
Komfort- und kosten- optimierte Luftführungs- konzepte für energie- effiziente Wohnbauten „Doppelnutzen“

Vorteile und Grenzen der
erweiterten Kaskadenlüftung

E. Sibille
G. Rojas-Kopeinig
M. Rothbacher
R. Pfluger
H. K. Malzer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

37/2013

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten „Doppelnutzen“

Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung

Dr.-Ing. Rainer Pfluger, DI Elisabeth Sibille, Mag. Gabriel Rojas-
Kopeinig, DI Mattias Rothbacher, DI Harald Konrad Malzer
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Institut für
Konstruktion und Materialwissenschaften

Neue Heimat Tirol Gemeinnützige WohnungsGmbH

Innsbruck, Mai 2013

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse www.HAUSderZukunft.at Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract	11
1 Einleitung.....	13
2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt	14
2.1 Beschreibung des Standes der Technik.....	14
2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema.....	15
2.3 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)	17
2.4 Verwendete Methoden	17
2.5 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten mit Quellenangabe, Erläuterung der Erhebung.....	19
Multi-Zonen-Simulationen	19
3 Ergebnisse des Projektes.....	20
3.1 Beurteilung der erweiterten Kaskadenlüftung mittels Simulation	20
3.1.1 Entwicklung und Testen geeigneter Multi-Zonen-Simulationsmodelle	20
3.1.2 Gewählte Simulationsparameter – Statistisch relevantes Referenzmodell...23	
3.1.3 Auswerte- und Bewertungsmethode.....	28
3.1.4 Sensitivitätsanalyse – Identifizierung der wichtigsten Simulationsparameter	30
3.1.5 Simulationsergebnisse des Referenzmodell mit Standardluftführung und mit erweiterter Kaskadenlüftung	33
3.1.6 CFD-Simulationen - Lüftungseffizienz bei erweiterter Kaskadenlüftung in Wohnzimmer mit ungünstig positionierten Überströmöffnungen	36
3.2 Messergebnisse – Feldversuch in 3 Wohneinheiten	40
3.2.1 Volumenströme.....	41
3.2.2 Gewählte Vergleichszeiträume	43
3.2.3 Auswertung - Schlafzimmer	44
3.2.4 Auswertung Wohnzimmer.....	46
3.2.5 TVOC Messungen	47
3.3 Überströmöffnungen.....	48
3.3.1 Anforderungen an Überströmelemente.....	48
3.3.2 Vermessung von einfachen tür- und zargenintegrierten Überströmlösungen.....	54
3.4 Grundrisstopologie	62

3.4.1	Luftqualität im Wohnzimmer nach Grundrissgestaltung bei erweiterter Kaskadenlüftung	62
3.4.2	Einfluss der erweiterten Kaskadenlüftung auf die Investitionskosten	66
4	Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms	69
4.1	Einpassung in das Programm	69
4.2	Beitrag zum Gesamtziel des Programms	69
4.3	Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	69
4.4	Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse	70
5	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	70
6	Ausblick und Empfehlungen	71
7	Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis	72
8	Anhang	80

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Ein „Haus der Zukunft“ sollte äußerst energieeffizient sein und durch hohen Wohnkomfort überzeugen. Beides lässt sich nur mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung erreichen. Die Technologie ist eigentlich vorhanden und liefert bei guter Planung und Umsetzung zufriedenstellende Ergebnisse. Allerdings führen hohe Kosten und komplexe Systemtechnik heute leider noch oft zu suboptimalen Lösungen bei Planung und Umsetzung und folglich geringer Nutzerakzeptanz.

Die Motivation für dieses Projekt besteht im Bestreben, möglichst einfache, kostengünstige aber dennoch höchst energieeffiziente („Low-Tech“) Lüftungskonzepte mit hohem Wohnkomfort zu entwickeln.

Inhalte und Zielsetzungen

Komfortlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (Zu-/Abluftanlagen) können wesentlich effizienter, kostengünstiger und wartungsärmer gebaut werden, wenn die Luftführung konsequent nach dem Prinzip der gerichteten Durchströmung erfolgt. Dabei kann die Zuluft nicht nur von den Zulufräumen in Flure und Ablufträume überströmen, sondern auch z.B. vom Schlafräum in den Wohnraum, bzw. vom Abstellraum in das WC (Doppelnutzen der Zu- bzw. Abluft). Im Rahmen dieses Projekts wurde der Einfluss der Luftführung hinsichtlich Raumluftqualität, Raumluftfeuchte und Kosten systematisch untersucht. Ein direkter Vergleich zwischen der sogenannten erweiterten Kaskadenlüftung (keine eigene Zuluft im Wohnzimmer) und der Standardluftführung (mit Zuluftauslass im Wohnzimmer) soll Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung aufzeigen. Zudem wurden offene Fragestellungen zur Dimensionierung, zur Grundrissgestaltung und zum Schallschutz (in Bezug auf Überströmöffnungen) geklärt und in einem Planungsleitfaden dokumentiert.

Methodische Vorgehensweise

Mit Hilfe numerischer Simulationsmethoden konnte der Einfluss der Luftführung auf Raumluftqualität und Raumluftfeuchte quantifiziert werden. Die sogenannten Multi-Zonen-Modelle wurden mit Hilfe umfangreicher Messdaten aus Vorprojekten validiert. Auf Basis statistischer Daten wurde eine für Österreich repräsentative Referenz-Wohnsituation modelliert und der Einfluss diverser Eingabeparameter (Nutzerverhalten, Klima etc.) analysiert um dann im direkten Vergleich den Einfluss der Raumluftführung zu untersuchen.

Auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche wurden mögliche Wohnungsgrundrisse systematisch nach topologischen Kriterien kategorisiert. Eine entsprechende Vielzahl an Computersimulationen mit dem genannten Multi-Zonen-Modell gaben Aufschluss über Möglichkeiten und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung in Abhängigkeit des Grundrisses. Außerdem konnten mit Hilfe von Strömungssimulationen (CFD) kritische Überströmanordnungen für bestimmte Grundrisse identifiziert werden.

Parallel zu den numerischen Simulationen wurden tür- und zargenintegrierte Überströmlösungen im Doppelkammer-Prüfstand messtechnisch in Bezug auf Schallschutz und Strömungswiderstand untersucht.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die im Projekt „Doppelnutzen“ gewonnenen Erkenntnisse stellen erstmals systematisch alle für die Planung von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau notwendigen Konzepte und Informationen bereit, welche für die praktische Umsetzung der erweiterten Kaskadenlüftung notwendig sind. Damit kann die Eignung von praktisch beliebigen Grundrissen in Neubau und Sanierung für die erweiterte Kaskadenlüftung bewertet werden. Darüber hinaus konnten die bislang noch fehlenden strömungstechnischen und schalltechnischen Daten für einfache und kostengünstige (insbesondere für bauseits zu errichtende) Überströmöffnungen gemessen werden.

Aufbauend auf den Projektergebnissen wird die Umsetzung an konkreten Beispielobjekten (mehrgeschossiger Wohnbau) im Rahmen des Projektes „low_vent.com“ vom Projektteam erprobt.

Die gesamten Projektergebnisse sind insbesondere für Planer, Architekten, Haustechniker und Entscheidungsträger in Wohnbaugesellschaften von besonderem Interesse, weil sie die Möglichkeit bieten, mittels der erweiterten Kaskadenlüftung kostengünstige und hocheffiziente Lüftungssysteme zu realisieren. Mit Hilfe des online zur Verfügung gestellten Tools kann die genannte Zielgruppe im Rahmen ihrer jeweiligen Planungstätigkeit arbeiten, fallspezifische Informationen abrufen und ggf. in den eigenen Konzepten und Entwürfen umsetzen.

Ausblick

Die hier vorgestellten Arbeiten und Ergebnisse konnten bereits im Forschungsprojekt low_vent.com weitergeführt und konkretisiert werden. Außerdem soll eine messtechnische Absicherung von den in diesem Projekt mittels CFD identifizierten kritischen Fällen durchgeführt werden.

Ein mögliches Demonstrationsvorhaben ist das Bauvorhaben „Vögelebichl“, welches vom Projektpartner Neue Heimat Tirol in Innsbruck in zwei Gebäudeteilen realisiert wird. Ein weiteres Demonstrationsprojekt ist in Vorarlberg im kostengünstigen Wohnbau geplant (Projekt KliNaWo unter der Leitung des Energieinstituts Vorarlberg).

Abstract

Starting point/Motivation

The program aims at improving energy efficiency in residential areas while maintaining a very high comfort for the user. This can be achieved only with the installation of a ventilation system with heat recovery. The technology and device for this is already available. With a good design and realisation it is already possible to achieve acceptable results. However, this technology still incurs high costs and complexity in the systems which lead to sub-optimal solutions for the design and the realisation. This leads to a low user acceptance.

For this reason the first motivation of this project is to investigate concepts for ventilation which are as simple, cheap and energy efficient as possible (“low-tech”) whilst maintaining high comfort for the users.

Contents and Objectives

Ventilation facilities with heat recovery can be more efficient, cheaper and demand less maintenance when the air guidance is designed according to the concept of directed air flow. This means, that the supply air can flow from the supply air rooms to the exhaust air room through the corridor and also through the living-room. This project investigates the effect of the air guidance on air quality, air humidity and the costs. A direct comparison of standard (with supply air in the living-room) and cascade (without supply air in the living-room) ventilation should show the advantages and the limits of cascade ventilation. In addition the issues of air-rating, floor-plan composition and noise insulation (related to the air flow openings) have been investigated and the results have been recorded on a website.

Methods

The influence of air guidance on air quality and air moisture could be quantified with numerical simulation methods. The multi-zone model has been validated with several measurements from former projects. A representative reference apartment for Austria has been modelled based on several statistical data. Thus, the influence of several input parameters (user behaviour, climate...) could be analysed and eventually a direct comparison of the concept of air-guidance could be investigated.

Large-scale research of typical floor-plans has been carried out in order to classify them into several categories according to their topological properties. Every floor-plan category has been systematically simulated with the given multi-zone model in order to point out the possibility for cascade ventilation and / or its limits according to the topological properties of the floor-plan. It should be noted that computerised fluid dynamic (CFD) simulations were made to identify which arrangements of the air-flow opening could be critical for cascade ventilation.

Measurements have been taken in a “double-room” using several air-flow opening elements to investigate the airborne sound insulation and the air-flow capability.

Results

The results of the project “Doppelnutzen” give necessary detailed information about the concept of cascade ventilation and systematic answers for design and realisation issues. It is possible to evaluate the adaptability of a given floor-plan to cascade ventilation. In addition, missing data on noise insulation and air flow capability in simple and low-cost air-flow openings have been collected.

The results of the project are the theoretical basis for the installation of cascade ventilation in several case-study buildings in the frame of the project “low-vent.com”.

The results of the project are particularly interesting for designers, architects and residential building companies because the concept of cascade ventilation allows the design of highly efficient and low-cost ventilation systems. For this purpose, an online site and tool help them to access up the necessary information for specific cases in order to help them to design cascade ventilation correctly.

Prospects / Suggestions for future research

The results of this project have already been used within the frame of research project low-vent.com. It should be noted that measurements will be made to validate the CFD simulation for critical cases concerning the arrangement of the air-flow openings in the living-room.

The concept of cascade ventilation will probably be installed in several case-study buildings. One of them is actually built by the project partner “Neue Heimat Tirol”. The other is located in the region Vorarlberg and will be investigated within the research project “KiNaWo”.

1 Einleitung

Ein „Haus der Zukunft“ sollte äußerst energieeffizient sein und durch hohen Wohnkomfort überzeugen. Beides lässt sich nur mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung erreichen. Die erforderliche Technologie ist eigentlich vorhanden und liefert bei guter Planung und Umsetzung zufriedenstellende Ergebnisse. Aber hohe Kosten und komplexe Systemtechnik führen leider noch oft zu suboptimalen Lösungen bei Planung und Umsetzung, und in Folge zu einer in der breiten Bevölkerung noch niedrigen Akzeptanz.

Komfortlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (Zu-/Abluftanlagen) können wesentlich effizienter, kostengünstiger und wartungsärmer gebaut werden, wenn die Luftführung konsequent nach dem Prinzip der gerichteten Durchströmung erfolgt. Das Projekt „**Doppelnutzen**“ untersucht die Umsetzung dieses Prinzips für den Wohnungsbau: Die Luft wird nur in den Schlafräumen zugeführt und strömt von dort in die Wohnräume über. Damit lässt sich der notwendige Außenluftvolumenstrom bei praktisch gleicher Raumluftqualität weiter reduzieren, denn die BewohnerInnen befinden sich *entweder* im Wohnzimmer *oder* im Schlafzimmer. Gegenüber einer Lösung mit umschaltbaren Klappen stellt dies eine **einfache, kostengünstige und wartungsarme „Low-tech“ Variante** dar.

Obwohl sich dieses Prinzip in einzelnen Demonstrationsvorhaben schon gut bewährt hat, fehlte vor dem Projekt noch eine systematische Grundlageuntersuchung zur erweiterten Kaskadenlüftung. Dies wurde im Rahmen dieses Projektes an drei verschiedenen Themenschwerpunkten durchgeführt.

Luftqualität

Zuerst wurde die Luftqualität bei erweiterter Kaskadenlüftung durch Simulationen beurteilt. Dafür wurden Modelle erzeugt und der Einfluss von verschiedenen Parametern (gebäude- oder nutzerabhängig) untersucht. Eine Studie mit CFD Simulationen wurde ebenfalls durchgeführt, um Planungshinweise für eine gute Luftdurchmischung im Wohnzimmer bei erweiterter Kaskadenlüftung zu liefern.

Das Prinzip von Kaskadenlüftung wurde in der Passivhauswohnanlage Lodenareal (NHT, Innsbruck) getestet und gemessen. Die Messergebnisse bestätigen die Ergebnisse aus den Simulationen.

Überströmöffnung

Des Weiteren wurde die Frage der Überströmöffnungen ebenfalls durch Messungen von Volumenstrom, Druckverlust und Schall untersucht. Anhand der Messergebnisse wurden empirische Formeln zur Bestimmung des Druckverlustes in Abhängigkeit des Volumenstroms für jedes untersuchte Element vorgeschlagen.

Grundrisse

Eine Untersuchung der Einsetzbarkeit der erweiterten Kaskadenlüftung nach den topologischen Eigenschaften der Grundrisse wurde ebenfalls im Rahmen dieses Projektes durchgeführt.

Aus den verschiedenen Resultaten wurden die praxisrelevanten Aussagen ausgewählt und in einer Webseite in Form von Planungshinweisen zusammengestellt. Die Webseite beinhaltet ebenfalls ein interaktives Web-Tool, das die Eignung eines gegebenen Grundrisses für eine erweiterte Kaskadenlüftung überprüft.

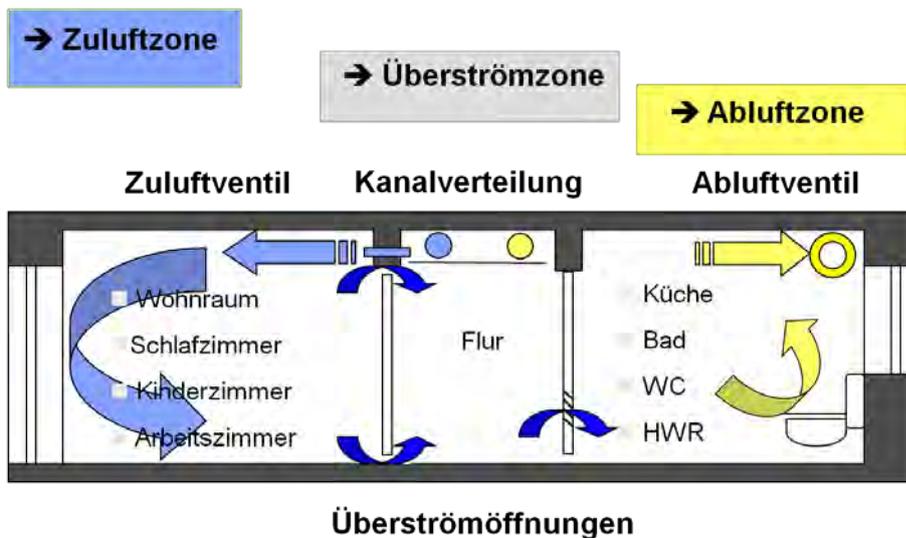
In den folgenden Kapiteln werden zuerst die Hintergrundinformationen zum Projektinhalt erläutert. Dann werden die Methoden und die Ergebnisse aus der Forschungsarbeit zusammengestellt. Zum Schluss wird erklärt wie die Resultate dieses Projektes sich auf die Ziele des Programms beziehen.

2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

2.1 Beschreibung des Standes der Technik

Komfortlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (Zu-/Abluftanlagen) führen die Außenluft nach Vorerwärmung durch den Wärmeübertrager normalerweise jeweils allen Zulufräumen wie z.B. Wohn-, Arbeits-, Schlafzimmer etc. über einen oder mehrere Luftkanäle zu. Über spezielle Überströmöffnungen oder den Türspalt strömt die Luft von dort in den Flur und wird dann in den Ablufträumen (Bad, WC, Küche etc.) wieder abgesaugt (siehe Abbildung 1). Dieses Prinzip der Luftführung wird gerichtete Durchströmung genannt, weil die Richtung der Luftführung immer von den Räumen mit wenig Raumlufbelastung zu den Räumen mit höherer Belastung geführt wird. Damit wird die Luft mehrfach genutzt, weil sie sowohl die Zu- als auch die Ablufträume durchströmt.

Gegenüber der raumweisen Lüftung, bei welcher jeder Raum sowohl über Zu- als auch mit Abluftkanal verfügt, reduziert sich bei der gerichteten Durchströmung der notwendige Außenluftvolumenstrom bereits um etwa 50 %. Dies wirkt sich positiv auf die Effizienz der Anlage (Ventilatorstromverbrauch und Lüftungswärmeverluste) und auf die Investitionskosten (weniger Kanallänge, kleinere Zentralgeräte, weniger Ventile) aus. Insbesondere trägt es dazu bei, zu geringe Raumluffeuchte im Winter zu vermeiden (geringerer Außenluftwechsel). Dieses Prinzip hat sich heute als Standardverfahren für die Luftführung etabliert.



Überströmöffnungen
 Abbildung 1: Schematische Darstellung der Standardluftführung bei mechanischer Wohnraumbelüftung. Diese Form der gerichteten Durchströmung hat sich heute als Standard etabliert. (Quelle: PHI)

2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Bereits 1999 wird die gerichtete Durchströmung als Standardverfahren für die Luftführung in energieeffizienten Wohnräumen beschrieben (Pfluger, Feist, & Schnieders, 1998). Dabei wird die im Wärmeübertrager vorgewärmte Frischluft in den Zuluftbereichen wie z.B. Wohn-, Arbeits-, Schlafzimmer etc. eingebracht. Über die vorgesehenen Überströmöffnungen strömt die Luft dann meist über den Flur in die Abluftbereiche, wie Bad, WC, Küche, etc. Siehe Abbildung 1.

Unter dem Stichwort Zonierung wird auch schon in (Werner & Laidig, 1997) die dauerhaft und gerichtete Luftströmung von den Zuluftzonen zu den Abluftzonen empfohlen. Schon damals wurde erkannt, dass eventuell auch Essbereiche offener Wohnküchen als reine Überströmzonen, ohne eigene Zu- oder Abluft, ausgelegt werden können. Während in Österreich und Deutschland über Jahre die Wohn- und Essbereiche den klassischen Zuluftbereichen zugeschrieben wurde, erkannte man in der Schweiz schon früh, dass das Prinzip der gerichteten Durchströmung noch weiter entwickelt werden kann. In einem Informationspapier für Baufachleute (Fraefel, 1999) wird die Kaskadenlüftung folgendermaßen beschrieben: „Bei diesem Konzept führt man die frische Luft nur den Schlafzimmern zu, lässt den Wohnbereich frei durchströmen und fasst die Abluft in den am stärksten belasteten Räumen wie Küche, Bad, WC.“

Die Vorteile der Kaskadenlüftung mit Wohnbereich als Überströmbereich liegen auf der Hand, siehe z.B. (Barp, Fraefel, & Huber, 2009; Greml, 2010; Kapferer, Greml, Höfler, Leitzinger, & Suschek-Berger, 2011): Die Außenluftfrate kann weiter reduziert werden, da die Luft quasi doppelt genutzt wird. Wenn die Bewohner schlafen, wird im Wohnzimmer keine Frischluft benötigt, und wenn sich die Bewohner im Wohnbereich aufhalten, kommt die Zuluft „unverbraucht“ aus den Schlafräumen. Durch die geringere Außenluftfrate kann die gesamte Lüftungsanlage (Ventilatoren, Luftleitungen,...) kleiner und somit kostengünstiger ausgelegt

werden. Im Fall gleichbleibender Leitungsquerschnitte kann der Ventilatorstromverbrauch gesenkt werden, und die Ventilator- und Strömungsgeräusche reduzieren sich. Geringere Luftwechselraten bedeuten bei gleichbleibenden Wärmerückgewinnungsgrad geringere Lüftungswärmeverluste. Außerdem benötigen die Wohn- und Essbereiche keine eigene Zu- oder Abluftleitungen und somit keine zusätzlichen Schalldämpfer und Luftauslässe mehr. Dies spart bei den Installationskosten und schafft größere gestalterische Freiheit. Zusätzlich, kann durch geringere Außenluftstraten die Trockenheit im Winter reduziert werden.

Bezüglich Nachteile bzw. Einschränkungen wird in (Fraefel, 1999) sowie in (Huber, 2006) nur die Forderung nach entsprechender Anordnung der Räume geäußert. In (Greml, 2010) wird hingewiesen, dass eventuelle Geruchsbelastungen aus den Schlaf- und Kinderzimmern in das Wohnzimmer transportiert werden. Der Autor geht davon von aus, dass dieser Fall insbesondere bei Kinderzimmern, wo zumindest teilweise von einer gleichzeitigen Nutzung auszugehen ist, problematisch sein könnte. Hygienische Bedenken bezüglich Übertragung aus den Schlafzimmern werden nur für einen Krankheitsfall geäußert.

Eine umfassende wissenschaftliche Untersuchung der Vor- und Nachteile und deren Quantifizierung gab es bis dato noch nicht. In (Barp et al., 2009) werden jedoch die Ergebnisse einer CFD-Simulation, einer CO₂ Messung und eines Nebelversuch für einen ungünstig erscheinenden Grundriss präsentiert. Darin wird festgestellt, dass Wohnbereiche welche nicht zwischen Zuluft- und Abluftauslässen positioniert sind, also auf ersten Blick nicht einen klassischen Überströmbereich darstellen, auch bestens mit Frischluft versorgt werden. Voraussetzungen dafür sind, dass der Wohnbereich offen zum Gang ist (keine Tür) und das Vorhandensein von Wärmequellen (z.B. Personen, sonnenbeschienene Flächen, Heizkörper, etc). Wenn nur schwache Wärmequellen vorhanden sind (keine Personen, Übergangszeit,...), dann funktionierte das Kaskadensystem nicht mehr „perfekt“ aber noch ausreichend gut. Es sei angemerkt, dass der untersuchte Wohnbereich eine Kochnische mit Abluft umfasste.

Vor allem der Einfluss der Zuluftventilanordnung (in Kombination mit der Abströmöffnung bzw. Abluftventil und der Raumgeometrie) auf die Raumluftrichtung wurde speziell für Passivhäuser untersucht (Kah, 2003; Jürgen Schnieders, 2003; Schwarz, 1999). Auch hier wurde festgestellt dass man bei Komfortlüftungen für energieeffiziente Gebäude mit einer vollständigen Durchmischung innerhalb eines Raumes ausgehen kann, wobei die thermisch induzierten Luftströmungen gegenüber den Impuls-induzierten Strömungen (aufgrund von Zuluftventilen) dominieren.

Bezüglich Auslegungshilfen gibt nur die bereits erwähnte Literatur (Barp et al., 2009; Fraefel, 1999; Greml, 2010; Huber, 2006) Hilfestellung. Konkret bietet (Huber, 2006) eine Tabelle für die Bestimmung des minimalen Zuluftvolumenstroms einer Wohnung mit einem Zimmer im Durchströmbereich für verschiedene Wohnungsgrößen. In (Greml, 2010) wird auch eine beispielhafte Berechnung der Auslegungsvolumenströme für Kaskadenlüftung mit und ohne Einbeziehung des Wohnbereichs in die Überströmzone gezeigt. Außerdem wird bei der Auslegung explizit zwischen Kinder und Elternschlafzimmer unterschieden. Die Autoren sind

der Ansicht, dass vorallem für kleine Wohnungen das Abluftkriterium entscheidend sein sollte und die Luftwechselrate daher effektiv nur um 10-15% reduziert werden kann.

2.3 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)

Der Neuheitsgrad in diesem Projekt besteht nicht in der Idee der konsequenten gerichteten Durchströmung (erweiterte Kaskadenlüftung) an sich, sondern in deren grundlegenden und systematischen Untersuchung, Quantifizierung und Optimierung, um sie für den breiten Einsatz im Wohnungsbau vorzubereiten.

In diesem Projekt wurde erstmals mit Hilfe sogenannter Multi-Zonen-Model-Simulationen der Einfluss der Luftführung auf die Raumluftqualität und Raumluftfeuchte untersucht. Das Modell, die verwendeten Modellparameter und die Software (CONTAM) konnte hierfür mit den umfangreichen Messdaten aus Vorprojekten validiert werden. Das Multi-Zonen-Modell wurde speziell für die Abbildung von Feuchtepuffereffekten weiterentwickelt und mit Hilfe hygrothermischer Simulationssoftware (Delphin) diesbezüglich abgeglichen.

Als wichtiges Ergebnis für die Wohnbauwirtschaft wird in diesem Projekt erstmalig die Eignung der erweiterten Kaskadenlüftung für eine Vielzahl möglicher Wohnungsgrundrisse untersucht. Mögliche Grundrissformen wurden nach topologischen Gesichtspunkten systematisch eingeteilt, um so Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung mit Hilfe der genannten Simulationsmodelle zu analysieren.

Um Einsatzgrenzen der erweiterten Kaskadenlüftung abzustecken, wurde für ungünstige Überströmanordnungen im Wohnzimmer eine Reihe von Strömungssimulationen (CFD) durchgeführt. Gezielte Arbeiten zur Untersuchung der Luftdurchmischung in Wohnräumen ohne eigenes Zu- und Abluftventil, wo alle Überströmöffnungen in einem offenen angrenzenden Gangbereich angeordnet sind, sind aus Vorprojekten nicht bekannt.

Um bis dato fehlende Auslegungsdaten in Bezug auf Überströmelemente bereitstellen zu können, wurden in einer umfangreichen Messkampagne einfache und kostengünstige Überströmlösungen auf Schalldurchgang und Strömungswiderstand vermessen.

Als Novum kann auch die Verbreitung der Projektergebnisse betrachtet werden. In einem interaktiven, web-basierten Planungsleitfaden können die für die Planung wesentlichen Ergebnisse übersichtlich abgerufen werden. Siehe:

http://passipedia.passiv.de/passipedia_de/planung/haustechnik/lueftung/grundlagen/planung_shinweise_fuer_komfort-_und_kostenoptimierte_luftfuehrungskonzepte

2.4 Verwendete Methoden

Die in diesem Projekt verwendeten Methoden werden im jeweiligen Ergebniskapitel (3.x) detailliert und inklusive Literaturverweise beschrieben. Die Beschreibung in diesem Kapitel dient der übersichtlichen Zusammenfassung.

Die Simulationssoftware **CONTAM** (Walton & Dols, 2010) entwickelt vom National Institute for Standardisation and Normalization (NIST) wurde für die Untersuchung des Einflusses der

Raumluftführung auf Raumluftqualität verwendet. CONTAM wurde von der „Indoor Air Quality and Ventilation Group“ des NIST, USA speziell für die Analyse von Luft- und Schadstofftransportphänomenen innerhalb eines Gebäudes entwickelt. Die verschiedenen Räume eines Gebäudes werden dabei als Zonen mit perfekter Durchmischung modelliert (Multi-Zone-Modelling). Unter normalen Bedingungen sind Luftströmungen in einem ausreichendem Ausmaß vorhanden, z.B. thermisch induzierte aufgrund von sonnenbeschienene Flächen oder Anwesenheit einer oder mehrerer Personen. Durch diese gerechtfertigte Annahme werden raumlufttechnische Untersuchungen von gesamten Wohneinheiten und Gebäuden für Tages-, Monats- und sogar Jahreszyklen ermöglicht.

Die Erstellung eines Simulationsmodelles erfordert immer eine Vielzahl diverser Modellparameter. Gerade bei der Bewertung der Raumluftqualität können die Parameter zur Beschreibung des Nutzerverhaltens einen wesentlichen Einfluss nehmen. Daher wurde in diesem Projekt versucht, Bewohner-bezogene Parameter (wie z.B. Personenanwesenheit, Innentemperatur, Wohnungsgröße,...) auf Basis statistischer Werte aus Literatur oder Messungen zu bestimmen. Die Generierung der erforderlichen Klimadatensätze erfolgte auf Basis langjähriger Mittelwerte mit der Computer-Software **Meteonorm** 6.1 („Meteonorm,“ n.d.).

Für die Bewertung der Luftschadstoffe mit anthropogenem Charakter, wurde die CO₂-Konzentration aus der zeit- und raumabhängigen Personenbelegung simuliert. Um auch anwesenheitsunabhängige Schadstoffemissionen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen abzubilden, wurden auch TVOC-Quellen modelliert, deren Quellstärke aus Daten diverser Literaturstellen abgeschätzt wurde. Der Feuchteeintrag durch Bewohner und deren Aktivitäten basiert auf Literaturwerten und wurde mit zeitgesteuerten Quellen abgebildet. Um Feuchtepuffereffekte auf Tages- und Jahresbasis realitätsnah abbilden zu können, wurden die in CONTAM verfügbaren Modelle getestet und weiterentwickelte Modelle mit Hilfe verfügbarer Modellsteuerungsmöglichkeiten („Controlls“ und „SuperElements“) implementiert. Die erforderlichen Parameter zur Beschreibung der Puffer- und Materialeigenschaften wurden über Regressionsanalyse mit hygrothermischen Referenzsimulationen bestimmt. Dafür wurde **Delphin**, ein Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, und Stofftransport in kapillarporösen Baustoffen („Delphin,“ n.d.), entwickelt vom Institut für Bauklimatik der TU Dresden, herangezogen.

Die erstellten Multi-Zonen-Modelle wurden mit den umfangreichen Messdaten aus Vorprojekten (Passivhaussiedlung Lodenareal, Innsbruck) validiert und abgeglichen.

Um eine große Anzahl an CONTAM-Modellen zu erstellen (Parametervariation, Variation der Grundrisstopologie) und durchlaufen zu lassen, wurde die Generierung bzw. die Parameteränderung mit Hilfe von **MATLAB** automatisiert.

Die Strömungssimulationen wurden mit der CFD-Software von **FLUENT/ANSYS** 14.5, unter Verwendung des integrierten RNG k- ϵ Turbulenzmodells durchgeführt.

Die Vermessung der Überströmelemente hinsichtlich Schalldämmung erfolgte im **Doppelkammer-Schallprüfstand** der Universität Innsbruck. Der Prüfaufbau wurde für die

Strömungswiderstandsmessung so adaptiert, sodass der Druckverlust bei gegebenem Volumenstrom mittels Mini-Blower-Door-Testgerät bestimmt werden konnte.

