

## SIMULATION VON LÜFTUNGSSYSTEMEN UND ENTWURF VERSCHIEDENER REGLER FÜR OPTIMIERTE LUFTQUALITÄT UND ENERGIEEFFIZIENZ

D. Aimer<sup>1</sup>, M. Wirnsberger<sup>1</sup> und H. Krause<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TH Rosenheim, Rosenheim, Deutschland

### KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Regler für Wohnraumlüftungsanlagen untersucht. Als Bewertungsgrößen wurden die Lüftungswärmeverluste und die kumulierte Grenzwertüberschreitung für CO<sub>2</sub> und relative Luftfeuchte verwendet. Dafür wurde in Matlab/Simulink ein Multizonen-Simulationsmodell erstellt. Untersucht wurde ein zentrales, ein dezentrales alternierendes (Pendellüftung) sowie ein nichtalternierendes (Einzelraumlüftung) Lüftungssystem. Jedes der Lüftungssysteme wurde mit konstantem Volumenstrom, einem PI- und einem Fuzzy-Regler (Ausnahme: Pendellüftung) simuliert. Gegenüber einem Lüftungssystem mit konstantem Volumenstrom, kann durch Regelung bei mindestens gleicher Luftqualität der Lüftungswärmeverlust um mindestens ein Drittel reduziert werden.

### EINLEITUNG

Heutzutage verbringen Menschen bis zu 90 % ihrer Zeit in Gebäuden (Klepeis, 2001). Luftqualität gewinnt daher immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig werden Gebäude immer luftdichter gebaut, um Wärmeverluste durch unkontrollierte Infiltration zu reduzieren. Im konstanten Betrieb versorgt eine Lüftungsanlage die Wohneinheit stetig mit Frischluft, wodurch ein ausreichender Luftwechsel sichergestellt wird. Jedoch wird auch dann gelüftet, wenn sich keine Personen im Raum befinden. Durch eine Anpassung des Luftaustauschs an den tatsächlichen Bedarf, können bei gleicher Luftqualität die Lüftungswärmeverluste reduziert werden (Rotger-Griful, 2016). In den letzten Jahrzehnten gab es viele Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Regelungen von Wohnraumlüftungsanlagen auf den Energieverbrauch und die Luftqualität. Beispielhaft sind Ein-/Aus Regler (Kesselring, 1993), PI-Regler (Lachhab, 2015) und Fuzzy-Regler zu nennen.

Lüftungskonzepte werden durch die (DIN 1946-6, 2019) in Systeme mit freier und mit ventilatorgestützter Lüftung unterteilt. In dieser Arbeit wurde ein zentrales Lüftungssystem, ein alternierendes dezentrales Lüftungssystem

(Pendellüfter) und ein dezentrales, nichtalternierendes Lüftungssystem (Einzelraumlüftungsgeräte) betrachtet.

Da die Lüftungswärmeverluste maßgeblich von den Außentemperaturen abhängen, ist es notwendig für die Ermittlung der Einsparpotentiale den Temperaturverlauf eines ganzen Jahres zu betrachten (Guyot, 2019). Das Ziel der Arbeit war es auch, komplexere Regler, wie z.B. Fuzzy-Regler, zu untersuchen. Deshalb wurde nicht auf vorhandene Multizonen-Simulationsprogramme wie CONTAM (Dols, 2000) zurückgegriffen, sondern die benötigten Gleichungen und Algorithmen in einer eigenen Simulink-Bibliothek implementiert.

### MODELLIERUNG UND ENTWICKLUNG

#### Betrachteter Wohnungsgrundriss

Als Vorlage für das Simulationsmodell wurde die Forschungswohnung an der TH Rosenheim verwendet (Wirnsberger, 2019). Der vorhandene Grundriss wurde für die Untersuchung um ein Büro und ein Kinderzimmer erweitert, um auch raumübergreifende Lüftungskonzepte untersuchen zu können (siehe Abschnitt Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung). In Abbildung 1 ist der verwendete Grundriss abgebildet.

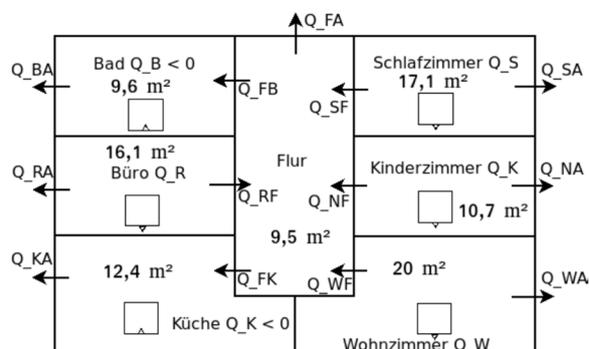


Abbildung 1: Verwendeter Wohnungsgrundriss, mit Flächen der Räume, Raumhöhe ist 2,8 m

#### Lüftungssysteme

Die Volumenströme der zentralen Lüftung und nichtalternierenden dezentralen Lüftung wurden nach

(DIN 1946-6, 2019) ausgelegt. Diese bewegen sich bei geregelter Lüftung zwischen Lüftung zum Feuchteschutz (Minimum) und Intensivlüftung (Maximum). Bei unregelmäßiger Lüftung wird jeder Raum kontinuierlich mit dem ermittelten Nennluftvolumenstrom belüftet.

Bei der zentralen Lüftung sind Schlaf-, Wohn-, Kinderzimmer und Büro Zulufräume sowie Bad und Küche Ablufträume nach (DIN 1946-6, 2019). Die einfachste Regelung bei zentralen Anlagen, ist die Abluftregelung. Hierbei wird als Regelgröße die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Abluftsammeleitung verwendet. Die Aufteilung der Volumenströme auf die einzelnen Räume ist hier konstant.

Ein komplexeres System stellt die zentrale Lüftungsanlage mit Einzelraumregelung dar. Hierbei wird in jedem Raum ein CO<sub>2</sub>-Sensor und eine Stelleinrichtung zur Regelung des Volumenstroms benötigt. Dieses System erlaubt eine Regelung der einzelnen Räume sowie die dynamische Aufteilung der Volumenströme je nach Bedarf.

