



## Doctoral Thesis

# **Development of a cross ventilation model between floors taking account of Insect- and Pollen screens for single family houses to predict the summer overheating**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Doctor of Science in Civil Engineering  
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

---

## Dissertation

# **Entwicklung eines stockwerkübergreifenden Querlüftungsmodells unter Berücksichtigung von Insekten- und Pollenschutzgittern für Einfamilienhäuser zur Prognose der sommerlichen Überwärmung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaft  
eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen  
von

Dipl.-Ing. Florian Ehrlich  
Matrikelnummer 9925734  
Hütteldorferstraße 34/10  
1150 Wien

- Betreuer: Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Thomas Bednar  
Institut für Hochbau und Technologie, Bereich Bauphysik und  
Schallschutz, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU-Wien  
Karlsplatz 13/206-2  
1040 Wien
- Gutachter: Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch  
Institut für Hochbau und Technologie, Bereich Hochbau und  
Bauwerkserhaltung, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU-Wien  
Karlsplatz 13/206  
1040 Wien
- Gutachter: Prof. Dr. –Ing. Dipl. –Phys. Klaus Sedlbauer  
Lehrstuhl für Bauphysik, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt,  
TU-München  
Arcisstraße 21  
80333 München

Wien, Juli 2018

---

## Vorwort

Die vorliegende Doktorarbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „Energy Efficiency - Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden“ während des Forschungsprogramms „COMET – HFA-Timber“. Gefördert wurde das Projekt durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft des Bundes (FFG) und der Technologieagentur der Stadt Wien (ZIT). Materiell unterstützten das Projekt die Firmenpartner Griffner, Homatherm, Hrachowina, Isocell, KLH, Knauf und Knauf Insulation. Als wissenschaftlicher Partner hat die TU-Wien das Projekt begleitet.

An dieser Stelle danke ich meinem ehemaligen Fachbereichsleiter für Bauphysik und Brandschutz an der Holzforschung Austria, Dipl. –Ing. Dr. Martin Teibinger für die Möglichkeit, mich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Holzforschung Austria bei diesem interessanten Forschungsthema einbringen zu können und Teilbereiche des Projekts für meine wissenschaftliche Arbeit zu verwenden. Danken möchte ich allen Vorgesetzten, Kolleginnen und Kollegen in der Holzforschung Austria für die produktive und mich unterstützende Zusammenarbeit am Projekt. Besonders hervorheben möchte ich meine ehemaligen Kollegen Stefan Dorner, Ing. Gerald Knoll, Ing. Markus Novacek, Dr. Bernd Nusser, Rudolf Schwab, Peter Wandler und Dipl. –Ing. Martin Wieser, die mir bei der experimentellen Arbeit und bei den Bauarbeiten am bauphysikalischen Forschungshaus in Stetten mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. Thomas Bednar für seine umfassende Betreuung in Form von wegweisenden Gesprächen und Hilfestellungen, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit sehr unterstützt haben. Besonders dankbar bin ich auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz am Institut für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien. Hervorheben möchte ich Marianne Rebel, die mir bei allen administrativen Fragen zur Seite gestanden ist. Hervorheben möchte ich auch Dipl. –Ing. Manfred Grüner und Ing. Harald Hofbauer für die tatkräftige Unterstützung bei den Messungen im Forschungshaus und bei der Beantwortung aller messtechnischen Fragen. Danken möchte ich weiters meinen Gutachtern Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. Andreas Kolbitsch von der Technischen Universität Wien und Prof. Dr. –Ing. Klaus Sedlbauer von der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Andrea für ihre Geduld mit „meiner Diss“ und ihre Unterstützung in der Schlussphase. Danken möchte ich meiner Familie, meinen Freundinnen und Freunden für die Unterstützung und Hilfestellung in allen Phasen meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Zu guter Letzt möchte ich der Hausgemeinschaft aus Ottenthal von der Gemeinschaft der Nachfolge Jesu danken, die mir die Möglichkeit geboten hat, meine Dissertation in einem inspirierenden Umfeld voranzutreiben.

## **Kurzfassung**

In der vorliegenden Arbeit wurden mit einfachen Mitteln die stockwerksübergreifende Querlüftung in Einfamilienhäusern und die Wirkung von Insekten- und Pollenschutzgittern berechnet. Ziel der Arbeit ist es, ein Planungswerkzeug zu erstellen, mit dem die sommerliche Überwärmung in Einfamilienhäusern möglichst rasch und genau prognostiziert werden kann. Ausgangspunkt für die Überlegungen ist der aktuelle Trend zur vermehrten Aufstellung von Klimageräten in Haushalten und die fehlende Möglichkeit in der aktuellen Planungspraxis, das Sicherheitsbedürfnis der Bewohnerinnen und Bewohner oder die Lebensrealität beim Lüften von Einfamilienhäusern abbilden zu können (Stichwort: gekippte Fenster im Erdgeschoss).

In der Literatur konnten keine an realen Einfamilienhäusern validierten Verfahren zur Berechnung der stockwerkübergreifenden Querlüftung und zur Berechnung des Lüftungsverhaltens bei Verwendung von Insektengittern gefunden werden.

Im Zuge der Arbeit fanden an verschiedenen Einzelraum- und Querlüftungssituationen mit und ohne Insektenschutz Tracergasmessungen statt. Neben der quantitativen Untersuchung der Luftströmungen wurde auch die Durchströmung des Gebäudes sichtbar gemacht. Das neu entwickelte Rechenmodell wurde anhand der Luftströmungsmessungen an einem realen zweistöckigen Einfamilienhaus validiert und in ein thermisches Raumsimulationsmodell eingebaut. Mit dem Raumsimulationsmodell wurde an einem praxisrelevanten Fall die operative Temperatur anhand des neuen Modells berechnet und mit der bisherigen Planungspraxis verglichen, um damit die sommerliche Überwärmung von Einfamilienhäusern mit verschiedenen Verfahren nachzuweisen.

Der Vergleich der in dieser Arbeit aufgezeigten Raumsimulation der stockwerksübergreifenden Querlüftung mit den derzeit für die Planung herangezogenen Verfahren zeigt, dass die Berücksichtigung des Querluftstromes durch alle Zonen und die Berücksichtigung des Wärmeaustausches durch ein Trennbauteil eine genauere Prognose der sommerlichen Überwärmung liefert als mit den bisherigen Planungsmethoden.

Als Ergebnis dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit einem einfachen Modell rasch das Lüftungsverhalten von Einfamilienhäusern nachvollzogen werden kann. Es hat sich aber auch gezeigt, dass mit dem Modell einige spezielle Lüftungssituationen nicht abbildbar sind.

## **Abstract**

The present scientific work contains the cross ventilation between floors in a single family house. It takes into account the influence of screens against insects and pollen using a simplified calculation method. The aim of the work is to create a tool for planners to predict the summer overheating in detached houses on a simple and fast way by keeping an unexpected high level of accuracy. The incentive for starting this work was the increasing growth of airconditioners in private homes. The presented method may open an opportunity for accurate planning even for small houses with reduced calculation work and should be taken as a contribution for climate protection. It respects the security needs of real life of residents when they ventilate their houses (keyword: tilted windows in ground floor during nighttime ventilation).

In the literature, no validated methods on real single family houses can be found neither for calculation of cross ventilation between floors nor for calculation of ventilation behaviour by use of insect screens. Therefore tracer gas measurements in different rooms and cross ventilation situations were performed, as well with and without insect protection. In addition to their quantitative analysis, the air flows through the building were visualized. The new developed calculation model was validated by airflow measurements on a real two-storey single-family house and integrated into a thermal room simulation model. Using the room simulation model, the operative temperature was calculated at a practical example for one thing according to the new model and was on the other hand compared with the actual planning practice - in order to demonstrate the summer overheating of single family houses by using different methods.

The comparison shown in this work between here given room simulation including cross ventilation between floors and the currently used methods for the planning process, illustrates the necessity to consider cross ventilation through all zones. Respecting the heat exchange through a separating component will enable a more accurate prediction of the summer overheating than previous planning methods without these opportunities.

As a result of this work it could be shown that the ventilation behavior of single-family house can be comprehended quickly with a simple model. The analysis with the simplified modelling also shows, that some special ventilation situations cannot be reproduced with this model.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 <i>Motivation der Arbeit</i> .....	1
1.1.1 In der Literatur sind Ansätze zur Berechnung der Lüftung vorhanden .....	2
1.1.2 Keine Validierung der Ansätze für den Einsatz bei Einfamilienhäusern .....	3
1.1.3 Planungsentscheidungen fallen ohne realistische Prognose .....	3
1.2 <i>Zielsetzung</i> .....	4
1.2.1 Validierte Methode zur Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen .....	4
1.2.2 Realistische Prognose - Sicherheitsbedürfnis der Bewohner in der Planung abbilden .....	5
1.2.3 Realistische Prognose – Rechnerische Berücksichtigung des Insektenschutzes .....	5
1.3 <i>Methodische Vorgehensweise</i> .....	5
<b>2 Literaturlauswertung – Stand des Wissens</b> .....	<b>7</b>
2.1 <i>Zusammenfassung der Literaturlauswertung</i> .....	7
2.1.1 Komfort im Innenraum durch Fensterlüftung .....	8
2.1.2 Natürliche Lüftung .....	8
2.1.3 Beschreibung des Luftvolumenstromes durch große Öffnungen (Large openings – größer 0,5 m <sup>2</sup> bis 5 m <sup>2</sup> ) und der Austauschkoefizienten .....	10
2.1.4 Verwendung von Luftstromnetzwerkmodellen .....	12
2.1.5 Herleitung des Modells der stockwerkübergreifenden Querlüftung .....	13
2.1.6 Vergleich Luftstromnetzwerkmodell – Messung .....	15
2.1.7 Vergleich CFD-Analyse – Messung / CFD-Analyse – Netzwerkmodell .....	16
2.1.8 Luftdurchsatz durch Insektengitter .....	19
2.2 <i>Bewertung der verschiedenen Methoden zur Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung</i> .....	23
2.2.1 Allgemeine Themen zur natürlichen Lüftung .....	23
2.2.2 Vereinfachte Verfahren .....	24
2.2.3 Luftstromknotenberechnung .....	24
2.2.4 Messverfahren aus Modellen – Einfluss des Insektenschutzes .....	25
2.2.5 Finite Volumenelemente (CFD) .....	26

<b>3</b>	<b>Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt über den sommerlichen Wärmeschutz von Holzeinfamilienhäusern.....</b>	<b>27</b>
3.1	<i>Beschreibung des Forschungsprojekts.....</i>	27
3.1.1	Untersuchungen im bauphysikalischen Forschungshaus.....	28
3.1.2	Befragung der Nutzer, Auswertung von Fertighausplänen.....	30
3.1.3	Entwicklung eines Modells .....	30
3.2	<i>Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt.....</i>	31
3.2.1	Nutzerverhalten beim Lüften .....	31
3.2.2	Wichtigkeit des Faktors „Lüften“.....	35
<b>4</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>37</b>
4.1	<i>Tracergasmessungen für Einzelraum- und Querlüftungssituationen .....</i>	37
4.1.1	Messaufbau .....	38
4.1.2	Ablauf der Messung einer Einzelraumsituation anhand eines Beispiels .....	44
4.1.3	Berechnung der Tracergaskonzentrationen.....	45
4.1.4	Ablauf der Messung einer Querlüftungssituation anhand eines Beispiels.....	47
4.1.5	Untersuchte Fälle.....	59
4.2	<i>Vorstellen des Modells.....</i>	67
4.2.1	Modellbestandteile aus der Literatur .....	68
4.2.2	Annahmen .....	71
4.2.3	Berechnung der effektiven Öffnungsquerschnitte.....	72
4.2.4	Anwendung des Modells auf die Einzelraumsituation.....	75
4.2.5	Anwendung des Modells auf die Querlüftungssituation.....	77
4.3	<i>Validierung des Modells.....</i>	80
4.3.1	Vergleich zwischen berechneter und gemessener Tracergaskonzentration - Beispiele für gute und schlechte Übereinstimmungen.....	80
4.3.2	Ergebnis des Validierungsprozesses .....	105
4.4	<i>Anwendung des Wissens – Vergleich mit der Praxis .....</i>	112
4.4.1	Thermische Raumsimulation mit stockwerksübergreifender Querlüftung .....	113
4.4.2	Ergebnisdarstellung:.....	130
4.4.3	Schlüsse aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach B 8110-3 .....	145
<b>5</b>	<b>Wissenschaftlicher Beitrag.....</b>	<b>148</b>
5.1	<i>Luftstromknotenmodelle mit Berücksichtigung von Totzonen .....</i>	148
5.2	<i>Berücksichtigung von Insektengittern im Luftstromknotenmodell .....</i>	149

<b>6</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>150</b>
6.1	<i>Auswirkung der schwach belüfteten Bereiche des durchströmten Raumvolumens .</i>	150
6.2	<i>Austausch zwischen den Zonen bei Querlüftung .....</i>	150
6.3	<i>Einschwingvorgang bei Querlüftung .....</i>	151
6.4	<i>Ist eine feinere Auflösung des stockwerkübergreifenden Querlüftungsmodells notwendig? .....</i>	151
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>152</b>
7.1	<i>Einzelraumdurchströmung, EG gekippt .....</i>	152
7.1.1	Ohne Gitter .....	152
7.1.2	Mit Insektengitter .....	156
7.1.3	Mit Pollengitter .....	161
7.2	<i>Einzelraumdurchströmung, EG geöffnet.....</i>	163
7.2.1	Ohne Gitter .....	163
7.2.2	Mit Insektengitter .....	169
7.2.3	Mit Pollengitter .....	176
7.3	<i>Einzelraumdurchströmung, OG geöffnet .....</i>	178
7.3.1	Ohne Gitter .....	178
7.3.2	Mit Insektengitter .....	186
7.4	<i>Querdurchströmung, EG gekippt – OG geöffnet (2 Zonen) .....</i>	190
7.5	<i>Querdurchströmung, EG geöffnet – OG geöffnet (2 Zonen) .....</i>	193
7.6	<i>Querdurchströmung, EG geöffnet – OG geöffnet (4 Zonen) .....</i>	199
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>204</b>
<b>9</b>	<b>Publikationen.....</b>	<b>208</b>

# 1 Einleitung

In der Einleitung wird die Motivation für die vorliegende Arbeit vorgestellt. Aus der Motivation werden die Ziele der Dissertation und die methodische Vorgehensweise der wissenschaftlichen Untersuchung formuliert.

## 1.1 Motivation der Arbeit

Der sommerliche Wärmeschutz von Wohngebäuden ist in den einschlägigen technischen Regelwerken OIB-Richtlinie 6 OIB:2015 und ÖNORM B 8110-3:2012 geregelt. Wohngebäude werden hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes derzeit so geplant, dass in einem als kritisch einzustufenden Einzelraum entweder eine bestimmte Speichermasse vorhanden sein muß oder ein Anforderungswert an die operative Temperatur nicht überschritten werden darf. Um den Anforderungswert der operativen Temperatur zu erreichen, dürfen im Wohnbau keine Klimaanlage zum Einsatz kommen. Erlaubt ist die Berücksichtigung aller inneren Wärmequellen, der Verschattung und die Anwendung der natürlichen Nachtlüftung oder der Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen.

Die Realität hat gezeigt, dass den Nutzern im Sommer zu heiß ist. In einer Untersuchung über den Kühlenergiebedarf (Adnot et al. 2003), auf Basis der Verkaufszahlen von Klimageräten, wird gezeigt daß der Kühlenergiebedarf in Europa innerhalb von 10 Jahren (von 1990 bis 2000) um das Doppelte angestiegen ist (siehe Abb. 1).

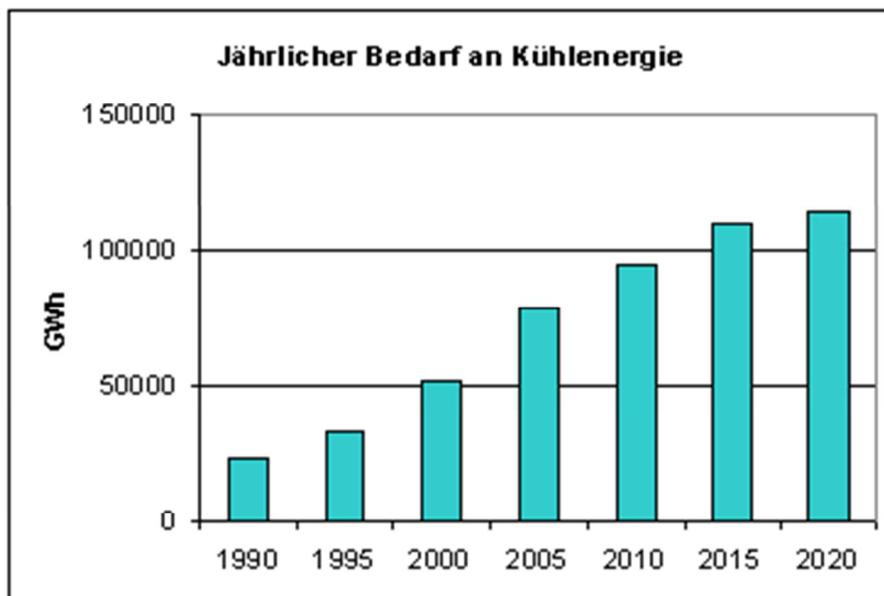


Abb. 1: Anstieg des jährlichen Kühlenergiebedarf in der gesamten EU, Quelle: (Adnot et al. 2003)

Werden Prognosemodelle auf den Verkauf von Klimaanlage angewandt, so kann beobachtet werden, dass sich der Kühlenergiebedarf innerhalb von 20 Jahren (von 2000 bis 2020) erneut verdoppeln wird. Aus der Arbeit geht nicht hervor wie sich die klimatisierten Flächen hinsichtlich Büronutzung und Wohnnutzung aufteilen.

Aus der Untersuchung von (Töglhofer et al. 2007) geht hervor wie sich die klimatisierten Flächen je nach Region und Nutzung verteilen. 65 % der Flächen in US-amerikanischen Haushalten und 85 % der Flächen in japanischen Haushalten haben eine Klimaanlage. Im Vergleich dazu sind in Europa im Mittel 5% der Wohnungen und Häuser klimatisiert.

Im Dienstleistungssektor sind 80 % der US-amerikanischen und 100 % der japanischen Geschäfte und Büros klimatisiert. Im Vergleich dazu sind in Europa im Mittel 27 % der Geschäfts- und Büroflächen klimatisiert. Zu ergänzen ist, dass die europäischen Mittelwerte je nach EU-Staaten sehr stark schwanken. Der Trend zeigt nach derzeitigem Stand jedoch in Richtung Anstieg der Klimatisierung in Europa.

In einem Forschungsprojekt zum sommerlichen Wärmeschutz (Teibinger et al. 2014) wurden untersucht, welchen Einfluss die Faktoren Lüftung, Verschattung und innere Lasten haben. Es hat sich gezeigt, dass der Faktor Lüftung den größten Einfluss auf die operative Raumtemperatur hat. Wie wichtig die Sicherstellung einer natürlichen Lüftung - nicht nur im Sommer- ist, findet man in der Literatur (Fabi et al. 2012), (Zhang und Barrett 2012), (Iftikhar et al. 2001), (Moujalled et al. 2008), (Stephens 2003).

Im Einzelnen besteht die Motivation zur Untersuchung des Lüftungsverhaltens in folgenden Punkten:

### **1.1.1 In der Literatur sind Ansätze zur Berechnung der Lüftung vorhanden**

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Verfahren zur Berechnung der Lüftung eines Raumes oder mehrerer Zonen. Die Verfahren reichen von einfachen Ansätzen für die Berechnung von Luftströmungen unter stationären Bedingungen (vergleiche Etheridge 2012, Maas 1992, Hensen et al. 1993) bis hin zur Modellierung von Strömungen in einem Raum mit finiten Elementen (vergleiche Peppes et al. 2001, Nikolopoulos et al. 2012, Teppner et al. 2014). Die Abbildung der Durchströmung von mehreren Zonen können mittels Netzwerkmodellen (vergleiche Cockroft 1979, Aynsley 1997, Schulze und Eicker 2013) oder finiten Elementen (vergleiche Nikolopoulos et al. 2012, Okuyama et al. 2009, Wang und Chen 2008) durchgeführt werden. Hinter vielen Modellen stecken Algorithmen, die eine aufwendige Berechnung erfordern. Einige Modelle hatten zum Ziel, eine möglichst umfassende Berechnung bei geringem Rechenaufwand zu bieten (vergleiche Aynsley 1997, Norrefeldt 2013).

Man findet auch Untersuchungen zum Einsatz von Insektengittern. Dabei wird der Luftwechsel von Insektengittern an Glashäusern (vergleiche Teitel et al. 2009, Bartzanas et al. 2002, Miguel und Silva 2000) untersucht.

### **1.1.2 Keine Validierung der Ansätze für den Einsatz bei Einfamilienhäusern**

Ein Großteil der Modelle wurde anhand von Windkanal- und Temperaturmessungen validiert. In einigen Fällen wurden Tracergasmessungen an Versuchsräumen durchgeführt (vergleiche Maas 1995, Hall 2004). Bei den Modellen für die Berechnung von Insektengittern wurde die Berechnung des Luftdurchsatzes oder des Luftaustauschs mittels Windkanalmessung validiert. Alternativ dazu wurden Modelle für die Berechnung des Luftdurchsatzes oder der Innentemperatur an Versuchsgewächshäusern mit Temperatur- oder Luftgeschwindigkeitsmessungen validiert (vergleiche Molina-Aiz et al. 2009, Miguel und Silva 2000).

Aus keiner Arbeit ist eine Validierung eines Modells mit Luftströmungsmessungen an einem zweistöckigen Objekt in der Größe eines Einfamilienhauses ersichtlich.

### **1.1.3 Planungsentscheidungen fallen ohne realistische Prognose**

In der aktuellen Praxis zur Planung sommertauglicher Räume (ÖNORM B 8110-3:2012) wird die operative Temperatur eines als kritisch einzustufenden Raumes mit dem detaillierten Verfahren berechnet. Alternativ dazu kann mit dem vereinfachten Verfahren die speicherwirksame Masse des Raumes berechnet werden<sup>1</sup>. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn die operative Temperatur unterhalb eines bestimmten Anforderungswertes liegt. Beim vereinfachten Verfahren gilt der Nachweis als erbracht, wenn eine gewisse speicherwirksame Masse in Abhängigkeit eines durch geöffnete Fenster in der Nacht sichergestellten stündlichen Luftwechsels vorhanden ist. In der Nachweisführung werden Annahmen zur Lüftung, Verschattung und, im detaillierten Verfahren, zu den inneren Lasten berücksichtigt. Bei der Berücksichtigung der Lüftung im detaillierten Verfahren wird in den Berechnungsansätzen die Durchlüftung des als kritisch einzustufenden Raumes berücksichtigt (siehe 4.4.2.3, Abb. 52).

Einen Ansatz zur Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen findet man in der ÖNORM B 8110-3:2012 nicht. Für die Berücksichtigung einer stockwerksübergreifende Querlüftung wird in der Norm ein Ansatz gezeigt mit dem der thermisch induzierte Luftvolumenstrom innerhalb einer Zone zufolge Höhendifferenz berechnet werden kann (siehe 4.4.2.3, Abb. 53).

---

<sup>1</sup> Von 1999 bis 2012 konnten beide Verfahren gleichermaßen zur Berechnung verwendet werden.

Im vereinfachten Verfahren wird der stündliche Luftwechsel unter anderem aus dem angenommenen Luftwechsel berechnet. Dabei können auch Querlüftungssituationen durch Fenster in zwei oder mehreren Fassadenebenen angenommen werden, [...] *wenn die widmungsgerechte Nutzung der Räume es zulässt, dass ein Luftaustausch zwischen Räumen nachts möglich ist [...] [...] Berücksichtigt werden dürfen nur Fassaden von Aufenthaltsräumen, bei denen die Lüftungsöffnungen nachts offengehalten werden können. [...] aus (ÖNORM B 8110-3:2012)* Eine Berücksichtigung von gekippten Fenstern ist im vereinfachten Verfahren nicht möglich.

Die Auswirkungen von Insekten- oder Pollengittern auf die Lüftung kann in der aktuellen Planungspraxis in Österreich nicht berücksichtigt werden. Im detaillierten Nachweisverfahren wird bei den Ansätzen für die Berechnung der Luftvolumenströme [...] *hingewiesen, dass „die Berechnung voraussetzt, dass keine wie immer gearteten Strömungsbehinderungen wie beispielsweise Insektenschutzgitter oder Vorhänge vorhanden sind. [...] aus (ÖNORM B 8110-3:2012).* Im vereinfachten Verfahren gibt es keine Hinweise auf die Anwendung von Insektengittern.

## **1.2 Zielsetzung**

Das Ziel der Arbeit ist, einen validierten Rechenansatz für die Berechnung der stockwerkübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen zu finden. Mit dem Modell soll eine Prognosemöglichkeit für die Sommertauglichkeit von Gebäuden geschaffen werden, wobei speziell das Sicherheitsbedürfnis der Bewohner (keine geöffneten Fenster im Erdgeschoß während der Nachtlüftung) und der Nutzerkomfort durch Berücksichtigung von Insektengitter durch das Insektengitter abgebildet werden soll.

### **1.2.1 Validierte Methode zur Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen.**

In den bisherigen Modellen fanden sich validierte Modelle, die anhand von Windkanalmessungen im Modellmaßstab, Messungen an einem einzelnen Versuchsraum oder simulierten Messungen mit realen Wetter-Randbedingungen durchgeführt wurden (siehe 1.1.2).

Ziel der Arbeit ist ein Modell zur Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen. Es soll so einfach zu handhaben sein, dass es in der täglichen Planungspraxis angewendet werden kann. Es wurde anhand von von Luftströmungsmessungen in einem Forschungshaus validiert. Dieses Forschungshaus hatte die Abmessungen eines Einfamilienhauses. Aufgrund der allgemeingültigen physikalischen Zusammenhänge ist das Modell auch auf größere Objekte anwendbar.

### **1.2.2 Realistische Prognose - Sicherheitsbedürfnis der Bewohner in der Planung abbilden**

Der Schutz von Einbruch bei der Nachtlüftung ist bei Bewohnern von Einfamilienhäusern ein wichtiges Thema und ein Einflußfaktor auf eine mögliche sommerliche Überwärmung durch Nicht-Anwendung der Nachtlüftung (Teibinger et al. 2014). Eine Möglichkeit, um eine brauchbare Nachtlüftung bei einem gewissen Maß an Sicherheit sicherzustellen, ist die Anwendung der stockwerksübergreifenden Querlüftung mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster. In der Realität befinden sich die beiden Lüftungsöffnungen meist nicht in derselben Zone. In der aktuellen Fassung der ÖNORM B 8110-3:2012, B.3 kann dieses Szenario nicht abgebildet werden, weil im Ansatz zur Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung berücksichtigt wird, dass Einström- und Ausströmöffnung in derselben Zone liegen (siehe Abb. 53 in 4.4.2.3).

### **1.2.3 Realistische Prognose – Rechnerische Berücksichtigung des Insektenschutzes**

Weiters wird die Nachtlüftung durch Insektenschutz eingeschränkt (Teibinger et al. 2014). In der aktuellen Planungspraxis ist es nicht möglich, Insektengitter in der Berechnung der Luftvolumenströme zu berücksichtigen (siehe 1.1.3).

Diese Arbeit schließt die Berücksichtigung von Insektenschutzgitter ein. Die Rechenansätze für die Berücksichtigung von Insektengittern in der Literatur brauchen zum Teil eine entsprechende Recheninfrastruktur. Ein weiteres Ziel für eine realistische Prognose von Insektengittern ist eine möglichst rasche Berechnungsweise, damit das Verfahren in der täglichen Planungspraxis angewendet wird.

### **1.3 Methodische Vorgehensweise**

Um die Ziele zu erreichen, wurde eine Auswertung der zur Verfügung stehenden Berechnungsmöglichkeiten zur Untersuchung der stockwerkübergreifenden Querlüftung durchgeführt. Ergänzt wurde der Wissensstand durch die Auseinandersetzung mit dem Nutzerverhalten in Einfamilienhäusern.

Im nächsten Schritt wurden Tracergasmessungen an einem zweistöckigen Holzeinfamilienhaus im Rahmen des Forschungsprojektes „COMET“ Energy Efficiency (Teibinger 2014) im Zeitraum von Oktober 2012 bis August 2013 durchgeführt (siehe 3.1). Die Vor-Ort-Messungen dienten zur Quantifizierung der Luftströme in verschiedenen Lüftungssituationen mit und ohne Insektengitter und zur Validierung des neu entwickelten Modells. Ergänzt wurden die Tracergasmessungen durch qualitative Durchströmungs-

untersuchungen mit künstlichem Nebel. Um ausschließlich den thermisch induzierten Luftwechsel zu studieren, wurde der Einfluss des Windes durch Ausscheiden von Messungen mit zu hoher Windgeschwindigkeit berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wurde ein Rechenmodell, zur Berechnung des thermisch-induzierten Luftwechsels an der stockwerksübergreifenden Querlüftungssituation und an einzelnen Räumen erstellt. Bei der Suche nach Berechnungsmöglichkeiten hat sich herausgestellt, dass eine rasche Berechnung der verschiedenen Situationen am geeignetsten mit einem Netzwerkmodell abgebildet werden kann. Anschließend wurde das Modell anhand der Messungen an Ort und Stelle mit Tracergas validiert.

In weiterer Folge werden die gewonnenen Erkenntnisse über die Berechnung der stockwerkübergreifenden Querlüftung in Einfamilienhäusern in einer thermischen Raumsimulation angewandt. Dabei sollen die operativen Temperaturen in einem zweistöckigen Einfamilienhauses berechnet werden, um die Ergebnisse des Querlüftungsmodells zu plausibel darzustellen. Ein Vergleich zwischen den Nachweisverfahren der derzeitigen Regelwerke und dem neuen Modell soll das Verbesserungspotential der hier vorgestellten Methode vor Augen führen.

Am Schluß soll auch gezeigt werden, welche Grenzen das neue Rechenmodell aufweist.

## **2 Literaturlauswertung – Stand des Wissens**

Im folgenden Abschnitt wird herausgearbeitet, welche Möglichkeiten zur Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung in Einfamilienhäusern vorhanden sind und wie der Stand des Wissens zu diesem Thema ist.

Für die Anwendung des gewonnenen Wissens werden die wissenschaftlichen Beiträge im Abschnitt 4.4.1 ausgewertet.

### **2.1 Zusammenfassung der Literaturlauswertung**

Die zu suchenden Arbeiten aus den Themenbereichen „natürliche Lüftung“ und „Insektenschutz“ wurden nach folgenden Schlagworten gesucht und kategorisiert:

- Natürliche Lüftung
  - o Überblick über das Thema Lüftung
  - o Einzelraumlüftung
  - o Querlüftung
  - o Rechen- und Messverfahren
- Insektenschutz

Die gefundenen und ausgewählten Arbeiten werden in Abschnitt 2.1 wiederum in Untergruppen aufgeteilt und nach den angeführten Themengruppen zusammengefasst:

- Komfort im Innenraum durch Fensterlüftung
- Natürliche Lüftung
- Beschreibung des Luftvolumenstromes durch große Öffnungen (Large openings) und der Austauschkoefizienten
- Verwendung von Luftstromnetzwerkmodellen
- Herleitung des verwendeten Modells
- Vergleich Luftstromnetzwerkmodell – Messung
- Vergleich CFD-Modell – Messung / CFD-Modell – Netzwerkmodell
- Luftdurchsatz durch Insektengitter

In Abschnitt 2.2 wird die Verwendbarkeit der gefundenen Beiträge für die Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querdurchlüftung unter Berücksichtigung des Insektenschutzes diskutiert. Diese Bewertung ist Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Modellansatzes (siehe 4.2)

### **2.1.1 Komfort im Innenraum durch Fensterlüftung**

Ausgehend von Befragungen wurden Gründe herausgearbeitet, warum Menschen in Räumen ihre Fenster öffnen. Die Motivationen hängen zumeist von physikalischen Faktoren wie Außen- und Innenluftbedingungen oder betreffen das Lebensumfeld und persönliche Faktoren (Fabi et al. 2012).

An einem Bürohaus in Sheffield's (UK) wurden Messungen zum Raumklima und Fensteröffnungsverhalten durchgeführt. Neben der Untersuchung des Fensteröffnungsverhaltens in Abhängigkeit von Innen- und Außenklima wurde ein statistisches Modell entwickelt. Damit kann die Wahrscheinlichkeit, ein Fenster zu öffnen, in Abhängigkeit des Außen- und Innenklimas, berechnet werden (Zhang und Barrett 2012).

In einer Feldstudie in den Städten Oxford und Aberdeen (UK) wurde das Lüftungsverhalten von Bewohnern in Häusern mit Fensterlüftung und mit Klimaanlage untersucht. Untersucht wurde das Lüftungs- und Beschattungsverhalten in Abhängigkeit der Außen- und Innenluftbedingungen und die Zufriedenheit mit den Steuerungsmöglichkeiten. Die Zufriedenheit der Bewohner zeigte sich am höchsten, wenn die Bewohner ihre Lüftungs- und Beschattungssysteme selbst regeln konnten. Bewohner mit Fensterlüftung und Vorhängen/Jalousien gaben an, zufriedener zu sein als Bewohner, die mit Klimaanlage lüfteten (Iftikhar et al. 2001).

An Hand von fünf natürlich belüfteten Bürohäusern in Lyon wurden Innenklimamessungen im Sommer und Winter durchgeführt. Ergänzend dazu wurden die Nutzer über die Zufriedenheit mit dem Innenraumklima befragt. Der Vergleich zwischen berechneter und tatsächlich erhobener Zufriedenheit nach ISO 7730 zeigt, dass die berechnete Zufriedenheit geringer ist. Der Vergleich von berechneter und tatsächlicher Zufriedenheit nach EN 15251 zeigte eine höhere Übereinstimmung der Werte. Der Ansatz nach EN 15251 zeigt, dass der thermische Komfort für natürlich belüftete Objekte besser abgebildet wird (Moujalled et al. 2008).

### **2.1.2 Natürliche Lüftung**

Ausgehend von der Wechselbeziehung Gebäude und natürliche Lüftung wurde aus der Zusammenschau von wissenschaftlichen Aufsätzen aus dem späten 19. Jahrhundert gezeigt, dass die natürliche Lüftung einen Einfluss auf die Gesundheit der Bewohner im Besonderen in Städten hat. Es wurden die Möglichkeiten und Methoden zur natürlichen Belüftung im Vereinigten Königreich von Großbritannien des 19. Jahrhunderts dargestellt. Ebenfalls beschrieben wurde, wie sich eine gute Frischluftversorgung auswirken kann, damit bestimmte Krankheiten, die damals auftraten, nicht ausbrechen (Stephens 2003).

Die Zusammenfassung von Erkenntnissen aus 50 Jahren Forschung aus Sicht eines britischen Wissenschafters gibt einen Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten von natürlich belüfteten Gebäuden. Dabei werden verschiedene Rechenmodelle, von einfachen stationären Ansätzen bis hin zu komplexen CFD-Modellen für verschiedene Anwendungsfälle beschrieben und diskutiert. Der Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten zeigt, dass nicht für jedes Problem die Anwendung von numerischen Verfahren notwendig ist (Etheridge 2015).

Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Fensterlüftung werden in einer Dissertation (Maas 1995) über die Quantifizierung des Fensterluftwechsels untersucht. Dabei werden verschiedene Rechenansätze messtechnisch validiert und erweitert. Zusätzlich betrachtet wird der Einfluss des Windes. Aus dem Fensterluftwechsel werden die Lüftungswärmeverluste in der Heizperiode berechnet. Den Abschluss bildet ein Vergleich zwischen Fensterluftwechsel bei gekippten Fenstern mit dem Heizenergieverbrauch (Maas 1995).

Mit Hilfe von verschiedenen Rechenansätzen und einer numerischen Simulation wird in einer Dissertation (Hall 2004) der thermisch induzierte Luftwechsel bei gekippten Fenstern in verschiedenen Fensterbauformen berechnet und messtechnisch validiert. Es zeigt sich, dass die Form der innenliegenden Fensterlaibung und ein Heizkörper unter dem Fenster in Funktion einen Einfluß auf den Luftvolumenstrom haben. Weiters konnte beobachtet werden, wie sich die Luft im Raum bei gekippten Fenstern bewegt und verteilt. Festgestellt wurde, dass der Temperaturabfall in den ersten zehn Minuten bei gekippten Fenstern gleich ist, egal ob geheizt wird oder nicht (Hall 2004).

Die Frage, wie sich die Hauptwindrichtung auf die Ausrichtung eines Gebäudes in Bezug auf Lüftung auswirken kann, wurde mittels räumlicher CFD-Simulation und Windkanalmessungen untersucht. Ebenfalls behandelt wurde die Frage, ob und wie sich die Raumaufteilung eines Gebäudes auf die Luftvolumenströme im Inneren auswirken kann. Die Untersuchung zeigt, dass sich Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf den Luftvolumenstrom im Inneren stark auswirken. Direkte Zusammenhänge zwischen der Raumaufteilung und dem sich einstellenden Luftvolumenstrom im Inneren konnte nicht beobachtet werden. Festgehalten werden kann, dass die Windgeschwindigkeit proportional zum Zuluftvolumenstrom ist (Nikas et al. 2010).

Anhand eines Referenzobjekts in einer Querlüftungssituation mit zwei gegenüberliegenden Fenstern soll gezeigt werden, wie empfindlich verschiedene CFD-Modelle in Berechnungsprogrammen auf den Einfluss von Randbedingungen und Berechnungsparameter reagieren. Das Ziel waren möglichst genaue

Querlüftungsberechnungsergebnisse mit CFD. Die Rechenergebnisse wurden mit Windkanalmessungen verglichen. Die Autoren kamen zum Schluss, dass die verfügbaren CFD-Simulationswerkzeuge die Einflussparameter oft nicht genau genug betrachten. Ebenfalls festgestellt wurde, dass diese Vergleichsuntersuchung nur auf bestimmte Gebäudeformen und Fenstergrößen anwendbar ist (Ramponi und Blocken 2012).

Anhand einer Querlüftungssituation in einem Raum, soll die Wirkung von Insektenschutzgittern auf den Luftvolumenstrom mit einem CFD-Modell untersucht werden. Der studierte Querluftstrom stellt sich zwischen dem südseitigen und dem ostseitigen Fenster ein. Neben der Berechnung von verschiedenen Maschenweiten der Insektengitter wurde auch der thermische Komfort (PMV) in verschiedenen Zonen des Raumes mitberechnet. Zur Validierung der CFD-Simulationen wurden Windkanalmessungen durchgeführt. Die Berechnungen zeigten, dass Insektengitter den Luftvolumenstrom im Inneren maßgeblich vermindern und die Innenraumtemperatur ansteigen lässt. Der Einfluss der Maschenweite konnte ebenfalls beobachtet werden. Die Berechnung des thermischen Komforts zeigte, dass Bereiche in der Nähe der Fenster und zwischen den Fenstern im Luftstrom begünstigter sind als Bereiche außerhalb dieser Zonen (Ravikumar und Prakash 2011).

In der ÖNORM B 8110-3:2012 (ÖNORM B 8110-3) zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes von Wohnräumen werden zwei Berechnungsverfahren angeführt. Im vereinfachten Verfahren wird der Einfluss der Lüftung durch stationäre Parameter abgebildet. Im detaillierten Verfahren wird der sommerliche Wärmeschutz mittels dynamischer Simulation nachgewiesen. Dabei kann der Einfluss der Lüftung für einzelne Räume oder für Querlüftungssituationen die in einer Zone mit Höhenunterschied stattfinden, berücksichtigt werden. Querlüftungssituationen durch mehrere Zonen oder der Einfluss von Insektengittern können dort auch nicht im detaillierten Verfahren abgebildet werden.

### **2.1.3 Beschreibung des Luftvolumenstromes durch große Öffnungen (Large openings – größer 0,5 m<sup>2</sup> bis 5 m<sup>2</sup>) und der Austauschkoefizienten**

Ziel des International Energy Agency (IEA) Annexes 20 war die Verbesserung von Luftströmungsmodellen bei der Durchströmung von Fenstern und Türen bei natürlicher Lüftung. Dazu wurden groß angelegte Laboruntersuchungen durchgeführt. Untersucht wurden die einseitige Durchströmung von Räumen und die Querlüftungssituation. Parallel dazu wurden numerische Modelle erweitert. Der Forschungsschwerpunkt lag auf der natürlichen Lüftung durch große Öffnungen mit und ohne Windeinfluß. Das Ziel der Arbeit war die Berechnung der Massenströme durch große Öffnungen und die Bestimmung von

Austauschkoeffizienten für den durchschnittlichen Luftaustausch in Räumen und für lokale Angaben von Austauschkoefizient für Öffnungen. Der durchschnittliche Austauschkoefizient zwischen Räumen wurde mit  $0,4 \pm 0,1$  bestimmt. Die lokalen Austauschkoefizienten betragen im oberen und unteren Bereich der Öffnung bis zu 0,7 und im Bereich der neutralen Ebene weniger als 0,5 (Maas 1992).

Aus den Berechnungsansätzen für Luft- und Wärmeströme durch große Öffnungen lassen sich Gleichungen zur Berechnung von Luftstromnetzwerkmodellen für einzelne Räume, Raumgruppen und ganze Gebäude herleiten und in Gebäudesimulationsprogramme integrieren. Die entsprechenden Gleichungen wurden in der Arbeit an einer vertikalen Öffnung angewendet. Außerdem wurde die Temperaturschichtung der Luft innerhalb eines Raumes rechnerisch berücksichtigt. Der Austauschkoefizient wurde in den Berechnungen mit 0,5 angenommen (Hensen et al. 1993).

Die Berechnung des Luftvolumenstromes enthält Unsicherheitsfaktoren. Ein Unsicherheitsfaktor ist der Austauschkoefizient. Um Planern einfache Werkzeuge zur Berechnung des Luftvolumenstromes an die Hand zu geben, wird der Luftaustauschkoefizient in einem dreistöckigen Bürohaus in Lausanne untersucht. Bei großen Öffnungen wird der Austauschkoefizient durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Um den Windeinfluss in den Messungen zu vernachlässigen, wurde in der windstillen Zeit gemessen. Der ermittelte Austauschkoefizient beträgt  $0,6 \pm 0,1$  bei windstillen Bedingungen. Für höhere Windgeschwindigkeiten kann keine Aussage getroffen werden, da der Austauschkoefizient stark schwankt. Abschließend wurde festgehalten, dass vereinfachte Planungsansätze für die Berechnung des Luftvolumenstroms eine brauchbare Genauigkeit für die Planung der Nachtlüftung liefern. Die Ergebnisse lassen sich trotz modellbedingter Vereinfachungen gut anwenden, da auch die Eingabedaten gewisse Ungenauigkeiten enthalten (Flourentzou et al. 1998).

In einem Buch über natürliche Lüftung von Gebäuden werden verschiedene Rechenansätze für die Berechnung des Luftvolumenstromes vorgestellt. Behandelt werden stationäre und instationäre Rechenansätze für Räume mit kleinen und großen Öffnungen. Vorgestellt werden Ansätze für Luftstromknotenmodelle mit denen der Luftaustausch in mehreren Räumen rechnerisch nachgebildet werden kann. Ein Teil des Buches beschreibt Ansätze für numerische Simulationsverfahren (CFD). Der Luftaustauschkoefizient für große vertikale Öffnungen ohne Windeinfluss wird mit 0,6 angeführt (Etheridge 2012).

#### **2.1.4 Verwendung von Luftstromnetzwerkmodellen**

Um in tropischen Regionen Gebäude errichten zu können, die aus Kostengründen nur mit natürlicher Belüftung auskommen, wurde eine Möglichkeit geschaffen, einfach und kostengünstig die Gebäudebelüftung zu berechnen. Dazu wurde ein Netzwerkmodell entwickelt, das mit einfacher PC-Hardware, die thermisch induzierten und windinduzierten Luftvolumenströme in einem Gebäude berechnen kann. Das Ziel war ein Rechenalgorithmus, der ein Gebäude möglichst exakt abbildet, aber ohne finite Volumenelemente auskommt, da diese eine hohe Rechenleistung und eine umfangreiche Rechenvorbereitung erfordern. Das Rechenmodell besteht aus Knoten und Widerständen, analog zu elektrischen Schaltungen. Mittels Hardy-Cross Verfahren werden die Luftvolumenströme an den Netzknoten solange iteriert, bis der Fehler im gesamten Netzwerk hinreichend klein ist. Das Ergebnis der Arbeit sind Gleichungen, aus denen der Leser am PC ein Luftstromknotennetzwerk nachbilden kann (Aynsley 1997).

Um dem Planer ein einfaches Werkzeug zur Berechnung des thermisch-induzierten Luftwechsels zu geben, wurde aus Ansätzen basierend auf der Bernoulligleichung, eine analytische Lösung für die Luftvolumenströme in einem Gebäude mit zwei Öffnungen in unterschiedlicher Höhenlage und einer gleichmäßigen Temperaturverteilung berechnet. Mit dem Ansatz können auch Gebäude mit mehr als zwei Öffnungen und einer ungleichen Temperaturverteilung über die Raumhöhe betrachtet werden. Mit den Gleichungen lässt sich der Luftdurchsatz durch das Gebäude und die Temperaturverteilung im Inneren berechnen. Des Weiteren lassen sich mit dem Modell Planungsfragen wie z.B. das Verhältnis und die Ausrichtung von Öffnungsflächen und der Einfluss der Temperaturschichtung im Inneren beantworten (Andersen 2003).

Auf der Suche nach dem Potential von natürlicher Lüftung im Bezug auf die Ersparnis von Kühlenergie und dem möglichen thermischen Komfort wurde die Lüftung eines dreistöckigen Bürohauses mit dem Programm Energy Plus studiert. Dabei wurden in einer dynamischen Simulation mit gekoppelten Luftstromnetzwerken die operativen Raumtemperaturen und die Luftvolumenströme berechnet. Das Ziel der Untersuchungen sollen Aussagen zum thermischen Komfort in Bürohäusern an Orten in unterschiedlichen Klimazonen sein. Als Berechnungsstandorte wurden Stuttgart (Deutschland), Turin (Italien) und Istanbul (Türkei) ausgewählt. Neben der Berechnung der Gesamtlüftungssituation wurden Detailsituationen wie z.B. Lüftungskamine oder die Auswirkung von Fenstergröße, Position in der Wand und Orientierung untersucht. Die Berechnungen wurden für den thermisch-induzierten und den windinduzierten Luftvolumenstrom durchgeführt. Eines der Ergebnisse der Arbeit war, dass analytische Gleichungen für die Berechnung des Luftvolumenstromes mit einfachen stationären

Luftstromknotennetzwerk-Simulationen gut übereinstimmen. Die Lage der Öffnung in der Fassade wurde nicht berücksichtigt. Damit verzichtete man jedoch auf einen bedeutenden Einflussfaktor. Eine weitere Erkenntnis war, dass der Einsatz von Lüftungskaminen bei thermisch induzierter Lüftung einen 5-9 fachen Luftwechsel mit sich bringt. Eine wichtige Aussage war, dass bei Einzelraumlüftung die höchsten Luftwechsel auftreten, wenn die Lüftungsöffnung knapp unter der Decke liegt oder wenn die Lüftungsöffnung in eine obenliegende und eine untenliegende Öffnung aufgeteilt ist (Schulze und Eicker 2013).

### **2.1.5 Herleitung des Modells der stockwerkübergreifenden Querlüftung**

In Kapitel 2 eines Berichts über die Durchströmung von großen vertikalen Öffnungen in Gebäuden (IEA – Annex 20) wurden sämtliche rechnerische Zusammenhänge zum thermisch induzierten Luftwechsel aus der Literatur zusammengestellt. Die Zusammenhänge bildeten die Grundlage für vergleichende Luftströmungsuntersuchungen in verschiedenen Labors weltweit. Als Untersuchungsobjekt diente ein einfaches Referenzgebäude mit zwei Öffnungen, das zufolge eines thermisch-induzierten Luftwechsels durchströmt wurde. Aus den Mess- und Berechnungsergebnissen wurde sichtbar, dass die Luftgeschwindigkeitsprofile in den Öffnungen unterschiedlich verlaufen und die Lage der neutralen Ebene nicht gleich ist. Die Autoren kamen zum Schluss, dass der Verlauf der Luftgeschwindigkeit linear angenähert werden soll und der Luftvolumenstrom mittels analytischen Ansatzes auf Basis der Bernoulligleichung berechnet werden soll (Maas 1992).

Ausgehend von der Bernoulligleichung wird der temperaturinduzierte Massenstrom der Luft und die Wärmestromverteilung zwischen Räumen berechnet. Ausgehend von einem Ansatz mit komplexen Zahlen wird die Massenstromverteilung für die obere und untere Hälfte der Öffnung unter Berücksichtigung der vertikalen Temperaturverteilung in der Öffnung angeführt. Die Verteilung der Luftvolumenströme wird in Abhängigkeit der Höhe berechnet und ist nichtlinear. Aus den Ergebnissen kann herausgelesen werden, dass vertikale thermische Schichtungen einen Einfluss auf das Ergebnis der Luftvolumenstromberechnung haben. Aus den rechnerischen Zusammenhängen lassen sich Knotennetzwerkmodelle für die Berechnung der Durchlüftung von Mehrzonen-Objekten erstellen (Hensen et al. 1993).

Im Rahmen von International Energy Agency (IEA) – Annex 23 wurde ein Algorithmus zur Berechnung von Luftvolumenströmen in mehrere Zonen entwickelt (COMVEN). Ziel der Untersuchung war es, mit einer Empfindlichkeitsanalyse die Robustheit des COMVEN-Modells auf Ungenauigkeiten in den Messungen hin zu überprüfen. Für die

Empfindlichkeitsanalyse wurden der Teilfaktorplan und die Monte Carlo Methode verwendet. Es stellte sich heraus, dass die Monte Carlo Methode eine gute Aussage über die Genauigkeit des gesamten Modells liefern kann. Der Teilfaktorplan ist geeignet für Detailbetrachtungen, bei denen es um das Verständnis physikalischer Vorgänge geht. Dadurch konnte das Modell validiert werden und es wurde festgestellt, dass das Modell geeignet ist, um den temperaturinduzierten Luftvolumenstrom in Einfamilienhäusern berechnen zu können (Borchiellini und Fürbringer 1999).

Im Rahmen vom IEA Annex 27 wurde die Zuverlässigkeit in der Bestimmung des Luftvolumenstromes mittels Simulationsberechnung untersucht (COMIS) und mit Tracergasmessungen verglichen. Dazu wurden das Innen- und Aussenklima sowie die Luftvolumenströme bei Fensterlüftung und verschiedenen mechanischer Lüftung an typischen Ein- und Mehrfamilienhäusern in Schweden erfasst. Die Auswahl der Messobjekte sollte den Hausbestand in Schweden abbilden und die Möglichkeit zur Untersuchung der verschiedenen Lüftungssysteme bieten. Im Rahmen der Messungen wurde auch die Luftdichtheit der Gebäude bestimmt und Leckagen geortet. Der Vergleich zwischen Messung und Berechnung zeigt, dass der durchschnittliche Luftwechsel in allen Lüftungssystemen gleich und die Übereinstimmung sehr gut ist. Bei der Betrachtung des stündlichen Luftwechsels gab es größere Unterschiede zwischen Messung und Simulation. Bei einigen mechanischen Systemen wirken sich Leckagen stärker aus. Die Ungenauigkeiten in den Ergebnissen hängen bei den Tracergasmessungen von Messunsicherheiten ab. Bei der Simulationsberechnung kann das Ergebnis durch Unsicherheitsfaktoren wie Undichtheiten in der Hülle, lokale Windeinflüsse oder die falsche Einschätzung von Koeffizienten hervorgerufen werden (Blomsterberg et al. 1999).

In einem Leitfaden zur Modellierung von Luftströmungen werden verschiedene Modelle zur Berechnung von Luftvolumenströmen in einem Raum oder mehreren Zonen vorgestellt. Ein Großteil der vorgestellten Modelle sind Netzwerkmodelle. Durch die rechnerische Berücksichtigung der Luftschadstoffe können Aussagen über die Innenluftqualität gemacht werden. Im Anhang wird die Koppelung von Luftströmungsberechnungen mit der Berechnung von Temperaturen vorgestellt. Damit ist es möglich, thermische Raumsimulationen für mehrere Zonen durchführen zu können (Orme und Leksmono 2002).

Anhand eines dreistöckigen Beispiel-Bürogebäudes mit Stiegenhaus und Atrium wird die Entwicklung eines einfachen Modells zur Berechnung der natürlichen Lüftung zufolge thermisch induzierten Luftwechsels beschrieben. Das Rechenmodell soll zur Berechnung der Querlüftung von großen Räumen zwischen Stiegenhaus und Atrium mit Lüftungskamin geeignet sein. Als Vorbild für das Beispiel-Büroobjekt dienen

Untersuchungen an einem Bibliotheksgebäude in Coventry (UK) und an einem Seitentrakt der Wiener Hofburg (A). Von einer Druckbilanz des Objekts ausgehend wurde der Luftvolumenstrom zufolge thermisch induzierten Luftwechsels mittels Iteration errechnet. Die Temperaturschichtung im Gebäude wurde in der Berechnung vernachlässigt. Vergleichend wurde für den Fall des konstanten Wärmeeintrags in den Räumen aller Stockwerke, die Gleichungen numerisch gelöst. Das Ziel der Arbeit war die Ableitung von einfachen Bemessungsregeln aus der rechnerischen Untersuchung der Luftvolumenströme im Gebäude. Generell kann festgehalten werden, dass die Wahl von gleichen Lüftungsöffnungen unterschiedliche Luftvolumenströme in den einzelnen Stockwerken hat. Besonders in den oberen Stockwerken wurden niedrigere Luftvolumenströme bei höheren Innenraumtemperaturen beobachtet. Die Erwärmung des Lüftungskaminkopfs z.B. durch Sonnenbestrahlung wirkt sich ebenfalls auf die Luftvolumenströme im Inneren aus. Bei der Untersuchung hat sich gezeigt, dass sich eine Querlüftung nur dann einstellt, wenn das Verhältnis der Öffnungsfläche im Gebäudeinneren zur Öffnungsfläche nach außen höchstens 1 zu 10 beträgt. Die Öffnungen im Gebäudeinneren dürfen deswegen nicht zu groß gewählt werden, da es sonst zu Austauschströmungen innerhalb des Gebäudes kommen kann (Acred und Hunt 2014).

### **2.1.6 Vergleich Luftstromnetzwerkmodell – Messung**

In einer Dissertation werden der Wärmetransport und Luftströmungen in Gebäuden untersucht. Ausgehend vom bisherigen Stand der Planungsmethodik werden Rechenansätze für die thermische Leistung eines Gebäudes erstellt. Mit Messungen an einem Forschungshaus werden die Berechnungsmodelle für die Luftvolumenströme, die Innentemperaturen und den Energieverbrauch des Gebäudes verglichen bzw. validiert. Zur Berechnung der Luftvolumenströme und Wärmeströme im Gebäude, werden Netzwerkmodelle verwendet. Durch die Verknüpfung der Luftvolumenstromberechnung und der Wärmestromberechnung kann ein Gebäudemodellierungsalgorithmus erstellt werden. Besonders betrachtet werden die doppelt verglasten Isolierglasfenster. Der Autor kommt zum Schluss, dass computerunterstützte Berechnungssysteme die Art und Weise wie Gebäude geplant werden, beeinflusst bzw. verbessert. Weiters stellt er fest, dass die Ermittlung des Energiebedarfs von Häusern nicht nur einen Einfluss auf die Gebäudeplanung, sondern auch auf die Wahl der Anlagentechnik hat. Die daraus resultierenden Erkenntnisse bringen für alle am Planungsprozess Beteiligten Vorteile und zeigen Energiesparpotentiale auf (Cockroft 1979).

Die Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit von Mehrzonen- Netzwerkmodellen anhand von Luftvolumenstrommessungen in n-Zonen wird in einem wissenschaftlichen

Aufsatz beschrieben. Bei konventionellen Verfahren werden die Luftvolumenströme mittels Erstellung einer Massenbilanz und mit Einführung von Hilfsgrößen ermittelt. Aufgrund der großen Anzahl von Zonen im Objekt ( $n$ -Zonen) und des interzonalen Austauschs bei einer Vielzahl der Luftvolumenströme ( $n \times n-1$  – Luftströme) können unplausible Ergebnisse, wie z.B. negative Luftvolumenströme, auftreten. Bei der Verwendung von konventionellen Netzwerkmodellen ist es nicht möglich, Aussagen über die Berechnungsgenauigkeit gemacht werden. Im neuen Ansatz, unter Zuhilfenahme von finiten Elementen, werden die Luftvolumenströme im Mehrzonenmodell mittels Iteration der Abstandsquadrate errechnet. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse wird mittels Statistik überprüft. Dabei wurden die Luftvolumenströme nicht als einfache Luftvolumenströme sondern als konzentrations-gewichtete mittlere Luftvolumenströme dargestellt. Ein Teil der Rechenergebnisse wurde experimentell validiert. Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt. Eingearbeitet wurde auch eine Verbesserung der Berechnung des Wärmetransports und der Infiltration bei Mehrzonenmodellen (Okuyama et al. 2009).

In Form einer simulierten Messung fand eine Berechnung mit dem finiten Elemente-Modell (siehe Okuyama et al. 2009) anhand der meteorologischen Randbedingungen von Tokio statt. Das angenommene Untersuchungsobjekt war ein zweistöckiges Holzhaus mit 10 m x 10 m Grundfläche und 6 m Höhe. Die Ergebnisse wurden mit der Systemparameter-Überprüfungstheorie (vgl. Okuyama et al. 2009) verglichen, um den Fehler zu errechnen. Um die Berechnungsfehler gering zu halten, wird angemerkt, dass echte Messergebnisse zur Validierung notwendig sind. Die Abschätzung mit dem Systemparameter-Überprüfungsmodell ist grundsätzlich gut. Die effektive Wärmekapazität des Gebäudes wird als Unsicherheitsfaktor gesehen. Das vorgestellte Modell kann an natürlich belüfteten Ein- und Mehrfamilienhäuser angewendet werden. Es ist nicht geeignet für die Berücksichtigung von flächenhaften Speichermedien im Raum wie Heiz- und Kühldecken (Okuyama und Onishi 2012).

### **2.1.7 Vergleich CFD-Analyse – Messung / CFD-Analyse – Netzwerkmodell**

In einem zweistöckigen Wohnhaus nahe Athen (GR) wurde im Stiegenhaus der temperaturinduzierte Luftvolumenstrom untersucht. Die Stiege verläuft am Rand einer Außenwand und in der Mitte des Stiegenhauses befindet sich eine horizontale Öffnung (offene Stiegenspindel, die theoretisch einen vertikalen Luftaustausch zulassen würde). Das Ziel der Untersuchung war herauszufinden, wie sich die Form der Stiegenuntersicht mit dem jeweiligen Luftvolumen auf den Luftvolumenstrom und die Wärmeströme durch die horizontale Öffnung in der Mitte des Stiegenhauses auswirkt. Dazu wurde die Situation in einer CFD-Simulation abgebildet und es wurden Tracergasmessungen vor

Ort durchgeführt. Bei den Tracergasmessungen im Abklingverfahren stellte sich heraus, dass die Untersuchung des gesamten Stiegenhauses als eine Zone keine brauchbaren Ergebnisse lieferte. Es wurde bei der Messung sichtbar, dass sich jedes Stockwerk als eigene Zone verhielt. Es wurde gezeigt, dass die theoretischen Ansätze für Luftvolumenströme durch große Öffnungen auch auf horizontale Öffnungen anwendbar sind. Ebenfalls gezeigt wurde, dass der Austauschkoeffizient von der mittleren Temperaturdifferenz abhängig ist. Die Größe der Öffnungen hat keinen Einfluss auf den Austauschkoeffizienten. Durch die komplexe Geometrie des Stiegenhauses und die damit verbundenen Verwirbelungen im Luftvolumenstrom wurden in der CFD-Berechnung dreidimensionale Luftströmungen sichtbar. Dadurch ist eine thermische Kopplung beider Zonen nicht gegeben. Durch die Turbulenzen im Stiegenhaus fällt der Austauschkoeffizient ab und die Temperaturdifferenz im Stiegenhaus steigt an. Die Übereinstimmung zwischen den Messungen und dem CFD-Modell betrug bei den absoluten Werten 12 %. Die CFD-Berechnung war deswegen anwendbar, da die Luftströmungen relativ stabil waren. Um eine generelle Aussage machen zu können, sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Stiegenhausformen und -geometrien notwendig (Peppes et al. 2001).

Im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung an einem Versuchsraum wurden die Fragen beantwortet, ob die Berechnungsannahmen für Netzwerkmodelle für die Berechnung von Raumtemperatur und Luftvolumenströme richtig sind. Ebenfalls gefragt wurde, ob die thermischen Bedingungen im Raum konstant sind und ob man interne Luftbewegungen beim thermisch induzierten Luftwechsel wirklich vernachlässigen kann. Dazu wurde ein Versuchsraum in vier Zonen aufgeteilt, um die verschiedenen Bereiche des Luftvolumenstromes (Einströmen, Übergang, turbulente Durchmischung, Auslauf) durch einen Raum abzubilden. Zusätzlich wurde punktuell Wärme eingetragen. Die Labormessungen wurden mit Netzwerkmodellrechnungen (CONTAM) und CFD-Simulationsergebnissen verglichen. Die Untersuchung zeigt, eine signifikante Abweichungen von der Annahme es gebe innerhalb eines Raumes keine Luftbewegung und dass die Temperaturverteilung im Raum konstant ist. Keine interne Luftbewegung im Raum kann nur dann angenommen werden, wenn die Archimedeszahl einen bestimmten Wert überschreitet. Außerdem wurde festgestellt, dass die Länge des Hauptluftstromes bei fixer Einströmöffnung abhängig von der Lage der Ausströmöffnung ist (Wang und Chen 2008).

Um die Strömungssituation in einem Raum rasch berechnen zu können, wurde in einer Dissertation (Norrefeldt 2013) die Möglichkeit gesucht, die Genauigkeit von CFD-Simulationen mit der kurzen Rechenzeit von Netzwerkmodellen zu kombinieren. Es

wurde das zonale Modell VEPZO (velocity propagating zonal model) entwickelt, bei dem ein Raum in 10 bis 100 Zonen unterteilt wird. Ein zonales Modell besteht aus den Hauptkomponenten Volumen und Flüsse. Mit dem Modell wird der Luftaustausch zwischen den Volumenelementen berechnet und nach kurzer Rechenzeit mit einem handelsüblichen PC können die Strömungsverhältnisse in einem Raum vorhergesagt werden. Das Modell wurde an Mess- und Simulationsergebnissen eines Versuchsraums ( $L_1 \times L_2 \times L_3 = 2,6 \times 3,6 \times 2,55\text{m}$ ), die in einer anderen Arbeit gewonnen wurden, überprüft. Bei der Abbildung des Raumes mit VEPZO wurde der Raum einmal in gleich große Volumenelemente geteilt und im andern Fall so geteilt, dass die Elemente im Randbereich kleiner sind. Im zweiten Fall war die Geschwindigkeitsvorhersage am Rand genauer. VEPZO ist geeignet, um schnell das Strömungsverhalten z.B. aufgrund einer lokalen Wärmequelle in einem Raum vorhersagen zu können (Norrefeldt 2013).

Um die windinduzierte Querlüftung berechnen zu können, wurden Windkanalmessungen durchgeführt, die mit CFD-Simulationsrechnungen verglichen wurden. Das CFD-Modell basiert auf den nach Reynolds gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS). Das Versuchsobjekt ist ein quadratisches Haus mit vier gleich großen Räumen. Die Einströmöffnung wird direkt vom Wind angeströmt. Die Ausströmöffnung befindet sich auf der windabgewandten Seite. Die Räume sind miteinander durch große Öffnungen verbunden. Bei den Tracergasmessungen im Abklingverfahren wurde das Objekt von 0 bis 90° in 30° Schritten gedreht bis die Ein- und Auslassöffnung parallel zur Windrichtung stehen. Im Zuge der Messungen wurde auch der Luftvolumenstrom in den unterschiedlichen Höhenlagen bestimmt. Bei windparalleler Anströmung zeigt der Vergleich der Messergebnisse mit der Simulationsrechnung die größten Unsicherheiten. Damit die Luftgeschwindigkeitsprofile an den Einström- und Ausströmöffnung in der Berechnung genauer werden, sind die Zeiträume entsprechend lang zu wählen. Bei windparalleler Anströmung wurde im Inneren eine gleichmässigerer Verteilung der Luftvolumenströme festgestellt. Aufgrund von Hindernissen im Raum (z.B. Möbel) konnten Unterschiede zwischen tatsächlichem und effektivem Luftvolumenstrom im Inneren beobachtet werden. Generell kann festgehalten werden, dass eine komplexe Innenraumgeometrie eine höhere Verwirbelung im Innenraum mit sich bringt und den Unterschied zwischen tatsächlichem und effektivem Luftwechsel größer werden lässt (Nikolopoulos et al. 2012).

Um den Einfluss des Windes auf die Lüftung in Wohngebäuden zur Vermeidung von sommerlicher Überwärmung zu erforschen, wurden an einem zehnstöckigen Wohnhaus ( $L \times B \times H = 14 \text{ m} \times 21 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ) Windkanalmessungen durchgeführt. Parallel dazu wurden die Luftvolumenströmungen zufolge Wind mit einem CFD-Modell berechnet und

das Modell mit den Windkanalmessungen validiert. Abschließend wurde die operative Temperatur und die Ergebnisse zufolge windinduzierter Luftströmungen aus dem CFD-Modell berechnet und mit der operativen Temperatur zufolge thermisch induzierter Luftströmungen nach ÖNORM B 8110-3:2012 (ÖNORM B 8110-3) verglichen. Bei der Untersuchung der windinduzierten Luftvolumenströme mit Windkanalmessung und CFD-Modell wurde neben dem Einfluss auf das gesamte Gebäude auch der Einfluss des Windes auf unterschiedliche Fensterstellungen untersucht. Die Abweichung zwischen Messung und CFD-Berechnung betrug ca. 10-25 %. Beim Vergleich der berechneten und gemessenen Luftvolumenströme in verschiedenen Maßstäben hat sich gezeigt, dass der Maßstabsfaktor die Messergebnisse generell nicht beeinflusst. Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Luftvolumenstrom im Inneren je nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit von der Lage der Öffnungen im Raum abhängt. Zusätzlich wirken sich auch die lokalen Außenluftströmungen und die Druckverteilungen am Fenster aus. Im Vergleich der operativen Raumtemperaturen in einer Querlüftungssituation mit gekippten Fenstern zufolge Wind und thermisch induzierten Luftwechsel nach ÖNORM-Berechnung hat sich gezeigt, dass der windinduzierte Luftwechsel um das ca. 3-6 fache über dem thermischinduzierten Luftwechsel liegt (Teppner et al. 2014).

### **2.1.8 Luftdurchsatz durch Insektengitter**

Um Gewächshäuser in Israel natürlich belüftet zu können, werden statt dichten Seitenwänden Insektengitter eingesetzt. Mangelnde Luftdurchlässigkeit und erhöhte Windsogbeanspruchung der Seitenwände und der gesamten Konstruktion wurden in Gewächshäusern beobachtet. Um Erhaltungskosten zu sparen, wurde der Einfluss der Neigung und der Durchlässigkeit von Insektengittern mit Windkanalmessungen und CFD-Berechnungen untersucht und das CFD-Modell durch Messungen validiert. Untersucht wurden die praxisrelevanten Neigungen von 45° / 90° / 135° und die Durchlässigkeiten 0,40 / 0,52 / 0,62 von Insektengittern. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Neigung der Seitenwände eines Gewächshauses einen Einfluss auf die Windanströmung im Dachbereich und das gesamte Gewächshaus hat. Sind die Seitenwände nach innen geneigt (45°) so ist das Gebäude anfälliger für Windsogkräfte auf die Wände als bei nach außen geneigten Wänden (135°). Dafür ist der Luftdurchsatz bei nach innen geneigten Wänden (45°) höher als bei nach außen geneigten Wänden (135°) (Teitel et al. 2009).

Mittels CFD-Berechnung wurde der Einfluss des Insektengitters in den Öffnungen eines Tunnel-Gewächshauses untersucht. Das Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, wie sich das Insektengitter in der Lüftungsöffnung auf den Luftvolumenstrom und die Temperaturverteilung im Gewächshaus auswirken. Die Berechnung hat folgende Ergebnisse gezeigt: Ein Insektengitter reduziert den Luftvolumenstrom besonders in den

Ecken und Randbereichen um ca. 50 % und ist für einen Temperaturanstieg im Inneren mitverantwortlich. Bei einer Außentemperatur von 27°C lag die Innentemperatur ohne Insektengitter um 3°C über der Außentemperatur. Bei Verwendung eines Insektengitters lag die Innentemperatur um 7°C über der Außentemperatur. Weitere Einflussfaktoren auf Luftvolumenstrom und Raumtemperatur im Inneren waren die Windrichtung und der Strömungswiderstand durch Nutzpflanzen. Durch die Simulation wurde sichtbar, dass die Luftvolumenströme im Bereich von Öffnungen stärker waren als in der Raummitte. Zuletzt wurde festgehalten, dass die Ergebnisse ein gutes Bild über den Einsatz von Insektengittern von Gewächshäusern liefern, aber nicht verallgemeinert werden können (Bartzanas et al. 2002).

An einem zweischiffigen Glashaus in Portugal ( $L \times B \times H = 6,6 \text{ m} \times 4,1 \text{ m} \times 4,5 \text{ m}$ ) wurde der Einfluss von Insektengittern auf den Luftwechsel und das Innenklima mit vor Ort-Messungen und einem Netzwerkmodell untersucht. Untersucht wurde eine Dachöffnung mit und ohne Insektengitter. Weiters wurde der vertikale Luftvolumenstrom vom Boden durch die Dachöffnung durch ein durchlässiges Material mit den Ausmaßen der gesamten Bodenfläche mit und ohne Öffnung des durchlässigen Materials untersucht. Ziel der Arbeit war es, den Einfluss von luftdurchlässigen Materialien auf das Innenklima zu studieren. Die Übereinstimmung zwischen dem Netzwerkmodell und den Windkanalmessungen war sehr gut. Es wurde gezeigt, dass das Innenklima im Gewächshaus von der Durchlässigkeit des Insektengitters abhängt. Weitere Einflussfaktoren auf das Innenklima sind die Öffnungsgeometrie und die Windgeschwindigkeit. Bei kleinen vertikalen Öffnungen konnte beobachtet werden, dass die Wirksamkeit des Insektengitters im Vergleich zur Situation ohne Insektengitter bei geringen Windgeschwindigkeiten mit der Fenstergröße direkt proportional ansteigt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten sinkt die Wirksamkeit des Insektengitters bei ansteigender Fenstergröße ab. Keine Wirkung auf das Innenklima haben Insektengitter mit geringer Durchlässigkeit ( $K = 10^{-10} \text{ m}^2$ ) bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten ( $>18 \text{ m/s}$ ) und Insektengitter mit höheren Durchlässigkeiten ( $K > 10^{-8} \text{ m}^2$ ) bei üblichen Windgeschwindigkeiten ( $>4 \text{ m/s}$ ). Bei horizontalen Insektengittern mit Öffnungen im Inneren von Gewächshäusern konnte festgestellt werden, dass die Wirkung eines teilweise geöffneten Querschnitts im Vergleich zum vollständigen Querschnitt mit zunehmender Größe der Öffnung abfällt. Die Wirkung eines teilgeöffneten Querschnitts in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit hängt stark von der Durchlässigkeit des horizontalen Insektengitters ab. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich nicht nur auf Gewächshäuser anwenden, sondern können auch auf andere Gebäude angewendet werden (Miguel und Silva 2000).

Anhand dreidimensionaler Luftgeschwindigkeitsmessungen an landestypischen Gewächshäusern der Region Almeria (Spanien) wurde der Einfluss des Windes auf Insektengitter unter Berücksichtigung von Strömungshindernissen (z.B. Nutzpflanzen, Hinweisschildern) untersucht. Zusätzlich wurde der Austauschkoefizient für Luftströmungen durch Insektengitter unter Windeinfluss bestimmt. Das untersuchte fünfschiffige Gewächshaus ( $L \times B \times H = 38,5 \text{ m} \times 44 \text{ m} \times 3,2 \text{ m}$ ) hat an der Vorder- und Rückseite (Breitseite) jeweils eine große Ein- und Ausströmöffnung, die mit Insektenschutzgittern ausgestattet ist. In zwei der fünf Dachfirste, die parallel zur Breitseite angeordnet sind, sind ebenfalls Öffnungen mit Insektengitter eingebaut. Der Öffnungsanteil des Gitters beträgt 0,34 (Durchlässigkeit). Die Luftvolumenströme durch das Gewächshaus wurden mit drei verschiedenen CFD-Modellen berechnet und mit den Luftgeschwindigkeitsmessungen validiert. Der Austauschkoefizient wurde direkt aus den Messungen bestimmt. Die Messungen zeigen einen mittleren Austauschkoefizienten bei den Öffnungen zufolge des Windes von 0,193. Die Abminderung des Austauschkoefizienten bei Blattlausinsektengittern beträgt 71 % im Vergleich zu Öffnungen ohne Gitter.

Bei der Betrachtung der Durchströmung des Gewächshauses mit freien Lüftungsöffnungen und ohne Hindernisse im Inneren kann ein durchgehender Luftstrom beobachtet werden. Befindet sich in der Nähe der Ein- oder Ausströmöffnung ein Hindernis, kommt es darauf an, ob die Öffnung eher leeseitig oder luvseitig situiert ist. Wird das Hindernis direkt angeströmt, so teilt sich der Luftvolumenstrom auf; ein Teil geht ins Innere des Gewächshauses, der andere Teil geht nicht ins Gewächshaus. Befindet sich das Hindernis auf der windabgewandten Seite, so teilt sich der Luftvolumenstrom in eine obere und eine untere Hälfte. Die Luft in der unteren Hälfte strömt ins Innere des Gewächshauses, die Luft in der oberen Hälfte strömt aus dem Gewächshaus heraus. Durch die Verwendung von dreidimensionalen Anemometern können die Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzen genauer erfasst werden (Molina-Aiz et al. 2009).

Durch den Einsatz von Insektengittern in Gewächshäusern können Nutzpflanzen mit weniger Einsatz von Pestiziden vor Schädlingsbefall geschützt werden. Wirksame Insektenschutzgitter sind sehr engmaschig. Durch den Einsatz dieser Insektengitter entsteht bei Durchströmung einer Lüftungsöffnung ein Druckverlust, wodurch die Durchströmung geringer und die Innentemperatur höher ist. Anhand von Windkanalmessungen an drei Insektengittertypen (Gitter mit einer Durchlässigkeit von 0,78, 17-er Maschengitter mit einer Durchlässigkeit von 0,629 und 50-er Maschengitter mit einer Durchlässigkeit von 0,355) wurde der Druckverlust durch Insektengitter im Dachbereich von Gewächshäusern untersucht. Es wurden Temperatur- / Luftfeuchte-

messungen sowie die Außenklimabedingungen an einem vierschiffigen Gewächshaus für Pfefferpflanzen in Israel durchgeführt. Das Gewächshaus hatte eine Bodenfläche von 960 m<sup>2</sup> mit einer Längsseite von 32 m. Die Insektengitter waren in den vertikalen Öffnungen der tonnenförmigen Shed-Dächer mit einer Gesamtöffnungsfläche von 84 m<sup>2</sup> untergebracht. Aus den Messungen wurden der Austauschkoefizient für die Situation mit Insektengitter und der Druckverlust berechnet. Für die Berechnung des Austauschkoefizients und des Druckverlusts wurde ein Ansatz basierend auf der Bernoulligleichung gewählt. Alternativ wurde der Druckverlust durch Insektengitter mit der Forchheimer-Gleichung ermittelt. Die Methode der Berechnung der Austauschkoefizienten basierend auf der Bernoulligleichung kann für einfache Gitterstrukturen und für einen weiten Bereich von Luftströmungen verwendet werden. Die Berechnung mit der Forchheimer-Gleichung kann für komplizierte Gitterstrukturen eingesetzt werden. Bei sehr feinmaschigen Gittern kann das Verfahren mit der Forchheimer-Gleichung nicht verwendet werden. Die Windkanaluntersuchungen haben gezeigt, dass der Druckverlust bei sehr feinen Insektengittern sehr hoch ist und die Werte der Austauschkoefizienten gering. Bei den Temperatur- und Luftfeuchtemessungen im Gewächshaus wurde deutlich, dass feinmaschige Gitter die Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Inneren der Gewächshäuser ansteigen lässt. Bei Öffnungen, an denen feinmaschige Insektengitter montiert werden, können Turbulenzen auftreten, die den Luftdurchsatz ebenfalls verringern (Teitel 2001).

Die vorliegenden Untersuchungen zum Thema „Insektenschutzgitter“ sind sehr weitläufig und durchwegs fallbezogen (Gewächshäuser). Das heißt, dass eine verallgemeinernde Anwendung oder gar eine Übertragung auf das Lüftungsverhalten in Wohnhäusern zumindest schwer möglich ist. Immerhin ist es möglich, ungefähre Aussagen zu unterschiedlichen Parametern wie Fadenquerschnitten und Fadenabstände, unterteilt in Längs- und Querrichtung zu treffen. Weiters wurde das Verhältnis zwischen geöffneter und gesamter Fläche und der Luftdurchlässigkeit der verschiedenen Gitter verglichen. Beim Vergleich der CFD-Berechnungen wurde darauf geachtet, wie die Berechnungssituation abgebildet wurde. Bei zwei Arbeiten wurde das Insektengitter dreidimensional modelliert und es konnte gezeigt werden, dass der Luftdurchsatz höher ist. In wenigen Arbeiten wurde ein Zusammenhang zwischen dem Luftdurchsatz und der Maschenweite des Insektengitters herausgearbeitet. Beim Vergleich der verschiedenen Ergebnisse mussten große Unterschiede festgestellt werden. Ein Grund dafür kann sein, dass verschiedene Autoren dasselbe Thema bearbeiten. Ein anderer Grund kann die Wahl der passenden Luftaustauschkoefizienten oder anderer Berechnungsparameter sein. In den verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass ähnliche Randbedingungen oft große Unterschiede in den Austauschkoefizienten oder im

Luftvolumenstrom hervorrufen. Generell zeigten alle Untersuchungen, dass der Einbau von Insektengittern in Öffnungen von Gewächshäusern einen niedrigeren Luftwechsel und höhere Innentemperatur und Luftfeuchtigkeit mit einem steileren Anstieg mit sich bringt (Teitel 2007).

## **2.2 Bewertung der verschiedenen Methoden zur Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung**

Aus der Zusammenfassung der Literaturlauswertung (siehe 2.1) werden die in den Arbeiten beschriebenen Verfahren nach Verwendbarkeit für die Untersuchungsmethodik diskutiert.