2.5 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten mit Quellenangabe, Erläuterung der Erhebung

Im Kapitel 3 wird umfassend auf Vorgangsweise inklusive Daten und Literaturquellen eingegangen, deshalb beschränkt sich dieses Kapitel nur auf eine überblicksartige Zusammenfassung der Vorgehensweise bei der Multi-Zonen-Modellierung und Simulation.

Multi-Zonen-Simulationen

- Literaturrecherche bezüglich erweiterter Kaskadenlüftung und möglicher Simulationsprogramme zur Untersuchung der Raumluftqualität
- Erstellten eines Multi-Zonen-Modells mit CONTAM für die vermessenen Wohneinheiten aus Vorprojekt „Passivhaussiedlung Lodenareal“ (Wagner et al., 2012)
- Aufbereiten der Messdaten aus (Wagner et al., 2012) für den direkten Vergleich bzw. als Eingabegröße für Simulation, u.a.:
 - Innenklima: relative Feuchte und CO₂-Konzentration (für Vergleich),
Temperatur (als Eingabe)
 - Außenklima (als Eingabe): Temperatur, Feuchte und CO₂-Konzentration
 - Nutzerverhalten (als Eingabe): Kochstromverbrauch und LüftungspartyschalterAlle Größen für jeweils 18 Wohnzimmern und 6 Schlafzimmern für einen Zeitraum von 2 Jahren in 5-Minuten oder Stunden-Auflösung
- Vergleich der Simulations- und Messdaten auf Basis von Stundenmittelwerten für CO₂-Konzentration und relativer Feuchte
- Erstellen eines Referenzmodells mit statistisch repräsentativer Wohnraumsituation und repräsentativem Nutzerverhalten aus Daten der Statistik Austria (Ghassemi-Bönisch & Kronsteiner-Mann, 2011; Janik & Vollmann, 2001) und aus Messdaten diverser eigener oder partnergeführter Vorprojekte (Feist & Nagel, 2002; Feist, Peper, & Kah, 2001; Kapferer, 2011; Soeren Peper & Feist, 2008; Soeren Peper, Schnieders, & Feist, 2005, 2011; Soren Peper, Feist, & Pfluger, 2004; Pfluger & Feist, 2001)
- Sensitivitätsanalyse des Simulationsmodells auf diverse Eingabeparameter (Nutzer und Klima) innerhalb einer statistisch relevanten Schwankungsbreite
Ermittlung der möglichen Schwankungsbreite aus Daten der Statistik Austria (Ghassemi-Bönisch & Kronsteiner-Mann, 2011; Janik & Vollmann, 2001) und aus Messdaten diverser eigener oder partnergeführter Vorprojekte (Feist & Nagel, 2002;

Feist, Peper, & Kah, 2001; Kapferer, 2011; Soeren Peper & Feist, 2008; Soeren Peper, Schnieders, & Feist, 2005, 2011; Soeren Peper, Feist, & Pfluger, 2004; Pfluger & Feist, 2001)

Erzeugung der „parameter-variierten“ Modelle mit Hilfe von MATLAB

- Vergleich zwischen Standardluftführung (gerichtete Durchströmung) und erweiterter Kaskadenlüftung (keine Zuluft im Wohnzimmer) mittels Simulation des Referenzmodells
- Erzeugung CONTAM Simulationsmodelle der 63 verschiedenen Grundrissvarianten mit Hilfe von MATLAB. Sonstige Modellparameter basieren auf denen des Referenzmodells. Automatisierte Simulation und Auswertung der Ergebnisse aus den Grundrissvariationen.

3 Ergebnisse des Projektes

3.1 Beurteilung der erweiterten Kaskadenlüftung mittels Simulation

3.1.1 Entwicklung und Testen geeigneter Multi-Zonen-Simulationsmodelle

Die Messdaten aus dem vom Land Tirol und den Innsbrucker Kommunalbetrieben geförderten Projektes „Messtechnische Evaluierung der Passivhauswohnanlage Lodenareal“, siehe z.B. (Wagner et al., 2012), konnten für die Validierung der entwickelten Simulationsmodelle herangezogen werden. Im ersten Teil dieses Arbeitspaketes wurden die für die Validierung erforderlichen Daten aus den sehr umfangreichen Datensätzen (>250 Messgrößen in 5-Minuten bzw. 1-Stunden-Auflösung) extrahiert und auf Plausibilität untersucht. Die Raumluftqualität auf Basis der CO₂-Konzentration und die Raumluftfeuchte wurde statistisch ausgewertet und die Ergebnisse analysiert.

Die gemessenen Werte der Außenluft bzw. der Zuluft (Temperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration) konnten als Randbedingungen für das Simulationsmodell verwendet werden. Ebenso wurden die Informationen über Raumlufttemperatur (für Wohnzimmer und eventuell Schlafzimmer) und über den Status der Raumlüftungswahlschalter (Normalbetrieb oder Partymodus mit erhöhtem Volumenstrom) aus den Messdaten extrahiert und als weitere Randbedingungen in die Simulationen eingearbeitet.

Zur richtigen Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Raumluftfeuchte wurden die in CONTAM verfügbaren Möglichkeiten (Boundary Layer Surface Modell bzw. Suspension-Resuspension Modell) untersucht. Diese 1-Schicht-Modelle bilden tageszeitliche Feuchtepufferphänomene hinreichend genau ab. Um auch saisonale Feuchtepuffereffekte (bei hohen Speicherkapazitäten) abbilden zu können, wurden mit Hilfe der in CONTAM verfügbaren „Controller-Programmierung“ (Super-Elements) ein 2-Schichtmodell entwickelt und für das unten beschriebene Referenzmodell verwendet. Die für das Feuchtepuffermodelle

notwendigen Parameter wurden über einen Abgleich (Least-Square-Fit) mit zeitlichen Verläufen aus „genauen“ Feuchtetransportsimulationen für die verschiedenen Wandmaterialien ermittelt. Diese Referenzsimulationen mit nur einer Luftzone wurden mit der Software Delphin generiert.

Außerdem wurde das Nutzerverhalten (in der Simulation) so angenommen, dass sich eine gute Übereinstimmung mit dem Mittelwert der gemessenen Daten (CO₂-Konzentration und rel. Feuchte) ergab. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Annahmen ist in Tabelle 1 gelistet.

Belegung Wohnzimmer/Küche	Nicht berufstätige Person 7-10 u 16-23 an 7 Tagen + Kind 7-8 u 17-21 an 7 Tagen + berufstätige Person 17-23 an 4 Tagen + Gast 15-21 an 4 Tagen
Belegung Schlafzimmer	Nicht berufstätige 23-7 an 7 Tagen + berufstätige Person 23-5 an 4 Tagen
Belegung Kinderzimmer	Kind 21-7 an 7 Tagen
H2O-Quelle Wohnz./Küche	80g/h
H2O-Quelle Schlafzimmer	3x/Woche Wäschetrocknen im SZ (~1,9l in 36h als exp. Abfall:140g/h Startwert) + 15g/h
Türen Schlafzimmer	Voll geöffnet 7-9, 14-16 und 21-22 sonst geschlossen

Tabelle 1: Wichtigste Eingaben im Simuationsmodell zur Festlegung des Nutzerverhaltens, ermittelt durch Abgleich der Simulationsergebnisse mit den gemittelten Messdaten aus 18 Wohnzimmer und 6 Schlafzimmer aus der Passivhaussiedlung Lodenaral.

Abbildung 2 vergleicht Messwerte und Simulationsergebnisse für die resultierende Raumluftqualität, kategorisiert gemäß Tabelle 2, für Wohn- und Schlafzimmer. Dafür wurden die Daten der kritischsten Monate Dezember und Jänner (aus dem Jahr 2010/11) herangezogen.

Einteilung nach EN 13779: CO ₂ -Konz über AL	
IDA 1 ≤ 400 ppm	Hohe Raumluftqualität
IDA 2 ≤ 600 ppm	Mittlere Raumluftqualität
IDA 3 ≤ 1000 ppm	Mäßige Raumluftqualität
IDA 4 > 1000 ppm	Niedrige Raumluftqualität

Tabelle 2: Einteilung der Raumluftqualität nach EN13779 auf Basis der CO₂-Konzentration über Außenluft.

Der äquivalente Vergleich für die relative Feuchte im Wohn- und Schlafzimmer ist in Abbildung 3 dargestellt. Aus allen 4 Balkendiagrammen erkennt man, dass die Abweichung der Zeitanteile der jeweiligen Kategorie zwischen Mess- und Simulationsdaten fast immer <5%-Punkte bleibt. Die Fehlerbalken der Messdaten zeigen die Standardabweichung und zeigen den großen Einfluss des Nutzerverhaltens (Belegungsdichte, Lüftungsverhalten, etc) auf die Raumluftbedingungen. Das Simulationsmodell bildet somit eine Standardwohnung mit einem „gemittelten“ Nutzerverhalten hinreichend genau ab.

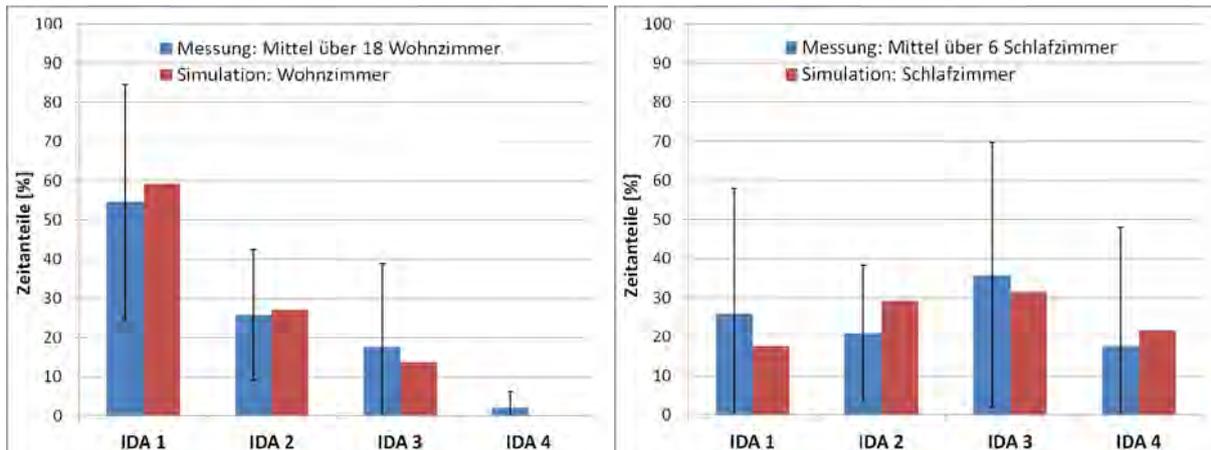


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen mit der simulierten Raumlufthumidität im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts) während der Wintermonate Dezember und Jänner (2010/11). Die Raumlufthumidität wurde gemäß EN13779 in 4 Klassen eingeteilt und auf Basis der CO₂-Konzentration über Außenluft ermittelt. Die Höhe der Balken zeigt den Zeitanteil in % mit der jeweiligen Raumlufthumidität. Für das Schlafzimmer wurden nur die Nachtstunden zwischen 23:00 und 7:00 Uhr ausgewertet.

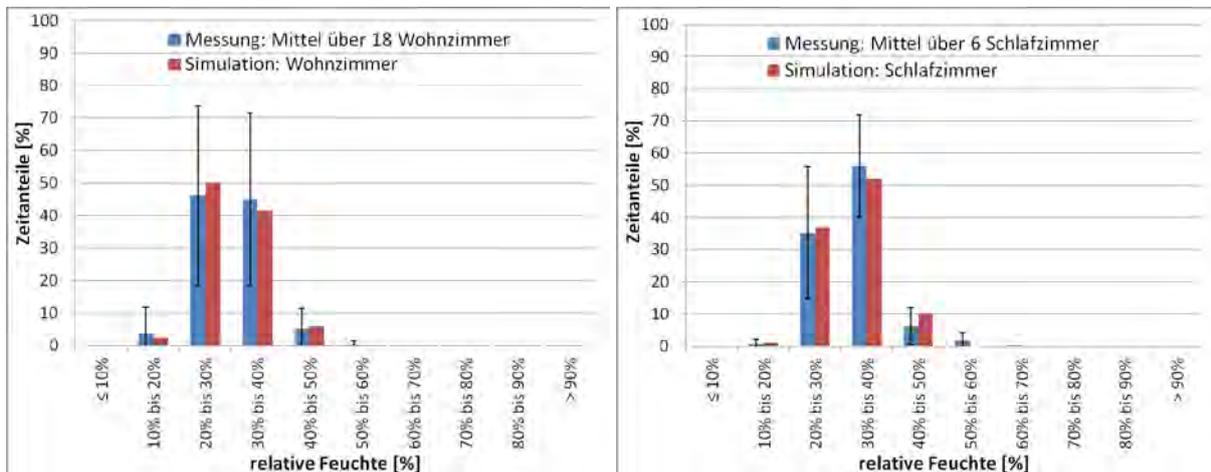


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen mit der simulierten Raumlufthumidität im Wohnzimmer (links) und Schlafzimmer (rechts) während der Wintermonate Dezember und Jänner (2010/11). Die relative Feuchte wurde für die Darstellung in 10%-Schritten kategorisiert. Die Höhe der Balken zeigt den Zeitanteil in % innerhalb der jeweiligen Feuchteklasse. Für das Schlafzimmer wurden nur die Nachtstunden zwischen 23:00 und 7:00 Uhr ausgewertet.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der CO₂-Konzentration und der relativen Feuchte im Schlafzimmer für eine ausgewählte Wohneinheit im Lodenareal. Für diese Simulation wurden ebenfalls die gemessenen Außenklimabedingungen und Innenraumtemperaturen zugrunde gelegt. Mit einem fixem (über das gesamte simulierte Jahr) Tages- bzw. Wochenrhythmus wurde das Nutzerverhalten (Belegungsichte, H₂O-Quellen, Innentüröffnungen, etc.) so angenommen, dass sich eine größtmögliche Übereinstimmung (über die gesamte Winterperiode) mit den gemessenen Daten ergibt.

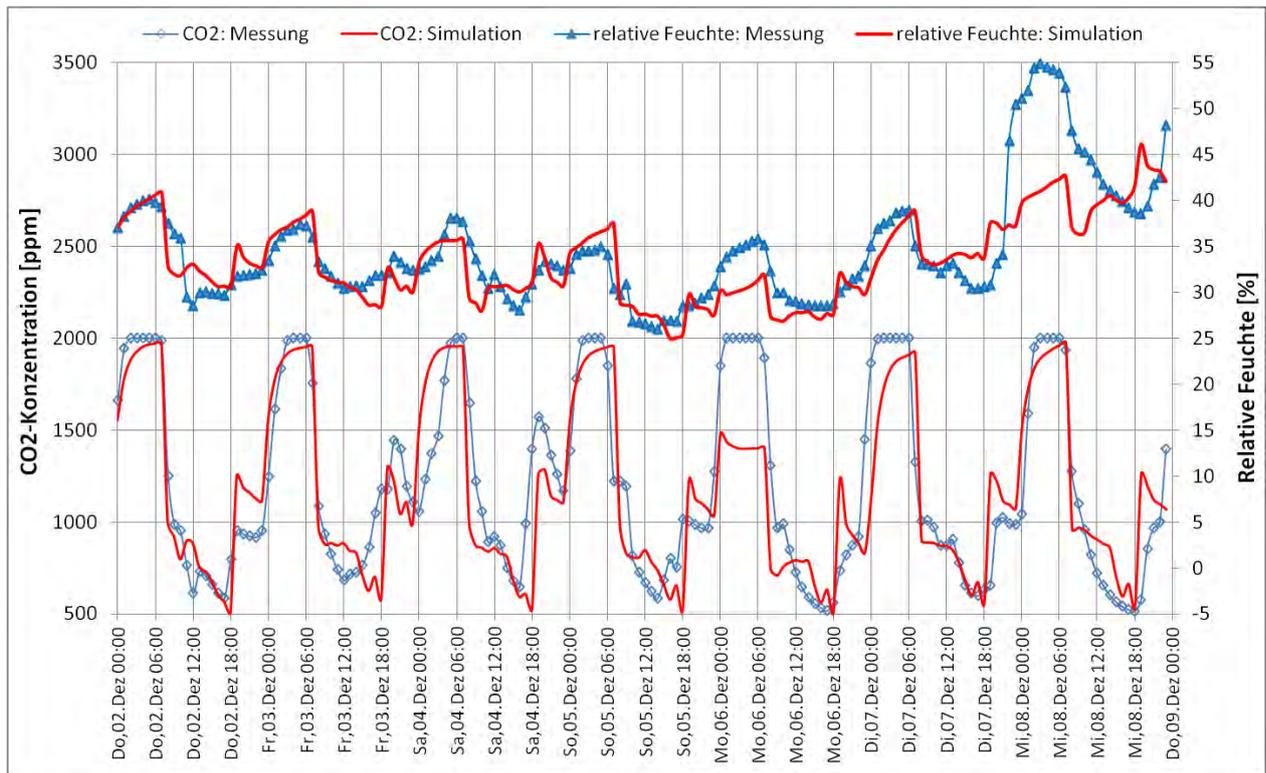


Abbildung 4: Vergleich von gemessenen und simulierten Tagesverläufen bezüglich CO₂-Konzentration und relativer Feuchte im Schlafzimmer für eine der 18 vermessenen Wohneinheiten während einer Dezemberwoche (2010).

Man erkennt, dass in den meisten der dargestellten Tagesverläufe die Belegungsdichte und –zeiten ganz gut getroffen wurde. In diesen Fällen passt sowohl CO₂-Konzentration als auch relative Feuchte der Simulation und der Messung überein. Eine Ausnahme (innerhalb des in Abbildung 4 dargestellten Zeitraumes) bildet die Nacht des 8. Dezembers, wo zwar die CO₂-Konzentration in Simulation und Messung fast identisch ist, aber die gemessene relative Feuchte stark von der simulierten (und den anderen dargestellten) Tagesverläufen abweicht. Dies ist auf ein, von der Simulation, stark abweichendes Nutzerverhalten in Bezug auf H₂O-Eintrag, wie z.B. durch vermehrtes Wäsche trocknen, zurückzuführen. „Sporadisch erhöhte Wäsche-Luft-Trocknungen“ konnten verbal von dem betroffenen Bewohner im Zuge eines Gesprächs bestätigt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der Simulationssoftware CONTAM die zeitlichen Verläufe von CO₂-Konzentration und relativer Feuchte in hinreichender Genauigkeit berechnet werden können. Es zeigte sich, dass die zu wählenden und oftmals unbekanntem Modellparameter, speziell das Nutzerverhalten, einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen kann.

3.1.2 Gewählte Simulationsparameter – Statistisch relevantes Referenzmodell

Um möglichst realitätsnahe und repräsentative Werte für die Simulationsparameter zu wählen, wurden soweit wie möglich Messdaten und Statistiken aus Literatur und eigenen bzw. partnergeführten Monitoringprojekten herangezogen.

Aus Daten der Statistik Austria aus der Volkszählung 2001 (Janik & Vollmann, 2001) wurde die für einen Bewohner in Österreich am häufigsten auftretende Wohnsituation ermittelt.

Abbildung 5 zeigt, dass die meisten in Österreich gemeldeten Personen in einer Wohnung mit 60m² bis 90m² Nutzfläche mit 4 Wohnräumen (inkl. Küche falls 4m² oder mehr) leben. Dieses Ergebnis ändert sich auch nicht bei einer bauperioden-spezifischen Betrachtung (bis 1960, 1961 bis 1990, nach 1990).

Betrachtet man für diese Kategorie (4 Wohnräume und 60m² bis 90m² Nutzfläche) die Anzahl der Bewohner pro Wohnung, so erhält man eine Verteilung mit einem Maximum bei 2 Bewohnern pro Wohnung, der Mittelwert liegt bei ca. 2,8 Bewohner/Wohnung. Die mittlere Nutzfläche in dieser Kategorie ergibt sich zu 76m².

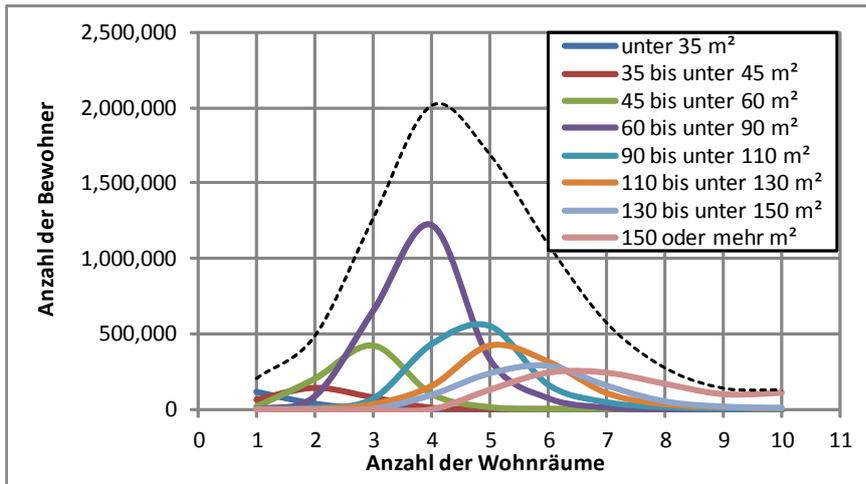


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung für Österreich: Anzahl der Bewohner als Funktion der Wohnraumanzahl für verschiedene Wohnungsgrößenkategorien. Daten der Statistik Austria.

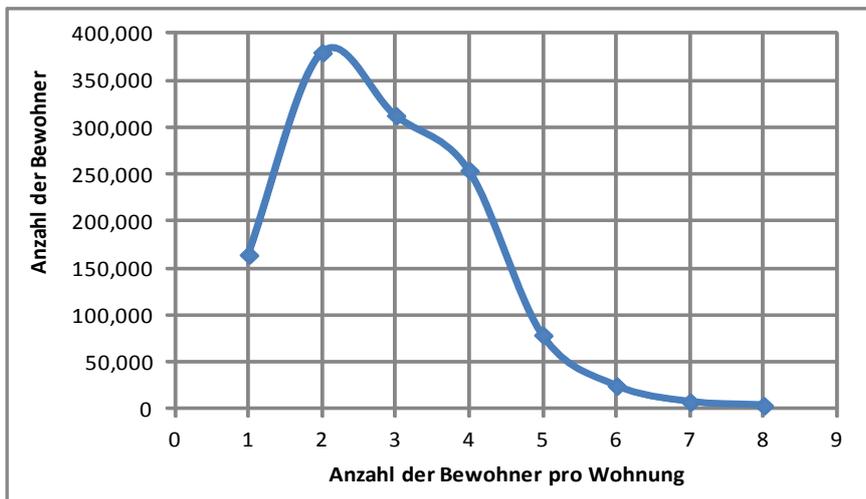
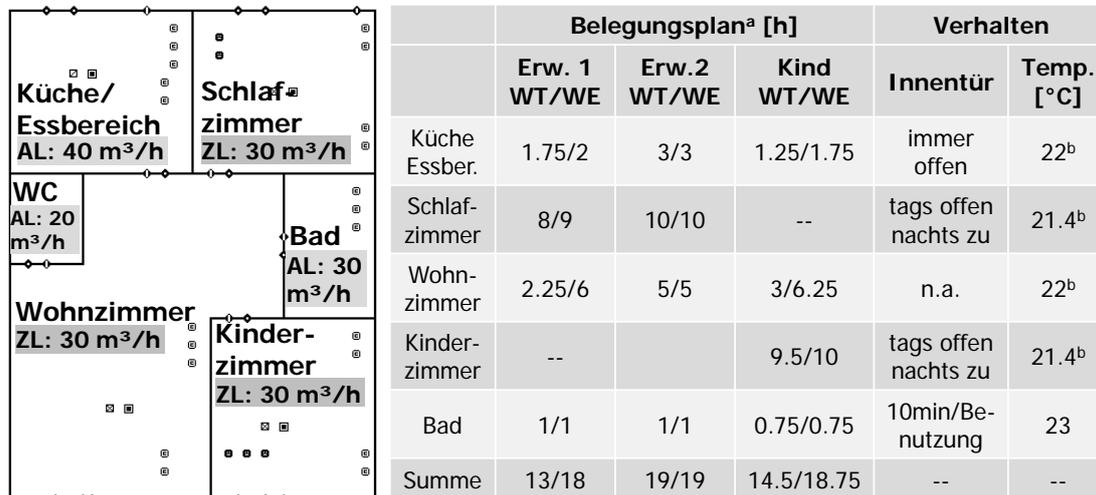


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung für Österreich: Anzahl der Bewohner als Funktion der Bewohneranzahl in Wohnungen mit 4 Wohnräumen mit einer Nutzfläche zwischen 60m² und 90m². Der Mittelwert ergibt sich zu 2,8 Bewohner pro Wohnung. Daten der Statistik Austria.

Somit wurde die Referenzwohnung mit 4 Wohnräumen (inkl. Küche) mit einer Nutzfläche von 76m² gewählt und mit einem 3 Personen Haushalt (berufstätig, nicht berufstätig, Schulkind) belegt. Die gewählte Grundriss-Topologie lehnt sich an einem realen Neubauprojekt der Neuen Heimat Tirol an und ist in Abbildung 7 (links) dargestellt. Die Anzahl der An-/Abwesenheitsstunden der Bewohner wurde ebenfalls aus Daten der Statistik Austria

extrahiert (Ghassemi-Bönisch & Kronsteiner-Mann, 2011), sie sind in Abbildung 7 (rechts) aufgelistet. Die gewählte zeitliche Verteilung der An- und Abwesenheit ist in Abbildung 8 illustriert. Die Stellung der Innentüren wurde aufgrund mangelnder Datenlage auf Basis persönlicher Erfahrungen angenommen. Eine Sensitivitätsanalyse (u.a.) dieses Parameters folgt in 3.1.4. Die gewählten Innenraumtemperaturen wurden aus den Ergebnissen diverser Passivhaus-Monitoringprojekte ermittelt (siehe Abbildung 7).



^agestützt auf stat. Daten (Ghassemi-Bönisch & Kronsteiner-Mann, 2011) ^b extrahiert aus (Feist & Nagel, 2002; Feist, Peper, & Kah, 2001; Kapferer, 2011; Soeren Peper & Feist, 2008; Soeren Peper, Schnieders, & Feist, 2005, 2011; Soeren Peper, Feist, & Pfluger, 2004; Pfluger & Feist, 2001)

Abbildung 7: (Links) CONTAM Skizze des Grundrisses. AL=Abluft, ZL=Zuluft. (Rechts) Belegungsplan und Parameter zum Nutzerverhalten WT=Wochentag, WE=Wochenende. Entnommen aus (Rojas, Sibille, & Pfluger, 2012).

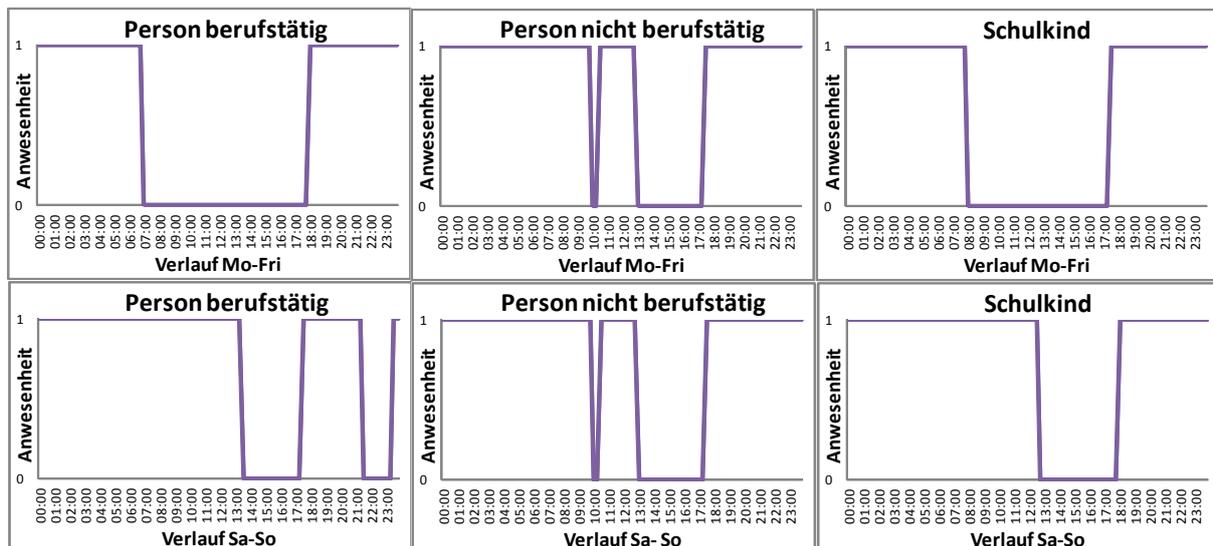


Abbildung 8: Gewählter tageszeitlicher Verlauf der Personenbelegung für das Referenzmodell.

Die Stärke der menschlichen Feuchte- und CO₂-Emissionen wurde nach Annex 27 (Månsson (Editor), 2002) modelliert und ist in Tabelle 3 zusammengefasst, die restlichen Feuchtequellen und die zugehörigen Modellparameter sind in Tabelle 4 gelistet.

	CO ₂ [l/h]	H ₂ O [g/h]
Kind (bis 18J) wach	12	45
Kind (bis 18J) schlafend	8	15
Erw (>18J) wach	18	55
Erw (>18J) schlafend	12	30

Tabelle 3: Menschlichen CO₂ und H₂O-Emissionen gemäß Annex 27 (Månsson (Editor), 2002)

Quellen	Stärke [g/d]	Typ	Modellparameter
Kochen	800 ^a	Konst.	Morgen/Mittag/Abend: 110 / 320 / 320 g/h ^b
Körperhyg.	800 ^a	G ₀ *exp(-kt)	G ₀ =325g/h; k=0.12h ⁻¹ ; 2x/(Tag Pers.)
Pflanzen, etc	670 ^a	Konst.	0.365g/(h m ² _{WF})
Wäschetrocknen	1150 ^a	G ₀ *exp(-kt)	G ₀ =68g/h; k=0.5h ⁻¹ ; 1x/(Woche Pers)

^a in Anlehnung an (Hartmann et al., 2001), ^b zeitl. Verteilung nach Annex 27 (Månsson (Editor), 2002).

Tabelle 4: Feuchtequellen durch Nutzeraktivitäten

Um auch anwesenheitsunabhängige Schadstoffemissionen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen abzubilden, wurden auch TVOC-Quellen in den 4 Wohnräumen modelliert. Aufgrund mangelnder Datenlage bezüglich Langzeit-Emissionsraten, wurden gemessene Raumlufkonzentrationswerte aus diversen Literaturstellen (Mølhav, Sparks, & Wolkoff, 1996; Norbäck, Björnsson, Janson, Widström, & Boman, 1995; Schulz et al., 2010) herangezogen, um eine mittlere wohnnutzflächenspezifische Emissionsrate von 500 µg/(m²_{WF} h) abzuschätzen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die hier gezeigten Absolutwertergebnisse der simulierten TVOC-Konzentrationen dementsprechend zu interpretieren sind. Sinn und Zweck der TVOC-Modellierung ist hier nicht die Bestimmung ihrer absoluten Höhe sondern vielmehr, den relativen Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Schadstoffbelastung durch ständig emittierende Quellen abzubilden.

