

IEA Energie in Gebäuden und Kommunen (EBC) Annex 68: Raumluftqualitätsoptimierte Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Wohngebäuden

G. Rojas, T. Calabrese,
A. Shandilya, R. Pfluger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

20/2022

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

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IEA Energie in Gebäuden und Kommunen (EBC) Annex 68: Raumluftqualitätsoptimierte Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Wohngebäuden

Gabriel Rojas, Toni Calabrese, Apeksha Shandilya, Rainer Pfluger
AB Energieeffizientes Bauen, Universität Innsbruck

Innsbruck, September 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	9
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	11
	3.1. Stand der Technik - Lüftung	11
	3.2. Bewertung der Raumlufthqualität	11
4	Projekthalt	13
	4.1. Ziele und Inhalte des Implementing Agreement „EBC“	13
	4.2. Ziele, Inhalte und Planung des Annex 68.....	14
5	Ergebnisse	16
	5.1. Relevante Schadstoffe und Bewertungsmetrik	16
	5.1.1. Typische Konzentration in Innenräumen von Wohngebäuden.....	16
	5.1.2. Expositionsgrenzwerte	18
	5.1.3. Auswahl der relevantesten Schadstoffe	20
	5.1.4. Bewertungsmetrik	24
	5.2. Schadstoffquellen-Modelle.....	26
	5.2.1. Formaldehyd-Emissionen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte	26
	5.2.2. Modellierung der größenabhängigen Feinstaubpartikel-Konzentration	28
	5.3. Gekoppelte Simulation / Co-Simulation	32
	5.4. Wohnraumlüftung – normative Vorgaben, Hürden und Herausforderungen in Umsetzung und Betrieb.....	37
	5.4.1. Nationale Vorgaben und Richtlinien.....	37
	5.4.2. Stakeholder-Befragungen.....	38
	5.5. Wohnraumlüftung – Lösungen, Innovationen und deren Bewertung	39
	5.5.1. Bewertung von zwei innovativen mechanischen Lüftungskonzepten	39
	5.5.2. Bewertung von Außenluftfilter von Wohnraumlüftungsanlagen	46
6	Vernetzung und Ergebnistransfer	52
	6.1. Zielgruppen und Relevanz.....	52
	6.2. Einbindung der Stakeholder und Dissemination	54
	6.2.1. Einbindung der Stakeholder	54
	6.2.2. Nationale Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse	54
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	57
8	Anhang	72
	Anhang A.1	72
	Anhang A.2	73
	Anhang A.3	74
	Anhang A.4	75
	Anhang A.5	76

Anhang B.1	77
Anhang B.2	77
Anhang B.3	77
Anhang B.4	77
Anhang B.5	77

1 Kurzfassung

Die energieeffiziente Bauweise stellt einen wesentlichen Hebel für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors und somit einen wichtigen Beitrag für die Erfüllung der Klimaschutzziele dar. So eine Bauweise erfordert eine luftdichte Gebäudehülle, sodass das Thema Raumluftqualität bei der Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Gebäuden unbedingt berücksichtigt werden muss. Jedoch wird, meist aufgrund ökonomischer Überlegungen, dieser Aspekt gerade im Wohnbau oft vernachlässigt. Es besteht ein Bedarf an Produkt- und Konzeptinnovationen und an ganzheitlichen und handhabbaren Bewertungsmethoden, um hohe Raumluftqualität, Komfort und Energieeffizienz bei niedrigen Kosten für den Wohnbau (inkl. Sanierung) bereitstellen zu können.

Die Ergebnisse dieses IEA Projekts sollen dazu beitragen, dass die Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Wohngebäuden auch in Hinblick auf ein gesundes Innenraumklima optimiert werden können. Ziel dieses Projekts war es, die wissenschaftlichen Grundlagen und Daten für eine umfassende Bewertung der Raumluftqualität und der Energieeffizienz zu erarbeiten, um mögliche Lösungsansätze für die Erfüllung der genannten Ansprüche (hohe Raumluftqualität, Komfort und Energieeffizienz bei niedrigen Kosten) zu evaluieren. Dazu wurden Bewertungsmetriken entwickelt, Modelle und Daten für die Beschreibung von Schadstoffquellen generiert, Modellierungswerkzeuge zur gekoppelten Berechnung von Energieeffizienz und Raumluftqualität erprobt bzw. weiterentwickelt, sowie Feldmessungen durchgeführt bzw. existierende Feldstudien dokumentiert. Diese Grundlagen wurden genutzt, um Strategien und Methoden für eine optimierte Planung, Ausführung und Betriebsführung von energieeffizienten Lüftungssystemen von Wohngebäuden zu untersuchen und zu bewerten. Neben der Vernetzung und dem Wissenstransfer mit den internationalen Projektpartner:innen verfolgte der österreichische Beitrag das Ziel eine detaillierte Raumluftqualitätsbewertung in möglichst einfacher Form mit bestehenden Simulationswerkzeugen zu erproben und damit innovative Lüftungskonzepte zu untersuchen.