Die Diskussion der Einsetzbarkeit für die Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung in Einfamilienhäusern wurde in fünf Themenbereiche aufgeteilt:

- Allgemeine Themen zur natürlichen Lüftung
- Vereinfachte Verfahren
- Luftstromknotenberechnung
- Messverfahren aus Modellen – Einfluss des Insektenschutzes
- Finite Volumenelemente (CFD)

### **2.2.1 Allgemeine Themen zur natürlichen Lüftung**

Für eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Thema Lüftung ist es notwendig, sich mit dem Thema Komfort durch Lüftung, und die gesundheitliche Auswirkung durch Frischluft auseinanderzusetzen (Fabi et al. 2012), (Zhang und Barrett 2012), (Iftikhar et al. 2001), (Moujalled et al. 2008), (Stephens 2003).

In einer vorgestellten Arbeit über die Wichtigkeit des Lüftens werden vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung von Krankheiten durch mangelhafte Lüftung erläutert (Stephens 2003). Die Möglichkeit, selbst aktiv die Lüftung zu regeln, und die Bedeutung der Lüftung für den Komfort und die Zufriedenheit der Nutzer wurde anhand einiger Beispiele und Methoden vorgestellt (Fabi et al. 2012), (Zhang und Barrett 2012), (Iftikhar et al. 2001), (Moujalled et al. 2008).

Ein Überblick über 50 Jahre Forschung auf dem Gebiet der natürlichen Lüftung war ebenfalls Teil der Auseinandersetzung mit dem Thema Lüftung (Etheridge 2015).

In der vorliegenden Arbeit wurden die Erkenntnisse aus den Arbeiten über die Auswirkungen und den Komfort von natürlicher Lüftung als Hilfe für die Beurteilung der Ergebnisse in der Anwendung des Rechenmodells oder als Hilfe für die Erstellung des Untersuchungsprogramms herangezogen. Die geschichtliche Auseinandersetzung mit

den Lüftungsmethoden zur Vermeidung von Krankheiten ergab Einblick in die historische Entwicklung des Lüftungsverhaltens. Der Überblick über jahrzehntelange Forschung auf dem Gebiet der natürlichen Lüftung gab einen Überblick über die möglichen Verfahren zur Ermittlung der stockwerkübergreifenden Querlüftung.

### **2.2.2 Vereinfachte Verfahren**

Vereinfachte Verfahren bzw. Ansätze für vereinfachte Verfahren werden in (Maas 1992), (Etheridge 2012), (ÖNORM B 8110-3), (Maas 1995), (Hall 2004) vorgestellt. Mit den Rechenansätzen lassen sich unter stationären Bedingungen die Luftvolumenströme für einen Raum bzw. auch für eine stockwerksübergreifende Querlüftungssituation bestimmen. Die vorgestellten Ansätze berücksichtigen zum Großteil den thermisch induzierten Luftwechsel (Maas 1992), (Hensen et al. 1993), (Etheridge 2012), (ÖNORM B 8110-3), (Maas 1995), (Hall 2004). Es gibt aber auch Ansätze, die den windinduzierten Luftwechsel berücksichtigen (Etheridge 2012), (Flourentzou et al. 1998), (Maas 1995), (Hall 2004). In den vorgestellten Ansätzen sind auch Werte für Randbedingungen zur Verwendung in Netzwerk- oder Finiten Volumenelementenmodellen enthalten (z.B. Austauschkoefizienten).

Mit den vereinfachten Verfahren kann oft nur ein Raumvolumen bzw. eine mittlere Temperaturdifferenz und Luftgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Für eine Näherung oder Abschätzung der Situation ist das gut geeignet. Finden diese Verfahren in der praktischen Anwendung Einsatz, werden Erhöhungsfaktoren eingeführt, damit die Ergebnisse auf der „sicheren Seite“ liegen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Gleichungen der vereinfachten Verfahren für Vergleichsrechnungen und zur Überprüfung von Ergebnissen unter stationären Bedingungen herangezogen. Durch die Berechnung der Gleichungen aus den vereinfachten Verfahren für jeden beliebigen Zeitschritt konnten instationäre Luftvolumenströme modelliert werden. Aus der Verknüpfung der Luftvolumenströme mehrerer Räume konnte ein Luftstromknotennetzwerk für ein mehrzoniges Objekt gebildet werden (siehe 2.2.3).

### **2.2.3 Luftstromknotenberechnung**

Die Abbildung eines Gebäudes als Netzwerkmodell stellt eine gute Möglichkeit dar, den Luftvolumenstrom und die Wärmeströme zu erfassen. Mit einem Netzwerkmodell kann der Luftwechsel zufolge Temperaturunterschied und Windanströmung berechnet werden. Durch die Modellierung der Räume als Knoten mit Widerständen und Kapazitäten kann ein Gebäude ähnlich einer elektrischen Schaltung nachgeildet werden. Die Umgebungsbedingungen können ebenfalls in das Schaltungsmodell integriert werden.

Mit Netzwerkmodellen können daher auch instationäre Prozesse abgebildet werden. Der dafür notwendige Gleichungsalgorithmus ist verhältnismässig einfach. Für die Berechnung der Temperaturen und Luftvolumenströme über den Zeitraum eines Jahres in und rund um ein Gebäude wird eine verhältnismässig geringe PC-Leistung benötigt (Maas 1995), (Hall 2004), (Maas 1992), (Aynsley 1997), (Andersen 2003), (Schulze und Eicker 2013), (Maas 1992), (Hensen et al. 1993), (Borchiellini und Fürbringer 1999), (Blomsterberg et al. 1999), (Orme und Leksmono 2002), (Acred und Hunt 2014), (Cockroft 1979), (Okuyama et al. 2009), (Okuyama und Onishi 2012), (Miguel und Silva 2000).

Für die Erfassung der stockwerksübergreifenden Querlüftung in der vorliegenden Arbeit wurde die Berechnung des Luftvolumenstromes und der Raumtemperaturen mit dem Knotenmodell durchgeführt. Im Modell wurde der Luft- und Wärmeaustausch zwischen zwei Zonen berücksichtigt. Durch die Modellierung des Gebäudes als Netzwerk von unterschiedlichen Zonen konnten auch mögliche Speichereffekte des Gebäudes miterfasst werden.

Eine genauere Betrachtung der unterschiedlichen Luftbewegungen im Raum, analog zu den Arbeiten von (Wang und Chen 2008) und (Norrefeldt 2013) wurde in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Das Ziel der Arbeit soll ein einfaches Luftstromknotenmodell sein, mit dem das sommerliche Verhalten von Einfamilienhäusern berechnet werden soll. Die möglichen Ungenauigkeiten werden dabei zugunsten eines einfach verwendbaren Rechenalgorithmus in Kauf genommen. Sollen lokale Strömungen im Raum genauer untersucht werden, gibt es die Möglichkeit, mit qualitativen und quantitativen Methoden vor Ort zu messen (siehe 4.1), oder mittels Aufteilung des Raums in Teilbereiche (siehe VEPZO-Modell Norrefeldt 2013) zu berechnen. Für Strömungsuntersuchungen von Räumen oder Teilbereichen von Räumen mit einer höheren Genauigkeit steht die Nachbildung mit finiten Volumenelemente (CFD) zur Verfügung (siehe 2.2.5).

#### **2.2.4 Messverfahren aus Modellen – Einfluss des Insektenschutzes**

Um die Wirksamkeit von Insektenschutz zu quantifizieren, wurde der Einfluss von Insektengittern beim Einsatz in Gewächshäusern untersucht. Durch Windkanalmessungen wurden die Luftaustauschkoeffizienten ermittelt, und es konnten Verwirbelungen beobachtet und erfasst werden.

In weiterer Folge wurden die Luftaustauschkoeffizienten mit CFD-Modellen rechnerisch berücksichtigt (Teitel et al. 2009), (Bartzanas et al. 2002), (Teitel 2001), (Teitel 2007).

Alternativ dazu wurden die Luftaustauschkoeffizienten mit Netzwerkmodellen berechnet (Miguel und Silva 2000), (Molina-Aiz et al. 2009), (Teitel 2001). In allen vorgestellten Arbeiten wurden die Rechenmodelle anhand der Messergebnisse überprüft und angepasst.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Wirksamkeit von Insektengittern durch die geometrische Abminderung der Öffnungsfläche berücksichtigt. Die Turbulenzen an den Öffnungen wurden durch entsprechende Faktoren berücksichtigt.

Die Erkenntnisse aus den Windkanalmessungen und CFD-Modellen wurden herangezogen um Aufschluß über das Durchströmungsverhalten der verschiedenen Gittertypen zu erhalten. Die bei den Untersuchungen berechneten Austausch-koeffizienten wurden als Ausgangswerte für die vorliegende Arbeit verwendet.

### **2.2.5 Finite Volumenelemente (CFD)**

Finite Volumenelemente (CFD) Modelle sind geeignet um lokale Luftströmungen zu berechnen und abzubilden. Es können Teilbereiche von Räumen oder die Strömungssituation einer Fensteröffnung abgebildet werden (Hall 2004), (Teppner et al. 2014), (Wang und Chen 2008). Mit CFD-Modellen kann auch das Strömungsverhalten in einem Raum berechnet werden (Ramponi und Blocken 2012), (Ravikumar und Prakash 2011). CFD-Modelle eignen sich auch, um die Luftströmungen in mehreren Zonen zufolge des thermisch induzierten und windinduzierten Luftwechsels abzubilden (Peppes et al. 2001), (Nikolopoulos et al. 2012), (Nikas et al. 2010). Finite Volumenelemente ermöglichen die Betrachtung von stark und schwach durchströmten Bereichen innerhalb einer Zone. Das Strömungsverhalten an Öffnungen mit Insektengittern und das Quantifizieren von Turbulenzen kann ebenfalls mit finiten Volumenelementen berechnet werden (Ravikumar und Prakash 2011), (Teitel et al. 2009), (Bartzanas et al. 2002), (Molina-Aiz et al. 2009), (Teitel 2007). Mit dem VEPZO-Modell zeigt (Norrefeldt 2013) eine Möglichkeit auf, das Strömungsverhalten in Räumen durch Aufteilung des Raumes in Teilbereiche mit einem geringeren Rechenaufwand abzubilden.

Für die vorliegende Arbeit wurden keine CFD-Modelle eingesetzt, da dies dem Ziel der Aufgabenstellung widersprochen hätte, ein einfaches und übersichtliches Modell darzustellen. Auch das VEPZO-Modell kam nicht zur Anwendung, da das Ziel des Modellansatzes nicht war, das Strömungsverhalten in Räumen nachzubilden, sondern den Luftvolumenstrom zufolge des thermisch induzierten Luftwechsels für ein zweistöckiges Einfamilienhaus nachzurechnen.

### 3 Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt über den sommerlichen Wärmeschutz von Holzeinfamilienhäusern

Neben der Literaturlauswertung zum Thema „natürliche Lüftung“ und „Insektenschutz“ werden Erkenntnisse, die im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Holzforschung Austria (Teibinger et al. 2014) entstanden sind, vorgestellt. Gleichzeitig wird die Versuchsanlage beschrieben, an der die Tracergasmessungen zur Validierung des Rechenmodells durchgeführt wurden (siehe 4.1).

Für die vorliegende Arbeit sind folgende Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt (Teibinger et al. 2014) relevant:

- Nutzerverhalten beim Lüften
- Einflussfaktor Lüftung

#### 3.1 Beschreibung des Forschungsprojekts

Das Projektziel war die Untersuchung der Einflussfaktoren Bauweise, Wärmeeintrag und Lüftung auf die Sommerbehaglichkeit in Holzeinfamilienhäusern (siehe Abb. 2). Der gelbe Bereich in der Mitte von Abb. 2 zeigt die gemeinsame Wirkung aller Faktoren auf die Sommerbehaglichkeit, während bisher hauptsächlich der Faktor Bauweise als Planungsgröße herangezogen wurde. Neben der Quantifizierung der Einflußgrößen soll eine Möglichkeit geschaffen werden, diese Faktoren auch im Planungsprozess berücksichtigen und berechnen zu können.

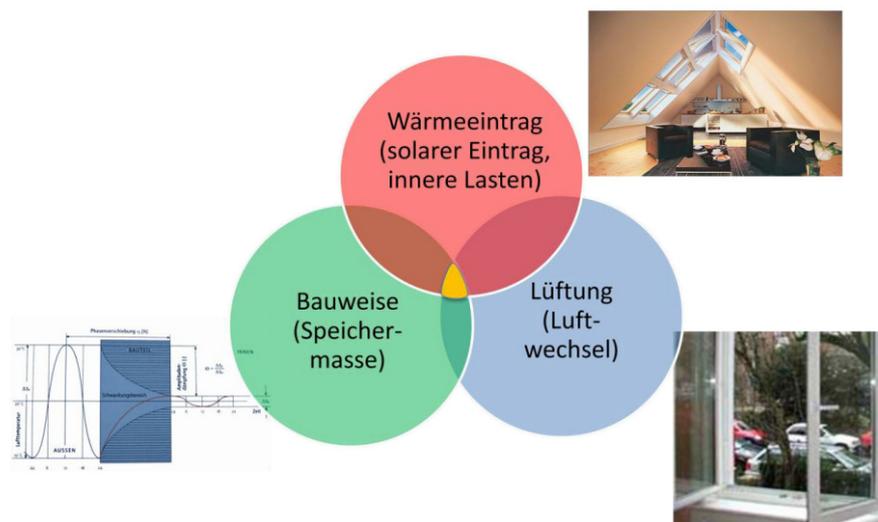


Abbildung 6: Zusammenwirkung aus Speichermasse, Wärmeeintrag und Lüftung

Abb. 2: Einflussfaktoren auf den sommerlichen Wärmeschutz, Quelle: (Teibinger et al. 2014)

Im Rahmen des COMET-Forschungsprojekts „energy efficiency – Sommerbehaglichkeit von Holzgebäuden“ wurden zwischen März 2010 und Februar 2014 an der Holzforschung Austria in Wien, Untersuchungen durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde ein bauphysikalisches Forschungshaus nordwestlich von Wien errichtet, in dem das thermischen Verhalten von verschiedenen Holzwandkonstruktionen und das Temperaturverhalten von Räumen mit bereichsweise verschieden aufgebauten Wandabschnitten untersucht wurden. Neben bewährten Bauweisen wurde auch das Verhalten von innovativen Baukonstruktionen studiert.

Die Messungen wurden mit einem eigens entwickelten und hier unter 4.4.1 vorgestellten Rechenmodell evaluiert. Das zugrunde gelegte Nutzerverhalten wurde durch Befragungen in typischen Haushalten erhoben.

Ein anderer Untersuchungsschwerpunkt waren Luftströmungsmessungen von Einzelräumen und der Querlüftung in Einfamilienhäusern, die in 4.1 näher beschrieben werden.

### **3.1.1 Untersuchungen im bauphysikalischen Forschungshaus**

Das beschriebene bauphysikalische Forschungsgebäude (siehe Abb. 3) ist ein zweigeschossiges Einfamilienhaus mit den Abmessungen  $L \times B \times H = 10,7 \times 8,7 \times 8,3$  m am Gelände der Holzforschung Austria in Stetten bei Korneuburg. In jedem Stockwerk sind jeweils 2 thermisch getrennte Räume, mit einer Nettfläche von  $10 \text{ m}^2$  eingebaut worden, von denen einer jeweils in der Holzrahmen Bauweise, der andere in Holzmassivbauweise errichtet wurde. Die Außenwandhülle im Erdgeschoss besteht aus je 26 und im Obergeschoss aus jeweils 33 verschiedenen Wandelementen. Alle Fenster haben eine außenliegende Verschattung. Die Fenstertüren der thermisch getrennten Räume im Erdgeschoß weisen einen Öffnungsquerschnitt von  $2,16 \text{ m}^2$  auf ( $B \times H = 1,08 \text{ m} \times 2,01 \text{ m}$ ). Der Lüftungsquerschnitt der thermisch getrennten Räume im Obergeschoß beträgt  $0,83 \text{ m}^2$  ( $B \times H = 0,64 \text{ m} \times 1,30 \text{ m}$ ). Zusätzlich ist eine Lüftungsanlage mit einem maximalen Luftdurchsatz von  $800 \text{ m}^3/\text{h}$  eingebaut, die in den thermisch getrennten Versuchsräumen einen bis zu fünffachen Luftwechsel zwecks Studiums der Wirkungsweise von solchen Anlagen sicherstellen soll.

Das Nutzerverhalten wurde in Form von Wärme - und Feuchtequellen (künstliche „Bewohner“) nachgebildet. Für die Ansteuerung der Haustechnik und der künstlichen Bewohner gibt es eine BUS-Steuerung, damit verschiedene Nutzungsszenarien abgebildet werden können. Dadurch ist es möglich, die Bewegungen der elektrisch betriebenen Verschattung, der elektrisch offenbaren Fenster und der Steuerung der

Lüftungsanlage zur Simulation des Fensterluftwechsels, zu realisieren und die Aktivitäten der Haustechnik und der künstlichen Bewohner mitzuprotokollieren.



**Abb. 3: Bauphysikalisches Forschungshaus, Außenansicht, Quelle: (Teibinger et al. 2014)**

Im Zuge des Forschungsprojekts (Teibinger et al. 2014) wurden das Raumklima, das Außenklima und die Bauteiltemperaturen in den einzelnen Räumen und im gesamten Gebäude erfasst. Abb. 4 zeigt einen Blick in einen Untersuchungsraum mit der Messtation für die operative Temperatur (schwarze Kugel) und der Innenraumtemperatur und –luftfeuchtigkeit. Hinter der Gipskartonverkleidung, begrenzt durch die grünen Klebebänder, befinden sich die Sensoren für die Aufzeichnung der Wandtemperaturen.



**Abb. 4: Bauphysikalisches Forschungshaus, Innenansicht, Messung der operativen Raumtemperatur und der Wandoberflächentemperatur, Quelle: (Teibinger et al. 2014)**

Das bauphysikalische Forschungshaus wurde weiters für die Messung der Luftvolumenströme mittels Tracergaskonzentration genutzt. Dabei wurde die Strömungssituation von einzelnen Räumen mit und ohne Insektengitter sowie die stockwerksübergreifende Querlüftung im ganzen Haus studiert. In Abschnitt 4.1 werden die Luftströmungsmessungen genauer beschrieben.

Anhand der Meßergebnisse der Temperaturmessungen und der Umgebungsbedingungen sowie Geometrie und wurde das thermische Simulationsmodell validiert (siehe 3.1.3).

### 3.1.2 Befragung der Nutzer, Auswertung von Fertighausplänen

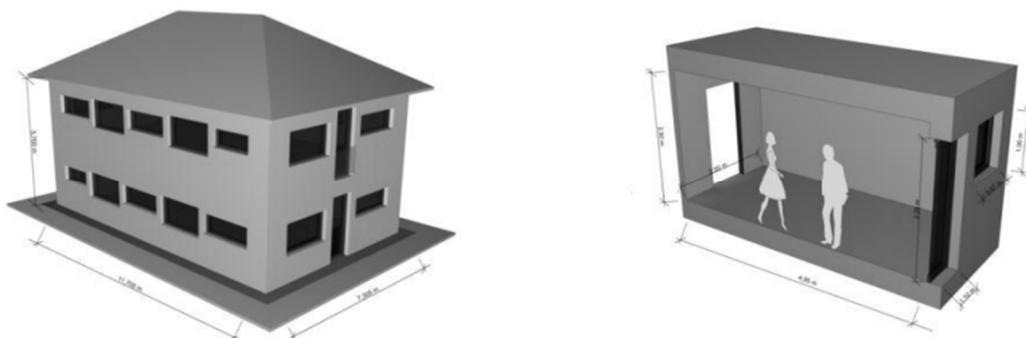
Ein Bereich im Forschungsprojekt war die Untersuchung des Nutzerverhaltens (siehe Teibinger et al. 2014). Für die Befragung wurden ca. 1500 Fragebögen an Käufer von Fertighäusern und -wohnungen verschickt. 20 % der Fragebögen konnte ausgewertet werden. Gefragt wurde neben der Behaglichkeit und der Zufriedenheit mit den Umgebungsbedingungen, das Verhalten der Nutzer im Umgang mit der Beschattung und der Lüftung.

Die Erkenntnisse der Befragung zum Thema Lüftung sind in Abschnitt 3.2.1 zusammengefasst.

### 3.1.3 Entwicklung eines Modells

Ein bestehendes Modell zur Berechnung der operativen Raumtemperatur eines Raumes wurde zu einem Zwei-Zonenmodell erweitert (siehe Kapitel 10 in Teibinger et al. 2014).

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden ein Referenzhaus und ein Referenzzimmer modelliert (siehe Abb. 5) und die Einflussfaktoren Innere Lasten, Verschattung und Lüftung beurteilt. Das Referenzobjekt entstand aus der statistischen Auswertung von Fertighausgrundrisse der Nutzer aus der Befragung (siehe 3.1.2).



**Abb. 5: Simulationsobjekt „Referenzhaus“ (links) und „Referenzzimmer“ (rechts), Quelle: (Teibinger et al. 2014) – graphisch angepasst**

Als Randbedingungen für die Simulationen wurden die Rechenansätze aus der ÖNORM B 8110-3:2012 (ÖNORM B 8110-3), herangezogen und durch die Auswertung der Nutzerbefragung (siehe 3.1.2) ergänzt.

Untersucht wurden sechs Holzwandaufbauten mit Holzdecken und ein Ziegelwandaufbau mit Stahlbetondecke. Bei den Holzaufbauten wurden die unterschiedlichen Bauweisen (Holzrahmen, Holzmassiv) sowie konstruktive Merkmale berücksichtigt.

Die Verschattung wurde in Form von außen- und innenliegenden Verschattungen berücksichtigt. Ebenfalls berücksichtigt wurde, dass keine Verschattung vorhanden ist.

Die Raumlüftung wurde durch geöffnete oder gekippte Fenster berücksichtigt. Die Raumlüftung mittels Lüftungsanlage wurde ebenfalls in der Vergleichsrechnung berücksichtigt.

Das Ergebnis waren Temperaturkurven der operativen Raumtemperatur für verschiedene Nutzergruppen wie zum Beispiel Familien mit Kindern oder kinderlose Paare (siehe 3.2.2).

### **3.2 Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt**

Aus den Untersuchungsergebnissen des Forschungsprojekts konnten aus der Befragung der Fertighauskunden und der Auswertung des Einflußfaktors Lüftung aus den Simulationsergebnissen folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Nutzerverhalten beim Lüften – Eine Befragung unter Fertighauskunden zeigt die Vorlieben und Gewohnheiten beim Lüften.
- Einflussfaktor Lüftung – Berechnungsergebnisse aus einer Simulation eines Versuchsraumes gibt eine Größenordnung für den Faktor Lüften an.

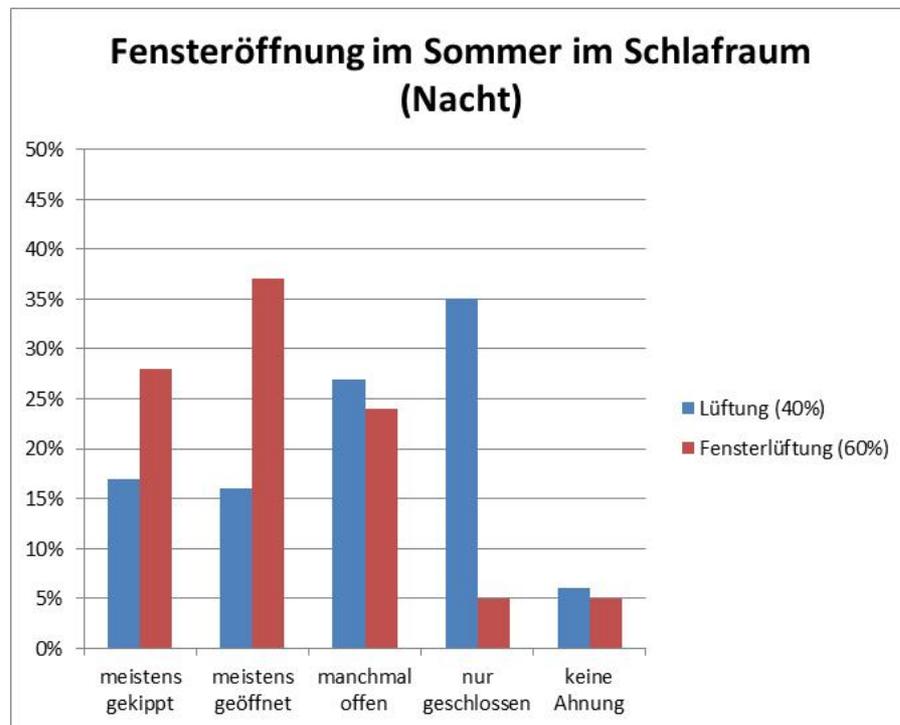
#### **3.2.1 Nutzerverhalten beim Lüften**

Zum Verhalten der befragten Fertighauskäufer im Sommer beim Thema Lüftung können folgende Zusammenhänge zur Nachtlüftung im Sommer im Schlafzimmer und im ganzen Haus sowie zur zeitlichen Verteilung des Lüftens im Haus beobachtet werden:

In Abb. 6 wird das Lüftungsverhalten in Sommernächten im Schlafzimmer gezeigt. Die roten Balken zeigen die Antworten von allen Bewohnern mit Fensterlüftung, während die blauen Balken das Verhalten der Bewohner mit Lüftungsanlage abbilden. Die Verteilung der Bewohner mit Fensterlüftung und der Bewohner mit Lüftungsanlage war 60 % zu 40 %.

Bei den Befragten mit Fensterlüftung gaben 28 % an, im Schlafzimmer ihre Fenster zu kippen während 61 % der Befragten ihre Fenster manchmal oder meistens öffnen.

Bei den Befragten mit Lüftungsanlage gaben 17% der Nutzer an, ihre Fenster zu kippen, während 43 % der Nutzer in Sommernächten ihre Schlafzimmerfenster manchmal oder meistens öffnen (Teibinger et al. 2014).



**Abb. 6: Befragungsergebnis der Frage: „Schlafen Sie im Sommer bei gekipptem oder geöffnetem Fenster?“, Quelle: (Teibinger et al. 2014)**

Abb. 7 zeigt das Lüftungsverhalten im gesamten Haus von Fertighauskäufern in Sommernächten. Die roten Balken zeigen wieder die Angaben der Nutzer mit Fensterlüftung während die Balken in blauer Farbe die Antworten der Nutzer mit Lüftungsanlage darstellen. Das Verhältnis der Fertighausbesitzer mit Fensterlüftung zu den Fertighausbesitzern mit Lüftungsanlage beträgt 60 % zu 40 %.

88 % der Nutzer mit Fensterlüftung gaben an, zumindestens ein, meistens jedoch „eigentlich alle“ Fenster in Sommernächten im Haus geöffnet zu halten. Im Vergleich dazu gaben 58 % der Befragten mit Lüftungsanlage an, in Sommernächten mindestens ein bis eigentlich alle Fenster geöffnet zu halten. 6 % der Befragten mit Fensterlüftung und 36 % der Befragten mit Lüftungsanlage gaben an, dass bei ihnen die Fenster im Sommer in der Nacht geschlossen sind (Teibinger et al. 2014).

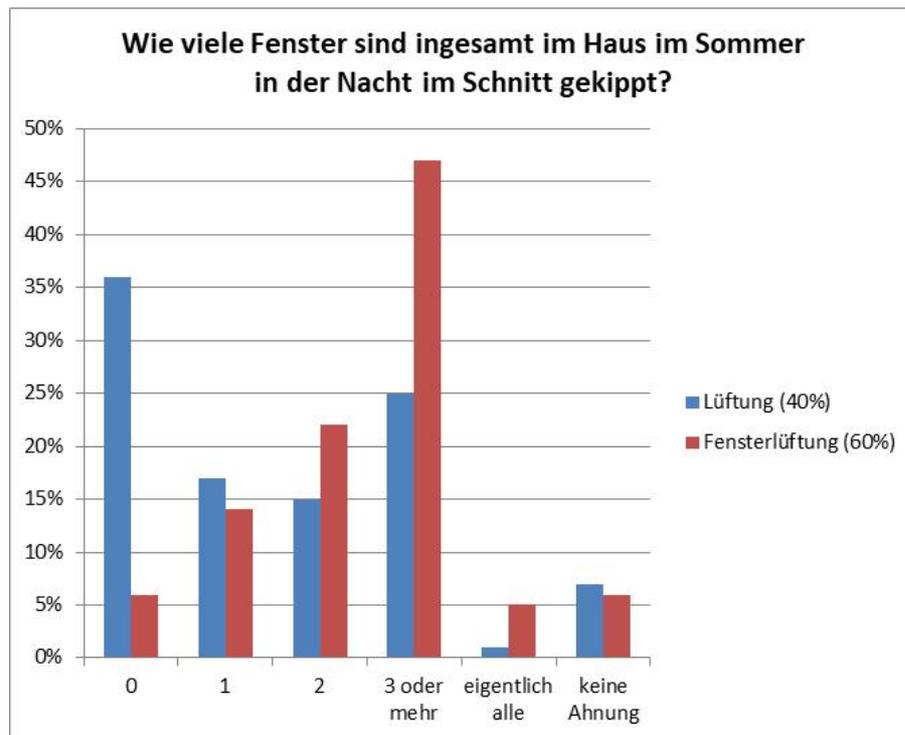


Abb. 7: Befragungsergebnis der Frage: „Wie viele Fenster sind insgesamt im Haus im Sommer in der Nacht im Schnitt gekippt?“, Quelle: (Teibinger et al. 2014)

In Tab. 1 ist die zeitliche Verteilung der Fensteröffnung im Sommer nach Uhrzeit gegliedert, dargestellt. Der Mittelwert und der Maximalwert werden aus den Befragungsergebnissen in Prozent für alle Aufenthaltsräume (Küche, Wohnzimmer, Schlafzimmer, Kinderzimmer und Arbeitszimmer) gebildet. Aus der Tabelle kann herausgelesen werden, dass die Fenster in der Nacht und am Vormittag zu einem hohen Prozentsatz geöffnet sind. Am Nachmittag werden die Fenster eher geschlossen gehalten. Die Mittelwertverteilung von Tab. 1 zeigt, dass die Fenster tendenziell mehr gekippt werden.

Tab. 1: Zusammenfassung des Befragungsergebnisses der Frage: „Zu welchen Tageszeiten öffnen oder kippen Sie in den wichtigsten Wohnräumen im Sommer üblicherweise Ihre Fenster?“, Quelle: aus (Teibinger et al. 2014), Abb. 46

Uhrzeit	Gekippte Fenster		Geöffnete Fenster	
	Mittelwert in %	Maximum in %	Mittelwert in %	Maximum in %
6.00 – 12.00	19	30	14,7	27
12.00 – 18.00	11	17	6,4	20
18.00 – 22.00	14,6	21	13	24
22.00 – 6.00	22,6	44	12,6	38

Durch Insekten in der Nacht fühlen sich 26 % der befragten Bewohner gestört. 51 % der Befragten gaben an, Insektengitter zu verwenden.

Durch Straßenlärm in der Nacht fühlen sich 9 % der Befragten gestört. 3 % der Bewohner schließen aufgrund des Straßenlärms häufig bzw. sehr häufig ihre Fenster, während 21 % der Bewohner ihre Fenster selten wegen dem Straßenlärm schließen.

Zum Thema Einbruchschutz gaben 28 % der Nutzer an, ihre Fenster im Erdgeschoß während der Nacht offen zu halten. 47 % der Befragten gaben an, einen Einbruchschutz, wie z.B. eine Alarmanlage, Fenstergitter, o.ä. zu verwenden.

Zu den Befragungsergebnissen zum Thema Lüftung ist anzumerken, dass die Behaglichkeit im neuen Wohnsitz als Vergleichswert zur früheren Wohnsituation abgefragt wurde. Bei der Befragung nach der Zufriedenheit mit den Raumtemperaturen im Sommer wurde nicht explizit ein Vergleichswert zur vorherigen Situation abgefragt. Es wurde nach der Zufriedenheit im (neuen) Haus gefragt.

Auf die Frage nach der Zufriedenheit mit den Raumtemperaturen im Sommer im (neuen) Haus gaben 82 % der Bewohner an, sehr zufrieden bzw. eher zufrieden zu sein. Auf die Frage nach der Behaglichkeit in der jetzigen Situation als Vergleich zum früheren Wohnsitz gaben 69 % der Befragten an, dass die jetzige Situation viel besser und 20% der Bewohner das die eher besser ist. Erhoben wurde die Art des früheren Wohnsitzes. Dabei stellte sich heraus, dass 64 % der Befragten vorher in einer Wohnung gelebt haben.

Aus den vorliegenden Zahlen geht hervor, dass ein Großteil der Fertighauskunden mit ihrer neuen Umgebung zufrieden ist. Die Umfrage gibt keinen Aufschluss, ob der Grund für die gestiegene Zufriedenheit ganz einfach in der neuen Wohnsituation (anstelle der Stadtwohnung ein Haus im Grünen) oder in einer technischen Verbesserung des neuen Heimes gelegen ist.

Aus der Befragung zum Thema Lüftung können folgende Schlüsse gezogen werden (vgl. Teibinger et al. 2014):

- Bewohner, die eine Lüftungsanlage haben, öffnen ihre Fenster tendenziell weniger.
- Ein Großteil der Bewohner hat in der Nacht die Fenster im ganzen Haus geöffnet bzw. gekippt.
- In Summe gaben 82 % der Befragten an, die Fenster in der Nacht geöffnet bzw. gekippt zu haben.
- Die Fenster sind, je nach Anwesenheit der Bewohner, häufig am Vormittag und in der Nacht geöffnet. Am Nachmittag sind die Fenster zumeist geschlossen.

Die Ergebnisse der Untersuchung fließen in die Randbedingungen der thermischen Raumsimulation ein (siehe 4.4.1.4).

Eine weitere interessante Erkenntnis ist:

- Insektenschutz ist ein relevantes Thema.

Ein Schluss, der zusammenfassend aus der Befragung abgeleitet werden kann:

Wird ausreichend gelüftet und ist eine Wärmeabfuhr in der Nacht möglich, so wirkt sich das auf die Zufriedenheit des Nutzers positiv aus.

### **3.2.2 Wichtigkeit des Faktors „Lüften“**

Aus dem Vergleich der operativen Temperaturen in den Räumen in verschiedenen Bauweisen wurde im ersten Schritt die maßgebliche Bauweise herausgefunden. In weiterer Folge wurden die verschiedenen Verschattungs- und Lüftungsmöglichkeiten anhand der maßgeblichen Bauweise miteinander verglichen.

Das maßgebliche Nutzerprofil für den Vergleich der operativen Raumtemperaturen bei der Lüftung war die Nutzung „Familien mit Kindern“. Bei der Verschattung war die Nutzung „erwerbstätiges Paar ohne Kinder“ das maßgebliche Nutzerprofil.

Der Vergleich der verschiedenen Bauweisen zeigte einen Temperaturunterschied von ca. 1 – 2 K. Bei der mineralischen Bauweise Ziegelwand mit Betondecke wurde sichtbar, dass die Konstruktion ein höheres Wärmepufferverhalten aufweist als bei Holzkonstruktionen. Ist der Wärmeeintrag hoch, dann dauert es bei dieser Konstruktion länger, bis die Wärme wieder abgeführt ist.

Der Vergleich der verschiedenen Verschattungsmöglichkeiten im maßgeblichen Nutzungsprofil „erwerbstätiges Paar ohne Kinder“ zeigte einen Temperaturunterschied zwischen 5 und 9 K.

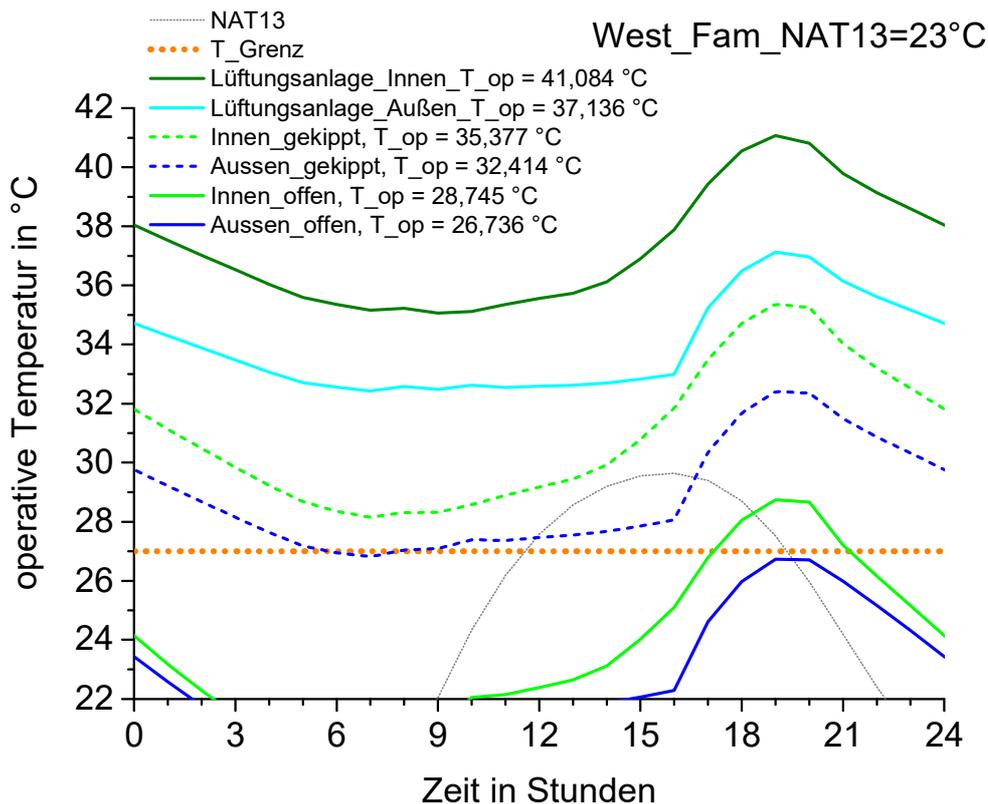
Abb. 8 zeigt den Vergleich verschiedener Lüftungsvarianten im maßgeblichen Nutzungsprofil „Familie mit Kindern“.

Die grün gefärbten Linien zeigen die Raumtemperaturen bei Fensterlüftung und innenliegender Verschattung. Die blauen Linien zeigen die Temperaturverteilung bei Fensterlüftung und außenliegender Verschattung.

Die Temperaturverteilung bei geöffneten Fenstern wird mit durchgezogenen Linien dargestellt. Strichlierte Linien verweisen auf die operative Temperatur bei gekippten Fenstern.

Die operative Temperatur bei Einsatz einer Lüftungsanlage und außenliegender Verschattung wird als türkise durchgezogene Linie dargestellt. Die dunkelgrüne durchgezogene Linie zeigt den Temperaturverlauf bei innenliegender Verschattung und dem Einsatz einer Lüftungsanlage.

Die im Diagramm angegebenen Werte sind die Maximalwerte der operativen Temperatur in der Zeit von 18.00 bis 21.00.



**Abb. 8: Berechnung der operativen Raumtemperatur mittels Simulation, Vergleich von verschiedenen Nachtlüftungssituationen (offenes Fenster, gekipptes Fenster, Lüftungsanlage), Quelle: (Teibinger et al. 2014) – graphisch angepasst**

Das Diagramm zeigt, dass die operative Temperatur ohne geeignete Nachtlüftung wie z.B. geöffnetes Fenster mit aktivierter außenliegender Verschattung untertags über dem Anforderungswert von 27°C liegt. Das Diagramm zeigt ebenfalls große Unterschiede zwischen den verschiedenen Lüftungsmöglichkeiten auf. Beim Vergleich der Fensterlüftung (geöffnet – gekippt) beträgt der Temperaturunterschied im Maximalwert 6-7 K. Wird das geöffnete Fenster mit der Lüftungsanlage im Grundluftwechsel verglichen, so können Temperaturunterschiede zwischen 10 und 12 K im Temperaturmaximum beobachtet werden.

Der Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten zur Sicherstellung der Nachtlüftung zeigt, wie wichtig das Thema Lüftung zur Vermeidung von sommerlicher Überwärmung ist.

## **4 Methodik**

Im Hauptteil der Arbeit werden die einzelnen Arbeitsschritte von der Zielsetzung bis zur Anwendung des Modells beschrieben. Ziel der Arbeit war es, ein Modell zu entwickeln, mit dem möglichst genau die Lüftung von Räumen und der stockwerksübergreifende Querdurchströmung von Einfamilienhäusern berechnet werden kann. Mit diesem Modell soll in weiterer Folge die operative Temperatur von Innenräumen z.B. eines Tages unter Verwendung des Luftströmungsmodells dynamisch berechnet werden. Die Ergebnisse der operativen Temperatur aus dem Modell soll mit gültigen Berechnungsverfahren aus der Norm verglichen werden.

Unter 4.1 wird der Ablauf der experimentellen Untersuchungen an den ausgewählten Einzelraum- und Querlüftungssituationen beschrieben.

Unter 4.2 wird das Modell zur Berechnung von Einzelraum- und Querlüftungssituationen vorgestellt, das anhand der Tracergasmessungen validiert wird.

Unter 4.3 werden die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Validierungsprozess präsentiert.

Unter 4.4 wird die Anwendung des Modells zur Berechnung der Lüftung in Einfamilienhäusern innerhalb der Berechnung der operativen Temperatur beschrieben. Dabei werden die berechneten operativen Temperaturen mit den bisherigen Planungsmethoden verglichen.

### **4.1 Tracergasmessungen für Einzelraum- und Querlüftungssituationen**

Im folgenden Abschnitt werden die Messungen der Tracergaskonzentrationen an einzelnen Räumen und an zwei stockwerksübergreifenden Querlüftungssituationen beschrieben. Die Messergebnisse sollen in weiterer Folge mit den berechneten Tracergaskonzentrationskurven aus dem Netzwerkmodell (siehe Abschnitt 4.2) verglichen werden, um daraus die Massenströme bzw. Luftvolumenströme rückrechnen zu können und das Netzwerkmodell dadurch zu validieren (siehe Abschnitt 4.3).

Unter 4.1.1 wird der grundsätzliche Messaufbau für die Vor-Ort Messungen im Maßstab 1:1 vorgestellt und unter 4.1.2 wird der Ablauf für die Messung einer Einzelraumsituation beschrieben.

In 4.1.3. wird die Verknüpfung von volumenbezogenen und massenbezogenen Tracergaskonzentrationen gezeigt. Mithilfe dieses Zusammenhangs ist es möglich die berechneten Tracergaskonzentrationen aus der Massenstromberechnung im Netzwerkmodell (siehe 4.2) in die gemessenen Tracergaskonzentrationen zu übertragen und vergleichbar zu machen (siehe Validierung des Modells in Abschnitt 4.3).

In 4.1.4 wird exemplarisch anhand einer Tracergasmessung der Mess- und Auswertevorgang für die Messung an einer Querlüftungssituation beschrieben.

Im Abschnitt 4.1.5 werden die untersuchten Einzelraum-Messungen und stockwerksübergreifenden Querlüftungssituationen zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse der Messungen werden im Kapitel 4.3 präsentiert.

Bei den Untersuchungen des thermisch-induzierten Luftwechsels in Räumen und Gebäuden wurde der Einfluss des Windes in der Berechnung und in den Messungen vernachlässigt. Da es selten möglich ist, Außenluftbedingungen ohne Wind ( $v = 0 \text{ m/s}$ ) vorzufinden, wurde der Faktor Wind dadurch vernachlässigt, dass nur Tracergasmessungen mit einer Windgeschwindigkeit  $v \leq 5 \text{ m/s}$  berücksichtigt wurden. Wurden trotzdem Messungen mit einer Windgeschwindigkeit  $v \geq 5 \text{ m/s}$  präsentiert, so wurden diese gekennzeichnet.

Durch diese Vernachlässigung des Windeinflusses können die Mess- und Rechenergebnisse mit den Berechnungsverfahren für den Luftvolumenstrom in einzelnen Räumen und bei der stockwerksübergreifenden Durchströmung gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Anhang B (ÖNORM B 8110-3) verglichen werden.

Für die praktische Planung bedeutet die Vernachlässigung des Windeinflusses in der Berechnung des Luftvolumenstromes, dass die Rechenergebnisse der Innenraumtemperaturen auf der sicheren Seite liegen. Hinzu kommt, dass der Einfluss des Windes nicht vorhersehbar und daher planbar ist. Grundsätzlich beeinflusst der Wind die Nachtlüftung im Sommer positiv, außer hohe Windgeschwindigkeiten sorgen dafür, dass die Fenster in der Nacht geschlossen gehalten werden.

#### **4.1.1 Messaufbau**

Die Messungen selbst fanden im bauphysikalischen Forschungshaus der Holzforschung Austria (siehe 3.1, Abb. 3) in Stetten nördlich von Wien statt.

Ziel der Messung war die Bestimmung der Tracergaskonzentration zufolge thermisch induzierten Luftwechsel. Untersuchungsgegenstand waren Einzelräume sowie eine stockwerksübergreifende Querlüftungssituation. Bei den Messreihen sollte auch der Einfluss des Insektenschutzgitters mitberücksichtigt werden. Um den Einfluss des Windes vernachlässigen zu können, wurde ein jahreszeitlicher Bereich gesucht, in dem die Windgeschwindigkeit gering war. Eine weitere Frage war, ob die Tracergasmessung als Messung des Abklingverhaltens einer Gaskonzentration durchgeführt oder ob über einen längeren Zeitraum eine Gaskonzentration gehalten werden soll.

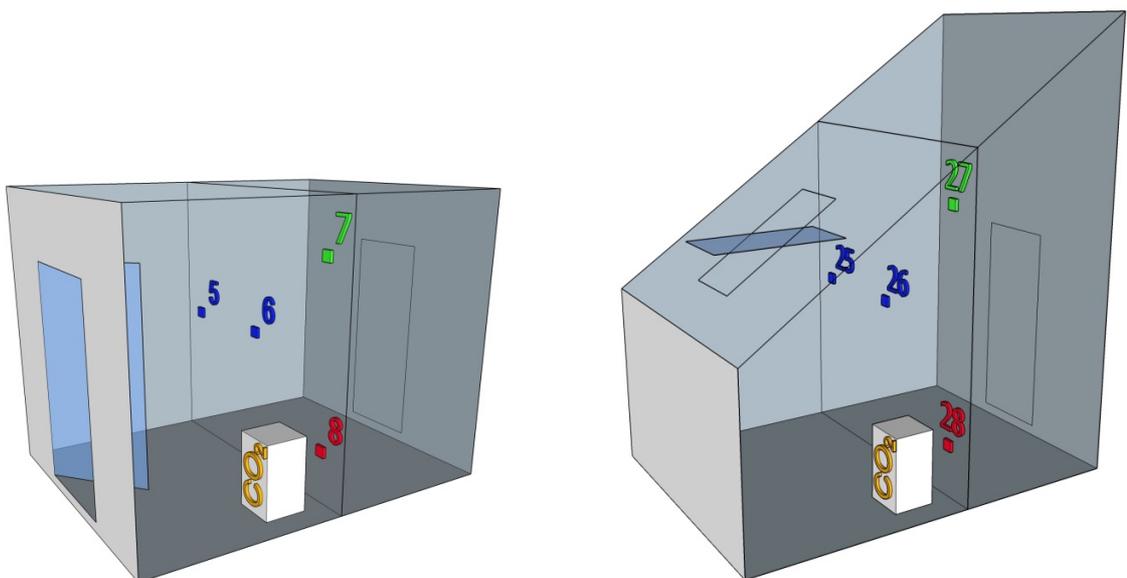
Nach der Versuchsplanungsphase wurde die Messausrüstung im Forschungshaus montiert und mit den Untersuchungen begonnen.

Die Tracergasmessungen fanden in zwei Messreihen im Oktober 2012 und im August 2013 statt, um mögliche jahreszeitliche Einflüsse sichtbar machen zu können. In beiden Zeiträumen wurden Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten ( $v \leq 5 \text{ m/s}$ ) gewählt.

Die untersuchten Bereiche waren ein Einzelraum im Erdgeschoß mit konstanter Raumhöhe und vertikaler Fenstertüre, und ein Raum im Obergeschoß in einer Dachgeschoßsituation mit Dachflächenfenster.

In Abb. 9 sind beide Räume mit dem Versuchsaufbau dargestellt. In beiden Räumen ist jeweils ein vertikales Gitter, bestehend aus Gaskonzentrationsmesssensoren dargestellt. Jeweils ein Sensor wurde 50 cm oberhalb des Bodens und ein Sensor wurde 50 cm unterhalb der Decke angeordnet. Die anderen Sensoren waren in einer mittleren Raumhöhe angebracht, wobei ein Sensor in der verlängerten Fensterachse montiert war. Dadurch sollen die Bereiche in der Nähe von Decke und Wand sowie im Hauptluftstrom des Fensters erfasst werden. Auch die augenscheinlich nicht durchströmten Bereiche sollten erfasst werden.

Die CO<sub>2</sub>-Quelle war hinter dem Sensorgitter angeordnet. Die in Abb. 13 dargestellte beispielhafte Tracergaskonzentrationverteilung stammt aus einer Einzelraumuntersuchung im Erdgeschoßraum (siehe linkes Bild in Abb. 9).



**Abb. 9: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Einzelraumsituation im Erdgeschoß (linkes Bild) und Obergeschoß (rechtes Bild), Quelle: (Ehrlich, 2013a) – graphisch angepasst**

An den beiden Untersuchungsräumen wurde die Tracergaskonzentrationsverteilung zufolge thermisch induzierten Luftwechsels bei geöffneten und gekippten Fenstern mit und ohne Insekten- und Pollenschutzgitter gemessen.

Im Erdgeschoßraum (Abb. 9, linkes Bild) wurde eine geöffnete und eine gekippte Fenstertür jeweils mit und ohne Insektenschutzgitter und Pollenschutzgitter gemessen. Die Fenstertür war nach Westen ausgerichtet.

Im Obergeschoßraum (Abb. 9, rechtes Bild) wurde ein geöffnetes Dachflächenfenster jeweils mit und ohne Insektenschutzgitter untersucht. Das Dachflächenfenster war nach Süden ausgerichtet.

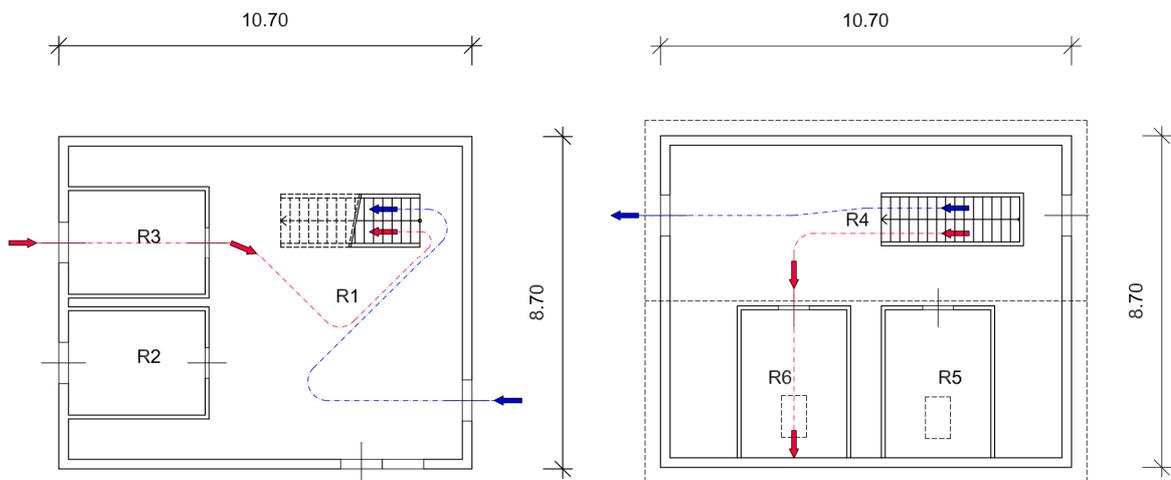
Im Zuge der Einzelraumuntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Messungen im Abklingverfahren brauchbare Ergebnisse liefern. Darum wurde bei der Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung ebenfalls mit dieser Messmethode gearbeitet. Die Untersuchung des Einflusses von Insekten- und Pollenschutzgittern lieferte bei den Einzelraumuntersuchungen ebenfalls brauchbare Ergebnisse. Aus diesem Grund und – damit die Untersuchung nicht durch zuviele sich beeinflussende Faktoren unklare Ergebnisse liefert – wurde bei der Untersuchung der Querlüftung nur der Zustand ohne Insektengitter untersucht.

Bei der Untersuchung der stockwerksübergreifende Querlüftung wurden zwei Szenarien ausgewählt:

In Szenario 1, oder auch als „R1 – R4“ bezeichnet, zeigt eine Querlüftungssituation durch zwei gleich große Räume mit zwei gleich großen Lüftungsöffnungen hin zur Außenluft.

In Szenario 2, oder auch als „R3 – R1 – R4 – R6“ bezeichnet, zeigt eine Querlüftungssituation durch vier unterschiedlich große Räume mit zwei unterschiedlich großen Lüftungsöffnungen zur Außenluft.

In Abb. 10 sind die beiden Szenarien mit **blauen** Linien und Pfeilen („R1 – R4“) und mit **roten** Linien und Pfeilen („R3 – R1 – R4 – R6“) dargestellt.



**Abb. 10: Messung der stockwerksübergreifenden Querlüftung im Forschungshaus der Holzforschung Austria, Erdgeschossgrundriss (links) und Obergeschossgrundriss (rechts), Darstellung der gemessenen Durchströmung durch 2 Zonen (blaue Pfeile) und durch 4 Zonen (rote Pfeile)**

An Szenario 1 („R1 – R4“) wurde der Fall „Erdgeschoßfenster gekippt – Obergeschoßfenster geöffnet“ und „Erdgeschoßfenster geöffnet – Obergeschoßfenster geöffnet“ untersucht. Das Erdgeschoßfenster (BxH=1,075 x 2,005 m) war ostseitig orientiert. Das Obergeschoßfenster (BxH=1,075 x 2,005 m) war westseitig orientiert.

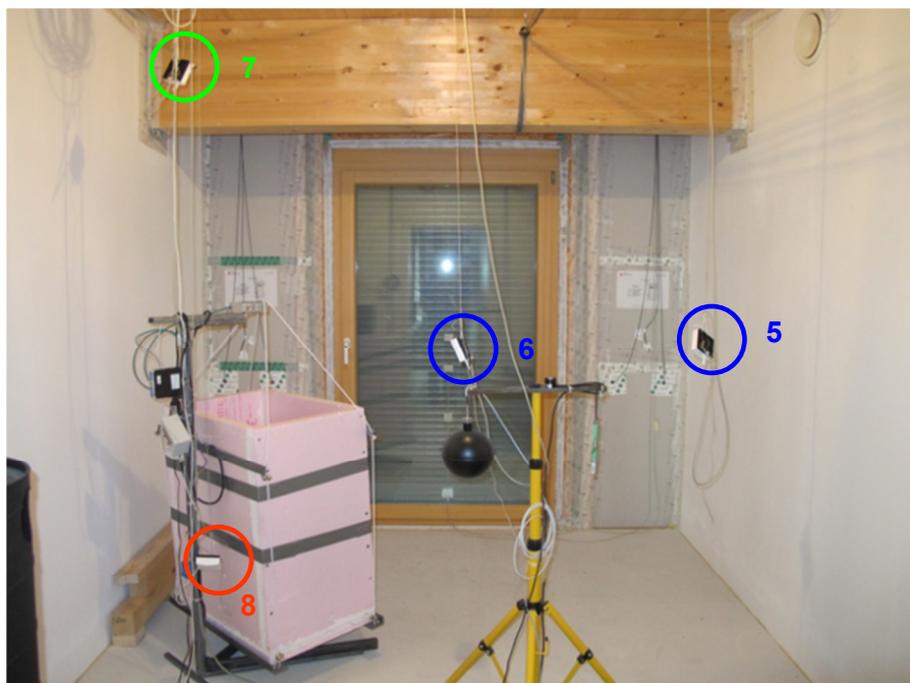
An Szenario 2 („R3 – R1 – R4 – R6“) wurde der Fall „Erdgeschoßfenster geöffnet – Obergeschoßfenster geöffnet“ untersucht. Das Erdgeschoßfenster (BxH=1,075 x 2,005 m) war westseitig orientiert. Das Obergeschoßfenster (BxH=0,640 x 1,300 m) war südseitig orientiert und geneigt ( $\alpha= 33^\circ$ ).

Anhand von Abb. 11 wird der Messaufbau für die Einzelraumuntersuchung im Erdgeschoß gezeigt. Im rosafarbenen Behälter wird das Trockeneis sublimiert und das freigesetzte Kohlendioxid mischt sich mit der Raumluft. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft wird mit den Tracergassensoren erfasst. Als Tracergassensoren wurden ("SAUTER, EGQ222F002") mit einem Messbereich von 0 bis 2000 ppm (0 bis 0.0013 kg CO<sub>2</sub> / kg trockene Luft) verwendet. Die Sensoren haben eine Genauigkeit von  $\pm 50$  ppm ( $\pm 0.000033$  kg CO<sub>2</sub> / kg trockene Luft) im Temperaturbereich von 0 bis + 50 °C. Neben der Messung der Tracergaskonzentration wurden auch die Raumlufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit während der Luftströmungsmessung aufgezeichnet. Bei den verwendeten Temperatursensoren handelte es sich um PT1000-Temperatursensoren ( $\pm 0,4$  °C bei + 20 °C) und kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtemesssensoren

HumiChip ( $\pm 0,75 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\pm 4\%$  rel. Luftfeuchte bei  $+ 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die Außenluftbedingungen während der Messungen wurden mit einer Wetterstation Ahlborn FMA 510 (Außentemperatur:  $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  bei  $+ 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , Windgeschwindigkeit:  $\pm 0,3 \text{ m/s}$  bei 0 bis 35 m/s, Windrichtung:  $\pm 3 \%$  von 0 bis  $360^\circ$ ) erfasst.

Die Messwerte der Außenlufttemperatur und der Windgeschwindigkeit wurde im Minutentakt erfasst. Die Tracergaskonzentration und die Innenlufttemperaturen während des Tracergaskonzentrationsabfalls wurden alle 20 sek. aufgezeichnet.

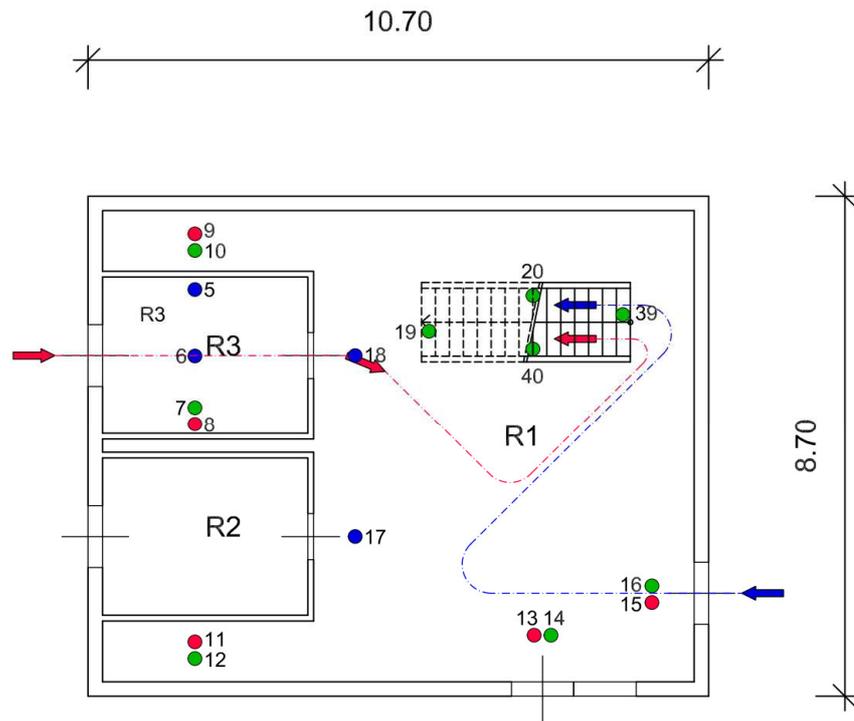
Bei den Untersuchungen im Sommer wurde das Kohlendioxid anstatt durch Trockeneissublimation mittels Gasflasche in die Raumluft eingebracht.



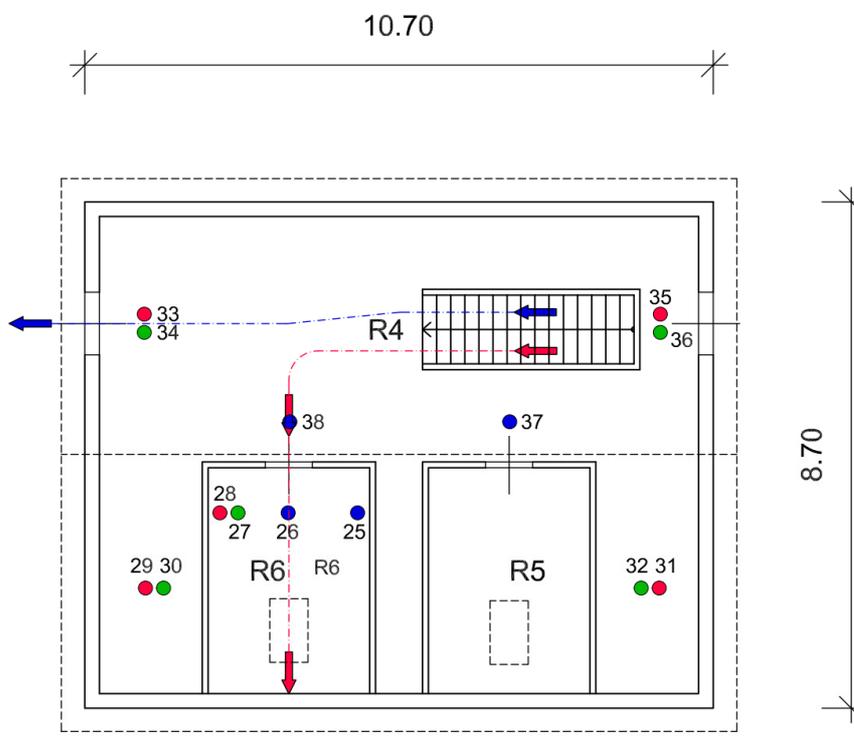
**Abb. 11: Tracergasmessung in einer Einzelraumsituation vor Ort, Quelle: (Ehrlich, 2015) – graphisch ergänzt**

Der Messaufbau für die Untersuchung der Querlüftungssituation ist in Abb. 12 dargestellt wobei im oberen Bildteil der Obergeschoßgrundriss und im unteren Teil der Erdgeschoßgrundriss dargestellt ist.

Die roten Punkte zeigen die Sensoren 50 cm über dem Boden. Die Sensoren im Abstand von 50 cm unterhalb der Decke sind grün dargestellt. Die blauen Punkte kennzeichnen die Tracergassensoren in der Raummitte.



- Tracergassensoren - Unten
- Tracergassensoren - Mitte
- Tracergassensoren - Mitte



- Tracergassensoren - Unten
- Tracergassensoren - Mitte
- Tracergassensoren - Oben

**Abb. 12: Tracergasmessung der Querlüftungssituationen, Standorte der Messpunkte, Obergeschoßgrundriss (unten) und Erdgeschoßgrundriss (oben)**

Die genauen Höhenlagen der Sensoren, bezogen auf das Niveau des Erdgeschoßfußbodens kann aus Tab. 2 herausgelesen werden. Die Tabellenwerte in Klammer im Obergeschoß geben die Höhenlage der Sensoren im Untersuchungsraum „R6“ an.

**Tab. 2: Absolute Höhenlage der Tracergassensoren in m mit Bezug auf den Erdgeschoßfußboden ( $\pm 0,000\text{m}$ ). Die Klammerwerte im Obergeschoß geben die relative Höhe im Bezug auf den Obergeschoßfußboden an**

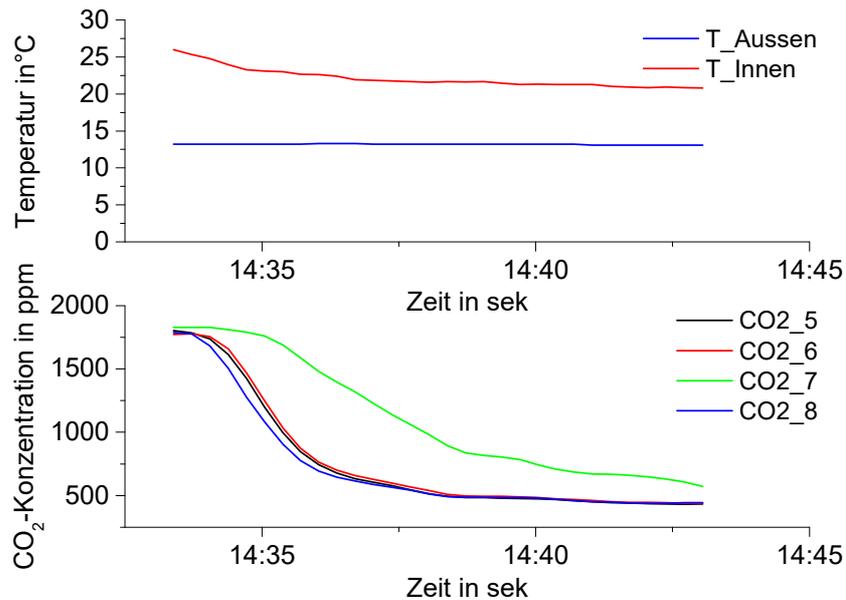
Sensorfarbe (siehe Abb. 12)	Erdgeschoß	Obergeschoß
rot	+ 0,500 m	+ 3,400 m (+ 0,500 m)
blau	+ 1,400 m	+ 4,340 m (+ 1,440 m)
grün	+ 2,200 m	+ 5,300 m (+ 2,400 m)

Das Tracergas wurde an verschiedenen Stellen im Erd- und Obergeschoß eingebracht und mit Ventilatoren verteilt.

#### 4.1.2 Ablauf der Messung einer Einzelraumsituation anhand eines Beispiels

In Abb. 13 ist der Verlauf einer Messung am Beispiel einer Einzelraummessung anhand von Temperatur- und Tracergaskonzentrationverteilung dargestellt. Die in Abb. 13 dargestellten Kurven entstanden bei der der Messung der in in Abb. 11 beschriebenen Aufbausituation. Der Verlauf Querlüftungsmessung ist analog zur Einzelraummessung. Bei der Verteilung der Tracergaskonzentration können zusätzlich Austauschprozesse zwischen den einzelnen Zonen beobachtet werden.

Die dargestellten Kurven in Abb. 13 zeigen die Situation nach dem Öffnen des Fensters, wenn die Tracergaskonzentration im unteren Teil der Abbildung abfällt und die rote Kurve der Innentemperatur im oberen Teil der Abbildung ebenfalls langsam absinkt. Beim Verlauf der Tracergaskonzentration kann beobachtet werden, dass die schwarze, die blaue und die rote Kurve gleichförmig absinken während die grüne Kurve langsamer absinkt. Die Farbe der Tracergaskonzentration entspricht den Markierungen der Sensoren in Abb. 11. Aus der Verteilung kann herausgelesen werden, dass manche Bereiche im Raum durch ein geöffnetes Fenster stärker durchströmt werden und andere Bereiche im Raum schwächer durchströmt werden.



**Abb. 13: Beispiel eines gemessenen Temperaturabfalls (oben) und eines Konzentrationsabfalls (unten), Quelle: (Ehrlich 2015) – graphisch angepasst**

Bevor bei jeder Messung der Abfall der Tracergaskonzentration beobachtet werden konnte, wurde die Luft mit Kohlendioxid angereichert. Durch Ventilatoren wurde die Raumluft gut durchmischt und die Raumlufttemperatur wurde im Raum ebenfalls angehoben um eine Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur zu erhalten. Anschließend wurde die Durchmischung ausgeschaltet, um eine Durchlüftung unter natürlichen Bedingungen zu erhalten. Alternativ dazu wurde der Konzentrationsabfall unter durchmischten Bedingungen aufgezeichnet. Dabei wurden die Ventilatoren im Raum während der Messung nicht ausgeschaltet.

Unter 4.3.1 sind alle Ergebnisse der Einzelraumuntersuchung und der stockwerksübergreifenden Querlüftung zusammengestellt und gekennzeichnet ob sie unter natürlichen Bedingungen und unter durchmischten Bedingungen aufgezeichnet wurden.

#### 4.1.3 Berechnung der Tracergaskonzentrationen

Um die gemessenen Tracergaskonzentration mit den berechneten Massenströmen aus dem Netzwerkmodell vergleichen zu können, ist der rechnerische Zusammenhang zwischen volumenbezogenen und massenbezogenen Tracergaskonzentrationen notwendig. Die Ergebnisse der Tracergasmessungen werden in volumenbezogenen Einheiten [ppm] ausgegeben. Um aus den berechneten Massenströmen im Modell die Tracergaskonzentrationen berechnen zu können, werden massenbezogenen Einheiten in  $\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg trockene Luft}}$  benötigt. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Validierungsprozess

(siehe 4.3), war es notwendig alle Messwerte von  $ppm$  in  $kg\ CO_2/kg\ trockene\ Luft$  umzurechnen (siehe (5)).

$$1ppm = \frac{1\ m^3\ CO_2}{10^6\ m^3\ trockene\ Luft} \quad (1)$$

Ausgangspunkt für die Umrechnung war der volumetrische Zusammenhang zwischen Tracergaskonzentration und trockener Luft in  $ppm$  (siehe (1)).

**Tab. 3: Gastkonstanten für gasförmiges CO<sub>2</sub> und trockene Luft bei +20 °C (Langeheinecke et al. 2008)**

$$R_{CO_2} = 188,9 \frac{J}{kg, K} \qquad R_{trockene\ Luft} = 287 \frac{J}{kg, K}$$

$R_{CO_2}$	in $\frac{J}{kg, K}$	Gaskonstante von CO <sub>2</sub> bei +20°C (siehe Langeheinecke et al. 2008)
$R_{trockene\ Luft}$	in $\frac{J}{kg, K}$	Gaskonstante von trockener Luft bei +20°C (siehe Langeheinecke et al. 2008)

Mittels der Gaskonstanten für Luft und CO<sub>2</sub> (siehe Tab. 3) und der Gasgleichung (siehe (2)) konnten das spezifische Gewicht für trockene Luft und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) angegeben werden (siehe (3) und (4)).

$$\frac{p_0}{\rho_0} = R \cdot T \quad (2)$$

$p_0$	in Pa	Druck unter Normbedingungen (T <sub>0</sub> =273,15 K)
$\rho_0$	in kg/m <sup>3</sup>	Dichte unter Normbedingungen (T <sub>0</sub> =273,15 K)
$R$	in $\frac{J}{kg, K}$	Gaskonstante des idealen Gases
$T$	in K	Temperatur des idealen Gases

Aus den Zusammenhängen für das spezifische Gewicht von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Luft (siehe (3) und (4)) konnte aus dem Verhältnis der beiden Volumina (siehe (1)) ein Verhältnis der beiden Massen angegeben werden (siehe (5)).

$$\rho_{CO_2} = \frac{kg\ CO_2}{m^3\ CO_2} \quad (3)$$

$$\rho_{tr.\ Luft} = \frac{kg\ trockene\ Luft}{m^3\ trockene\ Luft} \quad (4)$$

$\rho$	in kg/m <sup>3</sup>	Dichte
--------	----------------------	--------

Durch die Umrechnung der Tracergaskonzentration von volumenbezogenen auf massenbezogenen Einheiten (siehe (5)) ist ein Vergleich zwischen Messung und Berechnung möglich.

$$\text{Umrechnung: ppm in } \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg trockene Luft}} \quad (5)$$

Die Vergleiche zwischen Messungen und Berechnung werden für alle untersuchten Fälle in 4.3.1 vorgestellt.

#### **4.1.4 Ablauf der Messung einer Querlüftungssituation anhand eines Beispiels**

Unter 4.1.2 wurde die Durchführung einer Tracergasmessung in einem Einzelraum beschrieben. Bei den Messungen der Tracergaskonzentrationen an Einzelräumen konnte aus den Kurvenverläufen ein guter Mittelwert bestimmt werden. Durch die unterschiedlichen Konzentrationsverläufe konnte beobachtet werden, dass es Bereiche gibt, wo ein Austausch schneller stattfindet und Bereiche wo der Austausch langsamer bzw. verzögert stattfindet. Diese Beobachtung war Anlass das Raumvolumen in stark und schwach durchströmte Bereiche zu unterteilen.

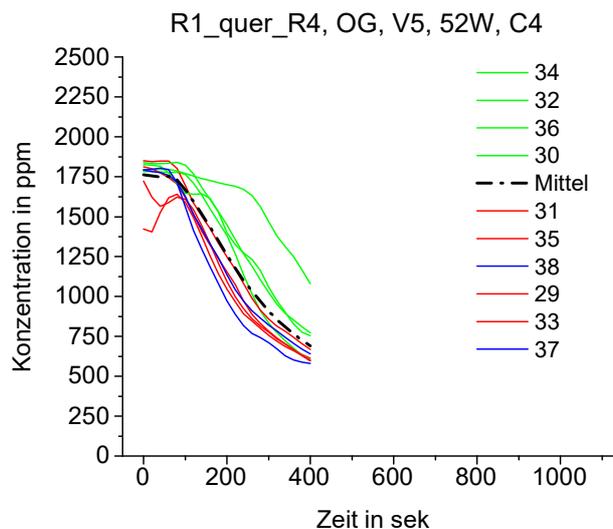
Bei der Messung der Tracergaskonzentrationen für Querlüftungssituation war die Mittelwertbildung aus den Kurven eines Raumes schwierig, da die verschiedenen Einflüsse auf den Luftvolumenstrom nicht klar erkannt und interpretiert werden konnten. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Vorgangsweise des Verarbeitens der Messkurven (Messung „52W“) am großen Obergeschoßraum des Szenarios 1 („R1 – R4“) vorgestellt. Am Ende des Verarbeitungsprozesses konnten die stark und schwach durchströmten Bereiche des Raumvolumens erkannt werden.

Im ersten Schritt sollte aus einem Überblick über die Tracergaskonzentrationsverteilung herausgefunden werden, wie der betrachtete Raum durchströmt ist (siehe 4.1.4.1). Dabei wurde oft sichtbar, dass einzelne Sensoren mit steilerem Kurvenabfall einen stärkeren Luftaustausch gezeigt haben als Sensoren mit flacherem Kurvenverlauf. Daher wurde im zweiten Schritt der Innenraumlufttemperaturverlauf während der Messung beobachtet (siehe 4.1.4.2). Zeigten alle Sensoren einen gleichmäßigen Temperaturabfall, so waren alle Zonen gleich durchströmt. Gab es einzelne Sensoren, die einen schnelleren Temperaturabfall gezeigt haben, dann war dieser Bereich stärker durchströmt als die anderen Bereiche des Raumes. Im dritten Schritt wurden die Tracergaskonzentrationsverläufe für einen Teilbereich des Raumes dargestellt (siehe 4.1.4.3). In dieser Darstellung konnte oft eindeutig herausgelesen werden, welche Bereiche dieses Teilbereichs stark oder schwach durchströmt waren.

Um eine zweifelsfreie Interpretation der Kurven zu gewährleisten, wurde im vierten Schritt eine qualitative Untersuchung des Luftvolumenstromes durchgeführt (siehe 4.1.4.4). Durch das Sichtbarmachen der Luftströmung mit künstlichem Nebel konnte die Interpretation der Tracergaskonzentrationskurven verifiziert werden. Im fünften Schritt wurden die stark und schwach durchströmten Bereiche für den jeweiligen Fall gekennzeichnet (siehe 4.1.4.5). Das Ziel der Analyse war die Bestimmung des Raumvolumens für die berechnete Tracergaskonzentrationsverteilung (siehe 4.1.5.1 und 4.1.5.2).

#### 4.1.4.1 Überblick über die Tracergasmessung

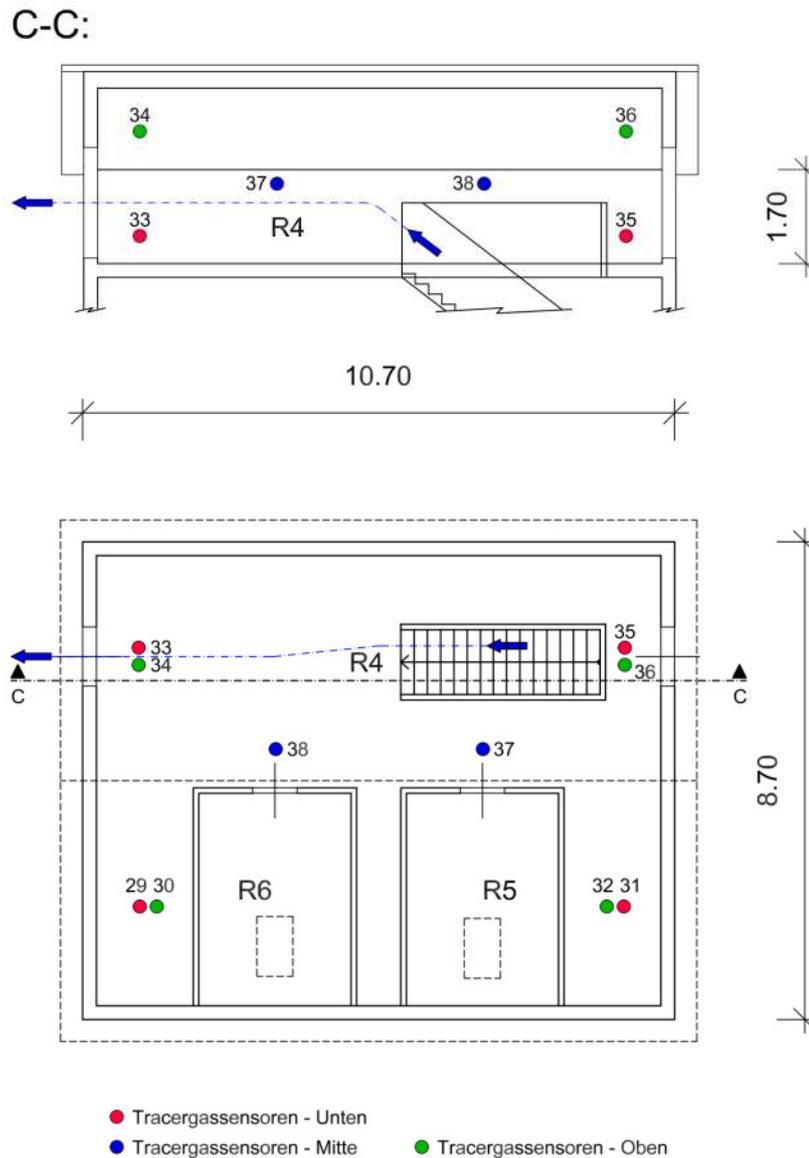
Nach der Durchführung der Messung wurden alle Tracergaskonzentrationskurven in einem Diagramm zusammengefasst (siehe Abb. 14). Die schwarze strichlierte Linie gibt den Mittelwert aller dargestellten Messkurven wieder. Die Kurvenverläufe zeigen eine Bündelung der Kurven. Die roten und blauen Kurven bilden eine Gruppe an Kurven die schneller abfallen als die grünen Linien. Die grünen Kurven zeigen ein langsames Abfallen.