Um die In- und Exfiltration in und aus der Gebäudehülle zu bestimmen, wurden in jedem der 4 Wohnräume jeweils zwei Undichtheiten modelliert, welche eine Luftwechselrate von 0,6(1/h) bei 50Pa Überdruck ergeben. Der Zu- und Abluftvolumenstrom für die Referenzlüftung beträgt jeweils 90m³/h, die Verteilung ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Klima entspricht dem langjährigen Mittel (1961-1990) für die Stadt Wien, generiert mit Meteonorm 6.1.

Um Feuchtepuffereffekte (auf Tages- bis Jahresbasis) abzubilden, wurden die in CONTAM bereits verfügbaren Modelle untersucht und erweitert. Die in der Software verfügbaren Quell/Senken-Modelle ermöglichen eine näherungsweise Abbildung von Puffereffekten. Diese sind aber reine Ad-/Desorptionsmodelle (mit einer linearen Sorptionsisotherme), d.h. sie können keine Feuchteleitung in die Wand abbilden (kein „Tiefenspeicher“). Konkret bietet sich das sogenannte „Boundary Layer Diffusion Model“ (siehe Abbildung 9) bzw. das mathematisch äquivalente „Deposition with Resuspension Model“ zur Abbildung von Feuchtespeicherung an.

$$S(t) = h \cdot d \cdot A [C(t) - C_s(t)/k]$$

h = film mass transfer coefficient over the sink

d = film density of air

A = surface area of the adsorbent

C_i = concentration in air

C_s = concentration in the adsorbent

k = Henry adsorption constant or the partition coefficient

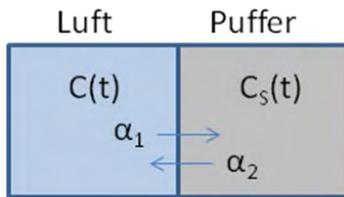


Abbildung 9: Schema und Beschreibung des in CONTAM verfügbaren „Boundary Layer Diffusion Model“. Es kann näherungsweise zur Abbildung von Feuchtepufferung in Wänden, etc. herangezogen werden.

Um auch den Einfluss von Materialien mit hohem Feuchtepufferpotential (wie z.B. Lehm) besser abbilden zu können, wurde mit den in CONTAM verfügbaren Modellen und Steuerungsmöglichkeiten („Controlls“ und „SuperElements“) ein 2-Schichtmodell (ebenfalls mit linearer Sorptionsisotherme) modelliert. Das Prinzip ist in Abbildung 10 schematisch skizziert.

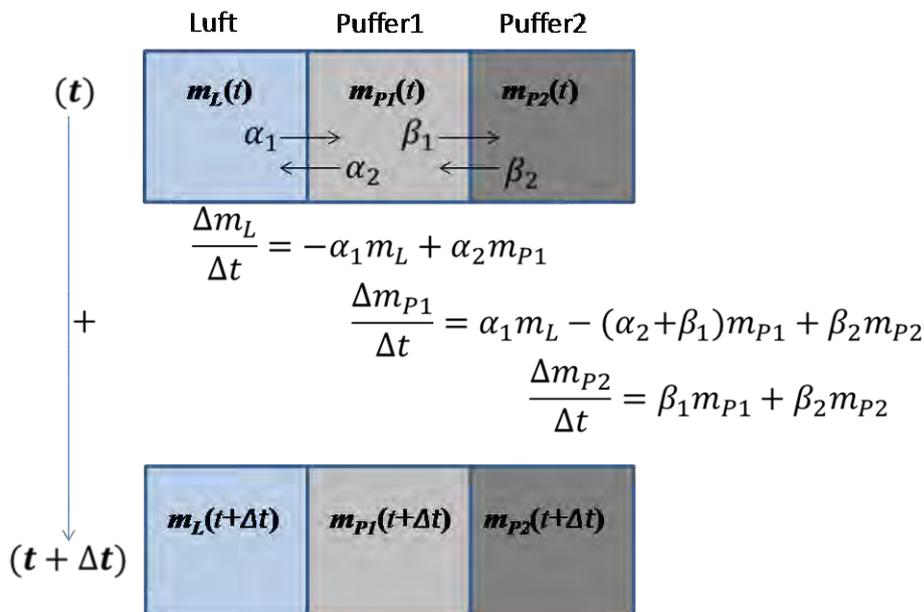


Abbildung 10: Schema des erweiterten Feuchtepuffermodells (2-Schicht).

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der zeitlichen Verteilung der relativen Feuchte für den Auswertzeitraum Dezember, Jänner und Februar für einen Modellraum mit folgenden Parametern: Luftwechselrate 0,8 (1/h), Feuchtequelle 2,13 g/(hm³) für 8 Stunden im 24 Stundenrhythmus, Pufferflächenbeladung 1m²/m³, Klimadatensatz für Wien (Meteonorm 6.1). Diese Parameter entsprechen einem typischen Schlafzimmer. Als Referenz dient das Ergebnis einer hygrothermischen Simulation über 6 Jahre mit der Wärme- und Feuchtetransportsimulationssoftware Delphin 5.6. Die Materialparameter wurden aus der umfangreichen softwareintegrierten Materialdatenbank für Lehm („Loam LSM Hist“) und Beton („C20_C25“) entnommen. Die für die CONTAM Simulation erforderlichen Parameter für die 1- und 2-Schichtmodelle (α_1 , α_2 , β_1 , usw.) wurden über die Methode der kleinsten Quadrate (für einen gesamten Jahreszyklus) bestimmt. In Abbildung 11 sieht man wie gut der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte mit dem 1- bzw. 2-Schichtmodell für den

beschriebenen Modellraum mit Beton- bzw. Lehmwänden nachgebildet werden kann. Will man Räume mit hohem Feuchtepufferpotential in CONTAM modellieren empfiehlt sich daher die Verwendung eines 2-Schichtmodells wie weiter oben beschrieben. Für Räume mit geringem bzw. mittlerem Feuchtepufferpotential genügt ein 1-Schichtpuffer, wie z.B. das in CONTAM integrierte Deposition/Resuspensionmodell.

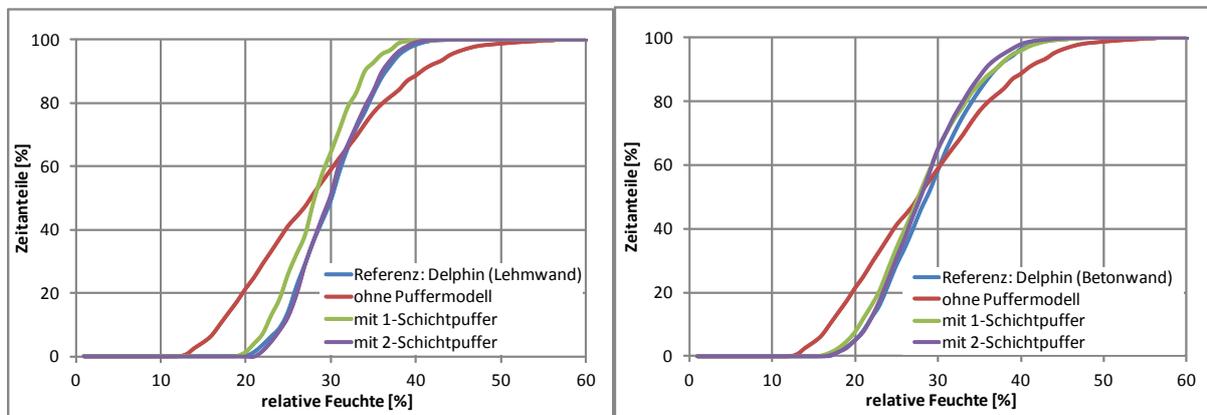


Abbildung 11: Zeitliche Luftfeuchteverteilung im Kernwinter (Dez., Jan. und Feb.) für einen Raum mit Betonwänden (rechts) und mit Lehmwänden (links), gerechnet mit verschiedenen Feuchtepuffermodellen. Details siehe Text.

Für das CONTAM Referenzmodell wurden die so erhaltenen Pufferparameter für Betonwänden mit folgender effektiven Flächenbeladung gewählt: Schlaf- und Kinderzimmer $1.4\text{m}^2/\text{m}^3$, Wohnzimmer und Küche $1\text{m}^2/\text{m}^3$. Um später auch höhere Pufferpotentiale simulieren zu können, wurde das CONTAM Referenzmodell mit dem hier vorgestellten 2-Schichtpuffer umgesetzt.

3.1.3 Auswerte- und Bewertungsmethode

Die Multi-Zonen-Simulation gibt als Ergebnis den zeitlichen Verlauf (typischerweise ein Jahresverlauf in Stundenauflösung) der untersuchten Stoffkonzentration (z.B. CO_2 , H_2O , TVOC) für jede Zone aus. Diese umfangreichen Ergebnisdaten gilt es im Hinblick auf Raumluftqualität und Raumluftfeuchte auszuwerten und zu bewerten. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit die folgende Methode entwickelt.

Die Konzentrationsverläufe werden als normierte Häufigkeitsverteilungen ausgewertet (siehe Abbildung 12 beispielhaft für CO_2). Dies wurde, wenn nicht anders beschrieben, in allen folgenden Auswertungen raumweise und nur für Stunden mit Personenbelegung (Stundenangabe in Legende) und nur für die Kernwintermonate (1. Dez. bis 28. Feb.) durchgeführt. Die Simulationen wurden dennoch über mindestens ein Jahr (bei Bedarf mehrere Jahre) durchgeführt um saisonale Feuchtepuffereffekte korrekt abzubilden. Die Auswertung beschränkt sich auf die drei Kernwintermonate, da es sich hierbei um die raumlufthygienisch kritischste Zeit im Jahr handelt (keine zusätzliche Fensterlüftung, trockene Zuluft). Nun wird die über den Auswertzeitraum zeitgewichtete gemittelte Über- bzw. Unterschreitung des Zielwertes (RW-I) (siehe Tabelle 5) ermittelt. Diese Zielwertabweichung ist in Abbildung 12 mit „A“ gekennzeichnet und ist für die vier untersuchten Räume angegeben, sie entspricht der auf den Auswertzeitraum umgelegte Fläche „F“. Es sei angemerkt, dass die hier verwendete lineare Gewichtung (zwischen

Überschreitungswert und Zeit) idealerweise mit einer physiologisch begründeten Gewichtung (bis dato noch nicht bekannt) zu ersetzen wäre.

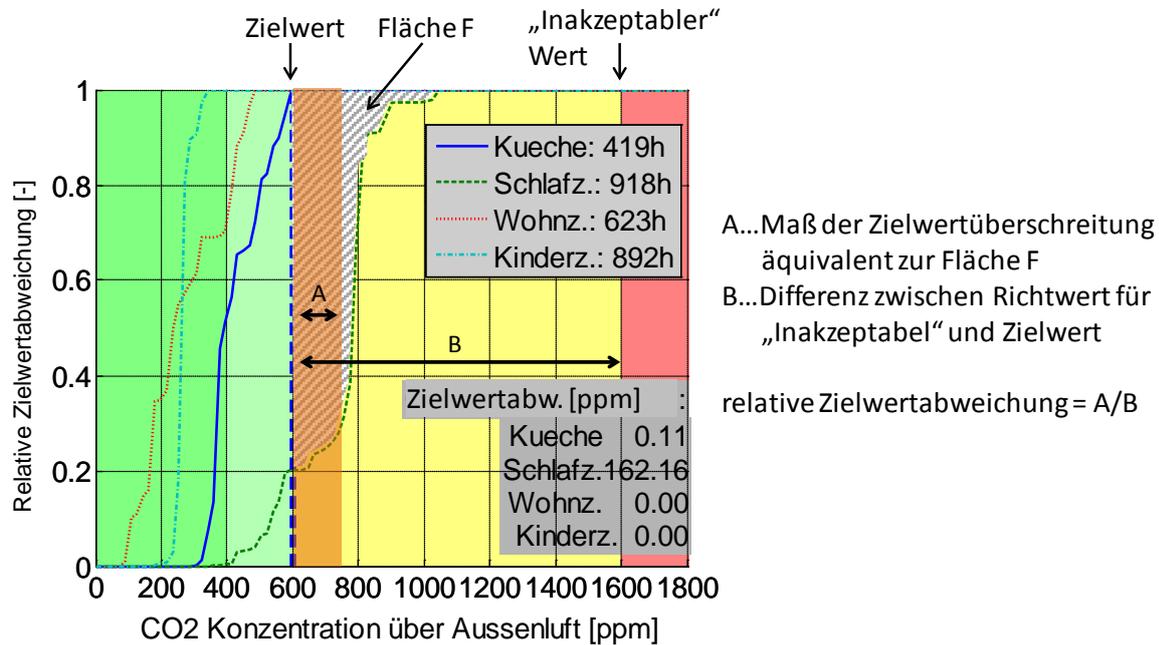


Abbildung 12: Bestimmung der relativen Zielwertabweichung nur für CO₂ anhand eines Beispiels für die Häufigkeitsverteilung der CO₂-Konzentration aus dem simulierten Referenzfall.

Bewertungskriterien ¹	CO ₂ ^{rel} (CO ₂ ^{abs}) [ppm]	Rel. Feuchte [%]	TVOC [mg/m ³]	Kürzel
Zielwert	<600 (1000)	>30	<0.3	RW-I
Zeitweise tolerabel	600-1600 (1000-2000)	20-30	0.3-3	RW-BB
Inakzeptabel	>1600 (2000)	<20	>3	RW-II

¹ Richtwerte für CO₂ und TVOC in Anlehnung an (Heinzow & Sagunski, 2007; Lahrz, Bischof, & Sagunski, 2008). RW-I der rel. Feuchte nach DIN EN 13779. Anmerkung: Richtwerte bez. rel. Feuchte umstritten, siehe z.B. (Hahn, 2007; Wolkoff & Kjærgaard, 2007).

Tabelle 5: Bewertungskriterien für die RLQ und deren Richtwerte (RW) bzw. Bandbreiten (BB)

Um die Ergebnisse nach den verschiedenen Kriterien (z.B. CO₂, relative Feuchte, TVOC) miteinander zu vergleichen und zu einer Gesamtbewertung addieren zu können, werden die so ermittelten (absoluten) Zielwertabweichungen relativ zu den jeweiligen Richtwert-Bandbreiten (RW-BB, siehe Tabelle 5), also der Differenz zwischen Zielwert und „inakzeptablen“ Wert, gesetzt. Die so erhaltene Gesamtbewertungsgröße, die sogenannte relative Zielwertabweichung, ist eine Maß dafür, wie lange und wie stark die Zielwerte der berücksichtigten Einzelkriterien in Summe über- bzw. unterschritten wurden. Der Wert 0 bedeutet somit, dass der Zielwert (RW-I) nie über- bzw. unterschritten wurde, der Wert 1 würde, z.B. für einen zeitlich konstanten Verlauf bedeuten, dass die Konzentration genau dem oberen Richtwert (RW-II) während des gesamten Auswertzeitraums entsprach.

Die für diese Bewertungsmethode verwendeten Ziel- bzw. Richtwerte für CO₂ und TVOC entstammen aus anerkannten Quellen (Heinzow & Sagunski, 2007; Lahrz et al., 2008). Der Ziel- bzw. Richtwert für die relative Feuchte wurde aus der DIN EN 13779 bzw. aus (Hahn, 2007; Wolkoff & Kjærgaard, 2007) abgeleitet.

3.1.4 Sensitivitätsanalyse – Identifizierung der wichtigsten Simulationsparameter

Um möglichst viele Parameter des Referenzmodelles variieren zu können, wurde ein MATLAB-Skript entwickelt, mit der die wichtigsten Parameter eines CONTAM Modells automatisch verändert werden können. Ein weiteres Skript startet die Simulation der so erzeugten „Variations-Modelle“ und wertet deren Ergebnisse aus.

3.1.4.1 Nutzerparameter

Die Personenbelegung wurde zwischen ein und fünf Personen entsprechend dem ca. 5. und 95. Perzentil der Personenanzahlverteilung (gemäß der Daten der Statistik Austria für die gewählte Wohnungskategorie: 4 Wohnräume, 60m² bis 90m²) für den Referenzgrundriss variiert. Dabei wurden alle Kombinationen (20) der in Abbildung 8 gezeigten Anwesenheitsprofile für 1-2 erwachsene Personen im Schlafzimmer, und 0-3 Kinder im Kinderzimmer simuliert. Abbildung 13 zeigt die relative Zielwertabweichung als Funktion der Personenbelegung (in Personen-Stunden pro Tag) für die Kriterien TVOC, CO₂, relative Feuchte und deren Summe für jeweils die vier untersuchten Räume. Man erkennt, dass zwar die Einzelkriterienbewertung (CO₂ und relative Feuchte) stark von der jeweiligen Raumbelugung abhängt (zick-zack-artige Sprünge), aber dass der Summenwert für Schlaf- und Kinderzimmer fast konstant bleibt und im Wohnzimmer sogar mit höherer Belegung sinkt (aufgrund des höheren Feuchteintrags). Der CO₂-Zielwert wird im Schlafzimmer ab zwei erwachsenen Personen, im Kinderzimmer ab drei Kindern im Mittel um ca. 20% der Richtwert-Bandbreite überschritten.

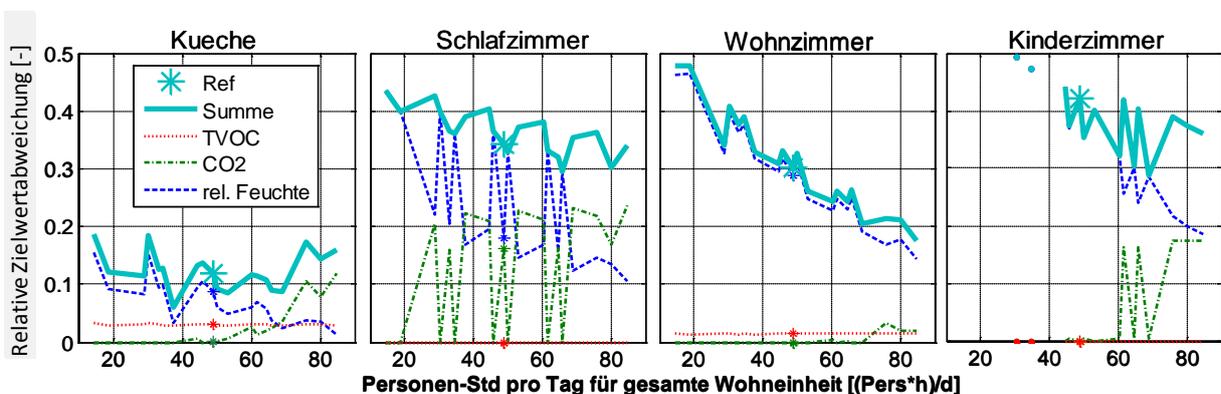


Abbildung 13: Raumlufthausqualität bei Variation der Personenbelegung. Verändert wurden Personenanzahl und deren Anwesenheitsprofil. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).

Die Türöffnungen von jeweils Schlaf- und Kinderzimmer wurden von „4 mal am Tag je 10 min“ (gleichmäßig verteilt) bis „durchgehend offen“ variiert.

Die Wahl der Variationsbreite der Fensterlüftungsdauer basiert auf den Daten diverser Messkampagnen (Kah et al., 2010; Kah, Pfluger, & Feist, 2005). Die mittlere Fensteröffnung für Wohneinheiten mit Lüftungsanlage (Passivhäuser) pro Tag und Fenster geht daraus mit ca. 53 min hervor. Das 5. und das 95. Perzentil können mit 27 und 93 min/(Tag*Fenster) abgeschätzt werden. Für die Referenzwohnung mit 4 Fenstern wurde also ein Variationsbereich von 108 bis 372 min/(Tag*Fenster) angesetzt. Die Verteilung der Fensteröffnungszeiten auf die 4 verschiedenen Fenster bzw. Räume wurde gemäß (Kah et

al., 2010) zu 28% Küche, 53% Schlafzimmer, 14% Wohnzimmer und 6% Kinderzimmer modelliert. Die Öffnungsuhrzeit wurde aufgrund mangelnder Datenlage mit 1 mal pro Tag 18:30 für Küche (Kochen des Abendessens), 7:30 für Schlafzimmer (Lüftung nach Aufstehen), 21:00 für Wohnzimmer und 18:00 für das Kinderzimmer angenommen.

Die Innenraumtemperaturen wurden innerhalb des 5. und 95. Perzentil der gemessenen Tagesmittelwerte aus diversen Messungen verändert (Feist et al., 2001; Soeren Peper & Feist, 2008; Soeren Peper et al., 2011). Die Variation erfolgte somit zwischen -4K und $+2.3\text{K}$ ausgehend von der gewählten Referenztemperatur. Die mögliche Variationsbreite für die Temperaturdifferenz zwischen Wohnzimmer und Schlafzimmer/Kinderzimmer wurde zwischen $P5=-2.2\text{K}$ und $P95=+0.25\text{K}$ bestimmt.

Repräsentativ für die mögliche Schwankungsbreite von Feuchteinträgen für einen 3 Personenhaushalt wurde der laut (Hartmann et al., 2001) als Unsicherheit geltende Feuchteeintrag von 2.3l/d aufgrund von Wäschetrocknen als Variationsbreite herangezogen. Zusätzlich zu den anderen Feuchtelasten wurden 0 bis 6 Wäschetrocknungsvorgänge pro Woche simuliert.

Die Simulationsergebnisse dieser vier Parametervariationen sind in Abbildung 14 zusammengefasst. Aus den Einzelergebnissen der 4 Zonen wurde dafür ein personenanzahlengewichteter Mittelwert gebildet. Den stärksten Einfluss auf die RLQ, konkret auf die relative Feuchte, hat die Raumlufthtemperatur. Dies ist zum größten Teil auf die Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte zurückzuführen, und nur zum kleinen Teil auf die gestiegenen In-/Exfiltrationsraten durch die Gebäudehülle.

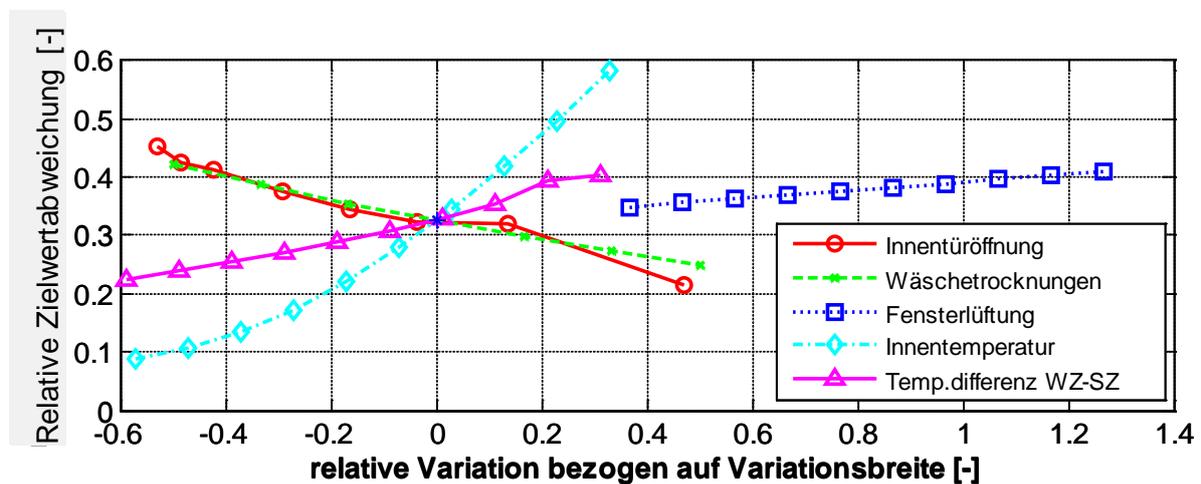


Abbildung 14: Relative Zielwertabweichung als Maß der Raumluftqualität bei Variation verschiedener nutzerspezifischer Parameter. Zwecks Übersicht ist nur der Summenwert aus rel. Feuchte, CO_2 und TVOC dargestellt. Die relative Zielwertabweichung von CO_2 und TVOC bleibt immer <0.06 (Nicht dargestellt). Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).

Überraschend ist das Ergebnis, dass die Variation des Innentüröffnungsverhaltens den etwa gleich starken Einfluss auf die relative Feuchte hat wie die des Feuchteintrags (innerhalb mögliche Schwankungsbreiten). Dies liegt wohl daran, dass sich die Feuchtepuffer in den Schlafräume bei geöffneten Türen tagsüber weniger stark entladen als bei geschlossenen Türen.

Das mögliche Fensterlüftungsverhalten zeigt für diesen Referenzfall einen nur geringen Einfluss. Der zusätzliche Luftwechsel verringert zwar die Luftfeuchtigkeit, aber nicht die Zielwertüberschreitung bezüglich CO₂. Die Begründung liegt an der Tatsache, dass die einzig vom Schlafzimmer herrührende CO₂ Zielwert-Überschreitung durch einen oder mehrere Lüftungsvorgänge am Tag nicht zu verringern ist. Dafür müssten Fensterlüftungsvorgänge nachts (im Kernwinter) modelliert werden, was für Wohnräume mit Komfortlüftungsanlagen als äußerst untypisch zu betrachten ist.

3.1.4.2 Klimaparameter

Die für die Variation der Klimaparameter modellierten Wetterdaten entsprachen den langjährigen Mittelwerten (1961-1990) verschiedener österreichischer Städte (Dornbirn, Eisenstadt, Graz, Innsbruck, Klagenfurt, Linz, Salzburg, St. Anton und Referenzfall Wien) und zum Vergleich einiger europäischen Städte (Berlin, Bozen, Dublin, Hamburg, Minsk, Sevilla, Trondheim). Alle Klimadatensätze wurden mit der kommerziell verfügbaren Software Meteonorm 6.1 generiert. Die Simulationsergebnisse sind gegen den über den Kernwinter gemittelten Wasserdampfgehalt (g Wasser pro kg trockene Luft) in Abbildung 15 aufgetragen.

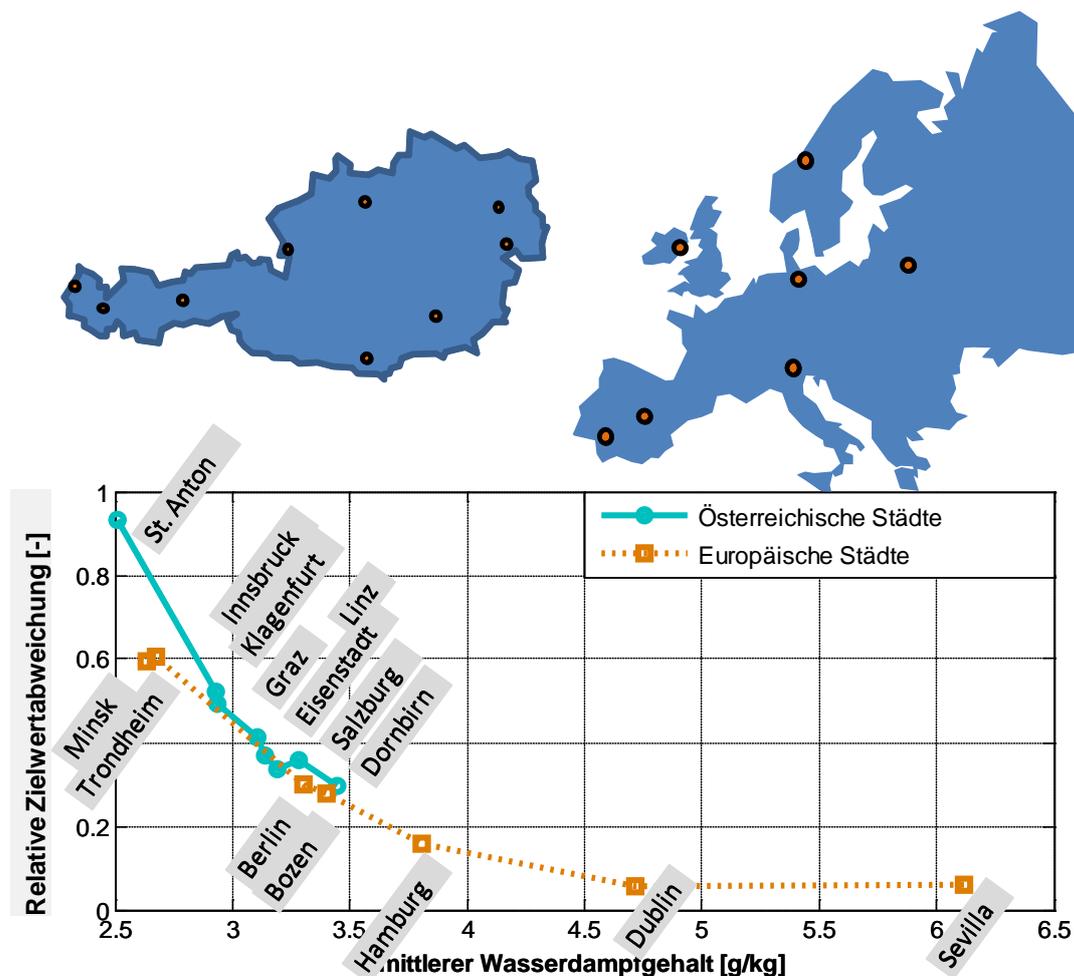


Abbildung 15: Relative Zielwertabweichung (Summenwert von CO₂, rel. Feucht und TVOC) bei Variation der Klimadaten, aufgetragen gegen den mittleren Wasserdampfgehalt (im Kernwinter) für österreichische und für europäische Städte.

3.1.4.3 Zuluftvolumenstrom

Es wurde die Zuluftmenge des Schlaf- und Kinderzimmers zwischen 0 und 60m³/h (pro Raum) variiert. Der Abluftvolumenstrom wurde proportional mitverändert (Balance). Abbildung 16 zeigt, dass 30 bis 40m³/h als Zuluftmenge für ein Schlafzimmer mit 2 Personen für die Referenzverhältnisse der beste Kompromiss zwischen CO₂-Konzentration und relativer Feuchte erzielt werden kann.

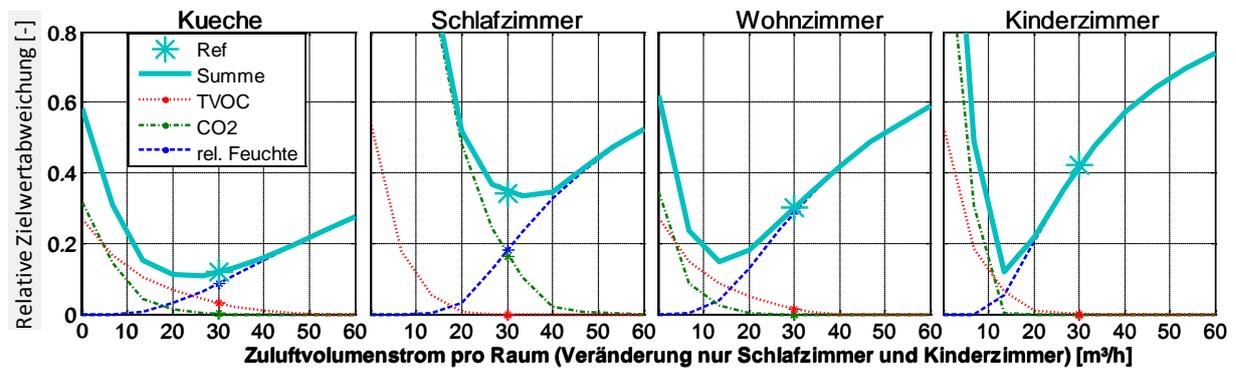


Abbildung 16: Raumlufthausqualität bei Variation der Zuluftmenge für Schlaf- und Kinderzimmer. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).