Der Innovationsbedarf bzw. die vorherrschenden Hürden und Herausforderung bei der Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung von Lüftungssystemen wurde durch eine Stakeholder:innen-Befragung im Rahmen dieses Projekts aufgezeigt. Es sticht der Bedarf für kostengünstige und platzsparende Lüftungslösungen hervor. Des Weiteren wurden die relevantesten 16 Innenraum-Luftschadstoffe in Niedrigenergiehäusern identifiziert, um eine Bewertungsmetrik abzuleiten. Die Berücksichtigung von Feinstaubpartikel- und Formaldehyd-Exposition stellte sich für die Modellierung als besonders relevant dar. Im Rahmen der österreichischen Beiträge wurden für diese beiden Schadstoffe die erforderlichen Quellen- und Senken-Modelle recherchiert und für den Einsatz in Multizonen-Modellen aufbereitet. Außerdem wurden verschiedene Co-Simulationsmethoden für eine detaillierte Raumluftqualitätsbewertung im Rahmen der dynamischen Gebäudesimulation erprobt. Sie erwies sich als mit den getesteten (und gängigen) Gebäudesimulationsprogramm nur unpraktikabel umsetzbar. Die Evaluierung zwei innovativer Lüftungskonzepte, der „erweiterten Kaskadenlüftung“ und „aktiven Überströmung“, zeigt, dass kleine Nachteile in Bezug auf Formaldehyd- bzw. Feinstaub-Exposition im Vergleich zur Standardkaskadenluftführung zu erwarten sind, aber dennoch insgesamt als durchaus gut bewertet werden kann.

2 Abstract

Energy-efficient construction is a major lever for decarbonizing the building sector and thus an important contribution to meeting climate protection targets. This requires an airtight building envelope, resulting in the urgent need to consider indoor air quality (IAQ) for design and operation of energy-efficient buildings. However, this aspect is often neglected, in particular for residential buildings, mostly due to economic considerations. There is a clear need for product and concept innovations and for holistic and practicable assessment methods to be able to provide high indoor air quality, comfort and energy efficiency at low cost for residential buildings (incl. refurbishments).

The results from this IEA-project aim to optimize the design and management of energy-efficient residential buildings, in particular in terms of a healthy indoor environment. The goal of this project was to develop the scientific basis and data for a comprehensive assessment of IAQ and energy efficiency in order to evaluate possible solutions that meet the above requirements (high indoor air quality, comfort, and energy efficiency at low cost). For this purpose, IAQ assessment metrics were developed, models and data for the description of pollutant sources were generated, modeling tools for the coupled calculation of energy efficiency and indoor air quality were tested or further developed, and field measurements were performed or existing field studies were documented. This basis was used to investigate and evaluate strategies and methods for optimized design, implementation and operational management of energy-efficient ventilation systems of residential buildings. In addition to networking and knowledge transfer within the international consortium, the Austrian contribution pursued the goal of incorporating a simple to use and yet detailed IAQ assessment procedure within common building performance simulation tools and applying this procedure to investigate innovative ventilation concepts.

The need for innovation and the prevailing hurdles and challenges in the planning, execution, operation and maintenance of ventilation systems were identified within a stakeholder survey conducted in this project. The need for cost-effective and space-saving solutions stood out. Furthermore, this project identified the most relevant 16 indoor air pollutants in low-energy buildings to derive an assessment metric. The consideration of particulate matter (PM) and formaldehyde exposure turned out to be particularly relevant for the modeling. As part of the Austrian contributions, the necessary source and sink models were researched for these two pollutants and prepared for use in multizone models. In addition, different co-simulation methods were tested for a detailed IAQ assessment in the context of dynamic building simulation. It was found to be impractical to implement with the tested (and commonly used) building simulation programs. The evaluations of two innovative ventilation concepts, namely "extended cascade ventilation" and "active overflow", point to minor disadvantages in terms of formaldehyde or PM exposure compared to the standard cascade ventilation principle. Nevertheless, the IAQ for those two innovative concepts can still be rated as quite high overall.

3 Ausgangslage

3.1. Stand der Technik - Lüftung

Betrachtet man den Stand der Lüftungstechnik, so zeigt sich, dass sich eine hohe Raumlufthqualität (RLQ) im Prinzip energieeffizient umsetzen lässt - gute Planung vorausgesetzt (Kapferer et al., 2011). Am Markt sind Lüftungsgeräte mit einem Wärmebereitstellungsgrad von >95% erhältlich. Mit ausreichend hohem Luftwechsel lassen sich alle Schad- und Geruchsstoffe gut verdünnen. Engmaschige Filter halten die Feinstaubkonzentration gering. Da ein hoher Außenluftwechsel eine niedrige Raumlufthfeuchte im Winter zur Folge hat (speziell in Österreich mit kalten, trockenen Wintern), können Lüftungsgeräte mit einer aktiven Befeuchtung oder einem feuchterückgewinnenden Wärmeübertrager ausgestattet werden. Letzteres ist energetisch vorteilhafter (Schnieders, 2008). Jedoch zeigen Erfahrungen und Rückmeldungen aus der Baupraxis, dass viele Bauherr:innen bzw. Facility Manager:innen der Wohnraumlüftung sehr kritisch gegenüberstehen. Diese beansprucht viel Platz für Lüftungsgerät und Verteilleitungen, erhöht die Baukosten und verursacht Betriebs- und Wartungsaufwand. Oft sind es die unsichtbaren Komponenten einer Lüftungsanlage, welche die Kosten massiv in die Höhe treiben. Der Brandschutz erfordert wartungsbehaftete Klappen, zentrale Anlagen benötigen teure Volumenstromregler, die Frostfreihaltung ist entweder komplex oder Primär-energetisch ineffizient, und die Leitungsführung erfordert zusätzliche Wandabhängungen bzw. Abkofferungen. Gerade bei der Wohnraumsanierung stellen die Leitungsführung und der Platzbedarf massive Herausforderungen dar. All dies führt dazu, dass die Investitionskosten meist bei >100 €/m² liegen (Thaler, 2010). Hinzu kommen Erfahrungsberichte über sehr hohe Wartungskosten (aufgrund schlechter Planung) von >2 €/m²a (Schöberl & Hofer, 2012). Als Konsequenz entscheiden sich viele Bauherr:innen für die traditionelle Fensterlüftung oder eine reine Abluftanlage. Das hohe Energiesparpotenzial und der erhöhte Komfort eines ansonsten thermisch hochwertig ausgeführten Gebäudes gehen somit verloren. Bei reiner Fensterlüftung kommt noch ein potentielles Gesundheits- und Schimmelrisiko hinzu, falls der/die Nutzer/in nicht ausreichend lüftet.