**Abb. 14:** Tracergasmessung mit allen Konzentrationsverläufen, Obergeschoßraum R4, Messung „52W“

Die grünen Kurven zeigen die Messergebnisse der Sensoren (30, 32, 34 und 36) die im Abstand von 50 cm unterhalb der Decke befestigt sind. Die blauen Kurven zeigen die Messergebnisse der Sensoren (37 und 38) auf halber Raumhöhe. Die roten Kurven zeigen die Messergebnisse der Sensoren (29, 31, 33 und 35) die im Abstand von 50 cm über dem Boden befestigt sind.

In Abb. 15 ist die Lage der Messpunkte 29 bis 38 im Grundriss und Schnitt eingezeichnet. Die absoluten Höhenlagen der Sensoren bezogen auf den Erdgeschoßfußboden sind in Tab. 2 aufgelistet.

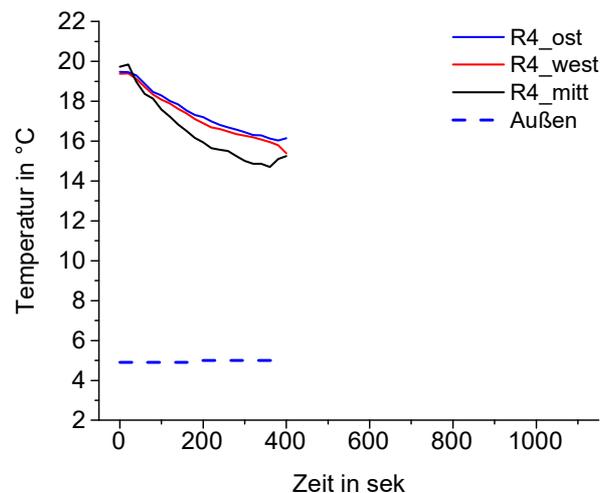


**Abb. 15: Lage der Messpunkte im Obergeschoß der Querlüftungssituation durch 2 Zonen: Grundriss (unteres Bild) und Schnitt C (oberes Bild). Die Farbe der Sensoren kennzeichnet die Höhenlage.**

Zusammenfassend kann der Überblicks-Tracergaskonzentrationsverteilung in Abb. 14 entnommen werden, dass die Bereiche in Bodennähe und auf halber Raumhöhe einen stärkeren Luftaustausch haben als die Bereiche unter der Decke. Durch die breitere Streuung der bodennahen und mittleren Bereiche ist nicht klar, ob es nicht auch eine Unterteilung der Bereiche im Grundriss in stärkere und schwächer durchströmte Bereiche gibt. Deswegen wurde im nächsten Schritt die Tracergasmessung anhand der Temperaturverteilung beurteilt.

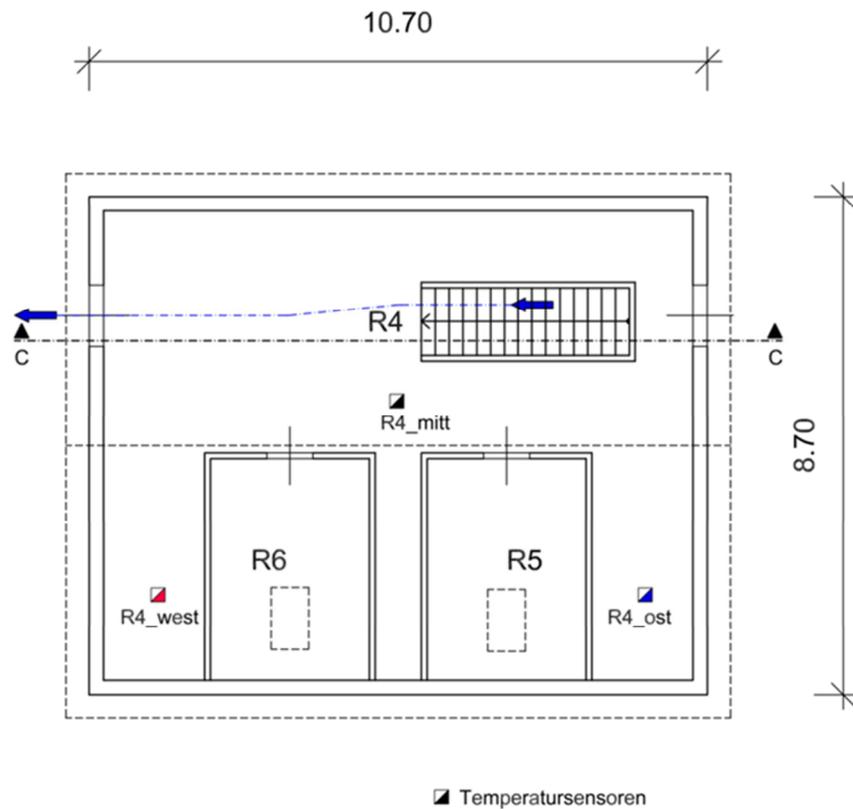
#### 4.1.4.2 Beurteilung einer Tracergasmessung anhand der Temperaturverteilung

Im zweiten Schritt wird die Tracergasmessung „52W“ anhand der Temperaturverteilung während der Messung in Abb. 16 beurteilt. Die dicke strichlierte Linie gibt die Außenlufttemperatur an, die während der Messung annähernd konstant war. Die schwarze Linie zeigt einen rascheren Temperaturabfall während der Messung als die rote und blaue Kurve. Der Verlauf der roten und blauen Kurve ist annähernd gleich und zeigt einen langsameren Temperaturabfall während der Durchströmung des Obergeschoßraumes R4.



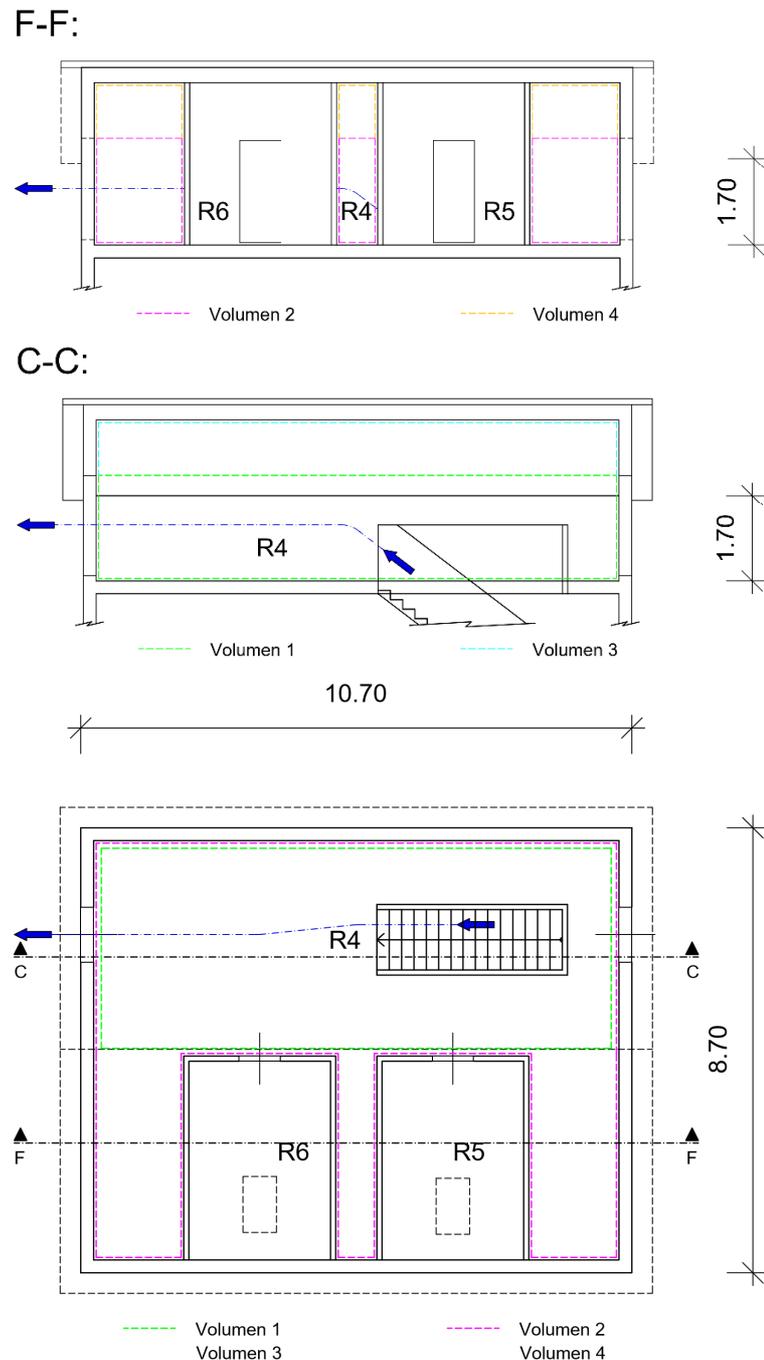
**Abb. 16: Beurteilung der Tracergasmessung anhand der Temperaturverteilung im Obergeschoßraum R4 der Messung „52W“ . Temperaturverlauf**

Abb. 17 zeigt die Lage der Temperaturmesspunkte im Grundriss des Obergeschoßraumes R4. Messpunkt R4\_mitt (schwarze Kurve) befindet sich in der Mitte des nördlichen Bereichs im Raum R4. Die Messpunkte R4\_ost (blaue Kurve) und R4\_west (rote Kurve) befinden sich in den seitlichen Nischen im Südlichen Bereich des Raumes R4. Alle Temperaturmesspunkte im Raum R4 waren auf halber Raumhöhe (+ 1,440 m über dem Obergeschoßfußboden) montiert.



**Abb. 17: Lage der Temperaturmesspunkte im Obergeschoßraum R4 der Messung „52W“**

Aus der Beurteilung des Temperaturverhaltens während der Tracergasmessung kann zusammengefasst werden, dass der nördliche Bereich zwischen Stiegenhaus und Fenster stärker durchströmt ist als die beiden seitlichen Nischen in der südlichen Hälfte des Raumes neben den kleinen Versuchsräumen (R5 und R6). Darum wird im nächsten Schritt die Tracergaskonzentration für den stärker durchströmten mittleren Bereich untersucht. Zuvor wird das Raumvolumen des Raumes R4 für die Berechnung in Teil-Raumvolumina (Volumen 1 bis Volumen 4) unterteilt (siehe Abb. 18).



**Abb. 18: Darstellung der durchströmten Bereiche im Grundriss (Unten) und im Schnitt C-C (Mitte) und Schnitt F-F (Oben) anhand des Obergeschoßraumes R4 am Beispiel der Messung „52W“**

In Abb. 18 ist die Unterteilung des Raumvolumens von R4 im Grundriss und im Schnitt C-C und Schnitt F-F dargestellt. Der hellgrün umgrenzte Bereich im Grundriss und im Schnitt C-C stellt den Teilbereich „Volumen 1“ und „Volumen 3“ dar. Im Schnitt C-C ist die Höhenausdehnung von „Volumen 1“ in hellgrün und von „Volumen 3“ in cyan dargestellt.

Die magentafarbene strichlierte Linie im Grundriss zeigt die Begrenzung von „Volumen 2“ und „Volumen 4“ an. Im Schnitt F-F ist die Begrenzung in der Höhe von „Volumen 2“ in magenta und von „Volumen 4“ in orange eingefärbt.

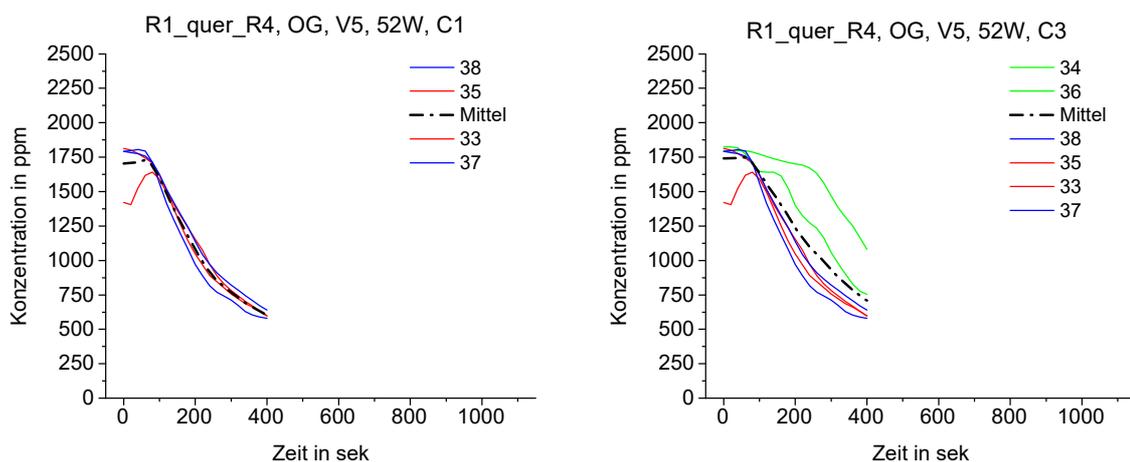
#### 4.1.4.3 Beurteilung einer Tracergasmessung anhand der Tracergasverteilung

Im dritten Schritt werden die Tracergaskonzentrationskurven der Messung „52W“ für den Bereich untersucht, der bei der Untersuchung der Temperaturkurven als stärker durchströmt eingestuft wurde (siehe 4.1.4.2). Für das konkrete Beispiel sind das die Tracergaskonzentrationskurven von „Volumen 1“ und „Volumen 3“ die in Abb. 19 miteinander verglichen und analysiert werden.

In Abb. 19 ist der Verlauf der Tracergaskonzentrationen für den Teilbereich des Obergeschoßraumes R4 dargestellt. Im linken Diagramm sind die roten und blauen Abklingkurven der Sensoren im „Volumen 1“ dargestellt. Die Abklingkurven zeigen die Tracergaskonzentration in der Raummitte (blaue Kurven) und in Bodennähe (rote Kurven). Die schwarze strichlierte Linie zeigt den Mittelwert der Abklingkurven.

Im rechten Diagramm sind zusätzlich zu den Kurven im linken Diagramm auch die Tracergaskonzentrationsverteilung in Deckennähe (grüne Kurven) dargestellt. Die schwarz strichlierte Mittelwertkurve zeigt im rechten Bild einen flacheren Verlauf als im linken Bild.

Aus dem Vergleich der Diagramme kann herausgelesen werden, dass „Volumen 1“ stärker durchlüftet ist, als „Volumen 3“. Ein weiterer Schluss aus dem Vergleich ist, dass die Mittelwertbildung aller Konzentrationskurven ein unklares bzw. verzerrtes Bild liefert. Stark und schwach durchströmte Bereiche müssen getrennt betrachtet werden.



**Abb. 19:** Verlauf der Tracergaskonzentration im großen Obergeschoßraum R4 anhand der Messung „52W“. Links ist der Konzentrationsverlauf der bodennahen und mittleren Sensoren zu sehen („Volumen 1“). Rechts ist der Konzentrationsverlauf aller Sensoren im Raum R4 zu sehen („Volumen 3“).

Aus der Beurteilung der Tracergaskonzentrationsverteilungen kann im fünften Schritt das Raumvolumen in stark und schwach durchströmte Bereiche unterteilt werden. Aus den

gewonnen Erkenntnisse kann das für die Berechnung der Tracergaskonzentrationskurven mit dem Rechenmodell relevante Raumvolumen bestimmt werden (siehe 4.1.4.5).

Um die Beobachtungen aus der Verteilung der Tracergaskonzentration zu untermauern, wurden qualitative Untersuchungen mit künstlichem Nebel durchgeführt (4.1.4.4).

#### **4.1.4.4 Qualitative Untersuchung mit künstlichem Nebel**

Zur Verifizierung der Analyse der Tracergaskonzentrationskurven (siehe 4.1.4.3) wird im vierten Schritt die qualitative Untersuchung des Luftvolumenstromes vorgestellt. Dabei sollen die stark und schwach durchströmten Zonen mit künstlichem Nebel sichtbar gemacht werden.

Analog zur Tracergasmessung „52W“ wurde in beide Räume Theaternebel ausgebracht und anschließend die Erdgeschoß- und Obergeschoß-Fenster wie in Szenario 1 „R1-R4“ (siehe Abb. 10, blaue Linie) geöffnet. Der sich einstellende Luftvolumenstrom wurde mittels Videokamera und Fotokamera erfasst und visuell beurteilt.

Die Auswertung der Bilder hat gezeigt, dass die Interpretation der Tracergaskonzentrationsverteilung aus den aufbereiteten Messkurven (siehe Abb. 19) mit der qualitativen Untersuchung übereinstimmen. Auch für andere Lüftungssituationen konnte eine Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen aus der qualitativen Untersuchung der Durchströmung und der Analyse der Tracergaskonzentrationskurven, festgestellt werden.

In den folgenden Abbildungen ist die Verteilung des Theaternebels im Obergeschoßraum R4 während der Untersuchung anhand von 4 Bildern (Abb. 20 und Abb. 21) gezeigt. Abb. 22 zeigt den stationären Zustand der stark und schwach durchströmten Bereiche nach dem Verteilvorgang.

Das linke Bild in Abb. 20 zeigt das Heraufziehen des thermisch induzierten Luftstromes durch das Stiegenhaus.

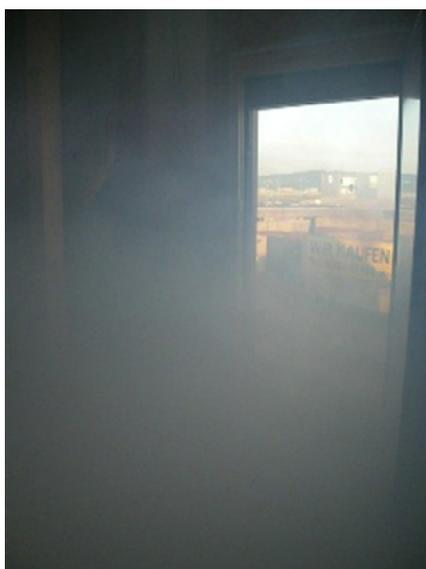
Im rechten Bild von Abb. 20 kann beobachtet werden wie sich der Nebel über das Stiegengeländer in Richtung ostseitiges Fenster ausbreitet deutlicher erkennbarer. Weiters kann auf dem rechten Bild in Abb. 20 beobachtet werden, dass sich der Nebel unterhalb eines bestimmten Bereichs verteilt, aber dabei nicht höher steigt.



**Abb. 20: Verteilung des Nebels im untersuchten Raum, qualitative Untersuchung am 23.6.2014, Bild 1 (Bild links) und Bild 2 (rechts)**

Auf dem linken Bild von Abb. 21 ist der Luftstrom beim Verlassen der Obergeschoß-Zone nach draußen zu sehen. Hier ist deutlich zu sehen, dass die stark durchlüfteten Bereiche unterhalb der Fensteroberkante des Außenfensters liegen. Weiters wird sichtbar, dass sich der Nebel nicht in Richtung der seitlichen Nischen neben dem westlichen Außenfenster bewegt.

Auf dem rechten Bild von Abb. 21 ist der Luftstrom einige Minuten nach dem Öffnen der Fenster zu sehen. Man sieht hier noch immer eine Verteilung des Nebels in den stark durchströmten Bereichen während die schwach durchströmten Bereiche oberhalb der Fensteroberkante schwach bis gar nicht vernebelt sind.



**Abb. 21: Verteilung des Nebels im untersuchten Raum, qualitative Untersuchung am 23.6.2014, Bild 3 (Bild links) bis Bild 4 (rechts)**

Abb. 22 zeigt die Trennung (rote Linie) der stark und schwach belüfteten Bereiche bei stockwerkübergreifender Querlüftung in einem Gleichgewichtszustand der sich einige Minuten nach dem Öffnen der Fenster einstellt. Dabei kann klar eine Totzone (wenig bis kein künstlicher Nebel) beobachtet werden, die sich über dem stark durchströmten Bereich unterhalb der Fensteroberkante einstellt.



**Abb. 22: Ausbildung von stark und schwach belüfteten Bereichen. Der stärker vernebelte Bereich unterhalb der roten Trennlinie, gilt als stark belüftet. Der weniger stark vernebelte Bereich oberhalb der roten Trennlinie, gilt als schwach belüftet.**

Aus der qualitativen Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung wird deutlich, dass sich bei natürlich belüfteten Zuständen schwach und stark belüftete Bereiche innerhalb der durchströmten Zone ausbilden.

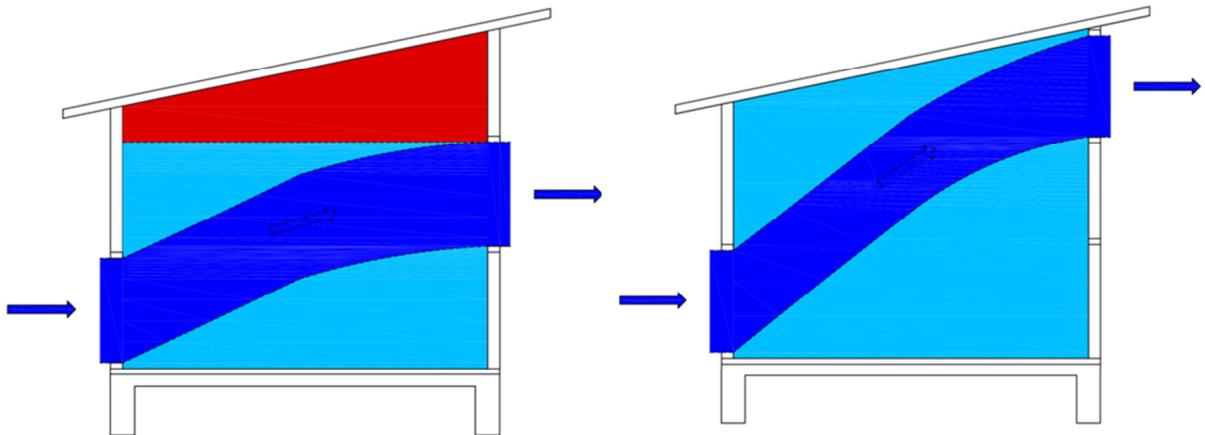
Außerdem wird sichtbar, dass sich der Hauptluftvolumenstrom wie ein Schlauch in der Größenordnung der Öffnungsfläche durch alle Zonen bewegt.

Ebenfalls sichtbar wird, dass sich oberhalb der Lüftungsöffnungen eine Totzone ausbildet.

Die geschilderten Erkenntnisse der qualitativen Untersuchungen mit künstlichem Nebel wurden im Zuge der Untersuchung verifiziert und anschließend in einer schematischen Darstellung in Abb. 23 bildlich festgehalten.

Die Abb. 23 zeigt die Querdurchströmung durch ein Einfamilienhaus mit unterschiedlicher Lage des Obergeschoßfensters. Im linken Bild sieht man die Totzone im Obergeschoß, bei einem niedrig positionierten Obergeschoßfenster. Werden die Fenster im

Obergeschoß, wie im rechten Bild zu sehen, höher gesetzt so ist die gesamte Obergeschoßzone stark durchlüftet.



**Abb. 23:** schematische Darstellung der Luft bei Querdurchlüftung, stark durchlüftete Bereiche (dunkelblau eingefärbt) und Ausbildung einer Totzone (roter Bereich) bei der betrachteten Versuchskonfiguration (siehe Abb. 21) im linken Bild. Die rechte Abbildung zeigt eine Situation mit einem höher positionierten Fenster und der daraus entstehenden Durchmischung des gesamten Raumvolumens, Quelle: (Teibinger et al. 2014)

Die Erkenntnisse der qualitativen Untersuchung können generell für die Planung von natürlicher (Quer-) Lüftung verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit wurden sie zur Verifizierung bei der Auswertung der Tracergaskonzentrationskurven (siehe 4.1.4.3) verwendet.

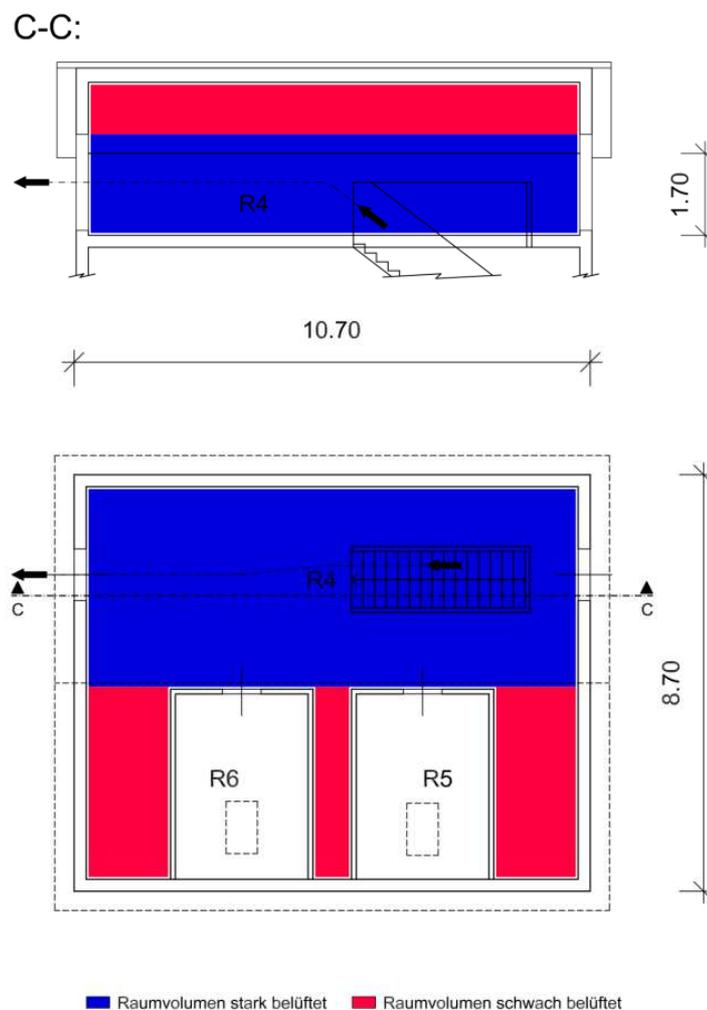
#### **4.1.4.5 Festlegung des für die Berechnung relevanten Raumvolumens**

Im 5. Schritt werden die stark und schwach durchströmten Bereiche des Raumvolumens für jede Situation festgelegt. In Abb. 24 wurde das für den Obergeschoßraum R4 bei der Messung „52W“ durchgeführt. Ziel der Analyse mit Festlegung der stark und schwach durchströmten Bereiche ist die Berechnung der Tracergaskonzentration mit dem Rechenmodell (4.2.4 und 4.2.5) für Einzelraum- und Querdurchlüftung. Dafür wird das für die Berechnung relevante Raumvolumen benötigt.

Am Beginn der Berechnungen wurde dafür das gesamte Raumvolumen angenommen. Im Vergleich zwischen gemessener und berechneter Tracergaskonzentration konnte in einigen Fällen trotz passender Austauschkoefizienten  $C_d$  oder Exponenten  $b_k$  keine Übereinstimmung beobachtet werden, während bei den Messungen unter durchmischten Bedingungen, Übereinstimmungen beobachtet werden konnten. Es zeigte sich, dass bei den Messungen unter durchmischten Bedingungen das gesamte Raumvolumen („Volumen 4“) oder ein großer Teilbereich in der gesamten Höhe („Volumen 3“) stark durchströmt war. Daraus ergab sich der Schluß, dass die stark durchströmten Bereiche das für die Berechnung relevante Raumvolumen darstellen. In der nachfolgenden

Berechnung der Tracergaskonzentrationen (siehe 4.1.5) wurden die stark durchströmten Bereiche (in Abb. 24 blau eingezeichnet) als relevantes Raumvolumen für die Berechnung angesetzt. Alle anderen Bereiche wurden als schwach durchströmte Bereiche (in Abb. 24 rot eingezeichnet) gekennzeichnet und in der Berechnung vernachlässigt.

Im nachfolgenden Bild (Abb. 24) sind die stark und schwach durchströmten Bereiche des Raumvolumens im Obergeschoßraum R4 dargestellt, die sich während der Messung „52W“ eingestellt haben. Aus der Analyse der Tracergaskonzentrationen (siehe 4.1.4.3) wurden die stark und schwach durchströmten Bereiche für jede Messung lokalisiert. Im Laufe der Analyse hat sich gezeigt, dass sich die stark und schwach durchströmten Bereiche nach bestimmten Mustern einstellen und bestimmte Bereiche stark und schwach durchströmt sind (siehe Abb. 18, „Volumen 1“ bis „Volumen 4“).



**Abb. 24: Festlegung des relevanten Raumvolumens für das Beispiel in 4.1.4.3 durch die Auswertung der Tracergasmessungen und der Aufteilung in stark und schwach durchströmte Bereiche**

In den Kapiteln 4.1.5.1 und 4.1.5.2 sind die relevanten Raumvolumina für die untersuchten Fälle dargestellt.

#### 4.1.5 Untersuchte Fälle

Im nachfolgenden Kapitel werden alle gemessenen Lüftungssituationen dargestellt. Dabei werden in den Abbildungen die stark und schwach durchströmten Bereiche für die Einzelraumsituation (siehe 4.1.5.1) und Querlüftungssituation (siehe 0) zur Bestimmung des für die Berechnung relevanten Raumvolumens hervorgehoben. Ergänzend dazu werden weitere Randbedingungen wie z.B. die verwendeten Insektengitter bei den Untersuchungen der Einzelraumlüftung (siehe 4.1.5.1) vorgestellt.

##### 4.1.5.1 Einzelraumlüftung

Die Untersuchung der Einzelraumlüftung wurde an kleinen Untersuchungsräumen im Erdgeschoss (R3) und Obergeschoss (R6) durchgeführt. Das Fenster des Erdgeschoßraumes (R3) ist nach Westen orientiert und das Dachflächenfenster des Obergeschoßraumes (R6) ist nach Süden ausgerichtet (siehe Abb. 10).

Tab. 4 gibt einen Überblick über alle untersuchten Mess-Situationen. Jede Situation wurde jeweils unter durchmischten und unter natürlichen Lüftungsbedingungen untersucht (siehe Abschnitt 4.1.1). Der Einfluss von Insektenschutzgittern und Pollenschutzgittern wurde bei der Untersuchung der Einzelraumlüftung untersucht.

Beim untersuchten Insektenschutzgitter handelt es sich um ein Produkt mit einer Maschenweite von 1,5 mal 1,7 mm und einer Fadendicke von 0,2 mm bei Kett- und Schußfäden.

Das untersuchte Pollengitter hat eine Maschenweite von 0,5 mal 1,8 mm. Die Fadendicke der Kettfäden betragen 0,15 mm. Die Fadendicke der Schußfäden betragen 0,3 mm.

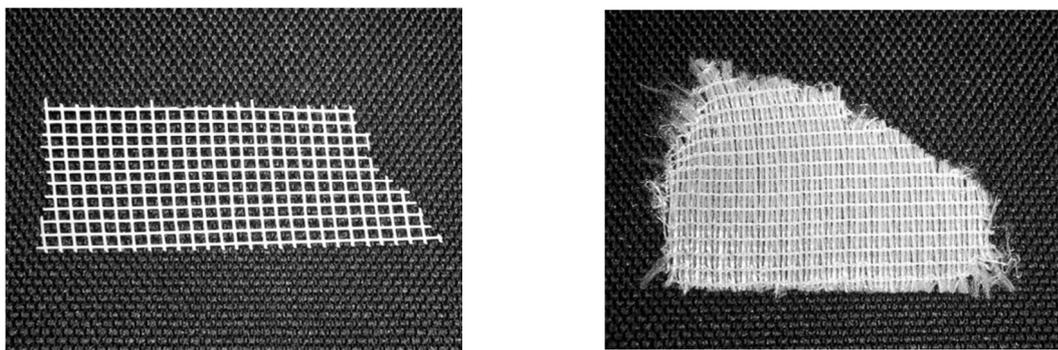


Abb. 25: Muster des untersuchten Insektengitters (linkes Bild) und des untersuchten Pollengitters (rechtes Bild)

Tab. 4 zeigt eine Übersicht aller untersuchten Einzelraumlüftungssituationen. Im Erdgeschoßraum (R3) wurde bei gekipptem und geöffnetem Fenster die Tracergaskonzentration bei der Einzelraumlüftung ohne und mit Insekten- und

Pollenschutzgitter gemessen (siehe Spalte „EG gekippt“ und „EG geöffnet“). Im Obergeschoßraum (R6) wurde bei geöffnetem Fenster die Tracergaskonzentration bei der Einzelraumlüftung ohne und mit Insektenschutzgitter gemessen.

**Tab. 4: Übersicht über alle untersuchten Einzelraumsituationen**

<b>EG gekippt</b>	<b>EG geöffnet</b>	<b>OG geöffnet</b>
Ohne Gitter	Ohne Gitter	Ohne Gitter
Mit Insektengitter	Mit Insektengitter	Mit Insektengitter
Mit Pollenschutzgitter	Mit Pollenschutzgitter	---

Tab. 5 zeigt die Kennzeichnung der durchströmten Raumvolumina für die untersuchten Einzelraumsituationen unter natürlich belüfteten („Na.“) und durchmischten Bedingungen („Mi.“) (siehe in Tab. 4).

Die rot dargestellten Felder zeigen, dass nur der untere Teil des Raumvolumens stark durchströmt ist (siehe Abb. 26 und Abb. 28). Die blau eingefärbten Felder kennzeichnen in Messsituationen, in denen das gesamte Raumvolumen stark durchströmt ist (siehe Abb. 27).

**Tab. 5: Übersicht über die durchströmten Raumvolumina für alle untersuchten Fälle (siehe Tab. 4). Die betrachteten Situationen sind in natürlich belüftete Mess-Situationen („Na.“) und durchmischte Mess-Situationen („Mi.“) aufgeteilt.**

	<b>EG gekippt</b>		<b>EG geöffnet</b>		<b>OG geöffnet</b>			
	Na.	Mi.		Na.	Mi.		Na.	Mi.
Ohne Gitter	Teil	Voll	Ohne Gitter	Teil	Voll	Ohne Gitter	Teil	Teil
Mit Insektengitter	Teil	Voll	Mit Insektengitter	Teil	Voll	Mit Insektengitter	Teil	Teil
Mit Pollenschutzgitter	Teil	Voll	Mit Pollenschutzgitter	Teil	Voll	---		

Aus der Zusammenschau der verschiedenen Untersuchungssituationen wird sichtbar, dass der Einfluss der zusätzlichen Luftdurchmischung eine Änderung des Durchströmungsverhaltens während des Fensterlüftens mit sich bringt.

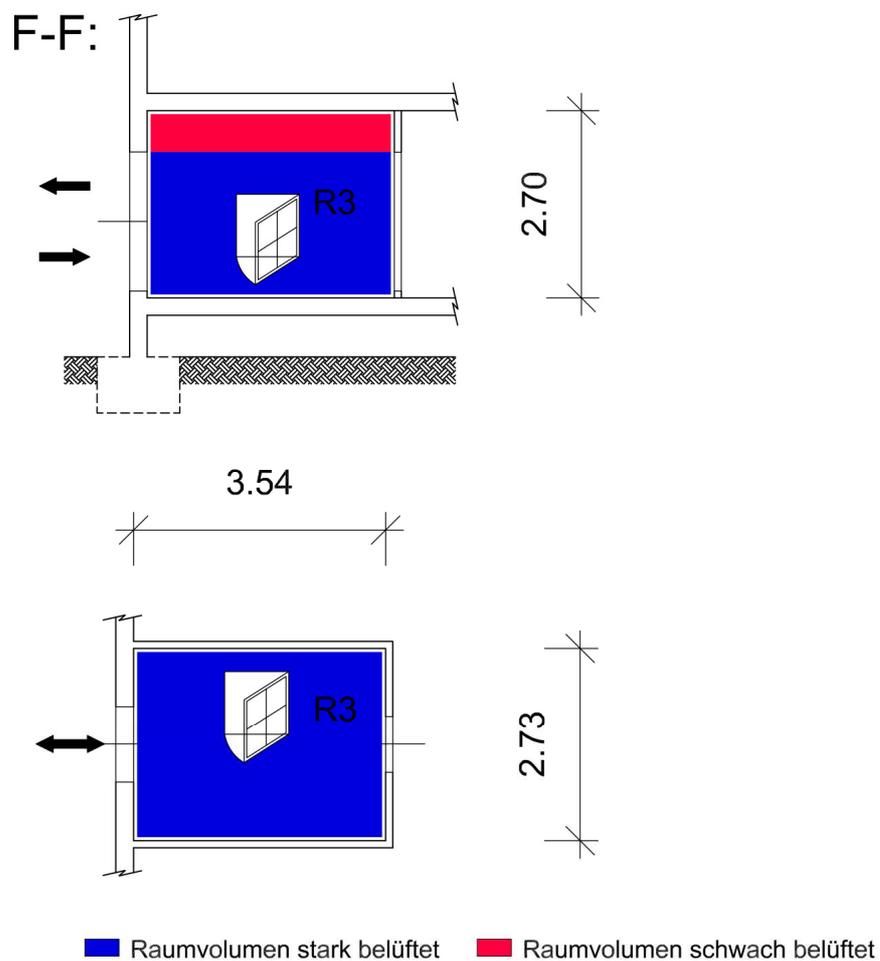
Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom ist durch die mechanische Durchmischung beeinflussbar.

Bei der Obergeschoßsituation ist der thermisch induzierte Luftvolumenstrom durch die zusätzliche Luftdurchmischung nicht beeinflussbar.

Bei der Bewertung des Einflusses der Luftdurchmischung in einem Raum wird sichtbar, dass Insekten- und Pollenschutzgitter keinen Einfluss auf die Durchmischung im Raum haben. Dies gilt für die Erdgeschoß- und für die Obergeschoßsituationen.

Abb. 26 zeigt die Verteilung der stark und schwach durchlüfteten Bereiche für alle natürlich belüfteten Erdgeschoßsituationen (EG gekippt, EG geöffnet).

In Blau sind die stark durchströmten Bereiche und in Rot sind die schwach durchströmten Bereiche dargestellt. Für die Berechnung der Tracergaskonzentration wurden als relevantes Raumvolumen die blau gekennzeichneten Bereiche angenommen.



**Abb. 26: Natürlich belüftetes Teilvolumen im Grundriss EG (unten) und im Schnitt EG (oben). Ausbildung von stark und schwach belüfteten Bereichen. Der blau markierte Bereich wurde in der Berechnung als relevantes Volumen angenommen.**

Abb. 27 zeigt die Verteilung der stark und schwach durchströmten Bereiche für alle durchmischten Erdgeschoßsituationen (EG gekippt, EG geöffnet).

Für die Berechnung der Tracergaskonzentration wurden als relevantes Raumvolumen die blau markierten, stark durchströmten Bereiche angenommen.

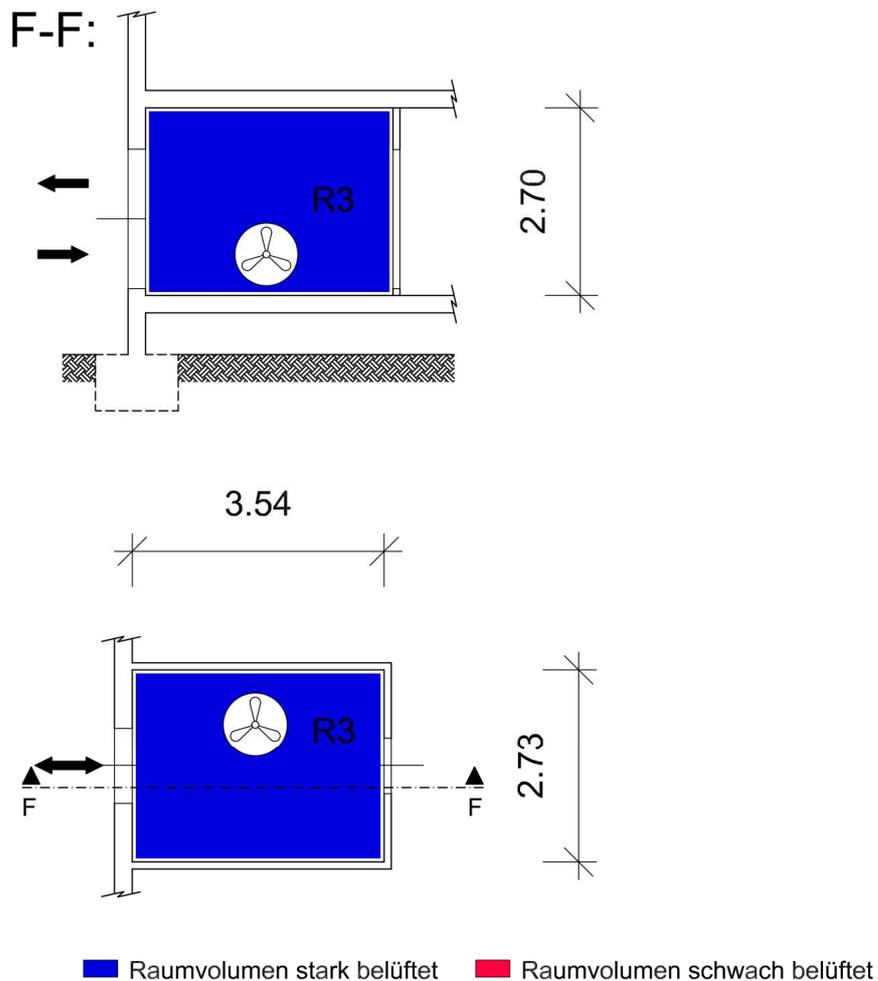


Abb. 27: Durchmischtes Raumvolumen im Grundriss EG (unten) und Schnitt EG (oben). Der gesamte Raum ist stark belüftet. Der blau markierte Bereich wurde in der Berechnung als relevantes Volumen angenommen.

Abb. 28 zeigt die Verteilung der stark und schwach durchströmten Bereiche für alle natürlich belüfteten und durchmischten Obergeschoßsituationen (OG geöffnet).

Die stark durchströmten Bereiche sind in Blau, die schwach durchströmten Bereiche sind in Rot dargestellt. Für die Berechnung der Tracergaskonzentration wurden als relevantes Raumvolumen die blau gekennzeichneten Bereiche angenommen.

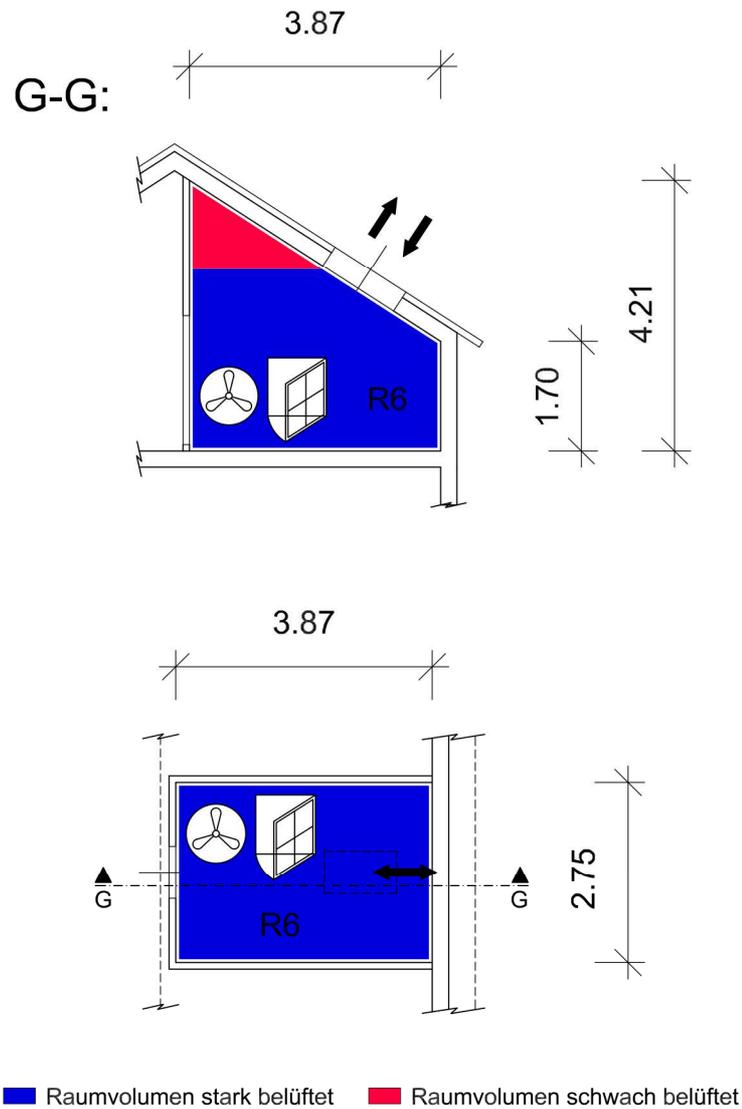


Abb. 28: Natürlich belüftetes und durchmischtes Volumen im OG Grundriss (unten) und im OG Schnitt (rechts). Ausbildung von stark und schwach belüfteten Bereichen. Der blau markierte Bereich wurde in der Berechnung als relevantes Volumen angenommen.

#### 4.1.5.2 Querlüftung

Zur Untersuchung der stockwerksübergreifenden Querlüftung wurden 2 Szenarien herangezogen. Szenario 1 umfasst 2 durchströmte Zonen mit zwei gleich großen Fensteröffnungen („R1-R4“). In Szenario 2 werden bei jeweils unterschiedlich großen Fenstern, 4 Räume durchströmt („R3-R6“).

Bei der Durchlüftung von 2 Zonen („R1-R4“) führt der Luftstrom vom großen Erdgeschoßraum (R1) mit ostseitig ausgerichtetem Fenster über die Stiegenöffnung in den großen Obergeschoßraum (R4) mit westseitig ausgerichtetem Fenster (siehe Abb. 10, mit blau markiertem Luftstrom).

Bei der Durchströmung von 4-Zonen („R3-R6“) führt der Luftstrom vom kleinen Erdgeschoßraum (R3) mit westseitig orientierter Fenstertür über den großen Erdgeschoßraum (R1) über die Stiegenhausöffnung in den großen Obergeschoßraum (R4). Die letzte durchströmte Zone ist der kleine Erdgeschoßraum (R6) mit südseitig orientiertem Dachflächenfenster (siehe Abb. 10, mit rot markiertem Luftstrom).

Tab. 6 zeigt eine Übersicht aller untersuchten Querlüftungssituationen unter natürlichen und durchmischten Bedingungen (siehe Abschnitt 4.1.1). Bei Szenario 1 („R1-R4“) werden zwei Lüftungssituation und bei Szenario 2 („R3-R6“) untersucht.

Der Einfluss von Insekten- und Pollenschutzgitter wird bei der stockwerksübergreifenden Querdurchströmung nicht mituntersucht.

**Tab. 6: Übersicht über alle untersuchten Querlüftungssituationen**

<b>EG gekippt – OG geöffnet</b>	2 Zonen
<b>EG geöffnet – OG geöffnet</b>	2 Zonen
<b>EG geöffnet – OG geöffnet</b>	4 Zonen

Tab. 7 zeigt die Kennzeichnung der durchströmten Raumvolumina für die untersuchten Querlüftungssituationen (siehe Tab. 6). Die rot dargestellten Felder zeigen, dass nur der untere Teil des jeweiligen Raumvolumens stark durchströmt ist (siehe Abb. 29 und Abb. 30).

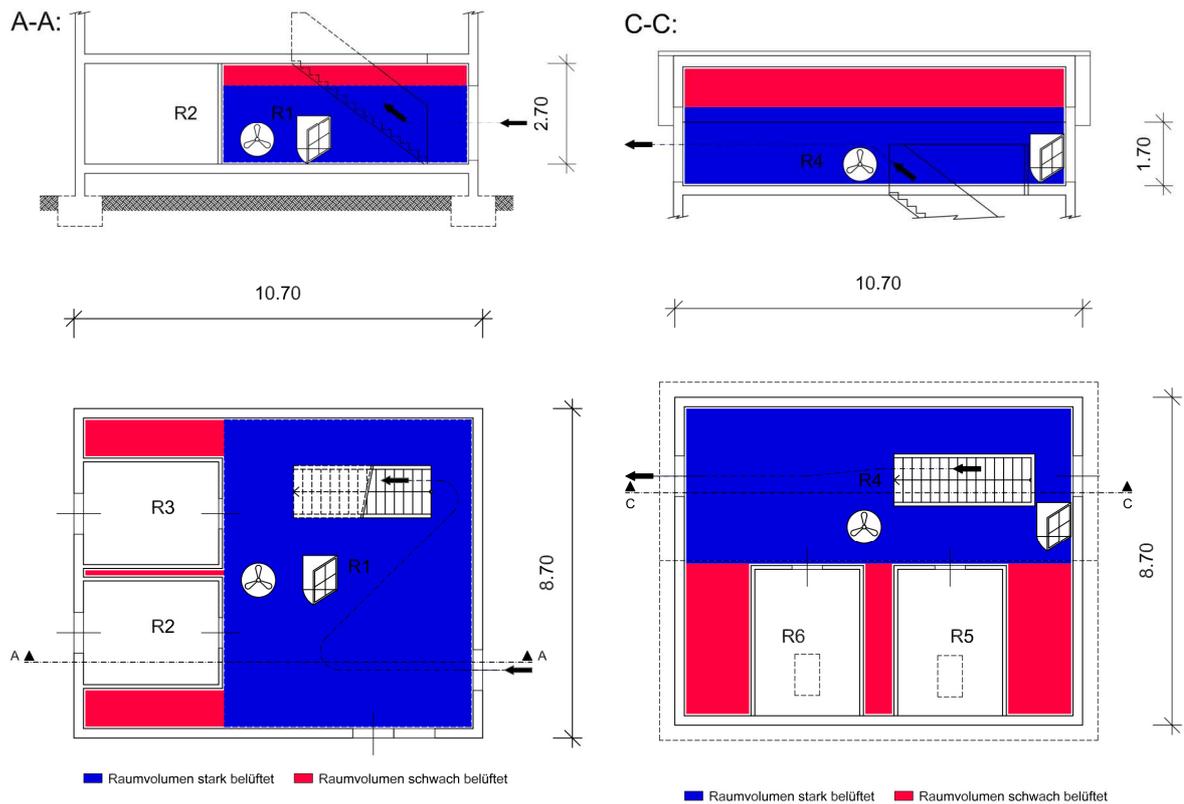
**Tab. 7: Übersicht über die relevanten Raumvolumina für alle untersuchten Fälle (siehe Tab. 7). Die betrachteten Situationen sind in natürlich belüftete Mess-Situationen („Natürlich“) und durchmischte Mess-Situationen („durchmischt“) aufgeteilt.**

<b>Situation</b>	<b>Zone 1</b>	<b>Zone 2</b>	<b>Zone 3</b>	<b>Zone 4</b>	<b>Verteilung</b>
EG gekippt- OG geöffnet	Teil	Teil	---	---	Natürlich
	Teil	Teil	---	---	Durchmischt
EG geöffnet- OG geöffnet	Teil	Teil	---	---	Natürlich
	Teil	Teil	---	---	Durchmischt
EG geöffnet- OG geöffnet	Teil	Teil	Teil	Teil	Natürlich
	Teil	Teil	Teil	Teil	Durchmischt

Aus der Zusammenschau der verschiedenen Querlüftungssituationen wird sichtbar, dass der Einfluss der zusätzlichen Luftdurchmischung im Raum keine Änderung des Durchströmungsverhaltens während der Fensterlüftung mit sich bringt. Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom wird durch die mechanische Durchmischung nicht beeinflusst.

Abb. 29 zeigt die Verteilung der stark und schwach durchlüfteten Bereiche für die Querlüftungssituationen des Szenario 1 („R1-R4“) mit 2 durchströmten Zonen. Die stark durchströmten Bereiche sind blau und die schwach durchströmten Bereiche sind rot dargestellt. Für die Berechnung der Tracergaskonzentration wurden als relevantes Raumvolumen die blau gekennzeichneten Bereiche angenommen.

Das Ventilatorsymbol kennzeichnet die Messungen unter durchmischten Bedingungen, das Symbol des geöffneten Fensters kennzeichnet die natürlich belüfteten Messungen.



**Abb. 29: durchmischtes Volumen im Grundriss EG (links unten) und Grundriss OG (links unten) sowie im Schnitt EG (links oben) und Schnitt OG (links oben). Ausbildung von stark und schwach belüfteten Bereichen**

Abb. 30 zeigt die Verteilung der stark und schwach durchlüfteten Bereiche für die Querlüftungssituationen des Szenario 2 („R3-R6“) mit 4 durchströmten Zonen. Die stark durchströmten Bereiche sind blau und die schwach durchströmten Bereiche sind rot dargestellt. Für die Berechnung der Tracergaskonzentration wurden als relevantes Raumvolumen die blau gekennzeichneten Bereiche angenommen.

Das Ventilatorsymbol kennzeichnet die Messungen unter durchmischten Bedingungen, das Symbol des geöffneten Fensters kennzeichnet die natürlich belüfteten Messungen.



**Abb. 30:** durchmischtes Volumen im Grundriss EG (links unten) und Grundriss OG (links unten) sowie im Schnitt EG (links oben) und Schnitt OG (links oben). Ausbildung von stark und schwach belüfteten Bereichen

## 4.2 Vorstellen des Modells

Vom Ziel ausgehend, ein möglichst genaues und einfaches Modell zu erstellen, mit dem auch dynamische Luftvolumenstromberechnungen gemacht werden können, wurde die Methodik der Luftstromnetzwerkmodelle gewählt. Um eine Vergleichbarkeit des Modells mit der Norm zu gewährleisten, wurde das Verfahren B (ÖNORM B 8110-3:2012, Gleichung 1) herangezogen und analysiert.

$$\dot{V} = 0,7 \cdot C_{ref} \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\Delta T} \quad (6)$$

$\dot{V}$	in $\text{m}^3/\text{h}$	Luftvolumenstrom über die Lüftungsöffnung
$C_{ref}$	in $\frac{\text{m}^{0,5}}{\text{h} \cdot \text{K}^{0,5}}$	Austauschkoeffizient $C_{ref} = 100 \frac{\text{m}^{0,5}}{\text{h} \cdot \text{K}^{0,5}}$
A	in $\text{m}^2$	Fläche der Lüftungsöffnung gem. Bild B.1 (ÖN B 8110-3:2012)
H	in m	Höhe der Lüftungsöffnung gem. Bild B.1 (ÖN B 8110-3:2012)
$\Delta T$	in K	Lufttemperaturdifferenz zwischen Außenluft und Innenluft

Es stellte sich heraus dass der Ansatz in (6) eine stationäre Gleichung zur Berechnung des thermisch induzierten Luftvolumenstromes mit einem Sicherheitsfaktor von 0,7 für die praktische Anwendung ist. Mit diesem Zusammenhang kann der Luftvolumenstrom für stationäre Fälle und auch für instationäre Fälle berechnet werden. In (Bednar et al. 2012) wurde ein Modell zur Berechnung der operativen Raumtemperatur vorgestellt, das mit Gleichung (6) den Luftvolumenstrom in einzelnen Räumen berechnet.

Für die praktische Anwendung in der Planung für die Lüftung von Einzelräumen oder der Querlüftung zwischen 2 Stockwerken liefert die direkte Berechnung des Luftvolumenstromes brauchbare Ergebnisse. Für die Berechnung des Luftvolumenstromes durch mehrere Zonen mit Berücksichtigung des Luftaustausches zwischen den Zonen wurden die Massenströme zufolge Temperatur (siehe Gleichung 7) zwischen den Räumen und zwischen innen und außen berechnet. Die Berechnung der Luftvolumenströme als Massenströme wurde gewählt, um den Luftdurchsatz zufolge der vorhandenen Lufttemperatur und der geometrischen Höhe auf Basis der Bernoulligleichung berechnen zu können.

Für die jeweilige Luftströmungssituation (siehe 4.2.4 und 4.2.5) wurde ein Zonenmodell mit allen auftretenden Luftvolumenströmen (siehe Abb. 33, Abb. 34 und Abb. 35, Abb. 36) erstellt. Anschließend wurden die Massenströme für den Luftaustausch durch die Öffnungen gebildet. Unter Berücksichtigung von Randbedingungen für den interzonalen Austausch konnten die Luftvolumenströme durch alle Räume berechnet werden. Um den Einfluss von lokalen Strömungen an den Öffnungen zu berücksichtigen, z.B. beim Einsatz von Insektengittern, wurden Faktoren eingeführt. Im Modell wurde der Einfluss des Windes nicht berücksichtigt, um die Anzahl der Unbekannten und die damit verbundenen möglichen Unsicherheitsfaktoren geringer zu halten.

In den Kapiteln 4.2.1 und 0 werden die rechnerischen Zusammenhänge des Modells und dessen Bestandteile vorgestellt. Die folgenden Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5 beinhalten die Anwendung der Gleichungen auf eine Einzelraumsituation (siehe 4.2.4) und auf eine stockwerksübergreifende Querlüftungssituation (siehe 4.2.5).

#### **4.2.1 Modellbestandteile aus der Literatur**

Die Berechnung der Lüftung zufolge Temperaturdifferenz durch die Verwendung von Massenströmen benötigt folgende Gleichungsbestandteile (siehe Etheridge 2012):

*Innendruck der jeweiligen Zone zufolge Höhe und Lufttemperatur:*

$$\left( P_i - (\rho_i \cdot g \cdot h_{k,i}) \right)$$

Der Innendruck einer Zone  $i$  besteht aus dem absoluten Druck  $P_i$  am Bezugsniveau aller Zonen minus Luftdichte ( $\rho_i$ ) mal Höhenlage ( $h_{k,i}$ ) mal Erdbeschleunigung  $g$  in der Zone. Die Höhenlage ( $h_{k,i}$ ) wird von einem gemeinsamen Bezugsniveau bis zum Flächenschwerpunkt der Öffnung gemessen. Der Index  $k$  kennzeichnet die durchströmte Öffnung.

*Austauschkoeffizient:*

$$C_d$$

Der dimensionslose Austauschkoeffizient  $C_d$  kann für jede Zone individuell festgelegt werden. In der Literatur wird für große Öffnungen ein Wert von  $0,6 \pm 0,1$  angegeben (siehe Kapitel 0).

*Öffnungsfläche:*

$$A_{eff}$$

Ist die effektive Öffnungsfläche zwischen den durchströmten Zonen. In 4.2.3 wird die Ermittlung der effektiven Öffnungsfläche gezeigt.

*Exponent:*

$$b_k$$

Für den Exponent ( $b_k$ ) wird in der Literatur (siehe Kapitel 0) eine Größenordnung zwischen 0,5 und 1 angegeben. Für Öffnungen mit turbulenten Strömungsbedingungen wird  $b_k = 0,5$  gewählt. Für laminare Strömungsbedingungen an den Öffnungen wird  $b_k = 1$  angesetzt.

Aus den Bestandteilen der Zusammenhänge, abgeleitet aus der Bernoulligleichung, kann der Massenstrom zufolge Temperaturdifferenz für eine Öffnung berechnet werden (siehe Etheridge 2012). Um die Luftvolumenströme für ein Netzwerk aus verschiedenen Zonen mit dazugehörigen Öffnungen zu erhalten, ist das Einführen von Randbedingungen notwendig (siehe 0). Aus den Massenstromgleichungen und den Randbedingungen entsteht ein Netzwerkmodell. Durch die iterative Berechnung der Druckbilanz können die Massenströme zwischen den Öffnungen und Innen und Außen berechnet werden (siehe 4.2.4 und 4.2.5).

Die Berechnung der Massenströme zwischen zwei Zonen durch eine große Öffnung ist in Gleichung (7) dargestellt. Berechnet wird der Massenstrom  $\dot{m}$  der Öffnung  $k$  zufolge Temperaturdifferenz zwischen Zone  $i$  und Zone  $j$ . Die positive Bezugsrichtung des

Massenstromes ist von  $i$  nach  $j$ . Für die Berechnung wird der Austauschkoefizient ( $C_{d,k}$ ), die Querschnittsfläche der jeweiligen Öffnung ( $A_{eff,k}$ ), die Druckdifferenz zwischen den berechneten Zonen ( $\Delta P_{i \rightarrow j,k}$ ) und die Luftdichte im Raum ( $\rho_i$ ) benötigt. Für die Berechnung erforderlich ist weiters der Exponent ( $b_k$ ), der das Strömungsverhalten der jeweiligen Öffnung abbildet.

$$\dot{m}_{i \rightarrow j,k} = C_{d,k} \cdot A_{eff,k} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_i}} \cdot \Delta P_{i \rightarrow j,k}^{b_k} \quad (7)$$

$\dot{m}_{i \rightarrow j,k}$	in kg/s	Massenstrom in Richtung Zone $i$ nach Zone $j$ an der Öffnung $k$
$C_{d,k}$	in kg/s, Pa <sup>0,5</sup>	Austauschkoefizient an der Öffnung $k$
$A_{eff,k}$	in m <sup>2</sup>	effektive Öffnungsfläche an der Öffnung $k$ , (siehe 4.2.3)
$\rho_i$	in kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte in der Zone $i$
$\Delta P_{i \rightarrow j,k}$	in Pa	Druckdifferenz an der Öffnung $k$ zwischen Zone $i$ und Zone $j$
$b_k$	–	Exponent zur Angabe des Strömungsverhaltens in der Öffnung $k$

Die Druckdifferenzen ( $\Delta P_{i \rightarrow j,k}^{b_k}$ ) zwischen den Zonen an der jeweiligen Öffnung werden aus dem absoluten Luftdruck und dem Luftdruck zufolge Dichte ( $\rho_i$ ) und Höhenlage der Öffnung ( $h_{k,i}$ ) der entsprechenden Zone ermittelt (siehe Gleichung (8)). Die Höhen der Öffnungen sind vom Bezugsniveau der jeweiligen Zone bis zum Flächenschwerpunkt der Öffnung gemessen (siehe. Abb. 33, Abb. 34, Abb. 35, Abb. 36).

$$\Delta P_{i \rightarrow j,k}^{b_k} = \left( \left( P_i - (\rho_i \cdot g \cdot h_{k,i}) \right) - \left( P_j - (\rho_j \cdot g \cdot h_{k,j}) \right) \right)^{b_k} \quad (8)$$

$P_i$	in Pa	absoluter Luftdruck in der Zone $i$
$g$	in m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung $g$ , ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )
$h_{k,i}$	in m	geodätische Höhe $h$ des Flächenschwerpunkts der Öffnung $k$ in der Zone $i$

### 4.2.2 Annahmen

Neben den Bestandteilen des Modells wurden zur Berechnung des Luftaustausch im und durch das Gebäude zwei Rechenannahmen getroffen.

Annahme 1:

Es kommt in der jeweiligen Zone zu einer vollständigen Luftdurchmischung. Das bedeutet, dass die Summe der Massenströme in jeder Zone gleich 0 ist. (siehe Gleichung (9)).

$$\sum_k \dot{m}_{i \rightarrow j, k} = 0 \quad (9)$$

Aus physikalischer Sicht heißt das, es gibt im Raum keinen temperaturbedingten Massenaustausch und somit keine Luftschichten mit unterschiedlichen Temperaturen.

Annahme 2:

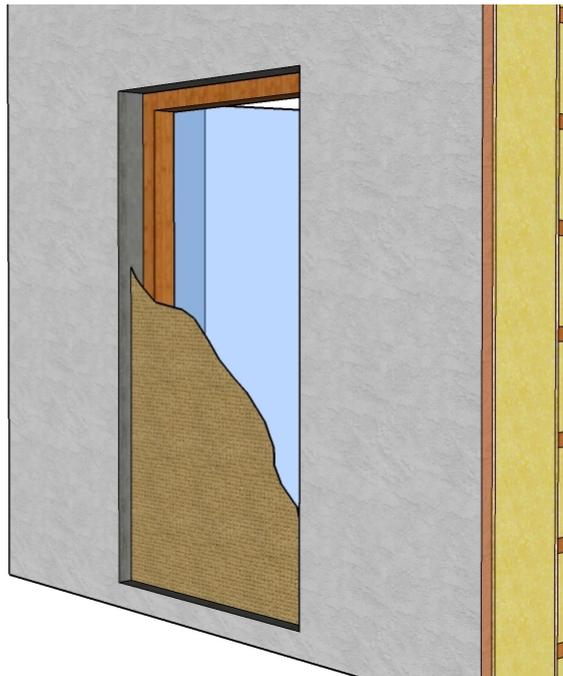
Die Öffnungen zwischen den Räumen werden geteilt. Diese Festlegung wurde getroffen, um in der Berechnung eine klare Festlegung der Richtung für die Luftvolumenströme zu erhalten. Sie beruht auf der Annahme, dass sich ein Gleichgewichtszustand bei Durchlüftung eines Raumes einstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Luft durch den unteren Teil der Öffnung einströmt und durch den oberen Teil der Öffnung wieder ausströmt. Bei idealen Bedingungen, wie z.B. vollständiger Durchmischung (siehe Annahme 1), bildet sich in der Mitte der Öffnung eine neutrale Ebene aus. Die ein- und ausströmenden Bereiche sind dann gleich groß. Werden mehrere Räume betrachtet und gibt es unterschiedliche Höhenlagen zwischen den Räumen, so kann beobachtet werden, dass sich die neutrale Ebene nach oben bzw. nach unten verschiebt. Es ist auch möglich, dass sich nur in einer Richtung ein Luftvolumenstrom durch die Öffnung einstellt (siehe Abb. 35 und Abb. 36).

Nach der Modellbildung der Massenströme  $\dot{m}_{i \rightarrow j, k}$  zwischen den Zonen  $i$  und  $j$  für alle Öffnungen  $k$  des Netzwerkmodells wird für den entsprechenden Temperaturzustand im Zeitschritt  $n$  unter Berücksichtigung von Annahme 1 (vollständige Luftdurchmischung) die Druckbilanz für den Zeitschritt  $n$  durch Iteration berechnet. Die Iteration erfolgt so lange bis die Differenz zwischen den Massenströmen hinreichend klein ist.

Die Luftvolumenströme  $\dot{V}_{i \rightarrow j, k}$  durch die jeweiligen Öffnungen können aus den Massenströmen  $\dot{m}_{i \rightarrow j, k}$  mit der Luftdichte ( $\rho_i, \rho_j$ ) der entsprechenden Zone ( $i, j$ ) bestimmt werden.

### 4.2.3 Berechnung der effektiven Öffnungsquerschnitte

Die Berechnung der effektiven Öffnungsfläche für gekippte Fenster und Fenster, die mit Insektengitter (siehe Abb. 31) ausgerüstet sind, erfordern die Anwendung eines Rechenansatzes. Im Verfahren B der ÖNORM B 8110-3:2012 (ÖNORM B 8110-3) ist ein Berechnungsansatz zur Ermittlung der effektiven Öffnungsfläche für gekippte Fenster angegeben. Für die Berechnung der effektiven Öffnungsfläche von Fenstern mit Insektengittern sind keine Rechenannahmen angegeben.

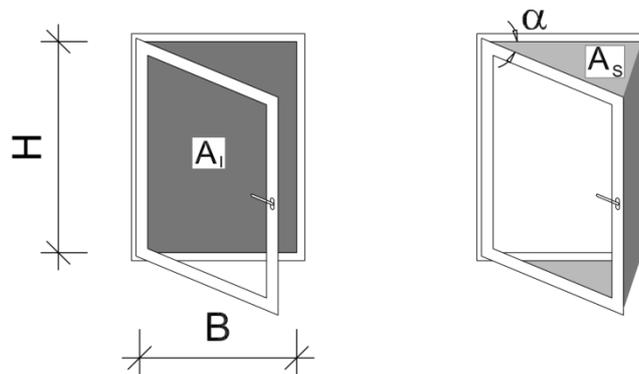


**Abb. 31: Fenstertür mit davorstehendem Insektengitter in einer Holzriegelwand, Ausgangssituation für die Berechnung der effektiven Öffnungsfläche mit einem Berechnungsansatz**

Um die effektive Öffnungsfläche ( $A_{eff}$ ) für jeden Fenstertyp (geöffnetes, gekipptes, Dachflächenfenster) mit einem davor oder dahinter montierten Insektengitter berechnen zu können wurde ein Ansatz gesucht, mit dem die effektive Öffnungsfläche aus der Überlagerung zweier Flächen (siehe z.B. Insektengitter und geöffnetes Fenster in Abb. 31) berechnet werden kann. In der Literatur wurde bei (Maas 1995) ein Ansatz gefunden der diesen Fall abbildet.

Bei der Berechnung der effektiven Öffnungsfläche ( $A_{eff}$ ) werden 2 Flächen ( $A_I$ ,  $A_S$ ) überlagert (siehe Abb. 32). Die Fläche ( $A_I$ ) entspricht der Fläche des gesamten Öffnungsquerschnittes und ( $A_S$ ) entspricht der Fläche des jeweils geöffneten Lüftungsquerschnittes. Bei der Berechnung von vollständig geöffneten Fenstern sind die Flächen ( $A_I$ ,  $A_S$ ) ident und entsprechen der effektiven Lüftungsfläche ( $A_{eff}$ ). Bei gekippten Fenstern wird die gesamte Fensterfläche ( $A_I$ ) und die Fläche des jeweils

geöffneten Lüftungsquerschnittes ( $A_S$ ) überlagert. Für die Bestimmung der effektiven Öffnungsflächen ( $A_{eff}$ ) von Fenstern mit vorgehängten Insektengitter wurde die gesamte Fensterfläche ( $A_I$ ) mit der Flächenverkleinerung durch das Insektengitter angenommen. Die Fläche des jeweils geöffneten Lüftungsquerschnittes ( $A_S$ ) wurde in ihrer tatsächlichen Größe angenommen.



**Abb. 32: Überlagerungen des gesamten Öffnungsquerschnitts  $A_I$  und der jeweils geöffneten Lüftungsfläche  $A_S$ , Quelle: (Maas 1995, Abschnitt 7.2)**

Die Berechnung der effektiven Öffnungsfläche ( $A_{eff}$ ) erfolgt aus der gesamten Fensterfläche ( $A_I$ ) und dem Durchflussverhältnis ( $\theta$ ) (siehe (10)).

$$A_{eff} = A_I \cdot \theta \quad (10)$$

$A_I$	in $m^2$	gesamte Fensterfläche gem. Abb. 32
$\theta$	–	Durchflußverhältnis zwischen vollständig geöffneten Fenster ( $\alpha = 90^\circ$ ) und dem tatsächlichen Fensteröffnungswinkel ( $\alpha$ )

Aus der Überlagerung zweier Fensterflächen eines Fensters wird das Durchflussverhältnis ( $\theta$ ) angegeben (siehe (11)). Durch die Überlagerung der Fläche des vollständig geöffneten Fensters ( $A_{equ}(\alpha = 90^\circ)$ ) und der Fläche des tatsächliche geöffneten Fensters ( $A_{equ}(\alpha)$ ) können verschiedene Öffnungsweiten berücksichtigt werden. Es lassen sich damit auch verschiedene Fenstertypen wie gekippte Fenster oder Dachflächenfenster berücksichtigen.

$$\theta = \frac{A_{equ}(\alpha)}{A_{equ}(\alpha = 90^\circ)} \quad (11)$$

$A_{equ}(\alpha)$  in  $m^2$  äquivalente Fensterfläche in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\alpha$  aus der Überlagerung der Fensterflächen  $A_I$  und  $A_S$  (siehe Abb. 32)

Gleichung (12) beschreibt die Zusammensetzung der äquivalenten Fensterfläche in Abhängigkeit der Öffnungsweite (siehe Abb. 32) als eine Überlagerung der gesamten Ansichtsfläche eines offenbaren Fensters ( $A_I$ ) und der seitlichen Durchströmungsöffnungen eines Fenster ( $A_S$ ).

$$A_{equ}(\alpha) = \left( \frac{1}{A_I^2} + \frac{1}{A_S^2} \right)^{-0.5} \quad (12)$$

$A_I$  in  $m^2$  gesamte Fensterfläche (siehe Abb. 32)

$A_S$  in  $m^2$  tatsächliche Fensterfläche (siehe Abb. 32)

Die seitlichen Durchströmungsöffnungen ( $A_S$ ) können mit Gleichung (13) für jeden Öffnungswinkel angegeben werden.

$$A_S = 2 \cdot H \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \left[ H \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + B \right] \quad (13)$$

$H$  in m Fensterhöhe (siehe Abb. 32)

$B$  in m Fensterbreite (siehe Abb. 32)

$\alpha$  in  $^\circ$  Öffnungswinkel des Fensters (siehe Abb. 32)

Die gesamte Ansichtsfläche des offenbaren Fensters ( $A_I$ ) setzt sich aus der Breite ( $B$ ) und Höhe des Fensters ( $H$ ) zusammen.

$$A_I = B \cdot H \quad (14)$$

Die nachfolgende Aufzählung der Arbeitsschritte zeigt die Berechnung der effektiven Öffnungsfläche aus den angegebenen Gleichungen:

- Berechnung von  $A_I$
- Ermittlung von  $A_S$  für die Öffnungswinkel  $\alpha$  und  $\alpha = 90^\circ$
- Ermittlung von  $A_{equ}$  für die Öffnungswinkel  $\alpha$  und  $\alpha = 90^\circ$
- Berechnen des Durchflussverhältnisses  $\theta$
- Ermitteln der effektiven Öffnungsfläche  $A_{eff}$

Um den geometrischen Einfluss von Insektenschutzgittern zu berücksichtigen, wurde  $A_I$  im 1. Schritt entsprechend der prozentuellen Flächenminderung reduziert. Alle anderen Schritte zur Ermittlung von  $A_{eff}$  werden unverändert ausgeführt.

#### 4.2.4 Anwendung des Modells auf die Einzelraumsituation

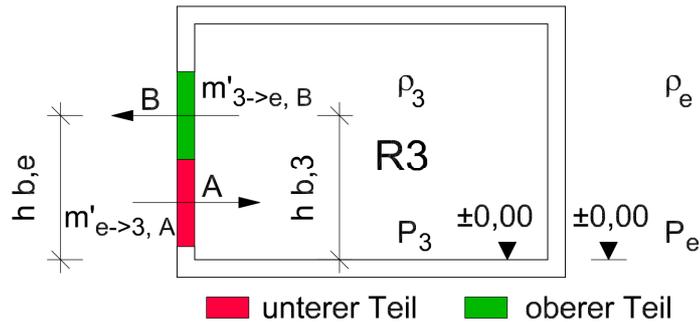
Das in weiterer Folge vorgestellte Modell zur Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung wurde im ersten Schritt an zwei Einzelraumsituation angewandt (siehe Abb. 33 und Abb. 34). Beide Räume haben das gleiche Raumvolumen von ca. 25 m<sup>3</sup>. Unterschiede können bei der Lage und Geometrie der Fensteröffnungen sowie bei der Form des Raumvolumens beobachtet werden. Abb. 33 zeigt einen Erdgeschoßraum mit rechteckigem Grundriss und konstanter Raumhöhe. Als Öffnung nach außen dient eine vertikale Fenstertür mit einer Öffnungsgeometrie von (BxH=1,075 x 2,005 m). Abb. 34 zeigt einen Dachgeschoßraum mit rechteckigem Grundriss und variabler Raumhöhe. Als Öffnung nach Außen dient ein Dachflächenfenster mit einer Neigung von 33° und einer Öffnungsgeometrie von (BxH=0,640 x 1,300 m).

Für die Erdgeschoßsituation in Abb. 33 wurden in die Berechnung als variable Größen die Luftdichte von Außenlufttemperatur ( $\rho_e$ ) und Innenlufttemperatur ( $\rho_3$ ) für den jeweiligen Zeitschritt eingesetzt.

Der absolute Innen- und Außendruck ( $P_3$ ) und ( $P_e$ ) wurde in der Berechnung gleich 0 gesetzt.

Die Höhenlage der Massenströme durch die Öffnungen A und B wurde für ( $h_{A,3}$ ) und ( $h_{A,e}$ ) mit 0,501m und für ( $h_{B,3}$ ) und ( $h_{B,e}$ ) mit 1,504m vom absoluten Bezugsniveau (= ± 0,00m) und vom Bezugsniveau im Raum bis zum Flächenschwerpunkt der jeweiligen Öffnung angegeben. Die effektive Öffnungsfläche der Öffnungen A und B ( $A_{eff,A}$ ,  $A_{eff,B}$ ) beträgt jeweils 1,078 m<sup>2</sup>.

Der Austauschkoefizient ( $C_d$ ) für die beiden Öffnungen A und B wurde mit 0,6 angesetzt. Der Exponent ( $b_k$ ) für geöffnete Fenster wurde 0,5 gesetzt. Bei gekippten Fenstern und bei geöffneten Fenstern mit Insektenschutz wurde der Exponent ( $b_k$ ) mit dem Wert 1 angenommen.



**Abb. 33: Anwendung der Gleichungen nach (Etheridge 2012) auf die Einzelraumsituation im EG**

Für die Obergeschoßsituation in Abb. 34 wurden in die Berechnung als variable Größen die Luftdichte von Außenlufttemperatur ( $\rho_e$ ) und Innenlufttemperatur ( $\rho_6$ ) für den jeweiligen Zeitschritt eingesetzt.

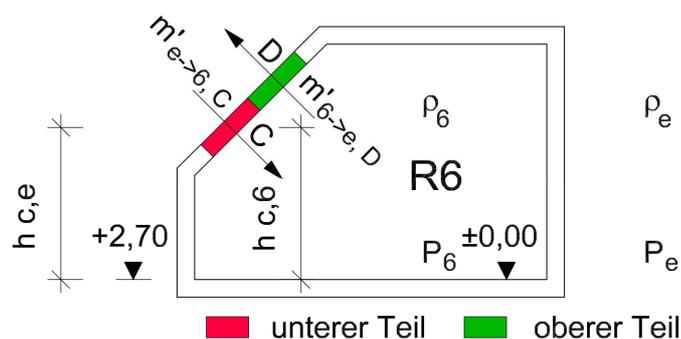
Der absolute Innen- und Außendruck ( $P_6$ ) und ( $P_e$ ) wurde in der Berechnung gleich 0 gesetzt.

Die Höhenlage des Massenstromes durch die Öffnung C wurde für ( $h_{C,6}$ ) mit 2,580 m vom Bezugsniveau  $\pm 0,00$  m im Raum und für ( $h_{C,e}$ ) mit  $2,580 + 2,70 = 5,280$  m vom absoluten Bezugsniveau (= + 2,70 m) bis zum Flächenschwerpunkt der jeweiligen Öffnung angegeben. Die Höhe des Massenstromes durch die Öffnung D vom Bezugsniveau zum Flächenschwerpunkt beträgt für ( $h_{D,6}$ ) 2,930 m und für ( $h_{D,e}$ )  $2,930 + 2,70 = 5,630$  m und.

Die effektive Öffnungsfläche der Öffnungen A und B ( $A_{eff,C}$ ,  $A_{eff,D}$ ) beträgt jeweils 0,160 m<sup>2</sup>.