Bei den dezentralen Lüftungssystemen befindet sich in jedem Raum mindestens ein Lüftungsgerät. Unterschieden wird dabei zwischen alternierenden und nichtalternierenden Lüftungsgeräten. Bei nichtalternierenden Lüftungsgeräten befinden sich Zu- und Abluftventilator in einem Gerät. Die Zu- und Abluftvolumenströme sind so für jeden Raum immer ausbalanciert. Dadurch findet kein Luftaustausch über den Flur statt. Die Wärmerückgewinnung erfolgt über einen rekuperativen Wärmetauscher.

Alternierende Lüftungsgeräte (auch Pendellüfter genannt) sind Lüftungsgeräte mit einem Lüfter und regenerativem Wärmetauscher. Bei der Pendellüftung findet ein periodischer Wechsel zwischen Zu- und Abluftbetrieb statt, um eine Wärmerückgewinnung zu ermöglichen. Als Grundlage für die Simulation wurde der Pendellüfter PP60 der Fa. Maico verwendet (Maico, 2019). Dieser wechselt alle 70 s die Luftströmung. Für die Änderung der Luftströmung benötigt der Lüfter 11 s, in denen der mittlere Volumenstrom näherungsweise 0 m<sup>3</sup>/h beträgt (Wirmsberger, 2019). Der Pendellüfter hat einen maximalen Fördervolumenstrom von 45 m<sup>3</sup>/h. Um einen mit den anderen Lüftungssystemen vergleichbaren Luftaustausch zu erreichen, wird jeder Raum mit zwei Lüftern ausgestattet, sodass der mittlere zugeführte Volumenstrom annähernd 45 m<sup>3</sup>/h ist. Die Pendellüfter in den Ablufträumen sind gegengleich getaktet, sodass ein Abluftraum ein in sich geschlossenes System darstellt. Die zwei Pendellüfter eines Zulufrumes sind jeweils gleich getaktet. So erfahren Zu- und Ablufträume die gleiche mittlere Frischluftzufuhr. Jedoch findet zwischen den Zulufräumen zusätzlich ein Luftaustausch über den Flur statt. Über die gegengleiche Taktung von jeweils zwei gemeinsam geregelten Zulufräumen (Regelgruppen, siehe Abschnitt Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung) wird eine ausgeglichene

Volumenstrombilanz sichergestellt. Die dynamische Einteilung der Zulufräume in Regelgruppen bietet Spielraum für Optimierungen.

Bei allen Regelkonzepten, außer der Abluftregelung bei der zentralen Lüftungsanlage, kann der Zu- bzw. Abluftvolumenstrom raumweise eingestellt sowie die CO<sub>2</sub>-Konzentration raumweise geregelt werden.

Der Luftaustausch zwischen den Räumen findet stets über den Flur statt. Die Wohnung wird als luftdicht angenommen.

Ziel ist es, den Einfluss der Regler in Kombination mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde für alle Lüftungssysteme eine Rückwärmezahl von 0,8 angenommen.

### Belegung der Wohnung

Die für die Simulation verwendete, tägliche Raumbelugung wurde für eine vierköpfige Familie angenommen und ist in Abbildung 2 aufgeführt. Es wird angenommen, dass es sich um 2 berufstätige Erwachsene sowie zwei schulpflichtige Kinder handelt. Die CO<sub>2</sub>-Emission ist dabei pro Person 20 l/h im Wachzustand und 10 l/h beim Schlafen (Seifert, 2019).

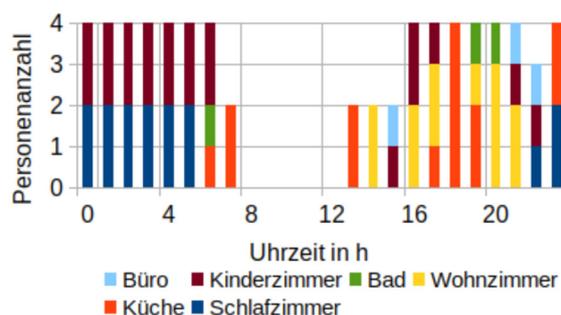


Abbildung 2: Tagesverlauf der Raumbelugung

Die Werte für die raumweise Feuchteabgabe sind in Anlehnung an (DIN 4108, 2010) gewählt und in Abbildung 3 dargestellt.

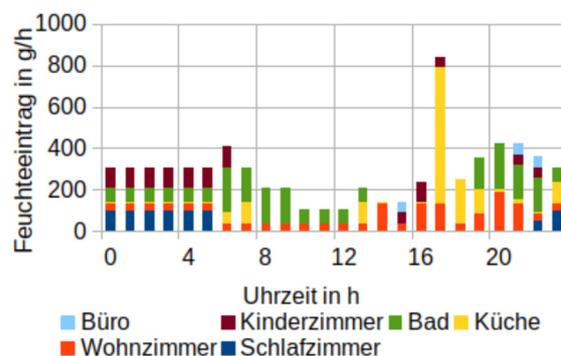


Abbildung 3: Tagesverlauf, Feuchteemission

Personen geben demnach 50 g/h im Ruhezustand ab. Es wird angenommen, dass sich 10 Pflanzen in der Wohnung befinden, die jeweils 2 g/h Wasser abgeben. Weiter wird täglich ein Kochvorgang inkl. 20 Minuten Geschirrspülen, einmal Duschen pro Person sowie einmal Wäschetrocknung im Bad angenommen.

## Wetterdaten

Die Lüftungswärmeverluste hängen, neben dem Luftwechsel und dem Wärmerückgewinnungsgrad, von der Außentemperatur ab und wurden deshalb für alle Heiztage eines Jahres ermittelt (Aimer, 2019). Verwendet wurde ein TRY-Datensatz des Standorts Mühlendorf am Inn (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2010).