In Abbildung 17 wurde die Zuluftmenge in das Wohnzimmer verändert. Man erkennt, dass sich bei 0m³/h das Minimum der relativen Zielwertabweichung ergibt, bzw. im Fall der Küche nur geringfügig davon abweicht. Dies zeigt, dass für die angenommenen Referenzverhältnisse tatsächlich auf die Wohnzimmerzuluft verzichtet werden kann, und man so die Zielwerte für CO₂, relative Feuchte und TVOC in Summe am wenigsten (in Dauer und Stärke) über- bzw. unterschreitet.

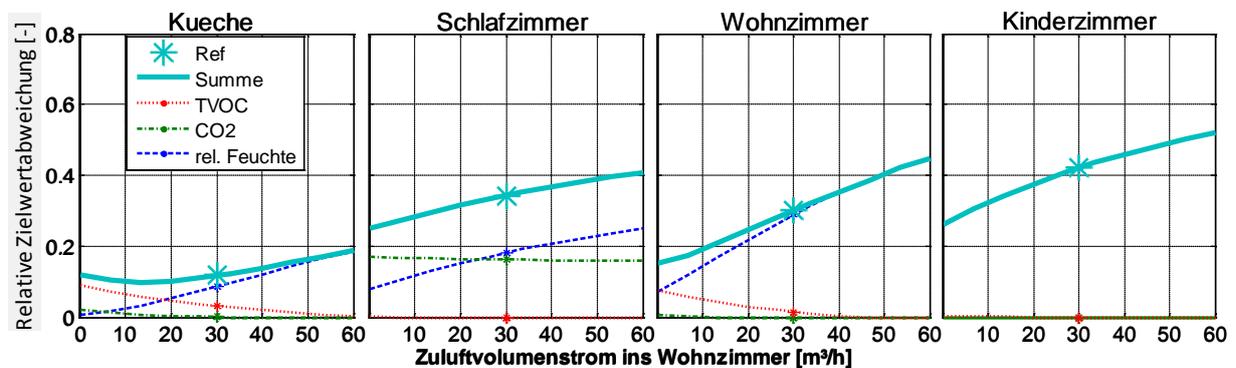


Abbildung 17: Raumlufthausqualität bei Variation der Zuluftmenge in Wohnzimmer. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).

Bei der erweiterten Kaskadenlüftung muss daher die eingesparte Wohnzimmerzuluft nicht die auf restlichen Zuluftträume (Schlaf- und Kinderzimmer) aufgeteilt werden.

3.1.5 Simulationsergebnisse des Referenzmodell mit Standardluftführung und mit erweiterter Kaskadenlüftung

Die folgenden Abbildungen zeigen einen direkten Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen für das Referenzmodell mit Standardluftführung und mit erweiterter Kaskadenlüftung. Dafür wurde der zeitliche Konzentrationsverlauf aus den Simulationsrechnungen ausgewertet und eine normierte kumulative Häufigkeitsverteilung für

die CO₂-Konzentration (Abbildung 18), für die relative Feuchte (Abbildung 19) und für die TVOC-Konzentration (Abbildung 20) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und jeweils nur für Zeiten mit Personenbelegung (gemäß Modell) erstellt. Die Anzahl ausgewerteter Stunden der jeweiligen Räume ist in der Legende der Abbildungen wiedergegeben. Die Simulationen basieren auf dem in 3.1.2 beschriebenen Referenzmodell und wurden mit der Multi-Zonen-Modell-basierten Software CONTAM für ein volles Kalenderjahr (aufgrund saisonaler Feuchtepuffereffekte) gerechnet.

Die Standardluftführung wurde genau wie das Referenzmodell in 3.1.2 mit insgesamt 90m³/h Zuluft (30m³/h pro Schlaf- und Kinderzimmer, 30m³/h für das Wohnzimmer) modelliert. Die erweiterte Kaskadenlüftung wurde, in Betrachtung der Ergebnisse aus 3.1.4.3, mit nur 60m³/h Gesamt-Zuluftvolumenstrom (30m³/h pro Schlaf- und Kinderzimmer) gerechnet.

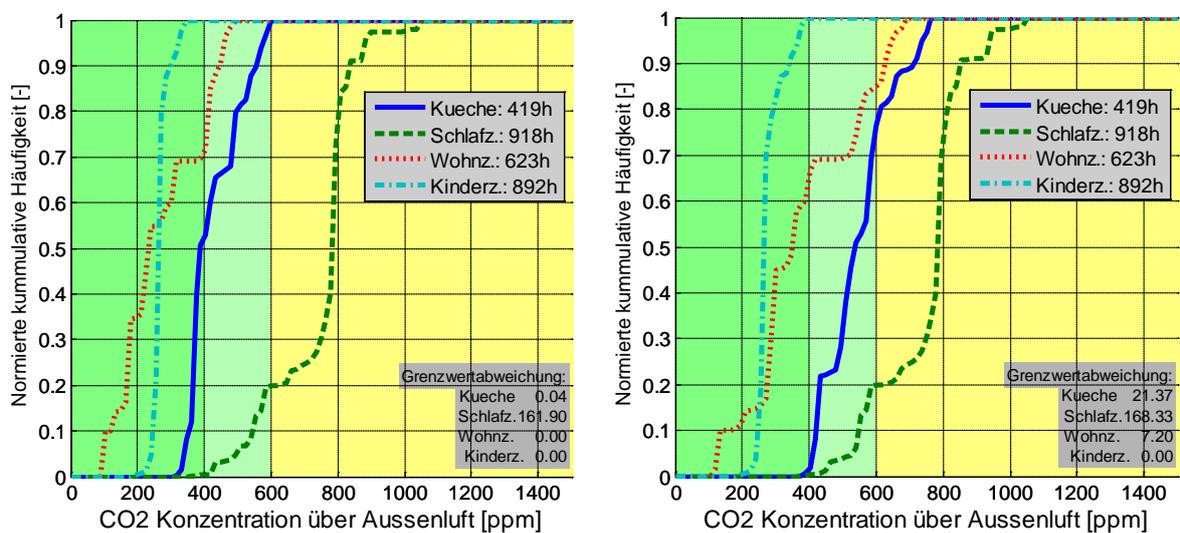


Abbildung 18: CO₂-Konzentrationshäufigkeitsverteilung bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.

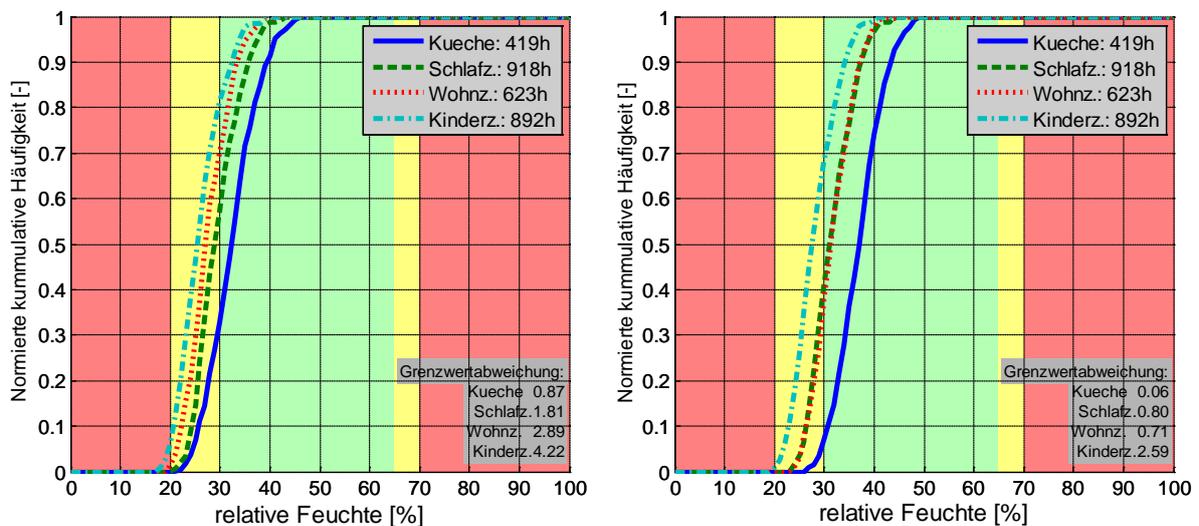


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.

Man erkennt in Abbildung 18 dass sich die CO₂-Konzentration im Schlaf- und Kinderzimmer aufgrund gleichbleibender Zuluftmenge kaum ändert, und dass sich die CO₂-Konzentration in Küche und Wohnzimmer erhöht, aber nur geringfügig und nur für kurze Zeit (15-20% des Auswertzeitraums) den Zielwert von 600ppm übersteigt. Die sich ergebende (mittlere) absolute Zielwertabweichung (siehe 3.1.3) erhöht sich somit für das Wohnzimmer von 0 auf 7,2ppm (siehe Abbildung 18, jeweils rechts unten).

Der leichten Erhöhung der CO₂-Konzentration steht eine Erhöhung der relativen Feuchte gegenüber, wie in Abbildung 19 zu sehen ist. Die absolute Zielwertabweichung reduziert sich mit der erweiterten Kaskadenlüftung um 1-2%-Pkte relative Feuchte (je nach Raum). Der Umstand, dass die relative Feuchte in Schlaf- und Kinderzimmer trotz gleichbleibender raumbezogener Zuluftmenge bei der erweiterten Kaskadenlüftung steigt, kann auf Feuchtepuffereffekte und tagsüber offenstehende Zimmertüren zurückgeführt werden.

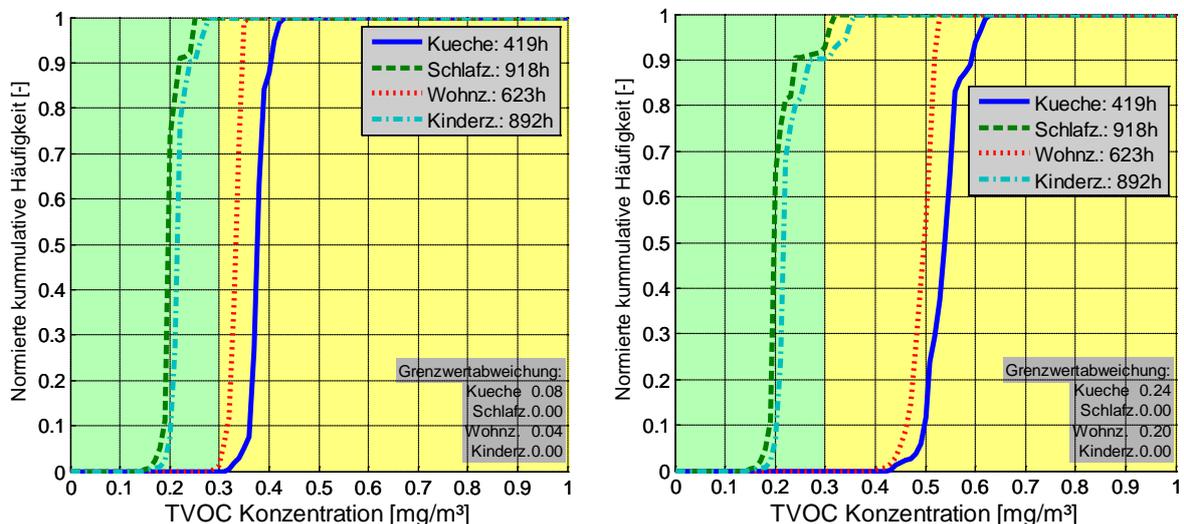


Abbildung 20: TVOC-Konzentrationshäufigkeitsverteilung bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.

Die TVOC-Konzentration in den Räumen mit der größten Aufenthaltsdauer (Schlaf- und Kinderzimmer) bleibt, wie erwartet, nahezu unverändert fast durchgehend unter dem festgelegten Zielwert von 0,3mg/m³ (siehe Abbildung 20). Für Küche und Wohnraum erhöht sich die absolute Zielwertüberschreitung von ca. 0,06mg/m³ auf ca. 0,22mg/m³. Folgende Anmerkungen sollten zur Relativierung dieses Ergebnisses gemacht werden:

1. Das für die TVOC-Bewertung herangezogene Papier des deutschen Umweltbundesamtes (Heinzow & Sagunski, 2007) gibt den Bereich zwischen 0,3 und 1,0mg/m³ als „hygienisch noch unbedenklich, soweit keine Richtwertüberschreitung für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen“ an. Desweiteren werden Werte über 5mg/m³ als hygienisch bedenklich und Werte über 10mg/m³ als hygienisch inakzeptabel bewertet. In der vom Arbeitskreis Innenraumluft im Auftrag vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft erstellten Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft (Baldinger et al., 2011), wird der TVOC-Konzentrationsbereich zwischen 0,25mg/m³ und 0,5mg/m³ als durchschnittlich bewertet.

2. Die Absolutwerte der TVOC-Konzentration dieser Simulationen sollten, wie schon im Kapitel 3.1.2 beschrieben, mit Vorsicht für eine Bewertung herangezogen werden. Die Quellstärke pro Quadratmeter Wohnfläche für das verwendete Referenzmodell wurde aus diversen Literaturquellen auf der „sichereren“, sprich auf der höheren, Seite zu $500\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{-Wohnfläche Stunde})$ abgeschätzt. Zum Beginn dieser Arbeit lagen leider noch keine Messergebnisse aus der vom Österreichischen Institut für Baubiologie und Bauökologie (IBO) geführten Messkampagne (Tappler, 2012) vor. Nach derzeitigem Stand und laut persönlicher Auskunft des Autors deuten die Ergebnisse dieser Studie darauf hin, dass eine TVOC-Quellstärke von $110\text{-}120\mu\text{g}$ pro $\text{m}^2\text{-Wohnfläche}$ und Stunde als Langzeitmittel bei neuen Gebäuden als realistischer Wert angenommen werden kann.

Für den mittels Computersimulation berechneten Vergleich zwischen Standardlüftung (mit $90\text{m}^3/\text{h}$ Gesamtzuluftmenge) und erweiterter Kaskadenlüftung (mit $60\text{m}^3/\text{h}$ Gesamtzuluftmenge) kann folgendes zusammenfasst werden:

- CO₂-Konzentration: Gleichbleibend in Schlaf- und Kinderzimmer, etwas höher aber nur kurzfristige Überschreitungen des Zielwerts ($1000\text{ppm}_{\text{absolut}}$) bei Kaskadenlüftung für Küche und Wohnzimmer.
- relative Feuchte: Erhöhung um ca. 2%-Pkte in Schlaf- und Kinderzimmer und um ca. 4-5%-Pkte in Wohnzimmer und Küche bei Kaskadenlüftung.
- TVOC: Gleichbleibend in Schlaf- und Kinderzimmer. Bei Kaskadenlüftung Erhöhung in Wohnzimmer/Küche, aber unter normalen Umständen (keine überdurchschnittlich hohen VOC-Emissionsraten) auch im unbedenklichen Bereich.

3.1.6 CFD-Simulationen - Lüftungseffizienz bei erweiterter Kaskadenlüftung in Wohnzimmer mit ungünstig positionierten Überströmöffnungen

Mit der erweiterten Kaskadenlüftung kann, wie mit den oben beschriebenen Multi-Zonen-Simulationen gezeigt, auf einen eigenen Zuluftauslass im Wohnzimmer, bei fast gleichbleibender Raumluftqualität, verzichtet werden. Voraussetzung dafür ist eine geeignete Grundrisstopologie (siehe Kap 3.4), bei der die von den Zuluftträumen (z.B. Schlafzimmer) überströmende Frischluft sich mit der Wohnzimmerluft vermischen kann, bevor sie über Abluftauslässe oder Überströmöffnungen der Abluft Räume wieder aus dem Wohnzimmer abgesaugt wird. Die verwendeten Multi-Zonen-Simulationsmodelle gehen von einer perfekten Durchmischung innerhalb einer Zone (Raum) aus. Unter normalen Umständen ist in Wohnräumen die natürliche Konvektion, angetrieben durch thermische Quellen bzw. Senken (Personen, elektrische Geräte, kalte oder warme Oberflächen, usw.), ausreichend, um für eine gute Durchmischung zu sorgen, und das unabhängig von der Anordnung der Zu- und Abluftauslässe (J. Schnieders, 2003). Zusätzlich wird in den meisten Zuluftträumen die Durchmischung mit Hilfe von geeigneten Zuluftauslässen (Weitwurfdüsen) unterstützt.

Für die erweiterte Kaskadenlüftung (ohne Zuluft im Wohnzimmer) galt es nun zu klären, inwieweit es bei ungünstigen Raumgeometrien und ungünstiger Anordnung der Überströmöffnungen zu einer unzureichenden Durchmischung kommen kann. So wurde

mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) untersucht, ob es bei Wohnzimmern wo die Überströmöffnungen der Zu- und Ablufträume in einem angrenzenden Gangbereich oder einer Nische des Wohnzimmer angeordnet sind und es keine zusätzliche Abluftabsaugung im Wohnzimmerbereich gibt, zu Kurzschlussströmungen kommen kann. Es sei angemerkt, dass typische moderne Grundrisse mit im Wohnzimmer integriertem Kochbereich (mit Abluft) keinen solchen ungünstigen Fall darstellen. Simuliert wurden „Worst-Case“ Szenarien mit geringstmöglichem thermischen Antrieb (fast ausschließlich adiabate Wände, nur eine Person, keine elektrischen Geräte).

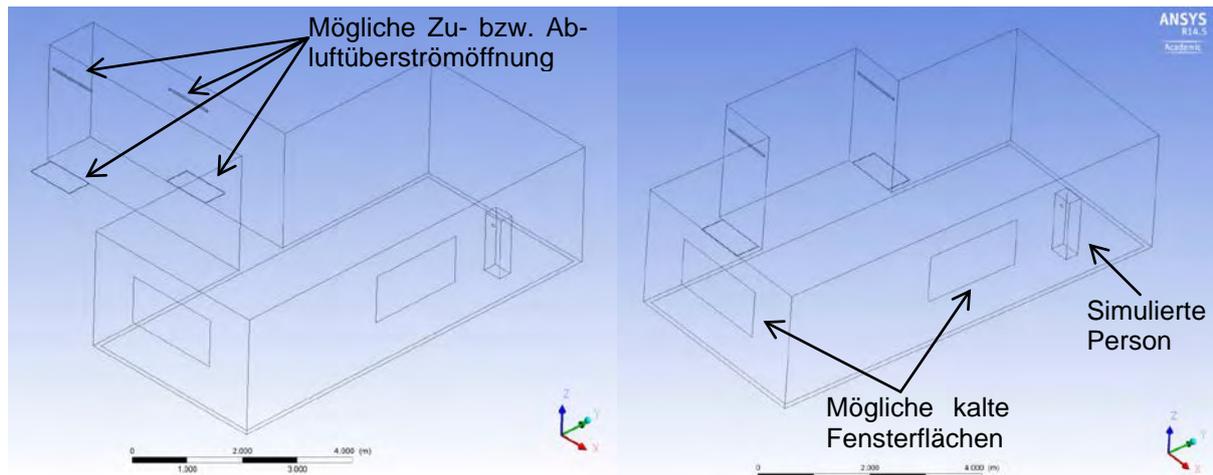


Abbildung 21: 3D-Ansicht zwei der mit CFD simulierten ungünstigen Wohnzimmergeometrien.

Durchgeführt wurden die Strömungssimulationen mit der CFD-Software FLUENT/ANSYS 14.5, wobei auf das RNG k - ϵ Turbulenzmodell zurückgegriffen wurde, da dies für Probleme mit natürlicher und erzwungener Raumlufkonvektion als ausreichend genau bekannt ist (Zhang, Zhang, Zhai, & Chen, 2007).

Im Gang-/Nischenbereich (siehe Abbildung 21) wurde die überströmende Zu- und Abluft mit einem Volumenstrom von $30\text{m}^3/\text{h}$ modelliert. Wahlweise konnten die Öffnungen unten (=Türschlitz mit 10mm) oder oben (=Zargenüberströmlösung) aktiviert werden. Die Person wurde stark vereinfacht als ein Quader mit den Abmessungen $0.4\text{m} \times 0.275\text{m} \times 1.25\text{m}$ mit einer Leistungsabgabe von 76W (Khalifa, Prescod, & Elhadidi, 2006; Nielsen, Murakami, Kato, Topp, & Yang, 2003) bei gekoppelter Strahlungsaustauschberechnung (FLUENT-integriertes S2S Modell) abgebildet. Ohne Strahlungsaustauschkoppelung (vergleichsweise mit und ohne S2S gerechnet) wurde die Person mit 23W (30% konvektiver Anteil) simuliert (Srebric, Vukovic, He, & Yang, 2008). Die CO_2 -Emission erfolgte punktuell auf 1m Höhe (Mundbereich) mit 18l/h. Um eine mittlere Raumtemperatur von 22°C zu erhalten, wurde die Wärmestromdichte an den kalten Flächen (Fenster) bzw. an den warmen Flächen (Fußboden) entsprechend gewählt (Gesamtwärmebilanz zwischen Person, Zuluft und warmen bzw. kalten Flächen). In diversen Simulationen wurden die vertikale (oben oder unten) und die horizontale (über die Gangtiefe verteilt) Position der Überströmöffnungen und die Ganggeometrien (Breite von 1,1m bis 5m, Tiefe von 1,2m bis 5m) und die Temperaturdifferenz zwischen überströmender Zuluft und Raumtemperatur variiert.

Beispielhaft sind zwei repräsentative Ergebnisse dieser CFD-Simulationen als CO₂-Konzentrationsverteilung in Abbildung 22 und Abbildung 23 gezeigt. Beide besitzen einen langen (5m), schmalen (1,1m) Gangbereich und wurden mit einer 0,6°C, gegenüber Raumtemperatur, kühleren Überström-Zuluft simuliert. Die Wärmebilanz für diese Fälle erfordert eine Wärmeabfuhr von 8,5W/m² an der 2m x 1m großen Fensterscheibe (siehe Vorderansicht, Abbildung 22).

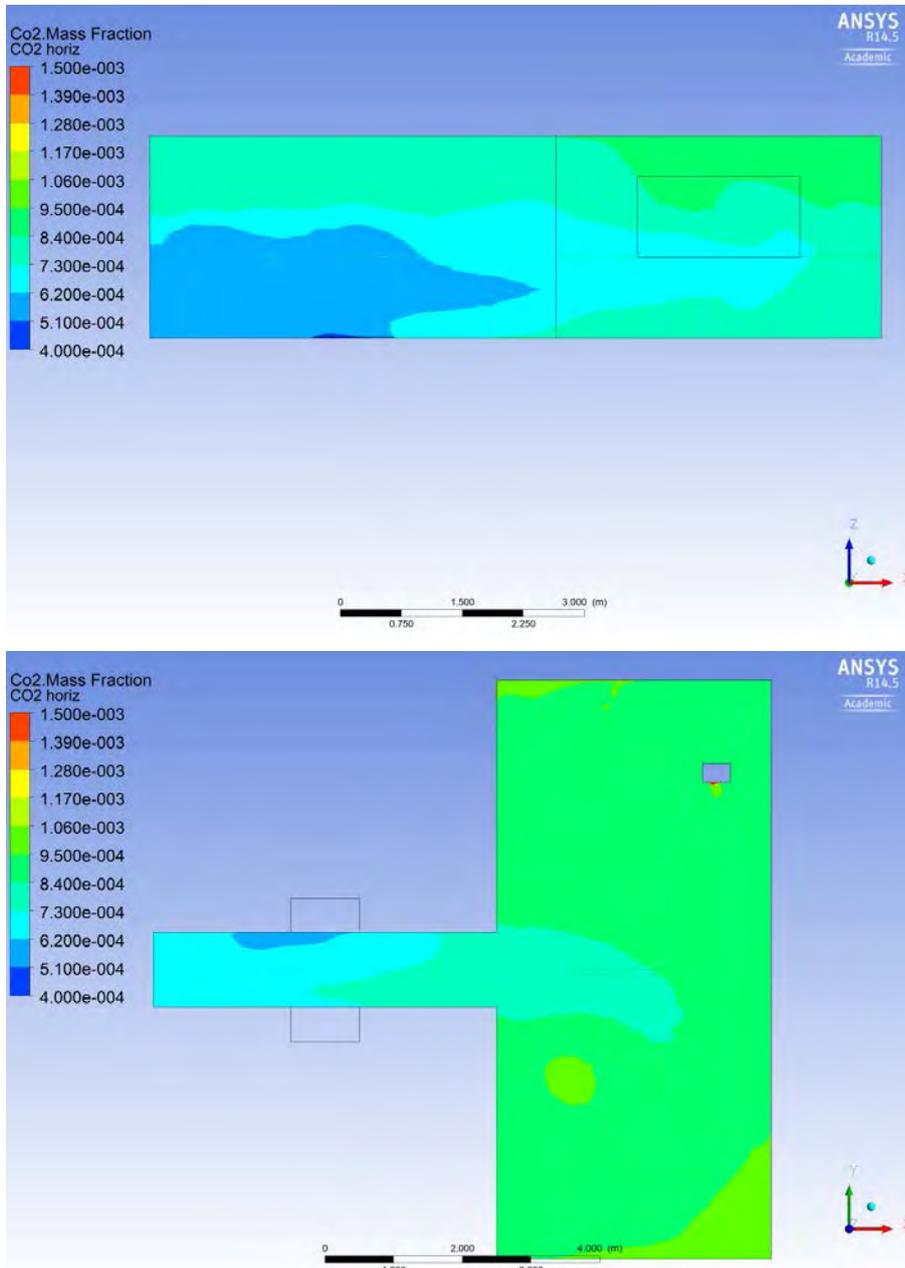


Abbildung 22: Vorderansicht und Draufsicht der sich ergebenden räumlichen CO₂-Verteilung im Wohnzimmer und Gangbereich für den Fall mit unten angeordneten Zuluftüberströmer (Türspalt) und gegenüberliegenden aber oben angeordneten Abluftüberströmer (Zarge). Die Farblegende zeigt die zugeordneten Konzentrationswerte in Volumenanteilen. Die überströmende Zuluft besitzt 400ppm.

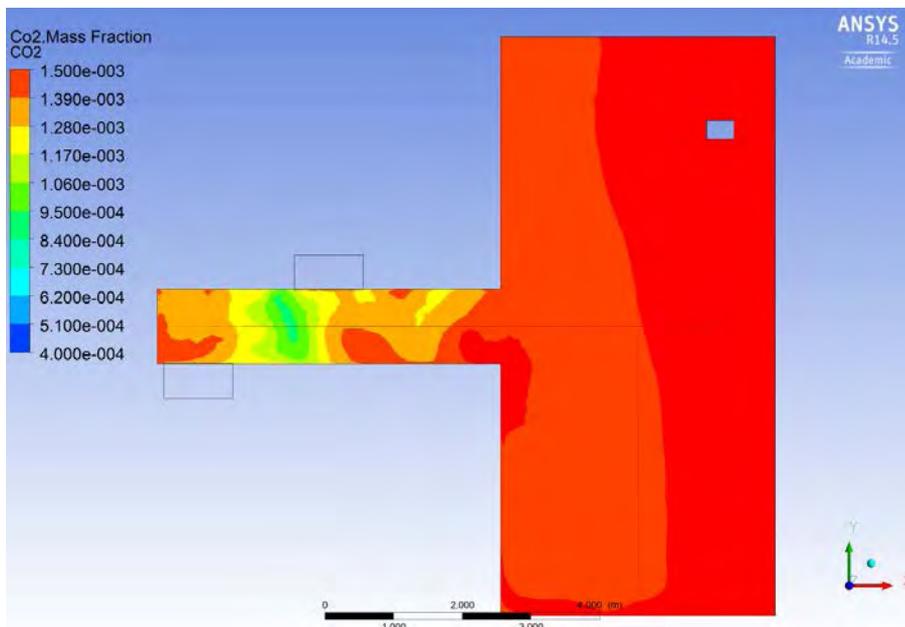
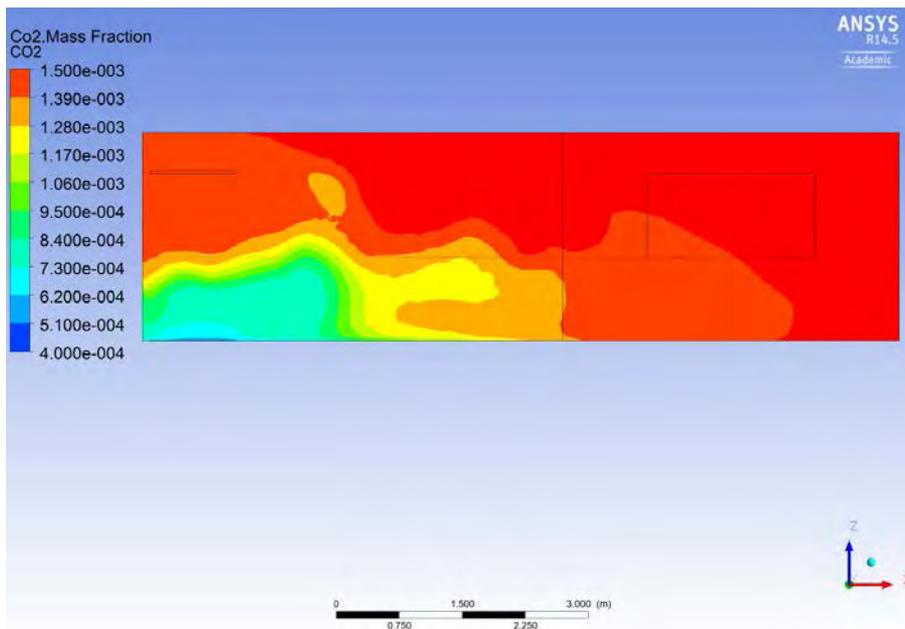


Abbildung 23: Vorderansicht und Draufsicht der sich ergebenden räumlichen CO₂-Verteilung im Wohnzimmer und Gangbereich für den Fall mit unten angeordneten Zuluftüberströmer (Türspalt) und ebenfalls unten, aber versetzt, angeordneten Abluftüberströmer (Türspalt). Die Farblegende zeigt die zugeordneten Konzentrationswerte in Volumenanteilen. Die überströmende Zuluft besitzt 400ppm.

Für den Fall mit vertikal versetzten Überströmöffnungen (Abbildung 22) erkennt man zwar niedrigere Konzentrationen im Gang, aber die CO₂-Konzentrationen im restlichen Wohnbereich steigen nur ein wenig über den Konzentrationswert der sich bei perfekter Durchmischung einstellen würde (=1000ppm). Es wurden verschiedene horizontale Positionen des Zuluft- gegenüber dem Abluftüberströmer simuliert. Die Lüftungseffizienz bleibt immer um die 0,55. Die Lüftungseffizienz ist ein Maß dafür, wie schnell die Luft im Raum ausgetauscht wird. Dabei entspricht 0,5 einer idealen Durchmischung und 1 einer Kolbenströmung (Etheridge & Sandberg, 1996a; J. Schnieders, 2003).

Abbildung 23 zeigt die simulierte CO₂-Konzentrationsverteilung für den Fall mit Zuluftüberströmer und Abluftüberströmer unten. Kurzschlussströmung zwischen Zuluft- und Ablufttraum bildet sich aus, dadurch steigt im Wohnzimmer die CO₂-Konzentration deutlich über die 1000ppm, die sich bei perfekter Durchmischung (mit 1 Person und 30m³/h Zuluft) einstellen würde. Auch hier wurden Simulationen für verschiedene Überströmpositionen und verschiedene Ganggeometrien gerechnet. Die Lüftungseffizienz liegt immer zwischen 0,2 und 0,35.

