulationsstudien sind erforderlich, um die Auswirkungen dieser Individualisierung auf den Energieverbrauch, den hygrothermischen Komfort und die RLQ in Wohngebäuden zu bewerten. Darüber hinaus sollte das Fehlen eines zuverlässigen Nutzers in weiteren Forschungsarbeiten angegangen werden, um die Fähigkeiten des selbstlernenden Reglers anhand realistischer Nutzermodelle zu bewerten.

### 3.4 Zusammenfassung des Kapitels

Zur Sondierung des aktuellen Standes der Technik wurde eine Marktrecherche und eine wissenschaftliche Publikationsrecherche durchgeführt. Neben dem manuellen Betrieb basieren die fortschrittlichsten Regelungsstrategien für die Wohnungslüftung auf bedarfsgeregelten Strategien. Die relative Feuchte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration sind die primär kontrollierten Größen. Außerdem wurden zwei Hauptschwächen identifiziert: Es wird jeweils nur eine Variable geregelt und es gibt einen bestätigten Mangel an bewohnerzentrierten Strategien, bei denen deren vielfältige Entscheidungsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Daher werden drei innovative Regelungsstrategien für Wohnungslüftungssysteme vorgeschlagen.

Im Hinblick auf die verfügbaren DCV-Lösungen wurden zwei innovative vollautomatische Regler entwickelt, mit dem Ziel, nach multivariablen Reglern zu suchen, bei denen sowohl die relative Luftfeuchtigkeit als auch CO<sub>2</sub> zusammen ohne Nutzerrückmeldung berücksichtigt werden. Der erste war ein Regler mit einer Kostenfunktion, bei dem die Lüfterdrehzahl durch die Variable bestimmt wird, die die höchste Unzufriedenheit aufweist, basierend auf Kurven aus der Literatur. Der zweite war ein Fuzzy-basierter Regler. Seine Zugehörigkeitsfunktionen werden ebenfalls mit Unzufriedenheitswerten aus der Literatur definiert. Die resultierenden Zugehörigkeitsfunktionen und die Interpretationsregeln werden mit Expertenwissen bestimmt. Es wurde ein Regelfeld für die Ventilator-drehzahl vorgeschlagen, das auf momentanen Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der CO<sub>2</sub>-Konzentration basiert. Fuzzy-basierte Regler sind bereits eine bewährte Technologie und wurden in mehreren Regelungssystemen in verschiedenen Bereichen erfolgreich eingesetzt.

Um den Mangel an nutzerorientierten Lösungen zu beheben, wurde eine selbstlernende bedarfsgeregelte Lüftungsstrategie vorgeschlagen, bei der das Komfortprofil des Nutzers bezüglich relativer Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> durch einen überwachten Lernalgorithmus erlernt wird. Standard-Komfortprofile wurden mit Hilfe der in Abschnitt 2 besprochenen Literatur definiert. Um die Nutzervielfalt für die mechanische Lüftung in der Gebäudesimulation zu testen, wurden vier verschiedene Nutzerkomfortmodelle (mit der relativen Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> als Eingangsvariablen) und drei Nutzerinteraktionsmodelle (aktiv, mittel und passiv) entwickelt. Die Profile wurden in ein probabilistisches Modell integriert, das die manuelle Wahl der Lüftungsstufe als ein zeitabhängiges Nutzerverhaltensmodell simuliert. Dieses Nutzermodell für den Betrieb von Wohnungslüftungsanlagen

wurde auf die Lernstrategie angewendet, um deren Leistungsfähigkeit und Lernfähigkeit zu charakterisieren. Das Lernen stabilisiert sich für alle Nutzertypen nach 60 Abstimmungen. Die selbstlernende Regelung bietet eine Lösung für dezentrale Wohnungslüftungssysteme, die sich an unterschiedliche Nutzerprofile anpassen können. Zur Bewertung der Auswirkungen dieses Reglers auf die Raumluftqualität und den Energieverbrauch ist eine Umsetzung dieser Lösung in der Praxis notwendig.



## 4 Umsetzung der selbstlernenden Regelung in einem Demonstrationsgebäude

### 4.1 Einleitung - Das Energy Smart Home Lab

Die neu entwickelte Regelung wurde in einem Demonstrationsobjekt umgesetzt. In diesem Abschnitt wird diese prototypische Implementierung des selbstlernenden Reglers für dezentrale Lüftungsanlagen in einer Wohnung beschrieben. Selbstlernende Regelungsstrategien für Nichtwohngebäude und andere gebäudetechnische Systeme wurden bereits realisiert und erfolgreich implementiert. So haben z. B. Cheng et al. [62] eine lernende Regelung für Jalousien in einem Bürogebäude in einem 5-monatigen Test implementiert. Die Ergebnisse zeigten, dass der Algorithmus sich erfolgreich an die unterschiedlichen Komfortprofile der Nutzer anpassen kann. Gunay et al. [55] testeten ein neuartiges Schema zum Erlernen der Nutzerinteraktion mit Thermostaten in Bürogebäuden. Die 1-Jahres-Implementierung führte zu einer Reduktion der Temperatursollwerte im Winter um 2-3°C und zu einer Erhöhung im Sommer. Park et al. [56] implementierten eine adaptive Regelung für die Beleuchtung in fünf Büros für acht Wochen. Dieser Regler schaffte es, ein Gleichgewicht zwischen Nutzerkomfort und Energieverbrauch herzustellen und zeigte das Potenzial von Lernalgorithmen als nutzerzentrierten Ansatz auf. Studien über die Implementierung selbstlernender Regler für Lüftungsanlagen wurden bislang nicht publiziert.

In dieser Studie wurde der im vorherigen Abschnitt beschriebene und simulierte selbstlernende DCV-Regler implementiert und drei Monate lang in einer Testwohnung untersucht. Es handelt sich dabei um das Energy Smart Home Lab (ESHL), das im Rahmen des MeRegio-Mobil Projekts [63] errichtet wurde. Das Wohnlabor ist ein ausgebauter Container, der sich auf dem Hauptcampus des Karlsruher Instituts für Technologie befindet. Die Wohnung hat zwei Schlafzimmer, einen Hauptraum (Kombination aus Wohnzimmer und Küche) und ein Bad/WC mit einer Gesamtfläche von ca. 60 m<sup>2</sup>. Ein zusätzlicher Raum enthält die Gebäudetechnik, zu dem die Bewohner jedoch keinen Zugang haben. Die Abbildungen Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen das Demonstrationsgebäude.



Abbildung 21 – Die Küche (links) und die Westfassade (rechts) des ESHL

Zwei Studierende (25-30 Jahre alt, ein Mann und eine Frau) bewohnten die Testwohnung vom 02.03.2020 bis zum 31.05.2020. In der Wohnung wurde ein System mit mehreren dezentralen fassadenintegrierten Lüftungsgeräten installiert, zusammen mit einer speziellen Nutzerbedienoberfläche. Ziel der Studie war es, die in Kapitel 3.3 vorgestellte selbstlernende Regelungsstrategie im Zusammenhang mit dem manuellen Betrieb der mechanischen Lüftung (über die Nutzerbedienoberfläche) zu untersuchen. Das vorgeschlagene Lüftungskonzept entspricht der Definition des AIVC bezüglich intelligenter Lüftungssysteme („Smart Ventilation“) [64].



Abbildung 22 – Der Wohnraum (links) und ein Schlafzimmer (rechts) des ESHL

## 4.2 Lüftungskonzept

### 4.2.1 Auslegung und Installation der dezentralen Lüftungsgeräte

Die installierten Geräte sind dezentrale alternierend betriebene Pendellüfter vom Typ Vitovent 100D der Fa. Viessmann [65]. Dieses ist ein wandintegriertes Gerät mit einem Axialventilator (maximaler Volumenstrom 46 m<sup>3</sup>/h). Das Gerät wechselt die Luftförderrichtung in einer definierten Periodenzeit (üblicherweise 60 Sekunden). Es verfügt weiterhin über einen Filter und ein Wärmerückgewinnungssystem (WRG) aus einem Keramikwärmespeicher (nach DIBt 81% mittlere und maximal 91% Wärmerückgewinnung). Die Energieeffizienzklasse nach EU-Verordnung Nr. 1254/2014 ist A. Abbildung 23 stellt das Gerät dar.



Abbildung 23 – Das installierte dezentrale Lüftungsgerät Vitovent 100D der Fa. Viessmann. 1 – Innenblende, 2 – Lüfter, 3 – Wärmespeicher, 4 – Außenblende. [Bild:Viessmann]

Die Regelung erfolgt typischerweise manuell mit vier Stufen. Zwei Modi sind verfügbar: alternierender Betrieb und Bypass (für Sommer- oder für Stoßlüftung). Tabelle 10 zeigt den Volumenstrom und den dazugehörigen Schalldruckpegel jeder Stufe des Geräts.

Tabelle 10 – Volumenstrom und Schalldruckpegel der 4 Stufen des Lüftungsgeräts

Lüftungsstufen	Stufe 1 (Grund)	Stufe 2 (Reduziert)	Stufe 3 (Normal)	Stufe 4 (Intensiv)
Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	18	28	38	46
Schalldruckpegel [dB(A)]	11	19	28	33

Die Auslegung der Lüftungsanlage für das Energy Smart Home Lab (ESHL) erfolgte nach Norm DIN 1946-6. Der gesamte Volumenstrom für die Nutzungseinheit (NE) ergibt sich zu:

$$\dot{V}_{v,ges} = \dot{V}_{v,ML} + \dot{V}_{v,Inf} + \dot{V}_{v,F}$$

- $\dot{V}_{v,ges}$  Gesamt-Außenluftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $\dot{V}_{v,ML}$  Luftvolumenstrom durch Lüftungstechnische Maßnahmen [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $\dot{V}_{v,Inf}$  wirksamer Luftvolumenstrom durch Infiltration [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $\dot{V}_{v,F}$  wirksamer Luftvolumenstrom durch manuelles Fensteröffnen [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Für eine konservative Auslegung muss die Fensterlüftung vernachlässigt werden. Der Gesamt-Außenluftvolumenstrom errechnet sich dann zu:

$$\dot{V}_{v,ges} = F_{LSt} (-0,002 A_{NE}^2 + 1,15 + A_{NE} + 20) = F_{LSt} 73,95$$

- $A_{NE}$  Fläche der Nutzereinheit [ $\text{m}^2$ ]
- $F_{LSt}$  Faktor, siehe Tabelle 6 in der DIN 1946-6

Die Wohnung verfügt eine Wohnfläche von  $60 \text{ m}^2$ . Der Faktor  $F_{LSt}$  wird für eine Wohnung mit hoher Belegung (konservativ) angenommen. Die Infiltration wird nach den Gebäudeeigenschaften des ESHL auf 0.1 ACH abgeschätzt ( $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Die Werte für die vier Lüftungsstufen werden dann aus Tabelle 7 in der Norm bestimmt, abzüglich der Infiltration, und abhängig vom Faktor  $F_{LSt}$ . Es ergeben sich die folgenden Luftvolumenströme:

- Feuchteschutz:  $\dot{V}_{v,ges} = 16.2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Reduzierte Lüftung  $\dot{V}_{v,ges} = 45.8 \text{ m}^3/\text{h}$
- Nennlüftung:  $\dot{V}_{v,ges} = 68.0 \text{ m}^3/\text{h}$
- Intensivlüftung:  $\dot{V}_{v,ges} = 90.3 \text{ m}^3/\text{h}$

Außerdem müssen nach Norm für das Bad/WC und die Küche mindestens jeweils  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  Abluft bei Nennlüftung gewährleistet sein. Auch für die Schlafzimmer müssen mindestens  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  pro Person bei Nennlüftung sichergestellt werden.