## Modellierung des Multizonenmodells

Die Stoffmengenkonzentration wird für jeden Raum nach Gleichung (1) bestimmt (die Berechnung erfolgt analog für die spezifische Luftfeuchte) (Aimer, 2019).

$$\sigma = \sigma_{aus} = \int Q_{CO_2, Raum} + \sigma_{ein} Q_{Lüftung} - \sigma Q_{Lüftung} dt \frac{1}{V_{Raum}} + \sigma_{init} \quad (1)$$

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

Die volumenspezifische CO<sub>2</sub>-Konzentration  $\sigma$  ergibt sich durch umstellen der Volumenstrombilanz. Berechnet wird die Konzentration aus der Summe der Startkonzentration  $\sigma_{init}$  und dem Verhältnis des CO<sub>2</sub>-Volumens im Raum zum Raumvolumen  $V_{Raum}$ . Das CO<sub>2</sub> im Raum setzt sich zusammen aus dem Integral des Volumenstroms des im Raum emittierten CO<sub>2</sub>  $Q_{CO_2, Raum}$  sowie des CO<sub>2</sub> der Zuluft-  $\sigma_{ein} Q_{Lüftung}$  und Abluftvolumenströme  $\sigma Q_{Lüftung}$  des Raums.

Zusätzlich wurde die Adsorption von Wasserdampf in den Innenflächen der Forschungswohnung über das PT<sub>1</sub>-Glied in Formel (2) modelliert. Der Verstärkungsfaktor und die Zeitkonstante wurden dafür aus einer Messreihe zum zeitlichen Adsorptionsverhalten von Sperrholz aus (Klinge, 2016) ermittelt.

$$G_W(s) = \frac{\Delta m_{w,w}(s)}{\Delta x_v(s)} = \frac{\kappa_{ad} A}{\tau_{ad} s + 1} = \frac{5,8345 \text{ kg/m}^2 A}{5hs + 1} \quad (2)$$

Für mehr Informationen zur Modellierung, siehe (Aimer 2019).

## Bewertungsgrößen

Die Lüftungswärmeverluste wurden über die zum Aufheizen der Außenluft auf Raumtemperatur sowie der zur Verdunstung bei Feuchtequellen innerhalb der Wohnung benötigten Enthalpie, wie in Formel (3) genähert.

$$\begin{aligned} \dot{H}_V &= \dot{H}_W + (\vartheta_i - \vartheta_a)(c_{p,l}(1 - x_a) + c_{p,w}x_a) \cdot \\ &\quad \cdot Q_{f,g} \rho_{f,i} \\ H_{V,rc} &= 0,2H_V = 0,2 \int \dot{H}_V dt \end{aligned} \quad (3)$$

Mit  $dH_w/dt$  als Verdunstungsenthalpiestrom,  $\vartheta_i$  als Innen- und  $\vartheta_a$  als Außentemperatur,  $c_{p,l}$  als spezifische Wärmekapazität von trockener Luft und  $c_{p,w}$  von Wasserdampf,  $x_a$  als spezifische Luftfeuchte der Außenluft,  $Q_{f,g}$  Gesamtfortluftvolumenstrom sowie  $\rho_{f,i}$  als Dichte feuchter Luft im Innenraum.  $H_v$  bezeichnet die Lüftungsenergieverluste ohne Wärmerückgewinnung und  $H_{v,rc}$  die Lüftungsenergieverluste mit einem für alle Lüftungssysteme angesetzten Wärmerückgewinnungsgrad von 80 %.

Bei der Wohnraumlüftung existieren in Deutschland keine Grenzwerte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Jedoch hat sich der Pettenkofer-Grenzwert, nach dem Luft mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration größer als 1000 ppm als schlecht zu bezeichnen ist, als Grenzwert etabliert (Guyot, 2019). Da die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Differenz zur Umgebungskonzentration geregelt werden soll, wird deshalb ein Sollwert von 600 ppm (bei einer angenommenen mittleren Umgebungskonzentration von 400 ppm) veranschlagt.

Die kumulierte Grenzwertüberschreitung der CO<sub>2</sub>-Konzentration, die CO<sub>2</sub>-Überstunden  $\tau_{ex}$  werden nach Formel (4) berechnet und haben die Einheit ppm·h. Diese Bewertungsgröße ist interessant, da nicht nur die Grenzwertüberschreitung allgemein, sondern auch deren Höhe und Dauer mit einfließt.

$$\tau_{ex} = \int \sigma - \sigma_{soll} dt |_{\sigma > \sigma_{soll}} \quad (4)$$

Berechnet werden die CO<sub>2</sub>-Überstunden raumweise, für alle Heiztage eines Jahres, da in Deutschland Lüftungsanlagen üblicherweise, außer zu Wartungszwecken, immer laufen (DIN1946-6, 2019).

Analog dazu werden Feuchteüberstunden nach Formel (5) berechnet. Die relative Feuchte in Innenräumen sollte  $\varphi_{ref,max} = 75\%$  nicht überschreiten, um Schimmel zu vermeiden.

$$\tau_{ex,\varphi} = \int \varphi - \varphi_{ref,max} dt |_{\varphi > \varphi_{ref,max}} \quad (5)$$

Ausschlaggebend für die Bewertung ist der Raum mit den meisten CO<sub>2</sub>-Überstunden bzw. Feuchteüberstunden über das Jahr. Dieser Wert geht dann in die Bewertung des Systems ein.

## Regler

Eine Lüftungsregelung kann gegenüber der konstanten Lüftung einige Vorteile mit sich bringen. Primäres Ziel der geregelten Lüftung ist es, die Lüftungswärmeverluste zu reduzieren und gleichzeitig mindestens die gleiche Luftqualität wie bei konstantem Betrieb zu erreichen. Für die Umsetzung der Regelung wurde ein PI-Regler und ein Fuzzy-Regler implementiert. Dabei wurde bei beiden Reglern auf die maximale CO<sub>2</sub>-Sollkonzentration geregelt. Bei der Fuzzy-Regelung wurde zudem die relative Luftfeuchte in einem Bereich zwischen 30 und 75 % in allen Räumen geregelt. Bei der PI-Regelung fand hier optional eine Regelung auf 50 % relative Luftfeuchte, anstatt auf die CO<sub>2</sub>-Sollkonzentration, beispielsweise im Bad bei der Einzelraumlüftung, statt.