3.1.6.1 Fazit CFD-Simulationen

Falls das Wohnzimmer keine eigene Abluft (aufgrund eines Kochbereichs) besitzt, und alle Zu- und Ablufträume in nur einem Gang- bzw. Nischenbereich untergebracht sind, dann können auf Basis dieser Simulationsergebnisse folgende Empfehlungen gegeben werden.

Zuluft- UND Abluftüberströmöffnungen sollten nicht beide unten (z.B. Türspalt) realisiert werden! Stattdessen sollten die Zuluft- und Abluftüberströmöffnungen nicht auf gleicher Höhe, z.B. Zulufüberströmer unten (z.B. 10mm Türspalt) und Abluftüberströmer oben (z.B. Überströmung zwischen Zarge und Türsturz, siehe Kapitel 3.3.2) platziert werden.

Bei Nicht-Beachtung könnte in Situationen mit nur geringen thermischen Antriebsquellen im Raum eine Kurzschlussströmung zwischen den Überströmöffnungen entstehen, die keine ausreichende Belüftung des Wohnzimmers gewährleistet.

3.2 Messergebnisse – Feldversuch in 3 Wohneinheiten

Um das Prinzip der erweiterten Kaskadenlüftung auch unter realen Bedingungen zu testen, wurde in einem von der Neuen Heimat Tirol in 2009 errichteten Wohngebäude in drei bewohnten Wohneinheiten die Zuluftauslässe im Wohnzimmer zugeklebt. Der projektierte Betriebsvolumenstrom (im Normalbetrieb) von 75m³/h wurde für die erweiterte Kaskadenlüftung auf 60m³/h durch Tausch der betreffenden Volumenstrombegrenzer reduziert. Da aus einem Vorprojekt (Wagner et al., 2012) der Großteil der für eine Vermessung der Raumluftqualität notwendigen Geräte und Infrastruktur bereits installiert war, konnte diese Vergleichsmessung mit relativ geringem Aufwand realisiert werden. Der Grundriss mit 82m² Wohnfläche und die Position der Zu- und Abluftauslässe ist in Abbildung 24, die für die Messung geplanten Zu- und Abluftvolumenströme in Tabelle 6 dargestellt.

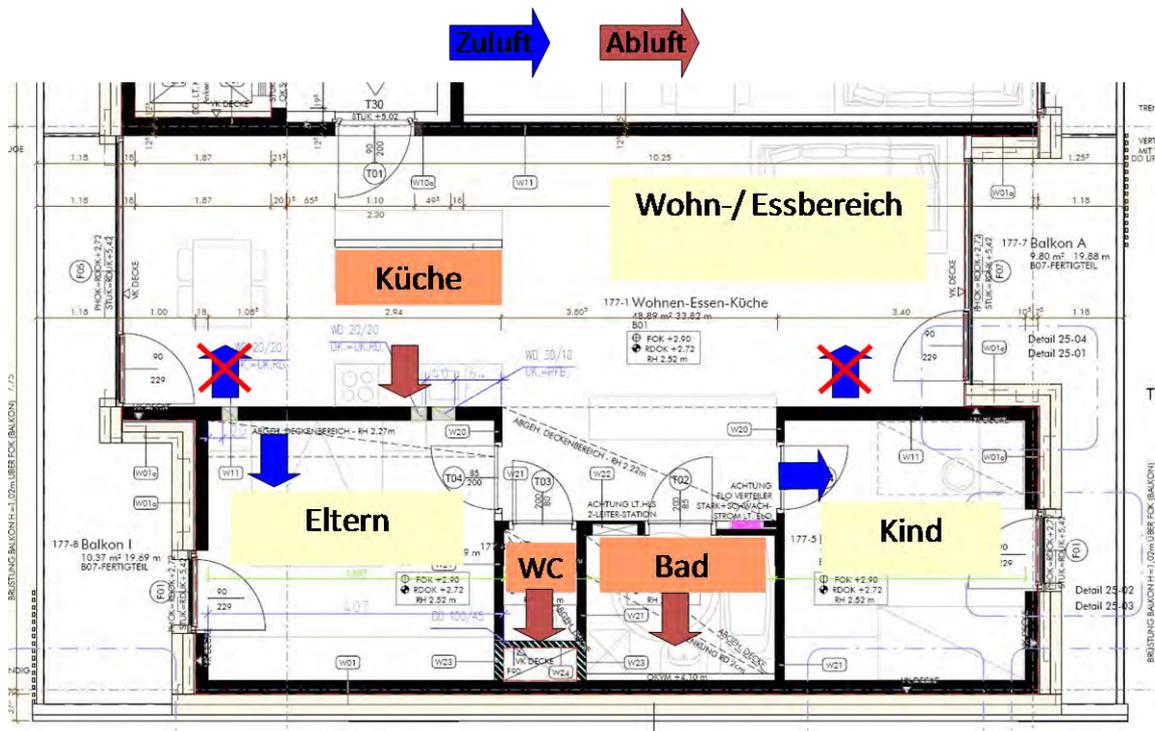


Abbildung 24: Grundriss und Position der Zu- und Abluftauslässe bei den für den Feldversuch verwendeten Wohneinheiten.

		Standardluftführung [m ³ /h]	Kaskadenluftführung [m ³ /h]
Zuluft	Schlafzimmer	19	30
	Kinderzimmer	19	30
	Wohnzimmer	37	0
Abluft	Kochbereich	37	30
	Bad	19	15
	WC	19	15

Tabelle 6: Die für die Testmessung geplanten Zu- und Abluftvolumenströme. Die Zuluftmengen für die Standardluftführung entsprechen dem projektierten Betriebsvolumenstrom dieser Wohneinheiten, die der Kaskadenluftführung entsprechen den Erkenntnissen aus den oben beschriebenen Simulationsrechnungen.

3.2.1 Volumenströme

Leider herrschten über den geplanten Messzeitraum (Dezember 2011 bis Februar 2012), keine konstanten Bedingungen. Die über die Lüftungsanlage zu- bzw. abgeführten Volumenströme lagen bereits bei Beginn der Messkampagne (16.12.2011) deutlich unter den Auslegungswerten für Normalbetrieb.

Die für die Messung ausgewählten Wohneinheiten (hier mit WE1, WE2 und WE3 bezeichnet) verfügen alle über einen identischen Grundriss mit ca. 82 m² Wohnfläche. Der Zu- und Abluftvolumenstrom ist für Normalbetrieb zu je 75m³/h ausgelegt und wurde vor Bezug der Wohnungen im Zuge des Projekts (Wagner et al., 2012) messtechnisch erfasst. Während dieser Messkampagne wurden in den drei Wohneinheiten die Zu- und Abluftvolumenströme wieder mittels FlowFinder (druckverlustkompensierte Messung) gemessen. Wie Tabelle 7

zeigt, lagen die Istwerte bereits bei Beginn dieser Messkampagne deutlich unter den Sollwerten, hätten aber für die zu testenden Kaskadenluftführung beinahe gereicht. Leider sanken die Luftwechselraten während der nächsten Wochen weiter drastisch ab. In Abbildung 25 ist der zeitliche Verlauf der Rohrströmungsgeschwindigkeit und somit des Volumenstroms abgebildet. Deutlich zu erkennen ist ein kontinuierlicher Abfall und ein sprunghafter Anstieg während der Wartungsarbeiten am 9.02.2012 (Filtertausch).

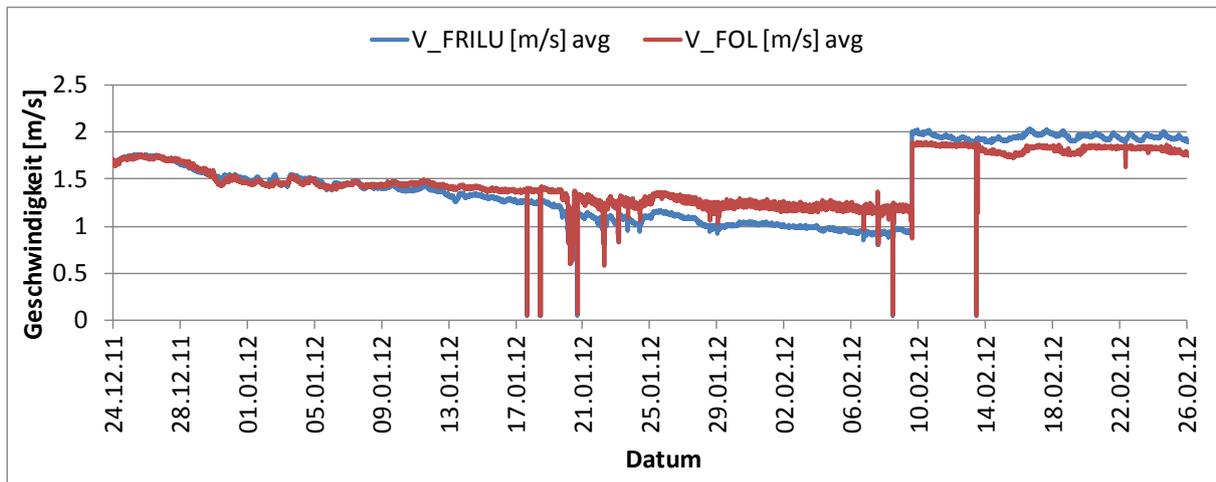


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Frischluftrohr und im Fortluftrohr.

Am 18.1.2012 (ca. 3 Wochen vor der Wartung der Lüftungsanlage) **lagen die, mit Hilfe des FlowFinders, gemessenen Zuluftvolumenströme zwischen 37 und 44 m³/h pro Wohneinheit, also bei ca. 50% des Auslegungswertes!** Erst am 9.2.2012 wurde die Lüftungsanlage von der zuständigen Firma gewartet. Nach der Wartung entsprach der Zuluftvolumenstrom in einer Wohneinheit (WE) in etwa dem geplanten 75m³/h, in den anderen beiden WE lagen die gemessenen Volumenströme bei ca. 60m³/h, gerade ausreichend für die zu testende erweiterte Kaskadenlüftung. Die Ursache für die sehr niedrigen Volumenströme lag an verschmutzten Außenluftfiltern. Eine Reduzierung des Tauschintervalls, beziehungsweise ein Tausch bei Bedarf durch den Hausmeister wäre zu empfehlen. Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen (Baustellen in Umgebung, etc.) können Filterstandzeiten stark variieren. Im Zuge dieser Messkampagne wurden außerdem Kondensatprobleme im Zentrallüftungsgerät gesichtet und an die zuständige Wartungsfirma gemeldet. Dies konnte während den Wartungsarbeiten auf eine defekte Außenluftvorwärmung zurückgeführt werden.

Messtermin	Uhrzeit	Luftführung	Filterzustand	SZ	KZ	WZ	ESS	Küche	Bad	WC	ZL ges	AL ges	Disbalance	Veränderung [%/Monat]		Kommentar
				m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	%	ZL	
WE1																
16.12.2011	09:30	Standard*	alt	10	10	14	10	30	12	12	44	54	-22			
19.01.2012	10:30	Standard*	alt	10	12	10	12	24	10	9.5	44	44	1	0	-17	1
	11:00	Kaskade*	alt	12	14	0	13	24	10	9.5	39	44	-12			
26.04.2012	14:00	Kaskade	neu (9.2.)	18	22	0	20	36	13	12	60	61	-2			
WE2																
16.12.2011	10:00	Standard*	alt	9	17	11	12	31	10	13	49	54	-9			
18.01.2012	10:00	Standard*	alt	7	12	10	8	24	8	10	37	42	-14	-23	-20	
	10:30	Kaskade*	alt	17	18	0	0	24	8	10	35	42	-20			1
13.02.2012	10:00	Kaskade*	neu (9.2.)	33	40	0	0	39	13	15	73	67	8			
	11:00	Kaskade	neu (9.2.)	29	27	0	0	28	16	14	56	58	-4			2
28.03.2012	16:00	Kaskade	neu (9.2.)	26	25	0	0	24.5	14	10	51	48.5	5	-6	-12	
WE3																
16.12.2011	13:00	Standard*	alt	11	12	18	12	28	12	16	53	56	-7			
18.01.2012	11:00	Standard*	alt	7.5	10	10	10	24	11	13	38	48	-28	-27	-13	
	11:30	Kaskade*	alt	16	21	0	0	24	11	13	37	48	-30			1
13.02.2012	12:00	Kaskade	neu (9.2.)	30	30	0	0	32	15	20	60	67	-12			
28.03.2012	15:00	Kaskade	neu (9.2.)	28	30	0	0	30	15	20	58	65	-12	-2	-2	
	15:30	Standard(*)	neu (9.2.)	14	16	17	15	30	15	20	62	65	-5			1

* Volumenstrom entsprach nicht den Soll/Auslegungswert

keine Messung möglich; aus den anderen Messdaten extrapoliert

1: Abluftwerte aus Vormessung (1/2 Std) übernommen

2: Volumenstrombegrenzer (60m³/h) eingebaut und Verteilung eingestellt

Tabelle 7: Volumenstrommessung mit FlowFinder

3.2.2 Gewählte Vergleichszeiträume

Aufgrund der sehr niedrigen und kontinuierlich sinkenden Lüftungsvolumenströme konnten die gewonnenen Messdaten zur Raumluftqualität nicht wie geplant für einen direkten Vergleich Standardluftführung (75m³/h) - Kaskadenlüftung (60m³/h) herangezogen werden.

Stattdessen wurde der Vergleichszeitraum für Standard- bzw. Kaskadenlüftung so gewählt, dass in beiden Fällen grob 60m³/h Zu- und Abluftvolumenstrom vorlagen. Für die Standardlüftung wurde der Zeitraum zwischen 18.11.2011 und 16.12.2011 herangezogen. Extrapoliert man die am 16.12.2011 gemessenen Volumenströme (siehe Tabelle 7) mit Hilfe der aus Abbildung 25 ermittelten Steigung (ca. -20% pro Monat) einen Monat in die Vergangenheit ergeben sich Werte zwischen 55 und 66m³/h.

Der Auswertzeitraum für die Kaskadenlüftung wurde zwischen 14.2.2012 und 13.03.2012 (also ebenfalls 28 Tage) gewählt. Die Volumenströme lagen in diesem Zeitraum ebenfalls grob um die 60m³/h (siehe Tabelle 7).

Ebenfalls wichtig bei einem Vergleich verschiedener Zeiträume sind die klimatischen Bedingungen. Zum Einen muss sichergestellt sein, dass die Außentemperaturen nicht so hoch sind, dass mit einer maßgeblichen zusätzlichen Fensterlüftung durch den Nutzer (offene Balkone, dauergekippte Fenster, etc.) zu rechnen ist. Zum Anderen ist auf eine ähnliche Außenfeuchteverteilung zwischen den beiden zu vergleichenden Zeiträumen zu achten. Diese beeinflusst, ebenso wie die internen Feuchtequellen und die Außenluftwechselrate, die Raumluftfeuchte maßgeblich.

Bei der Wahl der beiden Auswertzeiträume wurden daher nebst der Volumenstromproblematik (siehe oben) auch auf eine ähnliche Außenfeuchteverteilung geachtet (siehe Abbildung 26).

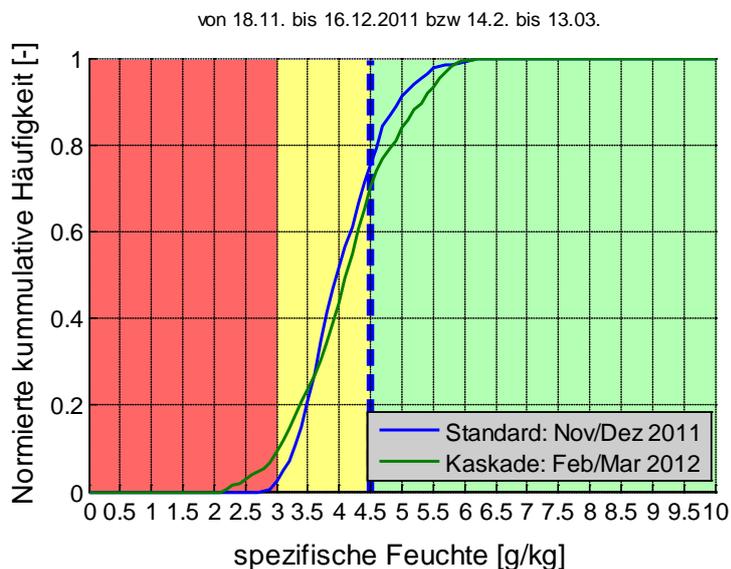


Abbildung 26: Normierte Verteilung der spezifischen Feuchte der Außenluft für die gewählten Auswertzeiträume.

3.2.3 Auswertung - Schlafzimmer

Abbildung 27 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der gemessenen CO₂-Konzentration der Schlafzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten. Im linken Diagramm wurde der für die Standardluftführung repräsentative Zeitraum zwischen 18. November und 16. Dezember 2011 ausgewertet. In dieser Zeit fiel sowohl Zuluft- als auch Abluftvolumenstrom um ca. 20% (siehe 3.2.1). Im Mittel lag der Volumenstrom in Wohneinheit (WE) 2 und 3 um die 60m³/h, in WE1 etwas darunter (Tabelle 7). Im rechten Diagramm ist der für die erweiterte Kaskadenlüftung repräsentative Zeitraum ausgewertet. Auch hier lag der Zu- und Abluftvolumenstrom je nach Wohneinheit zwischen 50m³/h und 60m³/h. Zur Umsetzung der erweiterten Kaskadenlüftung im Zuge dieser Messung wurden die Zuluftventile im Wohnzimmer abgeklebt, bei Bedarf der Volumenstrombegrenzer ausgetauscht (von maximal 75m³/h auf maximal 60m³/h) und die verbleibenden Zu- und Abluftventile neu einreguliert.

Für das Schlafzimmer wurden jeweils nur die Uhrzeiten mit angenommener Belegung (zwischen 23:00 und 7:00 Uhr) ausgewertet.

Man erkennt einen Rückgang der CO₂-Konzentration mit der erweiterten Kaskadenlüftung, vor allem für WE1 (=Raum1) und WE3 (=Raum3). Dies ist mit einer fürs Schlafzimmer höheren Zuluftmenge (bei fast gleichbleibender Gesamtzuluftmenge) einfach zu begründen. In WE2 (=Raum2) blieb die Konzentrationsverteilung annähernd unverändert, was möglicherweise auf eine offenstehende Schlafzimmertür zurückzuführen ist.

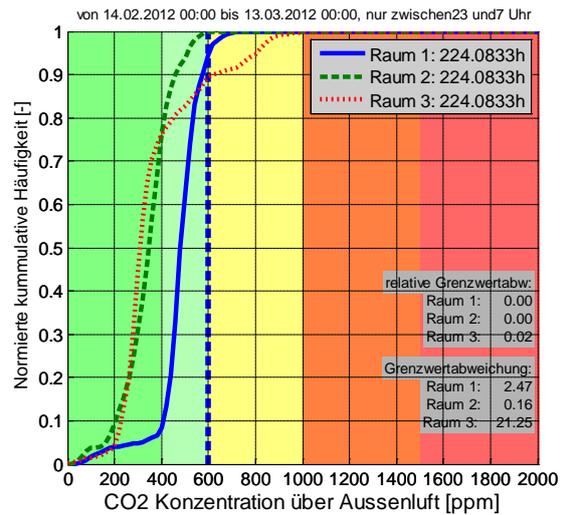
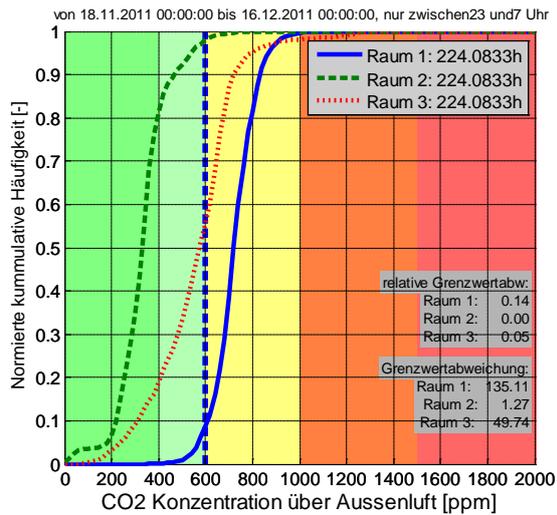


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenluftführung.

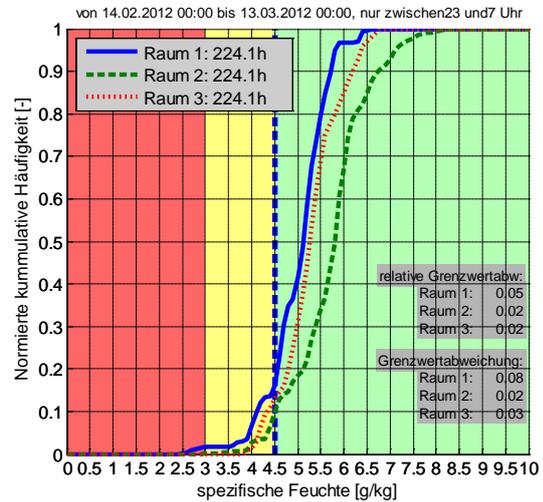
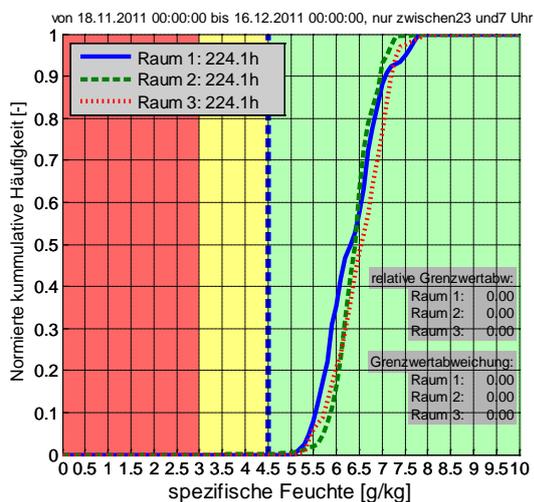


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Feuchte [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{feuchte Luft}}$] im Schlafzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenluftführung.

Um die Raumlufffeuchte unabhängig von der Raumtemperatur zu beurteilen wurde die gemessene relative Feuchte mit Hilfe der gemessenen Raumtemperatur in eine spezifische Feuchte in [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{feuchte Luft}}$] umgerechnet und die Häufigkeitsverteilung bestimmt (siehe Abbildung 28). Die Raumlufffeuchte im späteren Vergleichszeitraum (mit Kaskadenlüftung) reduzierte sich im Vergleich zum früheren Zeitraum (Standardlüftung) merkbar, blieb aber mindestens 85% der Zeit über den als Zielwert gesetzten 4.5 g/kg (entspricht ca. 30% r.F. bei 20°C). Aufgrund der höheren Zuluftvolumenströme im Schlafzimmer war eine niedrigere Luftfeuchte zu erwarten, jedoch sei hier angemerkt, dass auch saisonale Feuchtepuffereffekte diese Differenz verstärken. Am Anfang des Winters stehen, im Gegensatz zum Frühjahr, noch „geladene“ Feuchtepuffer (wie Wände und Decken) als zusätzliche Feuchtequellen zur Verfügung. Die genaue Quantifizierung dieses Effekts konnte im Zuge dieser Messkampagne nicht durchgeführt werden.

3.2.4 Auswertung Wohnzimmer

Auch im Wohnzimmer bestätigen sich die erwarteten Ergebnisse. Aufgrund vergleichbarer Gesamtvolumenströme ändern sich die Häufigkeitsverteilungen der CO₂-Konzentration zwischen Standardlüftung und erweiterter Kaskadenlüftung kaum. Einzig in WE1 (=Raum1) ist eine leichte Reduktion der CO₂-Konzentration mit erweiterter Kaskadenlüftung merkbar. Dies könnte aber auch auf Unterschiede in den Zu- bzw. Abluftvolumenströme zurückzuführen sein.

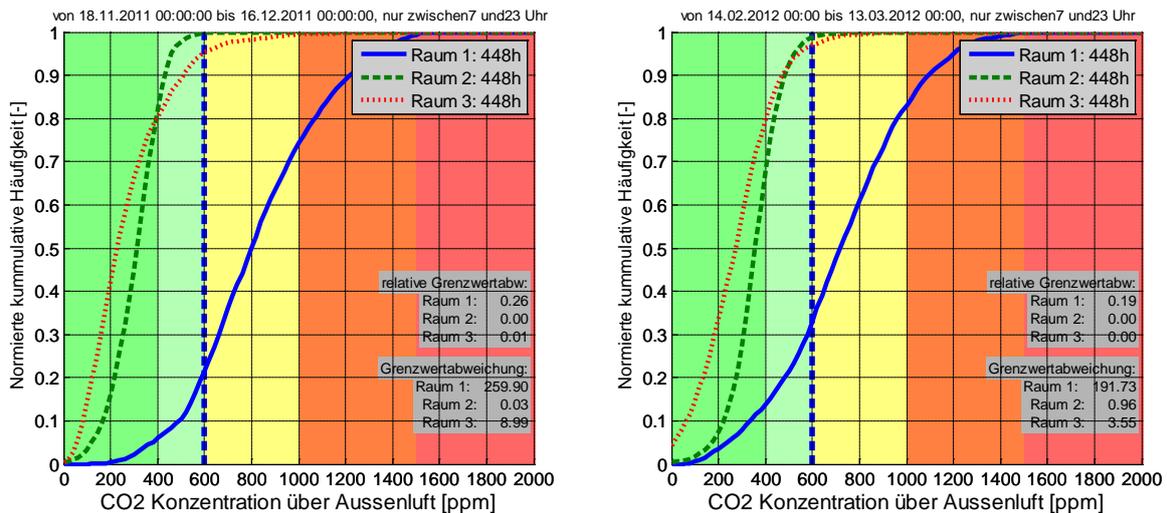


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der CO₂-Konzentration im Wohnzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.

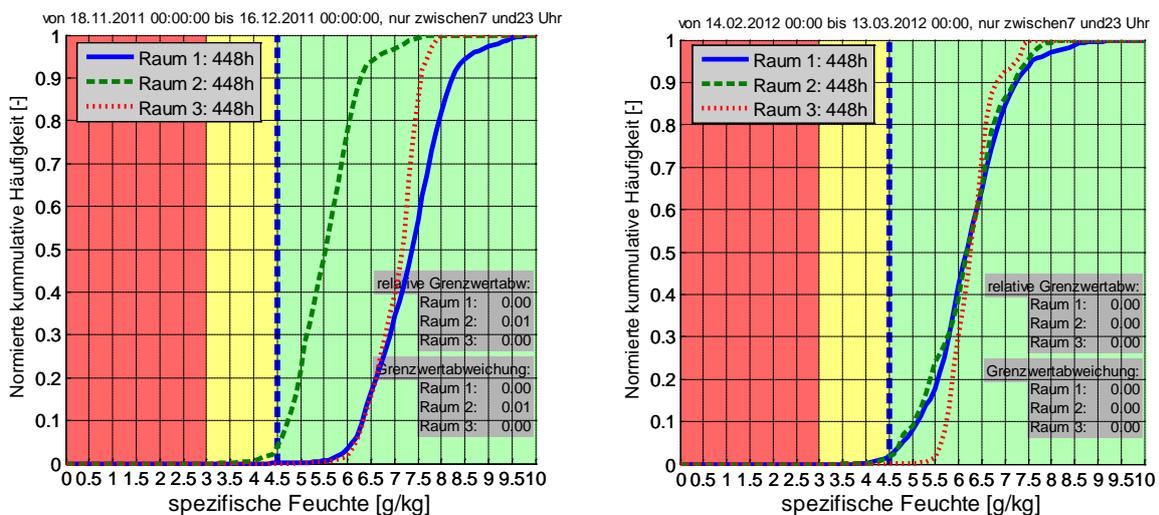


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Feuchte [g_{H2O}/kg_{feuchte Luft}] im Wohnzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.

Die gemessene Luftfeuchtigkeit reduziert sich zwischen den Standardlüftung und Kaskadenlüftung bzw. zwischen den beiden Auswerteziträumen um ca. 1g/kg (für Median) für WE1 und WE3. Diese Differenz könnte auf saisonale Feuchtepuffereffekte, wie oben erläutert, zurückzuführen sein. Warum sich die spezifische Feuchte von WE2 in dem für die Kaskadenlüftung repräsentativen Zeitraum gegenüber dem für Standardlüftung repräsentativen Zeitraum so deutlich erhöht, kann mit den zur Verfügung stehenden Messdaten nicht zufriedenstellend erklärt werden (evtl. Änderung des Nutzerverhaltens,...).

3.2.5 TVOC Messungen

Um auch den Einfluss der erweiterten Kaskadenlüftung auf die Schadstoffkonzentrationen die nicht nur von Anwesenheit und Aktivität der Bewohner abhängig sind zu untersuchen, wurde eine einfache TVOC-Messreihe geplant und durchgeführt. TVOC steht für Total Volatile Organic Compounds und ist ein Summenparameter für flüchtige organische Verbindungen (VOC), wofür typischerweise auf eine Definition im ECA-Report (Berglund et al., 1997) (C6 bis C16) zurückgegriffen wird. Das oben beschriebene Messobjekt eignet sich hervorragend für eine „nicht-invasive“ Messung, da in 18 Wohneinheiten Teflonschläuche für eine kontinuierliche Probenahme bereits vorhanden sind. Somit können die Luftproben mit einem im Technikraum aufgestellten TVOC-Messgerät entnommen werden ohne die jeweilige Wohnung betreten zu müssen. Da diese Messung im eigentlichen Projektumfang nicht inkludiert und die Finanzierung einer umfangreichen Messkampagne daher nicht gegeben war, wurde ein vereinfachtes Messprinzip verwendet. Ziel war nicht die Bestimmung der jeweiligen TVOC-Konzentrationen als Absolutwert, sondern nur als Relativwert zwischen Standardluftführung und erweiterter Kaskadenluftführung. Daher wurde ein TVOC-Summenwert statt über eine aufwendigere Einzelstoffbestimmung mittels Adsorption an Tenax-TA mit anschließender gaschromatographischer Auftrennung, mit einem direkt anzeigendem Gerät mit Photoionisationsdetektor (PID) bestimmt. Diese Methode arbeitet ohne Auftrennung der Einzelsubstanzen. Das verwendete Messgerät des Typs „ppbREA 3000“ wurde auf Isobuten kalibriert, die Ergebniseinheiten sind daher in Bezug auf Isobuten in „parts per billion“ (ppb) zu verstehen. Ein direkter Vergleich mit den genaueren gaschromatischen Messmethoden ist daher nicht möglich.