Die Luftfördermengen der einzelnen Stufen der dezentralen Lüftung ergeben sich dann gemäß den Lüftungsstufen nach DIN 1946-6. Für das Wohnlabor wurden deshalb vier Pendellüfter vorgesehen, d.h. die Lüftungsstufen nach Norm teilen sich auf zwei jeweils parallel betriebene Geräte auf, wodurch auch die Zu- und Ablufträume definiert werden. Die vier Pendellüfter werden paarweise betrieben, wobei die zwei Pendellüfter an der gleichen Fassade in derselben Richtung betrieben werden, um einen entsprechenden Druckunterschied in der Wohnung zu halten.

Im Bad/WC befindet sich ein zusätzliches Abluftgerät (Abbildung 24). Der Badlüfter besitzt keine Wärmerückgewinnung (WRG) und funktioniert nur nach Bedarf (bei Betätigung des Lichtschalters). Bei Anwesenheit muss ein Luftvolumenstrom von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  geliefert werden. Bei Abwesenheit pendelt dieser Ventilator mit einem Volumenstrom von  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . Da es eine ungerade Anzahl von Lüftern in der Wohneinheit gibt, muss die Summe der Volumenströme an den beiden Fassaden gleich sein. Außerdem muss der Volumenstrom aller anderen Geräte in der Wohnung angepasst werden, wenn der Badlüfter im Abluftbetrieb ist, damit Gerüche und Feuchte sicher abgeführt werden können. Die resultierenden Volumenströme nach der Normauslegung sind in Tabelle 11 dargestellt. Diese zeigt zudem, wie die einzelnen Lüftungsstufen eingestellt werden müssen.

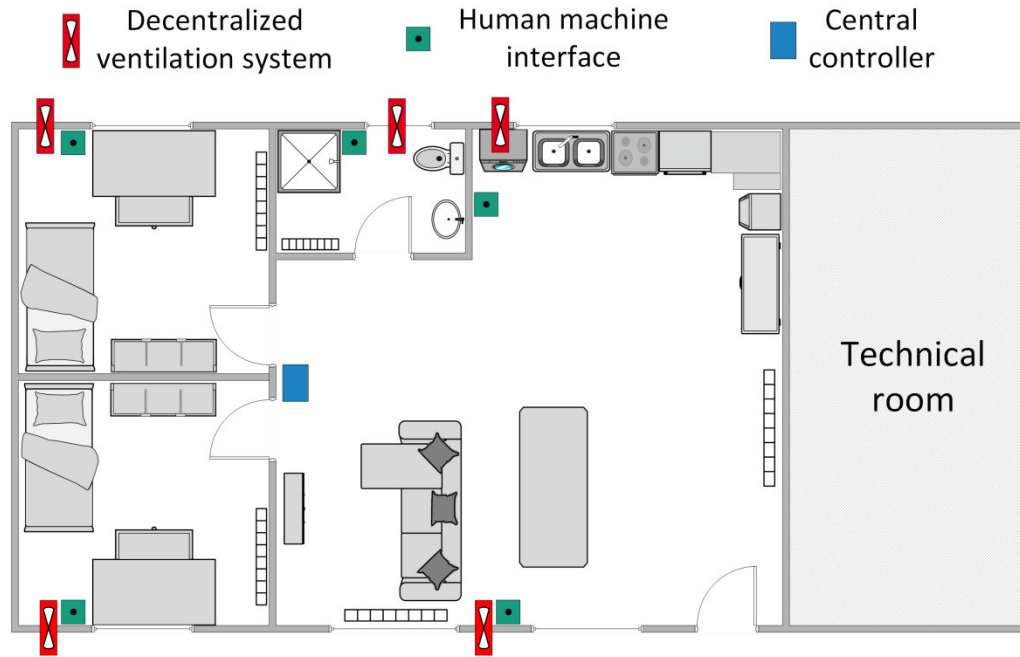


Abbildung 24 – Grundriss des ESHL und Platzierung der Pendellüfter

Tabelle 11 – Lüftungsstufen für die Versuchswohnung definiert nach DIN 1946-6

Lüftungsstufen	$\dot{V}_{tot}$ [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}_{mech}$ [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}_{mess}$ [m <sup>3</sup> /h]	$n_{vent}$ [%]
Feuchteschutz	22.2	16.2	20	20
Reduzierte Lüftung	51.8	45.8	46	50
Nennlüftung	74.0	68.0	68	75
Intensivlüftung	96.3	90.3	90	100

- $\dot{V}_{tot}$  gesamter Außenluftvolumenstrom nach DIN 1946-6, in m<sup>3</sup>/h
- $\dot{V}_{mech}$  mechanischer Außenluftvolumenstrom nach Infiltration, in m<sup>3</sup>/h
- $\dot{V}_{mess}$  gemessener Volumenstrom eines Lüfters in jeder Lüftungsstufe, in m<sup>3</sup>/h
- $n_{vent}$  Drehzahl eines Lüfters in jeder Lüftungsstufe, in %

Die tatsächlichen Volumenströme in jeder Lüftungsstufe wurden mit einem Drehradanemometer vor Ort gemessen. Abbildung 25 zeigt, wie diese Messung erfolgte.



Abbildung 25 – Messung des Volumenstroms eines Pendellüfters am ESHL

#### 4.2.2 Monitoringkonzept und Nutzerinterface

Die Installation der Geräte wurde durch einen geeigneten elektronischen Aufbau ergänzt, um eine erfolgreiche Implementierung des selbstlernenden Reglers zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde ein auf dem Internet der Dinge (IoT) basierender Ansatz gewählt. IoT-basierte Systeme ermöglichen eine hohe Informationsintegration und haben das Potenzial, intelligente Lüftungsregelungen effizient zu implementieren [66]. Das allgemeine Schema ist in der Abbildung 26 dargestellt.

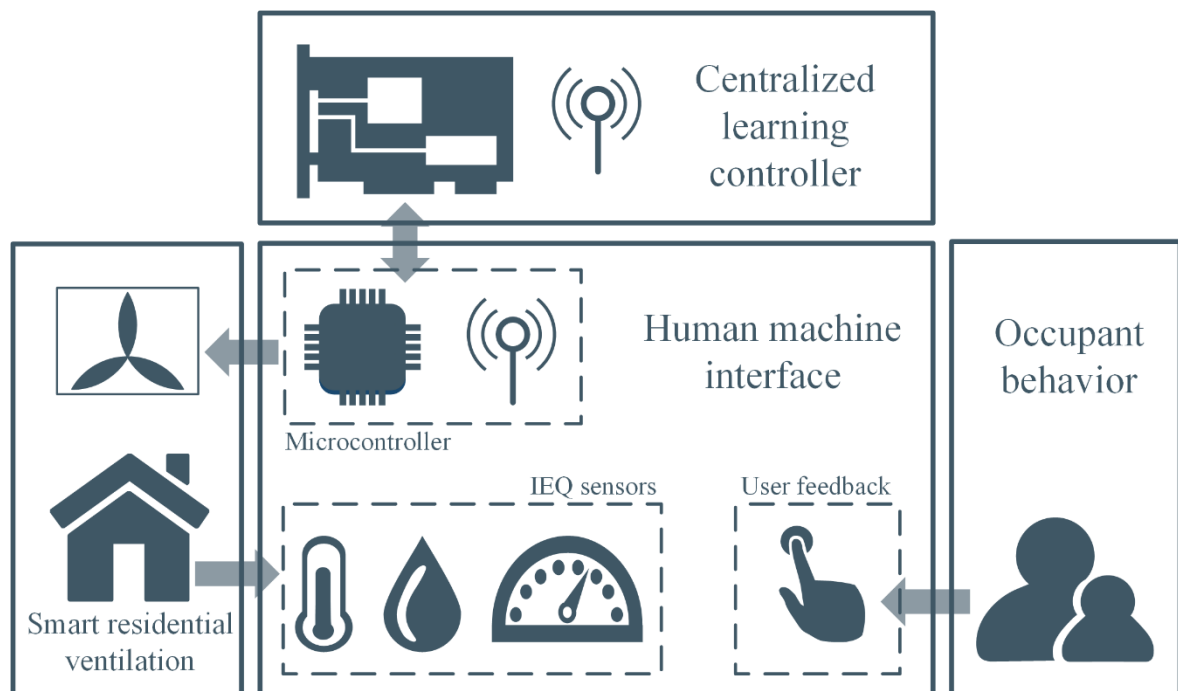


Abbildung 26 – Verbindung zwischen HMI, zentralem Regler, Pendellüfter und Nutzer

Die Regelung erfolgt raumweise. Dafür wurden sowohl raumweise als auch wohnungsweise Komponenten eingesetzt. Jedes Gerät verfügt über eine Nutzer-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface, HMI), an die der Ventilator, die Nutzeroberfläche und die Sensoren angeschlossen sind. Ein Mikrocontroller (Node MCU ESP32 ®) sammelt die Daten von den installierten Innenraumsensoren und der Nutzeroberfläche und sendet parallel dazu die Steuersignale an den Ventilator. Der Mikrocontroller kommuniziert mit dem zentralen Controller (Raspberry Pi 4B ®) über

WiFi. Die zentrale Regelung empfängt die Daten von den dezentralen Mikrocontrollern, speichert sie, führt den Regelalgorithmus aus und gibt die Entscheidung an den Mikrocontroller zurück, der dann das entsprechende Signal an die Ventilatoren sendet. Die gesamte zentrale Regelung ist in Python programmiert. Der Datenaustausch findet jede Minute statt oder wenn der Nutzer den Ventilator betätigt, wobei das Lernen nur alle zehn Minuten stattfindet.