Die PI-Regelung wurde in der Simulation für alle Lüftungssysteme verwendet. Sie besteht je nach Einsatz aus der zentralen Einheit (siehe Formel (6)) sowie aus unterschiedlichen vor- und nachgeschalteten Gliedern, die beispielsweise für die Begrenzung der Volumenströme oder für eine optimale Aufteilung der Luft auf die Räume sorgen. Siehe für weitere Details (Aimer, 2019).

Wegen der beschränkten Stellgrößen (nach oben und unten begrenzte Volumenströme) wurde der PI-Regler mit einem Anti-Windup-Filter mit Back Calculation nach (Visioli, 2006) erweitert, um eventuellen Verzögerungen bei der Reaktion des Reglers bei längerem Über- oder Unterschreiten des erlaubten Bereiches vorzubeugen. Der PI-Regler wurde damit nach Formel (6) umgesetzt.

$$Q_{sg,0} = eP + \int Ie + \frac{Q_{sg} - Q_{sg,0}}{T_t} dt \quad (6)$$

Mit  $e$  als Abweichung vom Sollwert,  $P$  als proportionale Verstärkung,  $I$  als integrative Verstärkung,  $T_t = P/I$  als Zeitkonstante des Anti-Windup-Filters,  $Q_{sg,0}$  als Reglerausgangsgröße vor der Steuergrößenbeschränkung und  $Q_{sg}$  als beschränkte Steuergröße.

Geeignete Werte für  $P$  und  $I$  wurden für jeden Regler nach dem Verfahren von Ziegler und Nichols (Unbehauen, 2007) ermittelt.

Die Fuzzy-Regelung wurde für die nichtalternierende Einzelraumlüftung sowie für die zentrale Lüftung verwendet. Sie erlaubt, es auf Basis von verschiedenen Eingangsgrößen (hier Außentemperatur, relative Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentration der Räume) sowie zuvor festgelegten, verbalen Entscheidungsregeln (Inferenzregeln), automatisch Entscheidungen zur Steuerung zu treffen. Ein Beispiel hierfür wäre in etwa: „Viel Lüften, wenn CO<sub>2</sub>-Konzentration hoch und relative Luftfeuchte hoch ist“.

Neben den Inferenzregeln sind die Fuzzy-Mengen (engl.: *fuzzy sets*) ein wichtiges Konzept dieser Regelung. Die Fuzzy-Mengen erlauben partielle Zugehörigkeiten von Eingangsgrößen, wie CO<sub>2</sub>-

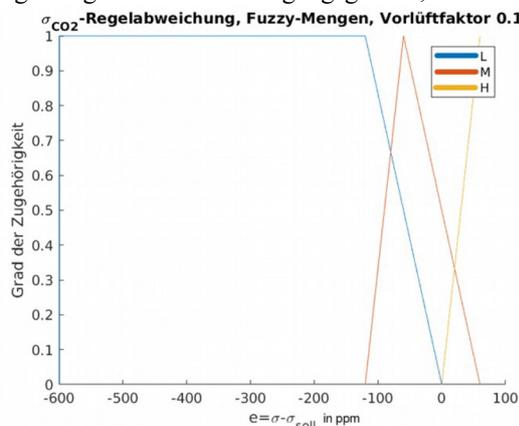


Abbildung 4: Fuzzy-Mengen für  $e = \sigma - \sigma_{soll}$ , L:  $\sigma - \sigma_{soll}$ , L: niedrige, M: mittlere, H: hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration, aus (Aimer, 2019)

Konzentration, relative Luftfeuchte oder Außentemperatur zu bestimmten Kategorien, wie z.B.: hoch, mittel, niedrig.

Dazu wurden beispielsweise für die CO<sub>2</sub>-Konzentration (hier handelt es sich um die Regelabweichung der Differenz zur Außenluft) Zugehörigkeitsfunktionen wie in Abbildung 4 angewendet. Auf Basis der bei der Fuzzifizierung ermittelten Zugehörigkeitsgrade aller Eingangsgrößen zu den jeweiligen Eingangs-Fuzzy-Mengen (L: niedrig, M: mittel, H: hoch) werden so mithilfe der Inferenzregeln und anschließend mithilfe der Regeln zur Verknüpfung von Fuzzy-Mengen die Zugehörigkeitsgrade zu den Ausgangs-Fuzzy-Mengen berechnet. Aus diesen Zugehörigkeitsgraden wird bei der Defuzzifizierung der benötigte Volumenstrom als Ausgangsgröße berechnet.

Für mehr Informationen zur entworfenen Fuzzy-Regelung, siehe (Aimer, 2019).

### Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung

Die PI-Regelung bei der Pendellüftung unterliegt bei raumweiser Ansteuerung wegen des raumübergreifenden Charakters und der periodischen Richtungswechsel der Volumenströme besonderen Anforderungen: Zum einen soll grundsätzlich die Volumstrombilanz im Flur durch die Lüfteransteuerung für einen Druckausgleich immer gleich 0 sein, zum anderen soll jeder Raum möglichst nach den jeweiligen Anforderungen belüftet werden. Für die dafür nötige Koordination zwischen den Räumen wird im Folgenden der Lösungsansatz der Bildung von Regelgruppen (Benutzung eines Reglers für zwei Räume mit ähnlichem Lüftungsbedarf) vorgestellt.

Die Idee der Regelgruppen ist es, dass jeweils zwei der vier Zulufräume einer Gruppe zugeteilt werden, für die dann ein gemeinsamer Regler eine gemeinsame Steuergröße berechnet. Die Zuordnung kann fest sein oder dynamisch, je nach Lüftungsbedarf erfolgen. Bei der dynamischen Zuordnung werden die Räume standardmäßig der Regelgröße nach geordnet und die ersten zwei sowie die letzten zwei jeweils in eine Gruppe eingeteilt. Für jede dieser Gruppen wird dann die höhere Regelgröße der beiden Räume verwendet, sodass einem Überschreiten des Sollwertes entgegengewirkt wird. Dies kann dazu führen, dass ein Raum in einer Gruppe mehr belüftet wird als nötig.