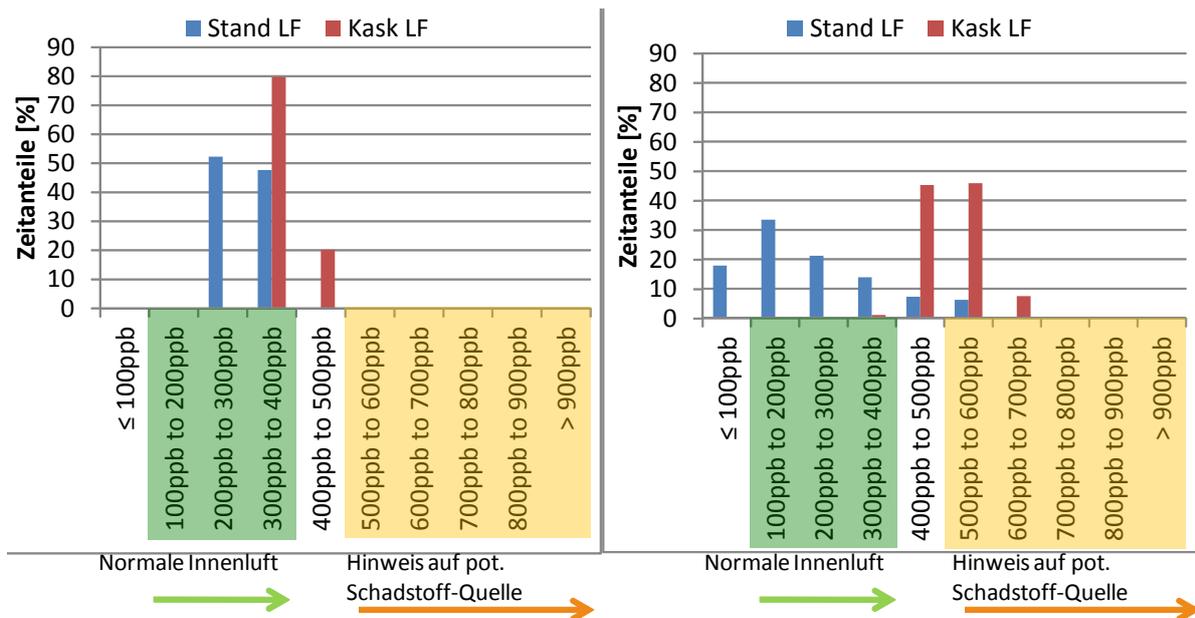


Abbildung 31: Ergebnisse der TVOC-Messung mittels Photoionisationsdetektor in Isobuten-bezogenen Einheiten mit Standardluftführung und erweiterter Kaskadenlüftung für zwei untersuchte Wohneinheiten (WE2 links und WE3 rechts). Die Bewertungshinweise des Messgeräteherstellers sind ebenfalls dargestellt. Die Ergebnisse sind nur bedingt interpretierbar, da die Außenluftwechselrate während der Messkampagne stetig sank.

Abbildung 31 zeigt die zeitliche Verteilung der gemessenen TVOC-Konzentrationen für zwei Wohneinheiten vor und nach der Umstellung auf erweiterte Kaskadenlüftung. Die Messdauer der vier Messreihen betrug jeweils ca. eine Woche. Technische Probleme bei der Lüftungsanlage (siehe Kapitel 3.2.1) führten zu sehr niedrigen, stetig sinkenden Außenluftwechselraten. Eine gewisse Erhöhung der TVOC-Werte ist bei der erweiterten Kaskadenluftführung zu erwarten. Da die erweiterte Kaskadenlüftung zeitlich nach der Standardluftführung gemessen wurde, können die Messergebnisse dieser TVOC-Messung nicht für einen direkten Vergleich herangezogen werden. Trotz sehr niedriger Zu-/Abluftvolumenströme von nur ca. 30-50m³/h pro Wohneinheit liegen die Messwerte, gemäß dem Bewertungsschema des Messgeräteherstellers, in oder knapp über dem Bereich für „normale Innenraumluft“.

3.3 Überströmöffnungen

3.3.1 Anforderungen an Überströmelemente

3.3.1.1 Numerische Berechnungsmethode

Ein einfaches Multi-Zonen-Modell wurde verwendet um die natürliche und erzwungene In- und Exfiltration und die Zuluftverteilung in die verschiedenen Räume in Abhängigkeit des Druckverlustes des Überströmelements zu bestimmen. Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf einem (zeitlich stationären) 3-Zonen-Modell, siehe Abbildung 32. Das sich ergebende Gleichungssystem wurde mit dem Newton-Verfahren einer gängigen Tabellenkalkulationssoftware gelöst:

$$\dot{V}_{IN} - \dot{V}_{OFE1} + \sum_j \dot{V}_{AP1j} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{V}_{OFE1} - \dot{V}_{OFE2} + \sum_j \dot{V}_{AP2j} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{V}_{OFE2} - \dot{V}_{OUT} + \sum_j \dot{V}_{AP3j} = 0 \quad (3)$$

Darin sind \dot{V}_{IN} bzw. \dot{V}_{OUT} der Zuluft- bzw. Abluftvolumenstrom, und \dot{V}_{APij} bzw. \dot{V}_{OFEi} der Volumenstrom durch die jeweilige Öffnung (air path) bzw. durch das jeweilige Überströmelement (overflow element). Diese können mit Hilfe eines Potenzgesetzes (Etheridge & Sandberg, 1996b) wie folgt berechnet werden:

$$\dot{V}_{OFEi} = C_{OFEi} \cdot |p_{Ri} - p_{R(i+1)}|^{n_{OFEi}} \cdot \text{Sign}(p_{Ri} - p_{R(i+1)}) \quad (4)$$

$$\dot{V}_{APij} = C_{APij} \cdot |p_0 + p_{Wij} - p_{Ri}(h_{ij})|^{n_{APij}} \cdot \text{Sign}(p_0 + p_w - p_{Ri}(h_{ij})) \quad (5)$$

Darin ist p_0 der Umgebungsdruck, p_{Wij} der Winddruck gemäß ("Airflow around buildings," 2009) an der jeweiligen Öffnung, n der Druckexponent des Überströmelement bzw. der Öffnung und $p_{Ri}(h)$ der Luftdruck in der Zone i auf Höhe h :

$$p_{Ri}(h) = p_{Ri}(0) - \rho(T_i) \cdot g \cdot h \quad (6)$$

T_i ist die Raumtemperatur der Zone i und g die Erdbeschleunigung. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass aus Gründen der Einfachheit dieses Gleichungssystem auf einer Volumenstrombilanz anstatt auf der physikalisch korrekten Massenbilanz der basiert.

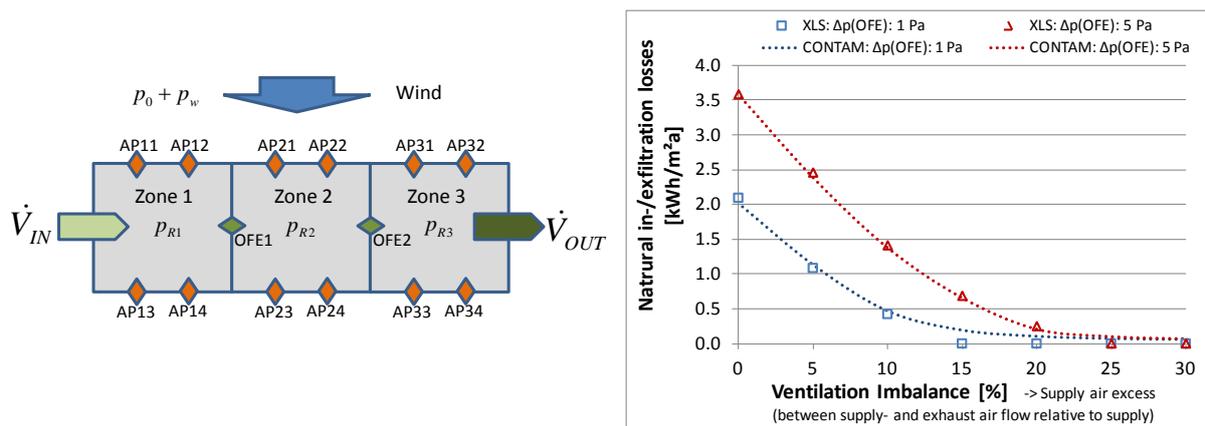


Abbildung 32: Links: Schema des verwendeten 3-Zone-Modells zur Bestimmung der Überströmanforderungen. Rechts: Vergleich zwischen In-/Exfiltrationswärmeverluste berechnet mit dem 3-Zone-Modell (stationär) und mit Hilfe von CONTAM (transient). Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

Die Gültigkeit dieses einfachen und stationären Modells wurde stichprobenartig mit transienten Simulationen mit CONTAM (Walton & Dols, 2010) überprüft. Abbildung 32 zeigt den Vergleich mit den Ergebnissen der transienten Simulation einer 80m² großen Zwei-

Schlafzimmer-Wohnung. Die dafür erforderlichen zeitaufgelösten Wetterdaten wurden mit Meteonorm 6.1 ("Meteonorm," n.d.) für den Standort Wien generiert.

3.3.1.2 Anforderungen in Bezug auf Energieeffizienz

Bei der Gebäude- und Lüftungsplanung sollte der Einfluss der Überströmöffnungen auf die Lüftungswärmeverluste berücksichtigt werden. Die Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes setzen sich aus Verlusten über die mechanischen Lüftungsanlage und Verluste aufgrund der natürlichen In-/Exfiltration durch Undichtheiten in der Gebäudehülle zusammen. Diese sind in Abhängigkeit der Zu-/Abluft-Balance in Abbildung 33 dargestellt. Die Verluste über das mechanische Lüftungssystem werden durch unvollständige Wärmerückgewinnung und durch erzwungene In- und Exfiltration aufgrund unausgeglichener Zu- und Abluftmengen verursacht. Die natürliche In-/Exfiltration wird durch die Differenz zwischen inneren und äußeren Luftdruck angetrieben. In rein natürlich belüfteten Gebäuden wird diese Druckdifferenz durch vertikale Dichteunterschiede (Kamineffekt) und durch den Einfluss des Windes erzeugt. In mechanisch belüfteten Gebäuden wird diese Druckdifferenz außerdem durch den Strömungswiderstand der Überströmöffnungen beeinflusst (siehe Schema in Abbildung 32). Es sei angemerkt, dass rein semantisch betrachtet, die In- und Exfiltrationsverluste die durch den Strömungswiderstand der Überströmelemente verursacht werden, der erzwungenen In-/Exfiltration zugerechnet werden könnten. Für Berechnung und weitere Analyse ist es jedoch vorteilhaft diese als Teil der natürlichen In- und Exfiltrationsverluste zu betrachten, so wie es auch in diesen Modell (siehe 3.3.1.1) getan wurde.

Die so berechneten Verluste aufgrund natürlicher In-/Exfiltration sind als Funktion der Lüftungsbalance für verschiedene Strömungswiderstände der Überströmelemente dargestellt (siehe Abbildung 33). Der Strömungswiderstand ist als Druckverlust bei Auslegungsvolumenstrom (pro Überströmelement) gegeben.

Um die Druckverlustanforderungen an die Überströmelemente zu bestimmen, wurden die In-/Exfiltrationsraten bei balancierten Betrieb als Funktion des Druckverlustes der Überströmelemente für verschiedene Gebäudedichtheitswerte geplottet (siehe Abbildung 34). Für einen n_{50} -Wert von $0,5h^{-1}$ erhöht sich die In-/Exfiltrationsrate von $0,02h^{-1}$ für eine Situation ohne Strömungswiderstand (z.B. offene Türen), auf ca. $0,03h^{-1}$ für ein Überströmelement mit einem Druckverlust von $\Delta p=3Pa$. Dies erhöht die gesamten Lüftungswärmeverluste (mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 80%) um 10% wird hier somit als gerade noch tolerabel bewertet. Erhöht man den Strömungswiderstand der Überströmlösung noch weiter, so steigen die In-/Exfiltrationsverluste noch steiler an. Dieser Effekt ist bei undichten Gebäuden noch stärker zu erkennen. Verwendet man z.B. ein Überströmelement mit 5Pa statt mit 2Pa Druckverlust für ein Gebäude mit einem n_{50} -Wert von $0,5h^{-1}$, würden die gesamten Lüftungswärmeverluste auf jene steigen, die ein Gebäude mit einem n_{50} -Wert von $0,8h^{-1}$ (und 2Pa Überströmelemente) bei sonst gleichen Bedingungen erzeugen würde.

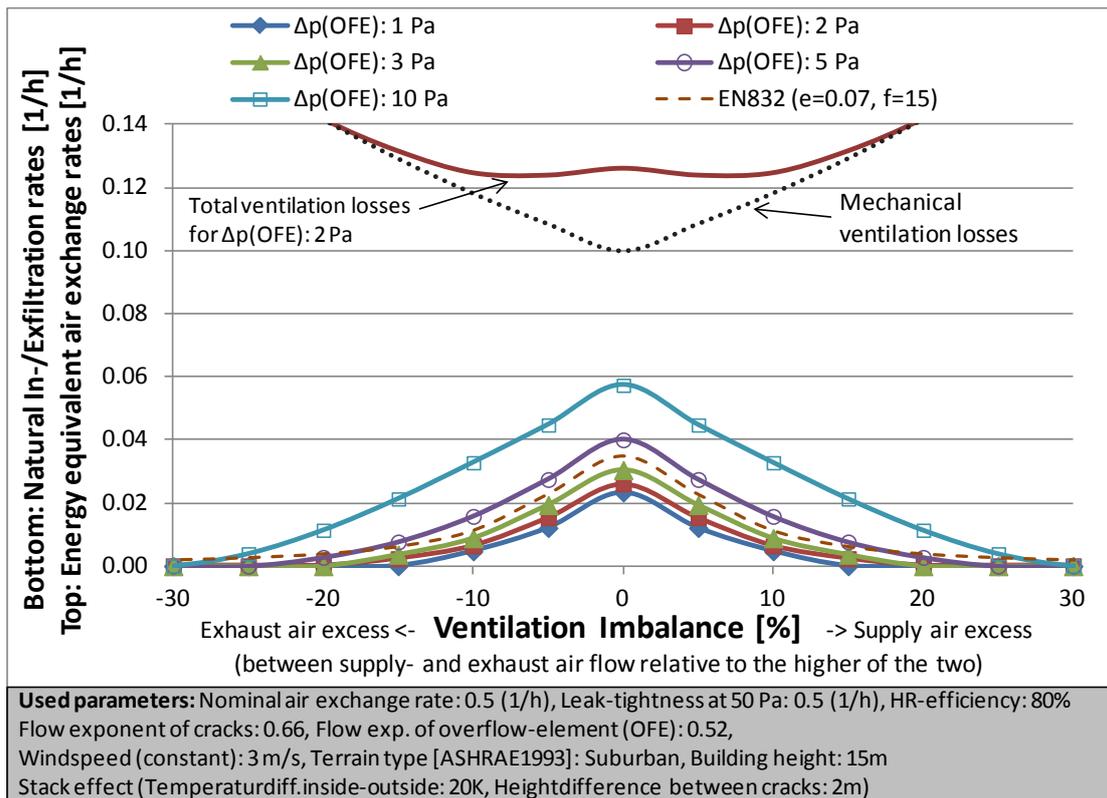


Abbildung 33: Natürliche In-/Exfiltration rates in Abhängigkeit der Disbalance (Zu-/Abluft) für verschiedene Druckverluste der Überströmelemente. Ebenfalls dargestellt sind die mechanischen und die gesamten Lüftungswärmeverluste für Überströmelemente mit einem $\Delta p=2\text{Pa}$. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

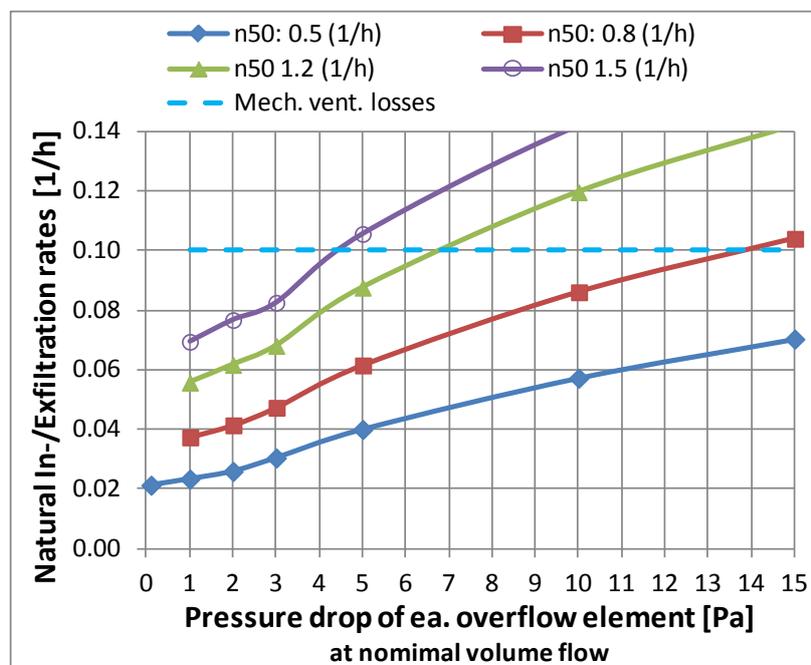


Abbildung 34: Natürliche In-/Exfiltration als Funktion des Druckverlustes der Überströmelemente für verschiedene Gebäudedichtheitswerte. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

3.3.1.3 Anforderungen in Bezug auf Raumlufthqualität

Ein weiterer zu beachtender Aspekt bei der Auslegung von Überströmelementen deren Einfluss auf die Raumlufthqualität. Die Zuluftverteilung verändert sich je nachdem ob eine Tür (oder mehrere Türen) zu diesen Zulufträumen offen oder geschlossen steht (siehe Schema in Abbildung 35). Dies gilt analog für die Ablufträume und deren Abluftverteilung.

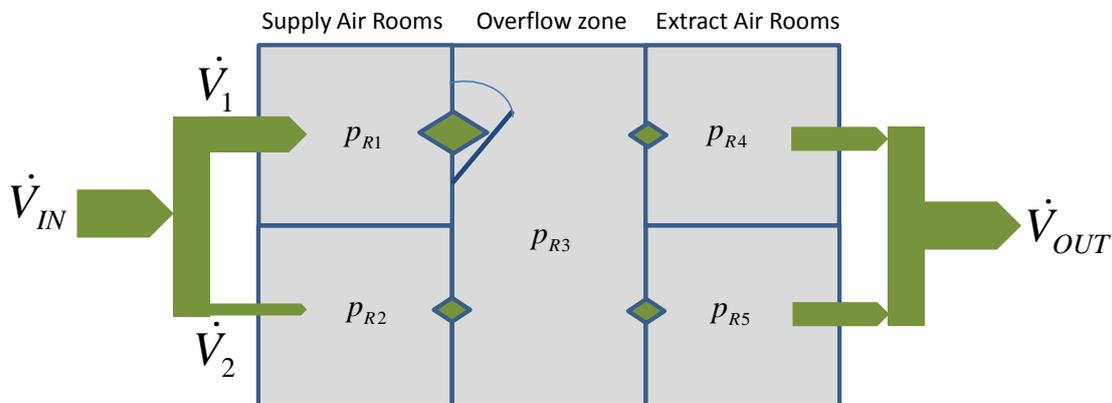


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Einflusses der Türstellung auf die Zuluftverteilung zwischen Räumen. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

Abbildung 36 zeigt wie stark sich der Zuluftvolumenstrom (relativ zum Auslegungswert) in dem Raum mit geschlossener Tür (die anderen Zulufträume mit geöffneter Tür) reduziert. Dieser Effekt ist umso stärker, je größer der Strömungswiderstand, sprich Druckverlust, des Überströmelementes ist. Da das Ergebnis auch vom Druckverlust des Zuluftventils und der Gesamtanzahl der Zulufträume abhängt, sind die Ergebnisse in Abbildung 36 für verschiedene Druckverluste des Zuluftventils (linkes Diagramm) und für verschiedene Anzahl an Zulufträume (rechtes Diagramm) dargestellt. Um den Ventilatorstromverbrauch der Lüftungsanlage möglichst gering zu halten, sollte das Luftverteilsystem (inkl. Zu- und Abluftventilen) möglichst geringen Druckverlust haben. Für Passivhäuser wird der empfohlene Zuluftventildruckverlust mit 10-15Pa angegeben. Soll die mögliche Verringerung des Zuluftvolumenstroms auf maximal 10% begrenzt werden, so muss (bei einem Zuluftventil Δp von 10Pa) der Druckverlust des Überströmelementes, je nach Anzahl der Zulufträume, zwischen 2Pa bis 4Pa gehalten werden.

Als allgemeine Empfehlung kann aus diesen Betrachtungen (Energieeffizienz und Raumlufthqualität) ein maximaler Druckverlust von 2-3Pa pro Überströmelement (bei Auslegungsvolumenstrom) abgeleitet werden.

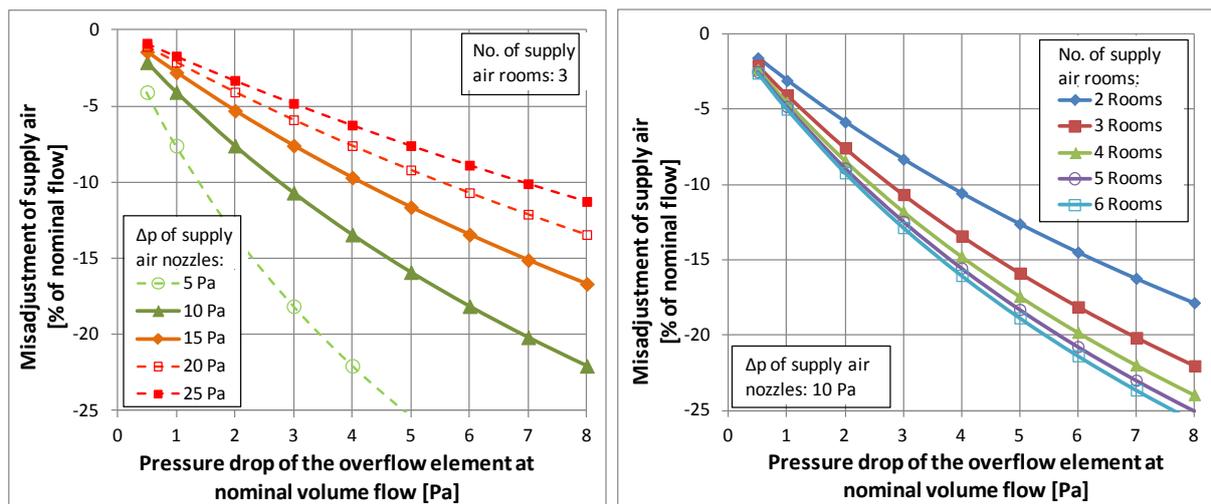


Abbildung 36: Veränderung des Zuluftvolumenstroms für verschiedene Zuluftventildruckverluste (links) und für eine verschiedene Anzahl an Zuluftträumen (rechts). Dargestellt sind immer die „Worst-case“ Szenarien, d.h. die Veränderung der Zuluftmenge im Raum mit geschlossener Tür während die Türen der anderen Zuluftträume geöffnet sind. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

3.3.1.4 Anforderungen in Bezug auf Schallschutz

Derzeit werden in Österreich keine Anforderungen an den Mindestschallschutz innerhalb von Wohneinheiten gestellt (ÖNORM B 8115-2, Schallschutz in der Raumakustik – Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz). In der ÖNORM B 8115-5 (Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 5: Klassifizierung) werden jedoch mehrere Klassen (A bis E) für differenzierte Anforderungen (Schutz niveaus) festgelegt, um die schalltechnische Qualität von Gebäuden darstellen zu können.

Die Einstufung in die Klasse C setzt die Einhaltung der Mindestanforderungen an den Schallschutz entsprechend dem Standardverfahren der ÖNORM B 8115-2 voraus. Für erhöhte Anforderungen an den Schallschutz werden die Klassen A und B definiert, welche unter anderem auch Anforderungen an den Luftschallschutz innerhalb von Wohneinheiten stellt.

In der Klasse B „Komfort“ wird eine bewertete Standard-Schallpegeldifferenz von $D_{nT,w} \geq 35$ dB als Anforderung an den Luftschallschutz zu Aufenthaltsräumen (mit Verbindung durch eine Türe) innerhalb von Nutzungseinheiten (auch im Einfamilienhaus) angeführt. Zur Einstufung in die Klasse A „hoher Komfort“ wird eine zusätzliche Anforderung an den Spektrum-Anpassungswert $C_{50-3150}$ gestellt.

Im gegenständlichen Projekt werden als Empfehlung für erhöhte Anforderungen an den Schallschutz innerhalb von Wohneinheiten für Aufenthaltsräume mit Verbindung durch eine Türe die Anforderungen an die Klasse B „Komfort“ laut ÖNORM B 8115-5 mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von $D_{nT,w} \geq 35$ dB übernommen. Für „normale“ Anforderungen an den Schallschutz werden um 5 dB verminderte Werte angesetzt.

Auch bei Einhaltung dieser Werte ist ein Gespräch mit normaler Unterhaltungssprache im Nachbarraum in Abhängigkeit vom vorhandenen Grundgeräusch teilweise bis gut zu verstehen (Quelle: Entwurf SIA 181).

Naturgemäß stehen die Anforderungen an den Schallschutz den Anforderungen an einen niedrigen Strömungswiderstand der Überströmelemente entgegen. Dennoch bestehen Möglichkeiten einen gewissen Luftschallschutz zwischen Räumen auch beim Einsatz von einfachen Überström-Lösungen mit einem akzeptablen Druckabfall zu gewährleisten.

Um den Schallschutz von Überströmelementen zu verbessern, kann die Geometrie und Positionierung des Lufteinlasses und -auslasses, sowie die Ausführung des Strömungskanales durch Anpassung der Geometrie (z.B. Länge des Kanals, Richtungsänderungen) und durch Erhöhung der Absorption im Kanal, optimiert werden.

3.3.1.5 Weitere Anforderungen

Weitere Anforderungen an die Überströmelemente könnten aus Aspekten wie Design, Lichtdurchfall, Reinigbarkeit, Kurzschlussrisiko und Zugluftrisiko (Draft Risk) erhoben werden. Eine Limitierung des Druckverlustes und somit der Strömungsgeschwindigkeit, reduziert das Zugluftrisiko auf Situationen wo das Überströmelement sehr nahe zu einem regulären Personenaufenthaltsbereich platziert wird, z.B. Türschlitz sehr nahe an der typischen Stehposition im Badezimmer. Auf eine Quantifizierung der weiteren möglichen Anforderungen konnte im Zuge dieses Projekts nicht eingegangen werden.

3.3.2 Vermessung von einfachen tür- und zargenintegrierten Überströmlösungen

Um Lüftungsplanern und Architekten die erforderlichen schall- und strömungstechnischen Daten zu liefern, wurden folgende Messungen durchgeführt. Die getesteten Überströmelemente entsprangen einer Literatur und Marktstudie, mit Fokus auf einfache tür- und zargenintegrierte (und bauseits realisierbare) Lösungen für welche bislang nicht ausreichend gemessene Auslegungsdaten bekannt waren.

3.3.2.1 Messaufbau zur Bestimmung des Strömungswiderstandes und des Schalldämm-Maßes

Ausgewählte Überströmelemente wurden in den Schallprüfstand der Universität Innsbruck installiert und die Luftschalldämmung sowie der Druckabfall der Elemente geprüft. Zu diesem Zweck wurden die zwei horizontal aneinander grenzenden Prüfräume (mit unterdrückter Flankenübertragung) durch eine zweiseitige Wandkonstruktion getrennt (siehe Abbildung 37). In der Trennwand befindet sich eine Öffnungsfläche ($H \times B = 205 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$), in welche die Prüfkörper eingebaut wurden. Falls erforderlich wurde die restliche Fläche der Prüföffnung mit einer hochschalldämmenden mehrschaligen Leichtbaukonstruktion verschlossen.

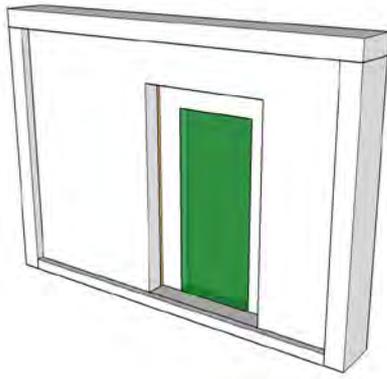


Abbildung 37: Links: Darstellung der zweischaligen Stahlbetonwand für den Einbau von Zimmertüren. Rechts: Foto beim Einheben einer Stahlbetonwand mit Prüfoffnung

Je nach Bauweise der Prüfelemente wurde das Schalldämm-Maß R bzw. die Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,e}$ des Bauteils messtechnisch ermittelt.

Das Schalldämm-Maß R entspricht dem zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses der auf das Prüfbauteil auftreffenden Schalleistung W_1 , zu der durch das Prüfbauteil auf die andere Seite abgestrahlten Schalleistung, W_2 .

Die Normschallpegeldifferenz $D_{n,e}$ ist jene Pegeldifferenz, die einem Bezugswert der Absorptionsfläche im Empfangsraum mit Schallübertragung durch ein kleines Bauteil entspricht.

Ein kleines technisches Bauteil ist ein Bauteil, mit Ausnahme von Fenstern und Türen, mit einer Fläche von weniger als 1 m^2 , das Schall zwischen zwei benachbarten Räumen oder zwischen einem Raum und dem Freifeld, unabhängig von angrenzenden Bauteilen überträgt.

Um den Strömungswiderstand zu bestimmen, wurde eine Seite der Doppelwandkonstruktion mit einer Platte luftdicht verschlossen (siehe Abbildung 38). Mit Hilfe eines „Mini-Blower-Door“ Testgerätes, des Typs J225, der Firma SI-special Instruments GMBH konnte der so entstandene Luftraum ($230 \text{ cm} \times 140 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$) mit Druck beaufschlagt werden, um die gewünschte Druckdifferenz über das Überströmelement zu erzeugen. Der dafür erforderliche Volumenstrom wurde mit dem im Mini-Blower-Door Testgerät integrierten Laminar-Flow-Meter gemessen. Falls erforderlich, konnte der Volumenstrom mit einem zusätzlich (parallel angeschlossenen) Ventilator auf bis zu $100 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht werden. Dieser zusätzliche Luftstrom wurde über den Druckverlust über ein zuvor kalibriertes Rohrstück bestimmt.

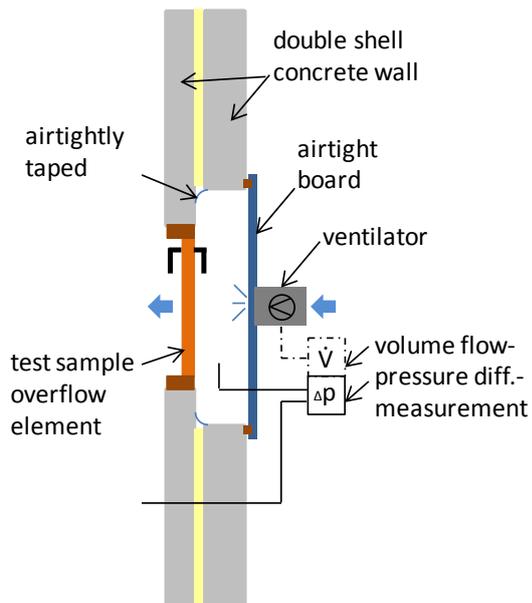


Abbildung 38: Messaufbau zur Bestimmung des Strömungswiderstandes. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).

3.3.2.2 Getestete Überströmelemente

- Türspalt (1):

Diese sehr einfache ist die zurzeit wohl am häufigsten verwendete Lösung. Oft wird der Spalt willkürlich dimensioniert, was einen zu hohen Druckverlust oder eine unnötige Verschlechterung des Schallschutzes zur Folge haben kann.



Abbildung 39: Gemessener Türspalt ohne (links) und mit (rechts) Teppich.