Es wurden mehrere Sensoren installiert, um Daten aus dieser Implementierung zu sammeln. Diese Sensoren sind in 1,5 m Höhe in der Nähe des Lüftungsgeräts in jedem Raum positioniert. Zu den Messgrößen gehören die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die CO<sub>2</sub>- und VOC-Konzentration sowie der Drehregler für die Nutzerrückmeldung. Aufgrund der Positionierung veränderte die vom Mikrocontroller abgegebene Wärme die Messwerte für die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit, was durch eine Sensorkalibrierung behoben wurde (die Raumtemperatur wurde mit einem Offset von etwa 7°C gemessen). Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der installierten Sensoren.

Tabelle 12 – Liste der installierten Sensoren im HMI

Sensorname	Größe	Einheit	Bereich	Genauigkeit
Sensirion SCD30	Temperatur	°C	-40 – +70	0.4+0.023(T-25)
	Relative Feuchte	%	0 – 100	3
	CO <sub>2</sub> Konzentration	ppm	0 – 40000	30
AMS CCS811	VOC	ppb	0 – 1187	**
	eqCO <sub>2</sub> Konzentration	ppm <sub>eq</sub>	400 – 8192	**
PEL12T Drehregler	Zustand	-	0-24	-

Außerdem wurde eine nutzerfreundliche Schnittstelle entwickelt. Maier [38] führte zwei Umfragen zur Wohnungslüftung durch. In der ersten wurden die Teilnehmer zu den wichtigsten Aspekten von Nutzeroberflächen für Wohnungslüftungssysteme befragt. Die zentralen Ergebnisse sind in den folgenden drei Punkten zusammengefasst:

- Die Oberfläche muss intuitiv und verständlich sein
- Der Benutzer muss in der Lage sein, die Lüftungsstufen zu erkennen
- Die Schnittstelle muss auch für Nutzer ohne technischen Hintergrund verständlich sein

Außerdem wurden die Teilnehmer der Studie gebeten, ihre ideale Oberfläche zu definieren, wobei sie einige auf dem Markt verfügbare Beispiele als Referenz hatten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Nutzer vor allem drehbare Bedienelemente bevorzugten. Daher wurde beschlossen, einen Drehgeber zu bauen, um das Feedback der Nutzer zu sammeln. Außerdem wurde ein Farbfeld (rot-grün-blau) eingebaut, um die Interpretation der Drehung zu erleichtern, wie in Abbildung 27 dargestellt. Ein grünes Licht bedeutet keine Veränderung der Stufe, ein blaues Licht bedeutet eine Verringerung der Lüfterstufe und ein rotes Licht bedeutet eine Erhöhung der Lüfterstufe. Die Bewohner wurden vor dem Experiment über die Bedeutung der Anzeige in Kenntnis gesetzt. Die Wahl des Nutzers wird in vier möglichen Abstimmungen gespeichert, je nach dem Unterschied zwischen der gewählten und der vorherigen Ventilatorstufe. Die Abstimmungen wurden dann von der Regelung gelernt:

- „Ich will viel weniger Luft“ (-2)
- „Ich will weniger Luft“ (-1)
- „Ich will mehr Luft“ (+1)
- „Ich will viel mehr Luft“ (+2)



Abbildung 27 – Die installierte Nutzerschnittstelle

### 4.2.3 Umsetzung der lernenden Regelung

Für die Umsetzung und den Test der selbstlernenden Regelungsstrategie wurde ein spezieller regelbasierter Regelungskreis entwickelt. Der Ablauf ist in Abbildung 28 dargestellt. Im automatischen Modus wurde der gleiche Regler, wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben (und in Abbildung 17 dargestellt), implementiert, wobei ein Klassifizierungsalgorithmus (Support Vector Machines) die Präferenzen des Nutzers in Bezug auf den Luftvolumenstrom vorhersagt. Die Daten der Nutzerinteraktionen werden gesammelt und der Algorithmus lernt, wie sich der Nutzer in Bezug auf die relative Luftfeuchtigkeit und die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum verhält. Die Ventilatoren sorgen für einen Mindestluftwechsel (Feuchteschutz) und können nicht ausgeschaltet werden. Die Regelung wird in jedem Raum individuell eingesetzt, um die unterschiedlichen Präferenzen der einzelnen Nutzer zu erfassen. Die Regelung wird in drei Szenarien außer Kraft gesetzt:

- Wenn die Dunstabzugshaube in der Küche eingeschaltet wird, werden die Ventilatoren ausgeschaltet, um Schäden an den Ventilatoren zu vermeiden (der Abluftvolumenstrom der Dunstabzugshaube ist doppelt so groß wie die Summe aller dezentralen Geräte).
- Wenn das Licht im Badezimmer eingeschaltet wird, läuft der Ventilator im Badezimmer mit voller Geschwindigkeit und alle anderen Ventilatoren laufen mit 25 % Geschwindigkeit und im Zuluftbetrieb, um die Verbreitung von Gerüchen in der Wohnung zu vermeiden.
- Wenn der Nutzer das System in einem bestimmten Raum betreibt, bleibt die gewählte Ventilatorstufe für 20 Minuten erhalten. Der Nutzer kann diese Auswahl wieder übersteuern.

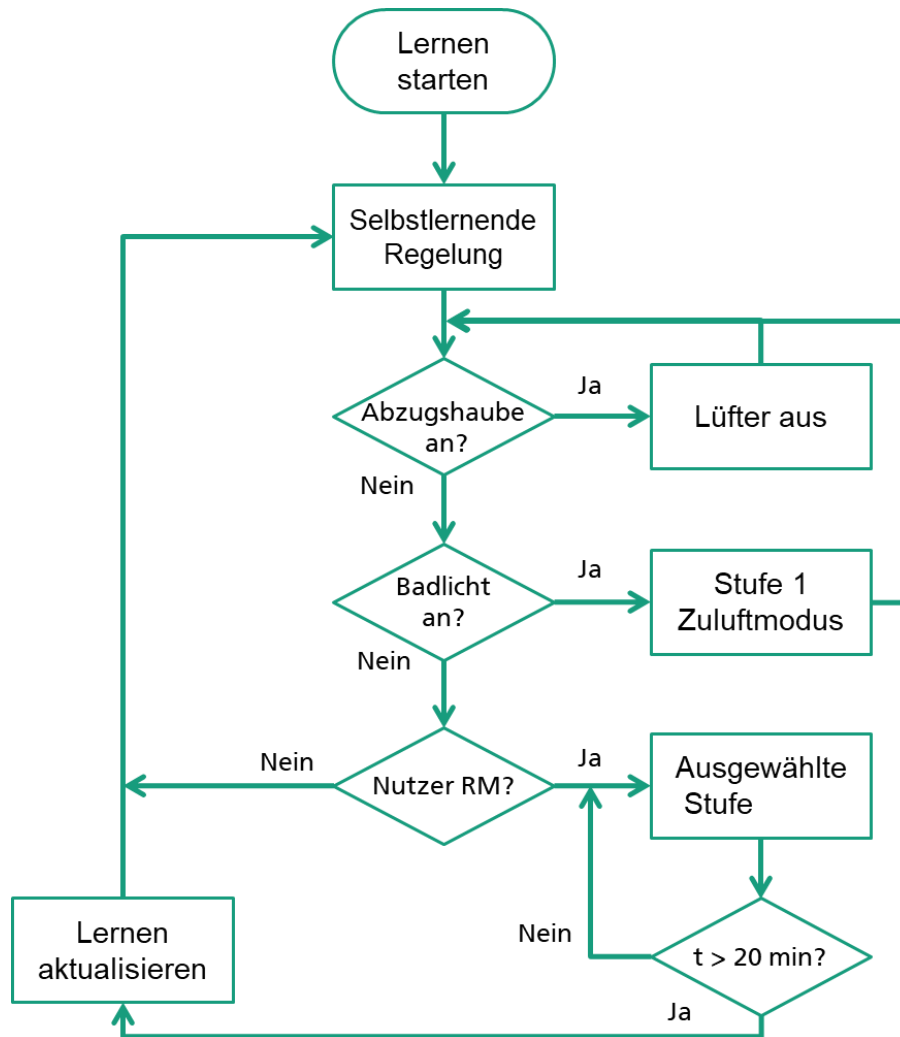


Abbildung 28 – Ablauf der installierten Regelung am ESHL (RM = Rückmeldung)

### 4.3 Auswertung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden allgemeine Ergebnisse zur Raumluftqualität, zur Leistung des Lüftungssystems und zu dem selbstlernenden Regler vorgestellt.

#### 4.3.1 Energieverbrauch, Komfort und Luftqualität

Abbildung 29 stellt die durchschnittlichen Außenbedingungen während des gesamten Messzeitraums dar. Obwohl dieses Experiment für winterliche Bedingungen konzipiert wurde, liegen nur im ersten Monat viele Tage mit einer durchschnittlichen Außentemperatur unter 5°C. Ende April wurden die typischen Wetterbedingungen des mittleren Frühlings beobachtet.