Die dynamische Einteilung in Regelgruppen, die sich eigentlich positiv auf die Lüftungseffektivität und mindernd auf die Lüftungswärmeverluste auswirken sollte, zeigte in der Simulation unerwünschte Effekte wie häufige Stellgrößen sprünge oder Phasenumkehr des periodischen Wechsels aus Zu- und Abluftbetrieb (Weiterlüften eines Lüfters in die gleiche Richtung nach einer halben Periode aufgrund eines Wechsels der Regelgruppe), die sich sehr ungünstig auf die Wärmerückgewinnung auswirken können. Deshalb wurden verschiedene Modifikationen der dynamischen Regelgruppeneinteilung durch Setzen

von Randbedingungen (wie: Verhindern der Phasenumkehr der Pendellüfter eines Raumes, zwei Räume mit der geringsten Differenz der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bilden die erste Gruppe oder Vorfiltern der Regelgrößen am Reglereingang über ein PT<sub>2</sub>-Glied) entwickelt. Es stellte sich heraus, dass diese zusätzliche Dynamik durch Vorfiltern der Regelgrößen mit dem PT<sub>2</sub>-Glied relativ gut unterbunden werden kann. Eine weitere, einfachere Möglichkeit stellt die feste Zuweisung von Räumen mit tendenziell gleichzeitiger Raumbelugung, wie z.B.: Schlaf- und Kinderzimmer (beide in der Nacht durch jeweils zwei Personen belegt) in gemeinsame Regelgruppen dar.

Für mehr Informationen, siehe (Aimer, 2019).

### SIMULIERTE KONFIGURATIONEN, VERGLEICH DER KONFIGURATIONEN UND VARIATIONEN

Um eine Bewertung und einen Vergleich der Konfigurationen aus Lüftungssystemen und Reglern vornehmen zu können und möglichst ein jeweiliges Optimum zu ermitteln, wurden jeweils entsprechende Parameter der Regelung oder der Ansteuerung der Lüftungssysteme, variiert von denen angenommen wurde, dass sich diese auf die Energieverluste und die Luftqualität auswirken können. Die wichtigsten dieser vorgenommenen Variationen sind im Folgenden geschildert.

Als Gütekriterium für die simulierten Variationen soll gelten, dass die Energieeinsparung möglichst hoch und die CO<sub>2</sub>-Überstunden  $\tau_{ex}$  nicht höher, als bei der zentralen Lüftung im konstanten Betrieb sein sollen. Die zentrale Lüftung wurde hier als Referenz gewählt, da sie in der Simulation die besten Werte unter den konstanten Lüftungen erzielt.

#### **Zentral Lüftung, Abluftregelung: Sollwertabsenkung**

Die CO<sub>2</sub>-Überstunden sind bei der Abluftregelung mehr als doppelt so hoch, wie bei der unregelmäßigen Lüftung (siehe Abbildung 5). Dies liegt zum einen an einer Verzögerung der Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Zulufräumen und zum anderen daran, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Abluft lediglich die Mischkonzentration der Ablufträume darstellt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einzelnen Räumen kann aber weit über dem Sollwert liegen. Deshalb soll hier eine Verringerung von  $\tau_{ex}$  erreicht werden, indem der Sollwert für die Regelung der Abluftkonzentration jeweils um 25, 50 und 75 % abgesenkt wird (Der Sollwert zur Berechnung von  $\tau_{ex}$  bleibt hierbei unverändert bei 600 ppm gegenüber Außenkonzentration). Die Idee dabei ist, dass durch den geringeren Sollwert bereits früher gelüftet wird, was die Verzögerung bei der Messung der teils sehr hohen Konzentrationen in den Zulufräumen ausgleichen könnte.

#### **Zentrale Lüftung, Fuzzy-Regelung: Variation Vorlüftfaktor**

Der Vorlüftfaktor  $k_{vl}$  beschreibt, um welchen Anteil der Regler bei relativ hohen Außentemperaturen (Stunde des jeweiligen Tages mit der höchsten Temperatur) unter die Sollgröße (CO<sub>2</sub>-Konzentration) Regeln darf. Die Idee der Vorlüftung ist, den Luftaustausch zeitlich zu verschieben und dadurch Energieeinsparungen im Winter zu bewirken.  $k_{vl}$  beeinflusst dabei die Regelung als Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen zu den Fuzzy-Mengen L und M der CO<sub>2</sub>-Konzentration (siehe Abbildung 4).

Bei dieser Variation soll die in (Aimer, 2019) genauer beschriebene Idee mittels Variation von  $k_{vl}$  bei der Kombination aus zentraler Lüftung und Fuzzy-Regelung auf Sinnhaftigkeit überprüft sowie gegebenenfalls ein optimaler Parameter  $k_{vl}$  ermittelt werden. Dazu wurden zunächst Simulationen mit den Werten 0,1, 0,2 und 0,3 als Vorlüftfaktor durchgeführt, um die Auswirkung auf die Gesamtenergiebilanz durch das Vorlüften anhand der Jahreswerte zu überprüfen. Zudem wurde eine Simulation ohne Vorlüften durchgeführt.

#### **Pendellüfter – PI-Regler: Modifikationen der Gruppeneinteilung, feste Gruppen**

Im Abschnitt Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung wurden verschiedene Modifikationen der dynamischen Regelgruppeneinteilung erwähnt. Hier wurden diese zusammen mit den drei Möglichkeiten, die vier Räume in fixe Zweiergruppen einzuteilen miteinander verglichen.