Der Austauschkoefizient ( $C_d$ ) für die beiden Öffnungen A und B wurde mit 0,6 angesetzt.

Der Exponent ( $b_k$ ) für alle betrachteten Varianten wurde 0,5 gesetzt.



**Abb. 34: Anwendung der Gleichungen nach (Etheridge 2012) auf die Einzelraumsituation im OG**

#### 4.2.5 Anwendung des Modells auf die Querlüftungssituation

Im zweiten Schritt wurde das Modell an zwei Querlüftungssituationen angewandt (siehe Abb. 35 und Abb. 36).

In der ersten Situation („R1 – R4“, siehe Abb. 35) bewegt sich der Luftvolumenstrom von außen durch die Eingangstür (Öffnung A und B) in einen großen Erdgeschoßraum (R1) und weiter durch die Stiegenhausöffnung E und F. Von der Stiegenhaus-Öffnung führt der Luftvolumenstrom durch den großen Obergeschoßraum (R4) durch eine Fenstertür (Öffnung C und D) ins Freie. Die beiden großen Räume (R1 und R4) haben das gleiche Raumvolumen von ca. 150 m<sup>3</sup>. Die tatsächliche Situation der Räume ist in Abb. 10 dargestellt. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, dass die Raumhöhe im Raum R1 konstant ist, während sie im Raum R4 aufgrund des Steildachs nicht konstant ist. Die Öffnungen (A, B und C, D) sind gleich groß und haben eine Öffnungsgeometrie von (BxH=1,075 x 2,005 m). Die Geometrie der horizontalen Stiegenhausöffnung beträgt (BxH=1,180 x 3,600 m).

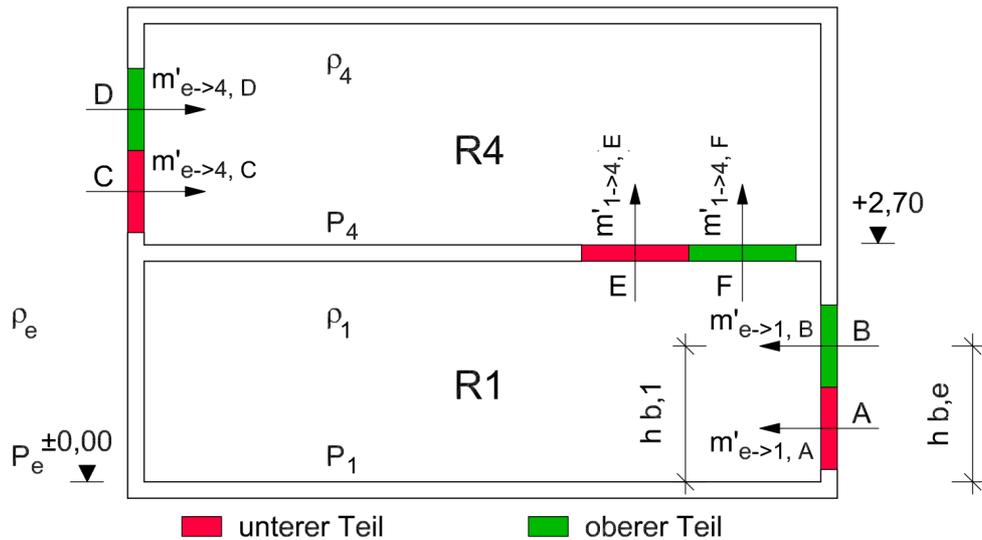
Für die Querlüftungssituation „R1-R4“ wurden in die Berechnung als variable Größen die Luftdichte von Außenlufttemperatur ( $\rho_e$ ), Innenlufttemperatur ( $\rho_1$ ) und Innenlufttemperatur ( $\rho_4$ ) für den jeweiligen Zeitschritt eingesetzt.

Die absoluten Innendrucke ( $P_1$ ) und ( $P_4$ ) und der Außendruck ( $P_e$ ) wurden in der Berechnung gleich 0 gesetzt.

Die Höhenlage der Massenströme durch die Öffnungen A und B wurde für ( $h_{A,1}$ ) und ( $h_{A,e}$ ) mit 0,501m und für ( $h_{B,1}$ ) und ( $h_{B,e}$ ) mit 1,504m vom absoluten Bezugsniveau  $\pm 0,00$  m bis zum Flächenschwerpunkt der jeweiligen Öffnung angegeben. Die Höhen der horizontalen Öffnungen E und F ( $h_{E,1}$ ) und ( $h_{F,1}$ ) mit Bezugsniveau im Raum R1 betragen 2,700 m. Die Höhen der Öffnungen E und F ( $h_{E,4}$ ) und ( $h_{F,4}$ ) mit Bezugsniveau im Raum R4 betragen 0,000 m. Die Höhen der Öffnungen C und D mit dem absoluten Bezugsniveau (= + 2,70 m) betragen für ( $h_{C,e}$ ) 2,70 + 0,501 = 3,201 m und für ( $h_{D,e}$ ) 2,70 + 1,504 = 4,204 m. Die Höhen der Öffnungen C und D mit Bezugsniveau im Raum R4 betragen 0,501 m für ( $h_{C,4}$ ) und 1,504 m für ( $h_{D,4}$ ).

Die effektive Öffnungsfläche der Öffnungen A und B ( $A_{eff,A}$ ,  $A_{eff,B}$ ) und C und D ( $A_{eff,C}$ ,  $A_{eff,D}$ ) beträgt jeweils 1,078 m<sup>2</sup>. Die effektive Öffnungsfläche für die Öffnungen C und D ( $A_{eff,C}$ ,  $A_{eff,D}$ ) beträgt jeweils 2,012 m<sup>2</sup>.

Der Austauschkoefizient ( $C_d$ ) für die alle Öffnungen (A, B, C, D, E und F) wurde mit 0,6 angesetzt. Der Exponent ( $b_k$ ) wurde für alle Öffnungen 0,5 gesetzt.



**Abb. 35: Anwendung der Gleichungen nach (Etheridge 2012) auf die Querlüftungssituation mit 2 Zonen**

In der zweiten Querlüftungssituation („R3 – R1 – R4 – R6“, siehe Abb. 36) bewegt sich der Luftvolumenstrom von Außen durch eine Fenstertür (Öffnung A und B) in den linken Erdgeschoßraum (R3) durch eine Innentür (Öffnung G und H) in den rechten Erdgeschoßraum (R1) und weiter durch die Stiegenhausöffnung E und F. Von der Stiegenhausöffnung führt der Luftvolumenstrom durch den rechten Obergeschoßraum (R4) durch eine Innentür (Öffnung I und J) in den linken Obergeschoßraum (R6) und durch ein Dachflächenfenster (Öffnung C und D) ins Freie. Die beiden großen Räume (R1 und R4) haben nahezu das gleiche Raumvolumen von ca. 150 m<sup>3</sup>. Die beiden kleinen Räume (R3 und R6) haben ebenfalls ein ähnliches Raumvolumen von ca. 25 m<sup>3</sup>. Nicht im Modell sichtbar, aber berücksichtigt wurde, dass in beiden übergeordneten Räumen noch jeweils zwei weitere, kleine Räume in Form von Einbauten untergebracht sind. Jeweils einer der beiden Räume (R3 und R6) ist durchströmt. Die kleinen Räume im Erd- und Obergeschoß sind nach unterschiedlichen Himmelsrichtungen ausgerichtet (siehe Abb. 10). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, dass die Raumhöhe im Erdgeschoß (Raum R3 und R1) konstant ist, während sie im Obergeschoß (Raum R4 und R6) aufgrund des Steildachs nicht konstant ist. Die Öffnungen (A, B) haben eine Öffnungsgeometrie von (BxH=1,075 x 2,005 m). Die Öffnungen (C, D) haben eine Öffnungsgeometrie von (BxH=0,640 x 1,300 m) und eine Neigung von 33°. Die Geometrie der Innentüren beträgt (BxH=0,800 x 2,000 m). Die Geometrie der horizontalen Stiegenhausöffnung beträgt (BxH=1,180 x 3,600 m).

Für die Querlüftungssituation „R3 – R1 – R4 – R6“ wurden in die Berechnung als variable Größen die Luftdichte von Außenlufttemperatur ( $\rho_e$ ), Innenlufttemperatur ( $\rho_3$ ),

Innenlufttemperatur ( $\rho_1$ ), Innenlufttemperatur ( $\rho_4$ ) und Innenlufttemperatur ( $\rho_6$ ) für den jeweiligen Zeitschritt eingesetzt.

Die absoluten Innendrucke ( $P_3$ ), ( $P_1$ ), ( $P_4$ ) und ( $P_6$ ) sowie der Außendruck ( $P_e$ ) wurden in der Berechnung gleich 0 gesetzt.

Die Höhenlage der Massenströme durch die Öffnungen A und B wurde für ( $h_{A,1}$ ) und ( $h_{A,e}$ ) mit 0,501m und für ( $h_{B,1}$ ) und ( $h_{B,e}$ ) mit 1,504m vom Bezugsniveau  $\pm 0,0$  m bis zum Flächenschwerpunkt der jeweiligen Öffnung angegeben. Die Höhe der Öffnung G ( $h_{G,3}$ ) und ( $h_{G,1}$ ) mit Bezugsniveau in Raum R3 und R1 beträgt 0,500 m. Die Höhe der Öffnung H ( $h_{H,3}$ ) und ( $h_{H,1}$ ) mit Bezugsniveau in Raum R3 und R1 beträgt 1,500 m. Die Höhen der horizontalen Öffnungen E und F ( $h_{E,1}$ ) und ( $h_{F,1}$ ) mit Bezugsniveau im Raum R1 betragen 2,700 m. Die Höhen der Öffnungen E und F ( $h_{E,4}$ ) und ( $h_{F,4}$ ) mit Bezugsniveau im Raum R4 betragen 0,000 m. Die Höhe der Öffnung I ( $h_{I,4}$ ) und ( $h_{I,6}$ ) mit Bezugsniveau in Raum R4 und R6 beträgt 0,500 + 2,700 = 3,200 m. Die Höhe der Öffnung J ( $h_{J,4}$ ) und ( $h_{J,6}$ ) mit Bezugsniveau in Raum R4 und R6 beträgt 1,500 + 2,700 = 4,200 m. Die Höhen der Öffnungen C und D mit Bezugsniveau  $\pm 0,0$  m betragen für ( $h_{C,e}$ ) 2,700 + 2,580 = 5,280 m und für ( $h_{D,e}$ ) 2,700 + 2,930 = 5,630 m. Die Höhen der Öffnungen C und D mit Bezugsniveau im Raum R6 betragen 2,580 m für ( $h_{C,4}$ ) und 2,930 m für ( $h_{D,4}$ ).

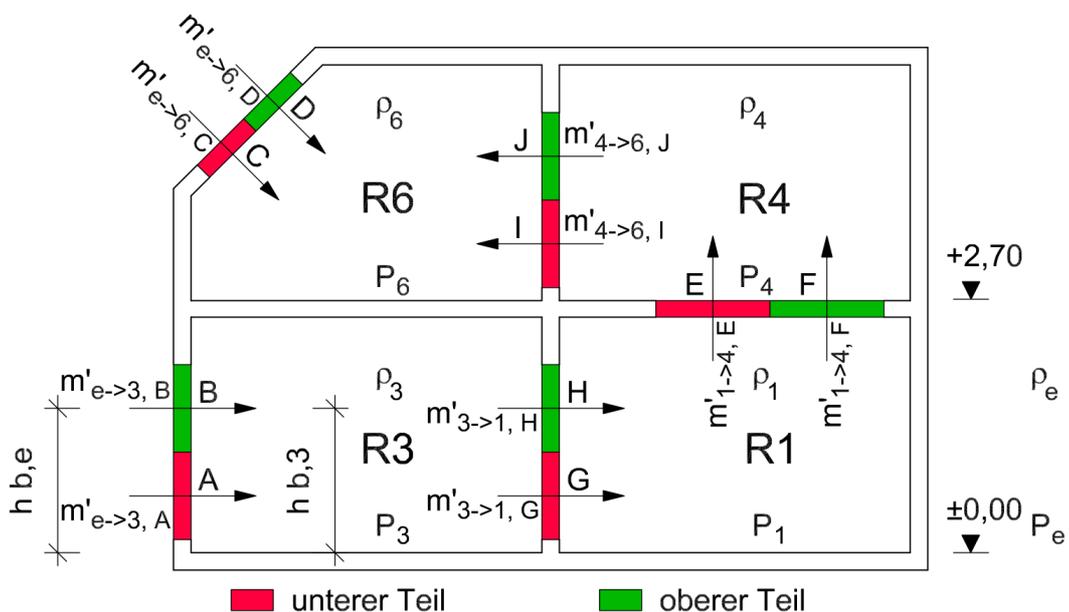


Abb. 36: Anwendung der Gleichungen nach (Etheridge 2012) auf die Querlüftungssituation mit 4 Zonen

Mit dem unter 4.1.5 vorgestellten Einzelraum- und Querlüftungssituationen angepassten Modell wurden die Massenströme und die Tracergaskonzentrationen für alle gemessenen Situationen zufolge thermisch induzierten Luftwechsel berechnet.

Im nächsten Schritt soll die Massenstromberechnung mit dem Rechenmodell anhand der Messung von Tracergaskonzentrationen zufolge thermisch-induzierten Luftwechsels validiert werden (siehe Abschnitt 4.3).

### **4.3 Validierung des Modells**

Im Abschnitt 4.3 – „Validierung des Modells“ wird die Übereinstimmung zwischen den Tracergasmessungen (siehe 4.1) und den Modellberechnungen (siehe 4.2) vorgestellt und die Ergebnisse des Validierungsprozesses beschrieben. In weiterer Folge wird das validierte Modell in einer thermischen Raumsimulation anhand eines Beispiels angewandt, um die operative Raumtemperatur von quergelüfteten Einfamilienhäusern zu berechnen (siehe Abschnitt 4.4).

Im Unterkapitel 4.3.1 werden Beispiele für sehr gute, gute und schlechte Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen anhand von Einzelraumsituationen und Querlüftungssituationen vorgestellt. Aus dem Vergleich der Tracergaskonzentrationskurven wurden die Luftvolumenströme rückgerechnet.

In 4.3.2 werden die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Tracergaskonzentrationen zusammengefasst und die Schlüsse aus dem Validierungsprozess gezogen.

#### **4.3.1 Vergleich zwischen berechneter und gemessener Tracergaskonzentration - Beispiele für gute und schlechte Übereinstimmungen**

Im folgenden Abschnitt wird der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Tracergaskurven anhand der in Tab. 8 vorgestellten Einzelraumsituationen gezeigt. Zur jeweiligen Situationen wird anhand eines Beispiels die graphische Übereinstimmung illustriert.

**Tab. 8: Übersicht über die verglichenen Situationen zwischen gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen bei der Einzelraumlüftung, graphisches Beispiel einer Übereinstimmung**

Einzelraum			Beispiel
EG gekippt			
ohne Insektengitter	mit Insektengitter	mit Pollenschutzgitter	16W
EG geöffnet			
ohne Insektengitter	mit Insektengitter	mit Pollenschutzgitter	10W
OG geöffnet			37W
ohne Insektengitter	mit Insektengitter		

In Tab. 9 wird analog dazu der Vergleich und das Beispiel für die Querlüftungssituationen gezeigt.

**Tab. 9: Übersicht über die verglichenen Situationen zwischen gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen bei der Querlüftung, graphisches Beispiel einer Übereinstimmung**

Querlüftung		Beispiel
2 Zonen	EG gekippt – OG geöffnet	23S
2 Zonen	EG geöffnet – OG geöffnet	20S
4 Zonen	EG geöffnet – OG geöffnet	41W

Die Bilder der jeweiligen Beispiele für Einzelraumdurchströmungen zeigen die berechneten Tracergaskonzentrationen als **rot** strichlierte Linie und die gemessenen Tracergaskonzentrationen als dünne **blau** strichlierte Linie. Bei den gemessenen Konzentrationen wird zusätzlich die Meßungenauigkeit der Tracergassensoren an (siehe 4.1.1, Sensorungenauigkeit) als blaue dicke Linie im Abstand zum Messwert dargestellt. Ebenfalls angegeben wird die Abweichung des 2-fachen Meßfehlers (95% Fraktile) als blau dünne Kurve jeweils neben der einfachen Messungenauigkeit. Bei den Querlüftungssituationen wurde das Farbschema von berechneter und gemessener Tracergaskonzentration sinngemäß angepasst.

Liegen die berechneten Werte innerhalb der einfachen Meßungenauigkeit so wurde die Übereinstimmung als „**Sehr gut**“ bewertet. Liegen die berechneten Werte innerhalb des 2-fachen Meßfehlers so wird die Übereinstimmung als „**Gut**“ bezeichnet. Liegen die berechneten Werte außerhalb beider Berandungen so wird die Übereinstimmung als „**Schlecht**“ gewertet.

Zu den vorgestellten Ergebnissen je nach Lüftungssituation sind die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom, die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft und die Windgeschwindigkeit angegeben.

Bei den Windgeschwindigkeiten ist die Streuung Plus/Minus zum Mittelwert angegeben. Der Wert in Klammer stellt der maximalen Windgeschwindigkeit während der Messung dar.

Im Feld „Anströmung“ ist die Anströmrichtung (Windzugewandt [„Zugew.“], Windabgewandt [„Abgew.“] und Windparallel [„Par“]) der Öffnungen angegeben. Zusätzlich ist die Änderung der Anströmrichtung während der Messung angegeben. Da die Windrichtung während der Messung nicht konstant war, wurde eine mittlere Windrichtung während der Messung berechnet. Beträgt die Änderung der Windrichtung vom Mittelwert während der Messung weniger als  $\pm 45^\circ$ , so wird die Anströmrichtung als „Gleich“ bzw. [„Gl“] bezeichnet. Ändert sich die Windrichtung während der Messung um mehr als  $\pm 45^\circ$  vom Mittelwert, so wird die Anströmrichtung als „Ungleich“ bzw. [„Ungl.“] bezeichnet.

In den Ergebnistabellen ist angegeben zu welcher Jahreszeit die Messung gemacht worden ist. Ebenfalls festgehalten wurde, ob die Messung unter natürlichen Lüftungsbedingungen oder durchmischten Bedingungen gemacht wurde (siehe 4.1.1).

#### **4.3.1.1 Erdgeschossfenster-gekippt**

In der Situation „Erdgeschoßfenster gekippt“ wurden insgesamt 11 Messungen durchgeführt. Bei 7 Messungen war die Übereinstimmung zwischen Tracergasmessung und Berechnung „sehr gut“ bzw. „gut“.

4 Messungen wurden ohne Insektengitter, 5 Messungen mit Insektengitter und 2 Messungen mit Pollenschutzgitter durchgeführt.

##### **– EG-gekippt ohne Insektenschutz - Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung**

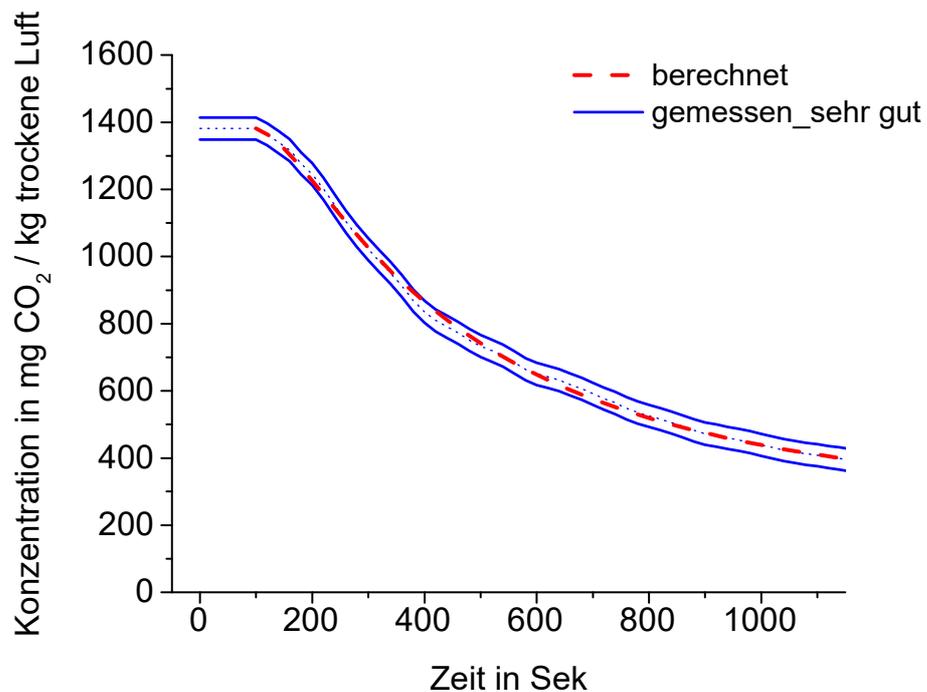
Abb. 37 zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung der natürlich belüfteten Messung „16W“ im Winterhalbjahr.

Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 1,94 m/s mit einer Streuung von  $\pm 0,23$  m/s. Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 2,4 m/s, unterhalb des Grenzwertes von 5 m/s bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen wurde. Das gekippte Erdgeschoßfenster war während der Messung dem Wind zugewandt und die Anströmrichtung war gleich.

Die Abnahme der Tracergaskonzentration während der Meßdauer von 32 Minuten und 40 Sekunden war gleichmäßig fallend.

Die berechnete Tracergaskonzentration der dargestellten Situation lag während der gesamten Messung innerhalb der einfachen Meßgenauigkeit. Die Übereinstimmung zwischen den Tracergaskonzentrationen kann daher als „Sehr gut“ eingestuft werden.

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 56 in 7.1.1) dargestellt.



**Abb. 37: Einzelraumdurchströmung im Erdgeschoss bei gekipptem Fenster (16W). Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration.**

– **Ohne Gitter**

In den Tabellen Tab. 10 und Tab. 11 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster gekippt, ohne Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 10 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 4 Messungen zeigte eine Messung eine schlechte Übereinstimmung. Dabei lag die Windgeschwindigkeit während der Messung im Bereich des festgelegten Maximalwerts von 5 m/s bzw. auch kurzzeitig darüber womit der Windeinfluß nicht vernachlässigt werden kann. Zusätzlich gab es starke Änderungen in der Anströmrichtung.

Es fällt auch bei den Messungen auf, dass die ungleichmäßigen Anströmbedingungen bei durchmischten Verhältnissen eine gute Übereinstimmung und bei den natürlich belüfteten Verhältnissen eine schlechte Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung zeigen.

**Tab. 10: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
14W	Nein	$2,58 \pm 0,50$ (3,7)	Gl. Abgewandt	sehr gut
3S	Nein	$4,43 \pm 0,48$ (5,9)	Ungl. Abgew.	schlecht
16W	Nein	$1,94 \pm 0,23$ (2,4)	Gl. Abgewandt	sehr gut
15W	Ja	$2,49 \pm 0,44$ (3,2)	Gl. Abgewandt	gut

Tab. 11 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer gekippten Fenstertüre im Erdgeschoß liegt zwischen 101 und 149 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 11,47 und 16,81 K.

Für die Versuche mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus der Temperaturdifferenz von 8,85 K ein Luftvolumenstrom von 78 m<sup>3</sup> /h berechnet. Dieser Wert ist als Abschätzung zu betrachten.

Bei der Gegenüberstellung zwischen mittlerem Volumenstrom und Temperaturdifferenz und Jahreszeit konnte kein Einfluss der Jahreszeit auf die Durchströmung beobachtet werden.

**Tab. 11: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	$V'$ in m <sup>3</sup> / h	$\Delta T$ in K	Durchmischt	Jahreszeit
14W	101	11,47	Nein	Winter
3S	78	8,85	Nein	Sommer
16W	149	16,81	Nein	Winter
15W	120	13,53	Ja	Winter

– **Mit Insektenschutz**

In den Tabellen Tab. 12 und Tab. 13 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster gekippt, mit Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 12 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 5 Messungen haben zwei Messungen eine schlechte Übereinstimmung. Bei der ersten Messung mit schlechter Übereinstimmung (6W) befanden sich die Randbedingungen Windgeschwindigkeit und Windrichtung im idealen Bereich. Bei der zweiten Messung mit schlechter Übereinstimmung (7S) war die Anströmrichtung während der Messung ungleich.

Generell kann festgehalten werden, dass der Vergleich zwischen Messungen unter durchmischten Bedingungen eine bessere Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Tracergaskonzentration zeigt als Messungen unter natürlichen Bedingungen. Es fällt auch auf, dass die ungleiche Anströmrichtung bei den durchmischten Messungen eine gute Übereinstimmung und bei den natürlich belüfteten Messungen eine schlechte Übereinstimmung zeigen.

**Tab. 12: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	v <sub>Wind</sub> in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
6W	Nein	2,01 ± 0,53 (2,9)	Gl. Zugewandt	schlecht
7S	Nein	2,06 ± 0,83 (3,3)	Ungl. Abgew.	schlecht
3W	Ja	0,73 ± 0,37 (1,4)	Gl. Parallel	sehr gut
6S	Ja	0,58 ± 0,40 (1,5)	Ungl. Abgew.	gut
7W	Ja	1,82 ± 0,54 (3,1)	Gl. Zugewandt	sehr gut

Tab. 13 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer gekippten Fenstertüre im Erdgeschoß mit Insektenschutzgitter liegt zwischen 69 und 98 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 8,17 bis 11,75 K. Für die Versuche mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus den Temperaturdifferenzen von 5,66 bis 8,53 K ein Luftvolumenstrom von 47 bis 72 m<sup>3</sup> /h berechnet. Diese Werte sind als Abschätzung zu sehen.

Bei der Gegenüberstellung zwischen mittlerem Volumenstrom und Temperaturdifferenz und Jahreszeit konnte kein Einfluss der Jahreszeit auf die Durchströmung beobachtet werden.

**Tab. 13: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmischt	Jahreszeit
6W	72	8,53	Nein	Winter
7S	47	5,66	Nein	Sommer
3W	69	8,17	Ja	Winter
6S	98	11,75	Ja	Sommer
7W	73	8,66	Ja	Winter

– **Mit Pollenschutz**

In den Tabellen Tab. 14 und Tab. 15 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster gekippt, mit Pollenschutzgitter zusammengestellt.

Tab. 14 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 2 dokumentierten Messungen ergab eine Messung eine sehr gute und die andere Messung eine schlechte Übereinstimmung.

Bei beiden Messungen lag die Windgeschwindigkeit unter 5 m/s und kann daher als vernachlässigbar angenommen werden. Bei beiden Messungen war die Anströmrichtung während der Messung ungleich.

Bei dem natürlich belüfteten Versuch (16S) zeigte die ungleiche Anströmrichtung während der Messung eine schlechte Übereinstimmung mit der Berechnung.

Damit kann festgehalten werden, dass der Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen unter durchmischten Bedingungen eine bessere Übereinstimmung zeigt als unter natürlichen Bedingungen. Es fällt auf, dass die ungleiche Anströmrichtung bei der durchmischten Messung eine sehr gute Übereinstimmung und bei der natürlich belüfteten Messung eine schlechte Übereinstimmung zeigt.

**Tab. 14: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	v <sub>Wind</sub> in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
16S	Nein	1,40 ± 0,90 (4,2)	Ungl. Abgew.	schlecht
15S	Ja	1,30 ± 0,66 (2,6)	Ungl. Zugew.	sehr gut

Tab. 15 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten

wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer gekippten Fenstertüre im Erdgeschoß mit Pollenschutzgitter beträgt 45 m<sup>3</sup>/h bei einer Temperaturdifferenz von 9,85 K.

Bei dem Versuch mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung liegt der Luftvolumenstrom bei 26 m<sup>3</sup>/h bei einer Temperaturdifferenz von 5,86 K. Dieser Wert ist als Abschätzung zu betrachten.

**Tab. 15: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmischt	Jahreszeit
16S	26	5,86	Nein	Sommer
15S	45	9,85	Ja	Sommer

#### **4.3.1.2 Erdgeschossfenster-geöffnet**

In der Situation „Erdgeschoßfenster geöffnet“ wurden insgesamt 15 Messungen durchgeführt. Bei 10 Messungen war die Übereinstimmung zwischen Tracergasmessung und Berechnung „gut“ bzw. „sehr gut“.

6 Messungen wurden ohne Insektengitter, 7 Messungen mit Insektengitter und 2 Messungen mit Pollenschutzgitter durchgeführt.

##### **– EG-geöffnet ohne Insektenschutz - Beispiel für eine gute Übereinstimmung**

Abb. 38 zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung der Messung „10W“ unter durchmischten Bedingungen im Winterhalbjahr.

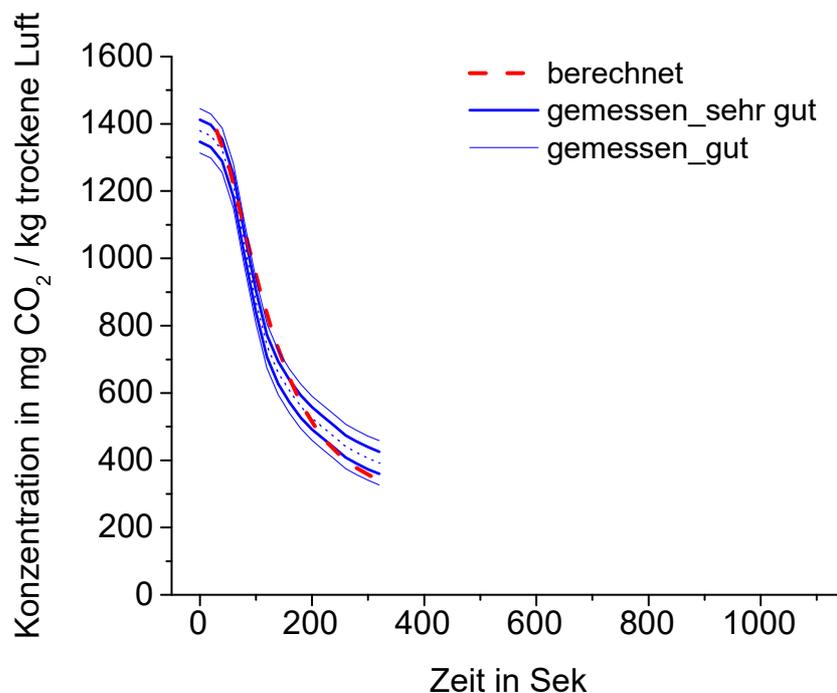
Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 0,61 m/s mit einer Streuung von ± 0,39. Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 1,4 m/s, unterhalb des Grenzwertes von 5 m/s, bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen wurde. Die Anströmrichtung während der Messung war ungleich. Das geöffnete Erdgeschoßfenster wurde am Beginn der Messung windparallel angeströmt und war während der Messung dem Wind zugewandt. Am Ende der Messung war die Anströmung des Fensters an der windabgewandten Seite.

Die Tracergaskonzentration sank während der Meßdauer von 5 min und 20 Sekunden rasch ab.

Die berechnete Tracergaskonzentration lag während der Meßdauer innerhalb der doppelten Sensorungenauigkeit. Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen

Tracergaskonzentrationen und den zugehörigen Berechnungen kann daher entsprechend der festgelegten Konvention als „Gut“ eingestuft werden.

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 72 in 7.2.1) dargestellt.



**Abb. 38: Einzelraumdurchströmung EG mit geöffnetem Fenster (10W). Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration.**

– **Ohne Gitter**

In den Tabellen Tab. 16 und Tab. 17 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster geöffnet, ohne Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 16 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 6 Messungen haben 2 Messungen eine schlechte Übereinstimmung. Bei beiden Messungen (11W und 12 W) waren die Randbedingungen Windgeschwindigkeit und Windrichtung im idealen Bereich. Jeweils eine Messung fand unter natürlicher Belüftung und die andere unter durchmischten Bedingungen statt.

Auffällig ist weiters, dass die Randbedingungen Windgeschwindigkeit bei 2 Messungen mit guter bzw. sehr guter Übereinstimmung vereinzelt über dem Grenzwert von 5 m/s liegt, an dem laut Annahme (siehe 4.1) der Windeinfluss vernachlässigt werden kann. Es fällt weiters auf, dass eine ungleiche Anströmrichtung bei windparalleler Anströmung des Fensters zu einer Messung mit guter Übereinstimmung führt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Großteil der Messungen eine gute bzw. sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Tracergaskonzentration zeigten, unabhängig davon, ob sie unter natürlich belüfteten oder unter durchmischten Bedingungen gemessen wurden.

**Tab. 16: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
13W	Nein	$2,97 \pm 0,28$ (3,5)	Gl. Abgewandt	gut
5S	Nein	$3,81 \pm 0,99$ (6,1)	Gl. Zugewandt	gut
11W	Nein	$1,03 \pm 0,39$ (1,7)	Gl. Parallel	schlecht
12W	Ja	$3,45 \pm 0,39$ (4,1)	Gl. Zugewandt	schlecht
4S	Ja	$4,25 \pm 0,78$ (5,9)	Gl. Zugewandt	sehr gut
10W	Ja	$0,61 \pm 0,39$ (1,4)	Ungl. Parallel	gut

Tab. 17 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer geöffneten Fenstertüre im Erdgeschoß ohne Insektengitter liegt zwischen 581 und 1066 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 2,65 bis 8,95 K.

Für Versuche mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus der Temperaturdifferenz von 8,89 bis 8,94 K ein Luftvolumenstrom von 1050 bis 1066 m<sup>3</sup> / h berechnet. Diese Werte stellen Anhaltspunkte dar.

Bei der Gegenüberstellung zwischen mittlerem Volumenstrom und Temperaturdifferenz und Jahreszeit konnte kein Einfluss der Jahreszeit auf die Durchströmung beobachtet werden.

**Tab. 17: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmischt	Jahreszeit
13W	1066	8,95	Nein	Winter
5S	581	2,65	Nein	Sommer
11W	1050	8,89	Nein	Winter
12W	1066	8,94	Ja	Winter
4S	890	6,12	Ja	Sommer
10W	984	7,70	Ja	Winter

– **Mit Insektenschutz**

In den Tabellen Tab. 18 und Tab. 19 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster geöffnet, mit Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 18 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 7 Versuchen haben drei Versuche eine schlechte Übereinstimmung. Bei einer Messung (9aS) lag die Windgeschwindigkeit über dem Grenzwert von 5 m/s, womit der Windeinfluss laut Annahme (siehe 4.1) nicht vernachlässigt werden kann. Bei den anderen beiden Messungen (5bW, 9bS) mit schlechter Übereinstimmung lag die Windgeschwindigkeit unter dem Grenzwert von 5 m/s. Bei allen 3 Messungen mit schlechter Übereinstimmung war die Anströmrichtung während der Messung gleichmäßig.

Es fällt auf, dass alle Versuche unter durchmischten Bedingungen eine gute Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Tracergaskonzentration zeigen, während bei den Messungen unter natürlich belüfteten Bedingungen nur eine Messung eine gute Übereinstimmung zeigt.

**Tab. 18: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	v <sub>Wind</sub> in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
5bW	Nein	0,63 ± 0,26 (0,9)	Gl. Parallel	schlecht
9aS	Nein	4,26 ± 0,83 (6,1)	Gl. Zugewandt	schlecht
9bS	Nein	3,28 ± 0,37 (3,9)	Gl. Abgewandt	schlecht
9W	Nein	3,53 ± 0,27 (4,0)	Gl. Zugewandt	gut
5aW	Ja	0,77 ± 0,19 (1,2)	Gl. Parallel	gut
8S	Ja	3,10 ± 0,59 (4,2)	Gl. Abgewandt	gut
8W	Ja	3,24 ± 0,57 (3,9)	Gl. Zugewandt	gut

Tab. 19 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer geöffneten Fenstertüre im Erdgeschoß mit Insektenschutzgitter liegt zwischen 337 und 692 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 2,00 bis 8,65 K.

Für die Versuche mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus den Temperaturdifferenzen von 2,67 und 5,77 K ein Luftvolumenstrom von 387 und 564 m<sup>3</sup> / h berechnet. Diese Werte stellen Anhaltspunkte dar.

Bei der Gegenüberstellung zwischen mittlerem Volumenstrom und Temperaturdifferenz und Jahreszeit konnte kein Einfluss der Jahreszeit auf die Durchströmung beobachtet werden.

**Tab. 19: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	$\Delta T$ in K	Durchmischt	Jahreszeit
5bW	564	5,77	Nein	Winter
9aS	387	2,67	Nein	Sommer
9bS	405	2,89	Nein	Sommer
9W	672	8,20	Nein	Winter
5aW	598	6,47	Ja	Winter
8S	337	2,00	Ja	Sommer
8W	692	8,65	Ja	Winter

– **Mit Pollenschutz**

In den Tabellen Tab. 20 und Tab. 21 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Erdgeschoßfenster geöffnet, mit Pollenschutzgitter zusammengestellt.

Tab. 20 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 2 Versuchen zeigen beide Versuche eine sehr gute Übereinstimmung. Jeweils eine Messung fand unter natürlichen und unter durchmischten Bedingungen statt. Bei beiden Messungen lag die Windgeschwindigkeit unter 5 m/s und kann daher als vernachlässigbar angenommen werden. Bei einer Messung war die Anströmrichtung während der Messung ungleich.

**Tab. 20: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	v <sub>Wind</sub> in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
18S	Nein	1,33 ± 0,66 (3,4)	Ungl. Parallel	sehr gut
17S	Ja	1,52 ± 0,69 (3,1)	Gl. Parallel	sehr gut

Tab. 21 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer geöffneten Fenstertüre im Erdgeschoß mit Pollenschutzgitter beträgt zwischen 22 und 55 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 1,88 bis 6,10 K.

**Tab. 21: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmischt	Jahreszeit
18S	22	1,88	Nein	Sommer
17S	55	6,10	Ja	Sommer

#### **4.3.1.3 Obergeschoß-geöffnet**

In der Situation „Obergeschoßfenster geöffnet“ wurden insgesamt 12 Messungen durchgeführt. Bei 8 Messungen war die Übereinstimmung zwischen Tracergasmessung und Berechnung „sehr gut“ bzw. „gut“.

8 Messungen wurden ohne Insektengitter und 4 Messungen mit Insektengitter durchgeführt.

– **OG-geöffnet ohne Insektenschutz - Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung**

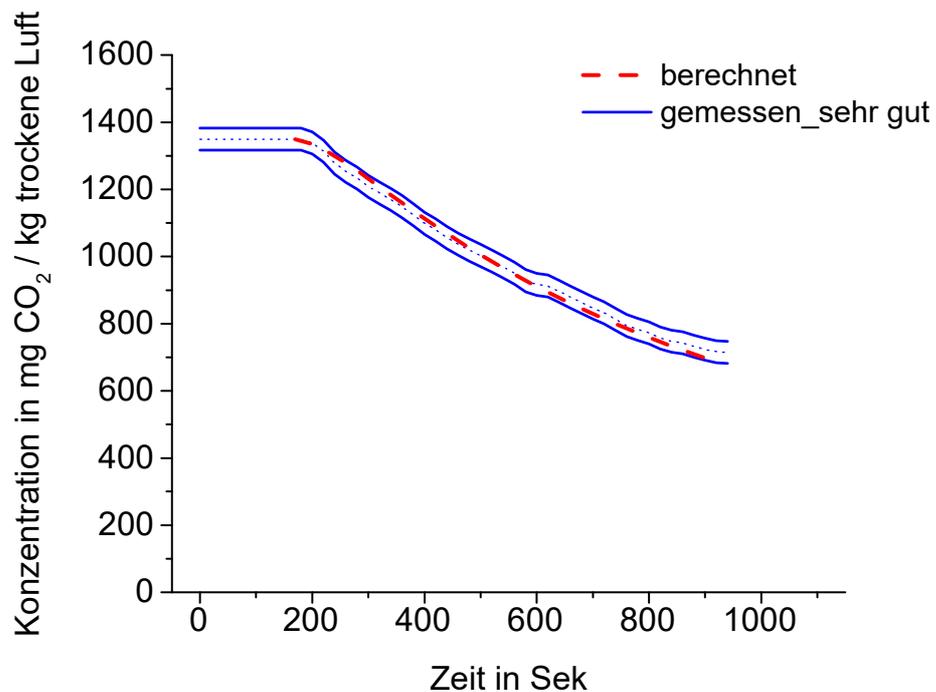
Abb. 39 zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung der Messung „37W“ unter durchmischten Bedingungen im Winterhalbjahr.

Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 1,89 m/s mit einer Streuung von ± 0,43. Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 2,6 m/s und damit unterhalb des Grenzwertes von 5 m/s bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen wurde. Die Anströmrichtung während der Messung war gleich. Das geöffnete Obergeschoßfenster wurde während der Messung an der windabgewandten Seite sowie windparallel angeströmt.

Die Abnahme der Tracergaskonzentration während der Meßdauer von 15 Minuten und 40 Sekunden war gleichmäßig fallend.

Die berechnete Tracergaskonzentration der dargestellten Situation lag während der gesamten Messung innerhalb der einfachen Meßgenauigkeit. Die Übereinstimmung zwischen den Tracergaskonzentrationen kann daher als „Sehr gut“ eingestuft werden.

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 89 in 7.3.1) dargestellt.



**Abb. 39: Einzelraumdurchströmung OG mit geöffnetem Fenster (37W). Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration.**

– **Ohne Gitter**

In den Tabellen Tab. 22 und Tab. 23 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Obergeschoßfenster geöffnet, ohne Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 22 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Von den 8 Versuchen zeigen alle Versuche eine gute bzw. sehr gute Übereinstimmung. Bei allen Messungen lag die Windgeschwindigkeit unter 5 m/s und kann daher als vernachlässigbar angenommen werden. Bei einer Messung unter durchmischten Bedingungen (13S) und zwei Messungen unter natürlich belüfteten Bedingungen (12S und 14S) war die Anströmrichtung während der Messung ungleich.

Bei den Versuchen unter natürlichen Bedingungen lässt sich ein Zusammenhang zwischen gleicher Anströmrichtung und sehr guter Übereinstimmung sowie ungleicher Anströmrichtung und guter Übereinstimmung beobachten. Bei den durchmischten Messungen konnte dieser Zusammenhang nicht beobachtet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die ungleiche Anströmung bei natürlich belüfteten Messungen einen Einfluss zeigt. Generell kann festgehalten werden, dass das Modell diese Situation in verschiedenen Varianten gut abbildet.

**Tab. 22: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
40W	Nein	$2,34 \pm 0,38$ (3,2)	Gl. Abgewandt	sehr gut
12S	Nein	$1,60 \pm 0,44$ (2,4)	Ungl. Parallel	gut
14S	Nein	$1,33 \pm 0,66$ (3,4)	Ungl. Zugew.	gut
38W	Nein	$1,89 \pm 0,43$ (2,6)	Gl. Abgewandt	sehr gut
39W	Ja	$1,25 \pm 0,26$ (1,8)	Gl. Parallel	sehr gut
11S	Ja	$1,61 \pm 0,65$ (3,1)	Gl. Zugewandt	sehr gut
13S	Ja	$1,30 \pm 0,66$ (2,6)	Ungl. Parallel	sehr gut
37W	Ja	$1,89 \pm 0,43$ (2,6)	Gl. Abgewandt	sehr gut

Tab. 23 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einem geöffneten Dachflächenfenster im Obergeschoß liegt zwischen  $18$  und  $119 \text{ m}^3 / \text{h}$  bei einer Temperaturdifferenz von  $0,69$  bis  $14,31 \text{ K}$ .

Bei der Gegenüberstellung zwischen mittlerem Volumenstrom und Temperaturdifferenz und Jahreszeit konnte kein Einfluss der Jahreszeit auf die Durchströmung beobachtet werden.

**Tab. 23: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmischt	Jahreszeit
40W	119	14,31	Nein	Winter
12S	87	7,56	Nein	Sommer
14S	18	0,69	Nein	Sommer
38W	102	10,71	Nein	Winter
39W	109	12,02	Ja	Winter
11S	68	4,62	Ja	Sommer
13S	90	8,04	Ja	Sommer
37W	102	10,71	Ja	Winter

– **mit Insektenschutz**

In den Tabellen Tab. 24 und Tab. 25 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Situation Obergeschoßfenster geöffnet, mit Insektengitter zusammengestellt.

Tab. 24 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Übereinstimmung der Konzentrationskurven.

Alle 4 Versuche haben eine schlechte Übereinstimmung. Bei allen Messungen mit schlechter Übereinstimmung lag die Windgeschwindigkeit über 5 m/s und kann daher nicht als vernachlässigbar angenommen werden. Die Anströmrichtung war bei allen Versuchen gleich.

Bei detaillierter Betrachtung aller Tracergaskonzentrationsabfallkurven im Anhang (siehe 7.3.2) zeigt sich, dass die berechneten Kurven weniger stark abfallen als die gemessenen Kurven. Es kann daher ausgegangen werden, dass die hohe Windgeschwindigkeit den Abklingvorgang beeinflusst.

Wird der Einfluss des Windes in der Berechnung mitberücksichtigt, kann eine Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung gezeigt werden.

**Tab. 24: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	v <sub>Wind</sub> in m/s	Anströmung	Übereinstimmung
21W	Nein	5,72 ± 0,75 (7,1)	Gl. Parallel	schlecht
19W	Nein	5,36 ± 0,66 (6,5)	Gl. Parallel	schlecht
20W	Ja	5,00 ± 0,64 (5,8)	Gl. Parallel	schlecht
18W	Ja	6,33 ± 0,58 (7,4)	Gl. Parallel	schlecht

Tab. 25 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten

wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Für die Versuche mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus den Temperaturdifferenzen von 6,99 bis 10,26 K ein Luftvolumenstrom von 73 bis 89 m<sup>3</sup> /h berechnet. Diese Werte sind als grobe Näherung zu sehen.

**Tab. 25: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	$\Delta T$ in K	Durchmischt	Jahreszeit
21W	73	6,99	Nein	Winter
19W	89	10,26	Nein	Winter
20W	88	9,98	Ja	Winter
18W	84	9,25	Ja	Winter

#### 4.3.1.4 Erdgeschoß gekippt – Obergeschoß geöffnet (Querlüftung 2 Zonen)

Im Querlüftungs-Szenario 1 (R1-R4) wurden in der Situation „Erdgeschoßfenster gekippt – Obergeschoßfenster geöffnet“ insgesamt 2 Messungen durchgeführt.

Bei einer Messung konnte in beiden Zonen eine „gute“ Übereinstimmung beobachtet werden.

- ***Erdgeschoßfenster gekippt – Obergeschoßfenster geöffnet (2 Zonen) - Beispiel für eine sehr gute bzw. gute Übereinstimmung***

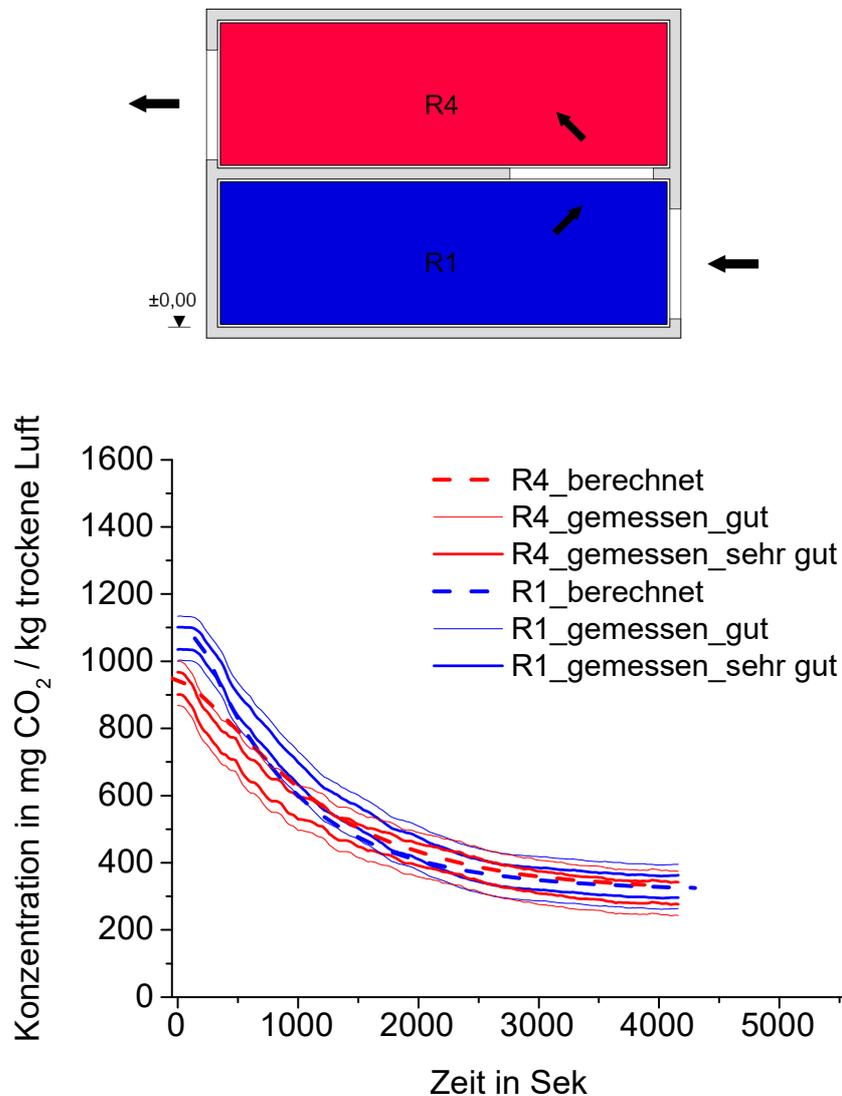
Abb. 40 zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung der Messung „23S“ unter durchmischten Bedingungen im Sommerhalbjahr. Die blauen Kurven zeigen den Verlauf der berechneten und gemessenen Tracergaskonzentrationen für die Zone R1. Die roten Linien stellen die gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen für die Zone R4 dar.

Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 1,57 m/s mit einer Streuung von  $\pm 0,51$ . Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 2,7 m/s unterhalb des Grenzwertes von 5 m/s, bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen (siehe 4.1) wurde. Die Anströmung der Fenster während der Messung erfolgte ungleichmäßig aus westlicher bzw. südwestlicher Richtung. Die Anströmung des Erdgeschoßfensters fand während der Messung größtenteils an der windabgewandten Seite statt. Das Obergeschoßfenster wurde hauptsächlich an der windzugewandten Seite angeströmt. Kurzzeitig wurden beide Fenster windparallel angeströmt.

Die Abnahme der Tracergaskonzentration während der gesamten Meßdauer von 69 Minuten und 20 Sekunden war gleichmäßig fallend.

Die berechnete Tracergaskonzentration während der Messung lag für beide Zonen innerhalb der doppelten Meßgenauigkeit („gute Übereinstimmung“).

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 94 in 7.4) dargestellt.



**Abb. 40:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit gekipptem Fenster im EG und geöffnetem Fenster im OG unter durchmischten Bedingungen (23S). Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und der roten Kurve [Zone 2] (Bild unten). Im oberen Bild sind die durchströmten Zonen schematisch dargestellt mit Bezug zu den Tracergaskonzentrationskurven.

#### – Vergleich der Übereinstimmung

In den Tabellen Tab. 26 und Tab. 27 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Querlüftungssituation durch 2 Zonen mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster zusammengestellt.

Tab. 26 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit und der Anströmrichtung jeweils für die Einströmöffnung (E) und die Ausströmöffnung (A). Aus den letzten beiden Spalten kann die Übereinstimmung der Konzentrationskurven für die jeweilige Zone abgelesen werden.

Von den 2 Messungen gab es bei einer Messung in einer Zone eine schlechte Übereinstimmung, während die zweite zugehörige Zone eine gute Übereinstimmung aufgewiesen hat. Die Anströmrichtung während der Messung änderte sich an allen Öffnungen stark. Die Windgeschwindigkeit während der Messungen lag unter 5 m/s.

Beim Vergleich zwischen der Messung unter natürlichen Bedingungen und der Messung unter durchmischten Bedingungen fällt auf, dass die Messung unter durchmischten Bedingungen eine bessere Übereinstimmung in allen Zonen zeigt, als die Messung unter natürlichen Bedingungen.

**Tab. 26: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anströmung	Vergleich Mess/Sim Z1	Vergleich Mess/Sim Z2
23S	Ja	1,57 ± 0,51 (2,7)	Gl. Abgewandt (E)	gut	gut
			Gl. Zugewandt (A)		
24S	Nein	1,44 ± 0,46 (2,6)	Ungl. Parallel (E)	gut	schlecht
			Ungl. Parallel (A)		

– **Herauslesen der Luftvolumenströme**

Tab. 27 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte mittlere Luftvolumenstrom bei einer Querlüftungssituation durch 2 Zonen mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster hat einen Wert von 563 m<sup>3</sup> / h bei einer mittleren Temperaturdifferenz von 7,12 K ergeben.

Bei der Messung mit der schlechten Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus der Temperaturdifferenz von 4,83 K ein Luftvolumenstrom von 422 m<sup>3</sup>/h berechnet. Dieser Wert stellt einen Anhaltspunkt dar.

Tab. 27: Messergebnisse Luftvolumenstrom

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmisch	Jahreszeit
23S	563	7,12	Ja	Sommer
24S	422	4,83	Nein	Sommer

#### 4.3.1.5 Erdgeschoß geöffnet – Obergeschoß geöffnet (Querlüftung 2 Zonen)

Im Querlüftungs-Szenario 1 (R1-R4) wurden in der Situation „Erdgeschoßfenster geöffnet – Obergeschoßfenster geöffnet“ insgesamt 6 Messungen durchgeführt.

Bei zwei Messungen konnten in beiden Zonen eine „gute“ bzw. „sehr gute“ Übereinstimmung beobachtet werden.

- **EG geöffnet – OG geöffnet (2 Zonen), Beispiel für eine sehr gute bzw. gute Übereinstimmung**

Abb. 41 zeigt ein Beispiel für eine sehr gute bzw. gute Übereinstimmung der Messung „20S“ unter natürlich belüfteten Bedingungen im Sommerhalbjahr. Die blauen Kurven zeigen den Verlauf der berechneten und gemessenen Tracergaskonzentrationen für die Zone R1. Die roten Linien stellen die gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationen für die Zone R4 dar.

Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 1,34 m/s mit einer Streuung von ± 0,38. Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 2,0 m/s und damit unter dem Grenzwert von 5 m/s, bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen wurde. Die Anströmung der Fenster während der Messung erfolgte gleichmäßig aus westlicher Richtung. Dabei befanden sich das Erdgeschoßfenster an der windabgewandten Seite und das Obergeschoßfenster an der windzugewandten Seite.

Die Abnahme der Tracergaskonzentration während der gesamten Meßdauer von 38 Minuten und 40 Sekunden war abfallend bzw. stark abfallend.

Die berechnete Tracergaskonzentration während der Messung lag für die Zone R1 innerhalb der einfachen Meßungenauigkeit („sehr gute Übereinstimmung“) und für die Zone R4 innerhalb der doppelten Meßungenauigkeit („gute Übereinstimmung“).

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 100 in 7.5) dargestellt.

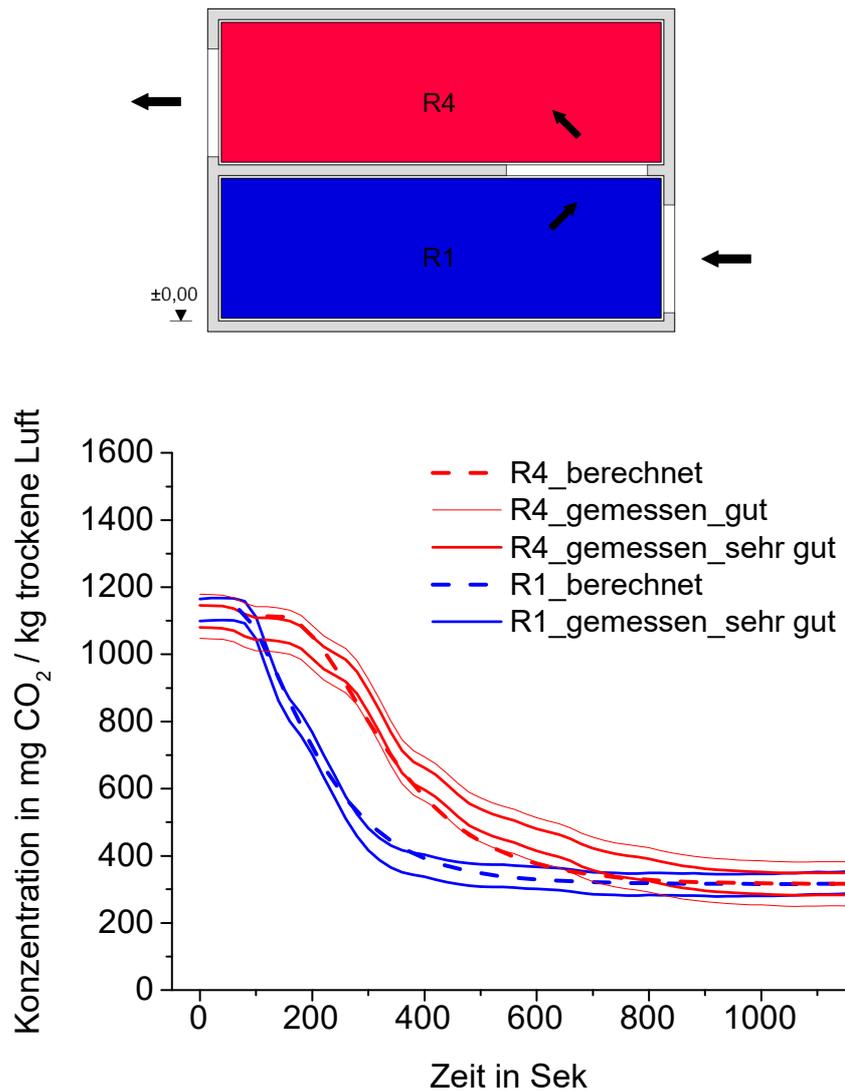


Abb. 41: Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im EG und OG unter natürlichen Bedingungen (20S). Beispiel für eine sehr guten bzw. guten Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und der roten Kurve [Zone 2] (Bild unten). Im oberen Bild sind die durchströmten Zonen schematisch dargestellt mit Bezug zu den Tracergaskonzentrationskurven.

#### – Vergleich der Übereinstimmung

In den Tabellen Tab. 28 und Tab. 29 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Querlüftungssituation durch 2 Zonen mit geöffnetem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster zusammengestellt.

Tab. 28 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt = natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit und der Anströmrichtung jeweils für die Einströmöffnung (E) und die Ausströmöffnung (A). Aus den letzten beiden Spalten kann die Übereinstimmung der Konzentrationskurven für die jeweilige Zone abgelesen werden.

Von den 6 Messungen gab es bei 4 Messungen in jeweils einer Zone eine schlechte Übereinstimmung, wobei die dazugehörige zweite Zone eine gute bzw. sehr gute Übereinstimmung gezeigt hat. Auffällig ist, dass bei 3 Messungen die schlechte Übereinstimmung in der Zone R1 sichtbar ist und bei der 4. Messung in der Zone R4. Die ungleiche Anströmrichtung (in der Messung 19S) zeigt keine Auswirkungen auf die Übereinstimmung auf die Messungen unter durchmischten Bedingungen. Die Windgeschwindigkeit lag während aller Messungen unter 5 m/s.

Beim Vergleich zwischen den Messungen unter natürlichen Bedingungen und den Messungen unter durchmischten Bedingungen fällt auf, dass die Messungen unter natürlichen Bedingungen eine bessere Übereinstimmung von beiden Zonen zeigen.

**Tab. 28: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bezeichnung	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anströmung	Vergleich Mess/Sim Z1	Vergleich Mess/Sim Z2
50W	Nein	1,34 ± 0,33 (1,7)	Gl. Parallel (E)	gut	gut
			Gl. Parallel (A)		
19S	Ja	1,44 ± 0,46 (2,6)	Ungl. Abgew. (E)	schlecht	gut
			Ungl. Zugew. (A)		
51W	Ja	1,13 ± 0,09 (1,4)	Gl. Parallel (E)	schlecht	gut
			Gl. Parallel (A)		
20S	Nein	1,34 ± 0,38 (2,0)	Gl. Abgewandt (E)	sehr gut	gut
			Gl. Zugewandt (A)		
52W	Nein	1,27 ± 0,34 (1,6)	Gl. Parallel (E)	schlecht	sehr gut
			Gl. Parallel (A)		
49W	Ja	2,94 ± 0,83 (3,9)	Gl. Abgewandt (E)	sehr gut	schlecht
			Gl. Zugewandt (A)		

– **Herauslesen der Luftvolumenströme**

Tab. 29 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außenluft an.

In den letzten beiden Spalten wird gezeigt ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer Querlüftungssituation durch 2 Zonen mit geöffnetem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster liegt zwischen 2556 und 2895 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 6,28 bis 7,30 K.

Bei der Messung mit schlechter Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung wurde aus der Temperaturdifferenz zwischen 6,74 bis 9,90 K ein Luftvolumenstrom von 2789 bis 3257 m<sup>3</sup> / h berechnet. Dieser Wert stellt eine grobe Näherung dar.

**Tab. 29: Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmisch	Jahreszeit
50W	2556	6,28	Nein	Winter
19S	3032	8,24	Ja	Sommer
51W	3257	9,90	Ja	Winter
20S	2895	7,30	Nein	Sommer
52W	3210	9,71	Nein	Winter
49W	2789	6,74	Ja	Winter

#### **4.3.1.6 Erdgeschoß geöffnet – Obergeschoß geöffnet (Querlüftung 4 Zonen)**

Im Querlüftungs-Szenario 2 (R3-R1-R4-R6) wurden in der Situation „Erdgeschoßfenster geöffnet – Obergeschoßfenster geöffnet“ insgesamt 5 Messungen durchgeführt. Eine Messung musste ausgeschieden werden, da die Kurvenverteilung nicht auswertbar waren (siehe Abb. 107). Bei einer Messung war die Übereinstimmung zwischen Tracergasmessung und Berechnung für alle Zonen „sehr gut“ bzw. „gut“.

- ***EG geöffnet – OG geöffnet (4 Zonen), Beispiel für eine sehr gute bzw. gute Übereinstimmung***

Abb. 42 zeigt ein Beispiel für eine sehr gute bzw. gute Übereinstimmung der Messung „41W“ unter durchmischten Bedingungen im Winterhalbjahr. Der Verlauf der berechneten und gemessenen Tracergaskonzentrationen wird für die Zone R3 in blau, für die Zone R1 in rot, für die Zone R1 in grün und für die Zone R6 in orange dargestellt.

Die mittlere Windgeschwindigkeit während der Messung betrug 1,37 m/s mit einer Streuung von ± 0,28. Der Maximalwert der Windgeschwindigkeit lag bei 1,9 m/s und damit unter dem Grenzwert von 5 m/s bei dem der Windeinfluss als vernachlässigbar angenommen wurde. Die Anströmung der Fenster während der Messung erfolgte gleichmäßig aus westlicher Richtung. Dabei befanden sich das Erdgeschoßfenster an der windzugewandten Seite und das Obergeschoßfenster parallel zur Windanströmung.

Die Abnahme der Tracergaskonzentration während der gesamten Meßdauer von 12 Minuten und 40 Sekunden war je nach Zone stark abfallend bzw. gleichmäßig abfallend.

Die berechnete Tracergaskonzentration während der Messung lag für die Zonen R3 und R1 innerhalb der doppelten Meßgenauigkeit („gute Übereinstimmung“) und für die

Zone R4 und R6 innerhalb der einfachen Meßungengenauigkeit („sehr gute Übereinstimmung“).

Die graphische Darstellung von Tracergasmessung und Windverteilung ist im Anhang (siehe Abb. 105 in 7.6) dargestellt.

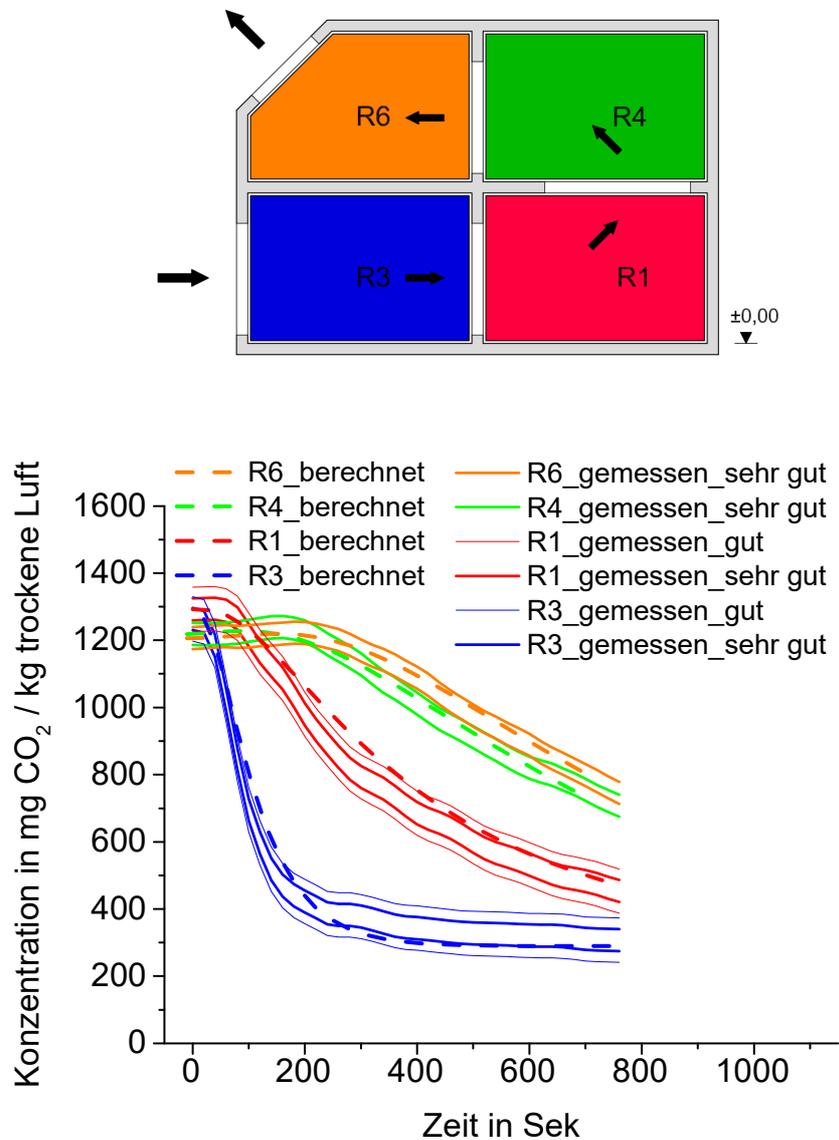


Abb. 42: Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im EG und OG unter durchmischten Bedingungen (41W). Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und der roten Kurve [Zone 2]. Bei der grünen Kurve [Zone 3] und der orangenen Kurve [Zone 4] ist die Übereinstimmung sehr gut (Bild unten). Im oberen Bild sind die durchströmten Zonen schematisch dargestellt mit Bezug zu den Tracergaskonzentrationskurven.

#### – Vergleich der Übereinstimmung

In den Tabellen Tab. 30 und Tab. 31 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Tracergaskonzentrationskurven für die Querlüftungssituation durch 4 Zonen mit geöffnetem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster zusammengestellt.

Tab. 30 zeigt den Zusammenhang zwischen den Messbedingungen (mit Ventilatoren durchmischt, nicht durchmischt=natürlich belüftet), der Windgeschwindigkeit und der Anströmrichtung jeweils für die Einströmöffnung (E) und die Ausströmöffnung (A). Aus den letzten vier Spalten kann die Übereinstimmung der Konzentrationskurven für die jeweilige Zone abgelesen werden.

Von den 5 Messungen war eine Messung nicht auswertbar (siehe Abb. 107 in in 7.6). Von den 4 auswertbaren Messungen gab es bei 2 Messungen in einer Zone eine schlechte Übereinstimmung und bei einer Messungen in drei Zonen eine schlechte Übereinstimmung. Auffällig ist weiters, dass bei einer Messung (42W) mit vernachlässigbaren Windeinfluss (Windgeschwindigkeit  $\leq 5$  m/s) und bei einer Messung unter durchmischten Bedingungen mit nicht vernachlässigbaren Windeinfluss (Windgeschwindigkeit  $\geq 5$  m/s) in der zweiten Zone eine schlechte Übereinstimmung zeigen. Die Windgeschwindigkeit lag bei 2 von 4 brauchbaren Messungen unter 5 m/s.

Beim Vergleich zwischen Messungen unter natürlichen Bedingungen und den Messungen unter durchmischten Bedingungen fällt auf, dass die Messungen unter durchmischten Bedingungen tendenziell eine bessere Übereinstimmung zeigen. Auffällig ist, dass die durchmischten Bedingungen bei einer Messung (43W) mit einer Windgeschwindigkeit  $\geq 5$  m/s und damit einem nicht vernachlässigbaren Windeinfluss, für eine sehr gute Übereinstimmung in drei von vier durchströmten Zonen sorgt.

**Tab. 30: Messergebnisse Wind und Bewertung der Ergebnisse**

Bez	Durchmischt	$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Anström-ung	Vergleich Mess/Sim Z1	Vergleich Mess/Sim Z2	Vergleich Mess/Sim Z3	Vergleich Mess/Sim Z4
43W	Ja	6,64 ± 0,70 (7,9)	Gl. Zugew. (E)	sehr gut	schlecht	sehr gut	sehr gut
			Gl. Parallel (A)				
44W	Nein	4,79 ± 0,31 (5,4)	Gl. Zugew. (E)	sehr gut	schlecht	schlecht	schlecht
			Gl. Parallel (A)				
41W	Ja	1,37 ± 0,28 (1,9)	Gl. Zugew. (E)	gut	gut	sehr gut	sehr gut
			Gl. Parallel (A)				
42W	Nein	1,61 ± 0,47 (2,6)	Gl. Zugew. (E)	gut	schlecht	sehr gut	sehr gut
			Gl. Parallel (A)				
21S	Ja	3,66 ± 0,75 (5,8)	Gl. Abgew. (E)	---	---	---	---
			Gl. Parallel (A)				

– **Herauslesen der Luftvolumenströme**

Tab. 31 gibt in den ersten beiden Spalten die Mittelwerte für den Luftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft an. In den letzten beiden Spalten wird gezeigt, ob die Messung unter durchmischten oder nichtdurchmischten Bedingungen durchgeführt wird und zu welcher Jahreszeit gemessen wurde.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom bei einer Querlüftungssituation durch 4 Zonen mit geöffnetem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster beträgt 1256 m<sup>3</sup> / h bei einer Temperaturdifferenz von 9,46 K.

Bei den Messungen mit den schlechten Übereinstimmungen zwischen Berechnung und Messung wurde aus der Temperaturdifferenz von 9,37 bis 12,51 K ein Luftvolumenstrom zwischen 1533 und 1644 m<sup>3</sup> / h berechnet. Diese Werte stellen einen Anhaltspunkt dar.

**Tab. 31: Erdgeschossfenster geöffnet – Obergeschossfenster-geöffnet, 4 Zonen, Messergebnisse Luftvolumenstrom**

Bezeichnung	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmisch	Jahreszeit
43W	1644	12,51	Ja	Winter
44W	1634	12,49	Nein	Winter
41W	1256	9,46	Ja	Winter
42W	1533	9,37	Nein	Winter
21S	---	---	Ja	Sommer

### 4.3.2 Ergebnis des Validierungsprozesses

Aus den Ergebnissen der verschiedenen Durchströmungssituationen werden Schlüsse für die Anwendbarkeit des Modells gezogen.

Im nachfolgenden Kapitel 4.4 wird das Modell in eine thermische Raumsimulation eingebettet und anhand eines Beispielobjekts angewandt.

Unter 4.3.2.1 werden die gewählten Parameter für die Öffnungen und unter 4.3.2.2 die Darstellung der Ergebniszusammenfassung gezeigt. Die Zusammenfassung der Einzelraumsituationen ist im Abschnitt 4.3.2.3 und die Zusammenfassung der Querlüftungssituationen ist unter 4.3.2.4 zu sehen.

Unter 4.3.2.5 werden die Grenzen des Modells beschrieben und unter 4.3.2.6 sind die Schlüsse aus dem Validierungsprozess zusammengestellt.

#### 4.3.2.1 Gewählte Öffnungsparameter

In 4.2.1 wurden Randbedingungen für die Berechnung der Tracergaskonzentrationen mit dem Rechenmodell angenommen. In der Literatur wurden für den Exponenten ( $b_k$ ), Größenordnungen angegeben. Für laminare Strömung wird  $b_k$  mit 1,0 und für turbulente Strömung mit 0,5 angegeben.

Im Zuge des Validierungsprozesses wurden diese Größenordnungen für die verschiedenen Fensteröffnungssituationen angepasst und als Grundlage für weiterführende Berechnungen eingesetzt.

In Tab. 32 und Tab. 33 sind die geometrischen Eigenschaften der Fensteröffnungen und der Exponent  $b_k$  aufgelistet.

Tab. 32 zeigt die Eigenschaften der Fensteröffnung und die Werte für den Exponenten  $b_k$  für die Einzelraumsituationen „Fenster gekippt“, „Fenster geöffnet“ und „Dachflächenfenster geöffnet“ unter Berücksichtigung von Insekten- und Pollenschutzgittern.

**Tab. 32: Strömungsexponenten, Einzelraumdurchströmung**

Fall	Breite in m	Höhe in m	Kippweite in m	$b_k$
Fenstertür, gekippt	1,075	2,005	0,130	1,00
Fenstertür, gekippt mit Insektenschutz	1,075	2,005	0,130	1,00
Fenstertür, gekippt mit Pollenschutz	1,075	2,005	0,130	1,00
Fenstertür, geöffnet	1,075	2,005	---	0,50
Fenstertür, geöffnet mit Insektenschutz	1,075	2,005	---	0,50
Fenstertür, geöffnet mit Pollenschutz	1,075	2,005	---	0,75
Dachflächenfenster, geöffnet	0,640	1,300	0,250	0,50
Dachflächenfenster, geöffnet mit Insektenschutz	0,640	1,300	0,250	0,50

In Tab. 33 sind die Öffnungsgeometrien und der Exponent  $b_k$  für die verschiedenen Querlüftungssituationen aufgelistet. Die Anzahl und die Form der verschiedenen durchströmten Zonen hatten keinen Einfluss auf das Strömungsverhalten an den Öffnungen.

**Tab. 33: Strömungsexponenten, Querdurchströmung**

Fall	Breite in m	Höhe in m	Kippweite in m	$b_k$
EG gekippt - OG geöffnet (2 Zonen)				
Fenstertür, gekippt (Einströmöffnung - EG)	1,075	2,005	0,130	1,00
Fenstertür, geöffnet (Ausströmöffnung - OG)	1,075	2,005	---	0,50
EG geöffnet - OG geöffnet (2 Zonen)				
Fenstertür, geöffnet (Einströmöffnung - EG)	1,075	2,005	---	0,50
Fenstertür, geöffnet (Ausströmöffnung - OG)	1,075	2,005	---	0,50
EG geöffnet - OG geöffnet (4 Zonen)				
Fenstertür, geöffnet (Einströmöffnung - EG)	1,075	2,005	---	0,50
Dachflächenfenster, geöffnet (Ausströmöffnung - OG)	0,640	1,300	0,250	0,50

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass an gekippten Fenstern mit und ohne Insekten- und Pollenschutzgittern ( $b_k = 1,0$ ), laminare Strömungsbedingungen vorherrschen (vgl. Etheridge 2012). An allen geöffneten Fenstern sowie an Dachflächenfenstern mit und ohne Insektenschutzgittern ( $b_k = 0,5$ ), herrschen turbulente Strömungsbedingungen vor (vgl. Etheridge 2012). Bei geöffneten Fenstern mit Pollenschutzgittern konnte ein Zustand zwischen laminar und turbulent beobachtet werden. ( $b_k = 0,75$ ).

Eine interessante Beobachtung konnte für das geöffnete Dachflächenfenster gemacht werden. Auf den ersten Blick sieht ein geöffnetes Dachflächenfenster wie ein gekipptes Fenster aus und wird in der ÖNORM B 8110-3:2012, Anhang B (ÖNORM B 8110-3:2012) wie ein gekipptes Fenster behandelt. Im Validierungsprozess stellte sich heraus, dass das geöffnete Dachflächenfenster wie ein geöffnetes Fenster turbulente Strömungsbedingungen aufweist und nicht laminare Strömungsbedingungen wie ein gekipptes Fenster. Die Auswertung in Tab. 33 zeigt, dass das Strömungsverhalten von der Anordnung der Kippgeometrie und der Kippweite des Fensters abhängig sind.

Der Einfluss von Insekten- bzw. Pollenschutzgittern wurde in den Querlüftungssituationen nicht untersucht. Als Annahmen für die Berechnung der Luftvolumenströme in Querlüftungssituationen mit Insektengittern können näherungsweise die Annahmen für die Einzelraumsituationen herangezogen werden.

#### **4.3.2.2 Darstellung der Ergebniszusammenfassung**

Um eine Aussage aus dem Validierungsprozess für die verschiedenen Situationen zu bekommen, wurden die Ergebnisse und die Randbedingungen in einer Tabelle abgebildet. Die Ergebnisse der Einzelraumsituationen sind in Tab. 32 und die Ergebnisse der Querlüftungssituationen in Tab. 33 zusammengestellt. Aus diesen Tabellen wurden die Schlüsse aus dem Validierungsprozess gezogen (siehe 4.3.2.6).

In den nachstehenden Tabellen Tab. 34 und Tab. 35 sind Größenordnungen für die mittleren Luftvolumenströme und Temperaturdifferenzen angegeben, die sich zu Folge des thermisch induzierten Luftwechsels einstellen. Die Luftvolumenströme und Temperaturdifferenzen bei den Versuchen mit schlechter Übereinstimmung wurden Näherungswerte berechnet. Um die Ergebnisse nach dem Grad der Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung zu kategorisieren wurde ein Farbschema für die ersten beiden Spalten eingeführt.

**Rot hinterlegte** Werte weisen eine Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung von kleiner als 25 % auf.

**Gelb hinterlegte** Werte weisen eine Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung von 25 bis 75 % auf.

**Grün hinterlegt** sind alle Werte mit einer Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung von mehr als 75 %.

In Spalte 3 wird angegeben, ob die Messungen unter natürlichen oder durchmischten Bedingungen aufgezeichnet wurden. Die letzten beiden Spalten zeigen an welcher Anteil an der Raumfläche und Raumhöhe stark durchströmt wurde (siehe 4.1.5.1 und 0). **Blau hinterlegt** sind alle gesamt durchströmten Flächen und Höhen. **Rot hinterlegt** sind alle teildurchströmten Flächen. Bei den querdurchströmten Messungen (siehe 4.3.2.4) ist angegeben, in welcher Zone das Volumen zum Teil oder gesamt durchströmt wurde.

#### **4.3.2.3 Zusammenfassung Einzelraumsituationen**

Aus Tab. 32 lassen sich folgende Zusammenhänge für die Einzelraumsituationen herauslesen.