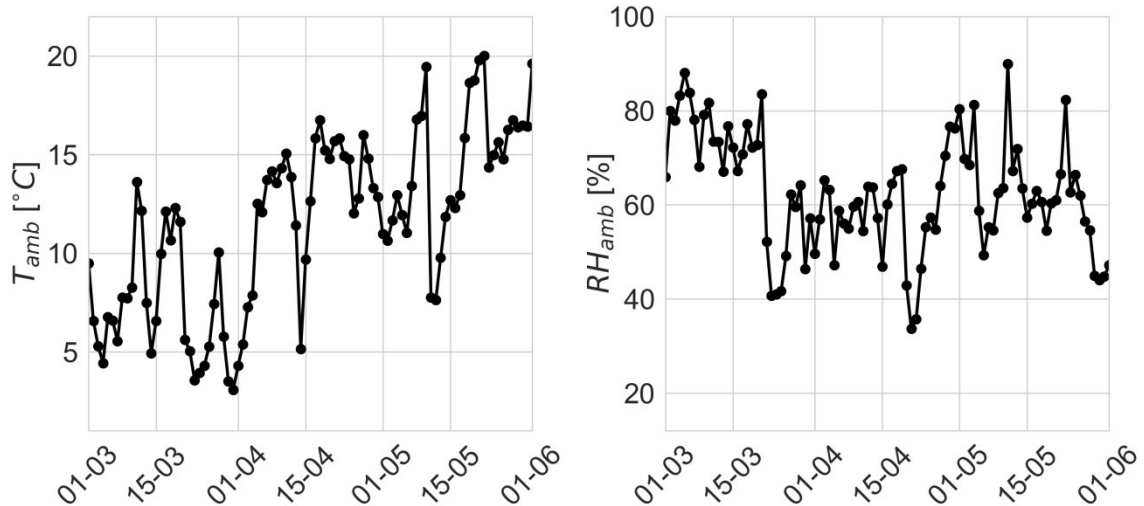


Abbildung 29 – Tagesmittelwertverlauf der Außentemperatur (links) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rechts) über die gesamte Messperiode

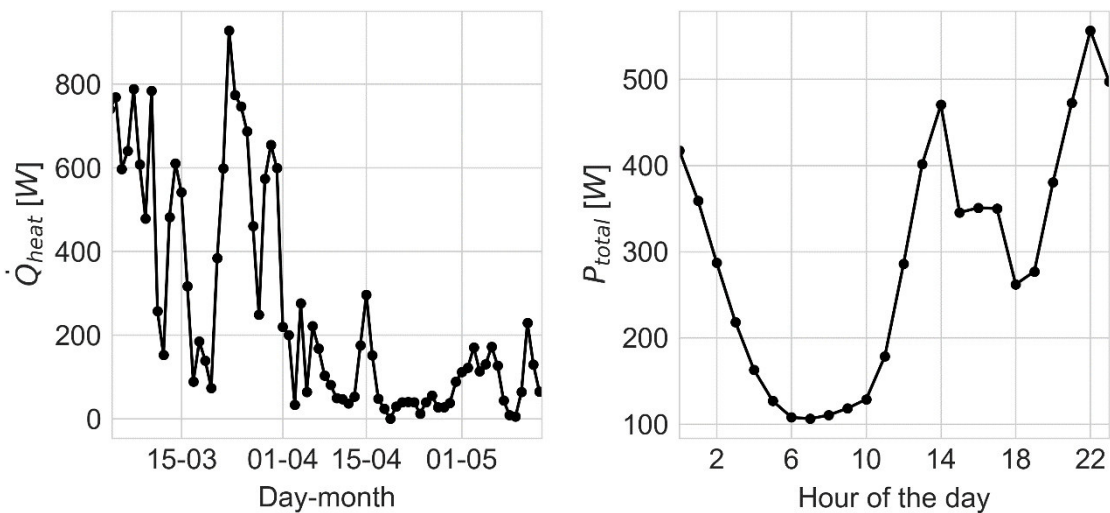


Abbildung 30 – Tagesmittelwertverlauf der Heizleistung (links) und Stromverbrauch (rechts) über die gesamte Messperiode.

In Abbildung 30 sind außerdem die durchschnittliche tägliche Heizleistung und der Stromverbrauch in der Wohnung dargestellt. Dies bestätigt, dass die Heizperiode im Jahr 2020 nur bis Anfang April andauerte. Das elektrische Energieverbrauchsprofil ist typisch für ein Mehrfamilienhaus, mit einer zeitlichen Verschiebung von drei Stunden im Vergleich zu durchschnittlichen Verbrauchsprofilen in Deutschland.

Die Abbildungen Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Boxplots der Innenraummessungen. Die Raumtemperaturen lagen in der Regel zwischen 22 und 24°C. Diese hohen Temperaturen wurden durch interne Lasten (durch die Anzahl von Geräten und Sensoren des Hauses) und hohe Temperatursollwerte verursacht. Infolgedessen wurden niedrigere Werte für die relative Luftfeuchtigkeit in den Räumen beobachtet (fast immer zwischen 25 und 50 %). Lediglich im Badezimmer wurden hohe Luftfeuchtheitswerte gemessen, wahrscheinlich wenn die Bewohner duschten. Die Lüftungsregelung hielt die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in allen Räumen in der Regel unter dem gewünschten Grenzwert von 1250 ppm. Beide Schlafzimmer wiesen höhere Werte im oberen Quartil auf und erreichten etwa 1600 ppm (meist während des Schlafs). Die VOC-Konzentration zeigt im Küchenbereich etwas höhere Innenraumbelastungen. Da der VOC-Sensor etwa zwei Meter vom Kochbereich entfernt installiert

wurde, konnte der Einfluss der Kochaktivitäten auf die Freisetzung von Luftschadstoffen nicht richtig überprüft werden. Im Allgemeinen bestätigen diese Ergebnisse, dass es mit dem festgelegten Lüftungskonzept und der selbstlernenden Regelungsstrategie gelungen ist, die Raumluftvariablen im gewünschten Bereich zu halten.

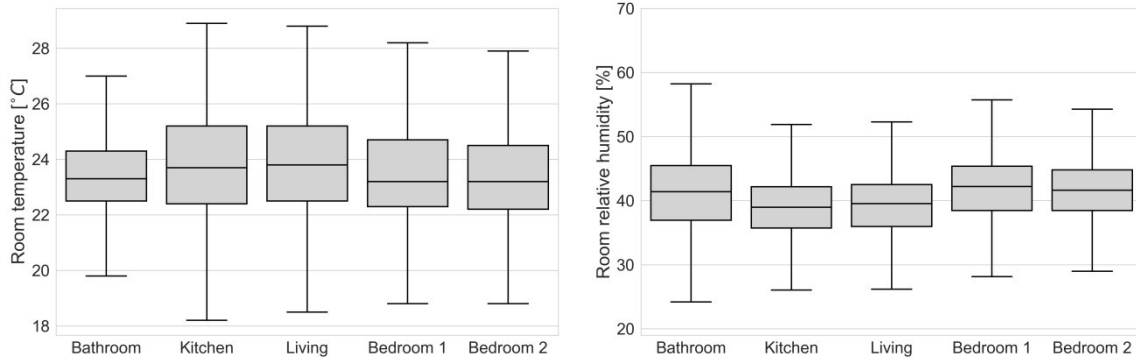


Abbildung 31 – Boxplot der gemessenen Lufttemperatur (links) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rechts) im Raum

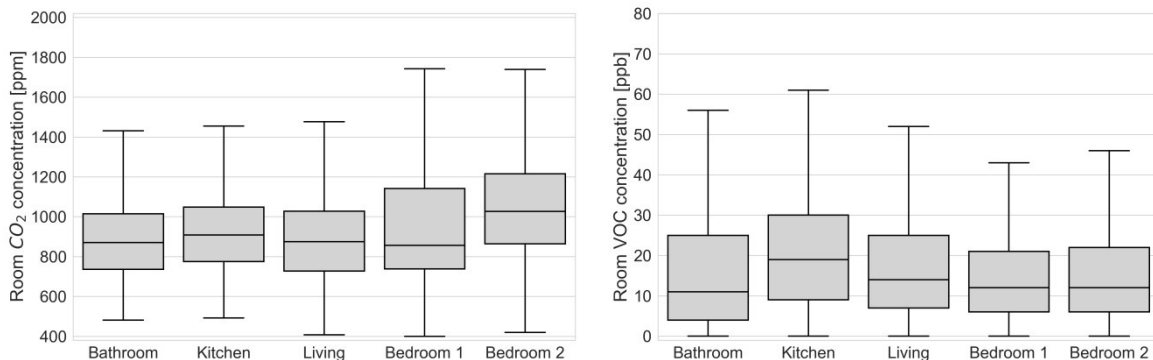


Abbildung 32 – Boxplot der gemessenen CO<sub>2</sub>- (links) und VOC-Konzentration (rechts) im Raum

Da sowohl der Wärmerückgewinnungsgrad als auch die Ventilatorleistung nicht gemessen wurden, konnte der Energieverbrauch des Lüftungssystems nicht richtig bewertet werden. Daher wurden die lüftungsbedingten Wärmeverluste unter der Annahme eines Wärmerückgewinnungsprofils anhand der Ergebnisse der Labormessungen des Geräts abgeschätzt. Außerdem wurde die Ventilatorleistung anhand des Datenblattes des Ventilators bestimmt. Weitere Einzelheiten zu diesen Schätzungen befinden sich in [47]. Der gesamte Primärenergieverbrauch durch die Lüftung ( $Q_{pe,vent}$ ) betrug 1,76 kWh/m<sup>2</sup> über die kompletten drei Monate (51% in März, 28% in April und 21% in Mai).

#### 4.3.2 Performance der dezentralen Lüftung

Während des Messzeitraums lieferte das installierte Lüftungssystem eine durchschnittliche Luftwechselrate von etwa 0,22 h<sup>-1</sup> (Abbildung 33). Die Darstellung zeigt ein theoretisch abgeleitetes Profil, da der Massenstrom anhand des zugehörigen Volumenstroms für eine bestimmte gemessene Ventilatorleistung berechnet und nicht gemessen wurde. Druckunterschiede zwischen Innen- und Außenbereich und hohe Windgeschwindigkeiten können in einer dezentralen Lüftungsanlage den realen Luftvolumenstrom vom theoretischen abweichen lassen. Die Peaks in der Abbildung sind auf eine automatische Uhr zurückzuführen, die die Ventilatoren fünfmal am Tag für zehn Minuten ausschaltete, um einen Speicherüberlauf in den Mikrocontrollern zu verhindern. Die Temperaturkorrektur in der Platine verursachte bei jedem Neustart eine Überschätzung der relativen Luftfeuchtigkeit, was zu einem kurzen Anstieg des Volumenstroms führte.