#### **Variationen des konstanten Betriebs bei allen Lüftungssystemen um Faktor C**

Zur Untersuchung der Möglichkeiten einer konstanten Lüftung wird, in Anlehnung an die Lüftungsstufen nach (DIN1946-6, 2019) (Lüftung zum Feuchteschutz:  $Q_{FL}=0,2Q_{NL}$ , Nennlüftung:  $Q_{NL}$  und Intensivlüftung  $Q_{IL}=1,3Q_{NL}$ ), eine Simulation für jede Variation der konstanten Volumenströme um einen Faktor C durchgeführt. Dabei soll keine optimale Einstellung, sondern die Auswirkung einer erhöhten, oder verringerten Lüftung (von einer angesetzten Ausgangslage aus) auf die Lüftungsenergieverluste sowie auf die CO<sub>2</sub>-Überstunden untersucht werden.

Für mehr Informationen zu den simulierten Variationen, siehe (Aimer, 2019).

### AUSWERTUNG UND DISKUSSION

#### **Ergebnisse aus dem Vergleich der Variationen**

Abbildung 5 zeigt alle simulierten Konfigurationen aus Lüftungssystemen und Reglern mit den zuvor beschriebenen Variationen im Vergleich bezüglich Lüftungswärmeverlusten  $H_{v,rc}$  und Luftqualität bzw. CO<sub>2</sub>-Überstunden  $\tau_{ex}$ . Die Einträge der Legende listen jeweils das Lüftungssystem, die verwendete Regelung und ggf. zusätzliche Parameter auf, die den zuvor

genannten Variationen entsprechen und beschreiben so die Simulierten Fälle.

Als beste Einstellung der Abluftregelung mit Sollwertabsenkung resultiert eine Absenkung von 50 %. Diese hat allerdings fast den gleichen Jahresenergieverlust wie die konstante Lüftung.

Bei der Vorlüftung während erhöhten Außentemperaturen bei der fuzzy-geregelten zentralen Lüftung stellte sich bei erhöhtem  $k_{vl}$  keine Verbesserung bezüglich Energieverlusten ein. Stattdessen führte die Deaktivierung der Vorlüftung zu den niedrigsten Energieverlusten. Diese Idee des Vorlüftens stellt somit keine Möglichkeit der Energieeinsparung dar. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass wegen der Durchmischung der Raumluft bei geringerer  $\text{CO}_2$ -Konzentration bei gleichbleibendem Zuluftvolumenstrom weniger  $\text{CO}_2$  aus dem Raum abgeführt wird, als bei hoher  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Das simulierte Vorlüften findet also mit analog zur  $\text{CO}_2$ -Konzentration abnehmender Effektivität statt.

Aus dem Vergleich der Einteilung der Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung geht hervor, dass eine feste Einteilung von Schlaf- und Kinderzimmer aufgrund der gleichzeitigen Belegung dieser Räume in der Nacht zur effizientesten Lüftung unter den festen Gruppeneinteilungen führt. Eine zusätzliche, leichte Verbesserung ist bei dynamischer Regelgruppeneinteilung bei allen Modifikationen sichtbar, wobei hier nur die Modifikation mit vorgefilterten Reglereingangsgrößen häufige Stellgrößensprünge und Phasenumkehrungen verhindert. Diese sollte deshalb als einzige Modifikation unter den dynamischen Gruppeneinteilungsverfahren aufgrund der genannten Einschränkungen bei der tatsächlichen Wärmerückgewinnung gewählt werden sollte.

Aus der Variation der konstanten Lüftungssysteme um bestimmte Faktoren geht hervor, dass ohne Regelung stets ein Kompromiss zwischen gesteigerter Luftqualität und Energieverlusten (bei erhöhtem Volumenstrom) und verringerter Luftqualität und Energieverlusten (bei verringertem Volumenstrom) geschlossen werden muss. Das inverse Verhältnis zwischen  $\tau_{ex}$  und  $H_{v,rc}$  bei den unregulierten Systemen sollen die in Abbildung 5 eingezeichneten Kurven für alle drei Lüftungssysteme verdeutlichen.

### Vergleich geregelte und unregelte Lüftung

Aus Abbildung 5 ist weiter ersichtlich, dass die geregelten Lüftungssysteme links der Kurven liegen, die den inversen Zusammenhang zwischen  $\tau_{ex}$  und  $H_{v,rc}$  beschreiben, und die meisten davon zudem sowohl bessere Luftqualität als auch niedrigere Energieverluste aufweisen, als die zentrale Lüftung im konstanten Betrieb. Dies ist auf die gezieltere Lüftung der Räume zurückzuführen, die durch die Erfassung der  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen und die raumweise Bestimmung des Volumenstroms bewirkt wird.

Ist die Erfassung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und die Steuerbarkeit der Volumenströme reduziert, wie bei der zentralen Lüftung mit Abluftregelung, so stellt sich keine oder nur eine kleine Verbesserung ein (in diesem Beispiel nur durch Sollgrößenabsenkung).

Die Fuzzy-Regelung bewirkt im Vergleich zur PI-Regelung niedrigere Energieverluste. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Fuzzy-Regelung als Mehrgrößenregelung die Luftfeuchte in jedem Raum geregelt wird und die Mindestlüftung zum Feuchteschutz nach (DIN1946-6, 2019) entfallen kann. Zum anderen findet eine Regelung im Bereich von 30 bis 75 % statt (im Gegensatz zur Sollgröße beim PI-Regler von 50 %), wobei ein Überschreiten dieses Bereiches aufgrund der höheren spezifischen Luftfeuchte mit weniger Lüftungsaufwand verhindert wird.

Das relativ gute Abschneiden der Pendellüftung bei den Energieverlusten in dieser Simulation ist, abgesehen von einem konstant für alle Systeme angenommenen Wärmerückgewinnungsgrad, folgendermaßen zu erklären: Bei der hier vorgestellten Konfiguration ist eine gezieltere Belüftung der Zulufräume möglich. Bei der zentralen Lüftung kann der Fall auftreten, dass eigentlich nur Zu- oder nur Ablufträume belüftet werden müssten. Dabei muss aber der Luftvolumenstrom für alle zu belüftenden Räume als Außenluft in die Wohnung zugeführt werden. Für diesen Fall entfällt der mögliche Vorteil der Kaskadenlüftung, einer mehrfachen Beladung der Luft mit Schadstoffen. Bei der Pendellüftung hingegen sind die Zulufräume in dynamischen Regelgruppen verschalten, sodass immer möglichst die Zulufräume mit dem höchsten Lüftungsbedarf auch den höchsten Luftwechsel erfahren und so eine maximale Beladung der Luft mit Kontaminanten ermöglichen und gleichzeitig die Menge der von außen zuzuführenden Luft minimieren.