Es scheint derzeit kaum Alternativen zwischen einer hocheffizienten, komfortablen und teuren Ausführung und einer kostengünstigen, ineffizienten und mit Komforteinbußen verbundenen Lüftungslösung zu geben. Um mögliche Vorteile innovativer Lösungen zeigen und quantifizieren zu können, bedarf es wissenschaftlich fundierter Bewertungsmethoden. Es fehlt diesbezüglich an der Datenbasis, am wissenschaftlichen Konsens über gesundheitliche Relevanz vieler Schadstoffe, einer Bewertungsmetrik und an handhabbaren Berechnungsmethoden, um die Raumlufthqualität und den Energieverbrauch bewerten zu können.

3.2. Bewertung der Raumlufthqualität

In der Regel wird bis dato die Wirksamkeit neuer Lüftungslösungen hauptsächlich auf Basis der CO₂-Konzentration in der Raumlufth bewertet, siehe z.B. EN 13779, ÖNORM H 6038 oder (Baldinger et al., 2011; Lahrz et al., 2008). Die Emission ist direkt mit dem menschlichen Metabolismus gekoppelt, wird durch die Atmung freigesetzt und dient daher als einfaches Maß der Luftverunreinigung durch anthropogene Schadstoffe. CO₂ an sich ist, bei den in Innenräumen typischerweise auftretenden

Konzentrationen (auch bei schlechter Belüftung), nicht gesundheitsschädlich. Die CO₂-Konzentration als Indikator für die RLQ in Innenräumen heranzuziehen ist „praktisch“. Der Konzentrationsverlauf ist einfach zu messen und mit Hilfe sogenannter Multi-Zonen-Modelle einfach zu simulieren. Die Emissionsstärke kann als konstant, bzw. stückweise konstant bzw. nur abhängig von Aktivitätsgrad und Masse der Person angenommen werden. Eine Wechselwirkung mit anderen Gasen/Schadstoffen oder Innenraumgegenständen bzw. -oberflächen findet nicht statt. Die Konzentration der eigentlichen Schad- und Geruchsstoffe wird in der Regel aufgrund der Komplexität nicht simuliert und nur in aufwendigeren Messkampagnen gemessen. Die Schadstoff- und Geruchsstoffe gelangen über verschiedenste Wege in die Innenraumluft. BewohnerInnen und ihre Aktivitäten (Kochen, Putzen, Körperhygiene), Bauprodukte und Einrichtungsgegenstände aber auch der Eintrag aus der Außenluft können als die wichtigsten Quellen bezeichnet werden. Ihre Quellstärke hängt von vielen Faktoren ab und ist dementsprechend schwierig zu modellieren. Hinzu kommt die Komplexität aufgrund chemischer Reaktion (Darling et al., 2012; Weschler, 2011) und Ad- und Desorptionseffekten (Deng et al., 2012; Sherman & Hult, 2013; Zhu et al., 2013) an den Oberflächen. Auch biologische Vorgänge beeinflussen die RLQ (Arlian et al., 2001). Zusätzlich können die relevanten Vorgänge Temperatur- und Feuchteabhängigkeit sein (Deng et al., 2009; Wolkoff & Kjærgaard, 2007; Zhang et al., 2007). Dass diese Effekte tatsächlich relevant sein können, zeigen Proband:innen-Versuche. So wurde z.B. berichtet, dass verschmutzte LüftungsfILTER, wenn sie mit ozonhaltiger Außenluft (so wie sie vor allem im Sommer beobachtbar ist) überströmt werden, Schad- bzw. Geruchsstoffe emittieren, sodass die RLQ negativ wahrgenommen wird (Bekö, 2007; Destailats et al., 2011; Lin & Chen, 2014). Außerdem wurde festgestellt, dass bestimmte Wandbeschichtungen die wahrgenommene Luftqualität positiv beeinflussen, bzw. Geruchsstoffe merkbar absorbieren können (Cros et al., 2012; Darling et al., 2012).