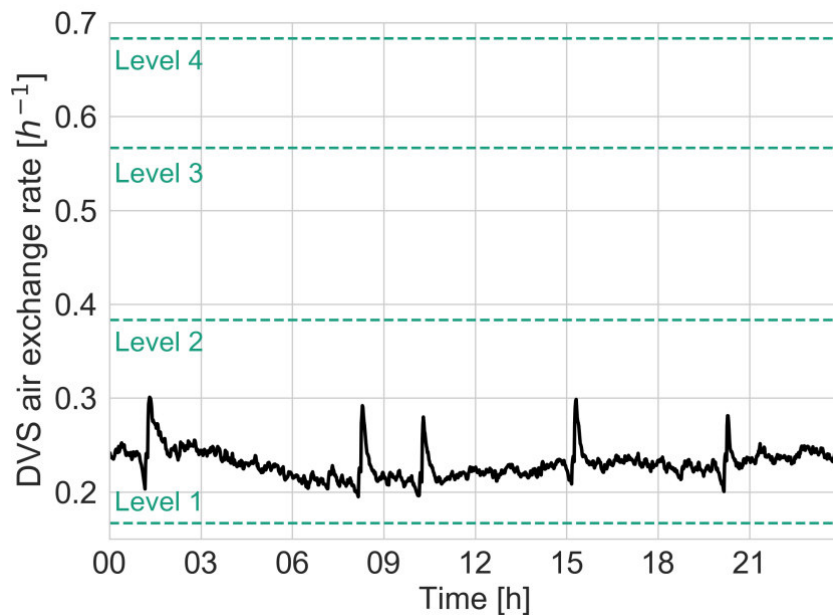


Abbildung 33 – Tägliche mittlere theoretische Luftwechselrate im Messzeitraum

Abbildung 34 zeigt die Häufigkeit der Ventilatorstufen in jedem Raum. Die Ventilatoren liefen fast immer auf den extremen Stufen (1 und 4). Die Küche und das Wohnzimmer sind die einzigen Räume mit erhöhten Anteilen an Lüfterstufe 4 – ein Ergebnis der erlernten Profile.

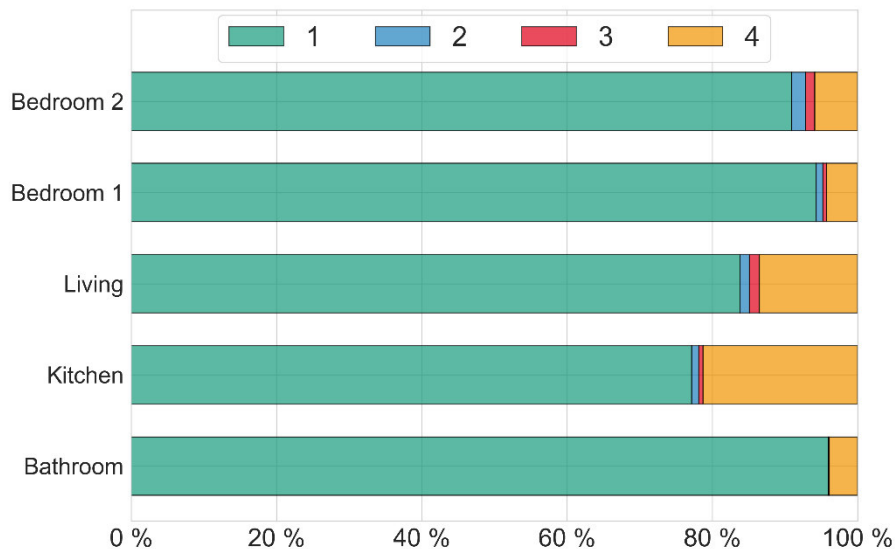


Abbildung 34 – Häufigkeit der Ventilatorstufen in jedem Raum während des Messzeitraums

### 4.3.3 Performance der selbstlernenden Regelung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des implementierten selbstlernenden Reglers analysiert. Wie bereits gezeigt, war das für diese Anwendung entwickelte Lüftungskonzept unter Berücksichtigung normbezogener Akzeptanzwerte für die relative Raumluftfeuchte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgreich. In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Bewohner auf die Leistung des DCV untersucht und der Lernprozess des Reglers beschrieben.

Tabelle 13 zeigt die Verteilung der Nutzerstimmen in jedem Raum nach dem jeweiligen Abstimmungstyp (-2 bis +2). Die Bewohner bedienten die Ventilatoren fast immer, indem sie den gewünschten Volumenstrom stark veränderten, was zu extremen Abstimmungen (-2 oder +2) führte. Dies könnte

auch eine Folge der gestalteten Nutzerschnittstelle sein, auch wenn die Bewohner in die Bedienung eingewiesen wurden. Es gibt einen klaren Trend dahingehend, dass die Nutzer häufig für einen geringeren Luftstrom in den Schlafzimmern und einen höheren Luftstrom in den anderen Räumen stimmten. Darüber zeigt sich anhand der Form der Abstimmungen, dass die Bewohner in den verschiedenen Räumen unterschiedliche Anforderungen oder Komfortprofile haben. Bei einem Lernansatz für die gesamte Wohnung würden diese raumindividuellen Profile verloren gehen.

Was die Häufigkeit der Nutzerinteraktionen betrifft, lag die Gesamtzahl der Abstimmungen in drei Monaten bei etwa 200. Das bedeutet, dass die Bewohner die Lüftungsanlage aktiv bedienten [39]. Dies kann auch eine Folge des Ausbruchs der Covid-19-Pandemie sein, da die Studierenden mehr Zeit in Innenräumen verbrachten als erwartet. Mehr als die Hälfte der Stimmen entfielen auf den ersten Monat, in dem die Bewohner wahrscheinlich noch mit den Geräten experimentierten. Nur der Küchenbereich wies mehr als zehn Interaktionen im letzten Monat auf. In der Küche und den beiden Schlafzimmern gab es mehr als 40 Nutzerabstimmungen, was bedeutet, dass der Lernprozess möglicherweise kurz vor der Stabilisierung stand. Im Wohnbereich und im Badezimmer gab es deutlich weniger Interaktionen, was bedeutet, dass die daraus resultierenden gelernten Profile noch potenzielle Unterschiede aufweisen könnten.

*Tabelle 13 – Anzahl der Nutzerstimmen pro Raum im Messzeitraum*

Votes	Bedroom 1	Bedroom 2	Living	Kitchen	Bathroom	Total
+2	6	6	15	26	18	71
+1	2	0	0	4	1	7
-1	0	3	2	10	2	17
-2	37	36	9	16	1	99
Total	45	45	26	56	22	194

Im Schlafzimmer 1 ist eine starke Präsenz negativer Stimmen (-2) zu beobachten, was zu einer größeren roten Fläche für das Kontrollfeld führt. Im Fall der Küche wird ein Übergewicht an positiven Stimmen (+2) festgestellt, obwohl die Verteilung der Stimmen ausgeglichener ist. In der Küche werden typischerweise höhere relative Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Werte erwartet, meist während der Kochzeit. Dadurch entstand ein grünes Feld in der Mitte. Die Nutzerschnittstelle mit den Sensoren wurde etwa zwei Meter vom Kochfeld (Schadstoffquelle) entfernt platziert und registrierte niedrigere Werte als erwartet. Dies könnte möglicherweise zu einer anderen Korrelation zwischen der Nutzerstimme und den gemessenen Werten führen.

Abbildung 35 zeigt das Startprofil der selbstlernenden Regelung. Es war die Ausgangsbasis für jeden Raum und wurde nach der Messperiode auf die individuell gewählten Präferenzen umgestellt. Abbildung 36 zeigt die daraus resultierenden Profile für Schlafzimmer 1 und die Küche. Diese spiegeln die zuvor analysierte Verteilung der Nutzerstimmen wider. Die größten Veränderungen im Kontrollbereich traten zwischen 30 und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit und 500 bis 1500 ppm CO<sub>2</sub>-Konzentration auf. Dies liegt vor allem daran, dass die Messwerte im Innenraum aufgrund des Luftaustausches der installierten Lüftungsanlage und die im Außenraum nur selten in den Extrembereichen lagen.

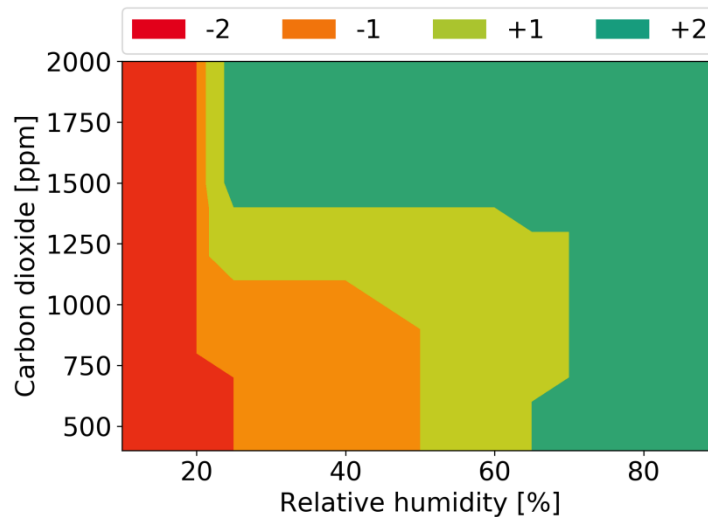


Abbildung 35 – Startfeld der selbstlernenden Regelung

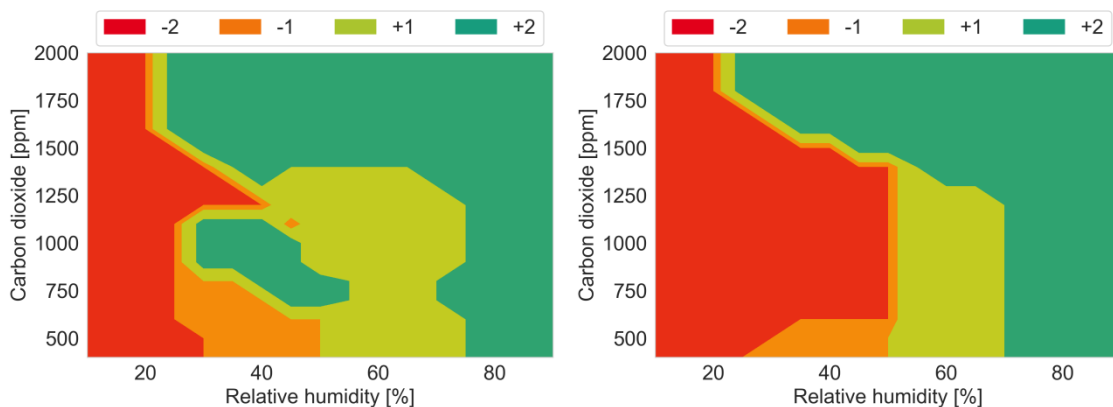


Abbildung 36 – Resultierende gelernte Regelungsfelder in Küche (links) und Schlafzimmer 1 (rechts) am Ende der Messperiode