Bei der Annahme des Wärmerückgewinnungsgrades von 0,8 lag der Fokus auf dem Vergleich der Regelungskonzepte untereinander. In der Realität können jedoch Pendellüfter einen schlechteren Wärmerückgewinnungsgrad aufweisen. Dem negativen Effekt auf die Wärmerückgewinnung durch Dysbalancen der Zu- und Abluftvolumenströme wird jedoch dadurch entgegengewirkt, dass die entwickelte Regelung für eine ausgeglichene Volumenstrombilanz sorgt.

### ZUSAMMENFASSUNG

Mit der entwickelten Simulationslösung können verschiedene Lüftungssysteme in Kombination mit unterschiedlichen Reglern simuliert werden. Die Anzahl und Verschaltung der Räume ist frei konfigurierbar. Die Zu- und Abluftvolumenströme können für jeden Raum festgelegt werden. Über die Volumenströme können die daraus resultierenden  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf-Konzentrationen in jedem Raum bestimmt werden.

Die entwickelten Regelkonzepte für die unterschiedlichen Lüftungssysteme zeigen in der Simulation die Möglichkeiten der Optimierung durch eine geregelte Lüftung bezüglich Reduktion der Lüftungsenergieverluste sowie Steigerung der Raumluftqualität. Für die Realisierung dieser Konzepte werden, neben Messeinrichtungen für CO<sub>2</sub>-Konzentration und relative Luftfeuchte in allen Zub- bzw. Ablufträumen sowie einer zentralen Recheneinheit, bei der zentralen Kaskadenlüftung zusätzlich Stelleinrichtungen zur Aufteilung des Zub- bzw. Abluftvolumenstroms auf die einzelnen Räume benötigt.

Der PI- sowie der Fuzzy-Regler wurden zunächst unabhängig von den jeweiligen Lüftungssystem entworfen. Eine Anpassung erfolgt beim PI-Regler über die Ermittlung der Parameter P, I und T<sub>t</sub> und beim Fuzzy-Regler über die Skalierung der Ausgangs-Fuzzy-Mengen.

Zudem wurde für den Fuzzy-Regler ein Konzept erarbeitet, um mit der Lüftung bereits vor Erreichen des Sollwertes aufgrund von CO<sub>2</sub>- oder Wasserdampfemissionen zu Beginnen. Dieses Konzept erwies sich jedoch als unvorteilhaft aus energetischer Sicht sowie aus Sicht der Raumluftqualität, da die Effektivität der Lüftung (CO<sub>2</sub>-Abnahme pro eingebrachter Frischluft) bei abnehmender Konzentration ebenfalls abnimmt (vgl. Ableitung Formel (1)).

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Konzepte für Stell- und Regeleinrichtungen wurden durch Simulation mit anderen, einfacheren Lösungen wie der Regelung nach Messungen in der Abluft und feste Aufteilung der Volumenströme bei der zentralen Lüftung oder Lüftung mit konstantem Volumenstrom verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Energieverluste durch eine Regelung und den entwickelten Konzepten für Pendellüftung und zentrale Lüftung um ein Drittel bis die Hälfte gegenüber der zentralen Lüftung im konstanten Betrieb verringert werden können.

Wenn die nach einer Wärmerückgewinnung verbleibenden Energieverluste nicht vernachlässigbar sind und keine zu hohen Anschaffungskosten für die zusätzliche Technik im Weg stehen, stellt die geregelte Lüftung durch die raumweise Bedarfserfassung und Einstellung des Zuluftvolumenstroms für jeden Raum ein gutes Mittel dar, um die Energieverluste wesentlich zu verringern und dabei auch in der Gesamtbilanz Kosten einzusparen.

Dem Gewinn an Raumluftqualität und der Verringerung an Lüftungswärmeverlusten stehen höhere Anschaffungskosten wegen der zusätzlichen Mess- und Regelungstechnik entgegen. Es bleibt aber abzuwarten, wie sich diese zusätzlichen Kosten in Zukunft entwickeln werden. Zudem könnte hier gegebenenfalls der zusätzliche Aufwand reduziert werden, indem mit durchdachteren Kombinationen aus Lüftungs- und Regelkonzepten auf einen Teil der Mess- und Stelleinrichtungen verzichtet werden kann.

## LITERATUR

- Aimer, D. 2019. Simulation von Lüftungssystemen zum Entwurf eines Reglers für optimierte Luftqualität und Energieeffizienz, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim Deutschland.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2010. Testreferenzjahr, Station: Muehldorf, Bezugszeitraum : 1988-2007, Typ: Mittleres Jahr, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html>
- DIN 1946-6 2019. Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 4108, DIN-Fachbericht 4108-8:2010-09, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden, Beuth Verlag, Berlin
- Dols, W. S., Walton, G. N., Denton, K. R. 2000. CONTAMW 1.0 User Manual, NISTIR 6476, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD USA.
- Guyot, G., 2019. Towards a better integration of indoor air quality and health issues in low-energy dwellings: Development of a performance-based approach for ventilation. Communauté Université Grenoble Alpes, 2018.
- Kesselring, J. P., Koontz, M. D., et alli 1993. Evaluation of residential ventilation controller technology, Proceedings of 'Indoor Air '93', S. 73-78
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., et alli 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, Journal of exposure analysis and environmental epidemiology Vol. 11, S. 231-252
- Klinge, A., Roswag-Klinge, E., et alli 2016. Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis, LEHM 2016, 2016, S. 5-6
- Lachhab F., Essaaidi, M., et alli 2015. A state-feedback approach for controlling ventilation systems in energy efficient buildings, 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), S. 1-6
- Maico Elektroapparate-Fabrik GmbH. 2019. Produktdatenblatt PP 60 K-SE, Abgerufen: 01.04.2020, URL: <https://www.maico->