Spalthöhen von 5 bis 20mm wurden vermessen um daraus die Koeffizienten für folgende Formel als Auslegungshilfe zu bestimmen. Damit kann der Volumenstrom in $[m^3/h]$ als Funktion des gewünschten Druckverlustes $\Delta p [Pa]$ berechnet werden.

$$\dot{V} = C * (\Delta p)^n \quad (1)$$

Die Parameter $C [m^3/h/Pa^n]$ und n können in Abhängigkeit der Spalthöhe $h [mm]$ und der Spalllänge $l [m]$ (=Türbreite) mit folgenden Formeln bestimmt werden.

$$C = (k * h + d) * l \quad (2)$$

$$n = \frac{A}{h - B} + 0.5 \quad (3)$$

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Rauigkeit der Oberfläche einen merkbaren Einfluss hat (Vergleiche Ergebnisse mit und ohne Teppich). Die

Abhängigkeit von der Spalttiefe (=Türblattdicke) darf hingegen vernachlässigt werden.

Holzzarge (2):

Diese ebenfalls beliebte Idee wurde bereits 1999 (ohne Messdaten) publiziert (Werner & Laidig, 1999). Dafür wird bewusst ein Spalt zwischen Türsturz und Holzzarge gelassen (kein Ausschäumen) und die oberen Zargenblenden innen abgefräst, sodass die Luft zwischen Wand und Zargenblende ein- und ausströmen kann. (Alternativ oder zusätzlich könnte diese Lösung auch seitlich realisiert werden.)

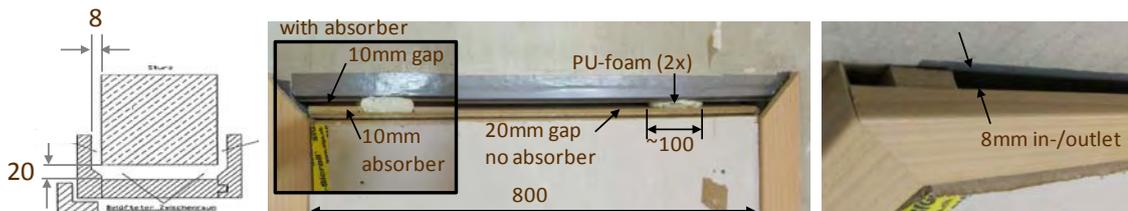


Abbildung 40: Holz-zargen-Überströmlösung. Links: Schematische Skizze aus (Werner & Laidig, 1999). Rechts: Fotos der vermessenen Einbausituation.

Der Volumenstrom $[m^3/h]$ über diese Überströmlösung kann für einen vorgegebenen Druckverlust folgendermaßen bestimmt werden:

$$\dot{V} = C^* \cdot l \cdot (\Delta p)^n \quad (4)$$

wobei l $[m]$ die Spaltlänge (=Türbreite) entspricht. Es sei angemerkt, dass die Parameter für stark abweichende Zargenausführungen von den gemessenen abweichen könnten.

- **Stahlzarge mit Schattenfuge (3):**

Diese Überströmlösung wurde im Rahmen dieses Projekts an der Universität Innsbruck entwickelt, und zielt darauf ab, ein unauffälliges und einfaches Design mit einem angemessenen Schalldämm-Maß zu kombinieren.

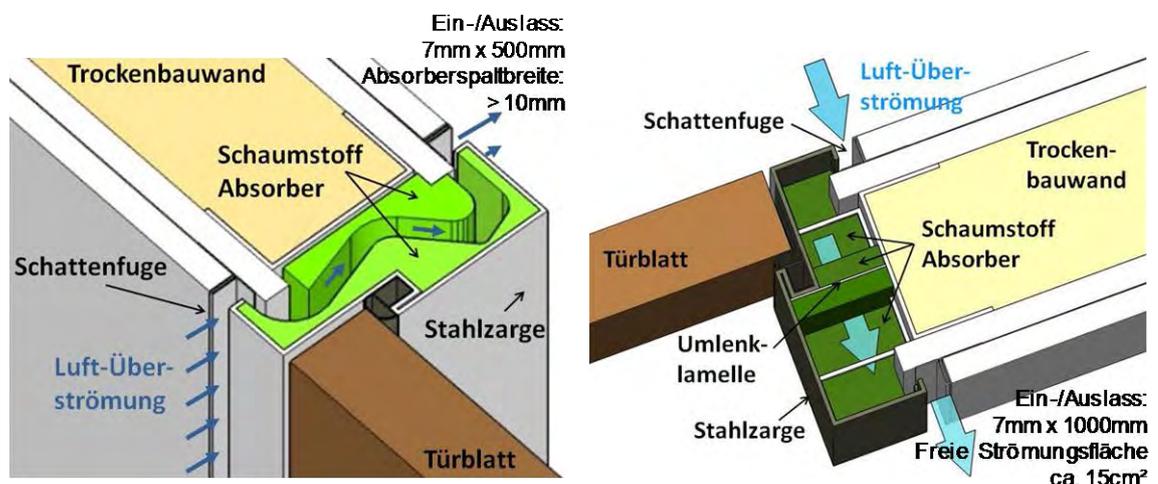


Abbildung 41: Zwei verschiedene Versionen der Stahlzargen-Überströmlösung. Die Luften- und auslässe sind nicht sichtbar in der Schattenfuge integriert.

Der Volumenstrom $[m^3/h]$ kann für diese Ausführungen ebenfalls mit Formel (4) bestimmt werden wobei $l [m]$ die Spalllänge ist.

- **Spezial-Lüftungszarge (4):**

Eine Überströmlösung entwickelt und produziert von Keller Zargen AG (Schweiz). Keine Messdaten waren bisher erhältlich. Der in der Zarge inkludierte Zuluftauslass wurde während der Messungen verschlossen. Für eine vorgegebene Druckdifferenz kann der Volumenstrom über Formel (1) bestimmt werden.

- **Ausgefräster Querfalz (5):**

Bei dieser Lösung wird der obere Querfalz dünner ausgeführt, sodass ein Spalt zwischen Türfalz und Türdichtung verbleibt. Eine "erweiterte" Version, mit anstatt nur oben, rundum (außer kurze Abschnitte für Türauflage) ausgefrästem Türfalz, wurde ebenfalls vermessen.



Abbildung 42: Foto des oben um 5mm abgefrästen Türfalzes. Über den verbleibenden Spalt zwischen Falz und Türdichtung kann die Luft überströmen.

Bei gegebenem Druckverlust kann der Volumenstrom $[m^3/h]$ mit Formel (1) berechnet werden.

- **Gelochtes Türblatt (6):**

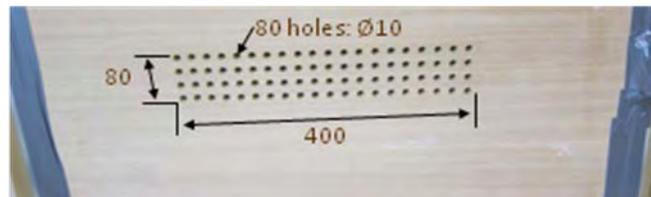


Abbildung 43: Foto der vermessenen Tür mit insgesamt 80 Überström-Löchern à 10mm Durchmesser im unteren Türbereich.

Diese einfache Lösung besteht aus vier Reihen mit je 20 Löchern mit 10mm Durchmesser. Der sich ergebende Volumenstrom $[m^3/h]$ kann mit Gleichung (4) bestimmt werden, wobei für l die Anzahl der Lochreihen (mit je 20 Löchern) eingesetzt werden muss.

- **Z-Blende (7):**



Abbildung 44: Foto der vermessenen Z-Blende.

Dieses Überströmelement ist eine Alternative zu den herkömmlichen Überströmgittern. Es besteht aus zwei Aluminiumblenden, durch die die Luft in einer z-förmigen Stromführung, bei geringem Lichtdurchfall, geführt wird. Ein 1 cm dicker Schaumstoffabsorber wurde im „versteckten“ Teil des Strömungspfad integriert. Der sich ergebende Volumenstrom $[m^3/h]$ kann mit Gleichung (1) bestimmt werden.

3.3.2.3 Messergebnisse

Um eine Vergleichbarkeit der schalltechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Überströmlösungen herzustellen und eine Gegenüberstellung mit den schalltechnischen Anforderungen zu ermöglichen, wird eine typische Einbausituation in einem Wohnraum betrachtet.

Es wird ein Aufenthaltsraum mit einem Volumen von $31,25 \text{ m}^3$ und einem Trennbauteil mit einer Fläche von $10,00 \text{ m}^2$ festgelegt. Aufgrund der Annahme, dass die maßgebliche Übertragung über die Trennwand mit Verbindungstüre (Zimmertüre) mit einer Fläche von $1,74 \text{ m}^2$ und ein mögliches Überströmelement erfolgt, kann die Nebenwegübertragung über flankierende Bauteile vernachlässigt werden. Das Schalldämm-Maß der Trennwand wird mit $R_w = 41 \text{ dB}$ definiert. Dies entspricht dem Schalldämm-Maß einer einfach beplankten Gipskarton-Metallständerwand mit einer Wandstärke von 75 mm .

Durch die vereinfachte Annahme, dass die Schallübertragung über flankierende Bauteile vernachlässigt werden kann, ist der Luftschallschutz zu dem Aufenthaltsraum ausschließlich vom Übertragungsweg durch den zusammengesetzten Trennbauteils abhängig.

Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz für die Direktübertragung durch den Trennbauteil kann wie folgt bestimmt werden:

$$D_{nT,w} = D_{nT,Dd,w} = R_{s,w} - 10 \lg S_S + 10 \lg V - 5 \text{ in dB}$$

wobei $R_{s,w}$ das bewertete Schalldämm-Maß des Trennbauteils in dB, V der Rauminhalt des Empfangsraumes in m^3 und S_S die Fläche des Trennbauteiles in m^2 sind.

Die oben angeführten Abmessungen des beispielhaften Aufenthaltsraumes sind so gewählt, dass die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und das resultierende Schalldämm-Maß $R'_{w,R}$ den selben Zahlenwert ergeben. Dadurch ist eine einfache Vergleichbarkeit der Zahlenwerte mit den Anforderungen anderer Normenwerke gegeben.

Das Schalldämm-Maß des zusammengesetzten Trennbauteiles hängt in diesem Fall von den Abmessungen und dem Schalldämm-Maß der einzelnen Teilflächen sowie der Normschallpegeldifferenz und der Anzahl von kleinen Bauteilen (Überströmelemente) ab:

$$R = -10 \lg \tau_{Dd}$$

$$\tau_{Dd} = \frac{S_W}{S_S} 10^{-R_{v,W}/10} + \frac{S_T}{S_S} 10^{-R_{v,T}/10} + n \frac{A_0}{S_S} 10^{-D_{n,s,w}/10}$$

wobei S_W die Wandfläche in m^2 , $R_{w,W}$ das bewertete Schalldämm-Maß der Wand in dB, S_T die Türfläche in m^2 , $R_{w,T}$ das bewertete Schalldämm-Maß der Türe in dB, A_0 die Bezugsabsorptionsfläche ($10m^2$), n die Anzahl der kleinen Bauteile und $D_{n,e,w}$ die bewertete Normschallpegeldifferenz eines kleinen Bauteils ist.

Die Ergebnisse der Messungen des Druckverlustes und des Luftschallschutzes werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Überströmelemente / Überströmlösungen	A	B	k	d	C/C'	N	$D_{n,e,w}$ [dB]
1a	Türe mit Bodenspalt	0.12	1.17	3.21	-0.08	-	-	-
1b	Türe mit Bodenspalt über Teppich	0.12	1.17	2.51	-2.17	-	-	-
2a	Holzzarge	-	-	-	-	20.2	0.58	36
2b	Holzzarge mit Schaumstoffabsorber	-	-	-	-	18.2	0.57	40
3a	Stahlzarge V1	-	-	-	-	7.0	0.59	37
3b	Stahlzarge V2	-	-	-	-	8.1	0.49	44
4	Spezial-Lüftungszarge	-	-	-	-	11.6	0.50	45
5a	Oberer Türfalz (Türe B)	-	-	-	-	4.5	0.57	34
5b	Umlaufender Türfalz (Türe B)	-	-	-	-	21.8	0.52	30
6	Gelochtes Türblatt (Türe A)	-	-	-	-	18.7	0.54	32
7	Z-Blende (Türe A)	-	-	-	-	19.8	0.52	30

Tabelle 1: Parameter der Druckverlustmessung (A, B, k, d, C, C' und n) und der Luftschallschutzmessungen ($D_{n,e,w}$).

Um eine Vergleichbarkeit der schalltechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Überströmlösungen herzustellen und eine Gegenüberstellung mit den schalltechnischen Anforderungen zu ermöglichen, wird die oben beschriebene Einbausituation in einem Aufenthaltsraum betrachtet.

	Bodenspalt für Überströmung	R'_w Türe im eingebauten Zustand [dB]	$D_{nT,w}$ [dB]*	Vol. strom [m^3/h] bei $\Delta p=2Pa$
1a	Türe mit 5mm Bodenspalt	23	30	18.4
1b	Türe mit 10mm Bodenspalt	20	27	36.4
1c	Türe mit 15mm Bodenspalt	18	25	54.4
1d	Türe mit 20mm Bodenspalt	15	23	72.4
1e	Türe mit 10mm Bodenspalt (mit Teppichbelag)	(23)	(30)	26.1

Table 2: Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz und Volumenstrom bei vorgegebenem Druckverlust für eine Türe mit Bodenspalt (Fuge). Schalldämm-Maß der Türe im eingebauten Zustand mit umlaufender Dichtung $R'_w = 30dB$. * Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz für beschriebene Einbausituation.

Türe mit 5 mm Bodenspalt (Fuge) und tür- oder türzargenintegrierte Überströmlösungen		R' _w Türe im eingebauten Zustand [dB]	D _{nT,w} [dB]*	Vol. strom [m ³ /h] bei Δp=2Pa
2a	Holzzarge	23	29	41.5
2b	Holzzarge mit Schaumstoffabsorber	23	30	40.9
3a	Stahlzarge V1	23	29	39.7
3b	Stahlzarge V2	23	30	41.3
4	Spezial-Lüftungszarge	23	30	34.9
5a	Oberer Türfalz (Türe B)	23	(28)	19.0
5b	Umlaufender Türfalz (Türe B)	23	27	41.7
6	Gelochtes Türblatt (Türe A)	23	28	45.7
7	Z-Blende (Türe A)	23	27	47.0

Table 3: Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz und und Volumenstrom bei vorgegebenem Druckverlust für unterschiedliche tür- oder türzargenintegrierte Überströmlösungen in Kombination mit einem 5mm Breiten Bodenspalt (Fuge).
* Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz für beschriebene Einbausituation.

Türe mit umlaufender Dichtung und tür- oder türzargenintegrierte Überströmlösungen		R' _w Türe im eingebauten Zustand [dB]	D _{nT,w} [dB]*	Vol. strom [m ³ /h] bei Δp=2Pa
2a	Holzzarge	30	33	23.1
2b	Holzzarge mit Schaumstoffabsorber	30	35	22.4
3a	Stahlzarge V1	30	34	21.2
3b	Stahlzarge V2	30	36	22.8
4	Spezial-Lüftungszarge	30	36	16.4
5a	Oberer Türfalz (Türe B)	31	32	6.7
5b	Umlaufender Türfalz (Türe B)	31	29	31.2
6	Gelochtes Türblatt (Türe A)	30	30	27.2
7	Z-Blende (Türe A)	30	29	28.5

Table 4: Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz und Volumenstrom bei vorgegebenem Druckverlust für unterschiedliche tür- oder türzargenintegrierte Überströmlösungen in Kombination mit einer Türe mit umlaufender Dichtung.
* Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz für beschriebene Einbausituation.

3.3.2.4 Fazit Überström-Auslegung

Eine passende Auslegung der Überströmöffnungen ist wichtig, um Folgendes zu vermeiden:

- überhöhte In- und Exfiltration durch die Gebäudehülle und damit erhöhte Lüftungswärmeverluste.
- eine unkontrollierte Veränderung der Zuluftverteilung bei geöffneten Innentüren und damit verbundene Verschlechterung der Raumluftqualität.
- unnötige Minderung des Schalldämm-Maßes zwischen Räumen und somit eine Verschlechterung des Schallschutzes.

Die Überströmelemente für energieeffiziente Gebäude mit mechanischer Wohnraumlüftung sollten so ausgelegt werden, dass der resultierende Druckabfall <2-3 Pa bei geplanten Betriebsvolumenstrom beträgt.

Für die oben beschriebene typische Einbausituation ergibt sich somit folgendes:

- Volumenströme zwischen 30-40 m³/h können mit einer einfachen und kostengünstigen türintegrierten Lösung ohne besondere Anforderungen an den Schallschutz ($D_{nT,w} \geq 30$ dB) erreicht werden.
- Bei einer Türe mit einem Bodenspalt von 5 mm können diese Anforderungen mit einer modifizierten Türzarge (Nr. 2b oder 3b) erfüllt werden.
- Ein Türspalt von 10 mm erlaubt einen Volumenstrom von 35 m³/h, jedoch wird der Luftschallschutz ($D_{nT,w}$) zwischen den Räumen auf 27 dB reduziert.
- Bei höheren Anforderungen an den Luftschallschutz (≥ 35 dB) ist auf jeden Fall eine umlaufende Dichtungsebene der Türe (Höckerschwellendichtung, hochwertige Absenkendichtung, etc.) in Kombination mit einem geeigneten Überstromelement erforderlich. In Abhängigkeit vom angestrebten Volumenstrom und dem angestrebten Luftschallschutz kann ein wand- oder deckenintegriertes Überstromelement erforderlich werden.
- Je nach erwünschtem Luftschallschutz ist zusätzlich das Schalldämm-Maß des Türblattes und der Trennwand, die Ausführung der Zarge, die Art der Zargendichtung und die Ausführung von Bändern (justierbar) zu beachten.

3.4 Grundrisstopologie

3.4.1 Luftqualität im Wohnzimmer nach Grundrissgestaltung bei erweiterter Kaskadenlüftung

3.4.1.1 Modell

Das Simulationsmodell wurde mit der multi-zonal Simulation-Software CONTAM 3.0 (NIST) aufgestellt. Dabei wurde jeder Raum eines Grundrisses mit einer Zone modelliert, wobei die Luft als perfekt durchgemischt angenommen wurde. Zwei Räume oder Zonen sind durch eine Überströmöffnung verbunden. In diesem Fall war die Überströmöffnung eine Tür, in offenem oder geschlossenem Zustand (Überströmung durch Türspalt bei geschlossenem Zustand).

Zum Beispiel wurden die zwei Räume mit 2 Zonen modelliert, wie in Abbildung 45 dargestellt, wenn der Vorraum vom Wohnzimmer mit einer Tür verbunden ist. Wenn es keine Trennung zwischen Vorraum und Wohnzimmer gibt, dann wurden die 2 Räume als eine Zone modelliert.

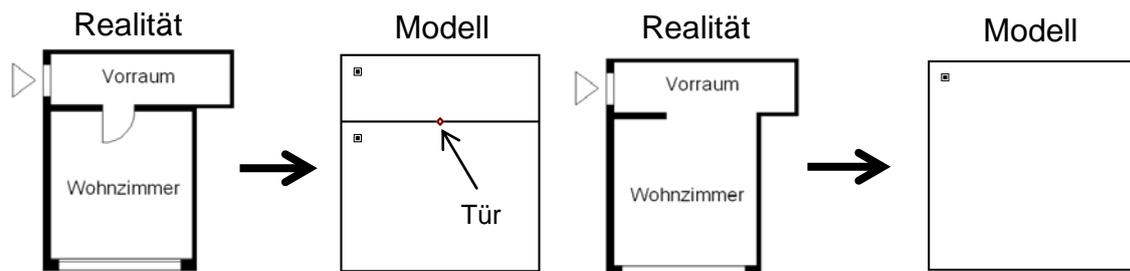


Abbildung 45: Beispiel für die Darstellung und die Modellierung eines "geschlossenen" Grundrisses (links) und eines "offenen" Grundrisses (recht).

Die Belüftungsart der Räume im Grundriss sowie die Positionierung der verschiedenen Überströmöffnungen (also zum Beispiel die Türen zwischen zwei angrenzenden Räumen) bestimmen dadurch den Luftströmungsweg in einer Wohnung. Die durchgeführte umfangreiche Recherchearbeit über moderne und renovierte Wohnungsgrundrisse zeigt, dass die meisten 2- bis 4 Zimmer Wohnungen über Räume bzw. Funktionalitäten, wie in Tabelle 8 dargestellt, verfügen. Nach dem Prinzip der gerichteten Durchströmung sind diese Räume auch wie folgt zu belüften.

Raum bzw. Funktionalität	Belüftung nach Prinzip der gerichteten Durchströmung
Schlaf- bzw. Kinderzimmer	Zuluft
Büroraum	
Wohnzimmer - Esszimmer	Zuluft (oder Überströmung)
Verkehrsfläche	Überströmung
Küche - Essbereich	Abluft
Badezimmer	Abluft
WC	Abluft
Abstellraum oder Sonstiges	Abluft

Tabelle 8: Art der Belüftung nach Funktionalität in der Wohnung. Prinzip der gerichteten Luftströmung.

Der Strömungsweg von den Zuluftauslässen bis in den Abluftauslässen kann mit diesem Modell in 4 Etappen bestimmt werden:

- Offener oder geschlossener Grundriss. Vorraum (bzw. Verkehrsfläche, wie zum Beispiel ein Treppenhaus).
- Integration der Küche in der Wohnung. Integrierte „Kochecke“ im Wohnzimmer oder getrennte Küche.
- Positionierung der Überströmöffnungen (Türen) im Grundriss zwischen den Zuluftträumen (Schlaf- und Kinderzimmer) und dem Wohnzimmer oder der Verkehrsfläche. Welcher Anteil an „Frischluff“ aus den Zuluftträumen strömt direkt in das Wohnzimmer?
- Positionierung der Überströmöffnungen (Türen) im Grundriss zwischen den Abluftträumen (WC, Bad, Küche, Abstellraum...) und dem Wohnzimmer oder der Verkehrsfläche.

(erweiterte Kaskadenlüftung) variiert. Die Abluftvolumenströme wurden mit dem Gesamtvolumenstrom in der Wohnung proportional reduziert. Dies wurde ebenfalls mit einem Matlab Programm gesteuert. Die Simulationen wurden automatisch mit Hilfe eines Matlab Programms gestartet. Die resultierenden CO₂-Konzentrationen und Werte der relativen Feuchte sowie die Anwesenheit im Wohnzimmer wurden mit Hilfe eines Matlab Programms in Matrizen gespeichert.

Die Kriterien für die Bewertung der Luftqualität sind die CO₂ Konzentration und die relative Feuchte im Wohnzimmer. Es wurde dieselbe Bewertungsmethode wie in AP2 verwendet. Die Simulationsergebnisse wurden für die 63 Grundrissgestaltungen in Diagrammen ausgewertet. Nachfolgende Abbildung zeigt für die daneben dargestellte Grundrissform ein Ergebnisdiagramm, wie es im Web-Tool dargestellt wird.

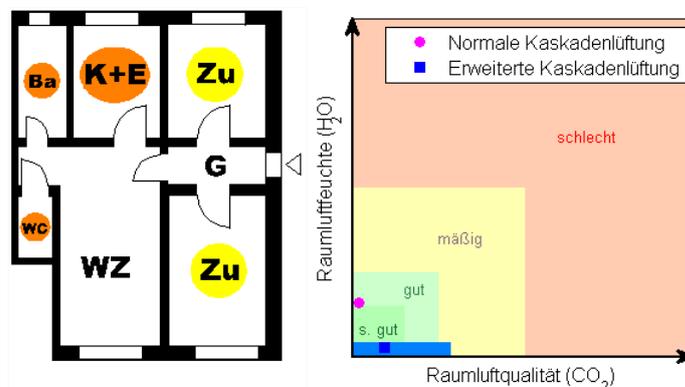


Abbildung 47: Beispiel Grundriss und entsprechendes Ergebnisdiagramm mit der Bewertung der Luftqualität und der Raumlufftfeuchte. Die Markierungen zeigen die Simulationsergebnisse bei normaler und erweiterter Kaskadenlüftung. Der blaue Balken beschreibt die Schwankungsbreite, die durch die Änderung von verschiedenen Nutzerparametern hervorgerufen wird.

Auf der x-Achse ist die relative Überschreitung der CO₂ Konzentration aufgetragen und auf der y-Achse ist die relative Unterschreitung der relativen Feuchte dargestellt. Die Bewertung der gesamten Luftqualität im Wohnzimmer erfolgt durch die dargestellten farblichen Bereiche:

- Der dunkelgrüne Bereich bezeichnet eine „sehr gute“ Luftqualität. Die Zielwerte für CO₂ und relative Feuchte werden weniger als 10 % der Zeit bei Anwesenheit über- bzw. unterschritten.
- Der hell grüne Bereich bezeichnet eine „gute“ Luftqualität. Die Zielwerte für CO₂ und relative Feuchte werden weniger als 25 % der Zeit bei Anwesenheit über- bzw. unterschritten.
- Der gelbe Bereich bezeichnet eine „mäßige“ Luftqualität. Die Zielwerte für CO₂ und relative Feuchte werden weniger als 50 % der Zeit bei Anwesenheit über- bzw. unterschritten.
- Der rote Bereich bezeichnet eine „schlechte“ Luftqualität. Die Zielwerte für CO₂ und relative Feuchte werden mehr als 50 % der Zeit bei Anwesenheit über- bzw. unterschritten.

Der Punkt in Magenta stellt die Ergebnisse der gegebenen Grundrissgestaltung für eine normale Kaskadenlüftung dar (mit 30 m³/h Zuluft im Wohnzimmer). Der blaue Punkt stellt die

Ergebnisse für dieselbe Grundrissgestaltung bei erweiterter Kaskadenlüftung (keine Zuluft im Wohnzimmer) dar.

3.4.1.3 Parametervariation

Um eine praxiserorientierte Information über den möglichen Einsatz einer erweiterten Kaskadenlüftung für Architekten und Planer geben zu können, sollen die Ergebnisse möglichst unabhängig vom Nutzerverhalten sein. Deshalb wurden zusätzlich zwei Reihen von Simulationen durchgeführt. Die 63 Grundrissgestaltungen wurden mit einem hohen und einem niedrigen Belegungsprofil und auch mit zwei weiteren Vorgaben für das Öffnungsverhalten der Tür zwischen Wohnzimmer und Vorraum simuliert. Der Einfluss dieser Parameter auf die Ergebnisse wurde ebenfalls im Ergebnisdiagramm dargestellt. Der blaue Balken zeigt die Auswirkung der Variation dieser zwei Parameter auf die relative Überschreitungshäufigkeit der CO₂-Grenze bzw. auf die relative Unterschreitungshäufigkeit der relativen Feuchte.

Je nach Grundrissgestaltung hat die Variation dieser zwei Parameter mehr oder weniger Einfluss auf die Ergebnisse. Zum Beispiel ist bei den Grundrissen mit 2 Schlafräumen in direkter Verbindung mit dem Wohnzimmer (typisch für Altbauwohnungen) die Luftqualität bei erweiterter Kaskadenlüftung immer gut zu bezeichnen, sogar besser als bei normaler Kaskadenlüftung, unabhängig von der Variation der zwei untersuchten Nutzerparametern. Bei anderen Grundrissgestaltungen, wie zum Beispiel bei einem Schlafräumchen, das mit dem Wohnzimmer verbunden ist, ist die Luftqualität bei erweiterter Kaskadenlüftung unter den Referenz-Randbedingungen zwar gut, verschlechtert sich aber, sobald man einen der zwei untersuchten Parameter variiert. Für diese Grundrissgestaltungen stellt die erweiterte Kaskadenlüftung keine stabile Lösung dar. Für die Grundrisse, bei denen das Wohnzimmer komplett isoliert ist, führt die erweiterte Kaskadenlüftung zu einer schlechten Luftqualität. Wenn nur die Küche im Wohnzimmer integriert ist und mit 30 m³/h ausgelegt wird (oder im Falle einer geschlossenen Küche, die mit dem Wohnzimmer verbunden ist), ist die Luftqualität im Wohnzimmer bei erweiterter Kaskadenlüftung ebenfalls schlecht. Detaillierte Ergebnisse für alle Grundrissformen befinden sich im Anhang bzw. auf der Webseite.

3.4.2 Einfluss der erweiterten Kaskadenlüftung auf die Investitionskosten

3.4.2.1 Investitionskosten und Flexibilität

Die Einsparung an Investitionskosten bei erweiterter Kaskadenlüftung ist von der Art der Rohrleitung und von der Grundrissform abhängig. Da die Länge der Rohrleitungen vom Grundriss abhängen, wurde versucht, die Grundrisse zu klassifizieren, um eine pauschale Antwort für das Einsparungspotential an Investitionskosten bei Kaskadenlüftung geben zu können. Es wurden also zwei Arten von Grundrissen unterschieden: die „flexiblen Grundrisse“ und alle anderen Grundrisse.

Ein Grundriss wird als „flexibel“ bezeichnet, wenn das Wohnzimmer so gestaltet ist, dass es abtrennbar für eine spätere Nutzung als weiteres Schlaf-, Kinder- oder Bürozimmer ist. Dabei

sind nach der Trennung trotzdem alle Räume von der Verkehrsfläche zugänglich. Abbildung 48 zeigt Beispiele von solchen „flexiblen“ Grundrissen.

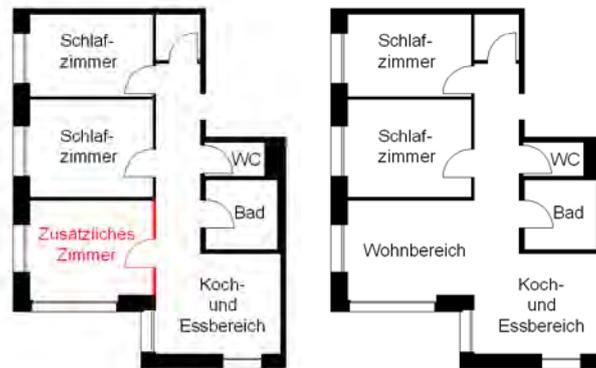


Abbildung 48: Beispiel-Grundriss bei dem eine Abtrennung des Wohnzimmers für eine Nutzung als weiteres Schlafzimmer möglich ist.

Abbildung 49 zeigt ein Beispiel wo diese Trennung nicht möglich ist.

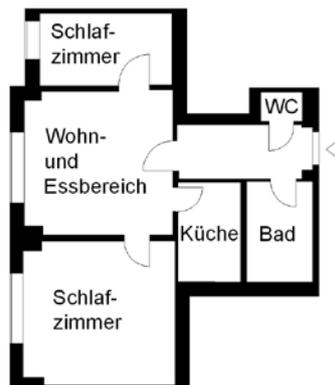


Abbildung 49: Beispiel-Grundriss bei dem das Wohnzimmer nicht abtrennbar für eine Nutzung als weiteres Schlafzimmer ist.

Die folgende Tabelle 9 fasst die zwei üblichen Leitungsstrategien und die zwei Arten von Grundrissempfehlungen und Einsparungspotentiale zusammen.