Abbildung 37 zeigt den Tagesverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit, der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Ventilatorzahl an zwei Beispieltagen (zu Beginn und am Ende der Testphase) für Schlafzimmer 1 und die Küche. Der Einfluss des Nutzerverhaltens auf die resultierenden Lüfterdrehzahlprofile ist offensichtlich, was den Erfolg des Lernprozesses hervorhebt. Für beide Räume ergeben sich an beiden Tagen ähnliche Profile für die Eingangsgrößen des Reglers. Ein Lüftungsregler ohne Lernverfahren sollte an beiden Tagen das gleiche Ventilatorzahlprofil aufweisen. In diesem Fall ist bei gleichen Eingangsgrößen eine deutliche Absenkung der Lüfterdrehzahl im Schlafzimmer 1 und eine Erhöhung der Lüfterdrehzahl in der Küche zu erkennen. Dies steht im Zusammenhang mit den erlernten Kontrollfeldern, die in Abbildung 36 dargestellt sind. Daher war die Leistung des innovativen selbstlernenden Reglers unter den experimentellen Bedingungen sehr zufriedenstellend.

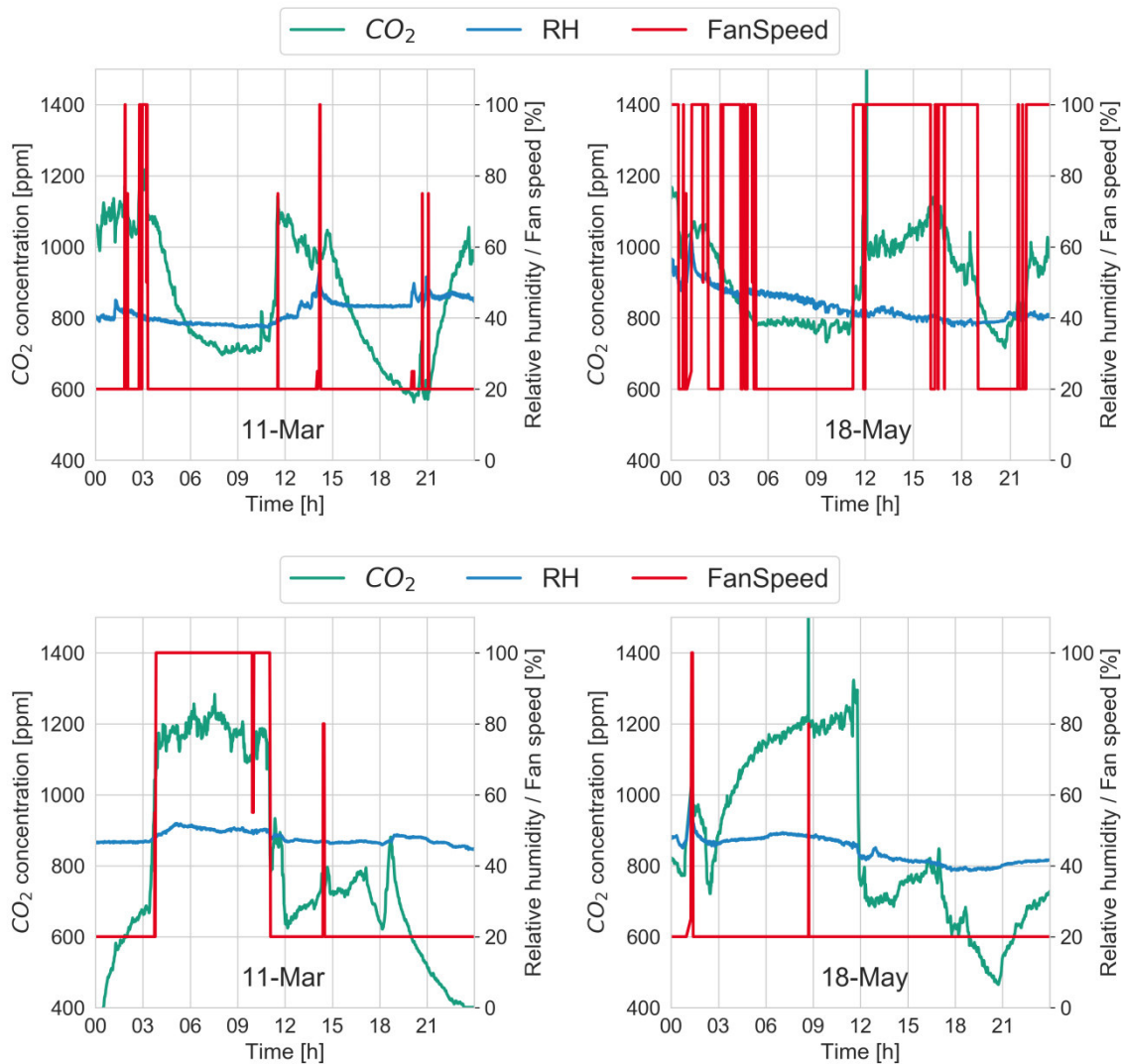


Abbildung 37 – Tagesprofil für die relative Feuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Ventilator Drehzahl in der Küche (oben) und im Schlafzimmer 1 (unten), vor dem Lernen (links) und nach dem Lernen (rechts)

#### 4.3.4 Nutzerbefragung: Akzeptanz und Zufriedenheit

Ergänzend zu den vorherigen Ergebnissen wurden die beiden Bewohner nach dem Experiment mit einem von Maier [38] entwickelten Fragebogen befragt. Das Ausfüllen dauerte etwa 30 Minuten, in denen Fragen zur natürlichen Lüftung (Fensteröffnung) und zur mechanischen Lüftung beantwortet werden mussten. Es wurden verschiedene Themen abgefragt, wie z. B. die Motivation, einen Innenraum zu lüften, die Bewertung von mechanischen Lüftungsgeräten, die Gestaltung der Nutzerschnittstelle und Verbesserungsvorschläge. Die wichtigsten Ergebnisse für diese Studie werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Der Hauptgrund für das Lüften ist den Bewohnern zufolge die Frischluftzufuhr. Sie weisen jedoch auch darauf hin, dass das Lüften eines Innenraums nicht unbedingt mit einer Verbesserung des Raumklimas verbunden ist. Außerdem werden Feuchtigkeit und Gerüche als Auslöser für das Belüften eines Raumes genannt, vor allem in Küche und Bad. Wenn man den Sommer berücksichtigt, wird die Innentemperatur zu einer relevanten Variable, was das Potenzial zeigt, die hier vorgeschlagene Methode auf Kontrollstrategien für den Sommer auszuweiten. Die Teilnehmer beantworteten auch Fragen zu ihren Lüftungsgewohnheiten. Nach dem Duschen besteht der stärkste Zusammenhang mit dem Lüften, was die Bedeutung der Beseitigung der überschüssigen Feuchtigkeit im Badezimmer betont. An kalten Tagen wird auch das Lüften vor dem Verlassen der Wohnung als wichtig bezeichnet, während an warmen Tagen das nächtliche Lüften bevorzugt wird.

Auch die Bewertung der mechanischen Lüftungssysteme wurde in die Umfrage einbezogen. In erster Linie betonten die Bewohner, dass die installierten Geräte ihre Anforderungen erfüllten und der daraus resultierende Luftaustausch als erfolgreich empfunden wurde. Obwohl Angsten et al. [68] kritische Punkte in Bezug auf die Effektivität der Belüftung und den Luftkurzschluss angaben, waren die Bewohner mit der gelieferten Frischluft zufrieden. Ein weiterer positiver Aspekt war die entwickelte Nutzerschnittstelle, die als intuitiv und verständlich bewertet wurde, insbesondere im Hinblick auf das Farbenfeld. Andererseits wurde diese Einfachheit auch kritisiert, da das System nicht programmierbar ist. Ein weiterer Kritikpunkt war die Lautstärke der Geräte in der Nacht, die anfangs zu Schlafproblemen führte. Dies ist ein Grund dafür, dass die Bewohner die Lüftungsstufe in beiden Schlafzimmern nachts häufig reduzierten. Die Geräuschemission des Systems wurde in den Stufen 3 und 4 als besonders störend empfunden.

Schließlich machten die Bewohner Vorschläge, die die Interaktion zwischen Nutzer und Technik verbessern könnten. Programmierbarkeit und Fernsteuerungsoptionen (hauptsächlich über eine Smartphone-App) werden als Schlüssel für die Individualisierung der Bedienung angesehen. Es ist erwähnenswert, dass beide Bewohner einen Universitätsabschluss in einem technikbezogenen Bereich haben, was ihre Affinität zu diesen Lösungen erhöht [38]. Außerdem könnte die Nutzerschnittstelle durch direkte Rückmeldungen (z. B. Anzeige der Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit) erweitert werden. Ein Schlafmodus hätte ebenfalls integriert werden können (dieser ist bei kommerziellen Lüftungsgeräten üblicherweise vorhanden).

Im Allgemeinen wurde der selbstlernende Regler als nützlich, aber nicht als entscheidend für die Akzeptanz des Systems empfunden. Ein Vergleich mit anderen Regelungsstrategien sollte durchgeführt werden, um die Akzeptanz genau zu untersuchen. Die Nutzer konnten die Intelligenz des Systems erkennen, allerdings wurde die mangelnde Flexibilität manchmal als negativ empfunden. Obwohl beide Bewohner einen ähnlichen Hintergrund haben und während des Messzeitraums zusammenlebten, unterscheiden sich ihre Antworten in einigen Aspekten, insbesondere in Bezug auf die Treiber zum Lüften eines Raums und die Wahrnehmung der Luftqualität.