- ventilatoren.com/cms-live/DE/Ausschreibungstexte/DB/DB\_DE\_PP\_60\_K-SE\_0095.0204\_p112421.PDF
- Rotger-Griful, S., Jacobsen, D., Sørensen, G. 2016. Demand response potential of ventilation systems in residential buildings, *Energy and Buildings* 121, S. 1-10
- Seifert 2019. Grundlagen der Wärmephysiologie. Theoretische Grundlagen, stationäre und instationäre Modelle. ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.
- Unbehauen, H. 2007. Regelungstechnik I, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Visioli, A. 2006. Practical PID Control, London, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg
- Wirnsberger, M., Buttinger, F., Krause, H. 2019. Ventilation Efficiency Of Push-Pull Ventilation Systems In Residential Buildings – CFD Simulation And Validation Of The Model With Measurements In A Research Apartment, 16th IBPSA International Conference And Exhibition, Rome Italy..

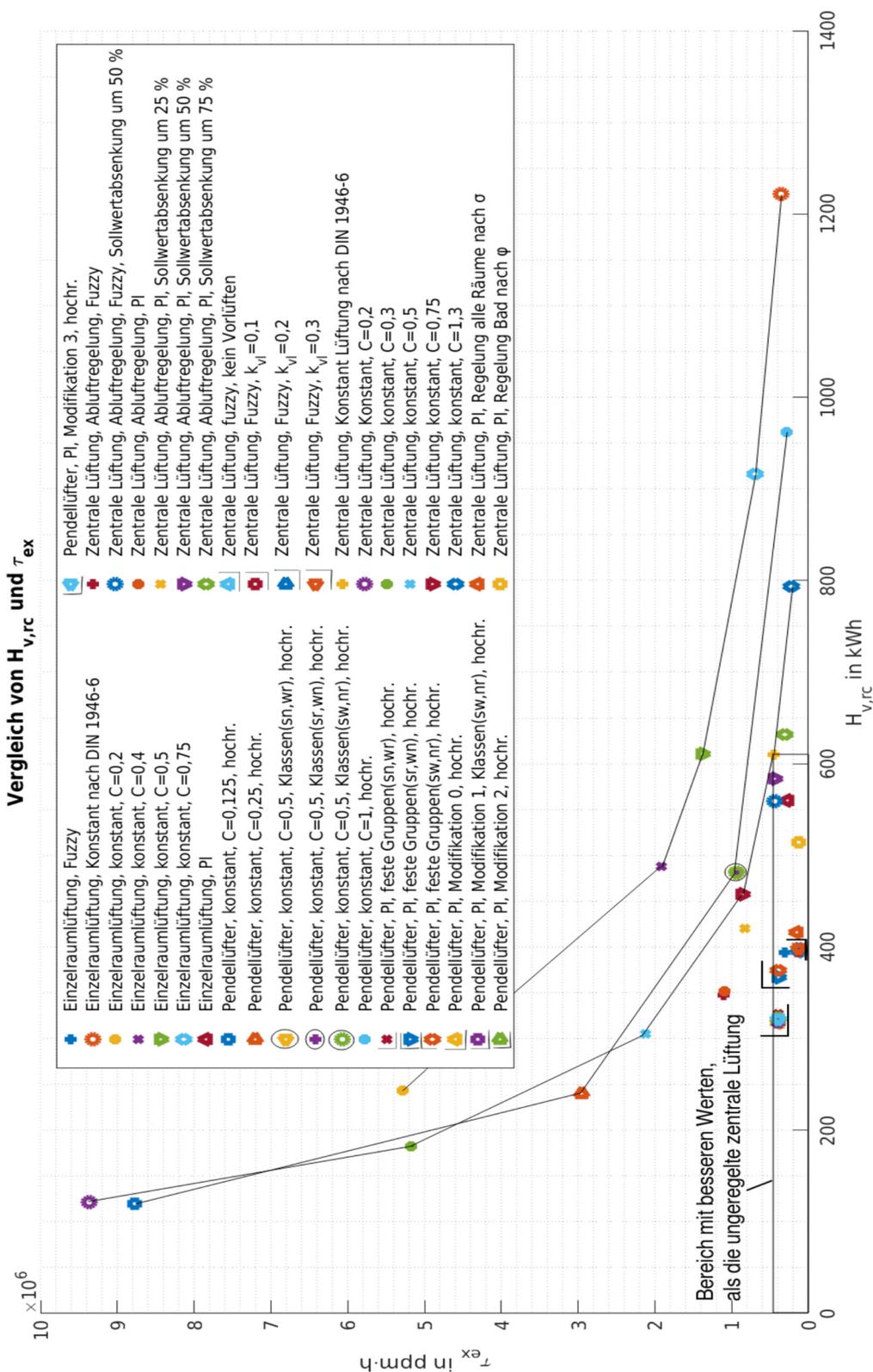


Abbildung 5:  $\tau_{ex}$ - $H_{v,rc}$ -Diagramm aller simulierten Konfigurationen (Eingezeichnete Kurve für jedes Lüftungssystem für Variationen von C; Gruppierung nahe beieinander liegender Punkte mit den Symbolen: □, L, J, O zur besseren Ortung über die Legende), Erklärungen zur Legende: hochr.→Hochrechnung auf Basis eines gemittelten Heizztages, Klassen→Klassenkonfiguration der Räume (Einteilung von jeweils zwei Räumen mit gleich getakteten Lüftern), Gruppen→Regelgruppenkonfiguration der Räume (Einteilung von jeweils zwei Räumen mit gegengleich getakteten Lüftern und mit gleichen Volumenströmen), s→Schlafzimmer, w→Wohnzimmer, k→Küche, b→Bad, n→Kinderzimmer, r→Büro, z. B.: sn→Klasse aus s und n, PI→PI-Regelung, Fuzzy→Fuzzy-Regelung, kvl→Vorlüftfaktor, C→Variationsfaktor für konstante Lüftung