Für die gekippten Erdgeschoßfenster, die geöffneten Erdgeschoßfenster und die Dachflächenfenster zeigen die Ergebnisse, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung sowohl unter natürlichen Bedingungen als auch unter durchmischten Bedingungen brauchbar bis sehr gut sind.

Für die gekippten Erdgeschoßfenster und die geöffneten Erdgeschoßfenster mit Insekten- und Pollenschutzgittern zeigt sich, dass die Messungen unter durchmischten Bedingungen tendenziell eine bessere Übereinstimmung zeigen als die Messungen unter natürlichen Bedingungen. Die Dachflächenfenster mit Insektengitter weisen generell eine schlechte Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung auf. Ursache dafür war die zu hohe Windgeschwindigkeit während der Messung.

Beim Vergleich der stark und schwach durchströmten Raumvolumina zeigt sich, dass beim gekippten Erdgeschoßfenster und beim geöffneten Erdgeschoßfenster unter natürlichen Bedingungen ein Teilvolumen stark durchströmt ist. Unter durchmischten Bedingungen ist bei beiden Situationen das gesamte Raumvolumen stark durchströmt. Beim Dachflächenfenster ist für durchmischte und natürlich belüftete Bedingungen das Teilvolumen stark durchströmt.

**Tab. 34: Zusammenschau der Ergebnisse, Einzelraumdurchlüftung**

Fall	V' in m <sup>3</sup> / h	$\Delta T$ in K	Durchmisch	Fläche	Höhe
EG gekippt, ohne Gitter	78 – 149	8,85 – 16,81	Nein	Gesamt	Teil
	120	13,53	Ja	Gesamt	Gesamt
EG gekippt, Insektengitter	47 – 72	5,66 – 8,53	Nein	Gesamt	Teil
	69 – 98	8,17 – 11,75	Ja	Gesamt	Gesamt
EG gekippt, Pollengitter	26	5,86	Nein	Gesamt	Teil
	45	9,85	Ja	Gesamt	Gesamt
EG geöffnet, ohne Gitter	581 – 1066	2,65 – 8,95	Nein	Gesamt	Teil
	890 - 1066	6,12 – 8,94	Ja	Gesamt	Gesamt
EG geöffnet, Insektengitter	387 – 672	2,67 – 8,20	Nein	Gesamt	Teil
	337 – 692	2,00 – 8,65	Ja	Gesamt	Gesamt
EG geöffnet, Pollengitter	22	1,88	Nein	Gesamt	Teil
	55	6,10	Ja	Gesamt	Gesamt
OG geöffnet, ohne Gitter	18 – 119	0,69 – 14,31	Nein	Gesamt	Teil
	84 – 88	9,25 – 9,98	Ja	Gesamt	Teil
OG geöffnet, Insektengitter	73 – 89	6,99 – 10,26	Nein	Gesamt	Teil
	84 – 88	9,25 – 9,98	Ja	Gesamt	Teil

Aus dem detaillierten Vergleich zwischen Messung und Berechnung (siehe 4.3.1) geht hervor, dass sich die Jahreszeit nicht auf die Messergebnisse auswirkt.

#### **4.3.2.4 Zusammenfassung Querlüftungssituation**

Aus Tab. 33 lassen sich folgende Zusammenhänge für die Querlüftungssituationen herauslesen.

Für die 2 Zonen Querdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster und bei der 4 Zonen- Querdurchströmung kann herausgelesen werden, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung unter durchmischten Bedingungen tendenziell besser ist als unter natürlichen Bedingungen. Bei den 2 Zonen- Querdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster zeigt sich, dass die Messungen unter natürlichen Bedingungen eine bessere Übereinstimmung haben.

Beim Vergleich der stark und schwach durchströmten Raumvolumina zeigt sich, dass sowohl unter natürlichen Bedingungen als auch unter durchmischten Bedingungen in allen Zonen ein Teilvolumen stark durchströmt ist. Bei der Querdurchströmung werden nur jene Bereiche durchströmt, die sich - bildlich gesprochen - im Luftstrom zwischen zwei Öffnungen befinden (vgl. qualitative Untersuchung in 4.1.4.4 mit Theaternebel).

Tab. 35: Zusammenschau der Ergebnisse, Querdurchlüftung

Fall	V' in m <sup>3</sup> / h	ΔT in K	Durchmisch	Fläche	Höhe	Zone
EG gekippt OG geöffnet	422	4,83	Nein	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
	563	7,12	Ja	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
EG geöffnet – OG geöffnet	2566 – 3210	6,28 – 9,71	Nein	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
	2789 – 3257	6,74 – 9,90	Ja	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
EG geöffnet – OG geöffnet	1533 – 1634	9,37 – 12,49	Nein	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
				Teil	Teil	3
				Teil	Teil	4
	1256 – 1644	9,46 – 12,51	Ja	Teil	Teil	1
				Teil	Teil	2
				Teil	Teil	3
				Teil	Teil	4

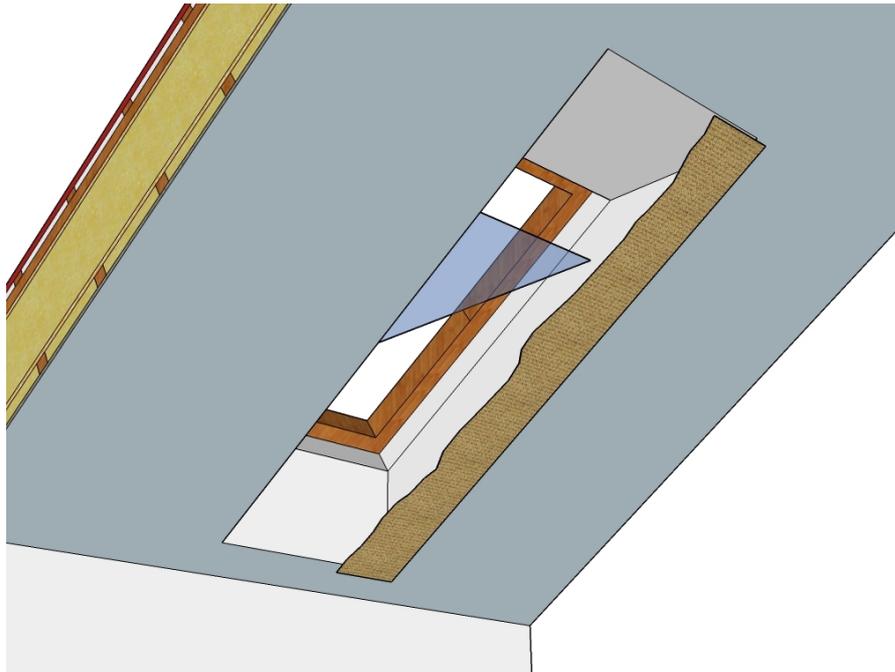
Aus dem detaillierten Vergleich zwischen Messung und Berechnung (siehe 4.3.1) geht hervor, dass sich die Jahreszeit nicht auf die Messergebnisse auswirkt.

#### 4.3.2.5 Grenzen des Modells

Im Zuge des Validierungsprozesses zeigten sich Grenzen im Modell zur Berechnung von Luftvolumenströmen bzw. Tracergaskonzentrationen.

Bei den Einzelraumsituationen zeigte sich, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung unter durchmischten Bedingungen höher sind als unter natürlichen Bedingungen. Durchmischte Bedingungen entsprechen der Annahme des vollständigen Austauschs in einer Zone. Für die Messungen unter natürlichen Bedingungen, wo zum Teil schlechte Übereinstimmungen zwischen Messung und Berechnung beobachtet wurden, sind weiterführende Überlegungen notwendig.

Weiters konnte das Insektengitter im Dachflächenfenster nicht nachgebildet werden. Das Insektengitter war an der Innenseite in Verlängerung der Innenoberfläche über die Fensterlaibung gespannt (siehe Abb. 43). Mit der Anpassung des Exponenten  $b_k$  konnten keine brauchbaren Tracergaskonzentrationen berechnet werden.



**Abb. 43: Messkonfiguration – Dachflächenfenster mit innenliegendem Insektengitter**

Bei den Querlüftungssituationen hat sich analog zu den Einzelraumsituationen gezeigt, dass einige Messungen unter natürlichen Bedingungen rechnerisch nicht sehr gut oder gut abbildbar waren.

Im Modell wurde weiters ein vollständiger Austausch zwischen den Zonen angenommen. Die Auswertung der Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung hat gezeigt, dass zwischen manchen Zonen kein vollständiger Austausch stattfindet.

Ein weiterer Grenzfall für das Rechenmodell ist die Berücksichtigung des Einschwingvorgangs des Luftvolumenstroms, der sich zwischen zwei Öffnungen einstellt. Bei jenen Messungen, bei denen sich der Luftaustausch von unten beginnend nach oben von Zone zu Zone eingestellt hat, hat die rechnerische Nachbildung der Abklingkurven brauchbare Ergebnisse geliefert. In Fällen, in denen sich der Luftstrom aufgrund einer anderen Reihenfolge des Fensteröffnens eingestellt hat, war es schwer bis unmöglich, brauchbare Ergebnisse zu berechnen.

#### **4.3.2.6 Schlüsse aus dem Validierungsprozess**

Aus der Zusammenschau der Ergebnisse des Validierungsprozesses können nun folgende Schlüsse gezogen werden:

- Stark und schwach durchströmte Bereiche wirken sich unterschiedlich aus. Durch die ausschließliche Berücksichtigung der stark belüfteten Bereiche im Rechenmodell konnte die Genauigkeit der Volumenstromberechnung erhöht werden.
- Mit einem Rechenmodell kann der thermisch induzierten Luftwechsel in einzelnen Räumen und auch in der Querlüftungssituation durch mehrere Zonen sehr rasch berechnet werden.
- Für ein brauchbares Ergebnis war die Reihenfolge des Öffnen der Fenster bei Querlüftung relevant.
- Das Strömungsverhalten an der Öffnung kann über einen Faktor berücksichtigt werden.
- Die Jahreszeit hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Insektengitter können über die geometrische Flächenabminderung des Gitters und die Wahl eines passenden Strömungsverhaltens an der Öffnung berücksichtigt werden.

Das Modell liefert rasch Ergebnisse für die stockwerkübergreifende Querlüftung und die Durchströmung von Einzelräumen. Für die Verwendung in der täglichen Planungspraxis sind die Ergebnisse brauchbar genug. Für eine genauere Berechnung der Durchströmung von Räumen können möglicherweise Lösungen sinnvoller erscheinen die eine höhere Abbildegenauigkeit aufweisen (z.B. VEPZO Norrefeldt 2013 auf mehrere Zonen angewandt).

#### **4.4 Anwendung des Wissens – Vergleich mit der Praxis**

Im letzten Teil der Methodik wird das validierte Rechenmodell in eine thermische Raumsimulation eingebettet und an einem Beispiel angewendet. Die plausibilisierten Rechenergebnisse sollen zeigen, dass die Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch mehrere Zonen brauchbare Ergebnisse für die Planungspraxis liefern.

Die Einbettung des Modells für die Berechnung der stockwerkübergreifenden Querlüftung in ein thermisches Raumsimulationsmodell zur Berechnung der operativen Temperatur wird in Kapitel 4.4.1 vorgestellt. Das Beispielobjekt und die Berechnungsrandbedingungen werden ebenfalls unter 4.4.1 beschrieben.

Unter 4.4.2 werden die Berechnungsergebnisse der operativen Temperatur für einen periodisch wiederkehrenden Tag und für eine Hitzewelle zusammen mit den Berechnungsergebnissen nach dem detaillierten Verfahren für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung gemäß ÖNORM B 8110-3:2012 (ÖNORM B 8110-3) gezeigt.

In Kapitel 4.4.3 werden die Ergebnisse des Simulationsmodells mit den Berechnungsergebnissen nach Norm verglichen und bewertet.

#### **4.4.1 Thermische Raumsimulation mit stockwerksübergreifender Querlüftung**

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Berechnung der operativen Temperatur mit dem validierten Modell zur Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung vorgestellt und die verwendeten Berechnungsrandbedingungen erläutert.

Die Berechnungsergebnisse sollen beitragen, die gewonnenen Erkenntnisse der Berechnung des thermisch induzierten stockwerksübergreifenden Luftvolumenstromes zu plausibilisieren.

Im Abschnitt 4.4.1.1 wird der Stand des Wissens zum Einfluss des Klimas auf das Nutzerverhalten beschrieben. Der Stand des Wissens zur Bewertung der Sommertauglichkeit von Wohn- und Bürogebäuden wird im Abschnitt 4.4.1.2 beschrieben.

Die Erweiterung eines thermischen Raumsimulationsmodells für Zwei-Zonen mit Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung wird unter 4.4.1.3 vorgestellt.

Das zweistöckige Einfamilienhaus, das als Beispielobjekt für die Berechnung der operativen Temperaturen mit dem vorgestellten Simulationsmodell eingesetzt wurde, wird in 4.4.1.4 vorgestellt. Das Untersuchungsschema und die Klima- und Nutzungsrandbedingungen werden in Abschnitt 4.4.1.5 und 4.4.1.6 beschrieben.

##### **4.4.1.1 Einfluss des Klimas auf das Nutzerverhalten**

In (Adnot et al. 2003) wird der Kühlenergiebedarf im Sommer für alle Länder der EU zusammengestellt. Der Kühlenergiebedarf wurde aus den Verkaufszahlen für Kompaktkühlgeräte (< 12 kW) unter Berücksichtigung von verschiedenen Kühlsysteme

und Arbeitszahlen rückgerechnet. Ergänzend dazu wurde eine Bewertung der Kühlsysteme hinsichtlich der Energieeffizienz durchgeführt.

Bei der zeitlichen Darstellung des Kühlenergiebedarfs in Europa zeigt sich, dass der Kühlenergiebedarf während der letzten 20 Jahre (1990-2010) um das 4-fache angestiegen ist. Die Prognose des Kühlenergiebedarfs zeigt für die nächsten 10 Jahre ebenfalls eine Steigerung um 20%. Aus dem Verlauf des Kühlenergiebedarfs anhand der Verkaufszahlen von Klimageräten kann ein wachsendes Komfortbedürfnis bei den Nutzern und/oder ansteigende Durchschnittstemperaturen im Sommer abgelesen werden.

(ZAMG 2015) beschreiben die Beurteilungskriterien von Hitzewellen anlässlich der Hitzewelle 2015. Anhand dieser Kriterien wurden für alle Landesteile Österreichs Hitzewellenereignisse im Zeitraum von 1874 bis 2015 berechnet und eine Reihenfolge von bisherigen „Rekordsommern“ erstellt. Aus der Häufung von Hitzewellenereignissen und dem Anstieg der mittleren Außentemperaturen im Jahresschnitt kann auf einen klimabedingten Temperaturanstieg geschlossen werden.

Ob der klimabedingte Anstieg oder das Komfortbedürfnis der Nutzer für den Anstieg beim Kauf von Klimaanlage und den Anstieg des Kühlenergiebedarfs verantwortlich ist, kann Gegenstand für weitere wissenschaftliche Auseinandersetzungen sein.

Für die vorliegende Arbeit sind beide Faktoren ein Grund, die sommerliche Überwärmung mit einem erweiterten Verfahren zu untersuchen, um zusätzliche Erkenntnisse für das Planen sommertauglicher Konstruktionen zu gewinnen.

#### **4.4.1.2 Bewertung der Sommertauglichkeit von Büro- und Wohngebäuden**

(Prommer 2008) bewertet die Sommertauglichkeit von Einfamilienhäusern durch Simulationsrechnung. An Hand von 3 verschiedenen Testräumen in unterschiedlichen Bauweisen und mit verschiedenen Fenstergrößen werden typische Einfamilienhaussituationen nachgestellt. Dabei werden die Testräume nach beiden Verfahren der ÖNORM B 8110-3 (Berechnung der immisionsflächenbezogenen Speichermasse und mittels dynamischer Simulation) untersucht.

Es stellt sich heraus, dass die Bewertung nach Norm ein Ja/Nein-Kriterium ist. Um die Bewertung der Sommertauglichkeit von Räumen und Konstruktionen noch besser durchführen zu können, wird die Einführung von Güteklassen für die Klassifizierung von Bauteilen empfohlen. Die Simulationsrechnung zeigt, dass die Überwärmungsneigung von Räumen im Sommer im Wesentlichen vom Wärmeeintrag durch die Fenster abhängt und dass der Wärmedämmstandard (Passivhaus, Niedrigenergiehaus, Bauordnung)

einen geringen Einfluss auf das Sommerverhalten hat. Die Berechnungsergebnisse zeigen weiters, dass schwere Bauweisen eine kleinere Tagesschwankung aufweisen und die Dachbodenausbauten mit Dachflächenfenstern kritischer im Bezug auf die Sommertauglichkeit sind als massive Räume mit vertikalen Fenstern.

(Handler et al. 2011) zeigt anhand von Raumsimulationsrechnungen und Vor-Ort-Messungen den Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) auf die Sommertauglichkeit von Außenwänden aus Ziegelmauerwerk. Anhand eines Modellobjektes an verschiedenen Standorten in verschiedenen Klimazonen (Wien, Izmir) wird die Wirkung des WDVS auf die operative Temperaturen untersucht. Das Raumsimulationsmodell wird anhand von Messergebnissen an einer Versuchswand in Wien validiert.

Wird die nächtliche Fensterlüftung die laut ÖNORM B 8110-3 gefordert wird, durchgeführt, liegt die operative Temperatur in Gebäuden mit WDVS unter der operativen Temperatur für Gebäude ohne WDVS. Wird der nächtliche Fensterluftwechsel nicht eingehalten, kommt es in Gebäuden mit WDVS eher zu einer sommerlichen Überwärmung als in Gebäuden ohne WDVS.

(Fux et al. 2013) beschreibt einen Vergleich von zwei Nachweisverfahren (Bestimmung des Sonneneintragswertes, dynamische Simulation) in der Neufassung der DIN 4108-2 anhand zweier Beispierräume. Der Vergleich soll Änderungen im Berechnungsverfahren des Sonneneintragswertes zwischen der Fassung 2003 und der Ausgabe 2013 verdeutlichen. Das Ziel der Norm-Überarbeitung war, dass das überarbeitete vereinfachte Nachweisverfahren mit Bestimmung des Sonneneintragswertes besser mit der dynamischen Simulation übereinstimmt. Gleichzeitig sollte das vereinfachte Verfahren auf der sicheren Seite liegen und nicht - wie in der Ausgabe 2003 - sogar Ergebnisse liefern, die im Vergleich zur dynamischen Simulation auf der unsicheren Seite liegen.

Der Vergleich zwischen dem überarbeiteten Sonneneintragswert-Verfahren und der dynamischen Simulation ergab, dass die Ergebnisse des überarbeiteten vereinfachten Verfahrens mit den Ergebnissen der Simulation übereinstimmen und die Werte auf der sicheren Seite liegen. Gleichzeitig wurden für das vereinfachte Verfahren klare Randbedingungen formuliert, die es unmöglich machen sollen, nicht sommertaugliche Konstruktionen durch geschickte Wahl von Randbedingungen so nachzuweisen, dass sie als sommertauglich gelten.

(Němeček und Kalousek 2015) bewertet die Sommertauglichkeit von Passivhausaufbauten anhand von Untersuchungen an einem Wohnhaus in Südmähren. Am Objekt wurden Messungen der operativen Temperatur im Sommer aufgezeichnet und

als Randbedingung für die Simulation eingesetzt. Parallel dazu wurde das Objekt in einer mehrzonigen Raumsimulation abgebildet und die operativen Temperaturen berechnet. Berechnet wurden die Fälle „sommerliche Überwärmung“ ohne Berücksichtigung einer Verschattung und „keine sommerliche Überwärmung“ mit Berücksichtigung einer Verschattung für ein Wohnzimmer und einen Dachgeschoßraum. In beiden Fällen wurde eine Nachtlüftung angenommen. In den Berechnungen wurden 4 Holzwandaufbauten und eine 5 Ziegelwände und 1 Betonwandaufbau berücksichtigt.

Das Ergebnis ist ein Zusammenhang zwischen spezifischer Wärmekapazität und maximaler operativer Temperatur für verschiedene Räume und Konstruktionen. Die Berechnung hat gezeigt, dass alle Aufbauten bei Anwendung einer Verschattung und einer sichergestellten Nachtlüftung als sommertauglich eingestuft werden können. Bei weggelassener Verschattung und sichergestellter Nachtlüftung zeigt sich, dass beide Räume mit schweren Ziegel- oder Betonwandaufbauten als sommertauglich eingestuft werden können. Räume in leichten Holz- oder Ziegelkonstruktionen zeigen bei nichtvorhandener Verschattung und vorhandener Nachtlüftung sommerliche Überwärmung.

Die Berechnungen wurden für den 15. Juli (Referenztag in der Norm) und einen kritischen Sommertag aus den Messaufzeichnungen durchgeführt. Die Unterschiede zwischen den beiden Klimarandbedingungen waren vernachlässigbar.

(Teibinger et al. 2014) beschreiben im Endbericht eines Forschungsprojekts die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Sommerbehaglichkeit in Holzhäusern. Die Forschungsarbeit bestand aus Messungen von Wandoberflächentemperaturen und operativen Temperaturen an Räumen in unterschiedlicher Bauweise. Untersucht werden sollte der Einfluss von verschiedenen Baustoffe und Bauweisen. Abgerundet wurde das Untersuchungsprogramm durch eine Befragung von Fertighauskunden zu ihrem Verhalten im Sommer. Ziel der Untersuchung war die Erweiterung von Planungswerkzeugen, mit denen die Sommertauglichkeit von Holzeinfamilienhäusern berechnet werden kann. Mit einem 2-Zonen-Rechenmodell zur Berechnung der operativen Temperatur wurden verschiedenen Holzaufbauten in unterschiedlichen Raumkonfigurationen und Nutzungsszenarien berechnet. Durch den Vergleich der operativen Temperatur der verschiedenen Fälle konnten die Einflussfaktoren auf die Sommerbehaglichkeit quantifizieren werden. Weiters entstand ein Diagramm zur Bestimmung der Sommertauglichkeit von Räumen mit bestimmten Fenstergeometrien und Verschattungseigenschaften bei verschiedenen Fensterorientierungen.

Die Einführung von Güteklassen für die Beurteilung der Sommertauglichkeit (siehe Prommer 2008) von Bauteilen ist ein Fall für eine gesonderte Auseinandersetzung. Für

die vorliegende Arbeit sind die Erkenntnisse aus den Simulationsrechnungen (siehe Prommer 2008, Handler et al. 2011, Němeček und Kalousek 2015 und Teibinger et al. 2014) als Vergleichswerte für die Berechnung nach Verfahren nach ÖNORM bzw. EN interessant.

Die Untersuchungen von (Fux et al. 2013) waren Anstoß, die Ergebnisse der Simulation der stockwerkübergreifenden Querlüftung mit den aktuellen Berechnungsverfahren des Luftvolumenstromes in der ÖNORM B 8110-3:2015 zu vergleichen.

Das 2-Zonen-Rechenmodell und die Annahmen für die Berechnung der operativen Temperatur in (Teibinger et al. 2014) waren Grundlage für die Erweiterung um das Modell zur Berechnung des Luftvolumenstromes bei stockwerksübergreifenden Querlüftung.

#### **4.4.1.3 Vorstellung Rechenmodell mit Berücksichtigung der Querlüftung**

Im folgenden Abschnitt wird das 2-Zonen-Rechenmodell zur Berechnung der operativen Temperaturen unter Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung vorgestellt.

Das 2-Zonen Modell zur Berechnung der operativen Temperatur ist eine Weiterentwicklung von einem Ein-Zonen Modell (siehe Bednar et al. 2012) unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Kopplung zwischen zwei Räumen (siehe Teibinger et al. 2014).

Im nachfolgenden Abschnitt ist die Beschreibung der Erweiterung mit dem dem validierten Rechenmodell (siehe 4.2 bzw. 4.3) zur Abbildung der stockwerksübergreifenden Querlüftung in Einfamilienhäusern.

Abb. 44 zeigt ein Schema des Zwei-Zonen-Knotenmodells (siehe Teibinger et al. 2014) mit den Ergänzungen des Querlüftungsmodells.

Das strichlierte Rechteck umgrenzt die betroffenen Zonen. In der Mitte innerhalb der Umgrenzung sind die Strahlungstemperaturen ( $\vartheta_{i,rad}$ ) und die Lufttemperaturen ( $\vartheta_{i,air}$ ) des jeweiligen Raumes dargestellt. Auf der Umgrenzung befinden sich die Wand- und Fensterknoten ( $\vartheta_{i,surf}$  und  $\vartheta_{i,f}$ ) die den entsprechenden Temperaturen zugeordnet sind. Die Kopplung der beiden Räume erfolgt über ein Trennbauteil, das im Modell als Linie zwischen den beiden Wandtemperaturknoten ( $\vartheta_{i,surf,1}$  und  $\vartheta_{i,surf,2}$ ) angedeutet wird. Die inneren und äußeren Einflüsse auf den Raum in Form von Außenlufttemperatur ( $\vartheta_e$ ), Sonneneinstrahlung ( $\phi_{i,sol,c}$  und  $\phi_{i,sol,r}$ ) und inneren Lasten ( $\phi_{IL,c}$  und  $\phi_{IL,r}$ ) werden der jeweiligen Luft- oder Strahlungstemperatur im Inneren zugeordnet.

Rot dargestellt ist der thermisch induzierte Luftvolumenstrom zufolge von geöffneten Fenstern ( $\dot{V}_{fen,i}$ ) im jeweiligen Raum.

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom zufolge Querlüftung wird im eingebetteten Luftstromknotenmodell für die entsprechenden Randbedingungen berechnet und als konvektiver Wärmestromeintrag ( $\phi_{air,cross,i}$ ) in Grün in die thermische Raumsimulation eingelesen und berücksichtigt.

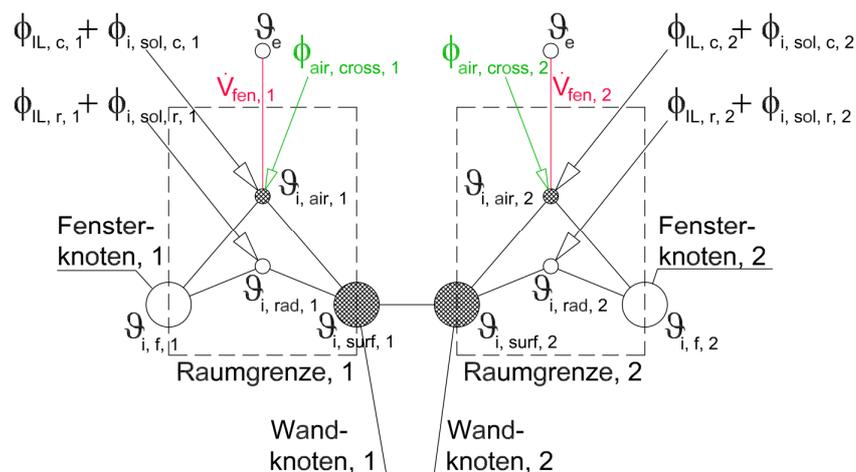


Abb. 44: graphische Darstellung des Rechenmodells für zwei Zonen mit Kopplungsbauteil und Berücksichtigung der Querdurchlüftung, Quelle: (Bednar et al. 2012) – graphisch erweitert

In den nachfolgenden Gleichungen ((18), (20), (21), (22)) werden die wesentlichen Bestandteile des Modells kurz vorgestellt (vgl. Bednar et al. 2012).

In Gleichung (15) wird der Ergebniswert, die operative Raumtemperatur als Funktion von Innenlufttemperatur und mittlere Strahlungstemperatur im Raum, dargestellt (siehe Gleichung 58 in Bednar et al. 2012).

$$\vartheta_{op} = \frac{\vartheta_{i,air} + \vartheta_{i,rad}}{2} \quad (15)$$

$\vartheta_{op}$	in °C	Operative Temperatur
$\vartheta_{i,air}$	in °C	Mittlere Lufttemperatur im Raum
$\vartheta_{i,rad}$	in °C	Mittlere Strahlungstemperatur im Raum

Gleichung (16) zeigt die Bestandteile der Strahlungstemperatur im Raum. Einen Beitrag zur Strahlungstemperatur leisten neben den Oberflächentemperaturen der Bauteile ( $\vartheta_{i,surf,k}$ ) und der

Fenster ( $\vartheta_{i,f}$ ) mit den dazugehörigen Flächen ( $A_k, A_f$ ) der Wärmeeintrag durch innere Lasten ( $\phi_{IL,r}$ ) (siehe Gleichung 56 in Bednar et al. 2012).

$$\vartheta_{i,rad} = \frac{\sum_{k=1}^n \vartheta_{i,surf,k} \cdot A_k + \sum_{f=1}^n \vartheta_{i,f} \cdot A_f + \sum \phi_{IL,r} / h_{i,r}}{\sum_{k=1}^n A_k + \sum_{f=1}^n A_f} \quad (16)$$

$\vartheta_{i,rad}$	in °C	Strahlungstemperatur im Raum
$\vartheta_{i,surf,k}$	in °C	innere Oberflächentemperatur des Bauteils k
$A_k$	in m <sup>2</sup>	Fläche des Bauteils k
$A_f$	in m <sup>2</sup>	Fläche des Fensters
$\vartheta_{i,f}$	in °C	Oberflächentemperatur an der inneren Oberfläche der Verglasung
$\phi_{IL,r}$	in W	Wärmestrom zufolge Strahlung der inneren Lasten
$h_{i,r}$	in Wm <sup>2</sup> / K	Wärmeübergangskoeffizient für die Strahlung an der Innenseite

In Gleichung (17) werden die Bestandteile zur Berechnung der Raumlufttemperatur ( $\vartheta_{i,air,i}$  und  $\vartheta_{i,air,i-1}$ ) dargestellt. Die Temperaturdifferenz ( $\Delta\vartheta_{i,air}$ ) wird gebildet um die Lufttemperaturen im Zeitschrittverfahren zu berechnen.

Zur Innenraumlufttemperatur leisten die Wärmeströme zufolge konvektiver Wärmeabgabe der Inneren Lasten ( $\phi_{IL,c}$ ), der Wandflächen ( $\phi_{k,c}$ ), der Fensterflächen ( $\phi_{f,c}$ ), des Luftwechsels der jeweiligen Zone ( $\phi_{LW}$ ) sowie der Heizung und Kühlung über eine Lüftungsanlage ( $\phi_{heat,c}$  und  $\phi_{cool,c}$ ) einen Beitrag. Der Beitrag der Querlüftung zur Innenraumtemperatur der jeweiligen Zone wird ebenfalls als konvektiver Wärmestrom ( $\phi_{air,cross}$ ) berücksichtigt (vgl. Gleichung 57 in Bednar et al. 2012) – ergänzt um den konvektiven Wärmestrom ( $\phi_{air,cross}$ ) zufolge Querlüftung.

$$\Delta\vartheta_{i,air} = \vartheta_{i,air,i} - \vartheta_{i,air,i-1} = \frac{\sum \phi_{IL,c} + \sum \phi_{k,c} + \sum \phi_{f,c} + \sum \phi_{LW} + \sum \phi_{air,cross} + \sum \phi_{heat,c} + \sum \phi_{cool,c}}{C_E} \cdot \Delta t \quad (17)$$

$\Delta\vartheta_{i,air}$	in K	Lufttemperatur im Raum
$\vartheta_{i,air,i}$	in °C	mittlere Lufttemperatur im Raum zum Zeitpunkt i
$\vartheta_{i,air,i-1}$	in °C	mittlere Lufttemperatur im Raum zum Zeitpunkt i - 1
$\phi_{IL,c}$	in W	Wärmestrom zufolge konvektiver Wärmeabgabe innerer Lasten
$\phi_{k,c}$	in W	Wärmestrom zufolge konvektiver Wärmeabgabe an Wandflächen
$\phi_{f,c}$	in W	Wärmestrom zufolge konvektiver Wärmeabgabe an Fensterflächen

$\phi_{LW}$	in W	Wärmestrom durch Luftwechsel in der jeweiligen Zone
$\phi_{air,cross}$	in W	Wärmestrom durch Luftwechsel als Folge der Querlüftung
$\phi_{heat,c}$	in W	Wärmestrom zur konvektiven Heizung (über die Lüftungsanlage)
$\phi_{cool,c}$	in W	Wärmestrom zur konvektiven Kühlung (über die Lüftungsanlage)
$\Delta t$	in s	Zeitschrittweite
$C_E$	in J/K	Wirksame Wärmespeicherkapazität der Einrichtung

Gleichung ((18) und (19)) zeigt die Zusammensetzung des konvektiven Wärmestrom ( $\phi_{LW}$ ) der Raumlüftung für den Fall mit und ohne mechanischer Lüftungsanlage. (siehe Gleichung (75) bzw. (76) in (Bednar et al. 2012)).

$$\phi_{LW} = \max(\phi_{LW,inf}; \phi_{LW,hyg}) + \phi_{LW,fen} \dots \text{ohne mechanischer Lüftungsanlage} \quad (18)$$

bzw.

(19)

$$\phi_{LW} = \phi_{LW,inf} + \phi_{LW,mech} + \phi_{LW,fen} \dots \text{mit mechanischer Lüftungsanlage}$$

$\phi_{LW}$	in W	Wärmestrom zufolge Luftwechsel
$\phi_{LW,inf}$	in W	Wärmestrom zufolge Infiltrationsluftwechsel
$\phi_{LW,hyg}$	in W	Wärmestrom zufolge hygienischem Luftwechsel
$\phi_{LW,fen}$	in W	Wärmestrom zufolge Fensterluftwechsel
$\phi_{LW,mech}$	in W	Wärmestrom zufolge Fensterluftwechsel über die mechanische Lüftungsanlage

Die Berechnung des konvektiven Wärmestroms zufolge Fensterluftwechsels der jeweiligen Zone in Gleichung (20) und (21) erfolgt über die Berechnung des thermisch induzierten Luftvolumenstroms ( $\dot{V}_{fen,i}$ ) und der Lufttemperaturdifferenz ( $\vartheta_{e,air}$  und  $\vartheta_{i,air}$ ) der jeweiligen Zone (vgl. Gleichung (79) in (Bednar et al. 2012)).

$$\phi_{LW,fen} = 0,34 * \dot{V}_{fen,i} * (\vartheta_{e,air} - \vartheta_{i,air}) \quad (20)$$

Der thermisch induzierte Luftvolumenstrom ( $\dot{V}_{fen,i}$ ) setzt sich aus dem Austauschkoefizienten ( $C_{ref}$ ), einem Sicherheitsfaktor für den Austauschkoefizienten von 0,7, der Lüftungsöffnungsfläche ( $A$ ) sowie aus der Höhe der Lüftungsöffnung ( $H$ ) und

der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur ( $\vartheta_{e,air}$  und  $\vartheta_{i,air}$ ) zusammen (siehe Gleichung (79) in (Bednar et al. 2012)).

$$\dot{V}_{fen,i} = 0,7 * C_{ref} * A * \sqrt{H} * \sqrt{|\vartheta_{e,air} - \vartheta_{i,air}|} \quad (21)$$

$\phi_{LW, fen}$	in W	Wärmestrom zufolge Fensterluftwechsel
$\dot{V}_{fen,i}$	in m <sup>3</sup>	Luftvolumenstrom zufolge thermisch induzierten Fensterluftwechsel
$C_{ref}$	in $\frac{m^{0,5}}{h \cdot K^{0,5}}$	Austauschkoeffizient mit  ( $C_{ref} = 100 \frac{m^{0,5}}{h \cdot K^{0,5}}$ für Einzelräume und $C_{ref} = 350 \frac{m^{0,5}}{h \cdot K^{0,5}}$ für Querlüftung)
$A$	in m <sup>2</sup>	Fläche der Lüftungsöffnung
$H$	in m	Höhe der Lüftungsöffnung
$\vartheta_{e,air}$	in °C	Außenlufttemperatur
$\vartheta_{i,air}$	in °C	Innenlufttemperatur

Der Beitrag der stockwerkübergreifenden Querlüftung zur Innenlufttemperatur wird zur jeweiligen Zone als konvektiver Wärmestromeintrag hinzugefügt. Im Rechenmodell wird der thermisch induzierte Luftwechsel zufolge Querdurchlüftung analog zu den Ansätzen in 4.2.1 bzw. 4.2.5 als Massen- bzw. Luftvolumenstrom berechnet. Die errechneten Massenströme ( $\phi_{air,cross,i}$ ) werden in weiterer Folge in das Temperaturknotenmodell mit der spezifischen Wärmekapazität der Raumlufte ( $C_{air}$ ) und der Lufttemperatur der jeweiligen Zone ( $T_{air,i}$ ) einbezogen.

$$\phi_{air,cross,i} = \dot{m}_{air,cross,i} * C_{air} * T_{air,i} \quad (22)$$

$\phi_{air,cross,i}$	in W	Wärmestrom durch Querluftwechsel in der jeweiligen Zone
$\dot{m}_{air,cross,i}$	in kg/s	Massenströme zufolge Querlüftung in der jeweiligen Zone
$C_{air}$	in J/kg, K	spezifische Wärmekapazität der Luft mit ( $C_{air} = 1006 \frac{J}{kg \cdot K}$ )
$T_{air,i}$	in J/kg, K	Lufttemperatur in der jeweiligen Zone

#### **4.4.1.4 Randbedingungen Rechenmodell - Geometrie, Fenster und Türen (Hard-Facts des Hauses)**

Im folgenden Abschnitt wird das untersuchte Modellobjekt (siehe Abb. 45) und die relevanten Eingabeparameter vorgestellt.

Das Modellobjekt ist angelehnt an das bauphysikalische Forschungshaus der Holzforschung Austria am Standort Stetten bei Korneuburg (Niederösterreich), dass für die in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Tracergasmessungen herangezogen wurde (siehe 3.1.1).

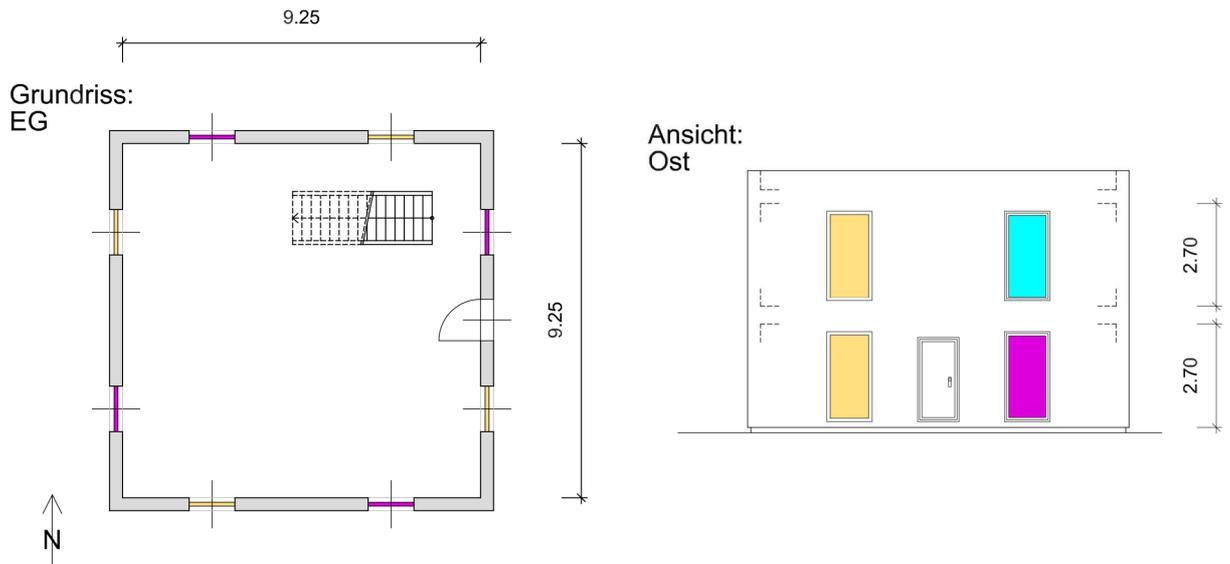
Das Objekt steht frei auf einer ebenen Grünfläche. Der Innenraum ist in zwei übereinanderliegenden Zonen aufgeteilt. Als Trennbauteil dient die Decke zwischen Erdgeschoß und Obergeschoß die eine Stiegenöffnung enthält. Die in der Realität vorkommenden Innenwände werden als Speichermasse in der Berechnung hinzugefügt.

Die Wandaufbauten und Fenster des Modellobjekts orientieren sich an den Aufbauten der Berechnung in (Teibinger et al. 2014).

Abb. 45 zeigt im unteren Bild den Erdgeschoßgrundriss des Modellobjekts. Der Objektgrundriss wurde quadratisch angenommen, um möglichst gleichartige Bedingungen für alle Himmelsrichtungen zu erhalten. Die Seitenlänge der Innenwand beträgt 9,25 m. Die Raumhöhe wurde mit 2,70 m angenommen. Der Anteil Fensterfläche zu Wandfläche beträgt ca. 22 %. Dieser Wert wurde aus einer statistischen Auswertung von Fertighausgrundrissen entnommen (siehe Teibinger et al. 2014). Die Fensterfläche wurde für jede Himmelsrichtung und in jedem Stockwerk gleich in je ein fixverglastes und ein öffnenbares Fenster verteilt. Die fixverglasten Fenster sind in Abb. 45 **Gelb** dargestellt. Die öffnenbaren, gekippten Fenster im Erdgeschoß sind **Magenta** eingefärbt und die öffnenbaren Fenster im Obergeschoß sind in **Cyan** gehalten.

Die Eingangstüre wurde als nicht öffnenbare Fläche mit einem entsprechend gewählten U-Wert angenommen. Die Stiegenhausöffnung hat die Abmessungen 1,18 / 3,60 m.

Der Obergeschoßgrundriss ist analog zum Erdgeschoßgrundriss jedoch ohne Eingangstüre. Die Nettogrundrissfläche pro Geschoß beträgt 85,5 m<sup>2</sup> und für beide Geschoße insgesamt 171 m<sup>2</sup>. Das gesamte Nettoraumvolumen beträgt 230,9 m<sup>3</sup>.



**Abb. 45:** 2-geschoßiges Einfamilienhaus in Holzbauweise als Modellobjekt, Erdgeschoßgrundriss (links), Ansicht von Osten (rechts). Die fix verglasten Fenster sind gelb angelegt. Die gekippten Fenster im EG sind magenta eingefärbt und die geöffneten Fenster im OG sind in Cyan gehalten.

In Tab. 36 werden die Fensterflächen des Modellobjekts für alle Himmelsrichtungen angegeben. Die Architekturlichte wurde für alle Fenster mit 118 cm /235 cm angenommen. Die Rahmenbreite der beweglichen Fenster (Öffnen, Kippen) wurde mit 11 cm angenommen und die Rahmenbreite der fixverglasten Fenster mit 9 cm. Die Glasfläche der jeweiligen Fenster kann der Tabelle Tab. 36 entnommen werden.

**Tab. 36:** Übersicht der Fensterflächen für Erdgeschoss und Obergeschoss nach Himmelsrichtung dargestellt

Flächenverteilung	Nord in m <sup>2</sup>	Ost in m <sup>2</sup>	Süd in m <sup>2</sup>	West in m <sup>2</sup>
Fensterfläche im EG, fixverglast	2,78	2,78	2,78	2,78
Glasfläche im EG, fixverglast	2,18	2,18	2,18	2,18
Fensterfläche im EG, beweglich	2,78	2,78	2,78	2,78
Glasfläche im EG, beweglich	2,05	2,05	2,05	2,05
Fensterfläche im OG, fixverglast	2,78	2,78	2,78	2,78
Glasfläche im OG, fixverglast	2,18	2,18	2,18	2,18
Fensterfläche im OG, beweglich	2,78	2,78	2,78	2,78
Glasfläche im OG, beweglich	2,05	2,05	2,05	2,05

Tab. 37 gibt einen Überblick über die angenommenen bauphysikalischen Eigenschaften der Fenster. Für die Berechnung wurden 3-fach verglaste Fenster mit einem U-Wert für die Verglasung von 0,60 W /m<sup>2</sup>, K und 1,10 W /m<sup>2</sup>, K für den Rahmen gewählt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad wurde mit 0,52 und der  $\psi$ -Wert mit 0,05 W / m, K gewählt.

Als Verschattung wurde eine außenliegende, weiße, wenig lichtdurchlässige Verschattung gewählt ( $F_c = 0,10$ ).

**Tab. 37: Bauphysikalische Eigenschaften der Fenster im Modellobjekt**

<b>Fenstereigenschaften</b>	<b>Wert</b>
U-Wert für Verglasung ( $U_G$ ) in $W / m^2, K$	0,60
U-Wert für Fensterrahmen ( $U_F$ ) in $W / m^2, K$	1,10
Durchgangskoeffizient Abstandhalter ( $\psi$ ) in $W / m, K$	0,05
Gesamtenergiedurchlassgrad Verglasung ( $g$ )	0,52
Abminderungsfaktor Sonnenschutz aussen ( $F_c$ )	0,10

Die Eingangstür wurde in der Berechnung als nicht öffnenden Teil der Wand mit einem U-Wert von  $1,10 W/m^2, K$  berücksichtigt (siehe Tab. 38).

**Tab. 38: Bauphysikalische Eigenschaften der Eingangstür im Modellobjekt**

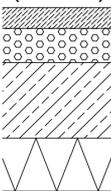
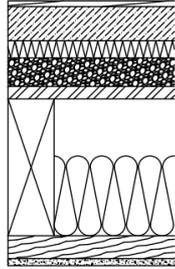
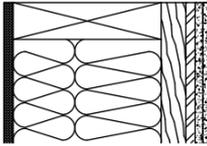
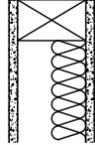
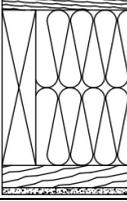
<b>Eingangstüreeigenschaften</b>	<b>Wert</b>
U-Wert der Eingangstüre ( $U_{ges}$ ) in $W / m^2, K$	1,10

Die für das Modellobjekt ausgewählten Wand- und Deckenaufbauten wurden in Tab. 39 zusammengefasst. Die gewählten Aufbauten wurden aus Tab 57 von (Teibinger et al. 2014) entnommen und entsprechen den maßgeblichen, für das Sommerverhalten kritischen Aufbauten, bei der Berechnung der operativen Temperatur (siehe Aufbau „Wohnung, Holzrahmenbauweise, Außenwand mit Installationsebene, Zementestrich“ in Teibinger et al. 2014).

Die Außenwände und Deckenbauteile sind Holzrahmenelemente mit einer Installationsebene an der Innenseite und an der Deckenunterseite. Bei den Deckenbauteilen wurde auf der Deckenoberkante eine Fußbodenkonstruktion mit Naßestrich angenommen. Die Bodenplatte ist ein mineralischer Aufbau mit einer gedämmten Betonplatte. Auf der Oberseite der Bodenplatte wurde ebenfalls eine Fußbodenkonstruktion mit Nassestrich angenommen. Die Innenwände sind teilgedämmte Holzriegelkonstruktionen. Als Dämmstoff wurde für die Außen- und Innenwände sowie die Deckenkonstruktion Glaswolle angenommen. Die Bodenplatte hat eine Dämmung aus extrudiertem Polystyrol (XPS). Die Trittschalldämmung der Holzdecke besteht aus Glaswolle. Die Dämmung unterhalb des Estrichs auf der Bodenplatte besteht aus expandiertem Polystyrol (EPS).

In Tab. 39 sind die Aufbauten in der ersten Spalte als Skizze dargestellt. Spalte 2 und 3 gibt die Material eigenschaften und die Schichtstärke an. In Spalte 4 ist die spezifische Wärmekapazität der Innen- und Außenseite der Bauteile angegeben. Spalte 5 enthält den U-Wert der angenommenen Konstruktionen.

**Tab. 39: Wand- und Deckenaufbauten des Modellobjektes (Spalte 2 und 3). Für alle Aufbauten werden auch die inneren und äußeren spezifischen Wärmekapazitäten (Spalte 4) und der U-Wert (Spalte 5) angegeben. Die graphische Darstellung der Aubauten befindet sich in Spalte 1.**

Aufbautyp	Material	Dicke in mm	C <sub>w</sub> in Wh / m <sup>2</sup> ,K	U in W / m <sup>2</sup> ,K
<b>Fundament (Boden)</b> 	Nassestrich EPS Beton XPS	55 90 200 140	32,73 (Boden) 1,29 (Erdreich)	0,15
<b>Decke (Decke und Boden)</b> 	Belag/Holz Zementestrich TDP (Glaswolle) Schüttung OSB KVH (80/240, alle 62,5 cm) / Luft KVH (80/240, alle 62,5 cm) / Glaswolle Lattung (50/40, alle 30 cm) / Glaswolle GKF	10 60 30 50 22 100 140 40 12,5	4,57 (Decke) 27,01 (Boden)	0,16
<b>Außenwand (innen)</b> 	GKF GKF Lattung (50/40, alle 30 cm) / Glaswolle OSB KVH (60/240, alle 62,5 cm) / Glaswolle MDF	12,5 12,5 40 15 240 15	8,31 (außen) 5,14 (innen)	0,15
<b>Innenwand</b> 	GKF KVH (60/100, alle 62,5 cm) / Luft KVH (60/100, alle 62,5 cm) / Glaswolle GKF	12,5 50 50 12,5	3,83 (innen)	0,63
<b>Ob. Geschossdecke</b> 	Schalung KVH (80/280, alle 62,5 cm) / Glaswolle Lattung (50/40, alle 30 cm) / Luft GKF	24 280 40 12,5	5,06 (Decke) 5,64 (Dach)	0,16

#### 4.4.1.5 Randbedingungen Rechenmodell – Untersuchungsschema

Im nächsten Abschnitt der thermischen Raumsimulation mit stockwerksübergreifender Querlüftung wird das Untersuchungsprozedere bei der Berechnung der operativen Temperatur mit dem erweiterten Simulationsmodell vorgestellt.

Untersucht wurde die stockwerksübergreifende Querlüftung mit gekippten Fenstern im Erdgeschoß und geöffneten Fenstern im Obergeschoß. Dieser Fall wurde ausgewählt, um das Sicherheitsbedürfnis der Nutzer zu berücksichtigen und eine effizienten Nachtlüftung abbilden zu können (vgl. Abschnitt 9.6 NutzerInnenverhalten Teibinger et al. 2014).

Im Modellobjekt wurden im Erd- und Obergeschoß jeweils ein Fenster pro Himmelsrichtung fix verglast angenommen (siehe 4.4.1.4). Die Anzahl der geöffneten bzw. gekippten beweglichen Fenster wurde in der Berechnung schrittweise erhöht um den Einfluss der Lüftung in der Berechnung sichtbar zu machen (vgl. Tab. 40).

In Tab. 40 ist das Öffnungsschema der Fenster in der Berechnung tabellarisch dargestellt. Die Spalten zeigen die geographische Ausrichtung der beweglichen Fenster für das Erdgeschoß im linken Tabellenteil und für das Obergeschoß im rechten Teil der Tabelle. In den Zeilen ist die Anzahl der geöffneten Fenster bezeichnet, die in den Ergebnistabellen und –diagrammen verwendet werden. Die cyan-farbigen Felder in der Tabelle markieren die gekippten Fenster im Erdgeschoß. Die magenta-farbigen Felder in der Tabelle kennzeichnen die geöffneten Fenster im Obergeschoß.

**Tab. 40: Untersuchungsschema für die Vergleichsrechnung der sommerlichen Überwärmung**

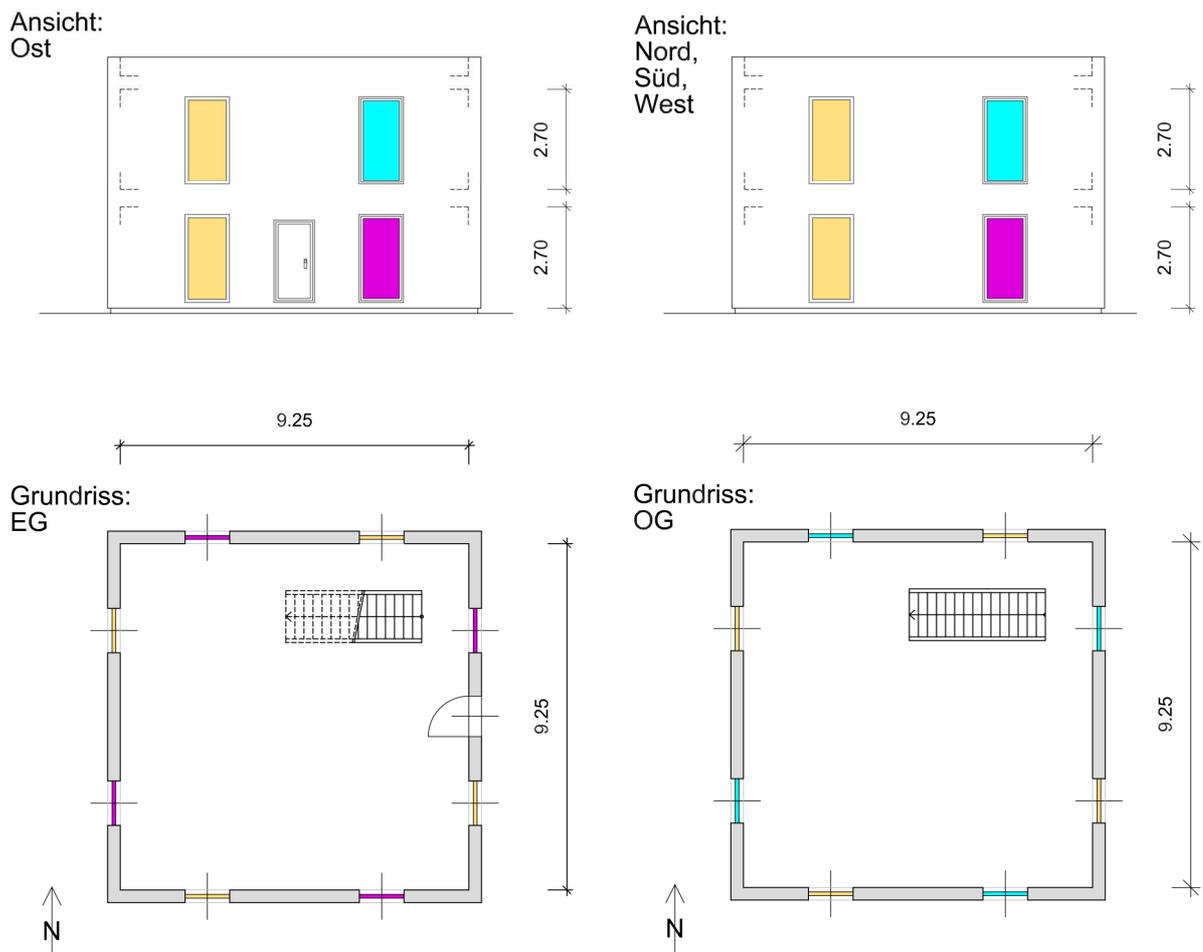
Bezeichnung	Erdgeschoß				Obergeschoß			
	Nord	Ost	Süd	West	Nord	Ost	Süd	West
1 Fenster	gekippt				geöffnet			
2 Fenster	gekippt	gekippt			geöffnet	geöffnet		
3 Fenster	gekippt	gekippt	gekippt		geöffnet	geöffnet	geöffnet	
4 Fenster	gekippt	gekippt	gekippt	gekippt	geöffnet	geöffnet	geöffnet	geöffnet

Abb. 46 illustriert die Fenster des Modellobjekts im Erdgeschoßgrundriß links unten und im Obergeschoßgrundriß rechts unten. Das linke obere Bild zeigt die Ostansicht mit der Eingangstüre. Im rechten oberen Bild befinden sich die Nord-, Süd- und Westansicht des Modellobjekts die alle gleich sind.

Die gelb-markierten Glasflächen in den Ansichten kennzeichnen die fixverglasteten Fenster im Erd- und Obergeschoß. Die Glasflächen in Cyan markieren die gekippten

Erdgeschossfenster. Die magenta-farbigen Glasflächen kennzeichnen die geöffneten Obergeschoßfenster.

Die Eingangstür an der Ostseite im Erdgeschoß wurde in der Berechnung nicht geöffnet um die Unterschiede in der Anzahl der geöffneten Fenster besser abbilden zu können.



**Abb. 46: Geometrie des Modellobjektes, Erdgeschoßgrundriss (links unten), Obergeschoßgrundriss (rechts unten), Ansicht von Osten (links oben), Ansicht von Norden, Süden und Westen (rechts oben). Die fix verglasten Fenster sind gelb angelegt. Die gekippten Fenster im EG sind magenta eingefärbt und die geöffneten Fenster im OG sind in Cyan gehalten.**

#### **4.4.1.6 Randbedingungen Rechenmodell - Klima, Nutzung**

Im Abschnitt über die klimatischen Randbedingungen und die Randbedingungen für die Nutzung des Objekts werden die für die Simulation gewählte Außenlufttemperatur und die angenommenen inneren Lasten beschrieben.

Als Außenlufttemperatur wurden die klimatischen Randbedingungen ÖNORM B 8110-3:2012 gewählt, um die Berechnungsergebnisse mit den gültigen Nachweisverfahren für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung vergleichen zu können (vgl. Pkt. 7.2 in

ÖNORM B 8110-3). Als Tagesmittelwert der Außentemperatur gem. ÖNORM B 8110-5:2010 ( $NAT_{13}$  ist gleich jener Wert der in 10 Jahren 130 Mal überschritten wird), wird das Tagesmittel für Stetten bei Korneuburg (=23°C) angenommen. (vgl. ÖNORM B 8110-5; Bbl. 2).

Abb. 47 zeigt den Verlauf der Außentemperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2015, Anhang A für einen periodischen Tag mit einem Tagesmittelwert von 23°C.

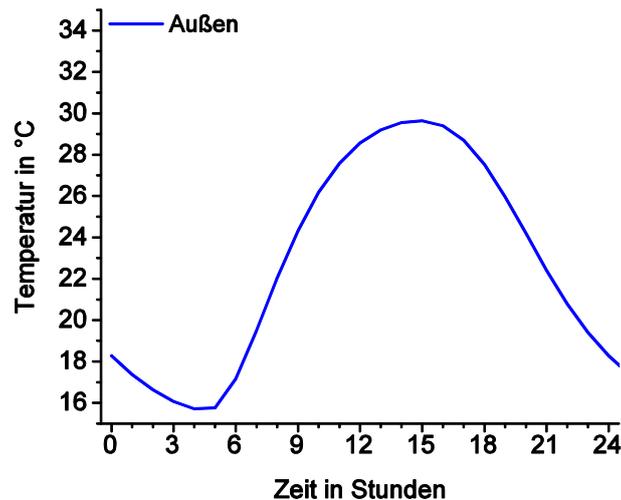
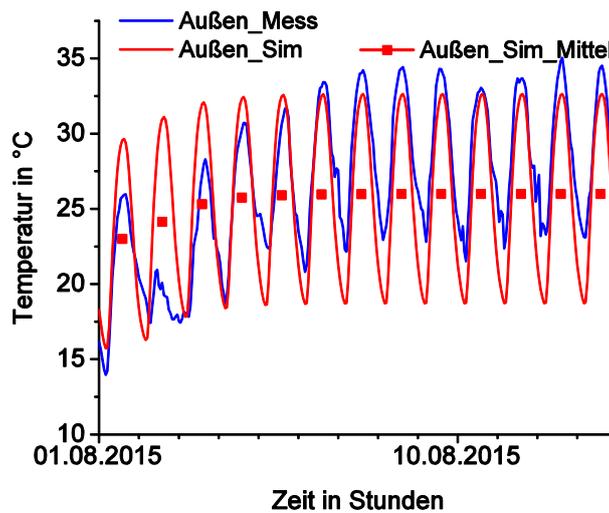


Abb. 47: Außentemperaturrandbedingungen für den periodischen Tag gemäß ÖNORM B 8110-3:2015, Anhang A

Um das Verhalten der Wand- und Deckenaufbauten und die „thermische Trägheit der Räume“ untersuchen zu können, wurde der Temperaturverlauf des periodischen Tages mittels Exponentialfunktion innerhalb von 10 Tagen vom Temperaturzustand 1 auf Temperaturzustand 2 um 3 K angehoben (vgl. Gleichung 95 und Kapitel 8.9 in Bednar et al. 2012). Der ansteigende Temperaturverlauf soll eine Hitzewelle nachbilden, um die thermische Speicherkapazität von Bauteilen besser sichtbar machen. Die berechnete Außenlufttemperatur wurde mit einer Außenlufttemperaturmessung vom August 2015 verglichen (siehe ZAMG 2015).

Abb. 48 zeigt in **Rot** den periodisch wiederkehrenden Außentemperaturverlauf, der mit dem exponentiellen Temperaturanstieg von 3 K überlagert wurde und eine Hitzewelle nachbilden soll. Die **blaue** Linie zeigt die gemessene Außentemperaturverteilung einer tatsächlich stattgefundenen Hitzewelle Anfang August 2015 in Wien. Der Vergleich der Kurven zeigt, dass der Modellansatz sehr gut für die Berechnung geeignet ist.



**Abb. 48: Außentemperaturrandbedingungen für eine zehntägige Hitzewelle gemäß Norm (rote Kurve) und in der Realität Anfang August 2015 (blaue Linie).**

Der Einfluss der Nutzung wird im Berechnungsmodell als Annahme für die Verschattung, Lüftung und Wärmeeintrag durch innere Lasten abgebildet. Die Annahmen für die Nutzung wurden aus den Ansätzen, die im Forschungsprojekt der Holzforschung Austria verwendet wurden, übernommen (vgl. 10.3 in Teibinger et al. 2014).

Für die Berechnung wurde ein Nutzungsprofil gewählt, bei dem die berechneten operativen Temperaturen möglichst hoch sind, damit die Ergebnisse möglichst auf der sicheren Seite liegen.

Es wurde angenommen, dass 2 erwerbstätigen Personen im Haus leben, die untertags nicht anwesend sind. Die Verschattung ist während ihrer Abwesenheit aktiv. Die Fenster sind je nach Öffnungsschema (siehe 4.4.1.5) in der Nacht geöffnet (siehe Tab. 41).

Die Ansätze für den Wärmeeintrag von Personen und Geräten ist aus Tab. 2 der ÖNORM B 8110-3:2012 entnommen (vgl. ÖNORM B 8110-3:2012). Der Wärmeeintrag für Personen wurde auf  $1 \text{ W/m}^2$  pro Person geändert (siehe Spalte 2 von Tab. 41). Für den Wärmeeintrag der Geräte wurden die Tabellenwerte aus der ÖNORM B 8110-3:2012, Tab. 2 übernommen (siehe Spalte 3 von Tab. 41).

**Tab. 41: zeitliche Darstellung der Nutzung durch Nutzer (Anwesenheit, Wärmeeintrag durch Geräte), Beschattung und Lüftung**

Zeit	Personen	Geräte	Beschattung	Lüftung
00:00-01:00	1	1,76		Fenster offen
01:00-02:00	1	1,67		Fenster offen
02:00-03:00	1	1,80		Fenster offen
03:00-04:00	1	1,80		Fenster offen
04:00-05:00	1	2,61		Fenster offen
05:00-06:00	1	5,76		Fenster offen
06:00-07:00	1	5,09		Fenster offen
08:00-09:00	0	1,80	Aktiv	
09:00-10:00	0	1,80	Aktiv	
10:00-11:00	0	1,80	Aktiv	
11:00-12:00	0	1,80	Aktiv	
12:00-13:00	0	1,80	Aktiv	
13:00-14:00	0	1,80	Aktiv	
14:00-15:00	0	1,80	Aktiv	
15:00-16:00	0	1,80	Aktiv	
16:00-17:00	0	1,80	Aktiv	
17:00-18:00	0	1,80	Aktiv	
18:00-19:00	1	6,26		
19:00-20:00	1	5,36		
20:00-21:00	1	4,32		Fenster offen
21:00-22:00	1	3,11		Fenster offen
22:00-23:00	1	2,70		Fenster offen
23:00-00:00	1	1,98		Fenster offen

#### 4.4.2 Ergebnisdarstellung:

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse aus der Anwendung des Luftstromknotenmodells im thermischen Raumsimulationsmodell anhand des Modellobjekts (siehe 4.4.1.4) für den Fall der stockwerksübergreifenden Querlüftung mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster präsentiert. Die Ergebnisse der operativen Temperatur werden für einen periodisch wiederkehrenden Tag (siehe 4.4.2.4) und einer Hitzewelle (siehe 4.4.2.5) dargestellt.

Als Bewertungskriterien für die Sommertauglichkeit von Konstruktionen und Räumen wird das Bewertungskriterien für einzelne Tage (siehe 4.4.2.1 für die Ergebnisse in 4.4.2.4) oder für einen längeren Zeitraum (siehe 4.4.2.2 für die Ergebnisse in 4.4.2.5) herangezogen.

Die Simulationsergebnisse im Abschnitt 4.4.2.4 und 4.4.2.5 werden mit den Berechnungsergebnissen aus den aktuellen Nachweisverfahren der ÖNORM B 8110-3:2012 verglichen, um die Ergebnisse aus dem Modell der stockwerksübergreifenden Querlüftung plausibel zu machen. Die Unterschiede in der Betrachtung der Lüftung mit

dem neuen Rechenmodell und den verschiedenen detaillierten Nachweisverfahren gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 (ÖNORM B 8110-3:2012) („Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur“) werden in 4.4.2.3 gezeigt.

Im Vergleich werden auch die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 8 (ÖNORM B 8110-3:2012) („Berechnung der speicherwirksamen Masse“) hinzugefügt. Die Ergebnisse aus dem Verfahren wurden in den Tabellen in 4.4.2.4 als „erfüllt“ bzw. „nicht erfüllt“ eingetragen. Für Räume mit gekippten Fenstern konnten und können keine Ergebnisse berechnet werden. In der ÖNORM B 8110-3:2012 wird beim vereinfachten Verfahren angemerkt, dass nur bei geöffneten Fenstern eine Nachtlüftung sichergestellt werden kann. Bei der Betrachtung der Hitzewelle (siehe 4.4.2.5) wurden keine Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens hinzugefügt, da das Verfahren stationäre Zustände betrachtet.

Die Schlüsse aus dem Vergleich werden in 4.4.3 zusammengefasst.

#### **4.4.2.1 Bewertungskriterien periodisch wiederkehrender Tag**

Als Bewertungskriterium für die Sommertauglichkeit von Räumen an einem periodisch wiederkehrenden Tag (vgl. ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7.2) wurde der Anforderungswert von 27 °C für Haupträume aus der ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 6.2 (ÖNORM B 8110-3:2012) herangezogen.

In den graphischen Darstellungen der operativen Temperatur ist die Anforderung von  $\leq 27$  °C als grau strichlierte Linie dargestellt.

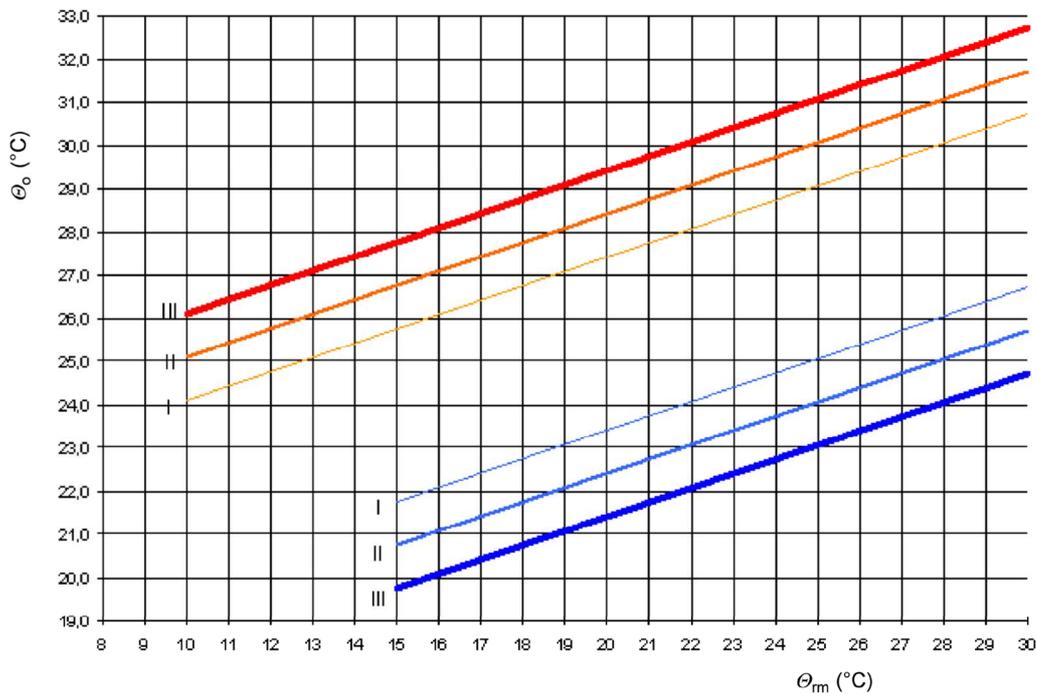
In den Ergebnistabellen (siehe 4.4.2.4) sind die operativen Temperaturen kleiner 27°C grün hinterlegt und alle operativen Temperaturen größer 27°C rot hinterlegt.

#### **4.4.2.2 Bewertungskriterien Hitzewelle**

Als Bewertungskriterium für die Sommertauglichkeit von Räumen während einer Hitzewelle wurde das „Auslegungskriterium für die Dimensionierung von Gebäuden, Heizungs- und Kühlanlagen, maschinellen und freien Lüftungsanlagen“ gemäß EN ÖNORM EN 15251:2007 (ÖNORM EN 15251:2007) für Räume mit Fensterlüftung (siehe Abschnitt 6.2.2 der ÖNORM EN 15251:2007) verwendet.

Der thermische Komfort in Räumen wird für den Anforderungswert der operativen Temperatur im Inneren ( $\theta_o$ ) als Funktion des gleitenden Mittelwert der Außentemperatur ( $\theta_m$ ) für jede Jahreszeit berechnet. Abb. 49 zeigt die Komfortgrenzwerte der operativen Temperatur im Inneren gemäß Anhang A2, der ÖNORM EN 15251:2007 (ÖNORM EN 15251:2007).

Für die vorliegende Arbeit wurden die Komfortgrenzen aus den Außentemperaturen zwischen 23°C und 26°C berechnet.



**Abb. 49: Auslegungswerte für operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur (ÖNORM EN 15251:2007)**

Die beschriebenen Kategorien der Komfortgrenzen sind in Tabelle 1 der ÖNORM EN 15251:2007 (ÖNORM EN 15251:2007) zusammengestellt.

**Tabelle 1 — Beschreibung der Anwendbarkeit der verwendeten Kategorien**

Kategorie	Beschreibung
I	hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen
II	normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude
III	annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden

ANMERKUNG Auch in anderen Normen wie z. B. EN 13779 und EN ISO 7730 wird eine Einteilung in Kategorien vorgenommen; diese können jedoch unterschiedlich benannt sein (A, B, C oder 1, 2, 3 usw.)

**Abb. 50: Beschreibung der verwendeten Kategorien in der EN 15251 für die Klassifizierung der operativen Temperaturen (ÖNORM EN 15251:2007)**

Für die Bewertung der Temperaturmaxima am Höhepunkt der Hitzewelle (siehe 4.4.2.5) wurden die Komfortgrenzen gemäß ÖNORM EN 15251:2007, Tabelle 1 (Abb. 50) für die Temperaturmaxima im Sommer, farblich gekennzeichnet (siehe Farbschema in Tab. 42).

Kategorie I (hohes Maß an Erwartungen) ist **gelb hinterlegt**. **Orange hinterlegt** sind die Werte der Kategorie II (normales Maß an Erwartungen). **Rot markiert** sind die Werte der Kategorie III (annehmbares Maß an Erwartungen). Werte in der Kategorie IV (Werte außerhalb der oben genannten Kategorien) sind **Grau** markiert.

**Tab. 42: Kategorisierung der operativen Temperaturen nach dem gleitenden Mittel der Außentemperatur (ÖNORM EN 15251)**

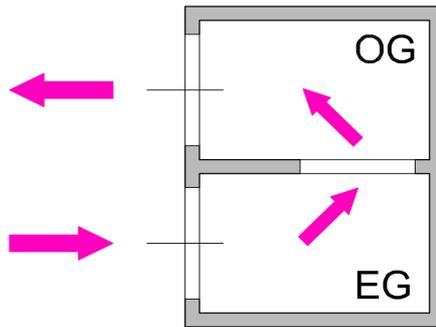
Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV

#### **4.4.2.3 Vergleich des Simulationsmodell mit dem detaillierten Nachweis der sommerlichen Überwärmung**

Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung der stockwerksübergreifenden Querlüftung im Simulationsmodell mit den Berechnungsansätzen im Anhang B der ÖNORM B 8110-3:2012 für die Berechnung der operativen Temperatur gem. ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 verglichen. In schematischen Abbildungen wird die Berücksichtigung des Luftvolumenstromes im Berechnungsmodell zur Berechnung der operativen Temperatur dargestellt. Der Vergleich wurde auf die Berechnung der operativen Temperatur an einem periodisch wiederkehrenden Tag und während einer Hitzewelle angewandt (siehe 4.4.2.4 und 4.4.2.5).

Abb. 51 zeigt die Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung eingebettet in der thermischen Raumsimulation (Pfeile in **Magenta**). Der Luftvolumenstrom der stockwerkübergreifenden Querlüftung wirkt sich auf die Raumtemperaturen im Erdgeschoß (EG) und Obergeschoß (OG) aus und wird auch durch die Raumtemperaturen im EG und OG beeinflusst.

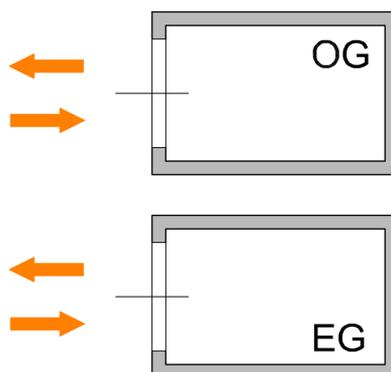
Das thermische Raumsimulationsmodell berücksichtigt bei der Berechnung der operativen Temperatur den Wärmeaustausch zwischen dem Erd- und Oberschoß. In den graphischen Ergebnisdarstellungen sind die operativen Temperaturen des Simulationsmodells („Modell\_Quer“) in **Magenta** dargestellt.



**Abb. 51: detaillierter Nachweis der sommerlichen Überwärmung mit dem Simulationsmodell unter Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung**

In Abb. 52 ist die Berechnung der operativen Raumtemperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 unter Berücksichtigung des Luftvolumenstromes gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Anhang B1 dargestellt (Pfeile in Orange). Die Luftvolumenströme für Erd- und Obergeschoß (EG und OG) werden für jeweils einen Raum mit gekippten bzw. geöffneten Fenstern berechnet und wirken sich auf die operative Temperatur im jeweiligen Raum aus.

Die stockwerkübergreifende Querlüftungssituation wird für die Berechnung in zwei Einzelräume (Erdgeschoß und Obergeschoß) zerlegt ohne eine thermische Kopplung der Räume zu berücksichtigen. In den graphischen Ergebnisdarstellungen sind die operativen Temperaturen des Simulationsmodells („Norm\_Einzel“) in Orange dargestellt.

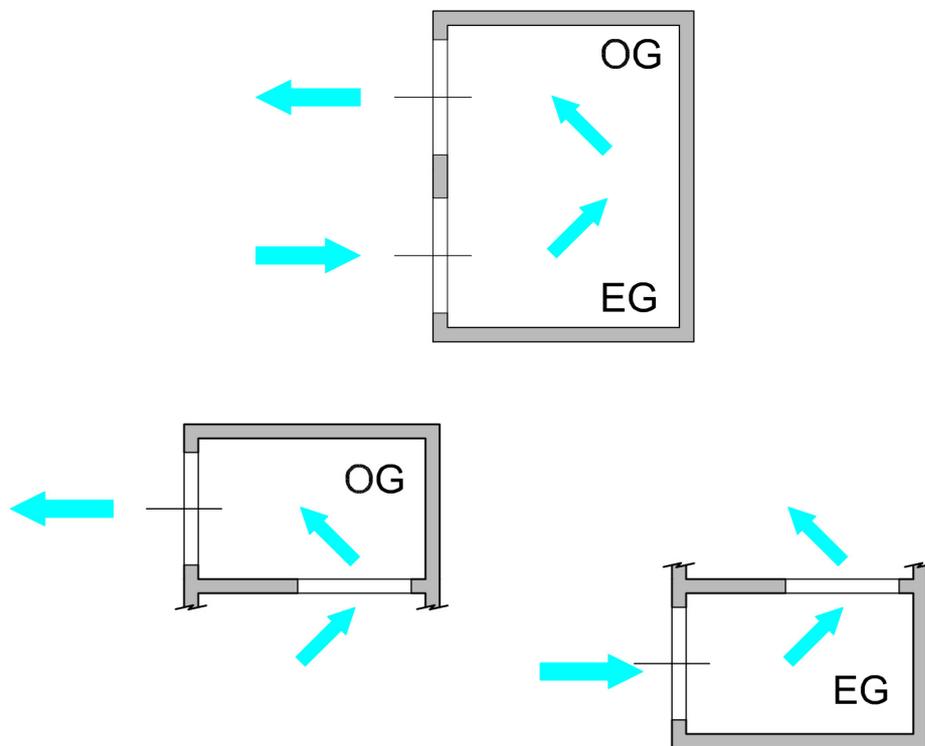


**Abb. 52: detaillierter Nachweis der sommerlichen Überwärmung nach ÖNORM B 8110-3:2012, Berechnung der Lüftung nach Anhang B1**

In den beiden Bildern von Abb. 53 ist die Berechnung der operativen Raumtemperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 unter Berücksichtigung des Luftvolumenstromes unter Berücksichtigung einer Höhendifferenz gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Anhang B2 dargestellt (Pfeile in Cyan). Das obere Bild zeigt die Berechnung des

Luftvolumenstromes gem. Anhang B2. Der Ansatz berücksichtigt die Querlüftung in einer Zone bei zwei gekippten bzw. geöffneten Fenstern mit einer Höhendifferenz.

Der aus der stockwerksübergreifenden Querlüftungssituation berechnete Luftvolumenstrom wurde in die thermische Raumsimulation eingearbeitet und die operative Temperatur von zwei einzelnen Zonen (Erdgeschoß und Obergeschoß) ohne thermische Kopplung berechnet (siehe Bild unten). Die operative Temperatur der beiden thermisch unterschiedlichen Räume wird durch den gleichen Luftvolumenstrom gleich beeinflusst. Der Wärmetransport durch die Querlüftung wird nicht wie im Simulationsmodell (Abb. 51) abgebildet. In den graphischen Ergebnisdarstellungen sind die operativen Temperaturen des Simulationsmodells („Norm\_Quer“) in Cyan dargestellt.