#### 4.3.5 Praktische Erfahrungen aus dem Feldversuch

Die Feldimplementierung einer auf maschinellem Lernen basierenden Regelungsstrategie für dezentrale Lüftungssysteme war erfolgreich. Das Experiment bestätigt, dass die Entwicklung von intelligenten IoT-basierten Technologien in Wohngebäuden auch für Lüftungssysteme funktioniert.

Der vorgeschlagene Regler wurde für den Betrieb dezentraler Lüftungsanlagen installiert. In Anlehnung an die Erkenntnisse von Angsten et al. [68] wurden die wesentlichen Vorteile gegenüber konventionellen Wohnungslüftungssystemen bestätigt:

- Einfacher Inbetriebnahme- und Installationsprozess
- Einfache Einzelraumregelung über die Nutzerschnittstelle
- Kontrollierter Luftaustausch in der gesamten Wohnung

Andererseits wurde als großer Nachteil die Schallemission festgestellt. Die Bewohner zeigten sich unzufrieden mit dem Geräuschpegel, den die Ventilatoren verursachten, wenn sie auf der höchsten Stufe liefen. Dies ist eine Herausforderung für die Lüftungsindustrie, die hier Verbesserungen entwickeln muss. Ein weiterer Nachteil der Einzelraumregelung ist der Geräteabgleich, der notwendig ist, um unerwünschte Druckunterschiede in der Wohnung zu vermeiden. Auch die Platzierung der Geräte sollte bedacht werden, da die Bewohner über Zugerscheinungen in kalten Nächten berichteten, wenn das Gerät mit voller Drehzahl lief.

Außerdem gab es Probleme mit der Kommunikation zwischen dem zentralen Controller und den dezentralen Mikrocontrollern. Das Hauptproblem bestand darin, dass die ausgewählten Mikrocontroller aufgrund der Interaktion mit den Ventilatoren, den Sensoren und dem zentralen Regler gelegentlich wegen Speicherüberlastung hängen blieben. Dieser Systemfehler wurde unglücklicherweise erst nach der Installation und zu einem Zeitpunkt entdeckt, als die Bewohner bereits dort wohnten. Dieses Problem wurde während der ersten Woche der Nutzung behoben.

Was den Monitoring-Aufbau betrifft, wurden die Variablen der Innenraumbedingungen erfolgreich gemessen. Allerdings konnten weder die lüftungsbedingten Wärmeverluste noch der Stromverbrauch der Ventilatoren richtig erfasst werden. Für die erste Messung hätten zusätzliche Geräte installiert werden müssen, um den tatsächlichen Ventilatorvolumenstrom und die Temperaturdifferenz vor und nach der Wärmerückgewinnung zu messen. Da die Geräte im zweiten Fall nur für dieses Experiment installiert wurden, wurde die Verbindung von der Hauptstromquelle überbrückt, wo es keine Strommessgeräte gab.

Eine zentrale Einschränkung betrifft den Ansatz des Lernens in einzelnen Räumen. Wie in einer bereits veröffentlichten Simulationsstudie [47] untersucht wurde, kann das gemeinsame Lernen verschiedener Komfortprofile zu instabilen Regelfeldern führen. Bei einer Ausweitung dieser Methode auf andere Gebäudetypen (z. B. Bürogebäude mit gemeinsam genutzten offenen Arbeitsbereichen) kann das Aufeinandertreffen der verschiedenen Komfortprofile kritisch werden. In diesem Fall wäre der selbstlernende Regler nicht in der Lage, die Komfortprofile der Nutzer individuell abzubilden. Es sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um eine angepasste Lösung für Räume mit mehreren Nutzern zu erreichen [69]. Schließlich sollte dieses Experiment mit verschiedenen Bewohnern wiederholt werden, um die Verzerrung der Ergebnisse auf ein bestimmtes Nutzerverhalten zu verringern.

Der letzte Punkt betrifft die Wetterbedingungen. Das Experiment sollte die Regelung unter winterlichen Bedingungen testen. Die Durchführung dauerte jedoch von März bis Ende Mai 2020. Ab Mitte April waren die Wetterbedingungen typisch für den späten Frühling. Dies wirkte sich auf den manuellen Betrieb der Lüftungsanlage aus, da die Bewohner im Sommer andere Gründe für das Lüften haben [36]. Dieses Experiment könnte erneut durchgeführt werden, um speziell das Verhalten bei sommerlichen Bedingungen zu untersuchen.

### 4.4 Zusammenfassung des Kapitels

Smarte Lüftung hat in den letzten Jahren im Wohnbereich an Bedeutung gewonnen. Die Forschung hat sich hauptsächlich auf verschiedene bedarfsabhängige Regelungen konzentriert, da die Umsetzung dieser Technologie bereits erprobt ist. Im Abschnitt 3 wird eine innovative selbstlernende Regelungsstrategie vorgeschlagen. In diesem Abschnitt wurde die Umsetzung dieser vorgeschlagenen Lösung in einer Testwohnung behandelt.

Die Implementierung des selbstlernenden Reglers in dezentralen Lüftungssystemen war erfolgreich. Es wurde eine Feldstudie in einer Smart-Home-Wohnung durchgeführt, in der zwei Bewohner drei Monate lang lebten. Es wurde ein IoT-Schema mit einer Nutzerschnittstelle entwickelt, über die die Bewohner die Lüftungsanlagen wie gewünscht bedienen konnten. Die Regelung lernte durch das Nutzerfeedback, sich an die Bedürfnisse der Bewohner anzupassen.

Das installierte dezentrale Lüftungssystem überzeugte durch einen ausreichenden Luftaustausch, um die Leistungsindikatoren für die relative Luftfeuchtigkeit und die CO<sub>2</sub>-Konzentration im gewünschten Bereich zu halten. Der Energieverbrauch konnte nicht erfasst werden. Die vorgeschlagene selbstlernende Strategie konnte die Regelfelder in jedem Raum individuell und zufriedenstellend anpassen. In der Küche und im Wohnzimmer wurde in der Regel die Lüftungsstufe erhöht, während in den Schlafzimmern die Luftmenge meist verringert wurde. Auch wenn längere Lernzeiten berücksichtigt werden sollten, konnte ein raumindividuelles Lernschema die Singularitäten des Nutzerverhaltens in jedem Raum korrekt erfassen.

Die Bewohner waren mit der Leistung der installierten Geräte zufrieden und hoben die Entwicklung der Nutzerschnittstelle hervor. Andererseits wurden die lauten Geräusche in den Schlafzimmern und die mangelnde Programmierbarkeit kritisiert. Smarte Wohnungslüftungssysteme wurden zwar als nützlich empfunden, sind aber nicht der einzige Aspekt, den die Nutzer für ihre Akzeptanz berücksichtigen. Die Umfrage ergab, dass die Motivationen und Präferenzen der Bewohner in Bezug auf die mechanische Lüftung unterschiedlich sein können, selbst wenn sie sich eine Wohnung teilen. Dies betont die Bedeutung der Individualisierung der Nutzerpräferenzen bei der Entwicklung innovativer, nutzerzentrierter Lüftungsregelungsstrategien.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] P. Wargocki, M. Sherman, W. de Gids, P. Wouters, F. Allard, R. Carrie, P. Carrer, S. Kephelopoulou, Proposed research agenda for achieving indoor air quality supporting health and comfort in highly energy efficient buildings, 35th AIVC Conference, Air Infiltration and Ventilation Centre 2013 (2013).
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1946-6 - Raumluftechnik - Teil 6 - Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung, 1st ed., Beuth Verlag GmbH, Berlin 91.140.30, 2019.
- [3] P. Carreira, A.A. Costa, V. Mansur, A. Arsénio, Can HVAC really learn from users?: A simulation-based study on the effectiveness of voting for comfort and energy use optimization, *Sustainable Cities and Society* 41 (2018) 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.043>.
- [4] W. O'Brien, A. Wagner, M. Schweiker, A. Mahdavi, J. Day, M.B. Kjærgaard, S. Carlucci, B. Dong, F. Tahmasebi, Da Yan, T. Hong, H.B. Gunay, Z. Nagy, C. Miller, C. Berger, Introducing IEA EBC annex 79: Key challenges and opportunities in the field of occupant-centric building design and operation, *Building and Environment* 178 (2020) 106738. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106738>.
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V., European Committee for Standardization, DIN EN 308. Wärmeaustauscher - Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 27.060.30, 1997.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V., European Committee for Standardization, International Organization for Standardization, DIN EN ISO 7730 - 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, 2nd ed., Beuth Verlag GmbH, Berlin 13.040.20; 13.180, 2006 (accessed 15 November 2017).
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V., European Committee for Standardization, DIN EN 16798-1: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik, 1st ed., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany 91.120.10, 2015.
- [8] European Commission, Richtlinie (EU) 2018/844 Des Europäischen Parlaments und des Rates: zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz, Brussels, Belgium, 2018.
- [9] PassivHaus Institut, Requirements and testing procedures for energetic and acoustical assessment of Passive House ventilation systems for certification as 'Passive House suitable component', Darmstadt, Germany, 2009.
- [10] F. Coydon, Holistic evaluation of conventional and innovative ventilation systems for the energy retrofit of residential buildings. PhD Thesis, Karlsruhe, Germany, 2015.
- [11] A. Merzkirch, Energieeffizienz, Nutzerkomfort und Kostenanalyse von Lüftungsanlagen in Wohngebäuden: Feldtests von neuen Anlagen und Vorstellung bedarfsgeführter Prototypen. PhD Thesis, 2015.
- [12] N. Alsen, Energetische und wirtschaftliche Bewertung von dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen. PhD Thesis, Kassel, Germany, 2017.
- [13] Deutsches Institut für Normung e.V., 18599-1 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Beuth Verlag GmbH 91.120.10; 91.140.01, 2016.