Bei der Bewertung von innovativen Lüftungskonzepten werden diese Aspekte meist nicht berücksichtigt. In der Regel wird eine ausreichende Verdünnung der vom Menschen emittierten Schad- und Geruchsstoffe mit Hilfe der CO₂-Konzentration und eventuell die sich einstellende Raumluftfeuchte überprüft. Stoffeinträge aus Bauprodukten, Mobiliar und Alltagsgegenständen, der Außenluft oder von NutzerInnenaktivitäten wie Kochen wird meist gar nicht oder nur stark vereinfacht abgebildet. Will man eine energetische und ökonomische Optimierung von Gebäuden (wie sie u.a. die EU-Richtlinie EPBD fordert) umsetzen, bedarf es einer genauen Kenntnis der sich einstellenden RLQ und deren Auswirkung auf Gesundheit, Komfort und Leistungsfähigkeit (letzteres vor allem bei Schulen und Bürogebäuden). Die RLQ muss somit Teil der Optimierungsfunktion werden. Bei einer reinen Betrachtung auf Basis der CO₂-Konzentration (und evtl. Raumluftfeuchte) bleiben oft Fragestellungen in Bezug auf Gesundheit und Komfort (inkl. wahrgenommene RLQ) offen.

Implementiert man z.B. die erweiterte Kaskadenlüftung, d.h. keine eigene Zuluft im Wohnzimmer (Sibille et al., 2013), stellt sich die Frage, wie stark sich die VOC-Konzentration aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen im Wohnzimmer erhöht. Bei dem für die Sanierung vielversprechenden Ansatz der aktiven Überströmung - Schlafräume werden indirekt über aktive Überströmelemente vom Flur aus belüftet (Sibille & Pfluger, 2015) – ist zu berücksichtigen, wie stark eine Geruchsübertragung oder Partikelübertragung aus dem Kochbereich (speziell bei offenen Wohnküchen) problematisch sein könnte, und ob mit passiven Elementen, z.B. Lehmwandputze (Darling et al., 2012), die Schad- und Geruchsstoffe direkt im Küchenbereich verringert werden könnten. Generell gibt es für Planer:innen noch wenig belastbare Informationen und Hilfestellungen, um eine möglichst wirksame und energieeffiziente Geruchsminderung und Fettabscheidung (mittels einer Dunstabzugshaube) für den Kochbereich auszulegen.

4 Projektinhalt

4.1. Ziele und Inhalte des Implementing Agreement „EBC“

Das Implementing Agreement mit dem Titel „Buildings and Communities Programme (EBC)“ bzw. früher „Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS)“ leitet Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur beschleunigten Umsetzung von energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden und Siedlungen. Die dafür erforderlichen Kenntnisse und Techniken werden durch kollaborative Forschung auf internationaler Ebene gewonnen. Das Programm führt u.a. Projekte (als Annex bezeichnet) zu folgenden Themenschwerpunkten durch:

- Energieeffizienz und nachhaltigen Technologien für die Energieversorgung von Gebäuden
- Lüftung und RLQ in Gebäuden
- Auswirkungen der Energienutzung auf Innenraumqualität und Gesundheit
- Entwicklung und Vergleich von Gebäudesimulationsprogrammen
- Energiemanagementsysteme für Gebäude und Kommunen
- Kommunale und regionale Energieversorgungskonzepte

Innerhalb des EBC Programms gab bzw. gibt es folgende abgeschlossene (grau) bzw. laufende Annexe mit einem direkten Themenbezug zu RLQ und Lüftung, eines davon der IEA EBC Annex 68, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Liste abgeschlossener und laufender IEA EBC Annex Projekte mit direktem Themenbezug zu Raumluftqualität und deren Bewertung in Gebäuden

Nr.	Titel (engl.)
8	Inhabitant Behaviour with Regard to Ventilation
9	Minimum Ventilation Rates
10	Building HEVAC Systems Simulation
18	Demand Controlled Ventilating Systems
20	Air Flow Patterns within Buildings
23	Multizone Air Flow Modelling
26	Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures
27	Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems
34	Computer-Aided Evaluation of HVAC System Performance
35	Control Strategies for Hybrid Ventilation in New and Retrof. Office Buildings (HybVent)
40	Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance
41	Whole Building Heat, Air and Moisture Response
53	Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods
55	Ventilative Cooling
66	Definition and Simulation of Occupant Behaviour in Buildings
68	Design and Operational Strategies for High IAQ in Low Energy Buildings
78	Supplementing Ventilation with Gas-phase Air Cleaning, Implementation and Energy Implications
86	Energy Efficient Indoor Air Quality Management in Residential Buildings
5	Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)

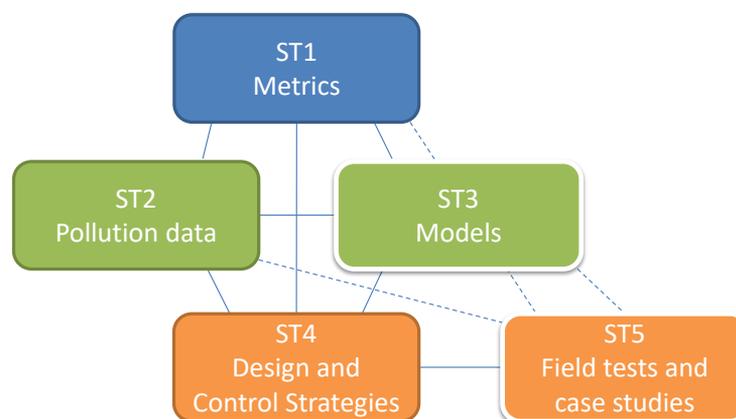
4.2. Ziele, Inhalte und Planung des Annex 68

Ziel dieses Annexes war es, eine wissenschaftliche Basis für die Ableitung von konkreten Empfehlungen für die Planung, Ausführung und Betriebsführung von hochenergieeffizienten Gebäuden mit hoher RLQ zu erarbeiten. Dafür sollten die Grundlagen für eine gekoppelte und somit ganzheitliche Bewertung von Energieverbrauch und RLQ in Gebäuden erarbeitet werden. Dazu zählen u.a. die Identifikation der relevantesten Schadstoffe, detaillierte Abbildung des Emissionsverhaltens und die Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Gebäude (z.B. Sorptionseffekte), des NutzerInnenverhaltens und der Außenluftqualität.