**Abb. 53:** detaillierter Nachweis der sommerlichen Überwärmung nach ÖNORM B 8110-3:2012. Die stockwerksübergreifende Querlüftung wird gemäß Anhang B2 berechnet (Bild oben) und anschließend auf zwei einzelne Räume (Erdgeschoß- und Obergeschoßraum) angewandt (Bild unten).

#### **4.4.2.4 Ergebnisse Periodisch wiederkehrender Tag**

In 4.4.2.4 werden die operativen Temperaturen des Simulationsmodells und der Berechnungen der operativen Temperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 für einen periodischen wiederkehrenden Tag als Nachweis der Vermeidung von sommerlicher Überwärmung graphisch und tabellarisch dargestellt. In der tabellarischen Darstellung der operativen Temperaturmaxima wurden, wenn berechenbar, die

Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 8 hinzugefügt.

In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung wird ein graphischer Vergleich der operativen Temperaturen aus den Berechnungen für 1 gekipptes und 4 fixverglaste Erdgeschoßfenster und 1 geöffnetes und 4 fixverglaste Obergeschoßfenster gezeigt. Es folgt eine tabellarische Zusammenstellung des Temperaturmaximums für die Variation der Öffnungsfläche in Erd- und Obergeschoß. Dabei wird die Sommertauglichkeit der berechneten Situationen (Erdgeschoßfenster gekippt – Obergeschoßfenster geöffnet) mit der sich ändernden Öffnungsfläche beschrieben (vgl. 4.4.2.1).

– **Graphische Darstellung EG und OG (Beispiel 1 Fenster gekippt/geöffnet)**

Im linken Bild von Abb. 54 werden die operativen Temperaturen für einen periodisch wiederkehrenden Tag für 4 fixverglaste und 1 gekipptes Fenster im Erdgeschoß gezeigt. Das rechte Bild von Abb. 54 zeigt die operativen Temperaturen für 4 fixverglaste und 1 geöffnetes Fenster im Obergeschoß.

Die dünne graue Linie in beiden Bildern kennzeichnet die Außenlufttemperatur von 23°C im Mittel. Die dicke grau strichlierte Linie in beiden Diagrammen verweist auf den Anforderungswert der operativen Temperatur von 27°C oberhalb davon, sommerliche Überwärmung eintritt (vgl. 4.4.1.6 und 4.4.2.1).

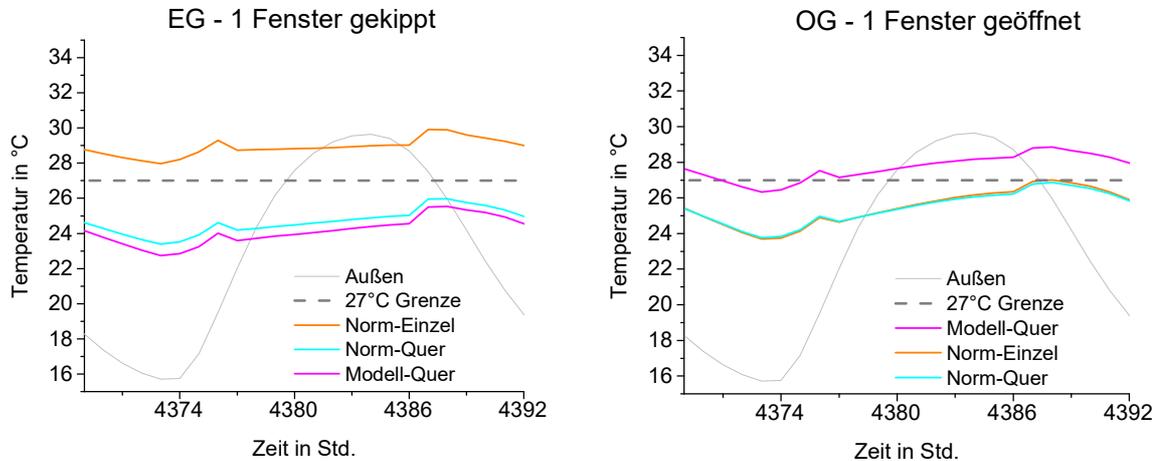
Die Magenta-farbigen Linien kennzeichnen die operative Temperatur des thermischen Simulationsmodells mit Berücksichtigung der thermischen Kopplung und der stockwerksübergreifenden Querlüftung („Modell-Quer“). Die Orangen Kurven kennzeichnen die Ergebnisse gemäß ÖNORM B 8110-3:2012 bei der Betrachtung der Situation in Form von zwei getrennten Einzelräumen mit einer getrennten Fensterlüftung für jeden Raum („Norm-Einzel“). Die Cyan-farbigen Linien zeigen den Verlauf der operativen Temperatur gemäß ÖNORM-Berechnung unter Berücksichtigung der Situation als zwei getrennten Einzelräumen mit einem gemeinsamen stockwerkübergreifenden Querlüftungsstrom („Norm-Quer“).

Die Betrachtung des Erdgeschoßraumes mit 4 fixverglasten und 1 gekippten Fenster (linkes Bild) zeigt, dass die operative Temperatur für „Norm-Quer“ im Bereich von „Modell-Quer“ bzw. leicht darüber liegt während „Norm-Einzel“ deutlich darüber liegt.

Die Betrachtung des Obergeschoßraumes mit 4 fixverglasten und 1 geöffneten Fenster (rechtes Bild) zeigt, dass die operative Temperatur für „Norm-Einzel“ im Bereich von „Norm-Quer“ bzw. leicht darüber liegt aber insgesamt deutlich unter der operativen Temperatur für „Modell-Quer“.

Zusammengefasst kann für den Erdgeschoßraum festgehalten werden, dass die Betrachtung als getrennter Einzelraum mit getrennter Lüftung für den Raum Ergebnisse liefert, die deutlich über den Werten des Simulationsmodells mit Berücksichtigung der Querlüftung liegen. Die Ähnlichkeit der Kurven vom Simulationsmodell mit Berücksichtigung der Querlüftung und der Betrachtung der getrennten Räume mit stockwerksübergreifenden Querluftstrom zeigt, dass das hinterlegte Luftvolumenstrommodell und die Annahmen des thermischen Simulationsmodell mit bisher verwendeten Verfahren gut übereinstimmt bzw. dass die bisherigen Verfahren für die Erdgeschoßsituation brauchbare Ergebnisse liefern.

Für den Obergeschoßraum kann zusammengefasst werden, dass die Berechnung der Situation mit Annahme von zwei getrennten Einzelräumen mit getrennter Lüftung bzw. stockwerksübergreifender Lüftung die in beiden Zonen gleich wirkt, deutlich niedrigere operative Temperaturen liefern als bei Anwendung des Simulationsmodells mit Berücksichtigung der thermischen Kopplung und der stockwerksübergreifenden Querlüftung durch beide Zonen. Auffällig ist, dass für die vorgestellte Situation mit kleinen Öffnungsflächen der Querlüftungsstrom und der Luftvolumenstrom bei einem geöffneten Fenster in etwa gleich sind.



**Abb. 54:** Vergleich der operativen Raumtemperaturen für einen periodischen Tag. Die Außentemperaturverteilung ist die graue Kurve. Die Temperaturanforderung der B 8110-3:2012 ist als grau strichlierte Linie dargestellt. Das linke Bild zeigt die op. Raumtemperatur bei jeweils 1 gekipptem Fenster im EG und 4 fix verglasten Fenstern im EG. Das rechte Bild zeigt die op. Raumtemperatur bei jeweils 1 geöffneten Fenster und 4 fix verglasten Fenstern im OG. Die orangenen Kurven zeigen den Temperaturverlauf des Normnachweises für beide Räume wenn jeder Raum als Einzelraum betrachtet wird. Die violetten Kurven zeigen den Temperaturverlauf des Normnachweises für beide Räume wenn die Querlüftungssituation mitberücksichtigt wird. Die Ergebnisse des Rechenmodells sind jeweils in Cyan und Magenta dargestellt. Die Vergleichswerte in den folgenden Tabellen (Tab. 43, Tab. 44) beziehen sich jeweils auf das Maximum der entsprechenden Temperaturkurve

In der nachfolgenden tabellarischen Darstellung der operativen Temperaturen für unterschiedliche Öffnungsflächen im Erd- und Obergeschoß wurden die

Temperaturmaxima (im Bereich zwischen Stunde 4386 und 4392 in Abb. 54) herangezogen.

– **EG-gekippt**

In Tab. 43 kann beobachtet werden, dass die operative Temperatur für alle Rechenmodelle mit Erhöhung der Anzahl an gekippten Fenstern (Erhöhung der Lüftungsfläche) geringer wird.

**Grün** hinterlegt sind alle Temperaturen unterhalb des Anforderungswertes von 27°C die sommertaugliche Räume kennzeichnen. **Rot** markiert sind alle Temperaturen, die nicht sommertaugliche Räume kennzeichnen.

In der ersten Spalte können die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises der ÖNORM B 8110-3:2012 abgelesen werden. Da der vereinfachte Nachweis bei gekippten Fenstern keine Ergebnisse liefern kann (das vereinfachte Verfahren kann nur bei geöffneten Fenstern angewandt werden) wurde die Spalte leer belassen. Spalte 2 („Norm-Einzel“) zeigt die operativen Temperaturen aus der Berechnung der Situation als getrennte Einzelräume mit getrennter Lüftung (vgl. 4.4.2.3 – orange Pfeile). In Spalte 3 („Norm-Quer“) können die operativen Temperaturen für die Modellierung der Situation als thermisch getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung herausgelesen werden (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Cyan). Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen des Simulationsmodell mit Berücksichtigung der stockwerkübergreifende Querlüftung (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Magenta).

Aus der Tabelle kann abgelesen werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ und „Norm-Quer“ unter 27°C liegen und die Raumsituationen daher als sommertauglich gelten.

Die operative Temperatur von „Einzel-Norm“ liegt bei 4 gekippten Fenstern und 4 fixverglasten Fenstern innerhalb der Anforderungsgrenze von 27°C.

Generell kann gesagt werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ und „Norm-Quer“ bei ansteigender Öffnungsfläche dieselbe Größenordnung haben. Die operativen Temperaturen von „Norm-Einzel“ liegen bei ansteigender Öffnungsfläche deutlich über den Werten von „Modell-Quer“ und „Norm-Quer“.

Tab. 43: Nachweis der sommerlichen Überwärmung an einem periodischen Tag für das Erdgeschoss. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises gem. B 8110-3 in der 2. Spalte. Dabei werden die Werte die nicht berechnet werden können Grau hinterlegt. Spalte 3 zeigt die operativen Temperaturen unter Berücksichtigung von getrennten Einzeräumen mit getrennter Lüftung. Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen bei Abbildung der Situation als getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung. Spalte 5 zeigt die operative Temperatur bei Anwendung des Simulationsmodells mit Betrachtung der Querlüftung und Temperaturen in zwei Zonen. In Grün sind alle operative Temperaturen unterhalb und in Rot alle operativen Temperaturen oberhalb des Anforderungswertes von < 27°C markiert.

Gekippt – Offen	Vereinfachter NW	T <sub>op_Norm- Einzel</sub> in °C	T <sub>op_Norm- Quer</sub> in °C	T <sub>op_Modell- Quer</sub> in °C
EG – 1 Fenster	-	29,91	25,98	25,53
EG – 2 Fenster	-	28,20	24,45	24,40
EG – 3 Fenster	-	27,18	23,73	23,88
EG – 4 Fenster	-	26,49	23,36	23,58

– **OG-geöffnet**

In Tab. 44 kann herausgelesen werden, dass die operative Temperatur für alle Rechenmodelle mit Erhöhung der Anzahl an geöffneten Fenstern (Erhöhung der Lüftungsfläche) geringer wird.

Grün hinterlegt sind alle Temperaturen unterhalb des Anforderungswertes von 27°C die sommertaugliche Räume kennzeichnen. Rot markiert sind alle Temperaturen, die nicht sommertaugliche Räume kennzeichnen.

In der ersten Spalte können die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises der ÖNORM B 8110-3:2012 abgelesen werden, die zeigen, dass der vereinfachte Nachweis für alle Öffnungssituationen im Obergeschoß erfüllt ist. Spalte 2 („Norm-Einzel“) zeigt die operativen Temperaturen aus der Berechnung der Situation als getrennte Einzelräume mit getrennter Lüftung (vgl. 4.4.2.3 – orange Pfeile). In Spalte 3 („Norm-Quer“) können die operativen Temperaturen für die Modellierung der Situation als thermisch getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung herausgelesen werden (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Cyan). Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen des Simulationsmodell mit Berücksichtigung der stockwerkübergreifende Querlüftung (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Magenta).

Der Tabelle kann entnommen werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ für 3 bzw. 4 geöffnete Fenster und 4 fixverglaste Fenster unter 27°C liegen und die Raumsituationen daher als sommertauglich gelten.

Die operativen Temperaturen von „Einzel-Norm“ liegen bei 2, 3 bzw. 4 geöffneten Fenstern und 4 fixverglasten Fenstern innerhalb der Anforderungsgrenze von 27°C. Die operativen Temperaturen von „Norm-Quer“ liegen für alle Raumsituationen unter 27°C und die Raumsituationen können somit als sommertauglich eingestuft werden.

Generell kann gesagt werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ bei ansteigender Öffnungsfläche deutlich über den Werten von „Norm-Quer“ und „Norm-Einzel“ liegen. Die operativen Temperaturen von „Norm-Einzel“ und „Norm-Quer“ bewegen sich bei ansteigender Öffnungsfläche in derselben Größenordnung, wobei die operativen Temperaturen von „Norm-Einzel“ unter den Werten von „Norm-Quer“ liegen.

**Tab. 44: Nachweis der sommerlichen Überwärmung an einem periodischen Tag für das Obergeschoss. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises gem. B 8110-3 in der 2. Spalte. Spalte 3 zeigt die operativen Temperaturen unter Berücksichtigung von getrennten Einzeräumen mit getrennter Lüftung. Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen bei Abbildung der Situation als getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung. Spalte 5 zeigt die operative Temperatur bei Anwendung des Simulationsmodells mit Betrachtung der Querlüftung und Temperaturen in zwei Zonen. In Grün sind alle operative Temperaturen unterhalb und in Rot alle operativen Temperaturen oberhalb des Anforderungswertes von < 27°C markiert.**

Gekippt – Offen	Vereinfachter NW	T <sub>op</sub> _Norm- Einzel in °C	T <sub>op</sub> _Norm- Quer in °C	T <sub>op</sub> _Modell- Quer in °C
OG – 1 Fenster	erfüllt	27,01	26,85	28,85
OG – 2 Fenster	erfüllt	25,52	25,37	27,41
OG – 3 Fenster	erfüllt	24,83	24,70	26,72
OG – 4 Fenster	erfüllt	24,44	24,31	26,30

#### 4.4.2.5 Ergebnisse Hitzewelle

In 4.4.2.5 werden die operativen Temperaturen des Simulationsmodells und der Berechnungen der operativen Temperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 7 für eine Hitzewelle graphisch und tabellarisch dargestellt. Die Berechnung soll das Verhalten des Raumes bei einem Temperaturanstieg im Sommer sichtbar machen und wurde als Erweiterung der Berechnung der operativen Temperatur zum Nachweis der sommerlichen Überwärmung für einen periodisch wiederkehrenden Tag durchgeführt. Die Berechnung der sommerlichen Überwärmung nach dem vereinfachten Verfahrens gemäß ÖNORM B 8110-3:2012, Pkt. 8 konnte nicht gemacht werden, da die Berechnung nur stationäre Zustände berücksichtigt.

In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung wird ein graphischer Vergleich der operativen Temperaturen aus den Berechnungen für 1 gekipptes und 4 fixverglaste Erdgeschoßfenster und 1 geöffnetes und 4 fixverglaste Obergeschoßfenster gezeigt. Es folgt eine tabellarische Zusammenstellung des Temperaturmaximums für die Variation der Öffnungsfläche in Erd- und Obergeschoß am Anfang und Ende der Hitzewelle. Die Sommertauglichkeit der berechneten Situationen (Erdgeschoßfenster gekippt – Obergeschoßfenster geöffnet) wird für den Anfang und das Ende der Hitzewelle mit sich ändernden Öffnungsfläche anhand der Komfortklassifizierung gemäß ÖNORM EN 15251:2007 bewertet (vgl. 4.4.2.2).

– **Graphische Darstellung EG und OG – (Beispiel 1 Fenster gekippt/geöffnet)**

Im linken Bild von Abb. 55 werden die operativen Temperaturen während einer Hitzewelle für 4 fixverglaste und 1 gekipptes Fenster im Erdgeschoß gezeigt. Das rechte Bild von Abb. 55 zeigt die operativen Temperaturen für 4 fixverglaste und 1 geöffnetes Fenster im Obergeschoß.

Die dünne graue Linie in beiden Bildern kennzeichnet die Außenlufttemperatur von 23°C im Mittel. Die dicke hellgrau strichlierte Linie zeigt in beiden Diagrammen die Grenze, unterhalb derer die operativen Temperaturen innerhalb von Kategorie I liegen. Die dicke mittelgrau strichlierte Linie verweist auf die Grenze für Kategorie II. Die operativen Temperaturen, die innerhalb der Kategorie III liegen, werden durch eine dicke schwarz strichlierte Linie begrenzt. Alle operativen Temperaturen außerhalb der Grenze von Kategorie III werden der Kategorie IV zugeordnet. (vgl.4.4.2.2).

Die **Magenta-farbigen** Linien kennzeichnen die operative Temperatur des thermischen Simulationsmodells mit Berücksichtigung der thermischen Kopplung und der stockwerksübergreifenden Querlüftung („Modell-Quer“). Die **Orangen** Kurven kennzeichnen die Ergebnisse gemäß ÖNORM B 8110-3:2012 bei der Betrachtung der Situation in Form von zwei getrennten Einzelräumen mit einer getrennten Fensterlüftung für jeden Raum („Norm-Einzel“). Die **Cyan-farbigen** Linien zeigen den Verlauf der operativen Temperatur gemäß ÖNORM-Berechnung unter Berücksichtigung der Situation als zwei getrennten Einzelräumen mit einem gemeinsamen stockwerkübergreifenden Querlüftungsstrom („Norm-Quer“).

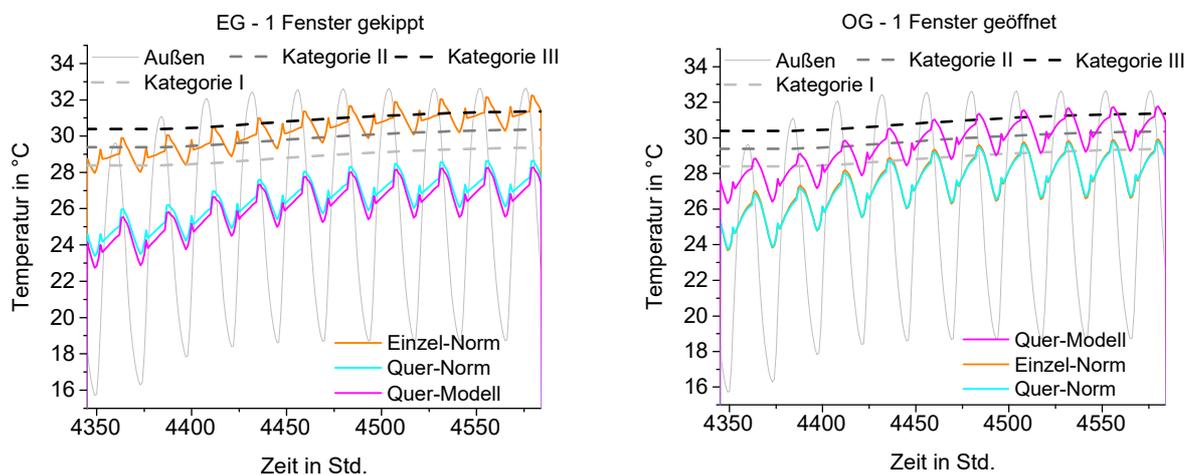
Die Betrachtung des Erdgeschoßraumes mit 4 fixverglasten und 1 gekippten Fenster (linkes Bild) zeigt, dass die operative Temperatur für „Norm-Quer“ im Bereich von „Modell-Quer“ bzw. leicht darüber liegt, während „Norm-Einzel“ deutlich darüber liegt. Bezüglich der Klassifizierung der operativen Temperatur nach den Komfortkriterien der EN 15251 kann aus dem Diagramm herausgelesen werden, dass die Maximalwerte von „Modell-Quer“ und „Norm-Quer“ während der gesamten Hitzewelle in Kategorie I liegen. Die operativen Temperaturen von „Norm-Einzel“ liegen am Beginn der Hitzewelle in Kategorie III und am Ende der Hitzewelle in der Kategorie IV.

Die Betrachtung des Obergeschoßraumes mit 4 fixverglasten und 1 geöffneten Fenster (rechtes Bild) zeigt, dass die operative Temperatur für „Norm-Einzel“ im Bereich von „Norm-Quer“ bzw. leicht darüber liegt aber insgesamt deutlich unter der operativen Temperatur für „Modell-Quer“. Nach den Komfortkriterien der EN 15251 liegen die Tagesmaxima der operativen Temperatur bei „Modell-Quer“ am Beginn der Hitzewelle in Kategorie II und am Ende der Hitzewelle in der Kategorie IV. Die Tagesmaxima der

operativen Temperatur von „Norm-Einzel“ und „Norm-Quer“ liegen am Beginn der Hitzewelle in Kategorie I und am Ende der Hitzewelle in Kategorie II.

Die Abstände zwischen den operativen Temperaturen während einer 10-tägigen Hitzewelle entsprechen den Abständen der operativen Temperaturen für einen periodischen Tag (siehe 4.4.2.4). Alle Kurvenverläufe der operativen Temperatur zeigen vom Beginn bis zum Ende der Hitzewelle einen leichten Anstieg, ausgehend von einem hohen Anfangsniveau am Beginn.

Vergleicht man den Maximalwert der Außentemperatur und den Maximalwert der operativen Temperaturen, so zeigt sich bei den operativen Temperaturen ein verzögertes Ansteigen, das in allen Berechnungsmodellen gleich ist. Der verzögerte Anstieg zeigt die speicherwirksame Masse der Konstruktion.



**Abb. 55: Vergleich der operativen Raumtemperaturen für vier fix verglaste und ein geöffnetes Fenster im Erdgeschoß während einer 10-tägigen Hitzewelle. Neben der Außentemperaturverteilung als dünne graue Linie wird auch die Raumkategorisierung nach EN 15251 als grau bzw. schwarz strichlierten Linien dargestellt. Die orangen Kurven zeigen den Verlauf der op. Raumtemperatur für die Berechnung nach Norm wenn nur ein einzelner Raum betrachtet wird. Die violette Kurve zeigt den Verlauf der operativen Raumtemperatur für die Berechnung nach Norm mit Berücksichtigung der Querlüftungssituation. Der Verlauf der operativen Raumtemperatur als Berechnungsergebnis des Simulationsmodells wird in cyan dargestellt. Die Vergleichswerte in den folgenden Tabellen (Tab. 45, Tab. 46) beziehen sich auf das Maximum der jeweiligen Temperaturkurve**

– **EG-gekippt**

In Tab. 45 kann beobachtet werden, dass die operative Temperatur für alle Rechenmodelle mit Erhöhung der Anzahl an gekippten Fenstern (Erhöhung der Lüftungsfläche) geringer wird.

**Gelb** hinterlegt sind alle Temperaturen, die der Kategorie I nach EN 15251:2007. **Orange** sind alle Temperaturen der Kategorie II gekennzeichnet. **Rot** markiert sind alle Temperaturen, die der Kategorie III zugeordnet sind. Alle Temperaturen der Kategorie IV sind **Grau** hinterlegt.

In der ersten Spalte können die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises der ÖNORM B 8110-3:2012 abgelesen werden, die in diesem Fall keine Ergebnisse liefern, da der vereinfachte Nachweis nur für stationäre Bedingungen brauchbare Ergebnisse liefert. Spalte 2 („Norm-Einzel“) zeigt die operativen Temperaturen aus der Berechnung der Situation als getrennte Einzelräume mit getrennter Lüftung (vgl. 4.4.2.3 – orange Pfeile). In Spalte 3 („Norm-Quer“) können die operativen Temperaturen für die Modellierung der Situation als thermisch getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung herausgelesen werden (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Cyan). Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen des Simulationsmodell mit Berücksichtigung der stockwerkübergreifende Querlüftung (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Magenta). Die Spalten 2, 3 und 4 sind geteilt. Die jeweils linken Werte zeigen die operativen Temperaturen am Beginn der Hitzewelle und die jeweils rechten Werte die operativen Temperaturen am Ende der Hitzewelle.

Aus der Tabelle kann abgelesen werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ und „Norm-Quer“ am Beginn und am Ende der Hitzewelle in der Kategorie I liegen.

Die operativen Temperaturen von „Einzel-Norm“ liegen am Beginn der Hitzewelle in Kategorie III und I und am Ende der Hitzewelle je nach Öffnungsfläche zwischen Kategorie I und IV.

Die Klassifizierung nach EN 15251 zeigt, dass die operativen Temperaturen im Erdgeschoß bei Anwendung der Querlüftungsmodelle „Modell-Quer“ und Quer-Norm“ während der gesamten Hitzewelle in der Kategorie mit dem besten Innenraumklima liegen, während bei Anwendung des Einzelraumlüftungsmodell „Einzel-Norm“ die operativen Temperaturen je nach Größe der Öffnungsfläche und Zeitpunkt innerhalb der Hitzewelle in zwischen bester und schlechtester Kategorien liegen.

Tab. 45: Anfangs- und Endwerte der operativen Temperatur von 1 bis 4 gekippten und 4 fixverglasten Erdgeschoßfenstern – Darstellung der operativen Temperaturen während einer 10-tägigen Hitzewelle mit Klassifizierung des thermischen Komforts nach EN 15251 bei zunehmender Öffnungsfläche. In der 1. Spalte sind die leeren Tabellenfelder als Ergebnis des vereinfachten Nachweises gem. ÖNORM B 8110-3 dargestellt, weil die Berechnung stationäre Fälle abbildet. Spalte 2 zeigt die operative Temperatur für die Abbildung der Situation als getrennte Einzelräume mit separater Lüftung. Spalte 3 zeigt die operative Raumtemperatur bei Abbildung der Situation als getrennte Einzelräume mit Querluftstrom. In der 4. Spalte sind die operativen Raumtemperaturen der Situations unter Anwendung des Simulationsmodells mit Berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung. In Gelb sind alle operative Raumtemperaturen der Kategorie I (siehe ÖNORM EN 15251) markiert. Orange sind alle Raumtemperaturen gekennzeichnet die der Kategorie II zugeordnet sind. Rot gekennzeichnet sind alle operative Raumtemperaturen der Kategorie III. Grau markierte operative Innenraumtemperaturen liegen in der Kategorie IV. Dunkelblau hinterlegt sind jene Bereiche die nicht berechnet werden können.

Gekippt – Offen	Vereinfachter NW	T <sub>op_Norm- Einzel</sub> in °C		T <sub>op_Norm- Quer</sub> in °C		T <sub>op_Modell- Quer</sub> in °C	
EG – 1 Fenster	-	29,90	32,24	25,97	28,66	25,53	28,28
EG – 2 Fenster	-	28,19	30,69	24,44	27,20	24,39	27,18
EG – 3 Fenster	-	27,18	29,76	23,72	26,51	23,88	26,69
EG – 4 Fenster	-	26,48	29,11	23,36	26,19	23,58	26,40

– **OG-geöffnet**

In Tab. 46 kann beobachtet werden, dass die operative Temperatur für alle Rechenmodelle mit Erhöhung der Anzahl an gekippten Fenstern (Erhöhung der Lüftungsfläche) geringer wird.

**Gelb** hinterlegt sind alle Temperaturen die der Kategorie I nach EN 15251:2007. **Orange** sind alle Temperaturen der Kategorie II gekennzeichnet. **Rot** markiert sind alle Temperaturen, die der Kategorie III zugeordnet sind. Alle Temperaturen der Kategorie IV sind **Grau** hinterlegt.

In der ersten Spalte können die Ergebnisse des vereinfachten Nachweises der ÖNORM B 8110-3:2012 abgelesen werden, die in diesem Fall keine Ergebnisse liefern, da der vereinfachte Nachweis nur für stationäre Bedingungen brauchbare Ergebnisse liefert. Spalte 2 („Norm-Einzel“) zeigt die operativen Temperaturen aus der Berechnung der Situation als getrennte Einzelräume mit getrennter Lüftung (vgl. 4.4.2.3 – orange Pfeile). In Spalte 3 („Norm-Quer“) können die operativen Temperaturen für die Modellierung der Situation als thermisch getrennte Räume mit gemeinsamer Querlüftung herausgelesen werden (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Cyan). Spalte 4 zeigt die operativen Temperaturen des Simulationsmodell mit Berücksichtigung der stockwerkübergreifende Querlüftung (vgl. 4.4.2.3 – Pfeile in Magenta). Die Spalten 2, 3 und 4 sind geteilt. Die jeweils linken Werte zeigen die operativen Temperaturen am Beginn der Hitzewelle und die jeweils rechten Werte die operativen Temperaturen am Ende der Hitzewelle.

Der Tabelle kann entnommen werden, dass die operativen Temperaturen von „Modell-Quer“ am Beginn der Hitzewelle Kategorie I bis II zugeordnet werden und am Ende Hitzewelle je nach Öffnungsfläche Kategorie I bis IV.

Die operativen Temperaturen von „Norm- Einzel“ und „Norm-Quer“ liegen am Beginn der Hitzewelle in Kategorie I und am Ende der Hitzewelle je nach Öffnungsfläche in Kategorie I bis II.

Die Klassifizierung nach EN 15251 zeigt, dass die operativen Temperaturen im Obergeschoß bei Anwendung des Querlüftungsmodells „Modell-Quer“ je nach Größe der Öffnungsfläche und Zeitpunkt innerhalb der Hitzewelle zwischen bester und schlechtester Kategorien liegen, während bei Anwendung des Einzelraum- und Querlüftungsmodells nach Norm die operativen Temperaturen je nach Öffnungsfläche in den besten bzw. zweitbesten Kategorien für die Erwartungen an das Innenraumklima liegen.

**Tab. 46: Anfangs- und Endwerte der operativen Temperatur von 1 bis 4 geöffneten und 4 fixverglasten Obergeschoßfenstern – Darstellung der operativen Temperaturen während einer 10-tägigen Hitzewelle mit Klassifizierung des thermischen Komforts nach EN 15251 bei zunehmender Öffnungsfläche. In der 1. Spalte sind die leeren Tabellenfelder als Ergebnis des vereinfachten Nachweises gem. ÖNORM B 8110-3 dargestellt, weil die Berechnung stationäre Fälle abbildet. Spalte 2 zeigt die operative Temperatur für die Abbildung der Situation als getrennte Einzelräume mit separater Lüftung. Spalte 3 zeigt die operative Raumtemperatur bei Abbildung der Situation als getrennte Einzelräume mit Querluftstrom. In der 4. Spalte sind die operativen Raumtemperaturen der Situations unter Anwendung des Simulationsmodells mit berücksichtigung der stockwerksübergreifenden Querlüftung. In Gelb sind alle operative Raumtemperaturen der Kategorie I (siehe ÖNORM EN 15251) markiert. Orange sind alle Raumtemperaturen gekennzeichnet die der Kategorie II zugeordnet sind. Rot gekennzeichnet sind alle operative Raumtemperaturen der Kategorie III. Grau markierte operative Innenraumtemperaturen liegen in der Kategorie IV. Dunkelblau hinterlegt sind jene Bereiche die nicht berechnet werden können.**

Gekippt – Offen	Vereinfachter NW	T <sub>op</sub> _Norm- Einzel in °C		T <sub>op</sub> _Norm- Quer in °C		T <sub>op</sub> _Modell- Quer in °C	
OG – 1 Fenster	-	27,01	29,92	26,85	29,80	28,85	31,77
OG – 2 Fenster	-	25,52	28,46	25,37	28,35	27,41	30,37
OG – 3 Fenster	-	24,83	27,79	24,69	27,68	26,72	29,69
OG – 4 Fenster	-	24,44	27,41	24,31	27,30	26,30	29,28

#### 4.4.3 Schlüsse aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach B 8110-3

Aus dem Vergleich der operativen Temperaturen der thermischen Raumsimulation eines zweistöckigen Einfamilienhauses konnte unter Anwendung verschiedener Lüftungsmodellen die Ergebnisse des stockwerkübergreifenden Querlüftungsmodells plausibilisiert werden. Zusätzlich können aus dem Vergleich der verschiedenen Lüftungsmodelle im Zusammenhang mit den Verfahren zur Berechnung der operativen Temperatur die Ergebnisse der aktuellen Planungspraxis bewertet werden.

In Abschnitt 4.4.3.1 werden die Schlüsse für den periodisch wiederkehrenden Tag und in Abschnitt 4.4.3.2 die Schlüsse für die Hitzewelle diskutiert. Das Fazit unter 4.4.3.3 enthält die Zusammenfassung der Schlüsse aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach B 8110-3.

#### **4.4.3.1 Periodischer Tag**

Die Diskussion der Rechenergebnisse für einen periodisch wiederkehrenden Tag stellt eine gute Vergleichsmöglichkeit aller untersuchten Rechenverfahren dar, da die Ergebnisse für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung nach ÖNORM B 8110-3:2012 für einen periodisch wiederkehrenden Tag berechnet werden. Der Vergleich der bisherigen Nachweisverfahren mit dem neu entwickelten und validierten Rechenmodell soll zeigen, welche Bereiche das neue Modell zusätzlich oder anders abdecken kann.

Im Erdgeschoß bilden das Querlüftungsmodell und der Berechnungsansatz unter Berücksichtigung des Querluftstroms in einem getrennten Einzelraum die Situation gleich ab. Die Ergebnisse der operativen Temperatur beider Modelle stimmen deswegen überein, weil die Querluftströme in beiden Modellen ähnlich berechnet werden und es keinen zusätzlichen Wärmeeintrag von einem Raum in den anderen Raum gibt.

Im Vergleich dazu liefert der Ansatz mit Berücksichtigung der Einzelraumlüftung im getrennten Einzelraum zu hohe operative Temperaturen, weil bei der Einzelraumlüftung gekippte Fenster und kein Querluftstrom berücksichtigt werden.

Im Obergeschoß bildet das Querlüftungsmodell die berechnete Situation mit höheren Werten ab als die Berechnungsansätze mit den unterschiedlichen Lüftungsmodellen in getrennten Einzelräumen. Im Querlüftungsmodell wird der Wärmeeintrag der Luft vom Erdgeschoß ins Obergeschoß sowie die thermische Kopplung der beiden Räume berücksichtigt.

Werden die beiden Lüftungsmodelle im getrennten Einzelraum miteinander verglichen, so zeigen sich keine Unterschiede in der operativen Temperatur. Daraus kann abgeleitet werden, dass beide Luftvolumenströme in getrennten Einzelräumen nahezu ident sind und der Luftvolumenstrom für eine Querlüftungssituation mit gekippten Erdgeschoßfenstern und geöffneten Obergeschoßfenstern ähnlich ist wie die Einzelraumsituation mit geöffneten Fenstern im Obergeschoß.

Im Vergleich der verschiedenen Berechnungsmodelle hat sich ebenfalls gezeigt, dass die operativen Temperaturen in einem linearen Verlauf mit steigender Öffnungsfläche sinken.

#### **4.4.3.2 Hitzewelle**

Die Kategorisierung nach EN 15251 bietet die Möglichkeit, den sommerlichen Komfort in Nutzungskategorien je nach Einsatzzweck der Räume in Abhängigkeit der Außentemperatur zu berechnen. Der Grenzwert von 27°C gemäß B 8110-3 ist dafür nicht geeignet, da der maximale Tagesmittelwert der Außentemperatur 23°C betragen darf und das Tagesmittel am Ende der Hitzewelle 26°C betrug.

Die Erkenntnisse aus den operativen Temperaturen während der Hitzewelle verhalten sich analog zu den Erkenntnissen aus den operativen Temperaturen an einem periodisch wiederkehrenden Tag (siehe 4.4.3.1). Die Klassifizierung nach EN 15251 teilt die Ergebnisse nicht in „sommertauglich“ und „nicht sommertauglich“ sondern teilt die operativen Temperaturen, je nach Nutzungsanforderung, in Abhängigkeit der mittleren Außentemperatur, in Kategorien ein.

Aus dem Vergleich der operativen Temperaturen am Beginn der Hitzewelle und der operativen Temperaturen an einem periodisch wiederkehrenden Tag können die Unterschiede der Kategorisierung herausgelesen werden.

Aus dem leicht verzögerten Anstieg der operativen Temperaturen kann die Wirkung der speicherwirksamen Masse der Konstruktion beobachtet werden, die sich für alle Lüftungsmodelle gleich auswirkt. Die Unterschiede in der Berechnung der Lüftung können anhand des Temperaturniveaus der operativen Temperatur und dem Temperaturabfalls während der Nachtlüftung beobachtet werden.

#### **4.4.3.3 Fazit**

Durch die Anwendung des stockwerkübergreifenden Querlüftungsmodells auf ein zweistöckiges Einfamilienhaus konnten die Ergebnisse des Lüftungsmodells plausibel dargestellt werden. Die Ähnlichkeiten in den Ergebnissen für den Erdgeschoßraum bei Anwendung der Querlüftung (siehe 4.4.3.1) zeigen, dass das neu gefundene Modell mit den bisher in der Praxis verwendeten Ansätzen übereinstimmt und dass die bisher verwendeten Ansätze in bestimmten Situationen brauchbare Ergebnisse liefern.

Die Unterschiede in der Berechnung der Lüftung zwischen stockwerksübergreifenden Querlüftungsmodell und den Berechnungsverfahren der Norm zeigen, dass in bestimmten Situationen bestimmte Randbedingungen, wie der Wärmeeintrag bei Querlüftung und die thermische Kopplung zwischen den Räumen, nicht berücksichtigt werden (siehe Abb. 54 und Abb. 55).

## 5 Wissenschaftlicher Beitrag

In den bisherigen Arbeiten wurden Luftströmungen in Räumen mit stationären Ansätzen, Luftstromknotennetzwerken oder finiten Volumenelementen betrachtet. Es wurden Luftströmungen in einzelnen Räumen oder Querlüftungssituationen untersucht. In einem Großteil der Fälle wurden die gefundenen Modelle auch anhand von Messungen validiert. In rund der Hälfte der Arbeiten wurden die thermisch- induzierten Luftströmungen untersucht, während in der anderen Hälfte die Luftströmungen zufolge windinduzierter Durchströmung untersucht wurde. Der Einfluss von Insektengitter auf die Durchströmung von Räumen und das Innenklima wurde mittels Berechnungen und Messungen an Gewächshäusern untersucht. (Ravikumar und Prakash 2011) berechnete die Wirkung von Insektengittern bei Querlüftung mit einem CFD-Modell.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit Ansätzen aus der Literatur und bisher verwendeten Netzwerkmodellen ein stockwerksübergreifendes Querlüftungsmodell für Einfamilienhäuser nachgebildet. Erkenntnisse aus Untersuchungen mit finiten Volumenelementen bei der Durchströmung von Räumen oder in Querlüftungssituationen wurden bei der Modellerstellung oder der Definition von Randbedingungen eingebracht.

Um den Insektenschutz im Querlüftungsmodell mittels Parametern quantifizieren zu können, wurden Erkenntnisse aus Arbeiten über das Durchströmungsverhalten von Insektenschutzgittern als Ausgangspunkt herangezogen.

Der Windeinfluß wurde im Modell vernachlässigt, um die Ergebnisse als Extremwerte für die Planung des sommerlichen Wärmeschutzes einsetzen zu können.

Der wissenschaftliche Beitrag in der vorliegenden Arbeit ist die

- Berücksichtigung von Totzonen in Luftstromknotenmodellen

und die

- Berücksichtigung von Insektengittern in Luftstromknotenmodellen

### 5.1 Luftstromknotenmodelle mit Berücksichtigung von Totzonen

Bei den Tracergasmessungen wurde sichtbar, dass die verschiedenen Bereiche eines Raumes unterschiedlich stark durchströmt sind. Diese Beobachtung deckte sich sowohl mit Erkenntnissen aus eigenen qualitativen Durchströmungsuntersuchungen (siehe 4.1.4.4) und Arbeiten, die mit Finiten Volumenelementen und Windkanalmessungen unterschiedliche starke Luftströmungen z.B. zufolge Windeinfluss in verschiedenen Bereichen von Räumen sichtbar machen. (siehe 2.1.7, Nikolopoulos et al. 2012).

Bei der Berechnung der Tracergaskonzentration und des Luftvolumenstroms zufolge Einzelraumlüftung und Querlüftung wurde sichtbar, dass die Annahme des gesamten Raumvolumens als stark durchströmter Bereich zu hohe Ergebnisse für den Luftvolumenstrom liefert. Eine Berücksichtigung der Totzonen lieferte genauere Ergebnisse für den Luftvolumenstrom bei einer raschen Berechnungsmöglichkeit von einer oder mehrere durchströmten Zonen.

## **5.2 Berücksichtigung von Insektengittern im Luftstromknotenmodell**

Um die Durchströmungseigenschaften von unterschiedlichen Öffnungen (z.B. gekippte oder geöffnete Fenster) bei thermisch-induzierten Luftwechsel zu berücksichtigen, wurde das Durchströmungsverhalten an den Öffnungen mittels Exponenten in der Berechnung des Massenstroms geregelt. In der Literatur wurden Werte für laminare und turbulente Strömungen angeführt (siehe 4.2.1). Diese Annahmen dienten als Ausgangspunkt, von dem aus die Anpassung der Werte durchgeführt wurde. Durch die Anpassung der Exponenten an die verschiedenen Öffnungstypen konnten in der Massenstromberechnung verbesserte Übereinstimmungen zwischen gemessener und berechneter Tracergaskonzentrationen erreicht werden.

Für die Berechnung des Luftvolumenstromes bei der Anwendung von Insekten- und Pollenschutzgittern wurde mittels eines geeigneten Ansatzes für die Berechnung des effektiven Lüftungsquerschnitts (siehe 4.2.3, Maas 1995) die geometrische Abminderung von Insektengittern abgebildet. Durch die Wahl von passenden Exponenten wurde zusätzlich das Durchströmungsverhalten berücksichtigt und sorgte für realistischere Werte bei der Berechnung der Tracergaskonzentration.

Dadurch ist es möglich, das Strömungsverhalten von Insektengittern einfach und genau in Luftstromknotenmodellen abzubilden und die einfache und rasche Berechnungsmöglichkeit für die tägliche Planungspraxis zu nutzen.

Die gefundenen Zusammenhänge wurden anhand von Messungen von Einzelraumsituationen validiert. Für die Berechnung der Querlüftungssituation wurden angenommen, dass die Strömungsparameter nicht wesentlich anders sind.

## **6 Ausblick**

Am Ende dieser Untersuchung finden sich, trotz gründlicher Auseinandersetzung mit dem Thema stockwerksübergreifende Querlüftung in Einfamilienhäusern, einige Anknüpfungspunkte für weiterführende Überlegungen.

In allen betrachteten Lüftungssituationen ist offen, wie sich die schwach durchströmten Bereiche auswirken (6.1).

Bei der Durchströmung durch mehrere Zonen hat sich gezeigt, dass es Forschungsbedarf bei der Fragen beim Austausch zwischen den Zonen (6.2) und beim Einschwingvorgang am Beginn einer Querlüftung (6.3) gibt.

Beim Vergleich zwischen Messung und Berechnung wurde sichtbar, dass Messungen unter durchmischten Bedingungen eine höhere Übereinstimmung zeigen. Dadurch stellt sich die Frage, ob nicht Modelle mit feinerer Auflösung der Räume notwendig sind (6.4).

### **6.1 Auswirkung der schwach belüfteten Bereiche des durchströmten Raumvolumens**

In der Berechnung der Luftdurchströmung wurden die schwach durchströmten Bereiche vernachlässigt (siehe 4.1.5.1 und 0). In Fällen mit sehr guter Übereinstimmung hat sich gezeigt, dass diese Annahme richtig ist (siehe 4.3.1).

Was passiert, wenn die schwach durchströmten Bereiche mitberücksichtigt werden und ob dadurch die Genauigkeit bei der Berechnung des Luftvolumenstromes gesteigert wird, kann Ausgangspunkt für weiterführende Überlegungen sein.

### **6.2 Austausch zwischen den Zonen bei Querlüftung**

Im Modell wird angenommen, dass die Summe der hinein- und hinausströmenden Massenströme gleich ist (siehe 4.2.1). Bei der Einzelraumdurchströmung zeigt diese Annahme brauchbare Ergebnisse. Bei der Querdurchströmung hat sich gezeigt, dass die vollständige Durchmischung nicht in allen Zonen stattfindet. Es wurde beobachtet, dass der angenommene vollständige Austausch in Zonen mit einer Öffnung nach Außen stärker stattfindet, als in Zonen die dazwischen liegen.

Die rechnerische Betrachtung des Luftaustauschs zwischen den Zonen bei stockwerksübergreifenden Querlüftung benötigt eine weiterführende wissenschaftliche Auseinandersetzung.

### **6.3 Einschwingvorgang bei Querlüftung**

Bei der Auswertung der gemessenen und berechneten Tracergaskonzentrationskurven wurde sichtbar, dass die Reihenfolge der Fensteröffnung bei Querlüftung, relevant ist. In den Auswertungen hat sich gezeigt, dass die Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Tracergaskonzentration besser ist, wenn die Erdgeschoßfenster vor den Obergeschoßfenstern geöffnet werden (vgl. Kurvenauswertung in 7.5). Ist die Reihenfolge beim Fenster öffnen umgekehrt, zeigt sich, dass in den Räumen mit den geöffneten Fenster ein Austausch stattfindet und sich die Querlüftung verzögert einstellt (vgl. Kurvenauswertung in 7.4).

Die Untersuchung des Einschwingvorgangs bei Querlüftung zufolge verschiedener Fensteröffnungssituationen kann der Beginn für weitere Forschungsarbeit sein.

### **6.4 Ist eine feinere Auflösung des stockwerkübergreifenden Querlüftungsmodells notwendig?**

Das Modell der stockwerkübergreifenden Querlüftung in der vorliegenden Arbeit basiert auf der Bernoulligleichung und der Annahme der vollständigen Durchmischung der Luft innerhalb eines Raumes. Der Abbildung der Durchströmung mittels Luftstromknoten wurde gewählt, um sehr rasch ein Ergebnis für die stockwerksübergreifende Querlüftung zu berechnen. Aus dem Grund wurden die Luftströmungen nicht mit finiten Massen- oder Volumenelementen abgebildet.

Das Knotenmodell zeigt grundsätzlich eine brauchbare Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Bei durchmischten Bedingungen kann prinzipbedingt eine höhere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung beobachtet werden als bei natürlich belüfteten Bedingungen.

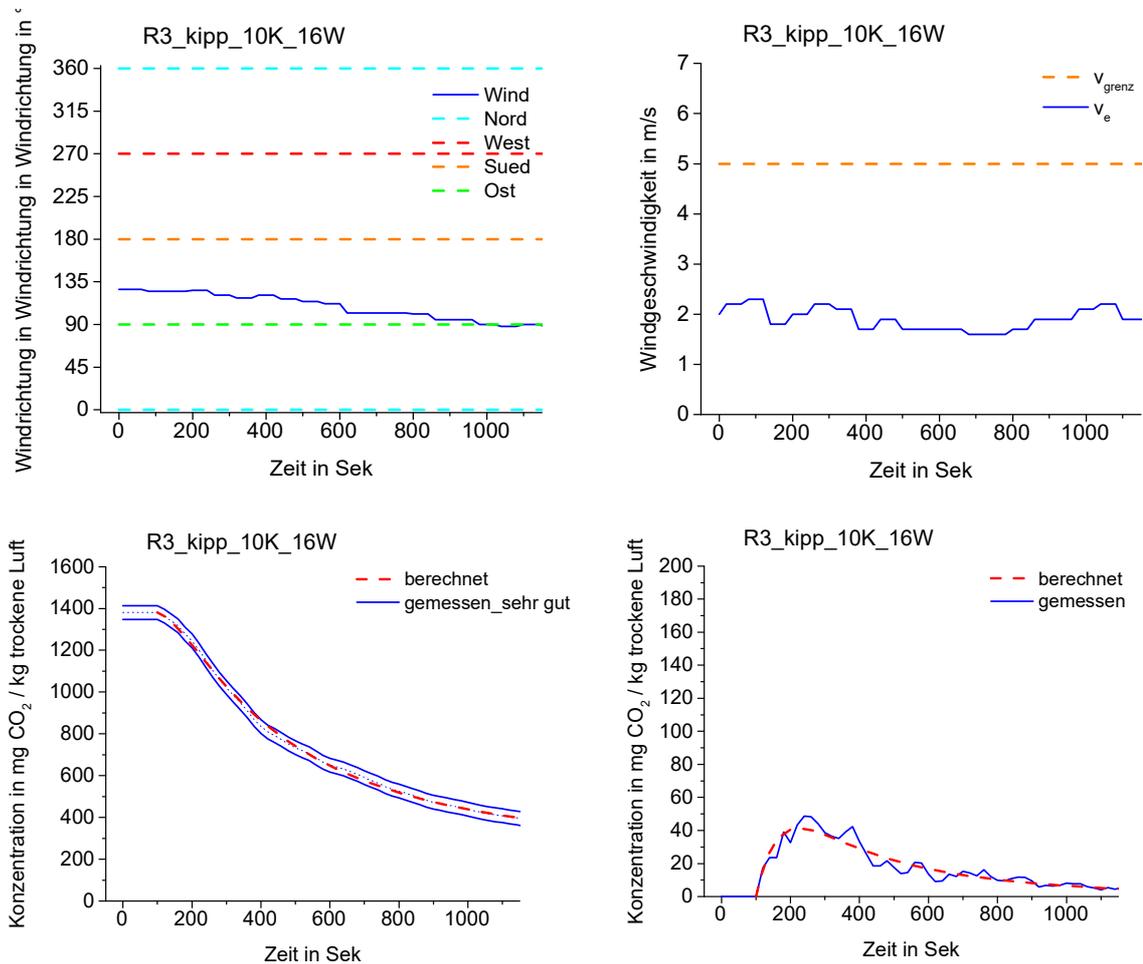
In der Literatur finden sich Modelle, die eine Brücke zwischen einfacher Modellierung und umfangreicher Darstellung herstellen (Norrefeldt 2013) - VEPZO. Mit diesem Modell kann der Luftvolumenstrom in Räumen durch Unterteilung in Unterzonen mit einer höheren Genauigkeit berechnet werden.

Wird dieses Modell auf mehrere Räume erweitert, kann die Luftdurchströmung zwischen den Zonen vergleichsweise rasch und genau abgebildet werden. Möglicherweise lassen sich dadurch auch die offenen Fragen in (6.1, 6.2 und 6.3) beantworten. Erforscht werden sollte auch die Frage wie aufwendig so ein Modell in Anlehnung an VEPZO für die Anwendung in der täglichen Planungspraxis ist.

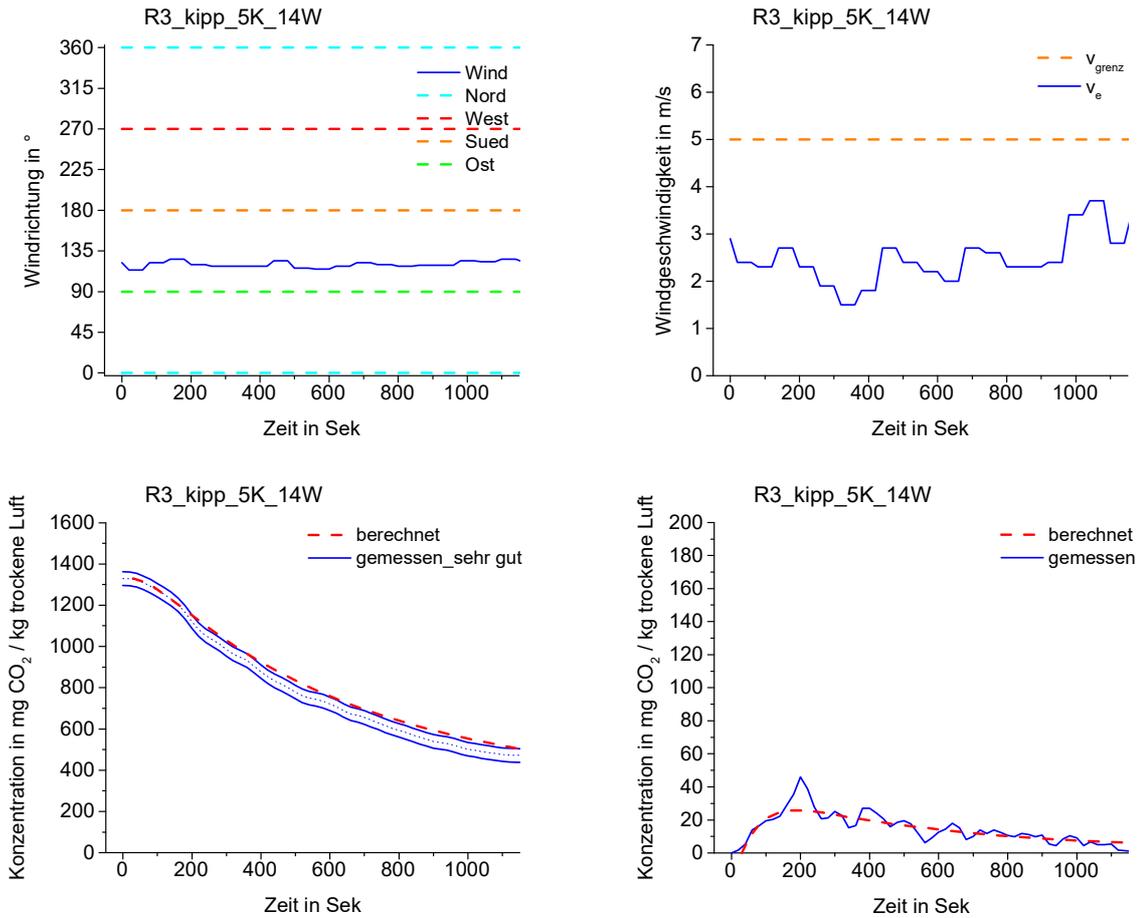
## 7 Anhang

### 7.1 Einzelraumdurchströmung, EG gekippt

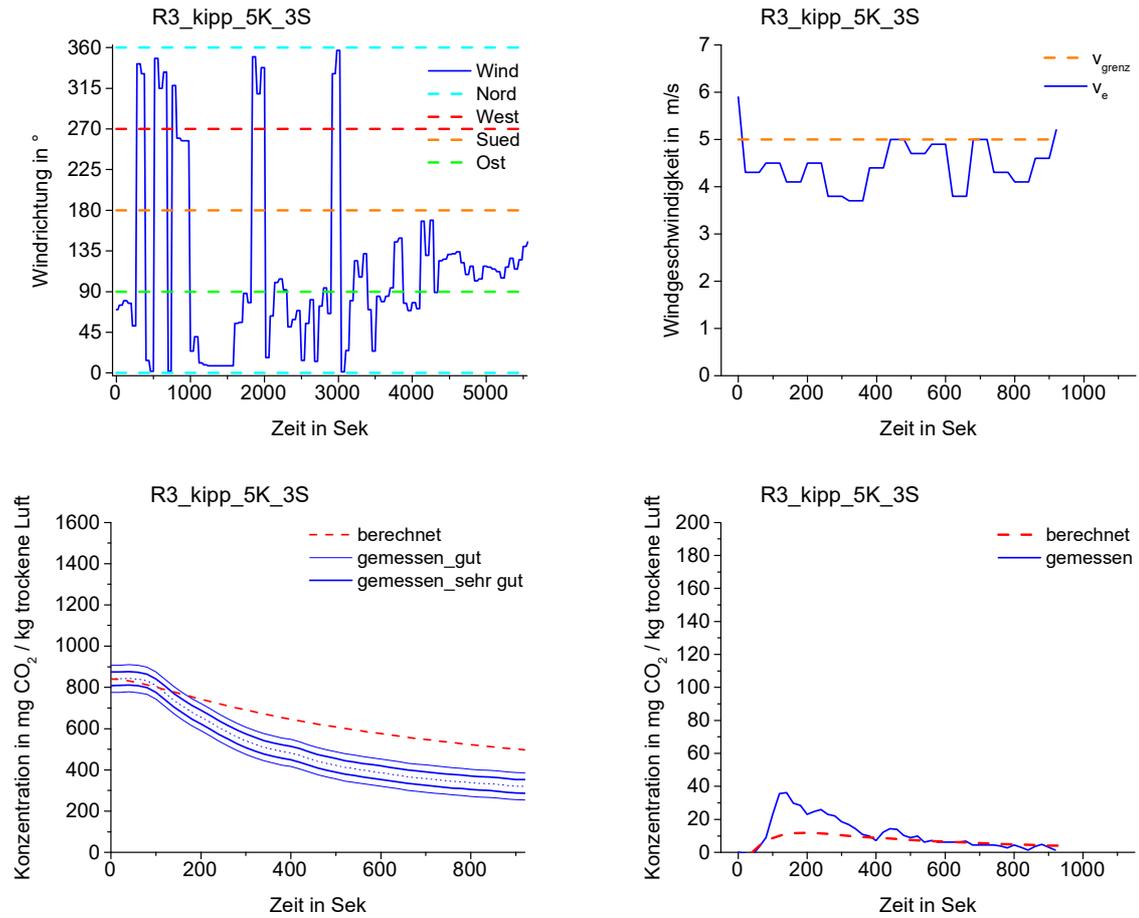
#### 7.1.1 Ohne Gitter



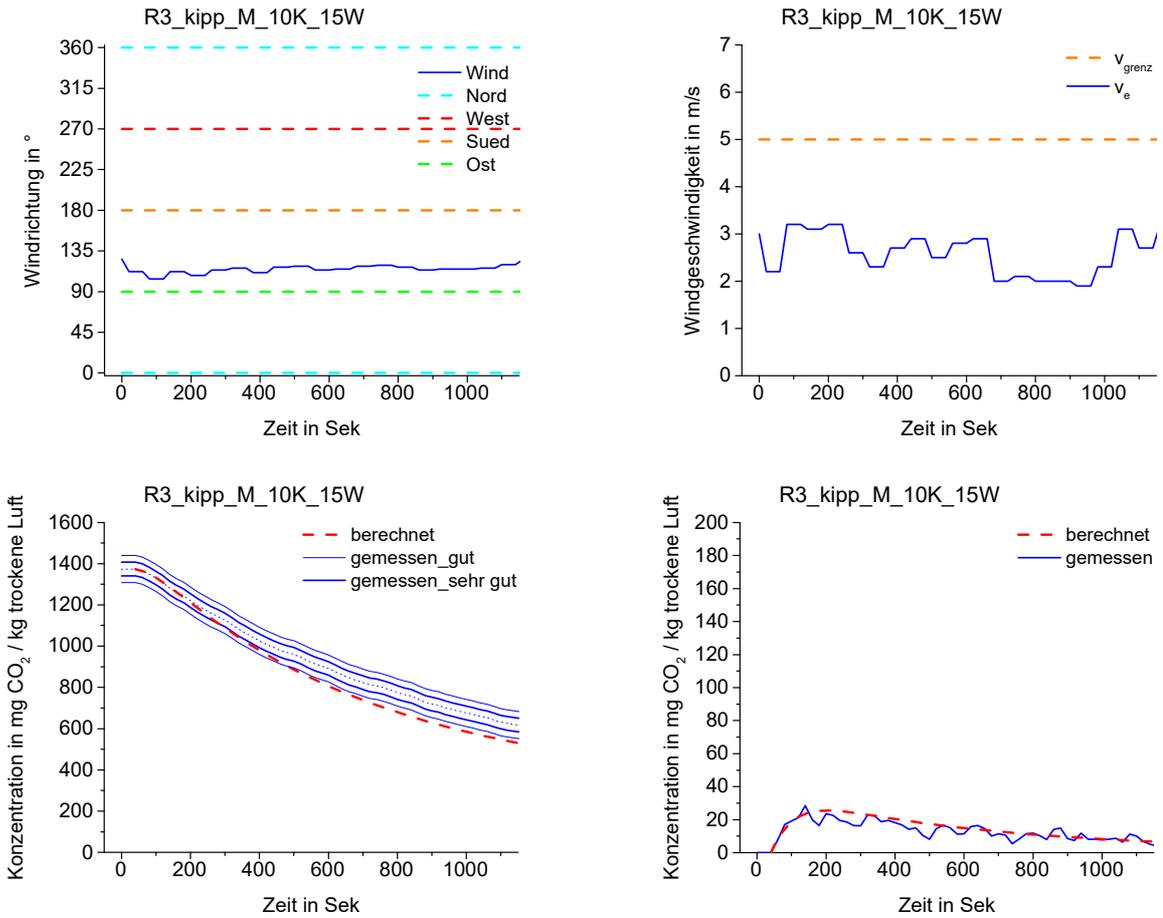
**Abb. 56:** Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßfenster ohne Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).



**Abb. 57: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster ohne Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

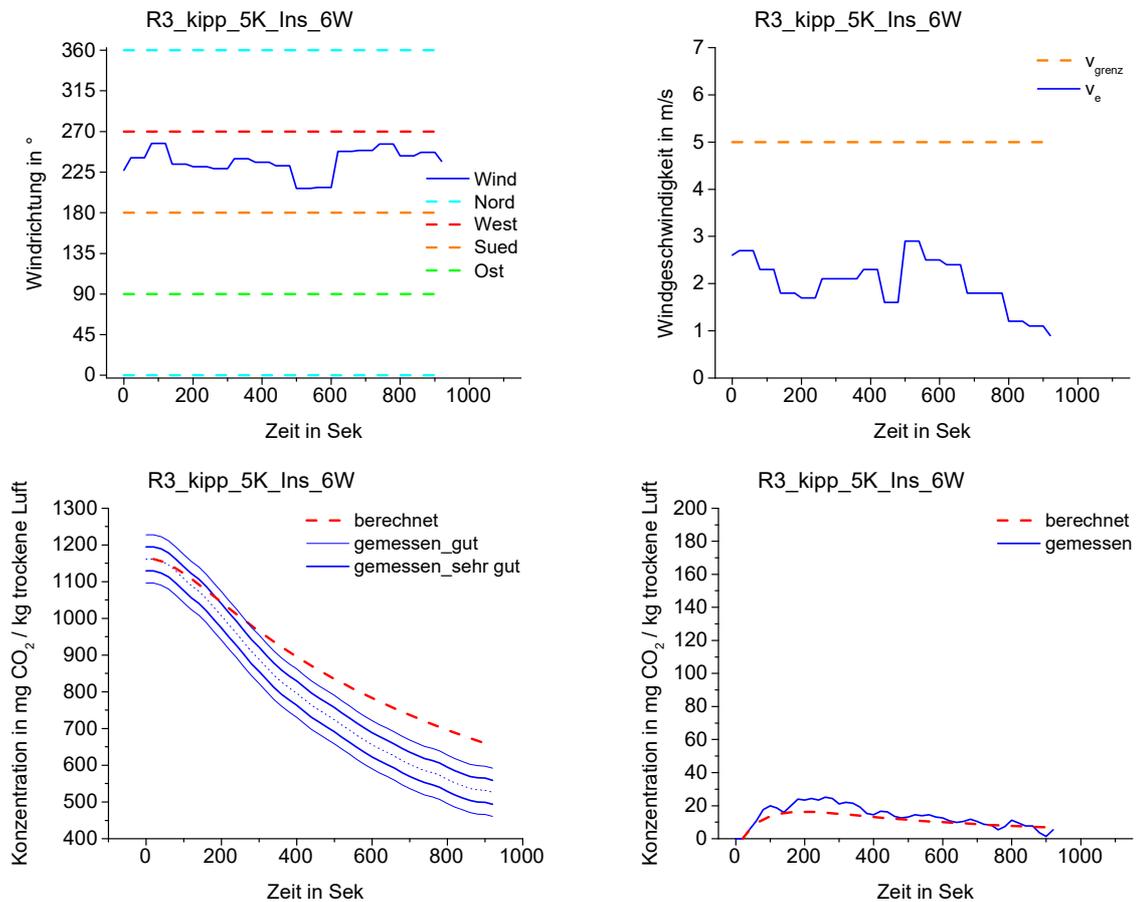


**Abb. 58: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster ohne Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

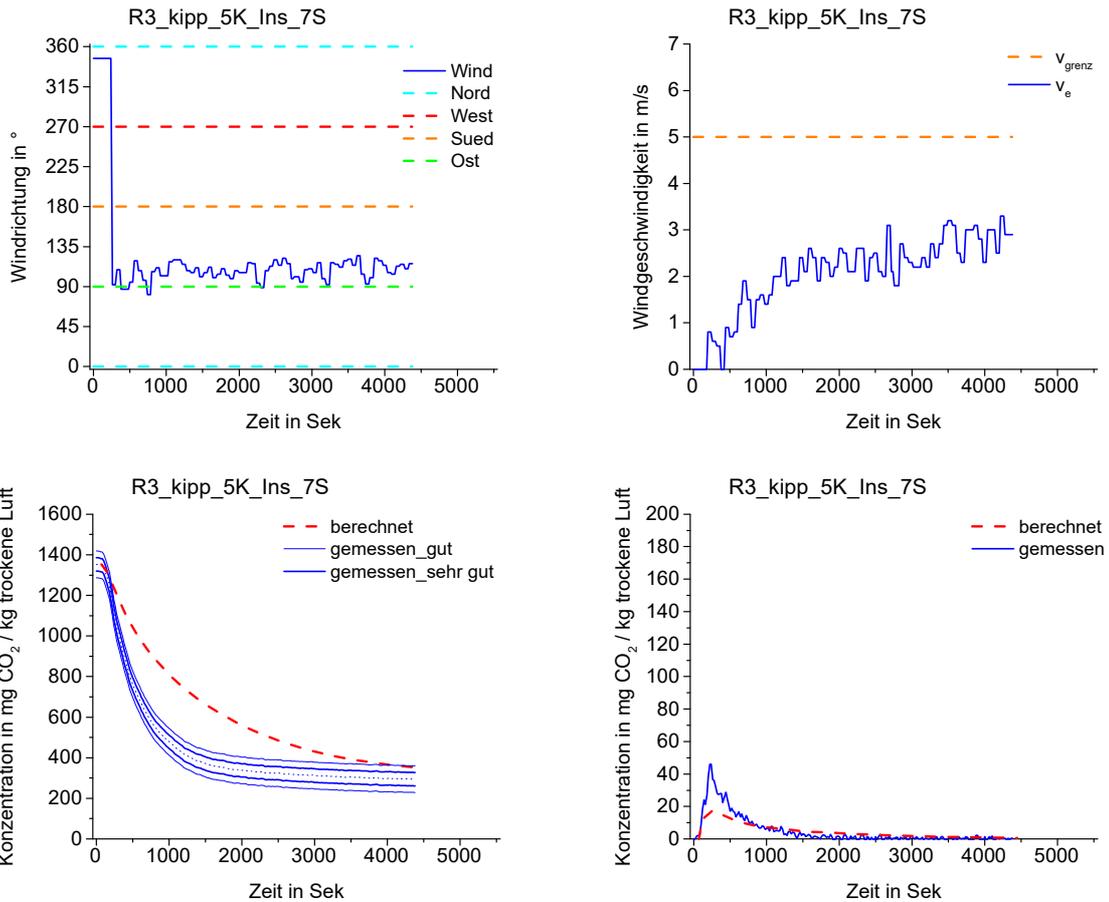


**Abb. 59:** Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).

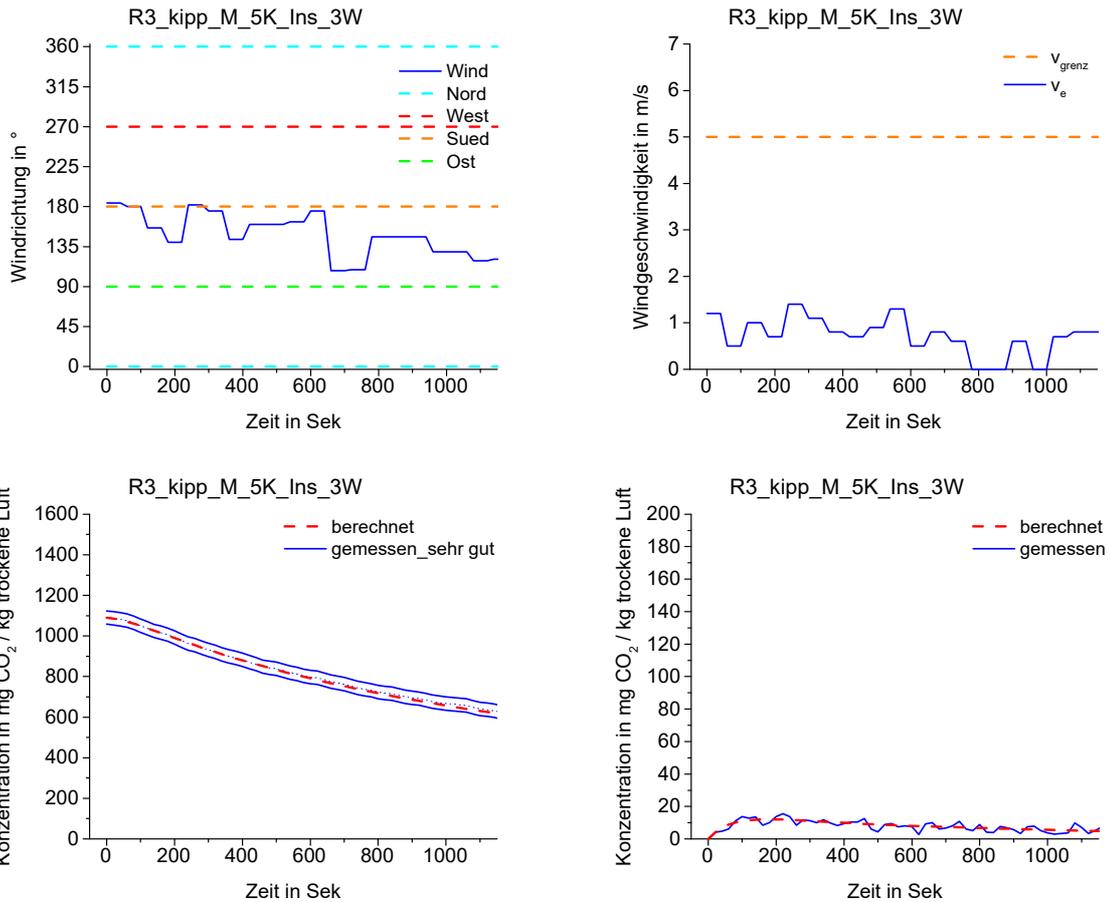
## 7.1.2 Mit Insektengitter



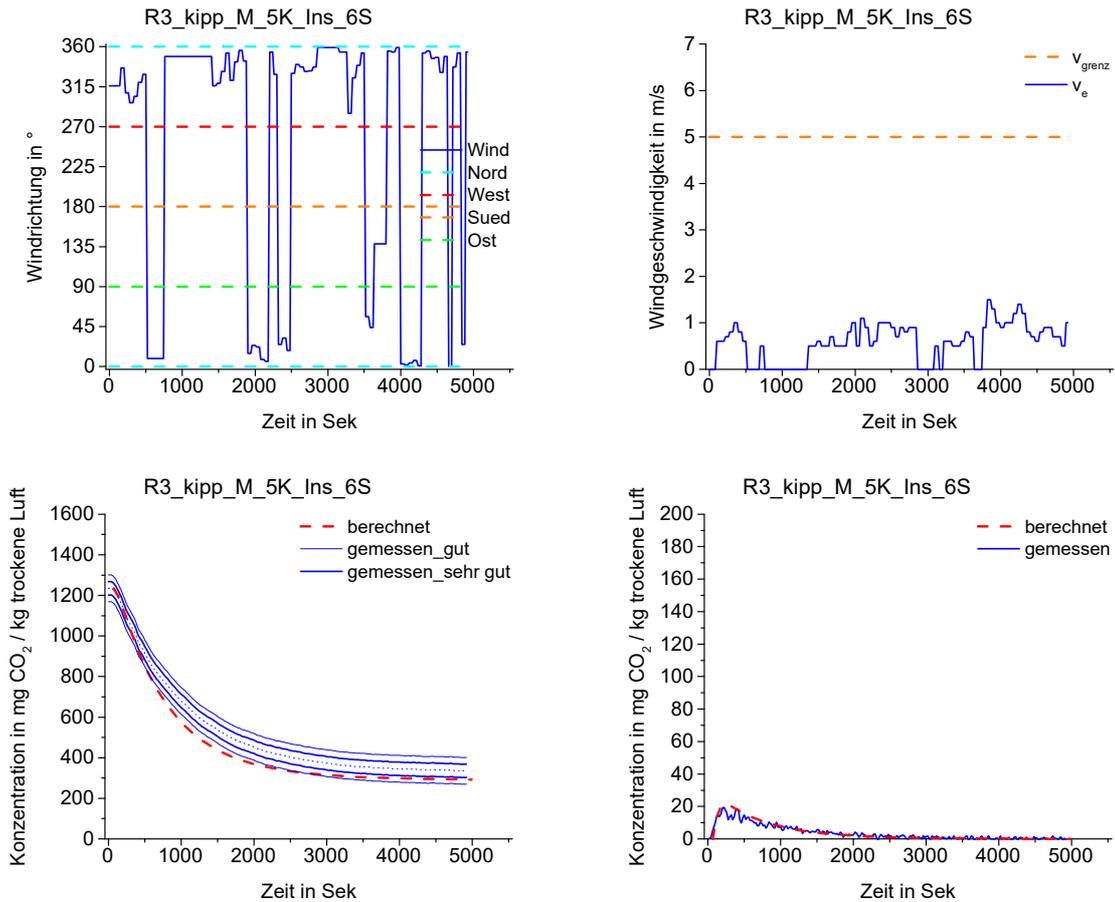
**Abb. 60:** Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).