- [14] European Commission, Commission delegated regulation (EU) 1254/2014; supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of residential ventilation units, 2014.
- [15] World Health Organization, WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould, Druckpartner Moser, 2009.
- [16] H. Viitanen, A.-C. Ritschkoff, Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature, Swedish University of Agricultural Sciences, Report of Forest Products N. 221 (1991).
- [17] A.V. Arundel, E.M. Sterling, J.H. Biggin, T.D. Sterling, Indirect health effects of relative humidity in indoor environments, *Environ. Health Perspect.* 65 (1986) 351–361. <https://doi.org/10.1289/ehp.8665351>.
- [18] A. Ahlawat, A. Wiedensohler, S.K. Mishra, An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments, *Aerosol and air quality research* 20 (2020) 1856–1861. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0302>.
- [19] World Health Organization, "World Health Organization. Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effects., EURO Reports and Studies 78 (1983).
- [20] C.A. Erdmann, K.C. Steiner, M.G. Apte, Indoor carbon dioxide concentrations and sick building syndrome symptoms in the base study revisited: analyses of the 100 building dataset, *Proceedings of Indoor Air 2002* (2002).
- [21] de Gids W.F., Wouters P., CO2 as indicator for the indoor air quality - General principles, AIVC Information Paper 33 (2010) 1–4.
- [22] P.O. Fanger, Introduction of the olf and the decipol Units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors, *Energy and Buildings* 12 (1988) 1–6. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90051-5).
- [23] M. Abadie, P. Wargocki, Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings-Annex 68: Subtask 1: Defining the metrics. AIVC Contributed Report 17, United Kingdom, 2017.
- [24] M.V. Jokl, New units for indoor air quality: decicarbdiox and decitvoc, *International Journal of Biometeorology* 42 (1998) 93–111.
- [25] G. Clausen, L. Carrick, P.O. Fanger, S.W. Kim, T. Poulsen, J.H. Rindel, A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noise, *Indoor Air* 3 (1993) 255–262. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1993.00006.x>.
- [26] J. Toftum, A.S. Jorgensen, P.O. Fanger, Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort, *Energy and Buildings* 28 (1998) 15–23.
- [27] Y. Sunwoo, C. Chou, J. Takeshita, M. Murakami, Y. Tochihara, Physiological and Subjective Responses to Low Relative Humidity in Young and Elderly Men, *Journal of Physiological Anthropology* 25 (2006) 229-238.
- [28] M.V. Jokl, Thermal Comfort and Optimum Humidity: Part I, *Acta Polytechnica* 1 (2002) 12–24.
- [29] Der Spiegel, Spiegel Online (23 April 2018).
- [30] M. Merckx, G. Bruyneel, I. Pollet, J. Laverge, Temperature, draft and ventilation efficiency of room based decentralised heat recovery ventilation systems, *Proceedings of 39th AIVC Conference* (2018) 838–847.
- [31] X. Wu, Y. Liu, G. Liu, F. Wang, Z. Wang, Effect of Supply Air Temperature on Indoor Thermal Comfort in a Room with Radiant Heating and Mechanical Ventilation, *Energy Procedia* 121 (2017) 206–213.

- [32] H. Manz, H. Huber, A. Schälín, A. Weber, M. Ferrazzini, M. Studer, Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery, *Energy and Buildings* 31 (2000) 37–47. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00077-2).
- [33] B. Mahler, R. Himmler, Results of the evaluation study DeAL Decentralized facade integrated ventilation systems, 8th International Conference for Enhanced Building Operations (2008) 1–8.
- [34] B. Rasmussen, M. Machimbarrena, Integrating and Harmonizing Sound Insulation Aspects in Sustainable Urban Housing Constructions, COST Action TU0901 (2014).
- [35] A. Boerstra, J. Balvers, R. Bogers, R. Jongeneel, F. van Dijken, Residential ventilation system performance: outcomes of a field study in the Netherlands, 33rd AIVC Conference (2012).
- [36] J. van Dongen, Occupant behaviour and attitudes with respect to ventilation of dwellings. AIVC Contributed Report 08, 2007.
- [37] T. Chiang, G. Mevlevioglu, S. Natarajan, J. Padget, I. Walker, Inducing [sub]conscious energy behaviour through visually displayed energy information: A case study in university accommodation, *Energy and Buildings* 70 (2014) 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.035>.
- [38] D. Maier, Aufbau und Durchführung einer Mixed-Methods-Studie zu Lüftungsverhalten und Raumklima sowie der Einstellung bezüglich Lüftungssystemen. Master Thesis, Ingolstadt, Germany, 2020.
- [39] X. Ren, C. Zhang, Y. Zhao, G. Boxem, W. Zeiler, T. Li, A data mining-based method for revealing occupant behavior patterns in using mechanical ventilation systems of Dutch dwellings, *Energy and Buildings* 193 (2019) 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.047>.
- [40] S. D'Oca, T. Hong, A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices, *Building and Environment* 82 (2014) 726–739. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.021>.
- [41] N. Artmann, H. Manz, P. Heiselberg, Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe, *Applied Energy* 84 (2007) 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>.
- [42] M. Gruner, The Potential of Façade-Integrated Ventilation Systems in Nordic Climate: Advanced decentralised ventilation systems as sustainable alternative to conventional systems. Master Thesis, 2012.
- [43] G. Rojas, R. Pfluger, W. Feist, Ventilation concepts for energy efficient housing in Central European climate – A simulation study comparing indoor air quality, mould risk and ventilation losses, *Proceedings of Indoor Air 2016* (2016).
- [44] A. Mikola, R. Simson, J. Kurnitski, The Impact of Air Pressure Conditions on the Performance of Single Room Ventilation Units in Multi-Story Buildings, *Energies* 12 (2019) 2633. <https://doi.org/10.3390/en12132633>.
- [45] A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, D. Waldmann, Field tests of centralized and decentralized ventilation units in residential buildings – Specific fan power, heat recovery efficiency, shortcuts and volume flow unbalances, *Energy and Buildings* 116 (2016) 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.008>.
- [46] L. Baldini, F. Meggers, H. Leibundgut, Advanced Decentralized Ventilation: How Wind Pressure Can Be Used to Improve System Performance and Energy Efficiency, *PLEA 2008* (2008).
- [47] N. Carbonare, Occupant-centered control strategies for decentralized residential ventilation. PhD Thesis, Karlsruhe, Germany, 2021.
- [48] D. Kolokotsa, T. Tsiavos, G.S. Stavrakakis, K. Kalaitzakis, E. Antonidakis, Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal±visual comfort and indoor air

- quality satisfaction, *Energy and Buildings* 33 (2001) 531–543.
- [49] M. Molina-Solana, M. Ros, M. Delgado, Unifying fuzzy controller for indoor environment quality, 2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS) (2013) 1080–1085. <https://doi.org/10.1109/IFSA-NAFIPS.2013.6608550>.
- [50] M.A.K. Jaradat, M.A. Al-Nimr, Fuzzy logic controlled deployed for indoor air quality control in naturally ventilated environments, *Journal of Electrical Engineering* 60 (2009) 12–17.
- [51] E.H. Mamdani, Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis, *IEEE Trans. Comput. C-26* (1977) 1182–1191. <https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779>.
- [52] F. Jazizadeh, A. Ghahramani, B. Becerik-Gerber, T. Kichkaylo, M. Orosz, Human-Building Interaction Framework for Personalized Thermal Comfort-Driven Systems in Office Buildings, *J. Comput. Civ. Eng.* 28 (2014) 2–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000300).
- [53] W. Kastner, M.J. Kofler, C. Reinisch, Using AI to realize energy efficient yet comfortable smart homes, 2010 IEEE International Workshop (2010) 169–172. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2010.5548612>.
- [54] D. Daum, F. Haldi, N. Morel, A personalized measure of thermal comfort for building controls, *Building and Environment* 46 (2011) 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.011>.
- [55] H.B. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison, J. Bursill, Development and implementation of a thermostat learning algorithm, *Science and Technology for the Built Environment* 24 (2018). <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1328956>.
- [56] J.Y. Park, T. Dougherty, H. Fritz, Z. Nagy, LightLearn: An adaptive and occupant centered controller for lighting based on reinforcement learning, *Building and Environment* 147 (2019) 397–414. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.028>.
- [57] J. Vázquez-Canteli, S. Ulyanin, J. Kampf, Z. Nagy, Adaptive multi-agent control of hvac systems for residential demand response using batch reinforcement learning, 2018 Building Performance Analysis Conference (2018) 683–690.
- [58] A. Ghahramani, J. Pantelic, C. Lindberg, M. Mehl, K. Srinivasan, B. Gilligan, E. Arens, Learning occupants' workplace interactions from wearable and stationary ambient sensing systems, *Applied Energy* 230 (2018) 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.096>.
- [59] G.Y. Yun, K. Steemers, Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer, *Building and Environment* 43 (2008) 1471–1482. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.08.001>.
- [60] F. Pedregosa, G. Varoquax, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, É. Duchesnay, Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research* 12 (2011) 2825–2830.
- [61] C.J. Burges, A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition, *Data Mining and Knowledge Discovery* 2 (1998) 121–167. <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555>.
- [62] Z. Cheng, Q. Zhao, F. Wang, Y. Jiang, L. Xia, J. Ding, Satisfaction based Q-learning for integrated lighting and blind control, *Energy and Buildings* 127 (2016) 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.067>.
- [63] U. Reiner, M. Kahl, T. Leibfried, F. Allering, H. Schmeck, MeRegioMobil-Lab – A Development Environment for Future Smarthomes, *Proceedings of the VDE Kongress* (2010).
- [64] F. Durier, R. Carrié, M. Sherman, What is smart ventilation?, *AIVC VIP* 38 (2018).
- [65] Viessmann GbmH, Dezentrales Wohnungslüftungsgerät Vitovent 100-D mit Wärmerückgewinnung, 01.08.19. <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/wohnungslueftung/dezentrale->

wohnungslueftung/vitovent-100-d.html (accessed 20.07.20).

- [66] J. Laverge, I. Pollet, S. Vandekerckhove, Big data and DCV: smart ventilation?, Proceedings of the ISIAQ Indoor Air 2018 conference. (2018).
- [67] L. Scharnhorst, T. Sandmeier, A. Ardone, W. Fichtner, The Impact of Economic and Non-Economic Incentives to Induce Residential Demand Response—Findings from a Living Lab Experiment, *Energies* 14 (2021) 2036. <https://doi.org/10.3390/en14082036>.
- [68] R. Angsten, T. Hartmann, Raumweise Lüftungsgeräte in der Wohnungslüftung - pro und contra, *GI Wissenschaft* 3 (2017) 210–215.
- [69] S.K. Gupta, S. Atkinson, I. O'Boyle, J. Drogo, K. Kar, S. Mishra, J.T. Wen, BEES: Real-time occupant feedback and environmental learning framework for collaborative thermal management in multi-zone, multi-occupant buildings, *Energy and Buildings* 125 (2016) 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.084>.