Die Arbeiten im Annex wurden in fünf Arbeitspakete, genannt „Subtasks“ (ST) gegliedert.

- 1) ST 1 - Bewertungsmetrik definieren: Es wurde eine Bewertungsmetrik erarbeitet und definiert, in der die Zusammenhänge zwischen Energieeffizienz und Raumluftqualität bzw. Gesundheit abgebildet werden können.
- 2) ST 2 - Schadstoffquellen beschreiben: Generierung von Modellen und Messdaten zur Beschreibung von Transport, Pufferung und Emission von Schadstoffen in Baustoffen bzw. Gebäuden.
- 3) ST 3 - Modellierung: Identifikation, Erprobung und Weiterentwicklung von Modellierungswerkzeugen zur gekoppelten Berechnung von Energieeffizienz und RLQ.
- 4) ST 4 - Entwicklung eines Leitfadens: Die Ergebnisse aus den anderen Subtasks wurden angewandt, um Strategien und Methoden für eine optimierte Planung, Ausführung und Betriebsführung von energieeffizienten Lüftungssystemen von Wohngebäuden darzustellen.
- 5) ST 5 - Feldmessungen und „Case Studies“: Feldmessungen wurden durchgeführt und existierende Feldstudien dokumentiert, um verschiedene Kontroll- und Designstrategien zu untersuchen und zu optimieren.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitspakete (ST) und deren Zusammenspiel



Die Definitionsphase dieses Projekts startete Anfang 2015 unter Leitung von Carten Rode (DTU, Dänemark). An diesem Projekt beteiligten sich ca. 30 Institutionen aus den folgenden 15 Ländern: Belgien, China, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Japan, Kanada, Korea, Neuseeland, Niederlande, Österreich, Norwegen, Tschechische Republik, Vereinigte Staaten von Amerika, Vereinigtes Königreich. Außerdem nahm Estland im Beobachterstatus teil.

Die Zielgruppe für die Ergebnisse aus dem Annex 68 sind:

- Haustechnikplaner:innen und Architekt:innen
- Hersteller:innen von Lüftungssystemen
- Hersteller:innen von Bauprodukten und Raumausstattungen
- Anbieter:innen von Gebäude- bzw. Heimautomatisationssystemen
- Bauherren, Wohnbauträger und Facility Manager:innen
- Behörden zur Erlassung von Richtlinien, Empfehlungen oder Anforderungen (z.B. in Österreich für die Wohnbauförderung)

Der österreichische Beitrag untersuchte Möglichkeiten einer möglichst detaillierten RLQ-Bewertung mit geringem Aufwand und mit bestehenden Simulationswerkzeugen. Zusätzlich wurden die im Annex erarbeiteten detaillierten Schadstoffmodelle und Bewertungsmetriken angewandt, um innovative Lüftungskonzepte zu untersuchen. Planungshinweise wurden abgeleitet und mögliche innovative Lösungsansätze für die Umsetzung von kompakten und kostengünstigen Wohnraumlüftungssystemen (aus nationalen Forschungsprojekten) im Rahmen der IEA Berichte zielgruppengerecht dokumentiert.

5 Ergebnisse

5.1. Relevante Schadstoffe und Bewertungsmetrik

Im Rahmen von Subtask (ST) 1 wurden jene Schadstoffe identifiziert, welche für die Bewertung der Innenraum-Luftqualität im Niedrigenergie-Wohnbau relevant sind bzw. relevant sein können. Außerdem wurde eine Bewertungsmetrik entwickelt, um die Belastung durch verschiedene Schadstoffe zu einer bzw. weniger Luftqualitäts-Bewertungsgröße(n) zusammenfassen zu können. Die folgenden Kapitel sind eine Zusammenfassung aus dem ST1-Bericht (Abadie & Wargocki, 2017). Eine weitere Zusammenfassung auf Englisch findet man in einer Journalpublikation (Cony Renaud Salis et al., 2017).

Im Rahmen der internationalen Aktivitäten in diesem Projekt wurden:

- typische Konzentrationen in Innenräumen von Niedrigenergie- und Nicht-Niedrigenergie-Wohngebäuden aus verfügbaren Messstudien ermittelt,
- relevante Schadstoffgrenzwerte (ELV) aus verschiedenen Ländern und Organisationen zusammengestellt,
- die relevantesten Innenraumluftschadstoffe für Niedrigenergie-Wohngebäuden identifiziert,
- eine Metrik für die Bewertung der Raumluftqualität unter Berücksichtigung der Langzeit- und Kurzzeit-Exposition entwickelt.