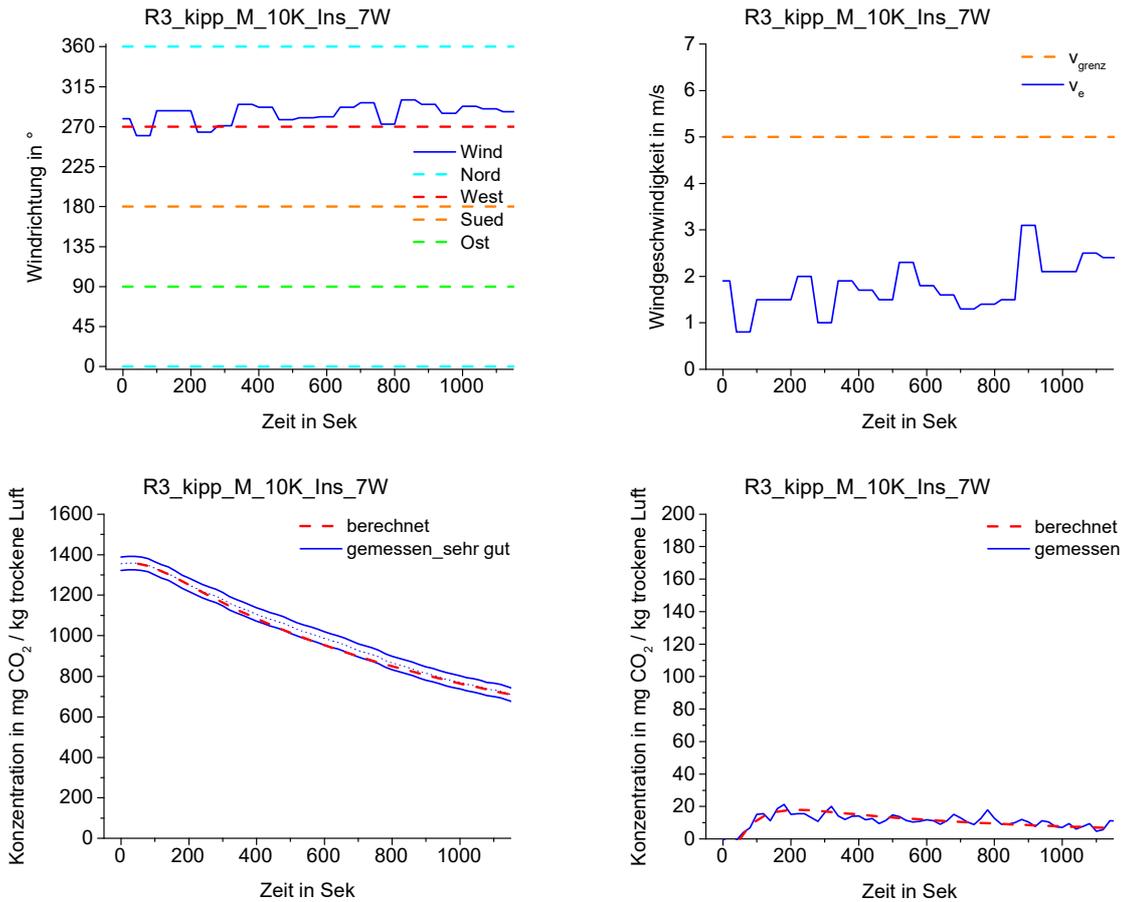
**Abb. 61: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 62: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

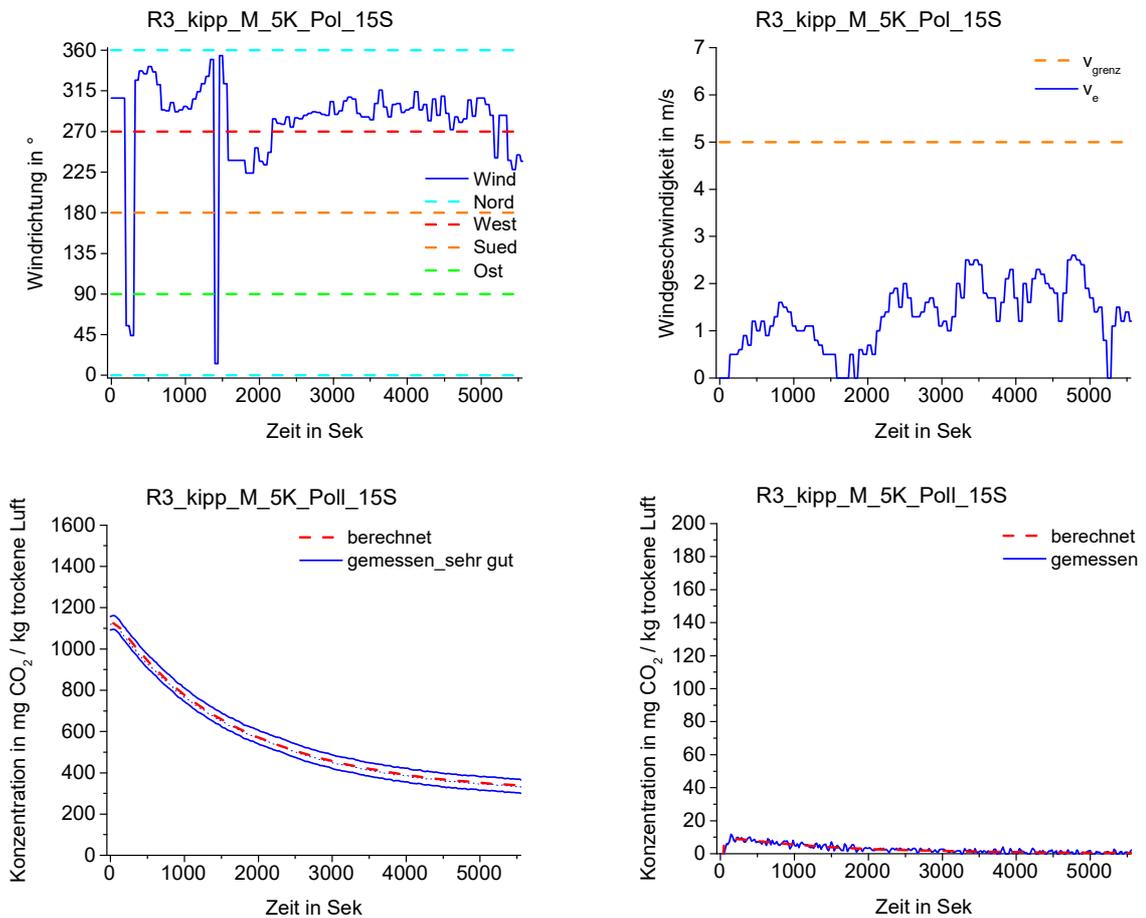


**Abb. 63: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

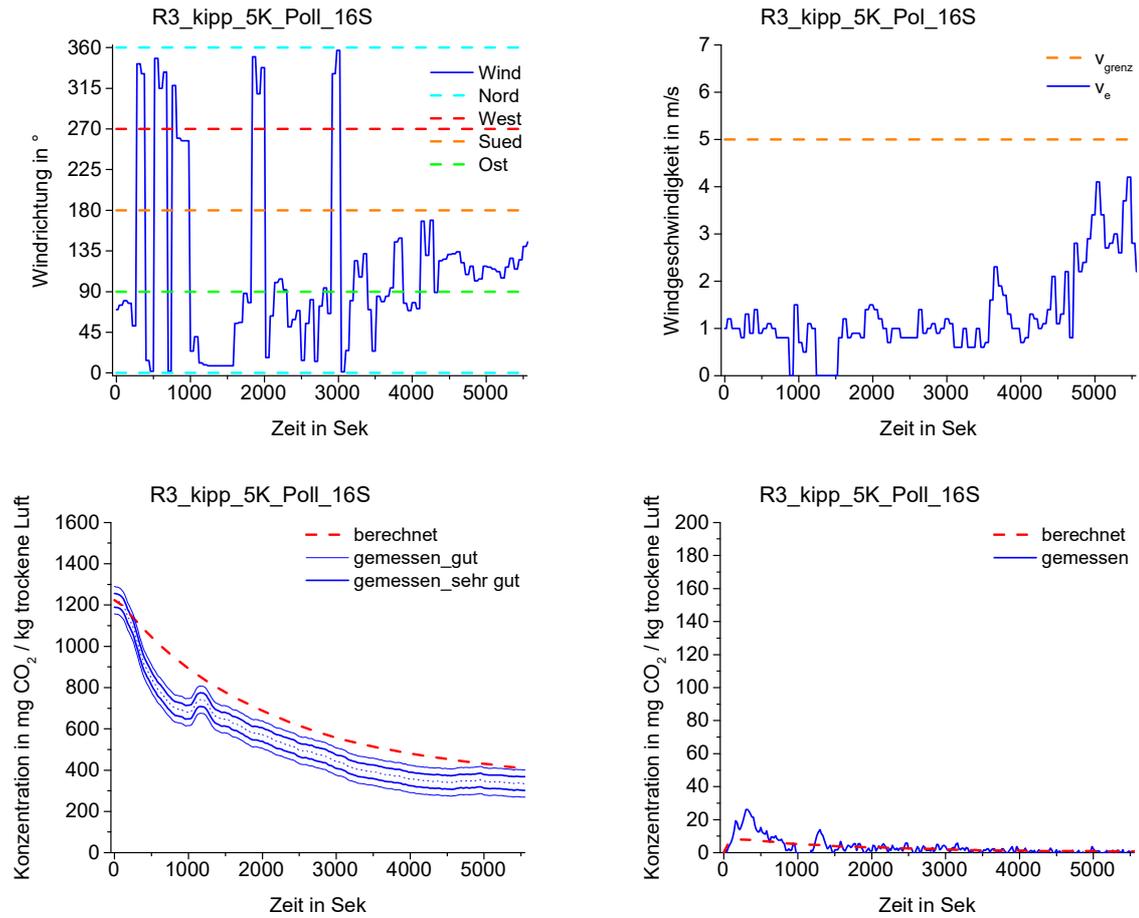


**Abb. 64: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

### 7.1.3 Mit Pollengitter



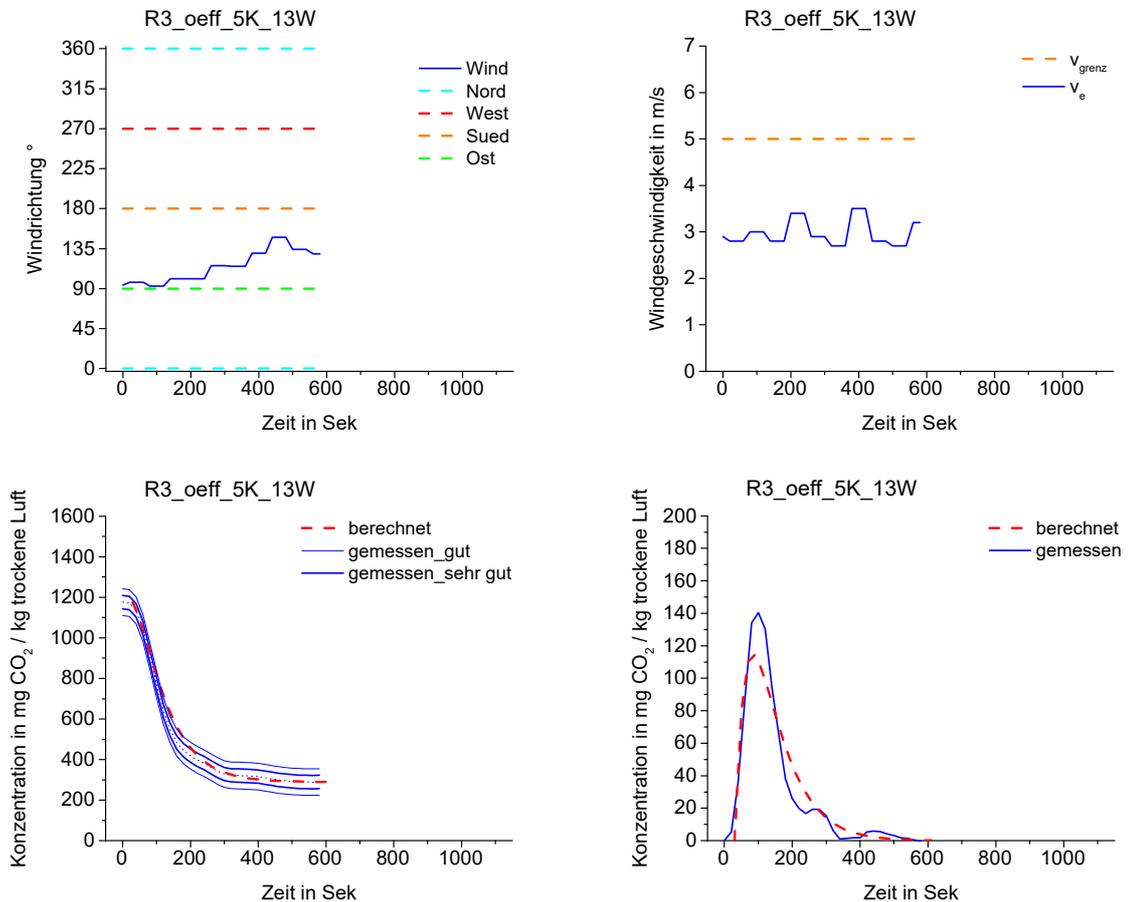
**Abb. 65: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Pollenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



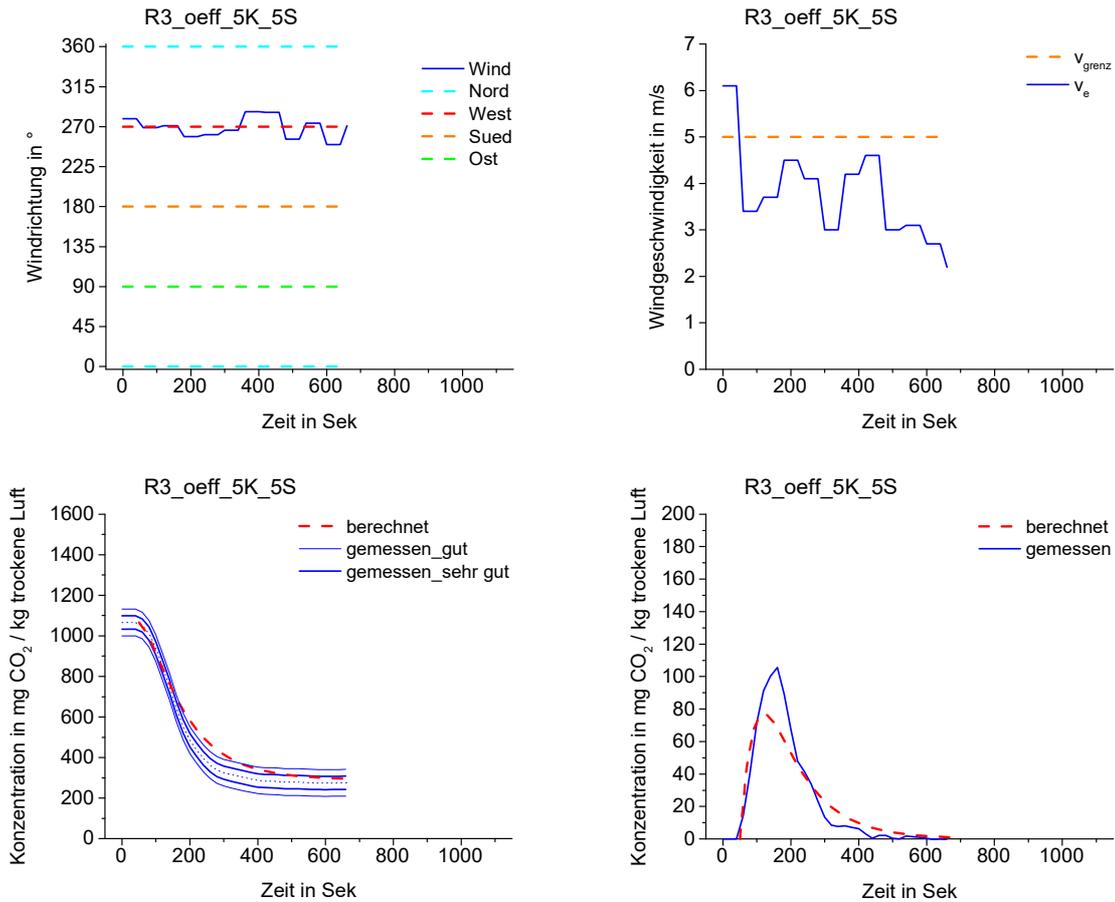
**Abb. 66: Einzelraumdurchströmung mit gekipptem Erdgeschoßenster und Pollenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

## 7.2 Einzelraumdurchströmung, EG geöffnet

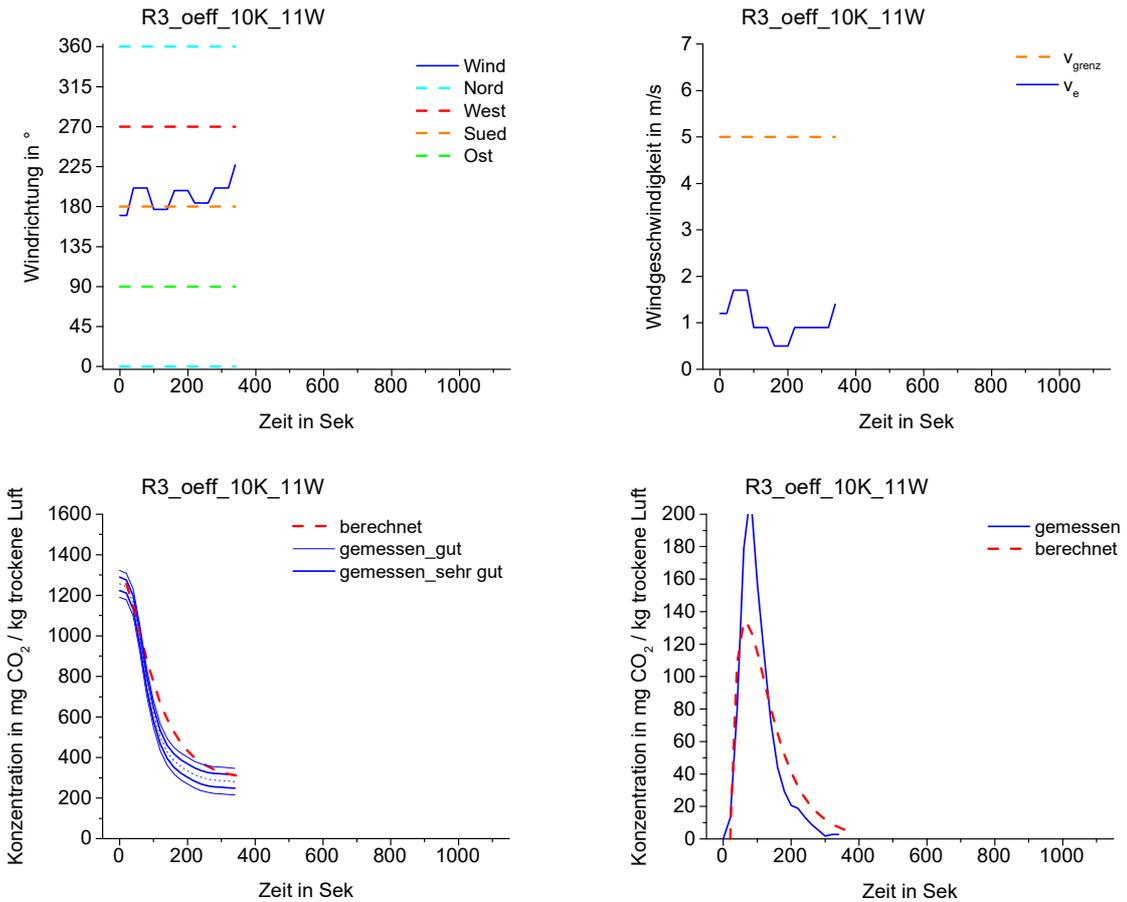
### 7.2.1 Ohne Gitter



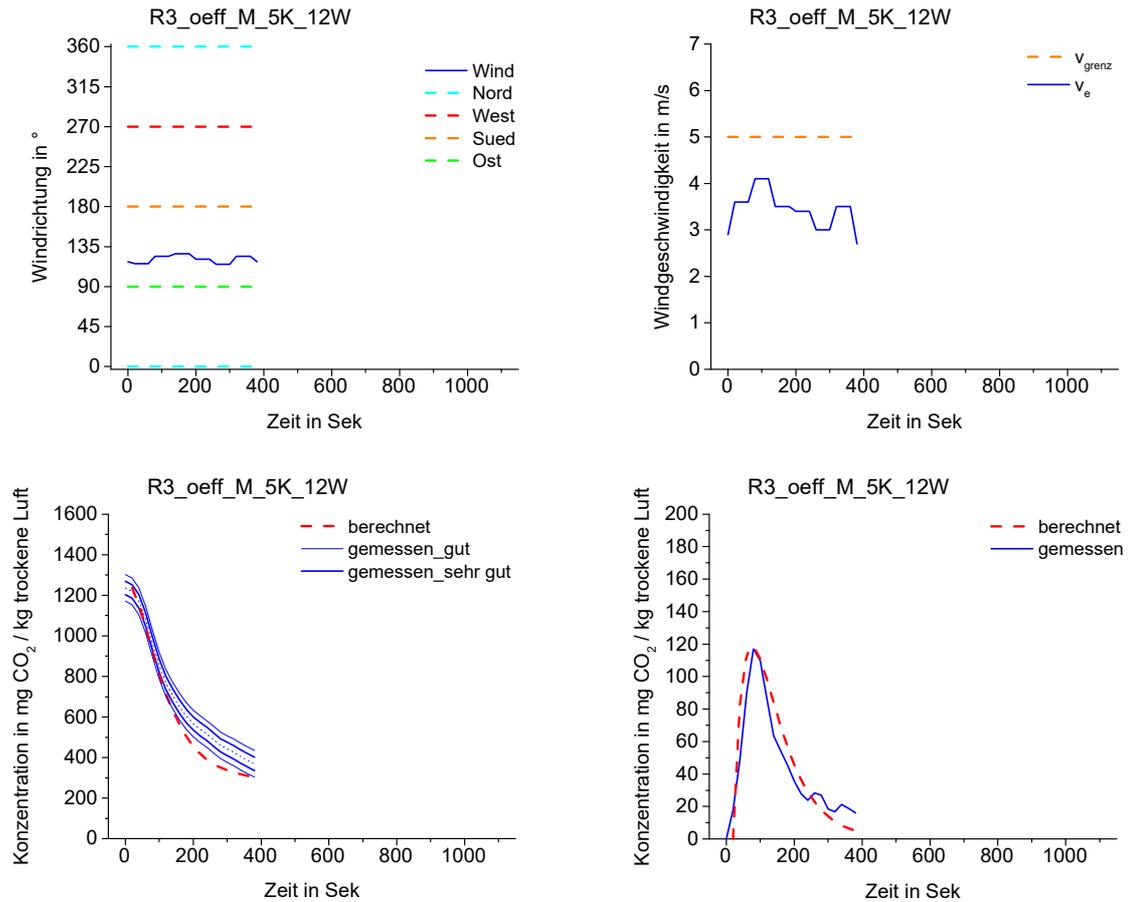
**Abb. 67:** Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).



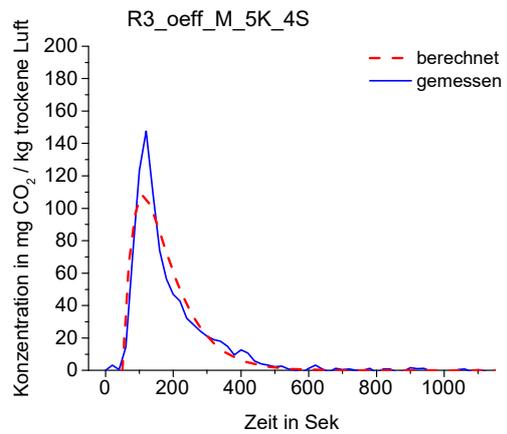
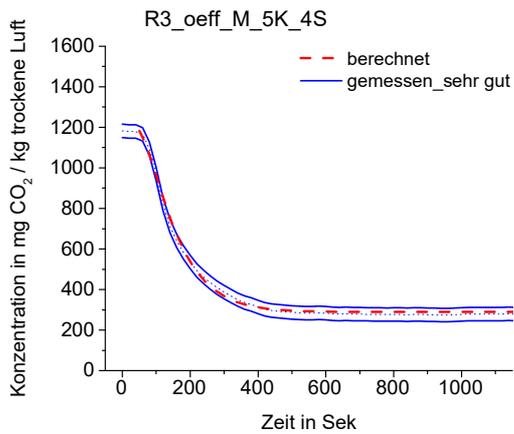
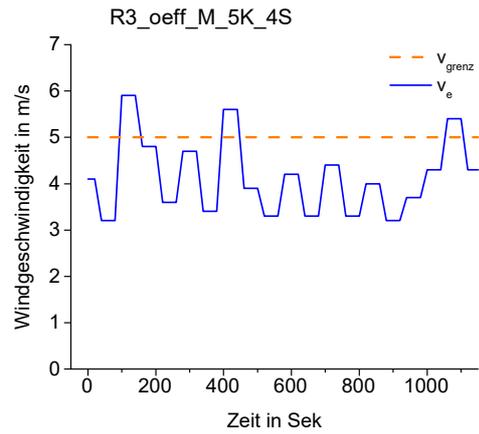
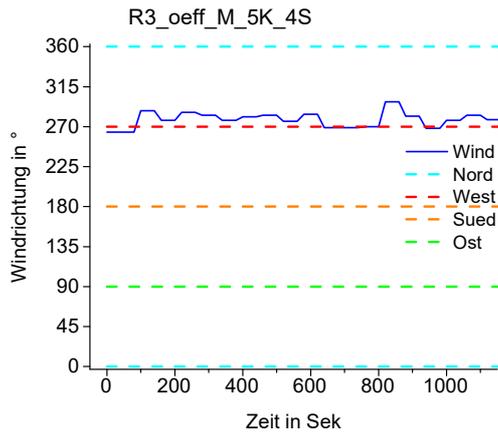
**Abb. 68: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter natürlichen Bedingungen.** Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).



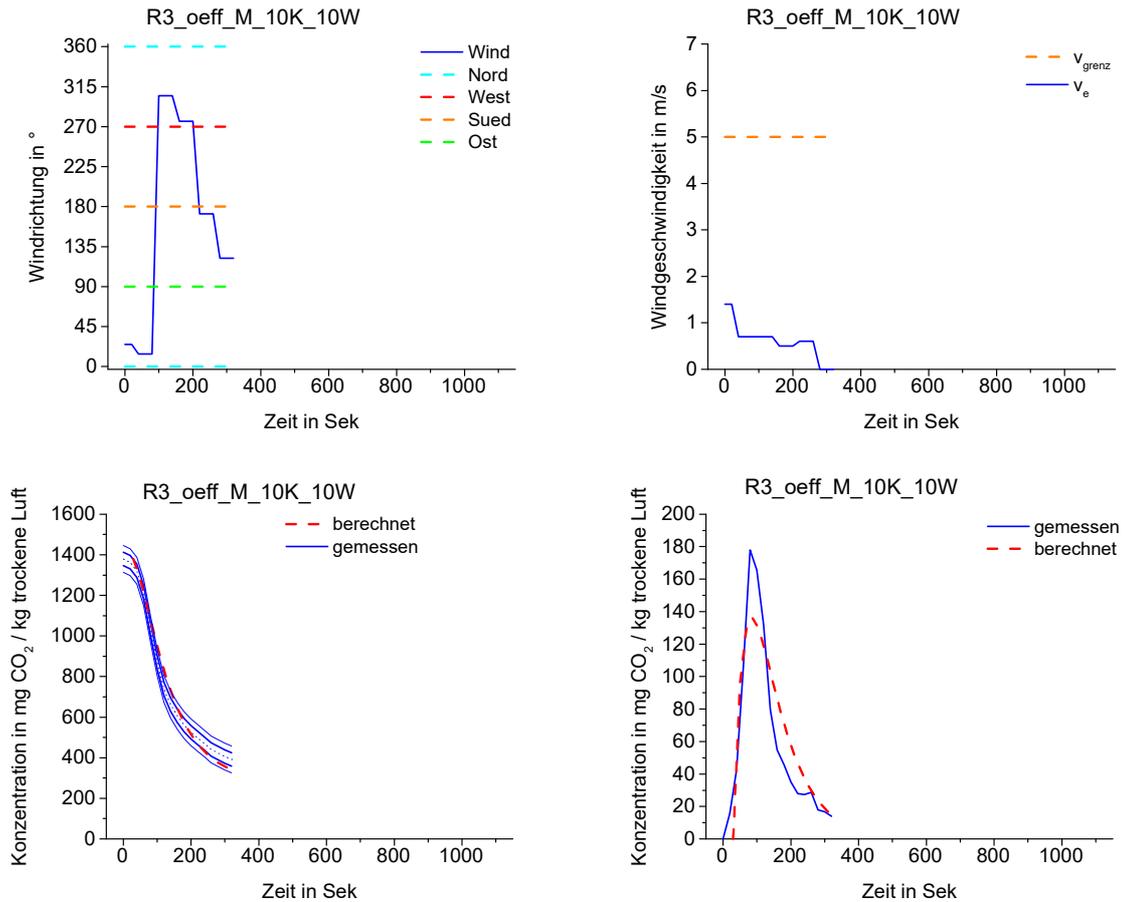
**Abb. 69: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 70: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

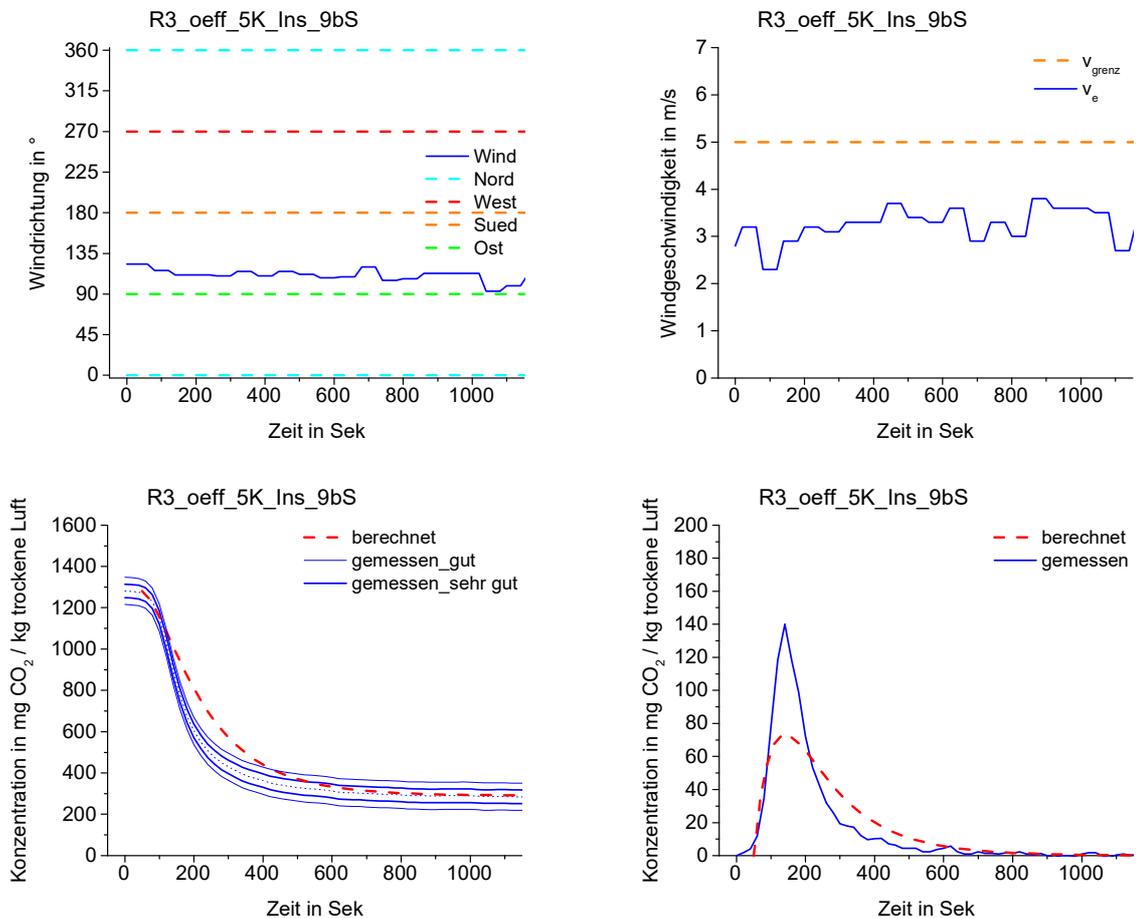


**Abb. 71: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

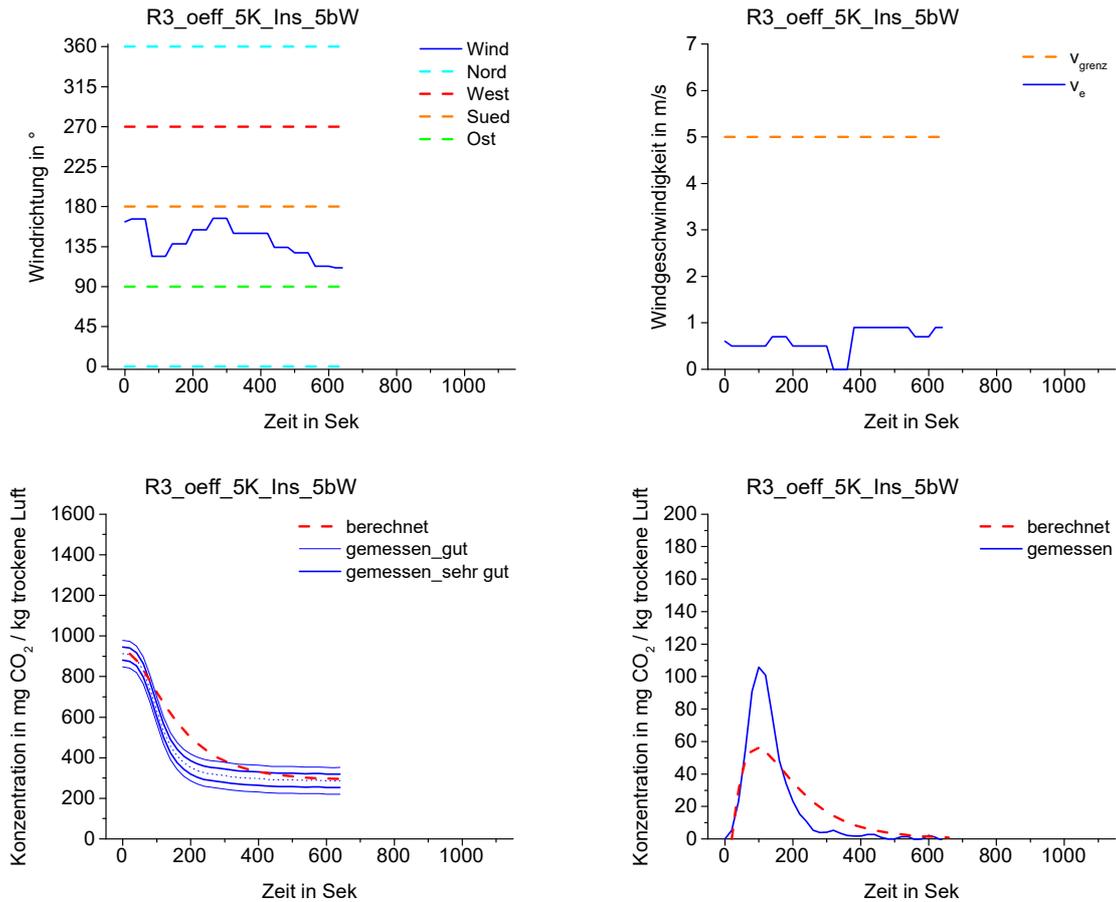


**Abb. 72: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster unter durchmischten Bedingungen.** Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).

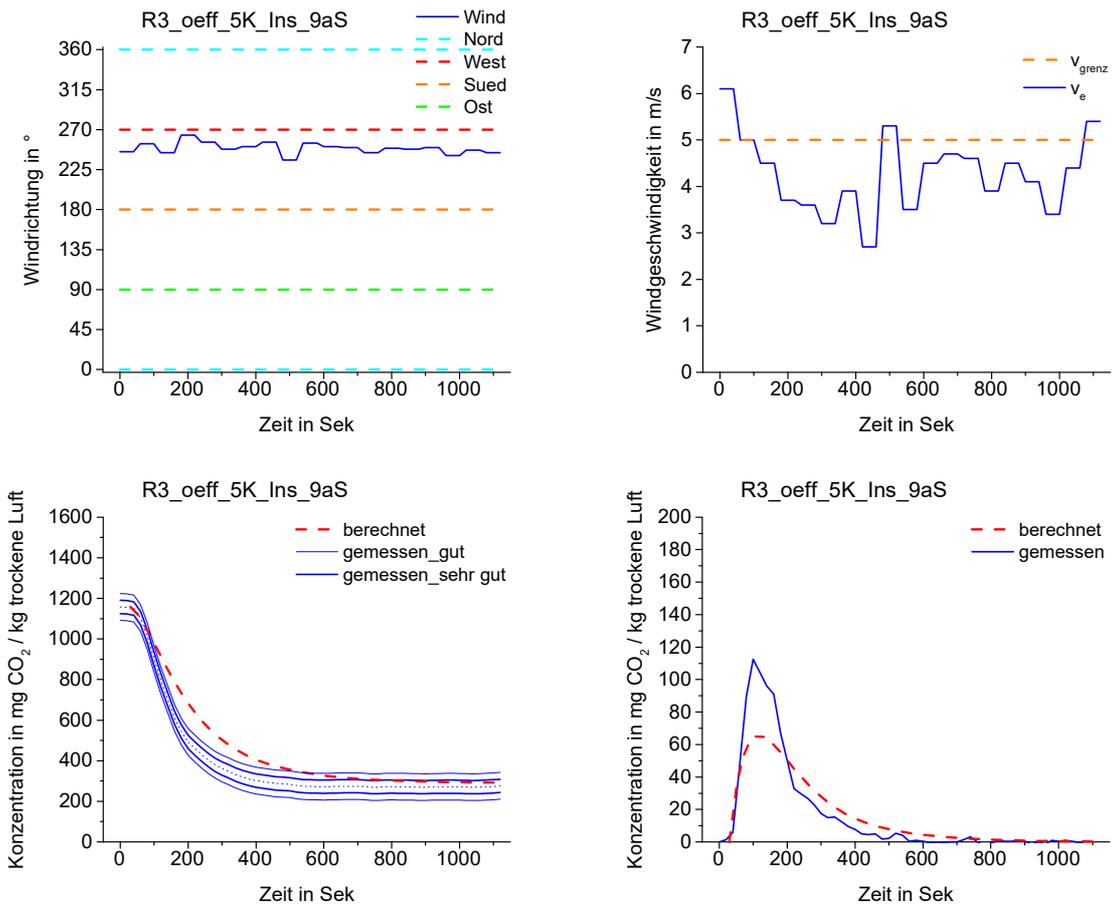
## 7.2.2 Mit Insektengitter



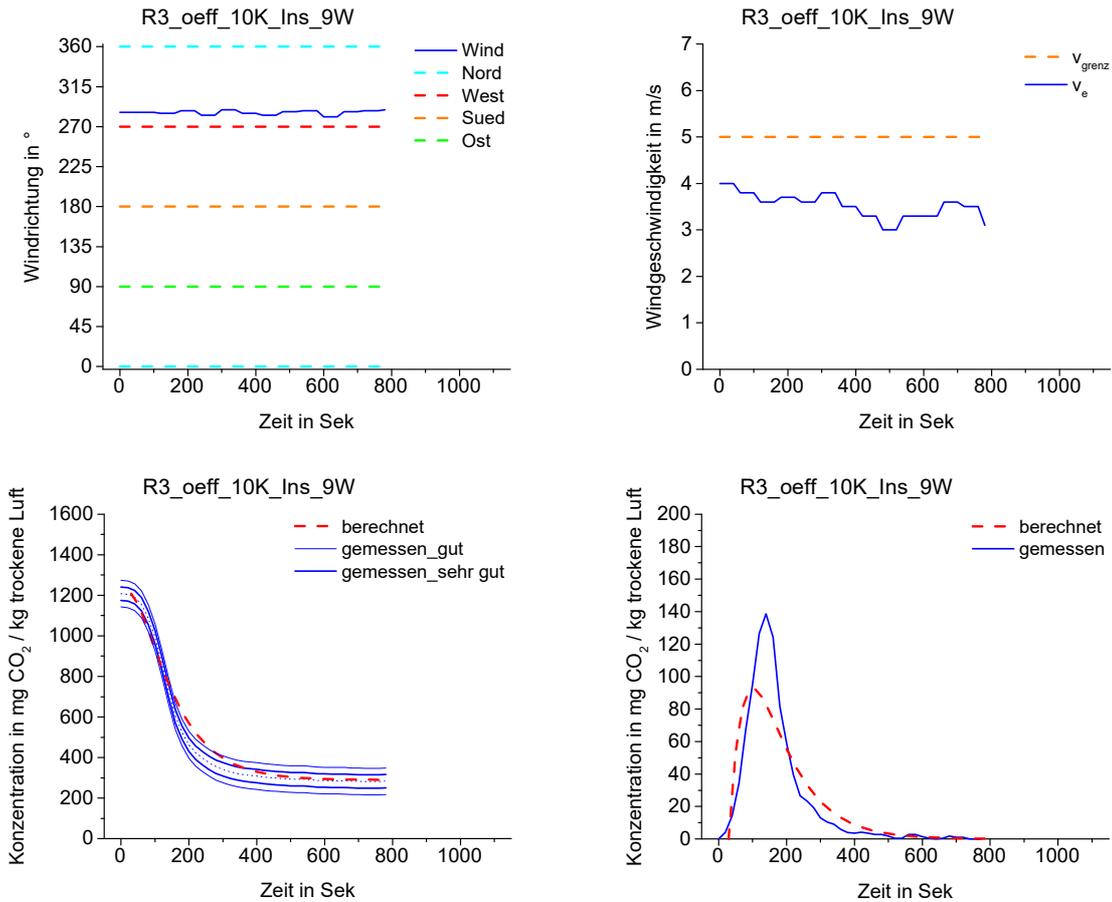
**Abb. 73: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



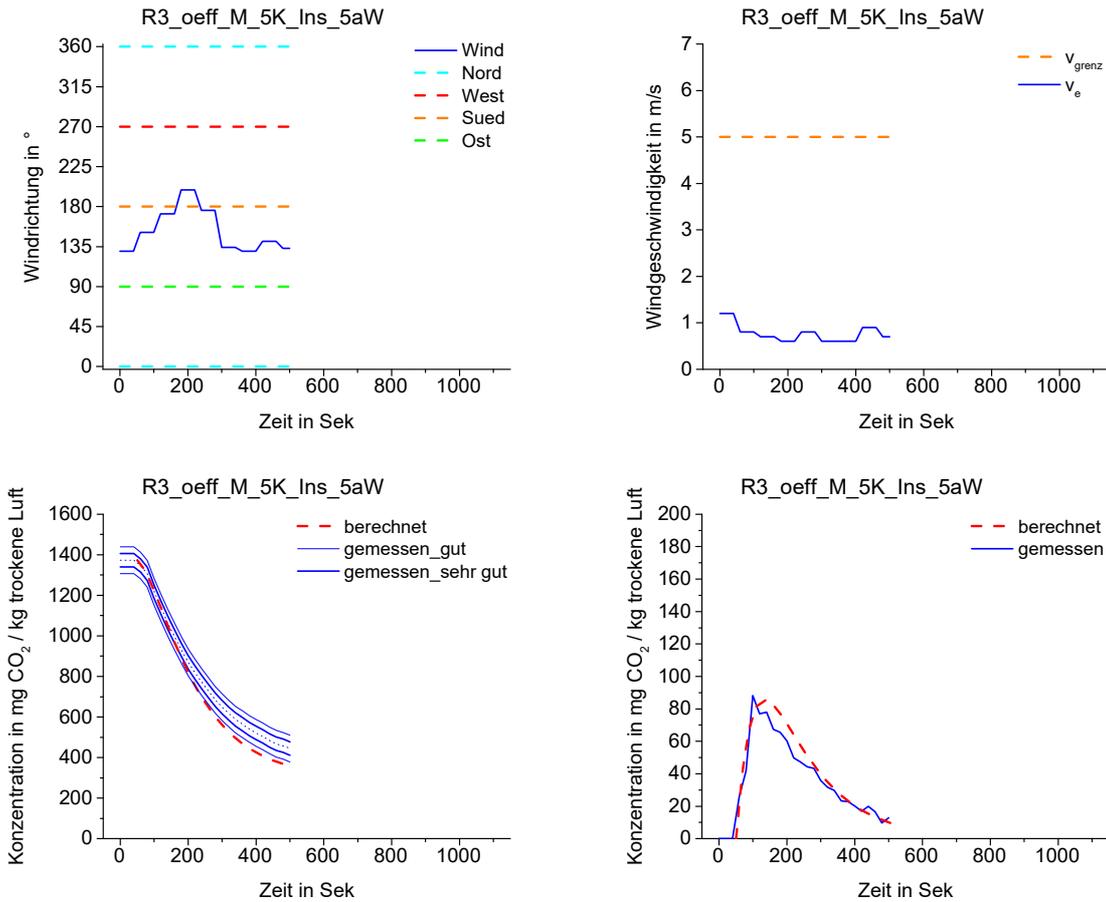
**Abb. 74: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



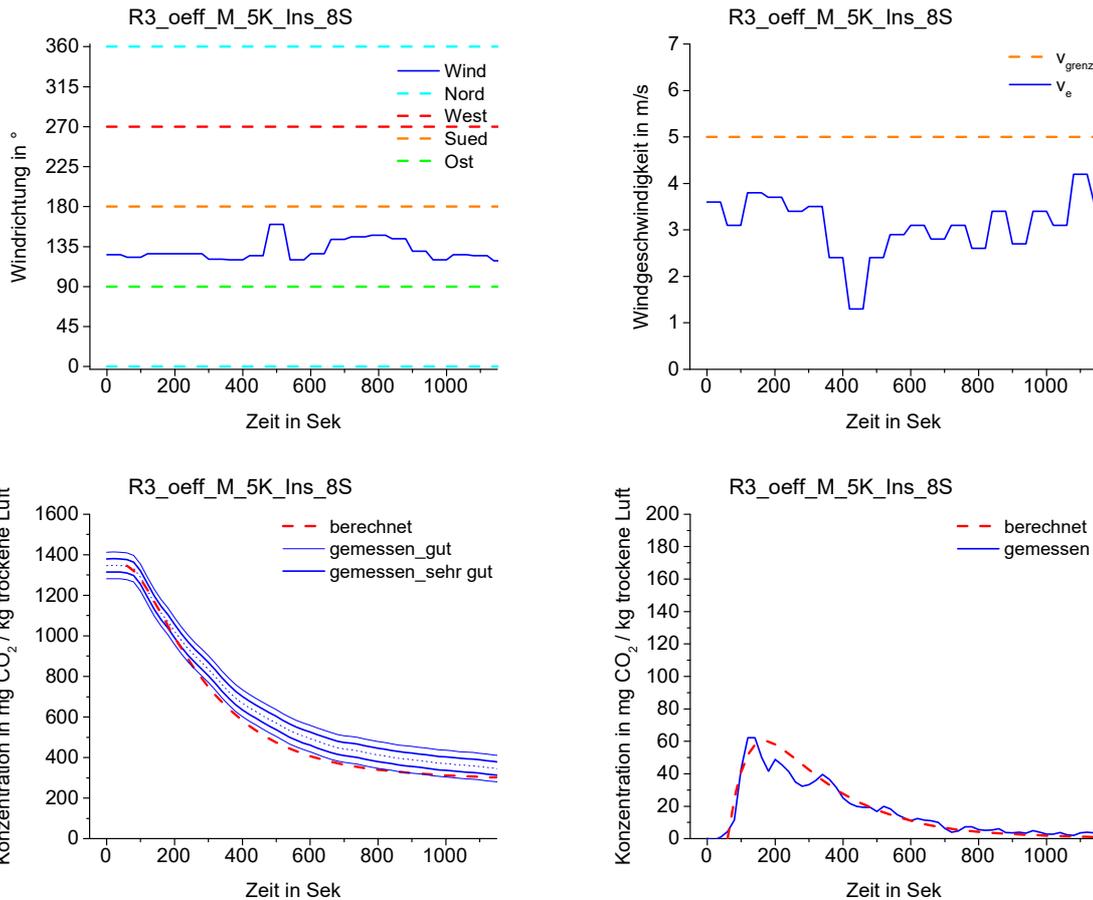
**Abb. 75: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



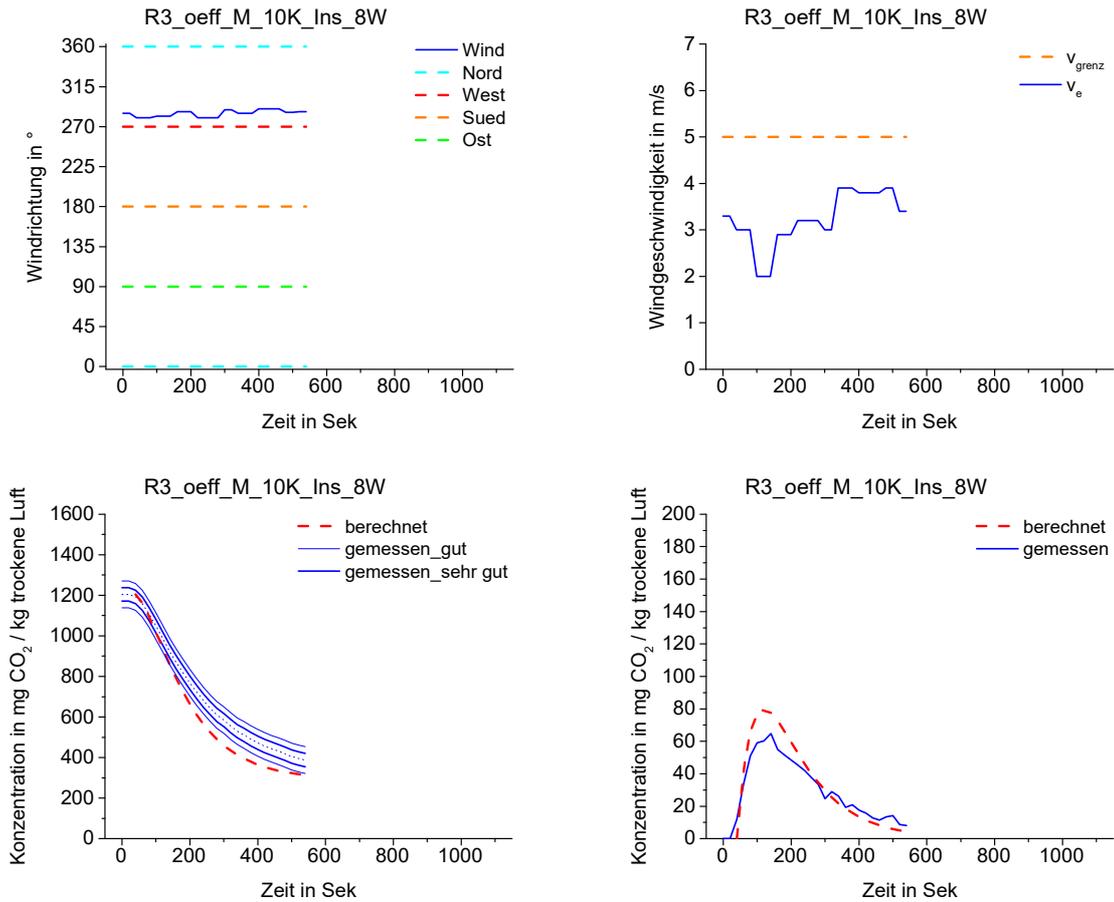
**Abb. 76: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 77: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

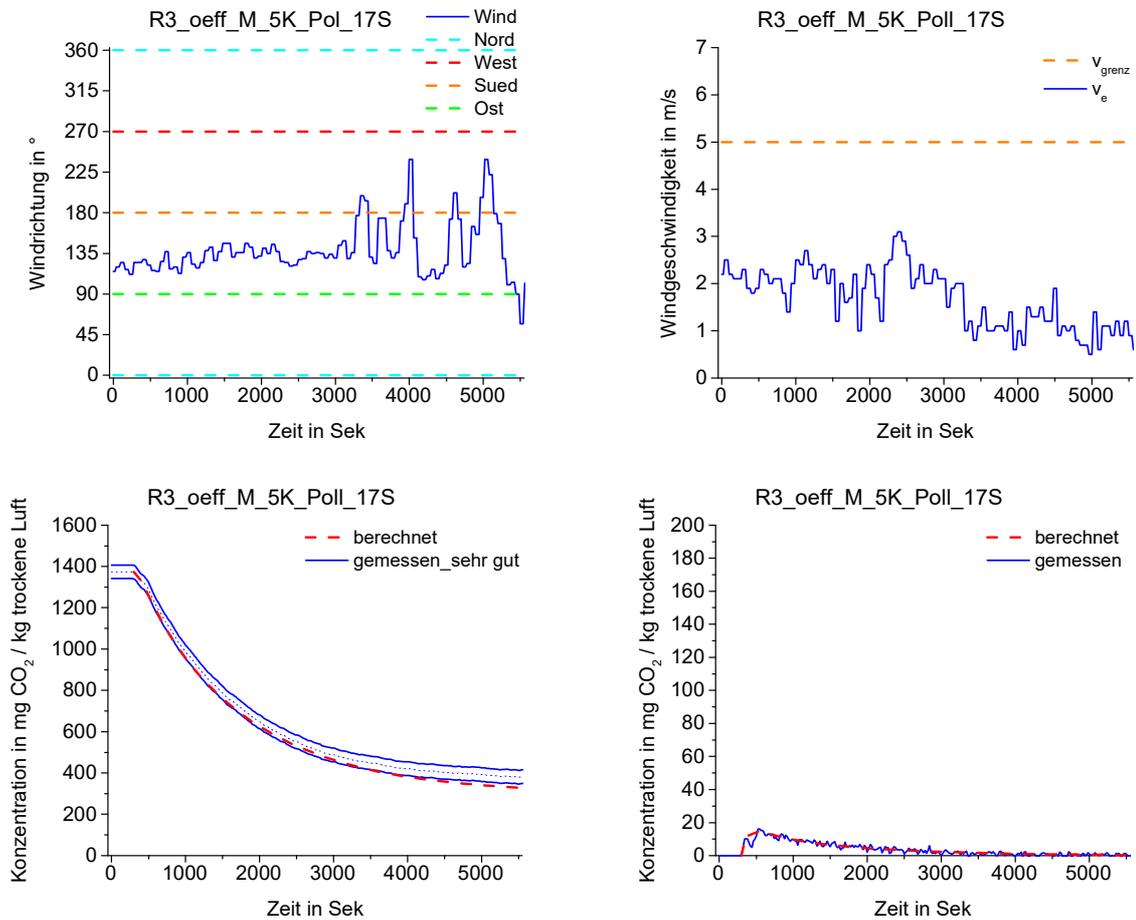


**Abb. 78: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

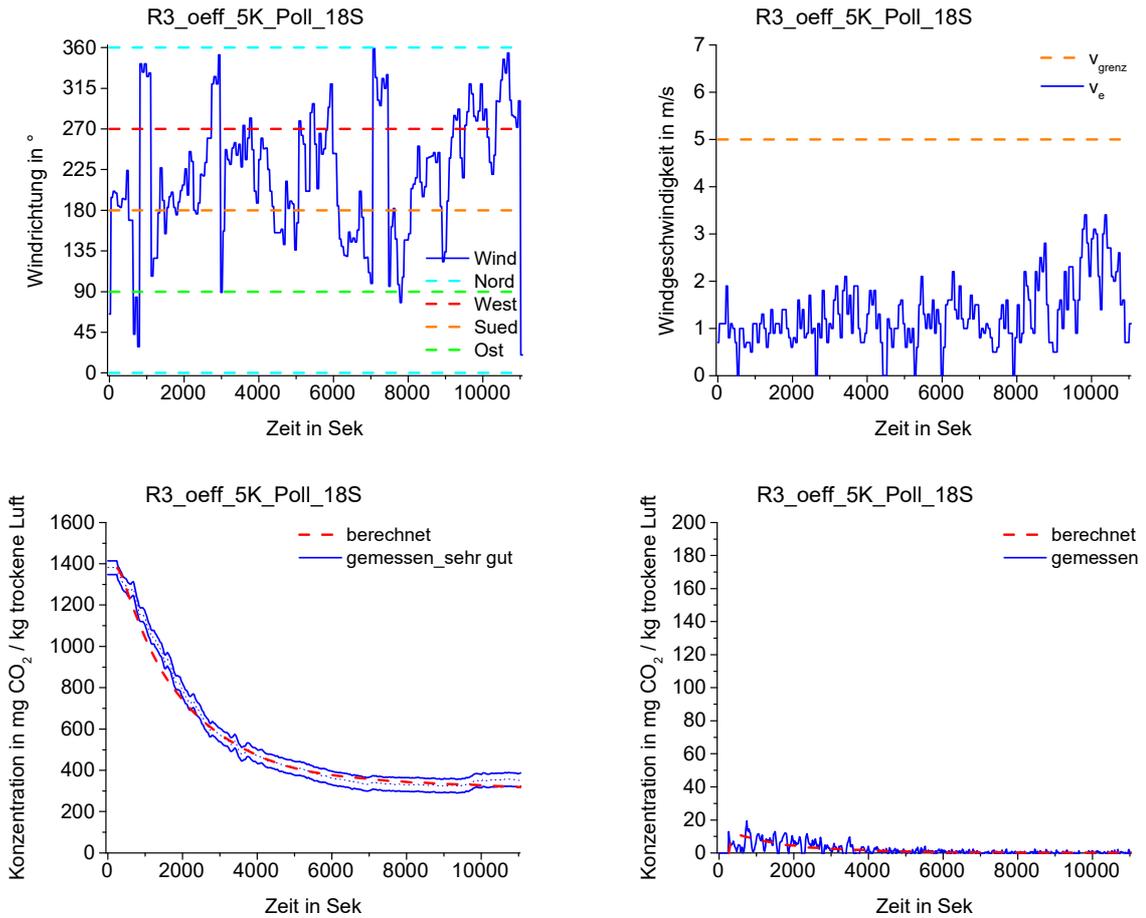


**Abb. 79: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

### 7.2.3 Mit Pollengitter



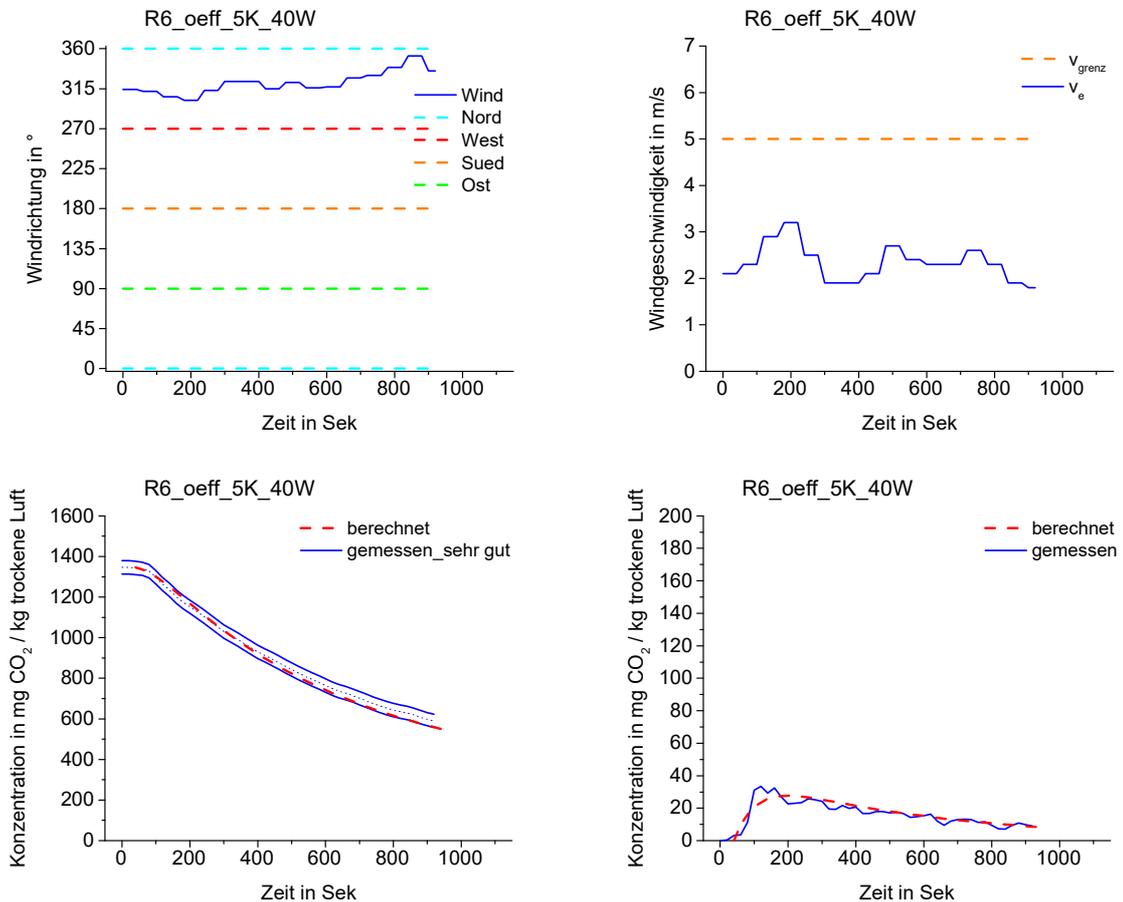
**Abb. 80: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Pollenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde ungleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



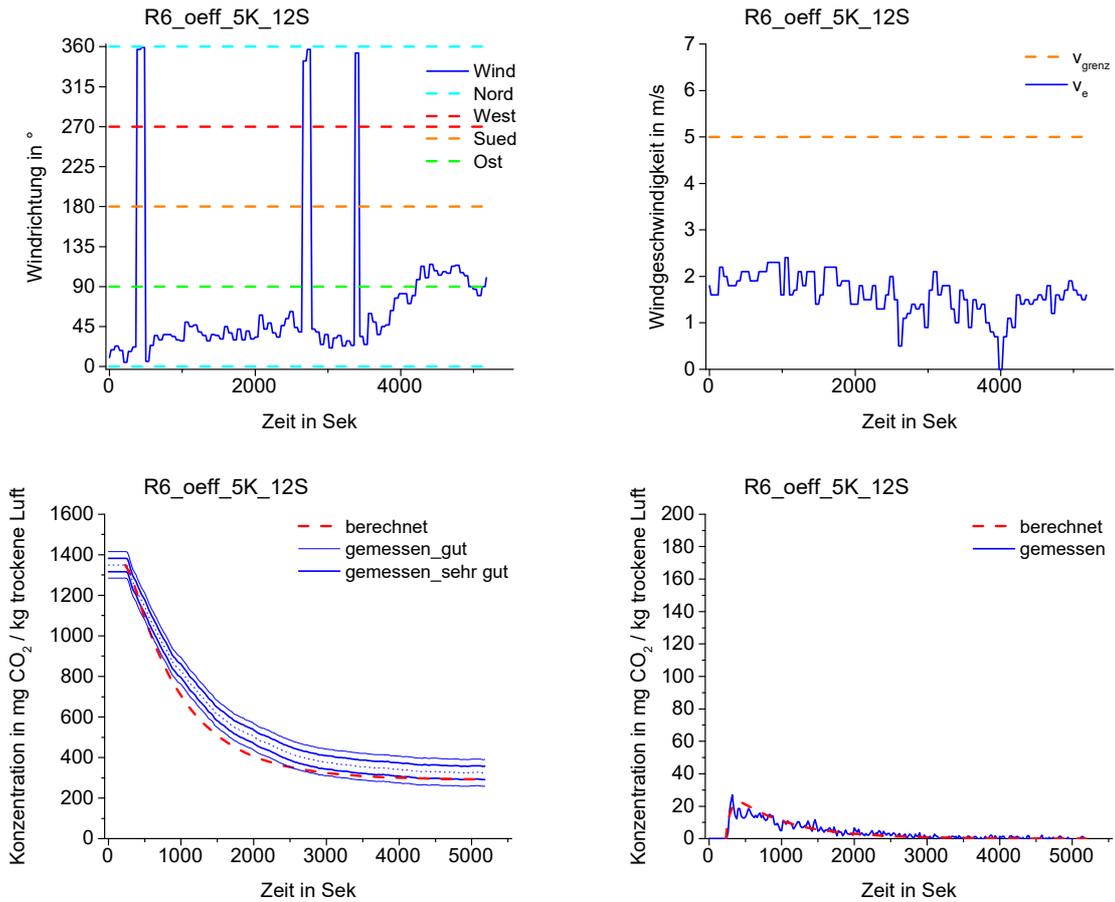
**Abb. 81: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Erdgeschoßenster und Pollenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Westen ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

## 7.3 Einzelraumdurchströmung, OG geöffnet

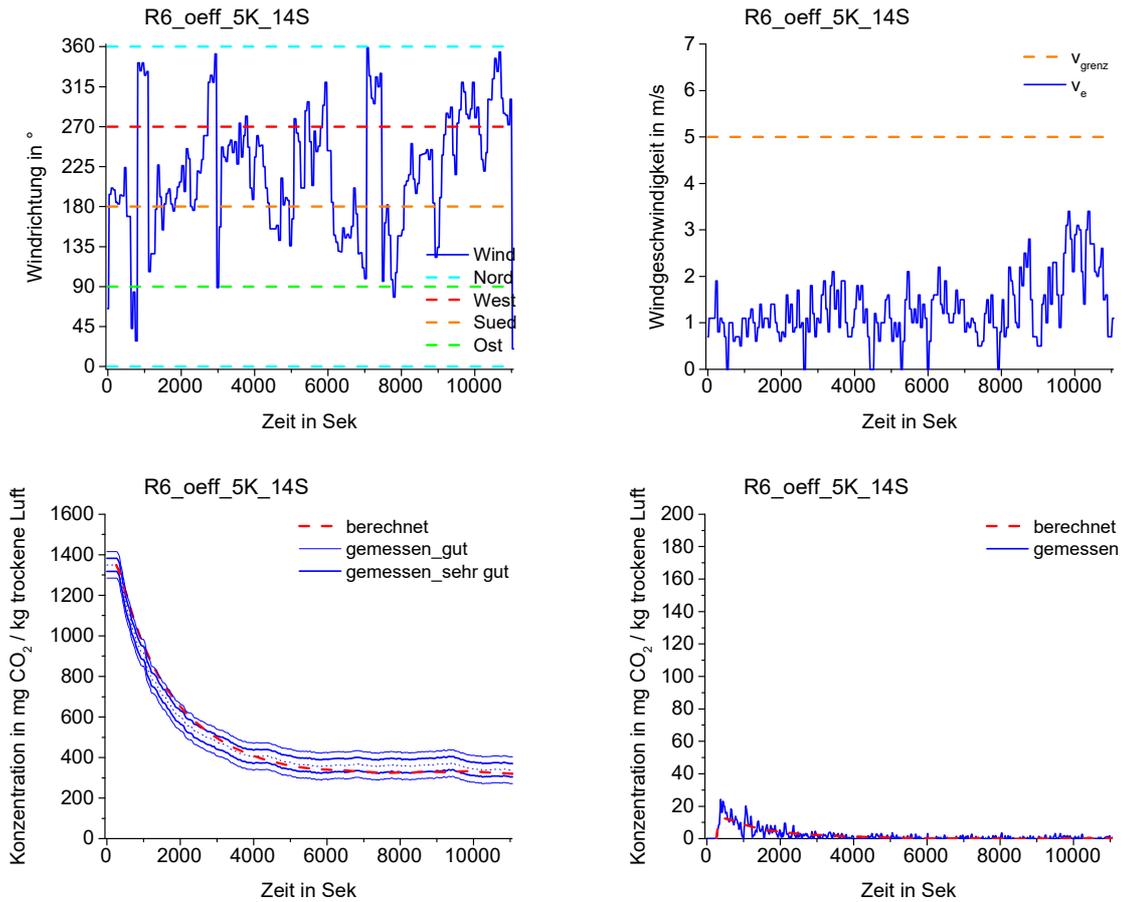
### 7.3.1 Ohne Gitter



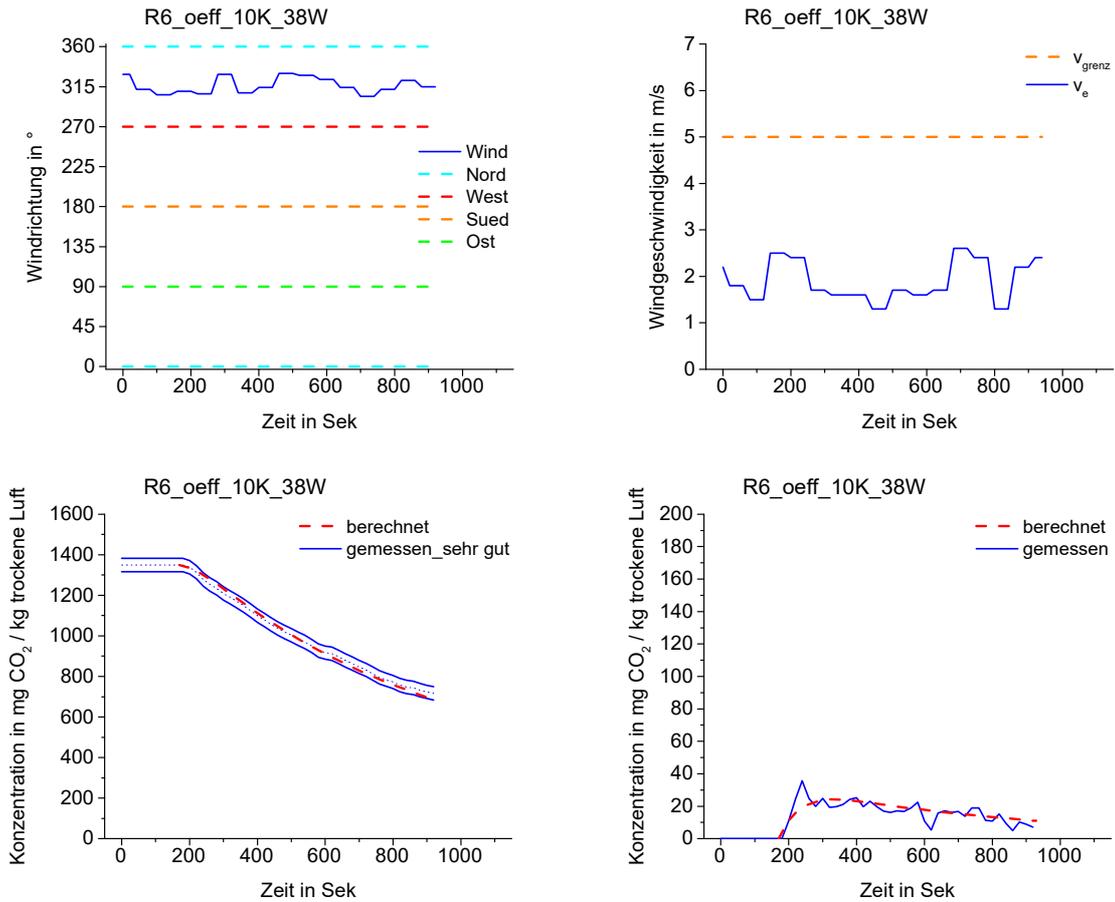
**Abb. 82: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



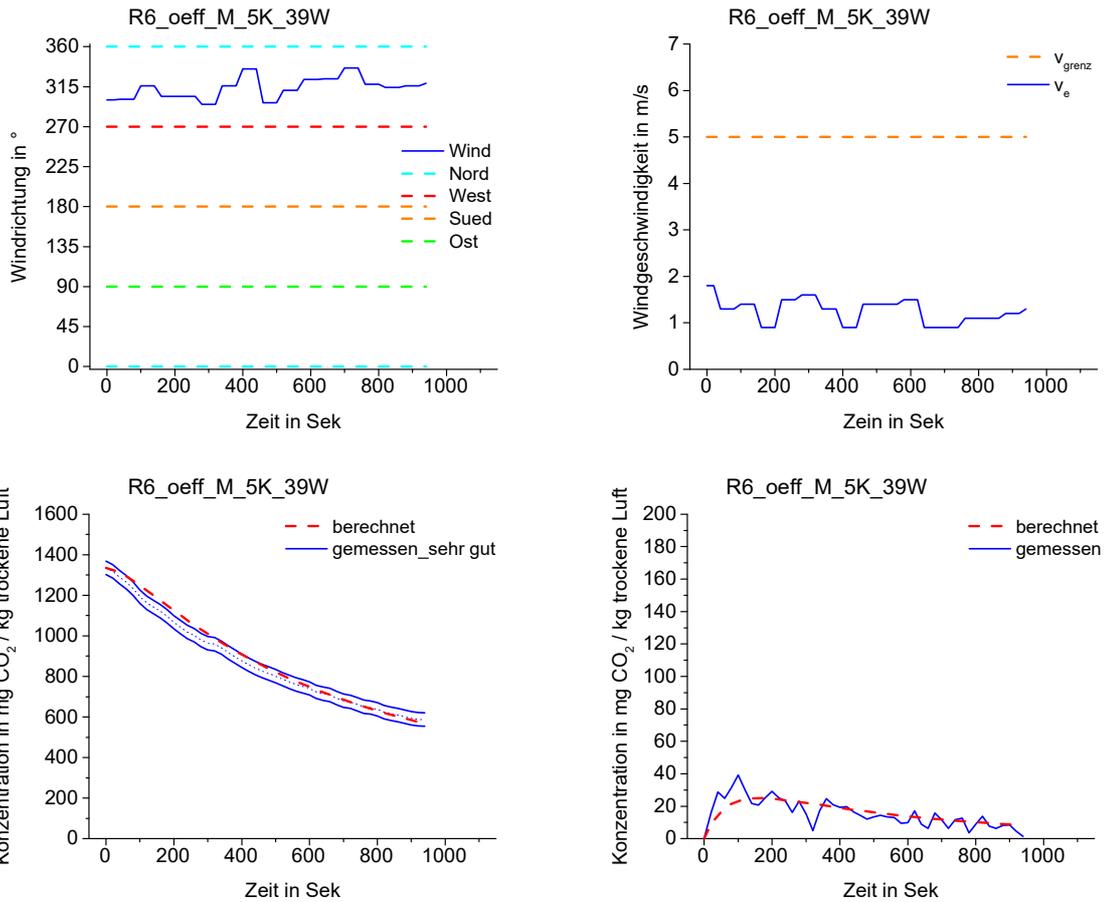
**Abb. 83: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



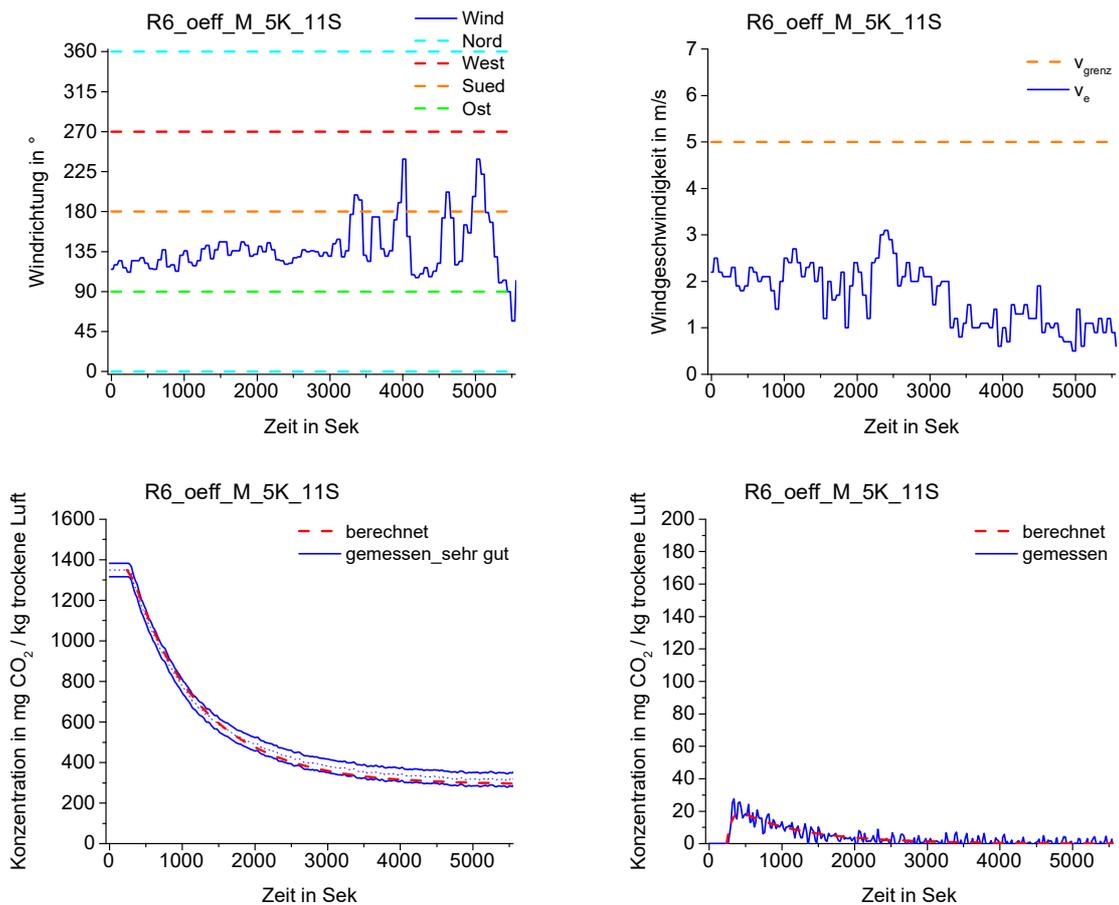
**Abb. 84: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



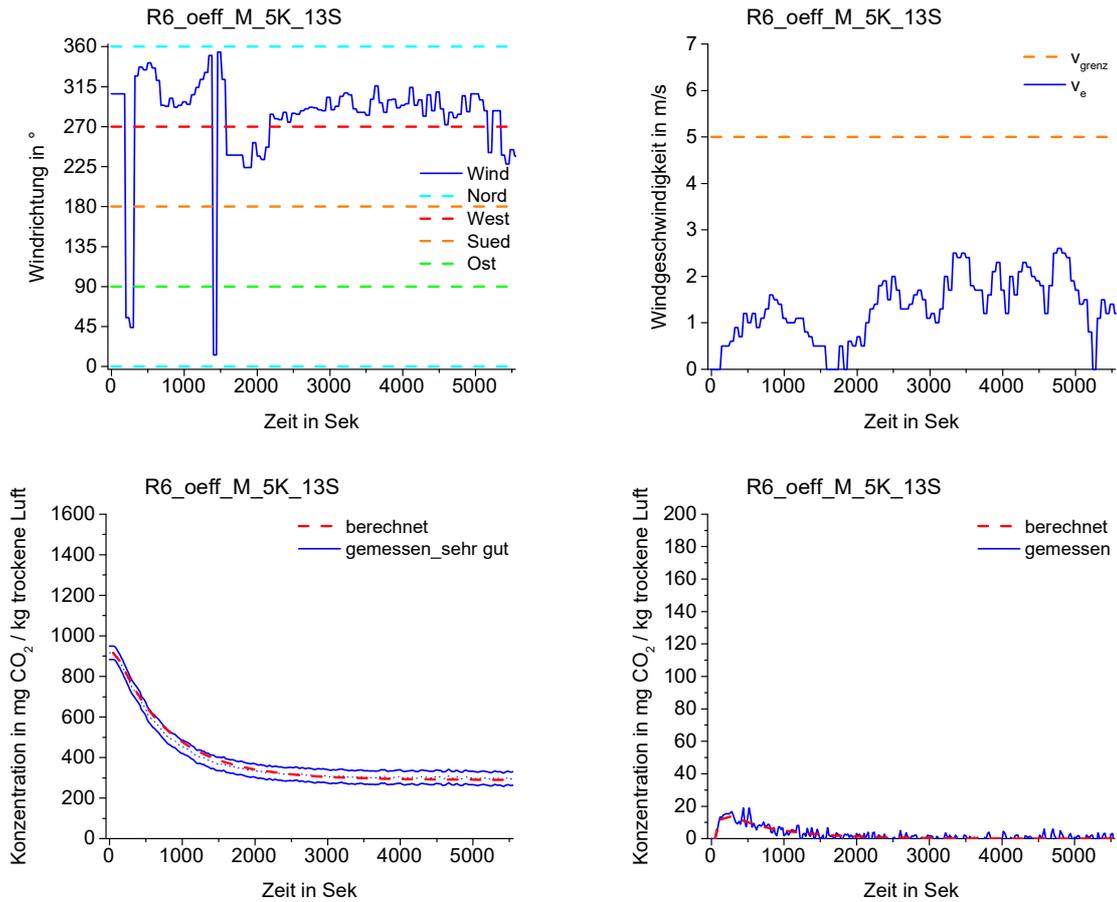
**Abb. 85: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



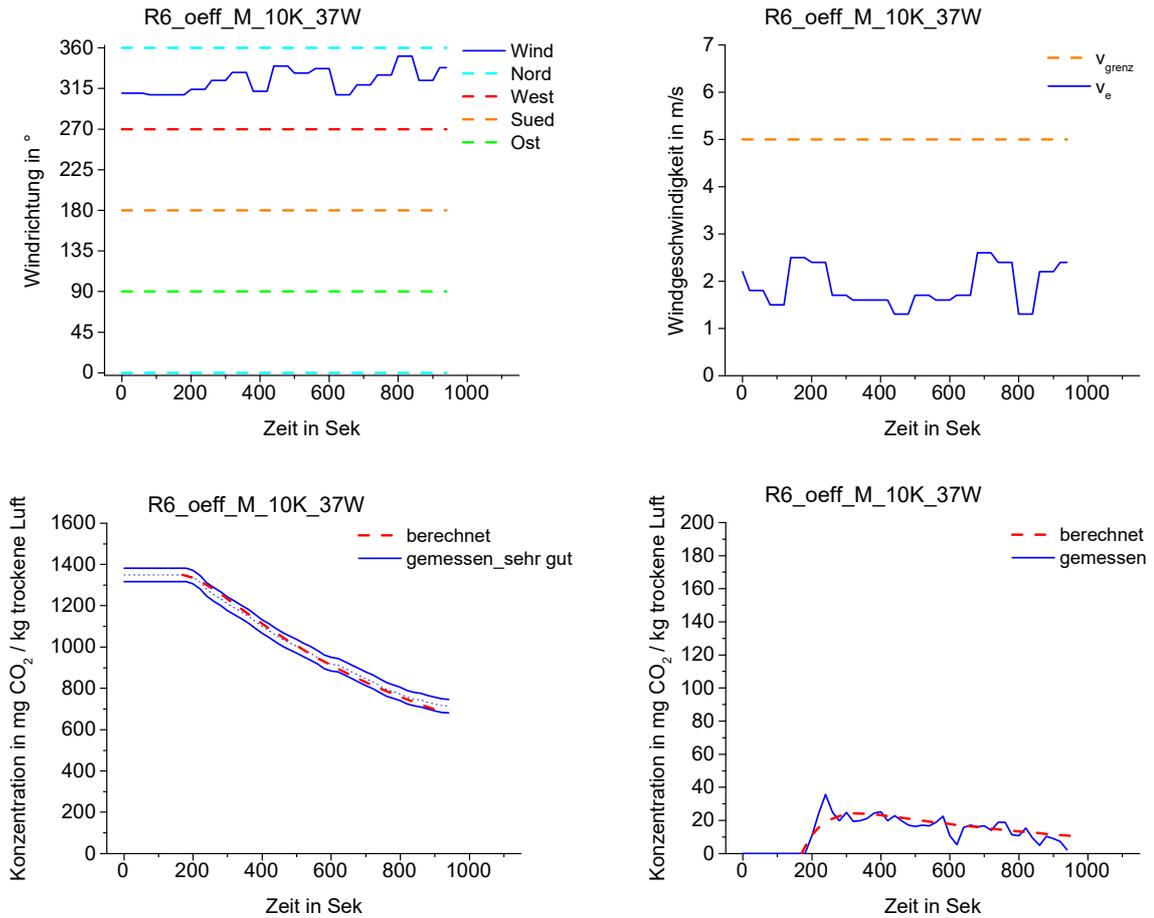
**Abb. 86: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 87: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