Art der Leitung	„flexible“ Grundrisse	Andere Grundrisse
<p align="center">Flexible Kunststoffrohre in der Decke einbetoniert.</p>	<p>In diesem Fall soll trotz einer erweiterten Kaskadenlüftung eine Zuluftleitung in der Decke im Wohnzimmer verlegt werden damit man später das Wohnzimmer abtrennen kann und als zusätzliches Schlafzimmer mit Zuluftauslass verwenden kann. Der Anschluss kann vorerst mit Deckel abgeschlossen „blind“ bleiben. In diesem Fall werden also keine Investitionskosten durch erweiterte Kaskadenlüftung gespart.</p>	<p>Die Einsparung des Zuluftauslass im Wohnzimmer und der Rohrlänge entspricht, je nach Größe und Geometrie der Wohnung ca. 15 % der Investitionskosten.</p> <p>Bei der Planung soll berücksichtigt werden, dass das Lüftungsgerät bzw. der Verteiler optimal in der Wohnung positioniert ist, damit Wege vom Verteiler zum Auslass minimiert werden.</p>
<p align="center">Verteilung mit Wickelfalzrohr oder mit starren Kunststoffrohren an der Rohdecke befestigt und mit Abkofferung bzw. Abhangdecke verdeckt.</p>	<p>Es wird empfohlen die Zuluftleitungen mit Weitwurfdüsen in den Räumen anzuschließen. Damit können die Auslässe direkt über der Tür, ohne Kurzschlussgefahr, positioniert werden. Dies ermöglicht eine Reduzierung der Rohrlängen und der Fläche an Abhangdecke oder die Abkofferungsarbeit.</p> <p>Bei flexiblen Grundrissen sollen die Leitungen für den Volumenstrom für normale Kaskadenlüftung ausgelegt werden. Damit kann später das Wohnzimmer als Schlafzimmer verwendet und mit Zuluft versorgt werden ohne die Grenze der Luftgeschwindigkeit von 2,5 m/s in den Rohren zu erreichen.</p> <p>Es wird also nur an der Rohrlänge und am Auslass gespart (ca. 15% der Investitionskosten).</p>	<p>Durch die Reduzierung des Gesamtvolumenstroms können die Rohre kleiner ausgelegt werden. Damit kann eine gesamte Einsparung von ca. 20 % der Investitionskosten durch erweiterte Kaskadenlüftung erreicht werden.</p>

Tabelle 9: Zusammenfassung der Kosteneinsparungsmöglichkeit nach Art der Luftleitungen und des Grundrisses

3.4.2.2 Einfluss der erweiterten Kaskadenlüftung auf die Betriebskosten

Die Leistungsaufnahme eines Ventilators hängt von dem Volumenstrom ab und wird meistens mit unterschiedlichen Druckverlusten in Form von Tabellen oder Grafiken vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Wenn man davon ausgeht, dass der Druckverlust am Ventilatoreintritt bei normaler und bei erweiterter Kaskadenlüftung gleich ist, können die Leistungsaufnahme und dadurch die Betriebskosten für diese Wohnung um ca. 23% reduziert werden.

Exemplarisch wurden im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes („Low-Vent.com“) speziell für eine Wohnanlage mit 11 Wohneinheiten die jährlichen Betriebskosten berechnet und verglichen, und zwar bei normaler und erweiterter Kaskadenlüftung für zentrale und dezentrale Verteilung. Es stellte sich in diesem Beispiel heraus, dass die erweiterte Kaskadenlüftung eine Reduzierung der Betriebskosten zwischen 10 % (dezentrale Lösung) und 28 % (zentrale Lösung) ermöglicht.

4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms

4.1 Einpassung in das Programm

Das Projekt trägt durch seine grundlegenden Forschungsarbeiten zu innovativen Konzepten der Raumlüftung im Wohnungsbau wesentlich zur Akzeptanzverbesserung der „Schlüsseltechnologie Komfortlüftung“ bei. Kommt es tatsächlich zu einer breiten Umsetzung der zu untersuchenden Konzepte, so wird ein maßgeblicher Beitrag zur Klimaentlastung erreicht. Die Wohnungslüftung kann künftig mit deutlich geringerem Ventilatorstromeinsatz sowie geringeren Lüftungswärmeverlusten betrieben werden. Die wirtschaftliche Umsetzbarkeit ist gesichert, weil sowohl Investitions- als auch Betriebs und Wartungskosten deutlich gesenkt werden können.

Die konsequente Umsetzung der gerichteten Durchströmung stellt einen wesentlichen Baustein auf dem Weg zum CO₂-neutralen Gebäudesektor dar.

4.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms

Im Detail setzt das Doppelnutzen-Projekt in vielfältiger Weise an folgenden allgemeinen Kriterien der zweiten Ausschreibung an.

Das Konzept von erweiterter Kaskadenlüftung kann als „Low-Tech“ bezeichnet werden, weil es die Luftleitungen in den Wohnungen verringert und die Installation vereinfacht. Es wird weniger Material (Leitungen, Auslässe, Schalldämpfer...) und weniger Strom für die Ventilatoren gebraucht. Dies bedeutet eine energieeffizientere Haustechnik durch eine optimierte Lüftung. Die Studie hat tatsächlich gezeigt, dass weniger Energie bei gleichbleibendem Nutzerkomfort gebraucht wird.

4.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Im Rahmen eines Start-up-Workshops wurden die Projektziele und die Methodik des Forschungsprojektes „Doppelnutzen“ mit Vertretern der Wohnungswirtschaft und der Haustechnik präsentiert, sowie offene Fragestellungen der Forschungsschwerpunkte

diskutiert. Es hat sich herausgestellt, dass Details und Studien in den folgenden Bereichen insbesondere gewünscht waren.

- Schallschutz der Überströmöffnungen
- Grundriss-Eignung für die Kaskadenlüftung
- Schadstoffkonzentrationen und deren Verteilung

Diese Wünsche wurden beim Ablauf der verschiedenen Untersuchungen besonders berücksichtigt und haben die Arbeit in den verschiedenen Arbeitspaketen geleitet.

Es wurde auch gewünscht, die Resultate der Studien in einer praxisgerechten Form zu verbreiten. Deshalb wurden die praxisrelevanten Ergebnisse in einer Webseite in Form von Planungshinweise und eines interaktiven Web-Tools zusammengestellt.

4.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse

Die Projektergebnisse haben gezeigt, dass das Prinzip von erweiterter Kaskadenlüftung tatsächlich umsetzbar ist. Die Voraussetzungen und Einschränkungen des Prinzips betreffen die Grundrissgestaltung, die Art der Überströmöffnungen und die Heizstrategie (bei erweiterter Kaskadenlüftung ist eine Heizung durch die Zuluft nicht zum Empfehlen, da es zu einer Überheizung im Schlafzimmer führen kann).

Das Umsetzungspotential des Lüftungskonzeptes ist hoch, und wurde bereits bei zwei verschiedenen Demo-Projekten umgesetzt (Demo-Gebäude in Kapfenberg und in Innsbruck Vögelebichl im Rahmen des Forschungsprojektes „Low-Vent.com“).

5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Die im Projekt „Doppelnutzen“ gewonnenen Erkenntnisse stellen erstmals systematisch alle für die Planung von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau notwendigen Konzepte und Informationen bereit, welche für die praktische Umsetzung der erweiterten Kaskadenlüftung notwendig sind. Damit wurde es dem Projektteam, bestehend aus dem wissenschaftlichen Forschungspartner (UIBK) und der Wohnungsbaugesellschaft (NHT) möglich, für praktisch beliebige Grundrisse in Neubau und Sanierung die Eignung für die erweiterte Kaskadenlüftung über die im Projekt entwickelten Kenngrößen und Bewertungsverfahren zu quantifizieren. Darüber hinaus konnten die bislang noch fehlenden strömungstechnischen und schalltechnischen Daten (insbesondere für bauseits zu errichtende Überströmöffnungen) gemessen werden.

Aufbauend auf den Projektergebnissen wird die Umsetzung an konkreten Beispielobjekten (mehrgeschossiger Wohnbau) im Rahmen des Projektes „low_vent.com“ vom Projektteam erprobt.

Die gesamten Projektergebnisse sind insbesondere für Planer, Architekten, Haustechniker und Entscheidungsträger in Wohnbaugesellschaften von besonderem Interesse, weil sie die Möglichkeit bieten, mittels der erweiterten Kaskadenlüftung kostengünstige und hocheffiziente Lüftungssysteme zu realisieren. Mit Hilfe des online zur Verfügung gestellten Tools kann die genannte Zielgruppe im Rahmen ihrer jeweiligen Planungstätigkeit arbeiten, fallspezifische Informationen abrufen und ggf. in den eigenen Konzepten und Entwürfen umsetzen.

6 Ausblick und Empfehlungen

Wie bereits erwähnt, konnten die Arbeiten im Forschungsprojekt low_vent.com bereits weitergeführt und konkretisiert werden. Messtechnische Absicherungen von Grenzfällen sind empfehlenswert, um kritische Fälle eindeutig identifizieren zu können und gesicherte mit Messdaten belegte Empfehlungen abgeben zu können. Diese Fälle sollten auch für die Validierung von CFD-Simulationen herangezogen werden. Mit Hilfe der Simulation ist dann die Abbildung von Varianten deutlich einfacher und kostengünstiger möglich.

Eines der möglichen Demonstrationsvorhaben ist das Bauvorhaben „Vögelebichl“, welches vom Projektpartner NHT in Innsbruck in zwei Gebäudeteilen realisiert wird. Die mit der Umsetzung der Kaskadenlüftung verbundenen Risiken können dadurch abgefangen werden, dass auch in den Wohnräumen Kanäle vorinstalliert werden, auch wenn diese nicht genutzt werden. Weil hier in den Decken eingelegte Schlauchsysteme zum Einsatz kommen sollen, ist eine spätere Nachinstallation nicht mehr möglich. Ein weiteres Demonstrationsprojekt ist in Vorarlberg im kostengünstigen Wohnbau geplant (Projekt KliNaWo unter der Leitung des Energieinstituts Vorarlberg).

7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Standardluftführung bei mechanischer Wohnraumbelüftung. Diese Form der gerichteten Durchströmung hat sich heute als Standard etabliert. (Quelle: PHI).....	15
Abbildung 2: Vergleich der gemessenen mit der simulierten Raumlufqualität im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts) während der Wintermonate Dezember und Jänner (2010/11). Die Raumlufqualität wurde gemäß EN13779 in 4 Klassen eingeteilt und auf Basis der CO ₂ -Konzentration über Außenluft ermittelt. Die Höhe der Balken zeigt den Zeitanteil in % mit der jeweiligen Raumlufqualität. Für das Schlafzimmer wurden nur die Nachtstunden zwischen 23:00 und 7:00 Uhr ausgewertet.	22
Abbildung 3: Vergleich der gemessenen mit der simulierten Raumluffeuchte im Wohnzimmer (links) und Schlafzimmer (rechts) während der Wintermonate Dezember und Jänner (2010/11). Die relative Feuchte wurde für die Darstellung in 10%-Schritten kategorisiert. Die Höhe der Balken zeigt den Zeitanteil in % innerhalb der jeweiligen Feuchteklasse. Für das Schlafzimmer wurden nur die Nachtstunden zwischen 23:00 und 7:00 Uhr ausgewertet.	22
Abbildung 4: Vergleich von gemessenen und simulierten Tagesverläufen bezüglich CO ₂ -Konzentration und relativer Feuchte im Schlafzimmer für eine der 18 vermessenen Wohneinheiten während einer Dezemberwoche (2010).	23
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung für Österreich: Anzahl der Bewohner als Funktion der Wohnraumanzahl für verschiedene Wohnungsgrößenkategorien. Daten der Statistik Austria.	24
Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung für Österreich: Anzahl der Bewohner als Funktion der Bewohneranzahl in Wohnungen mit 4 Wohnräumen mit einer Nutzfläche zwischen 60m ² und 90m ² . Der Mittelwert ergibt sich zu 2,8 Bewohner pro Wohnung. Daten der Statistik Austria.	24
Abbildung 7: (Links) CONTAM Skizze des Grundrisses. AL=Abluft, ZL=Zuluft. (Rechts) Belegungsplan und Parameter zum Nutzerverhalten WT=Wochentag, WE=Weekende. Entnommen aus (Rojas, Sibille, & Pfluger, 2012).	25
Abbildung 8: Gewählter tageszeitlicher Verlauf der Personenbelegung für das Referenzmodell.	25
Abbildung 9: Schema und Beschreibung des in CONTAM verfügbaren „Boundary Layer Diffusion Model“. Es kann näherungsweise zur Abbildung von Feuchtepufferung in Wänden, etc. herangezogen werden.	27

Abbildung 10: Schema des erweiterten Feuchtepuffermodells (2-Schicht).....	27
Abbildung 11: Zeitliche Luftfeuchteverteilung im Kernwinter (Dez., Jan. und Feb.) für einen Raum mit Betonwänden (rechts) und mit Lehmwänden (links), gerechnet mit verschiedenen Feuchtepuffermodellen. Details siehe Text.	28
Abbildung 12: Bestimmung der relativen Zielwertabweichung nur für CO ₂ anhand eines Beispiels für die Häufigkeitsverteilung der CO ₂ -Konzentration aus dem simulierten Referenzfall.	29
Abbildung 13: Raumlufqualität bei Variation der Personenbelegung. Verändert wurden Personenanzahl und deren Anwesenheitsprofil. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).	30
Abbildung 14: Relative Zielwertabweichung als Maß der Raumlufqualität bei Variation verschiedener nutzerspezifischen Parameter. Zwecks Übersicht ist nur der Summenwert aus rel. Feuchte, CO ₂ und TVOC dargestellt. Die relative Zielwertabweichung von CO ₂ und TVOC bleibt immer <0.06 (Nicht dargestellt). Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012). 31	
Abbildung 15: Relative Zielwertabweichung (Summenwert von CO ₂ , rel. Feucht und TVOC) bei Variation der Klimadaten, aufgetragen gegen den mittleren Wasserdampfgehalt (im Kernwinter) für österreichische und für europäische Städte.	32
Abbildung 16: Raumlufqualität bei Variation der Zuluftmenge für Schlaf- und Kinderzimmer. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).	33
Abbildung 17: Raumlufqualität bei Variation der Zuluftmenge in Wohnzimmer. Entnommen aus (Rojas, Sibille, et al., 2012).....	33
Abbildung 18: CO ₂ -Konzentrationshäufigkeitsverteilung bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.....	34
Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.....	34
Abbildung 20: TVOC-Konzentrationshäufigkeitsverteilung bei Standardluftführung (links) und bei erweiterter Kaskadenlüftung (rechts) für den Auswertzeitraum 1. Dezember bis 28. Februar und nur bei Personenbelegung.....	35
Abbildung 21: 3D-Ansicht zwei der mit CFD simulierten ungünstigen Wohnzimmergeometrien.	37
Abbildung 22: Vorderansicht und Draufsicht der sich ergebenden räumlichen CO ₂ -Verteilung im Wohnzimmer und Gangbereich für den Fall mit unten angeordneten Zuluftüberströmer (Türspalt) und gegenüberliegenden aber oben angeordneten Abluftüberströmer (Zarge). Die Farblegende zeigt die zugeordneten Konzentrationswerte in Volumenanteilen. Die überströmende Zuluft besitzt 400ppm.....	38

Abbildung 23: Vorderansicht und Draufsicht der sich ergebenden räumlichen CO ₂ -Verteilung im Wohnzimmer und Gangbereich für den Fall mit unten angeordneten Zuluftüberströmer (Türspalt) und ebenfalls unten, aber versetzt, angeordneten Abluftüberströmer (Türspalt). Die Farblegende zeigt die zugeordneten Konzentrationswerte in Volumenanteilen. Die überströmende Zuluft besitzt 400ppm.....	39
Abbildung 24: Grundriss und Position der Zu- und Abluftauslässe bei den für den Feldversuch verwendeten Wohneinheiten.	41
Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Frischluftrohr und im Fortluftrohr.....	42
Abbildung 26: Normierte Verteilung der spezifischen Feuchte der Außenluft für die gewählten Auswerteziträume.....	44
Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der CO ₂ -Konzentration im Schlafzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.	45
Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Feuchte [$g_{H_2O}/kg_{\text{feuchte Luft}}$] im Schlafzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.	45
Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der CO ₂ -Konzentration im Wohnzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.	46
Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Feuchte [$g_{H_2O}/kg_{\text{feuchte Luft}}$] im Wohnzimmer der drei untersuchten Wohneinheiten (Raum 1 bis 3). Links mit Standardluftführung, rechts mit erweiterter Kaskadenlüftung.	46
Abbildung 31: Ergebnisse der TVOC-Messung mittels Photoionisationsdetektor in Isobuten-bezogenen Einheiten mit Standardluftführung und erweiterter Kaskadenlüftung für zwei untersuchte Wohneinheiten (WE2 links und WE3 rechts). Die Bewertungshinweise des Messgeräteherstellers sind ebenfalls dargestellt. Die Ergebnisse sind nur bedingt interpretierbar, da die Außenluftwechselrate während der Messkampagne stetig sank.	48
Abbildung 32: Links: Schema des verwendeten 3-Zone-Modells zur Bestimmung der Überströmanforderungen. Rechts: Vergleich zwischen In-/Exfiltrationswärmeverluste berechnet mit dem 3-Zone-Modell (stationär) und mit Hilfe von CONTAM (transient). Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).	49
Abbildung 33: Natürliche In-/Exfiltrationsraten in Abhängigkeit der Disbalance (Zu-/Abluft) für verschiedene Druckverluste der Überströmelemente. Ebenfalls dargestellt sind die mechanischen und die gesamten Lüftungswärmeverluste für Überströmelemente mit einem $\Delta p=2Pa$. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).	51

Abbildung 34: Natürliche In-/Exfiltration als Funktion des Druckverlustes der Überströmelemente für verschiedene Gebäudedichtheitswerte. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).....	51
Abbildung 35: Schematische Darstellung des Einflusses der Türstellung auf die Zuluftverteilung zwischen Räumen. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).	52
Abbildung 36: Veränderung des Zuluftvolumenstroms für verschiedene Zuluftventildruckverluste (links) und für eine verschiedene Anzahl an Zulufräumen (rechts). Dargestellt sind immer die „Worst-case“ Szenarien, d.h. die Veränderung der Zuluftmenge im Raum mit geschlossener Tür während die Türen der anderen Zulufräume geöffnet sind. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).	53
Abbildung 37: Links: Darstellung der zweischaligen Stahlbetonwand für den Einbau von Zimmertüren. Rechts: Foto beim Einheben einer Stahlbetonwand mit Prüföffnung	55
Abbildung 38: Messaufbau zur Bestimmung des Strömungswiderstandes. Entnommen aus (Rojas, Rothbacher, & Pfluger, 2012).	56
Abbildung 39: Gemessener Türspalt ohne (links) und mit (rechts) Teppich.	56
Abbildung 40: Holzzargen-Überströmlösung. Links: Schematische Skizze aus (Werner & Laidig, 1999). Rechts: Fotos der vermessenen Einbausituation.	57
Abbildung 41: Zwei verschiedene Versionen der Stahlzargen-Überströmlösung. Die Luftein- und auslässe sind nicht sichtbar in der Schattenfuge integriert.	57
Abbildung 42: Foto des oben um 5mm abgefrästen Türfalzes. Über den verbleibenden Spalt zwischen Falz und Türdichtung kann die Luft überströmen.	58
Abbildung 43: Foto der vermessenen Tür mit insgesamt 80 Überström-Löcher à 10mm Durchmesser im unteren Türbereich.....	58
Abbildung 44: Foto der vermessenen Z-Blende.....	58
Abbildung 45: Beispiel für die Darstellung und die Modellierung eines "geschlossenen" Grundrisses (links) und eines "offenen" Grundrisses (recht).	63
Abbildung 46: Klassifikation des Grundrisses in einer Baumstruktur. Ausschnitt der gesamten Baumstruktur	64
Abbildung 47: Beispiel Grundriss und entsprechendes Ergebnisdiagramm mit der Bewertung der Luftqualität und der Raumlufffeuchte. Die Markierungen zeigen die Simulationsergebnisse bei normaler und erweiterter Kaskadenlüftung. Der blaue Balken beschreibt die Schwankungsbreite, die durch die Änderung von verschiedenen Nutzerparametern hervorgerufen wird.	65
Abbildung 49: Beispiel-Grundriss bei dem das Wohnzimmer nicht abtrennbar für eine Nutzung als weiteres Schlafzimmer ist.....	67

Abbildung 48: Beispiel-Grundriss bei dem eine Abtrennung des Wohnzimmers für eine Nutzung als weitere Schlafzimmer möglich ist.67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtigsten Eingaben im Simulationsmodell zur Festlegung des Nutzerverhaltens, ermittelt durch Abgleich der Simulationsergebnisse mit den gemittelten Messdaten aus 18 Wohnzimmer und 6 Schlafzimmer aus der Passivhaussiedlung Lodenaral.....	21
Tabelle 2: Einteilung der Raumluftqualität nach EN13779 auf Basis der CO ₂ -Konzentration über Aussenluft.	21
Tabelle 3: Menschlichen CO ₂ und H ₂ O-Emissionen gemäß Annex 27 (Månsson (Editor), 2002)	26
Tabelle 4: Feuchtequellen durch Nutzeraktivitäten	26
Tabelle 5: Bewertungskriterien für die RLQ und deren Richtwerte (RW) bzw. Bandbreiten (BB)	29
Tabelle 6: Die für die Testmessung geplanten Zu- und Abluftvolumenströme. Die Zuluftmengen für die Standardluftführung entsprechen dem projektierten Betriebsvolumenstrom dieser Wohneinheiten, die der Kaskadenluftführung entsprechen den Erkenntnissen aus den oben beschriebenen Simulationsrechnungen.....	41
Tabelle 7: Volumenstrommessung mit FlowFinder	43
Tabelle 8: Art der Belüftung nach Funktionalität in der Wohnung. Prinzip der gerichteten Luftströmung.	63
Tabelle 9: Zusammenfassung der Kosteneinsparungsmöglichkeit nach Art der Luftleitungen und des Grundrisses	68

Literaturverzeichnis

- Airflow around buildings. (2009). *ASHRAE Fundamentals* (p. 24.1 ff). Atlanta, GA: ASHRAE.
- Baldinger, S., Baumann, R., Damberger, B., Hanus-Illnar, A., Hutter, H.-P., Kundi, M., Palmisano, G., et al. (2011). Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft. Wien: Österreichische Akademie der Wissenschaften - Kommission für Reinhaltung der Luft im Auftrag des BMLFUW. Retrieved from http://www.lebensministerium.at/umwelt/luft-laerm-verkehr/luft/innenraumluft/richtlinie_innenraum.html
- Barp, S., Fraefel, R., & Huber, H. (2009). *Luftbewegungen in frei durchströmten Wohnräumen*. Retrieved from http://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/WeitereDokumente/Nachhaltiges_Bauen/1_2000_Watt/6_Technik/Luftbewegungen_Bericht_all es.pdf
- Berglund, B., Clausen, G., De Ceaurriz, J., Kettrup, A., Lindvall, T., Maroni, M., Molhave, L., et al. (1997). *ECA Report 19: Totale Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations*. World Health.
- Delphin. (n.d.). Retrieved September 1, 2012, from <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/>
- Etheridge, D., & Sandberg, M. (1996a). Definition of air-exchange efficiency. *Building Ventilation - Theory and Measurement* (1st ed., p. 267). John Wiley & Sons.
- Etheridge, D., & Sandberg, M. (1996b). The power law for narrow openings. *Building Ventilation - Theory and Measurement* (1st ed., pp. 88–89). John Wiley & Sons.
- Feist, W., & Nagel, M. (2002). Klimaneutrale Passivhaussiedlung Analyse im dritten Betriebsjahr Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg Analyse im dritten Betriebsjahr, (April).
- Feist, W., Peper, S., & Kah, O. (2001). *CEPHEUS-Projektinformation Nr 19: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung-Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg*. Retrieved from http://www.passiv.de/downloads/05_cepheus_19_messung.pdf
- Fraefel, R. (1999). *Die Wohnungslüftung im MinEnergie Haus, Planungshilfe für Baufachleute*. Zürich. Retrieved from <http://frae.ch/ALLG/Bilder/Wohnungslueftung.pdf>
- Ghassemi-Bönisch, S., & Kronsteiner-Mann, C. (2011). *Zeitverwendungserhebung 2008/09* (pp. 1–16). Retrieved from http://www.statistik.at/web_de/statistiken/soziales/zeitverwendung/index.html
- Greml, A. (2010). Luftmengenoptimierung - Kaskadennutzung. Retrieved March 13, 2010, from http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/EFH/komfortlueftung.at-Info11_Luftmengenoptimierung_-_Kaskadennutzung_V_1.0.pdf
- Hahn, N. Von. (2007). „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 67(3), 103–107.
- Hartmann, T., Gritzki, R., Bolsius, J., Kremonke, A., Perschk, A., & Richter, W. (2001). *Bedarfslüftung im Wohnungsbau*. Stuttgart.

- Heinzow, B., & Sagunski, H. (2007). Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 50, 990–1005. doi:10.1007/s00103-007-0290-y
- Huber, H. (2006). *Wohnungslüftung* (1st ed.). FAKTOR Verlag AG.
- Janik, W., & Vollmann, K. (2001). Wohnungen nach Haushaltsmerkmalen: GWZ-VZ 2001. Retrieved August 7, 2012, from http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wohnen_und_gebaeude/index.html
- Kah, O. (2003). Messung der Raumluftströmung mit Hilfe von Indikatorgasanalyse. In W. Feist (Ed.), *AKKP 23: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum* (1st ed.). Passivhaus Institut.
- Kah, O., Peper, S., Ebel, W., Kaufmann, B., Zeno, B., & Feist, W. (2010). *Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung*. Darmstadt.
- Kah, O., Pfluger, R., & Feist, W. (2005). *Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung / Monitoring in einem Passivhaus-Geschosswohnbau*. Darmstadt.
- Kapferer, R. (2011). Messtechnische Evaluierung Passivhauswohnanlage Lodenareal/Innsbruck: Präsentation erster Ergebnisse. *Tagungsband:15. Int. Passivhaus-Tagung*. Passivhaus Institut.
- Kapferer, R., Greml, A., Höfler, K., Leitzinger, W., & Suschek-Berger, J. (2011). *Evaluierung von zentralen bzw. semizentralen Wohnraumlüftungen im Mehrfamilienhausbereich und Erstellung von Qualitätskriterien bzw. eines Planungsleitfadens* (p. 311). Retrieved from <http://www.komfortlüftung.at/index.php?id=2008>
- Khalifa, H. E., Prescod, S. J., & Elhadidi, B. (2006). *Computation of an occupant exposure in an office cubicle* (pp. 1–14). Retrieved from http://homes.civil.aau.dk/pvn/cfd-benchmarks/csp_literature/2007_2009/Khalifa_HE_Prescod_SJ_Dannenhoffer_III_JF_and_Elhadidi_B_2006.pdf
- Lahrz, T., Bischof, W., & Sagunski, H. (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 51(11), 1358–69. doi:10.1007/s00103-008-0707-2
- Månsson (Ed.), L.-G. (2002). *Simplified Tools Handbook-Annex27*. (L.-G. Månsson, Ed.). FaberMaunsell Ltd on behalf of the International Energy Agency.
- Meteonorm. (n.d.). Retrieved August 31, 2012, from <http://meteonorm.com/home/>
- Mølhave, L., Sparks, L., & Wolkoff, P. (1996). The Danish Twin Apartment Study–Part II: Mathematical modeling of the relative strength of sources of indoor air pollution. *Indoor ...*, 18–30. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1996.t01-3-00003.x/abstract>
- Nielsen, P. V, Murakami, S., Kato, S., Topp, C., & Yang, J.-H. (2003). *Benchmark Tests for a Computer Simulated Person*. Aalborg. Retrieved from http://homes.civil.aau.dk/pvn/cfd-benchmarks/csp_benchmark_test/Benchmark Tests_071103.pdf

- Norbäck, D., Björnsson, E., Janson, C., Widström, J., & Boman, G. (1995). Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings. *Occupational and environmental medicine*, 52(6), 388–95. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1128243&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Peper, Soeren, & Feist, W. (2008). *Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim*. Darmstadt.
- Peper, Soeren, Schnieders, J., & Feist, W. (2005). *Mehrgeschoss-Passivhaus Hamburg Pinnasberg*. Darmstadt.
- Peper, Soeren, Schnieders, J., & Feist, W. (2011). *Monitoring Altbausanierung zum Passivhaus: Verbrauch, Raumluftqualität, Kellerfeuchte*. Darmstadt.
- Peper, Soren, Feist, W., & Pfluger, R. (2004). *Ein nordorientiertes Passivhaus*.
- Pfluger, R., & Feist, W. (2001). *CEPHEUS Nr 15: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung - Kassel Marbachshöhe*. Darmstadt.
- Pfluger, R., Feist, W., & Schnieders, J. (1998). *CEPHEUS, Luftführung in Passivhäusern, Planungsrichtlinien und Erfahrungen bei Ausführungsplanung und Betrieb* (1st ed.). Darmstadt: Passivhaus Institut.
- Rojas, G., Rothbacher, M., & Pfluger, R. (2012). Overflow elements: Impacts on energie efficiency, indoor air quality and sound attenuation. *33rd AIVC and 2nd TightVent Conference* (pp. 96–100).
- Rojas, G., Sibille, E., & Pfluger, R. (2012). Sensitivitätsanalyse zur Raumluftqualität mit Wohnraumlüftung. *enova - Nachhaltige Gebäude* (pp. 323–330). Pinkafeld, Austria: Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld.
- Schnieders, J. (2003). Wirkung von Position und Art der Lüftungsöffnungen auf den Schadstoffabtransport. In W. Feist (Ed.), *AKKP 23: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum* (1st ed., pp. 85–123). Passivhaus Institut.
- Schnieders, Jürgen. (2003). Wirkung von Position und Art der Lüftungsöffnungen auf den Schadstoffabtransport. In W. Feist (Ed.), *AKKP 23: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum* (1st ed., pp. 85–123). Passivhaus Institut.
- Schulz, C., Ulrich, D., Pick-Fuß, H., Seiwert, M., Conrad, A., Brenske, K.-R., Huenken, A., et al. (2010). *Kinder-Umwelt-Survey (KUS) 2003/06*.
- Schwarz, M. (1999). Numerische Simulation von Luftströmungen in Wohnräumen mit mechanischer Lüftungsanlage. In W. Feist (Ed.), *AKKP 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern2* (1st ed.). Passivhaus Institut.
- Srebric, J., Vukovic, V., He, G., & Yang, X. (2008). CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments. *Building and Environment*, 43(3), 294–303. doi:10.1016/j.buildenv.2006.03.023

- Tappler, P. (2012). Erhebung der Raumluftqualität energieeffizienter Häuser und deren Auswirkungen auf die Gesundheit der Bewohner. Retrieved from <http://www.ibo.at/de/forschung/index.htm>
- Wagner, W., Spörk-dür, M., Kapferer, R., Braitto, M., Pfluger, R., Ochs, F., & Suschek-Berger, J. (2012). *Forschungsprojekt Passivhauswohnanlage Lodenareal - Endbericht* (pp. 1–103).
- Walton, G. N., & Dols, W. S. (2010). CONTAM User Guide and Program Documentation. NIST.
- Werner, J., & Laidig, M. (1997). Projektierung und Dimensionierung von Lüftungsanlagen im Passivhaus. In W. Feist (Ed.), *AKKP 4: Lüftung im Passivhaus* (1st ed., p. III/1 – III/21). Passivhaus Institut.
- Werner, J., & Laidig, M. (1999). Grundlagen der Wohnungslüftung im Passivhaus. In W. Feist (Ed.), *AKKP 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern* (1st ed., pp. 25–54). Passivhaus Institut.
- Wolkoff, P., & Kjærgaard, S. K. (2007). The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International*, 33, 850–857. doi:10.1016/j.envint.2007.04.004
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z., & Chen, Q. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2— Comparison with experimental data from. *Hvac&R Research*, 13(6), 871–887. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2007.10391460>

8 Anhang

Anhang A: Vollständige Baumstruktur zur Grundrissklassifikation