Luftschadstoffe in Innenräumen können in folgende Gruppen kategorisiert werden:

- Gasförmige Schadstoffe
- Feststoffpartikel / Feinstaub
- Biologische Schadstoffe

Wie in Abbildung 2 dargestellt, kann jede Gruppe weiter in Subkategorien eingeteilt werden. Die Gruppe der halbflüchtigen organischen Verbindungen (semi-volatile organic compounds, SVOC) muss dabei als eigene Kategorie zwischen den flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) und dem Feinstaub angesiedelt werden.

5.1.1. Typische Konzentration in Innenräumen von Wohngebäuden

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden jene Studien identifiziert, bei denen Messdaten zu Raumluftqualität im Wohnbau erhoben wurden. Dabei wurde unterschieden, ob die jeweiligen Studienautoren die Wohngebäude als Niedrigenergiehaus (low energy, LE) oder nicht (non-low energy, Non-LE) bezeichneten. Es wurden Veröffentlichungen in peer-review Journalen sowie Ergebnisse aus nationalen Forschungsprojekten aus den Jahren 2006 – 2016 herangezogen. Insgesamt wurde auf Messergebnisse aus 16 Studien mit über 20.000 Haushalten als Nicht-Niedrigenergiehäuser bzw. aus sechs Studien mit knapp 3000 Haushalten als Niedrigenergiehäuser zurückgegriffen. Details, siehe (Abadie & Wargocki, 2017).

Abbildung 2: Kategorisierung der verschiedenen Luftschadstoffe in Innenräumen. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

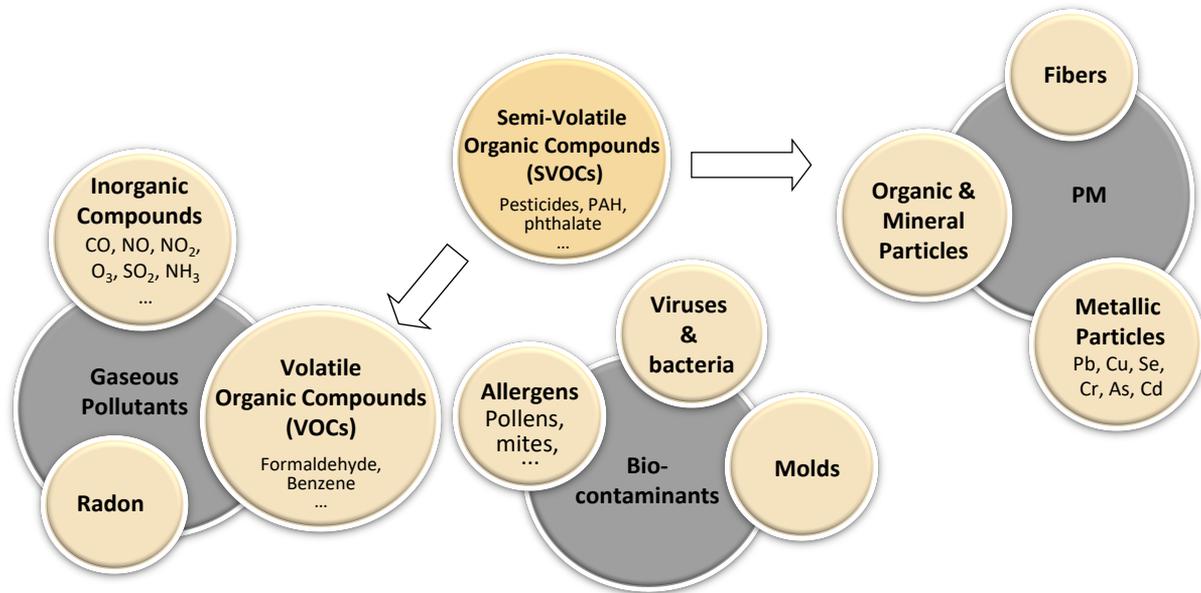


Abbildung 3: Mittlere gemessene Schadstoffkonzentration in Niedrigenergie- (Low-E) und Nicht-Niedrigenergiehäusern (Non-Low-E) aus den untersuchten Studien. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