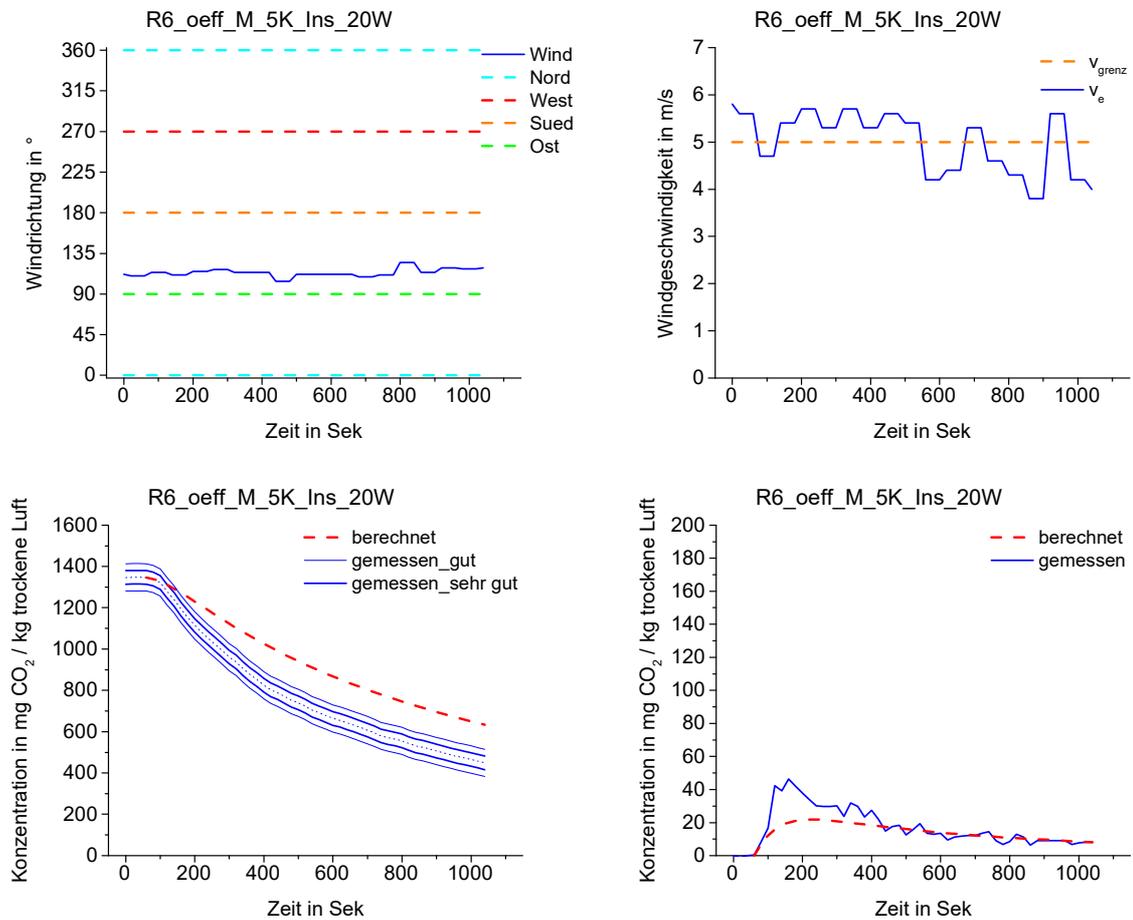


**Abb. 88: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde ungleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

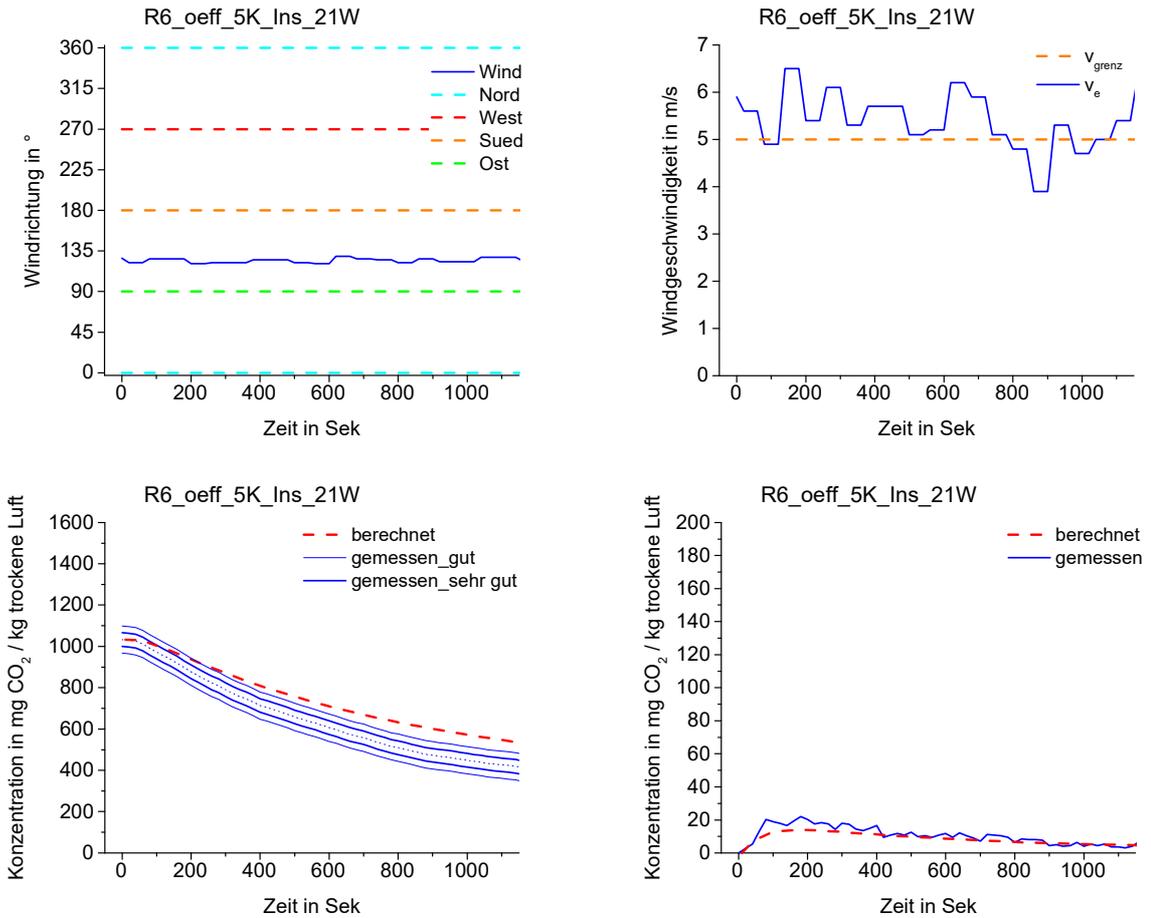


**Abb. 89: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung ist kleiner als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**

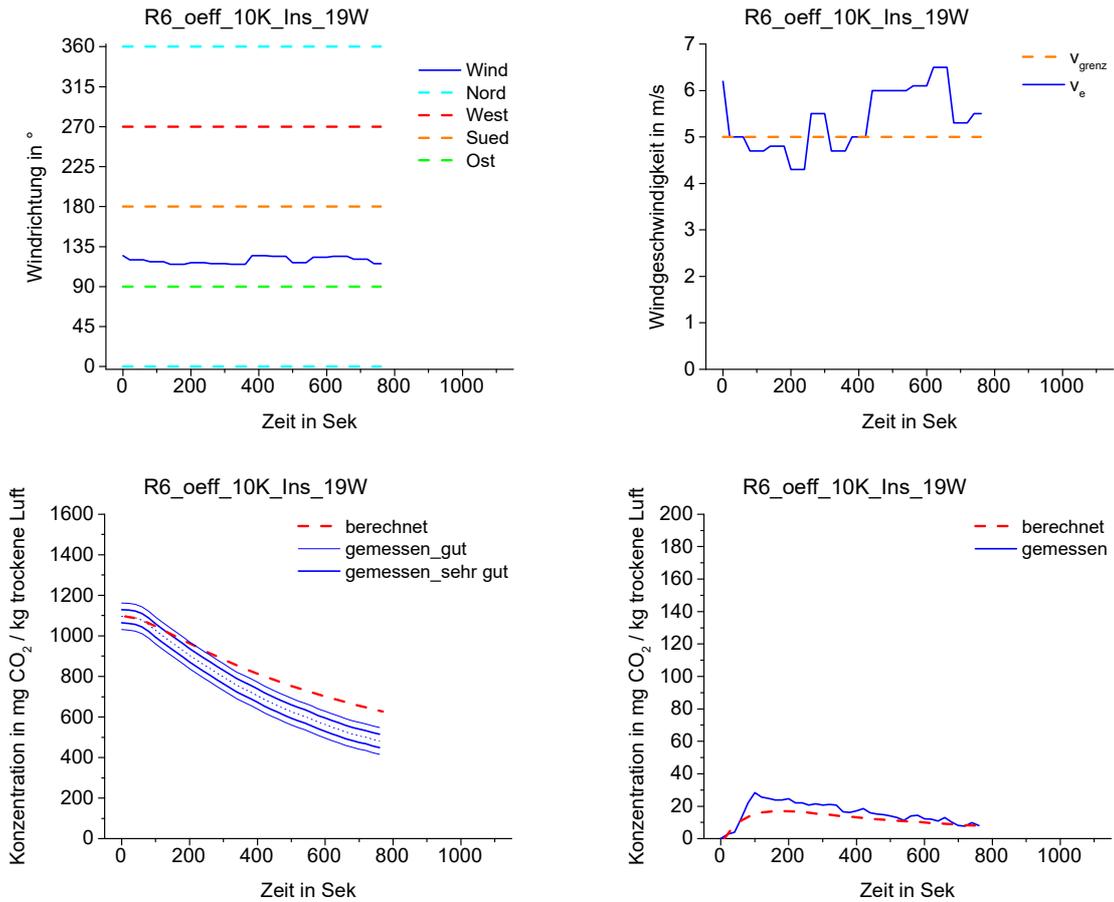
### 7.3.2 Mit Insektengitter



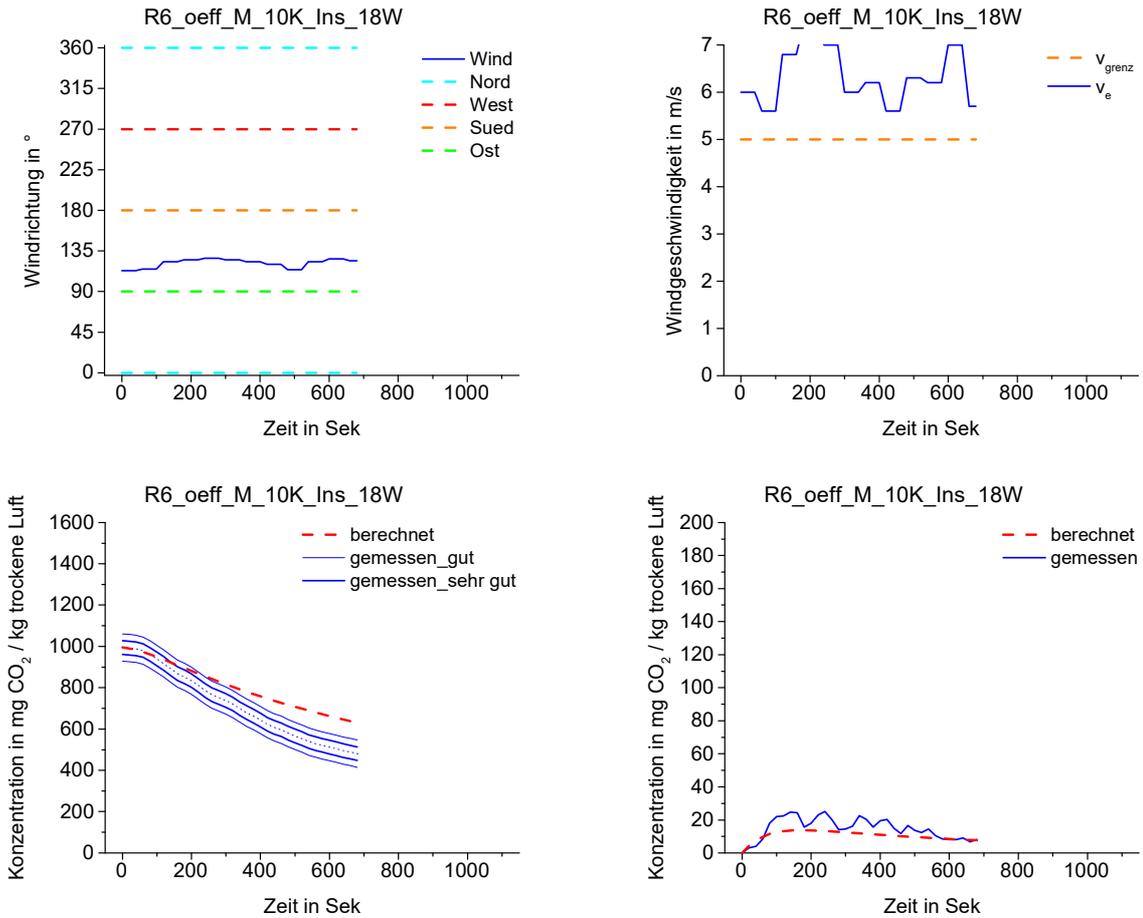
**Abb. 90: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s und darüber (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 91: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Mittel über 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

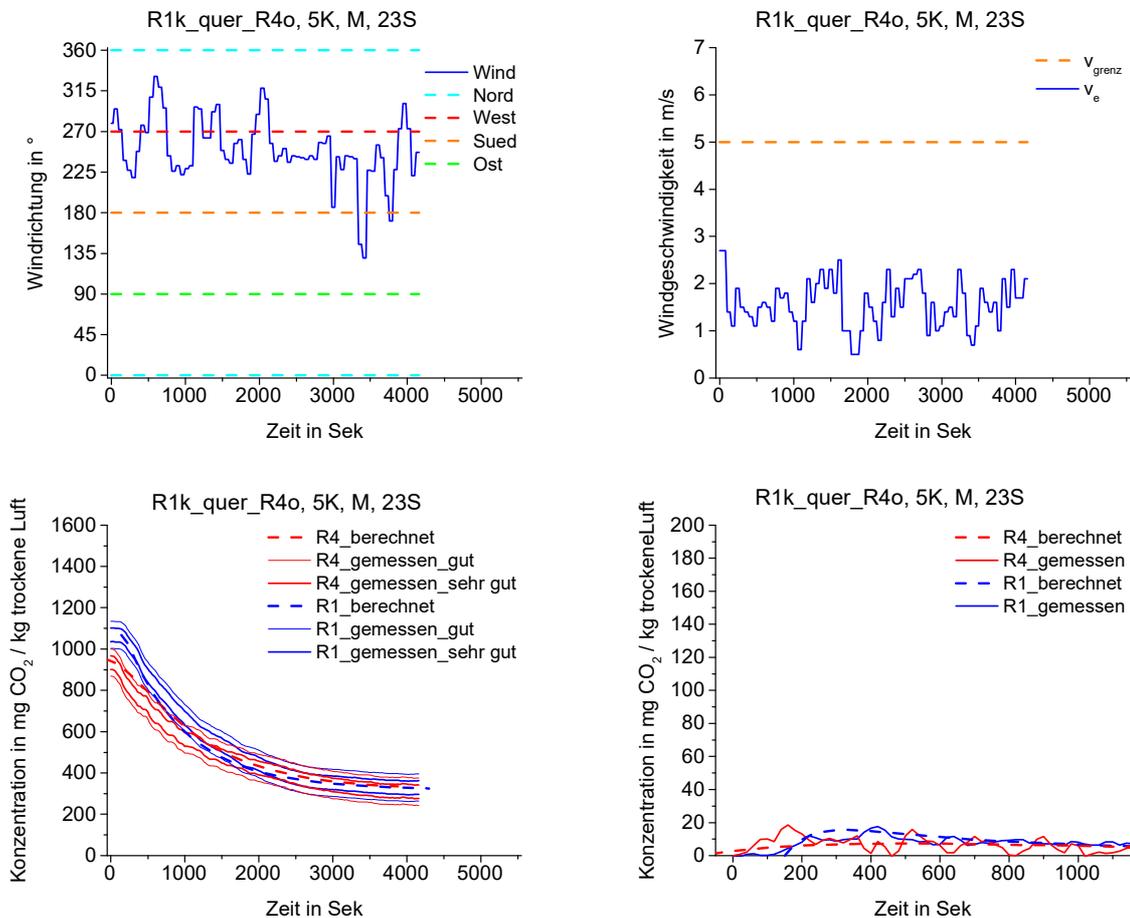


**Abb. 92: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster und Insektenschutz unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s und darüber (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

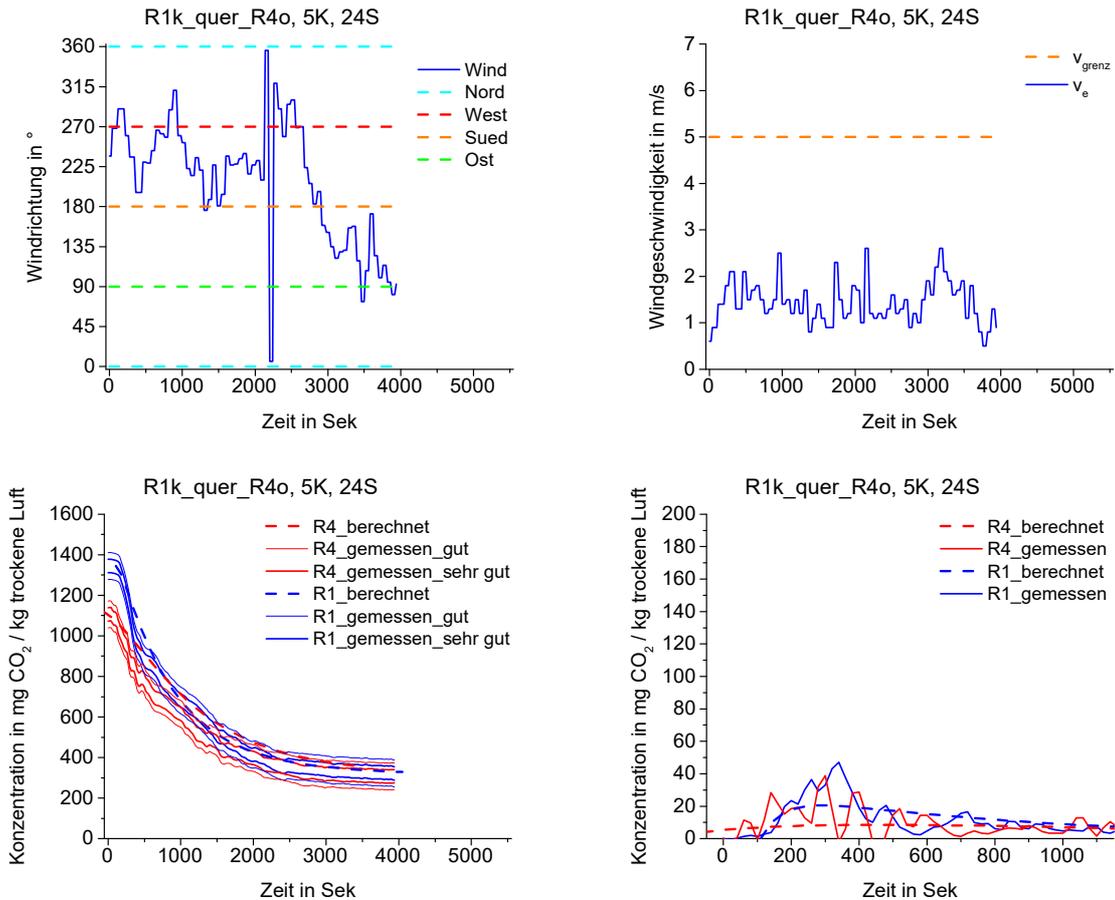


**Abb. 93: Einzelraumdurchströmung mit geöffnetem Obergeschoßenster und Insektenschutz unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Änderung der Windgeschwindigkeit während der Messung ist größer als 5 m/s (Bild rechts oben). Das nach Süden ausgerichtete Fenster wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

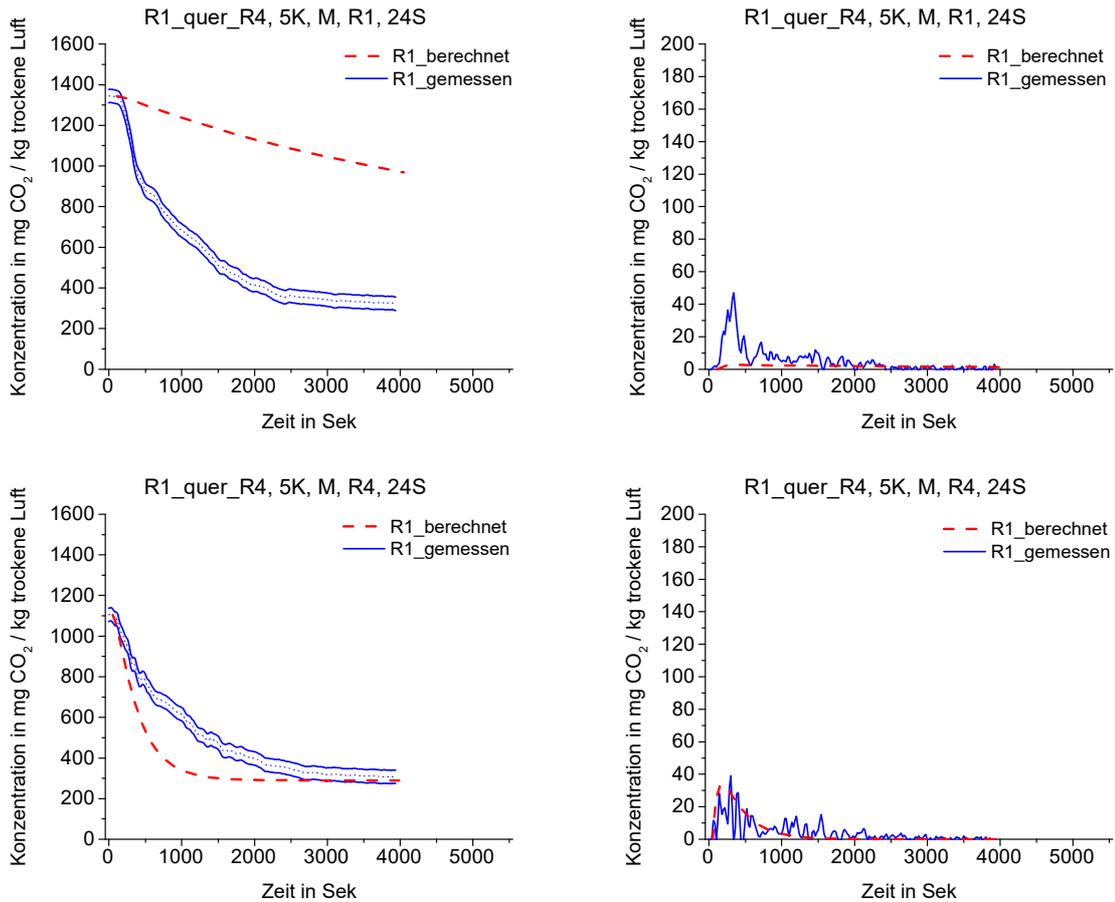
## 7.4 Querdurchströmung, EG gekippt – OG geöffnet (2 Zonen)



**Abb. 94:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).

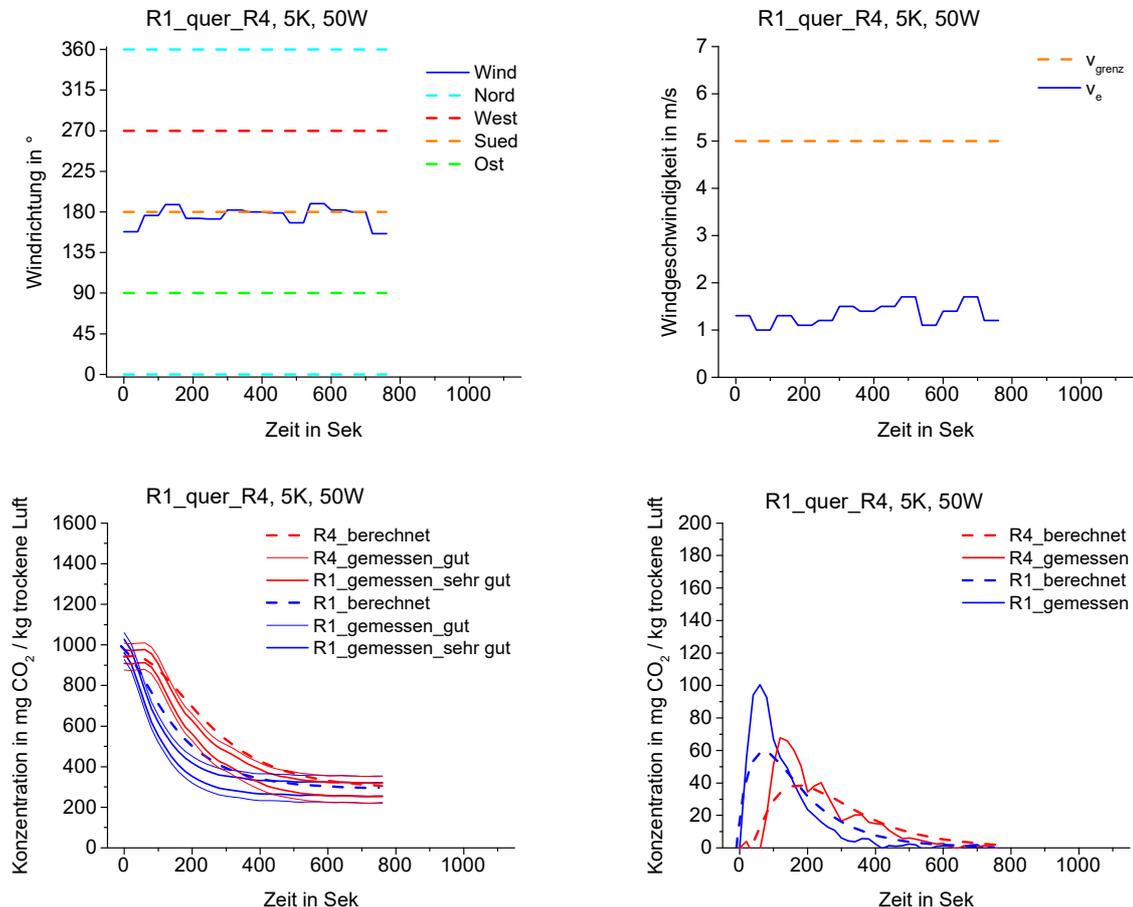


**Abb. 95: Querdurchströmung durch 2 Zonen mit gekipptem Erdgeschoßfenster und geöffnetem Obergeschoßfenster unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und eine schlechte Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine geringe Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Der Wind kommt aus südlicher Richtung (siehe Bild links oben). Die Einströmöffnung und die Ausströmöffnung werden parallel angeströmt. Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde ungleichmäßig windparallel angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde ebenfalls ungleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

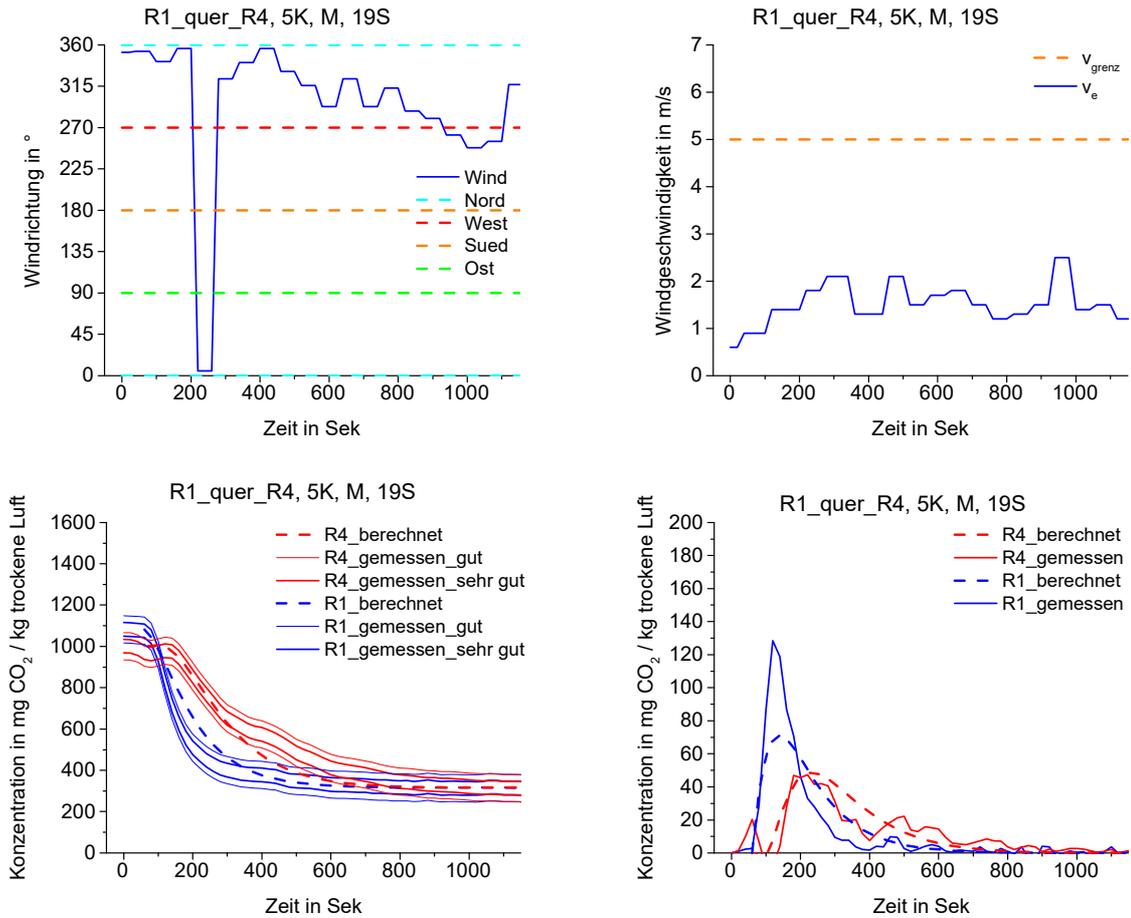


**Abb. 96:** Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine Aufteilung der Querdurchströmung (siehe Abb. 95) in zwei getrennte Einzelraumdurchströmungssituationen. Die oberen beiden Bilder zeigen die Situation im Erdgeschoss. Die unteren beiden Kurven zeigen die Obergeschoßsituation. Auf den jeweils linken Kurven ist die gemessene Tracergaskonzentration in blau und die berechnete Tracergaskonzentration in rot dargestellt. Auf den jeweils rechten Bildern sieht man die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve). Bei der Einzelraumsituation im Erdgeschoss wird sichtbar, dass der tatsächliche Luftaustausch höher ist als der berechnete Austausch. Im Obergeschoß zeigt sich, dass der berechnete Luftaustausch höher ist als der tatsächlich berechnete Austausch. Die Windverhältnisse während der Vergleichssituation sind in Abb. 95 dargestellt.

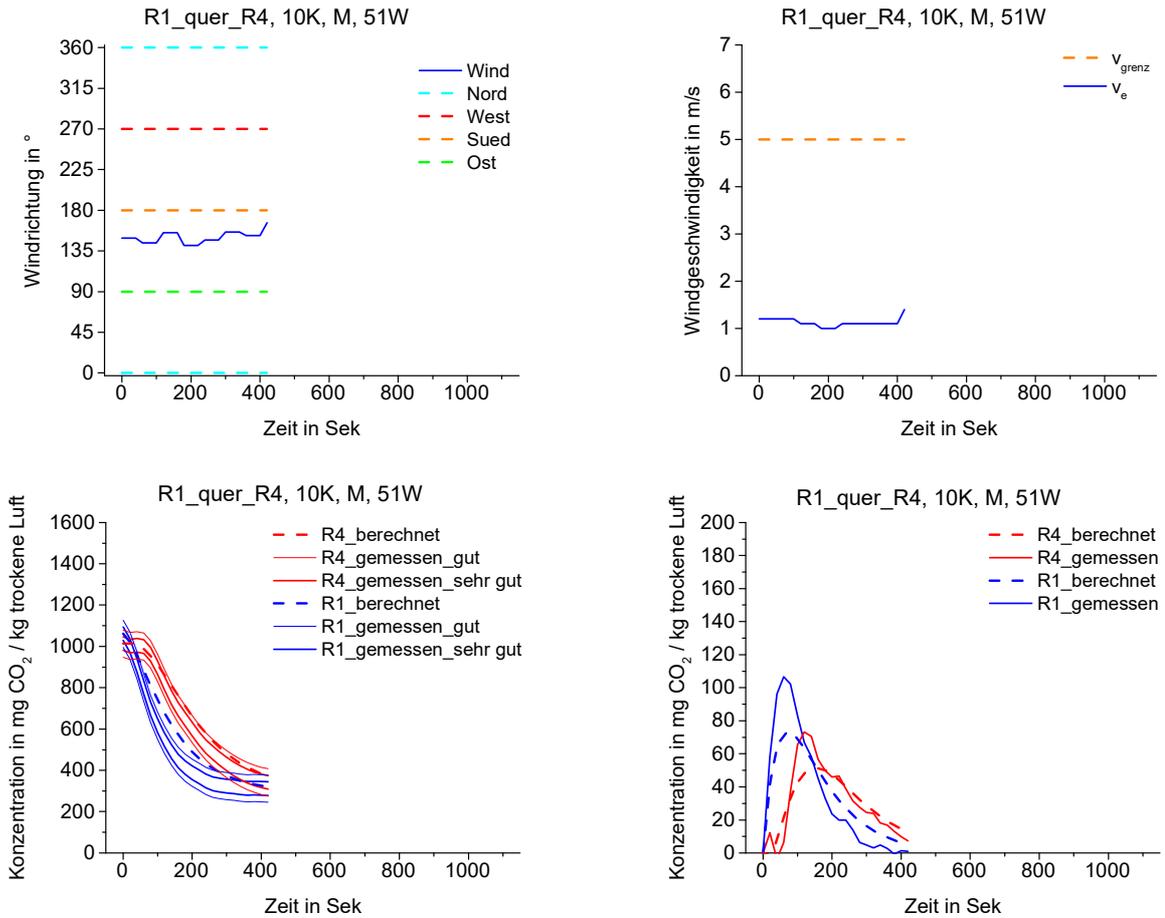
## 7.5 Querdurchströmung, EG geöffnet – OG geöffnet (2 Zonen)



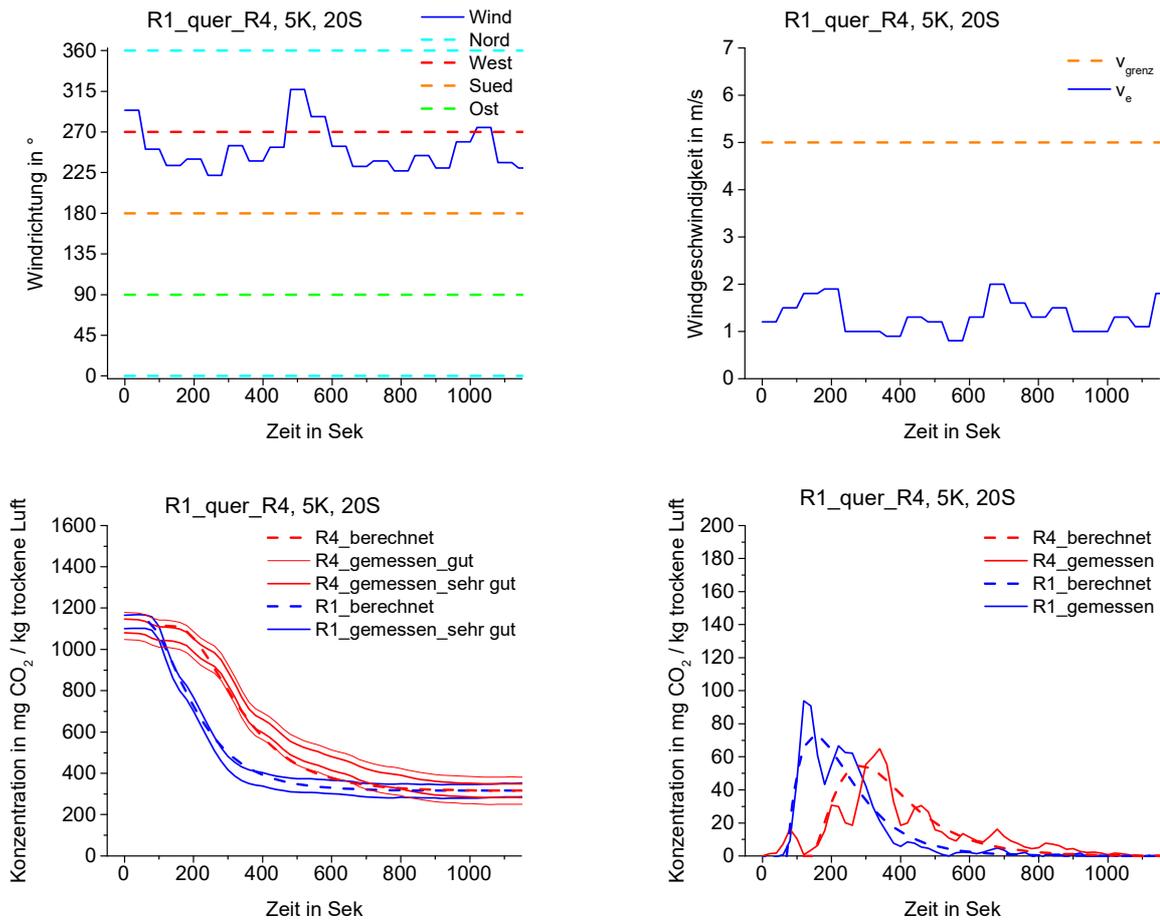
**Abb. 97:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine geringe Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde ebenfalls gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).



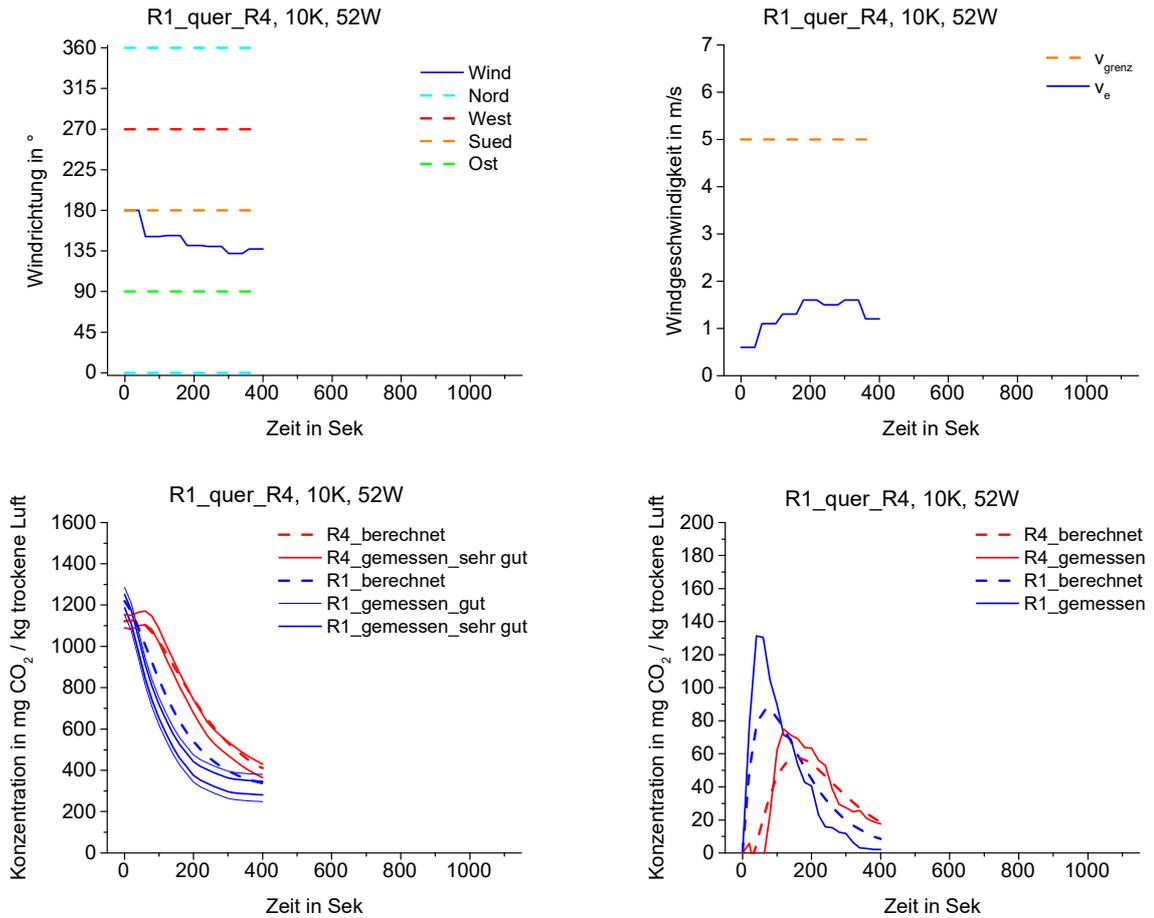
**Abb. 98: Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und einer guten Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine geringe Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite ungleichmäßig angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite ungleichmäßig angeströmt (Bild links oben).**



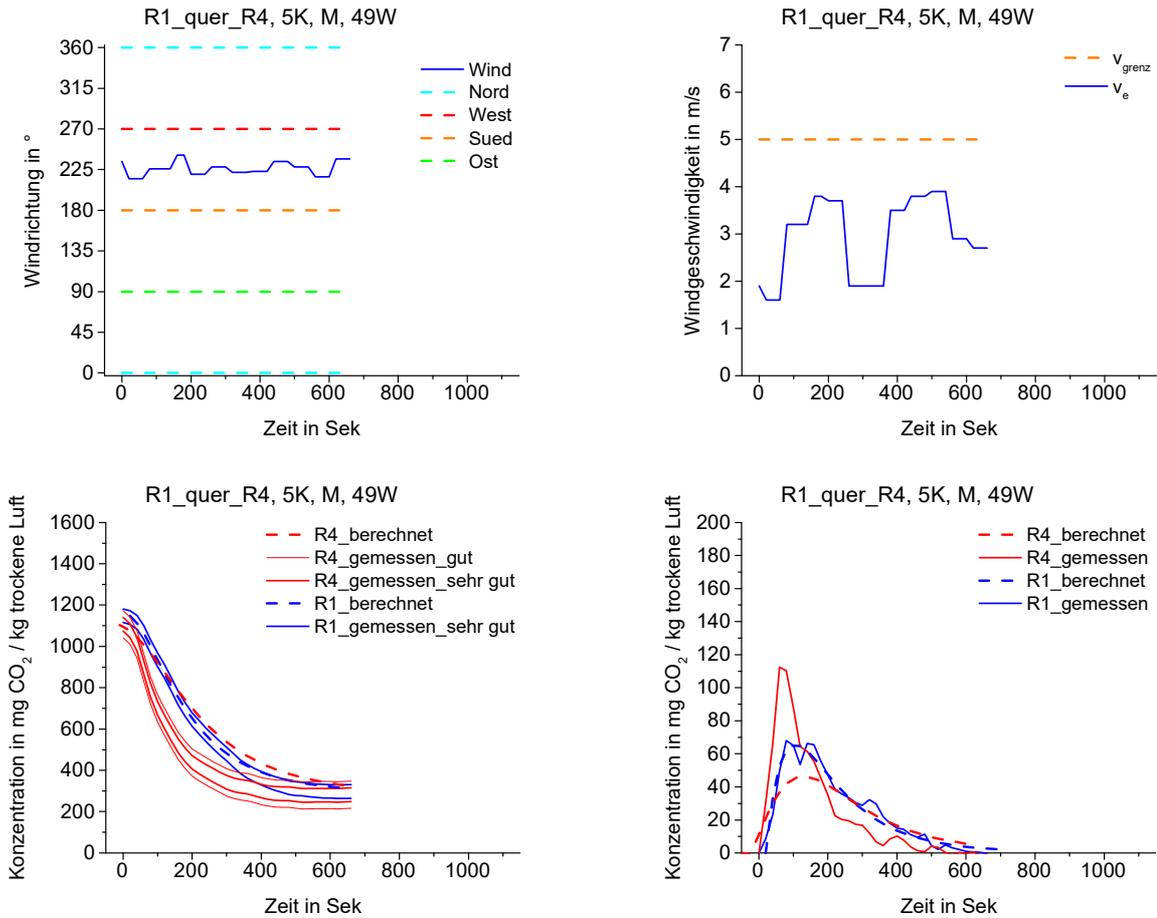
**Abb. 99: Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und eine gute Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine geringe Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde ebenfalls gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 100:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und eine gute Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] ebenfalls eine Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).

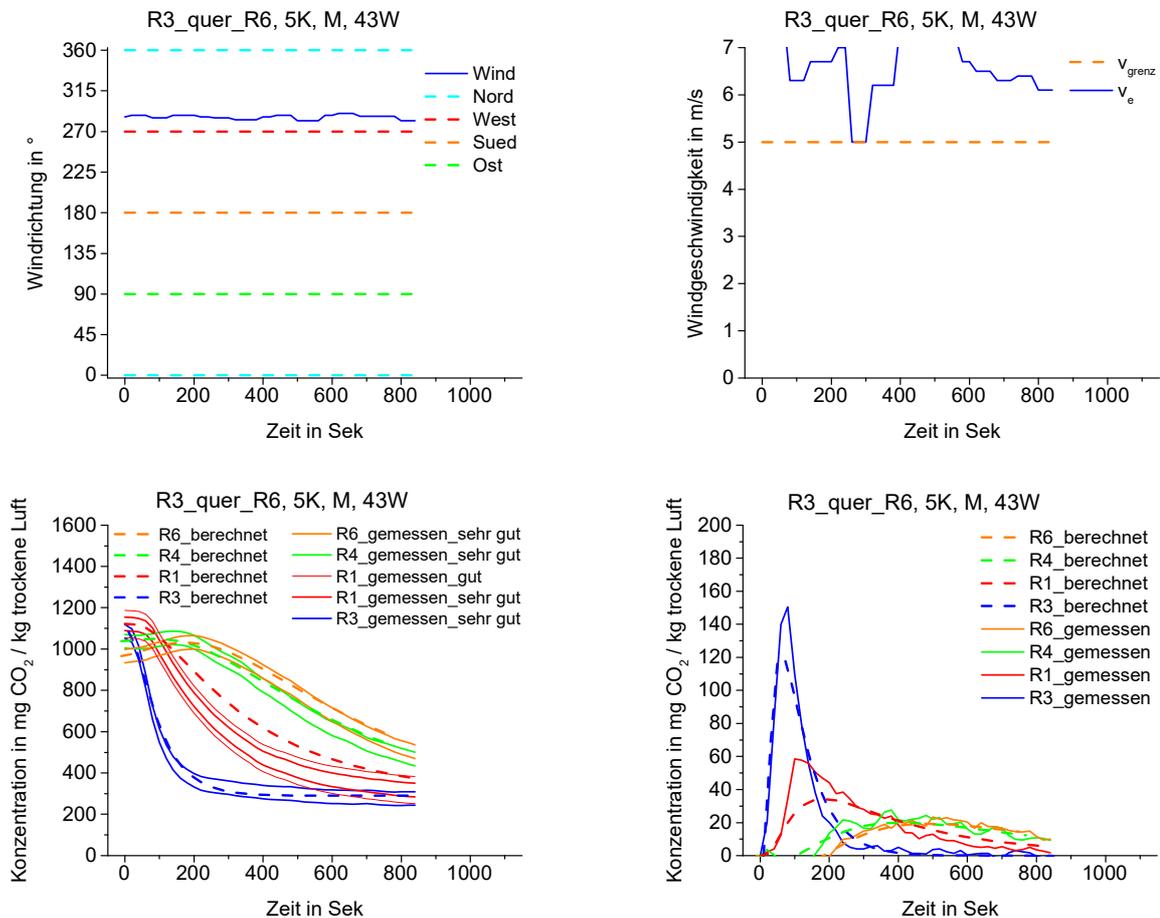


**Abb. 101:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und eine gute Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] eine geringe Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde ebenfalls gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).

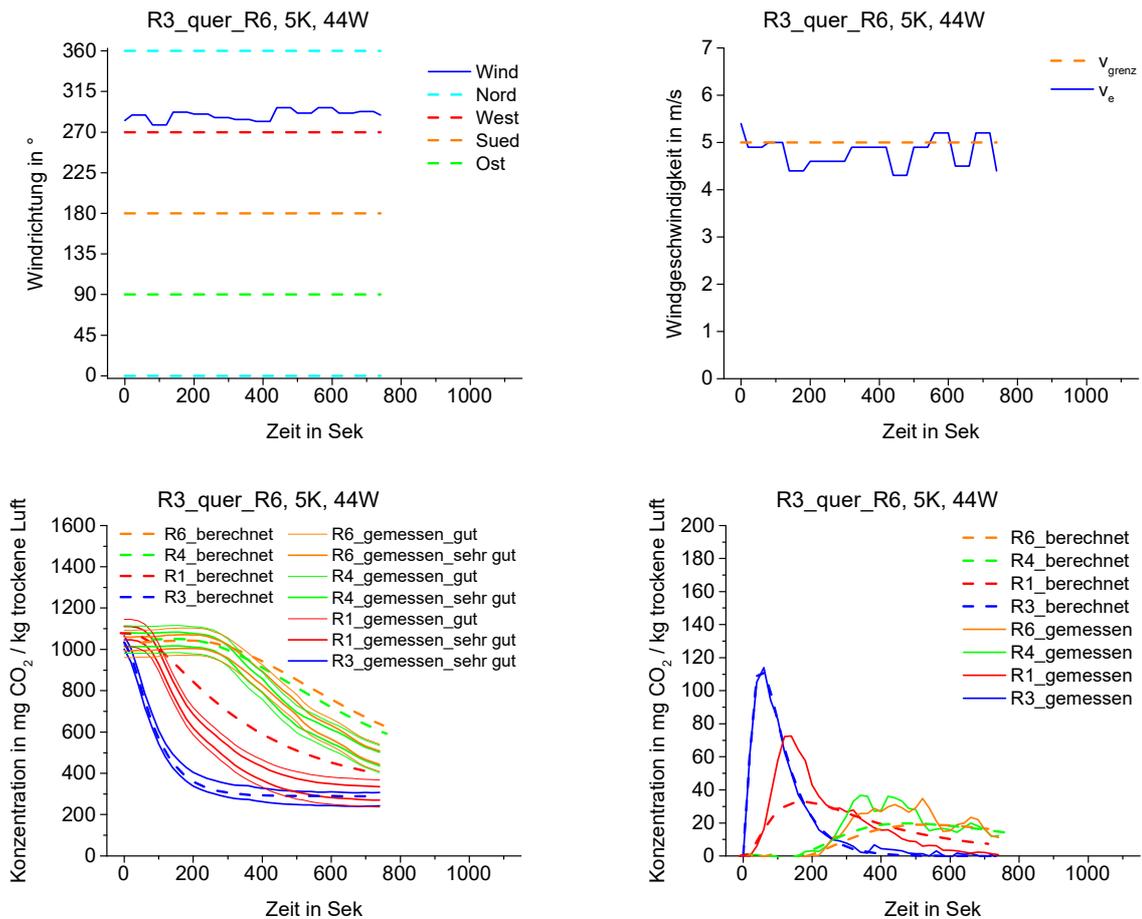


**Abb. 102:** Querdurchströmung durch 2 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und einer schlechten Übereinstimmung bei der roten Kurve [Zone 2] (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] ebenfalls eine Übereinstimmung und bei Zone 2 [rote Kurve] eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Osten ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Westen ausgerichtete Ausströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt (Bild links oben).

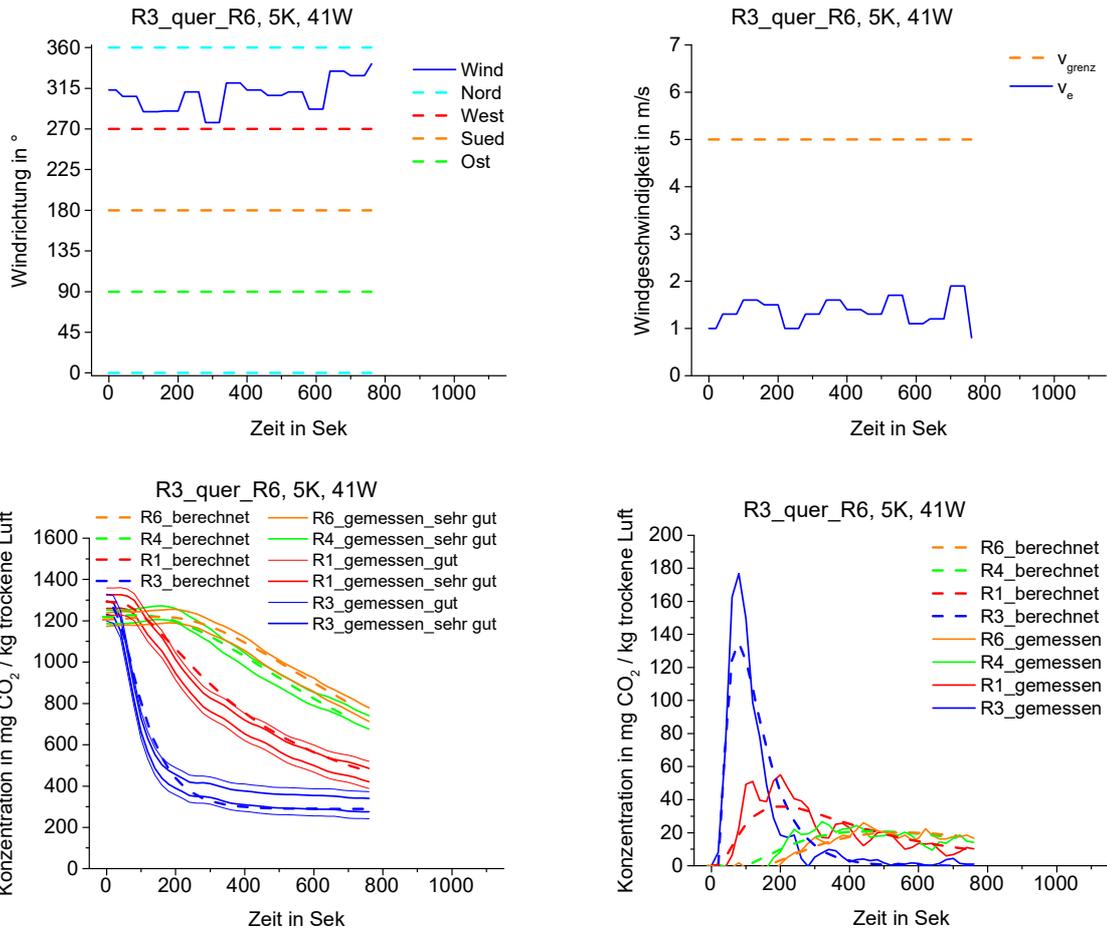
## 7.6 Querdurchströmung, EG geöffnet – OG geöffnet (4 Zonen)



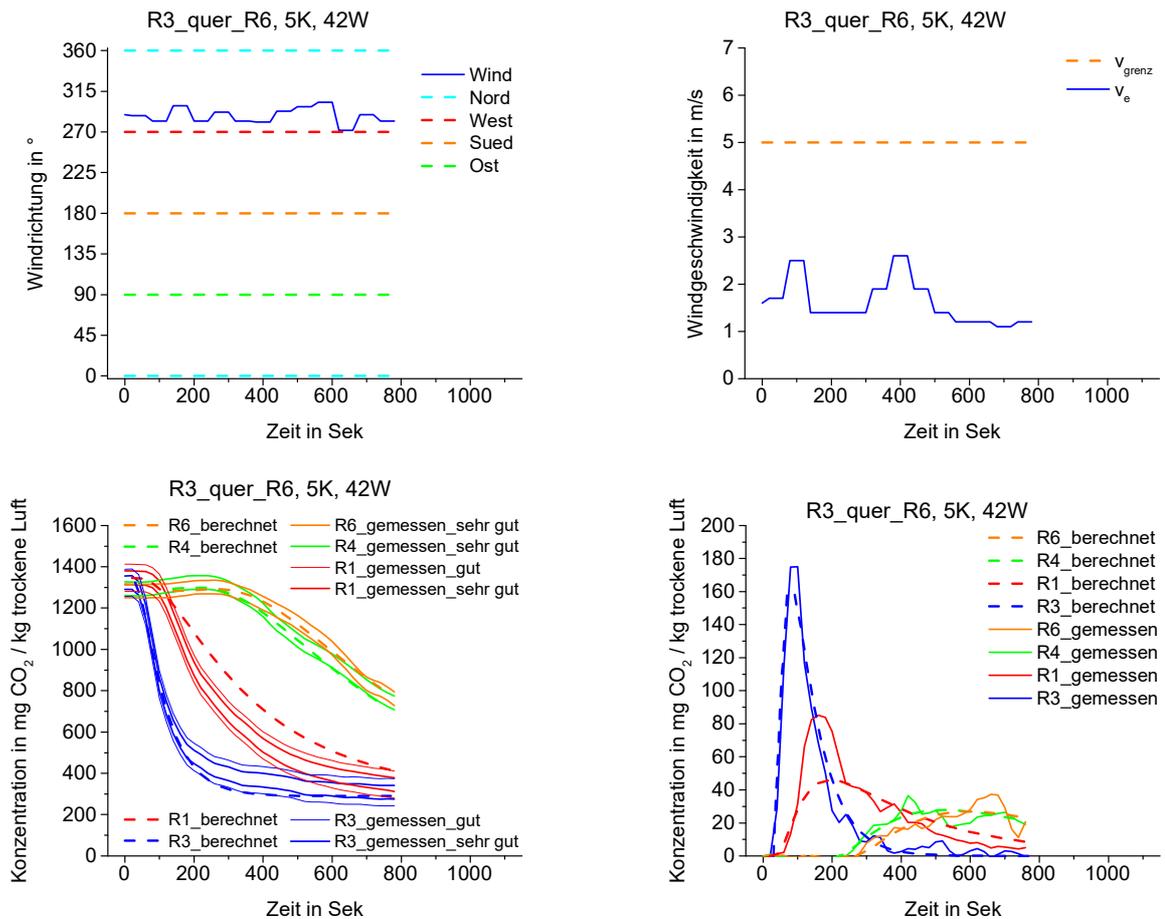
**Abb. 103: Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1]. Bei der roten Kurve [Zone 2] ist die Übereinstimmung schlecht. Bei der grünen Kurve [Zone 3] und der orangenen Kurve [Zone 4] ist die Übereinstimmung sehr gut (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] ebenfalls eine Übereinstimmung. Bei Zone 2 [rote Kurve] zeigt die Änderung der Tracergaskonzentration eine geringe Übereinstimmung. Die Übereinstimmung der Änderung der Tracergaskonzentration ist bei Zone 3 und 4 [grüne und orange Kurve] sichtbar (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt über 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Westen ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Süden ausgerichtete Ausströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



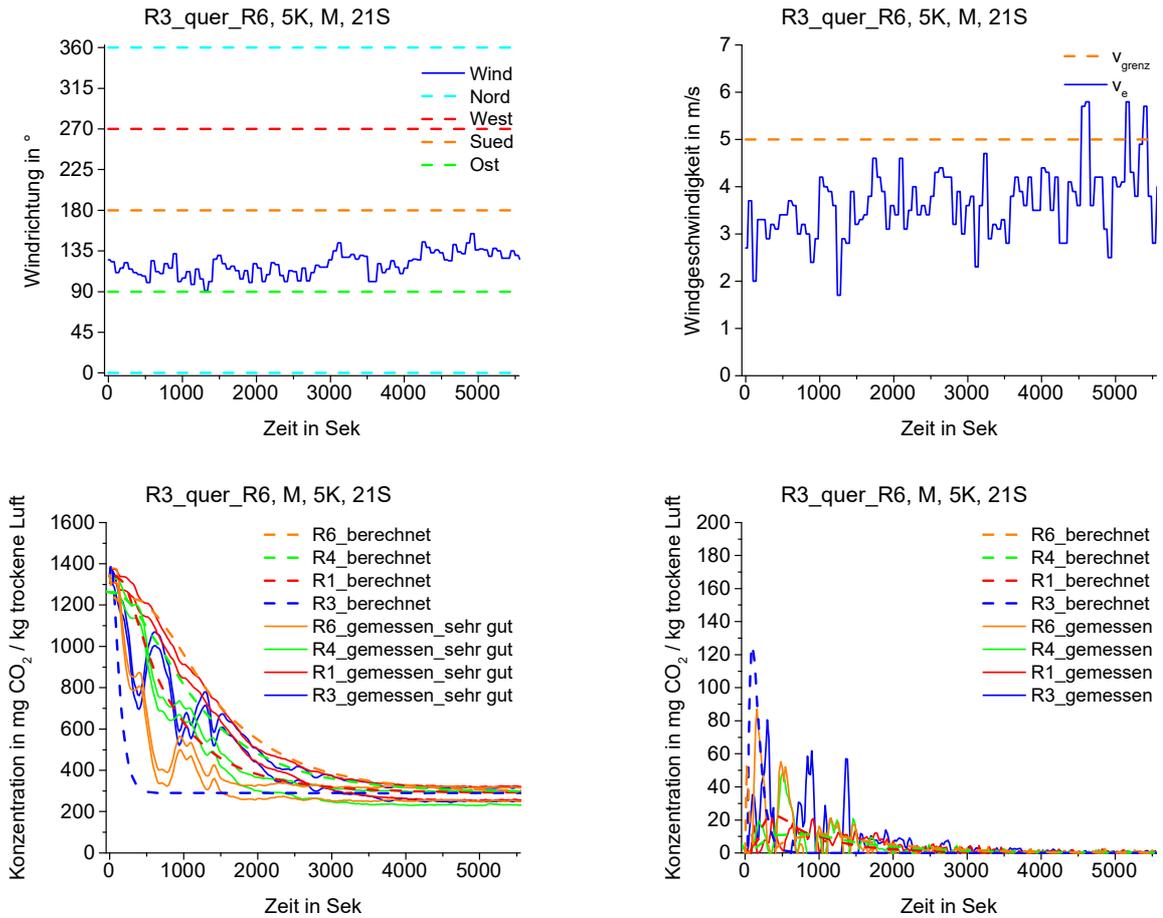
**Abb. 104: Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1]. Bei der roten Kurve [Zone 2], der grünen Kurve [Zone 3] und der orangen Kurve [Zone 4] ist die Übereinstimmung schlecht (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] ebenfalls eine Übereinstimmung. Bei Zone 2, Zone 3 und Zone 4 [rote, grüne und orange Kurve] zeigt die Änderung der Tracergaskonzentration eine geringe Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt im Bereich von 5 m/s und darüber (Bild rechts oben). Die nach Westen ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Süden ausgerichtete Ausströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 105: Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1] und bei der roten Kurve [Zone 2]. Die Übereinstimmung bei der grünen Kurve [Zone 3] und der orangenen Kurve [Zone 4] ist sehr gut (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 und 2 [blaue und rote Kurve] eine Übereinstimmung. Bei Zone 3 und Zone 4 [grüne und orange Kurve] zeigt die Änderung der Tracergaskonzentration eine sichtbare Übereinstimmung (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Westen ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windzugewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Süden ausgerichtete Ausströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**



**Abb. 106:** Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter natürlichen Bedingungen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessener und berechneter Tracergaskonzentration bei der blauen Kurve [Zone 1]. Bei der roten Kurve [Zone 2] ist die Übereinstimmung schlecht. Bei der grünen Kurve [Zone 3] und der orangen Kurve [Zone 4] ist die Übereinstimmung sehr gut (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) zeigt bei Zone 1 [blaue Kurve] ebenfalls eine Übereinstimmung. Bei Zone 2 [rote Kurve] zeigt die Änderung der Tracergaskonzentration eine geringe Übereinstimmung. Die Übereinstimmung der Änderung der Tracergaskonzentration ist bei Zone 3 und 4 [grüne und orange Kurve] sichtbar (Bild rechts unten). Der Wind kommt gleichmäßig aus westlicher Richtung (siehe Bild links oben). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s (Bild rechts oben). Die nach Westen ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Süden ausgerichtete Ausströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).



**Abb. 107: Querdurchströmung durch 4 Zonen mit geöffneten Fenstern im Erdgeschoß und Obergeschoß unter durchmischten Bedingungen. Die dargestellte Situation lässt sich nicht mit dem in 4.1.4 beschriebenen Verfahren auswerten, da die gemessenen Abklingkurven anders als die berechneten Abklingkurven verlaufen. Die Abklingkurven zeigen einen möglichen internen Luftaustausch zwischen Zone 1 [blaue Kurve] und Zone 4 [orange Kurve] ohne durchgängigen Luftstrom von der Einlass- zur Auslassöffnung durch alle Zonen (Bild links unten). Die Änderung der Tracergaskonzentration (Ableitung der Tracergaskonzentrationskurve) können in dieser Grafik nicht beobachtet werden (Bild rechts unten). Die Windgeschwindigkeit während der Messung liegt unter 5 m/s und steigt gegen Ende teilweise auf über 5 m/s an (Bild rechts oben). Die nach Westen ausgerichtete Einströmöffnung wurde an der windabgewandten Seite gleichmäßig angeströmt. Die nach Süden ausgerichtete Ausströmöffnung wurde gleichmäßig windparallel angeströmt (Bild links oben).**

## 8 Literaturverzeichnis

- Acred, Andrew; Hunt, Gary R. (2014): A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings. In: *Building and Environment* 71, S. 121–130. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.09.004.
- Adnot, Jerome; Waide, Paul; Riviere, Philippe; Marchio, Dominique; Holmstrom, Matin; Naeslund et al. (2003): Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC). FINAL REPORT - APRIL 2003. VOLUME1. Paris (Final Report, 1).
- Andersen, Karl Terpager (2003): Theory for natural ventilation by thermal buoyancy in one zone with uniform temperature. In: *Building and Environment* 38 (11), S. 1281–1289. DOI: 10.1016/S0360-1323(03)00132-X.
- Aynsley, Richard M. (1997): A resistance approach to analysis of natural ventilation airflow networks. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67-68, S. 711–719. DOI: 10.1016/S0167-6105(97)00112-8.
- Bartzanas, T.; Boulard, T.; Kittas, C. (2002): Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. In: *Computers and electronics in agriculture* 34, S. 207–221.
- Bednar, Thomas; Schöberl, Helmut; Ponweiser, Karl; Pöhn, Christian; Storch, Alexander (2012): Entwicklung des ersten rechtssicheren Nachweisverfahrens für Plusenergiegebäude durch komplette Überarbeitung der ÖNORMEN. Endbericht, ÖNORM Plus-Energie. Unter Mitarbeit von Siegmund Böhmer, Daniela Fischer, Michael Gössl, Radoslav Hanic, Simon Handler, Richard Hofer et al. Hg. v. Robert Rosenberger. Bundesinnung Bau. Wien.
- Blomsterberg, Å.; Carlsson, T.; Svensson, C.; Kronvall, J. (1999): Air flows in dwellings—simulations and measurements. In: *Energy and Buildings* 30 (1), S. 87–95. DOI: 10.1016/S0378-7788(98)00048-6.
- Borchiellini, Romano; Fürbringer, Jean-Marie (1999): An evaluation exercise of a multizone air flow model. In: *Energy and Buildings* 30 (1), S. 35–51. DOI: 10.1016/S0378-7788(98)00045-0.
- Cockroft, Jeremy Paul (1979): Heat Transfer and Air flow in Buildings. Dissertation. University of Glasgow, Glasgow. Building Services Research Unit.
- ÖNORM EN 15251, 01.09.2007: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; EN 15251.
- Ehrlich, Florian; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas (2013a): Parametric study of the summer behavior in timber houses. air flow in detached houses considering the influence of insect screens. In: A. Mahdavi (Hg.): Contributions to building physics. CESBP 2013. Wien. Vienna: Department of building physics and building ecology, S. 923–930.
- Ehrlich, Florian (2015): Sommer Verhalten im Niedrigenergiehaus. Einflüsse von der Lüftung bis zum NutzerInnenverhalten. In: Bauphysik Forum 2015. 6. Internationaler Holz(Bau)Physik-Kongress, 16. - 17. April 2015, Bad Ischl ; [Tagungsband], Bd. 50. Wien: Holzforschung Austria (HFA Schriftenreihe, 50), S. 13–24.
- Etheridge, David (2012): Natural ventilation of buildings. Theory, measurement and design. Hoboken, N.J.: Wiley. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/819381450>.
- Etheridge, David (2015): A perspective on fifty years of natural ventilation research. In: *Building and Environment*. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.033.

- Fabi, Valentina; Andersen, Rune Vinther; Corgnati, Stefano; Olesen, Bjarne W. (2012): Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. In: *Building and Environment* 58, S. 188–198. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.07.009.
- Flourentzou, F.; van der Maas, J.; Roulet, C.-A. (1998): Natural ventilation for passive cooling. Measurement of discharge coefficients. In: *Energy and Buildings* 27 (3), S. 283–292. DOI: 10.1016/S0378-7788(97)00043-1.
- Fux, Volker; Schäfers, Martin; Pekrul, Olga (2013): Neufassung von DIN 4108-2 - Sommerlicher Wärmeschutz mit Konstruktionen aus Kalksandstein. In: *Mauerwerk* 17 (2), S. 77–87. DOI: 10.1002/dama.201300563.
- Hall, Monika (2004): Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung.
- Handler, Simon; Korjenic, Azra; Bednar, Thomas (2011): Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen auf das Sommerverhalten von Gebäuden. In: *Bauphysik* 33 (4), S. 225–233.
- Hensen, J L M; Maas, J van der; Roos, A (1993): Air and Heat Flow through Large Vertical Openings. Eindhoven University of Technology. Eindhoven.
- Iftikhar, Raja A.; Fergus, Nicol J.; McCartney, Kathryn J.; Humphreys, Michael A. (2001): Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings 33, S. 235–244.
- Langeheinecke, Klaus; Jany, Peter; Thieleke, Gerd (2008): Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium ; mit 57 Tabellen. 7., verb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).
- Maas, Anton (1995): Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Kassel.
- Maas, J. van der (1992): Air flow through large openings in buildings. Technical Report. Subtask-2. Unter Mitarbeit von Francis Allard, Dominique Bienfait, Fariborz Haghghat, Georges Liébecq, Koos van der Maas, Roger Pelletret et al. Internationale Energie Agentur (IEA). Lausanne (Annex, 20).
- Miguel, A.F.; Silva, A.M. (2000): Porous materials to control climate behaviour of enclosures: an application to the study of screened greenhouses. In: *Energy and Buildings* 31, S. 195–209.
- Molina-Aiz, F.D; Valera, D.L; Peña, A.A; Gil, J.A; López, A. (2009): A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. In: *Biosystems Engineering* 104 (2), S. 224–242. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013.
- Moujalled, Bassam; Cantin, Richard; Guarracino, Gérard (2008): Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. In: *Energy and Buildings* 40 (12), S. 2215–2223. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.014.
- Němeček, Martin; Kalousek, Miloš (2015): Influence of thermal storage mass on summer thermal stability in a passive wooden house in the Czech Republic. In: *Energy and Buildings* 107, S. 68–75. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.068.
- Nikas, K.-S; Nikolopoulos, N.; Nikolopoulos, A. (2010): Numerical study of a naturally cross-ventilated building. In: *Energy and Buildings* 42 (4), S. 422–434. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.010.
- Norrefeldt, Victor (2013): VEPZO - Velocity Propagating Zonal Model. A locally refined airflow model for confined spaces to use in optimization applications. Zugl.: Stuttgart, Univ., Dissertation, Stuttgart.

OIB (2015): Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-Richtlinie 6 (6). Online verfügbar unter [www.oib.or.at](http://www.oib.or.at).

Okuyama, Hiroyasu; Onishi, Yoshinori (2012): System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration. In: *Building and Environment* 54, S. 39–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.002.

Okuyama, Hiroyasu; Onishi, Yoshinori; Tanabe, Shin-ichi; Kashihara, Seiichi (2009): Statistical data analysis method for multi-zonal airflow measurement using multiple kinds of perfluorocarbon tracer gas. In: *Building and Environment* 44 (3), S. 546–557. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.04.014.

Orme, Malcolm; Leksmono, Nurul (2002): AIVC Guide 5. Ventilation Modelling Data Guide. Internationale Energie Agentur (IEA).

Peppes, A. A.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. N. (2001): Buoyancy-driven flow through a stairwell. In: *Building and Environment* 36 (2), S. 167–180. DOI: 10.1016/S0360-1323(99)00062-1.

Prommer, Norbert (2008): Bewertung der Sommertauglichkeit von Gebäuden. Ein Info-Service des Verbandes Österreichischer Ziegelwerke. Newsletter-1 und 2. Verband Österreichischer Ziegelwerke. Wien.

Ramponi, R.; Blocken, B. (2012): CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. In: *Building and Environment* 53, S. 34–48. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.004.

Ravikumar, Parmasivam; Prakash, D. (2011): Analysis of thermal comfort in a residential room with insect proof screen: A case study by numerical simulation methods. In: *Build. Simul* 4 (3), S. 217–225. DOI: 10.1007/s12273-011-0032-9.

Schulze, Tobias; Eicker, Ursula (2013): Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. In: *Energy and Buildings* 56, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.044.

Stephens, John (2003): Poisonous Atmospheres: Ventilation and the Late Nineteenth Century Building. In: *Architectural Science Review* 46 (1), S. 3–11. DOI: 10.1080/00038628.2003.9696958.

Teibinger, Martin; Ehrlich, Florian; Nagl, Stefan; Pichler, Hubert (2014): ENERGY EFFICIENCY. Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden. Endbericht HFA-TIMBER. Unter Mitarbeit von Jozef Bednar, Stefan Dorner, Gerald Knoll, Irmgard Matzinger, Markus Novacek, Bernd Nusser und Christina Spitzbart. Hg. v. Holzforschung Austria. Wien.

Teitel, M.; Dvorkin, D.; Haim, Y.; Tanny, J.; Seginer, I. (2009): Comparison of measured and simulated flow through screens: Effects of screen inclination and porosity. In: *Biosystems Engineering* 104 (3), S. 404–416. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.07.006.

Teitel, Meir (2001): The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 110, S. 13–25.

Teitel, Meir (2007): The effect of screened openings on greenhouse microclimate. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 143 (3-4), S. 159–175. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.01.005.

Teppner, Renate; Langensteiner, Bernd; Meile, Walter; Brenn, Günter; Kerschbaumer, Sybill (2014): Air change rates driven by the flow around and through a building storey with fully open or tilted windows. An experimental and numerical study. In: *Energy and Buildings* 76, S. 640–653. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.004.

Töglhofer, Christoph; Formayer, Herbert; Habsburg-Lothringen, Clemens; Prettenthaler, Franz; Steininger, Karl; Tobin, Alexandra (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Niederösterreich. Endbericht.

Wang, Liangzhu; Chen, Qingyan (2008): Evaluation of some assumptions used in multizone airflow network models. In: *Building and Environment* 43 (10), S. 1671–1677. DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.10.010.

ÖNORM B 8110-3, 15.03.2012: Wärmeschutz im Hochbau; Teil 3: Vermeidung der sommerlichen Überwärmung; B 8110-3.

ÖNORM B 8110-5; Bbl. 2, 01.03.2010: Wärmeschutz im Hochbau; Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile; B 8110-5, Beiblatt 2.

ZAMG (2015): Hitzewellen: 2015 eines der extremsten Jahre der Messgeschichte — ZAMG. Online verfügbar unter <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzewellen-2015-eines-der-extremsten-jahre-der-messgeschichte>, zuletzt geprüft am 15.08.2015.

Zhang, Yufan; Barrett, Peter (2012): Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. In: *Building and Environment* 50, S. 125–134. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.018.

Nikolopoulos, Nikos; Nikolopoulos, Aristeidis; Larsen, Tine S.; Nikas, Konstantinos-Stefanos P. (2012): Experimental and numerical investigation of the tracer gas methodology in the case of a naturally cross-ventilated building. In: *Building and Environment* 56, S. 379–388. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.04.006.

## 9 Publikationen

Ehrlich, Florian (2013): Sommerliches Verhalten von Holzkonstruktionen. In: Bauphysik-Forum 2013. 4. Internationaler Holz(Bau)Physik-Kongress ; 18. - 19. April 2013, Mondsee ; [Tagungsband], Bd. 42. Wien: Holzforschung Austria (HFA-Schriftenreihe, 42), S. 135–141.

Ehrlich, Florian; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas (2013a): Parametric study of the summer behavior in timber houses. air flow in detached houses considering the influence of insect screens. In: A. Mahdavi (Hg.): Contributions to building physics. CESBP 2013. Wien. Vienna: Department of building physics and building ecology, S. 923–930.

Ehrlich, Florian; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas (2013b): PARAMETRIC STUDY OF THE SUMMER BEHAVIOR IN TIMBER HOUSES – COMPARISON OF WOODEN CONSTRUCTIONS. In: ProLigno, Bd. 9. Brasov: Transylvania University Press Brasov (ProLigno, 9), S. 41–49.

Ehrlich, Florian; Teibinger, Martin: Energie efficiency. Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden. Abschlußbericht (HFA-Timber). In: *HFA-Magazin* 12 (04/2014), S. 22–25.

Teibinger, Martin; Ehrlich, Florian; Nagl, Stefan; Pichler, Hubert (2014): ENERGY EFFICIENCY. Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden. Endbericht HFA-TIMBER. Unter Mitarbeit von Jozef Bednar, Stefan Dorner, Gerald Knoll, Irmgard Matzinger, Markus Novacek, Bernd Nusser und Christina Spitzbart. Hg. v. Holzforschung Austria. Wien.

Ehrlich, Florian (2015): Sommer Verhalten im Niedrigenergiehaus. Einflüsse von der Lüftung bis zum NutzerInnenverhalten. In: Bauphysik Forum 2015. 6. Internationaler Holz(Bau)Physik-Kongress, 16. - 17. April 2015, Bad Ischl ; [Tagungsband], Bd. 50. Wien: Holzforschung Austria (HFA Schriftenreihe, 50), S. 13–24.