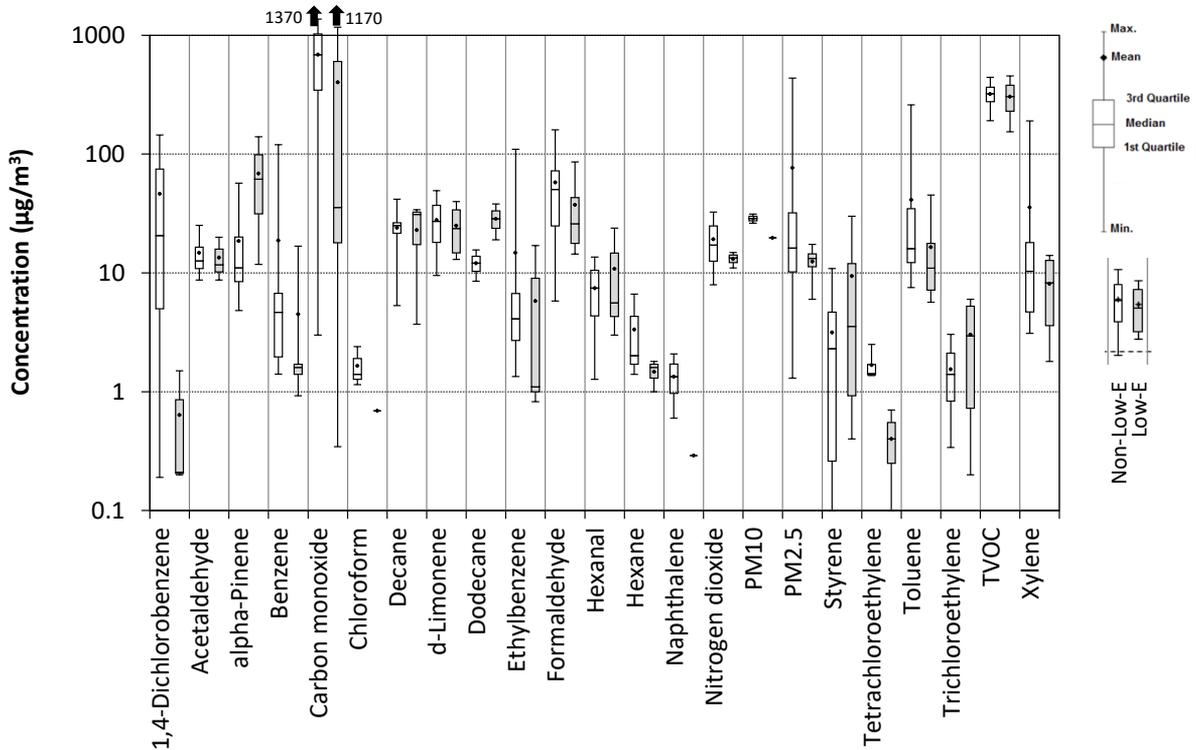


Abbildung 3 zeigt die jährlichen Konzentrationsmittelwerte (und weitere statistische Indikatoren) der relevantesten 23 Raumluftschadstoffe. In Niedrigenergiehäusern sind 17 der 23 Schadstoffkonzentrationen niedriger als bei Nicht-Niedrigenergiehäusern. Vor allem bei Kohlenmonoxid, 1,4-Dichlorobenzol und Toluol ist die Reduktion der mittleren Konzentration

signifikant. Bei drei Schadstoffen wurde höhere Werte in Niedrigenergiehäusern gemessen, nämlich Pinene, Dodecan und Styrol.

Unterschiede zeigten sich auch in einer länderweisen Betrachtung, vor allem in China und Japan, wo in Niedrigenergiehäusern die jahresmittlere Konzentration für mehrere Schadstoffe höher lag als in den Nicht-Niedrigenergiehäusern. Dies waren Formaldehyd, Pinene, Decan, Dodecan, Propanal, Crotonaldehyde, Trichloroethen und Pentanal.

Es sei angemerkt, dass wichtige Einflussfaktoren wie Schadstoffquellstärke, Alter des Gebäudes, Außenluftqualität und Luftwechselraten die Schadstoffkonzentrationen in Innenräumen beeinflussen, diese aber bei diesem einfachen Vergleich unberücksichtigt blieben. Es sei auch angemerkt, dass eine österreichische Studie, bei der die Raumluftqualität in Niedrigenergiehäusern mit jener in „Standardhäusern“ verglichen wurde (Tappler et al., 2014), aus zeitlichen Gründen in dieser Literaturrecherche unberücksichtigt blieb.

Um die gesundheitliche Belastung durch die verschiedenen Luftschadstoffe bewerten zu können, müssen neben der Schadstoffkonzentration auch die zugehörigen Expositionsgrenzwerte betrachtet werden.

5.1.2. Expositionsgrenzwerte

Es gibt verschiedene Arten von Expositionsgrenzwerte (exposure limit value, ELV): Toxizitätsgrenzwerte (toxicity reference value, TRV) und Richtwerte für Innenraumluft (indoor air guideline values, IAGV). TRVs werden für viele verschiedene Stoffe durch Tierversuche bestimmt und für die Festlegung der maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) bzw. der Arbeitsplatzgrenzwerte (occupational exposure limits, OELs) durch die Multiplikation mit Sicherheitsfaktoren (i.d.R. Gesamtfaktor 100) herangezogen. Sie sind für eine tägliche Exposition über einen Zeitraum von 8 Stunden ausgelegt. Hingegen sind Innenraumluft-Richtwerte (IAGVs) für alle Innenraumsituationen, also auch für das Wohnen, und längere Expositionsdauer, anwendbar. Diese Werte werden auf der Grundlage von epidemiologischen Studien ermittelt, in denen Gesundheitssymptome in Bevölkerungsgruppen beobachtet wurden, die in Innenräumen bestimmten Schadstoffen ausgesetzt sind. Richtwerte für Innenraumluft gibt es für wenige Schadstoffe, siehe auch (Baldinger et al., 2011). Diese sollten nicht mit dem sogenannten „Niedrigste interessierende Konzentrationswert“ (NIK-Wert) bzw. lowest concentration of interest (LCI) verwechselt werden. Die LCI-Werte werden zur Bewertung von Schadstoffemissionen aus Bauprodukten in die Raumluft herangezogen. Sie wurden durch deutsche und französische Behörden entwickelt und werden nun in einer europäischen LCI-Liste harmonisiert. Der aktuelle Stand dazu kann auf der Webseite der Europäischen Kommission (https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en) nachgelesen werden.

Für dieses Projekt wurde die Expositionsgrenzwerte aus den international verfügbaren Richtwerten für Innenraumluft (IAGVs) kompiliert. Dabei wurde zwischen Expositionsgrenzwerten für eine Langzeit- oder Kurzzeit-Betrachtung unterschieden. Es wurden die Richtwerte von folgenden Ländern und Organisation herangezogen: World Health Organization (WHO), Europäische Union (EU), Österreich, Belgien, Kalifornien, Kanada, China, Frankreich, Deutschland, Hongkong, Japan, Korea, Portugal und Vereinigtes Königreich (UK). Bemerkenswert ist, dass die Richtwerte sich je nach Land oder Organisation für bestimmte Schadstoffe erheblich unterscheiden (siehe Abbildung 4). Für die

Ausarbeitung einer Bewertungsmetrik im Rahmen dieses Projekts wurden die jeweils niedrigsten IAGV-Werte aus den international verfügbaren Quellen herangezogen, um Expositionsgrenzwerte (ELV) für Langzeit- und Kurzzeitfolgen zu bestimmen. Die Langzeit-ELVs definieren somit Konzentrationen, bei denen gesundheitliche (chronische) Folgen bei einer langfristigen Exposition (Monate bis Jahre) auftreten können und Kurzzeit-ELVs jene, bei denen gesundheitliche (akute) Folgen bei einer kurzfristigen Exposition (Stunden bis Tag) auftreten können.

Abbildung 4: Bandbreite der Langzeit-Expositionsgrenzwerte für Auswahl an Schadstoffe entnommen aus verschiedenen internationalen Quellen (>6) für Richtwerte für Innenraumluft (IAGV). Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

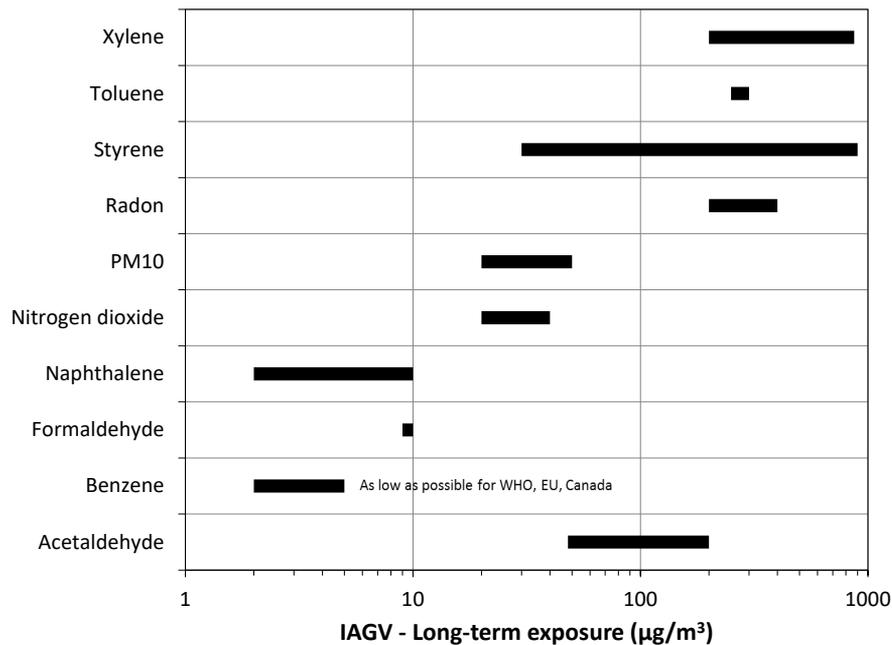


Tabelle 2: Liste der in Annex 68 verwendeten Langzeit- und Kurzzeit Expositionsgrenzwerte (ELV) abgeleitet aus international verfügbaren Richtwerten für Innenraumluft (IAGV) Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

Schadstoffe	Langzeit ELV	Kurzzeit ELV
Acetaldehyd [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	48	4600
Acrolein [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.35	6.9
Acrylnitril [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	5	-
Alfa-Pinen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	200	-
Ammoniak [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	70	3200
Benzol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.2	110
Kohlendioxid [ppm]	-	1000
Kohlenstoffdisulfid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	800	6200
Kohlenmonoxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	100
Tetrachlorkohlenstoff [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	40	1900
Chlorbenzol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1000	-
Chloroform [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	300	150
Dichlormethan [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	200	-
Ethylbenzol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	3800

Schadstoffe	Langzeit ELV	Kurzzeit ELV
Formaldehyd [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	9	123
Methylethylketon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	13000
Naphthalin [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2	-
Stickstoffdioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	470
Ozon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	180
Pentachlorphenol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	100	-
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	50
PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	10	25
Radon [Bq/m^3]	200	400
Styrol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	30	21000
Schwefeldioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	660
Tetrachlorethylen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	100	1380
Toluol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	250	37000
Trichlorethylen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2	-
TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	600
Vinylchlorid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	180000
Xylol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	200	22000

Anmerkung: Kohlendioxid wurde hier nicht als direkter Schadstoff, sondern als Indikator für Lüftungseffizienz bzw. Raumluftqualität bei Personenanwesenheit betrachtet und dementsprechend der ELV festgelegt.

5.1.3. Auswahl der relevantesten Schadstoffe

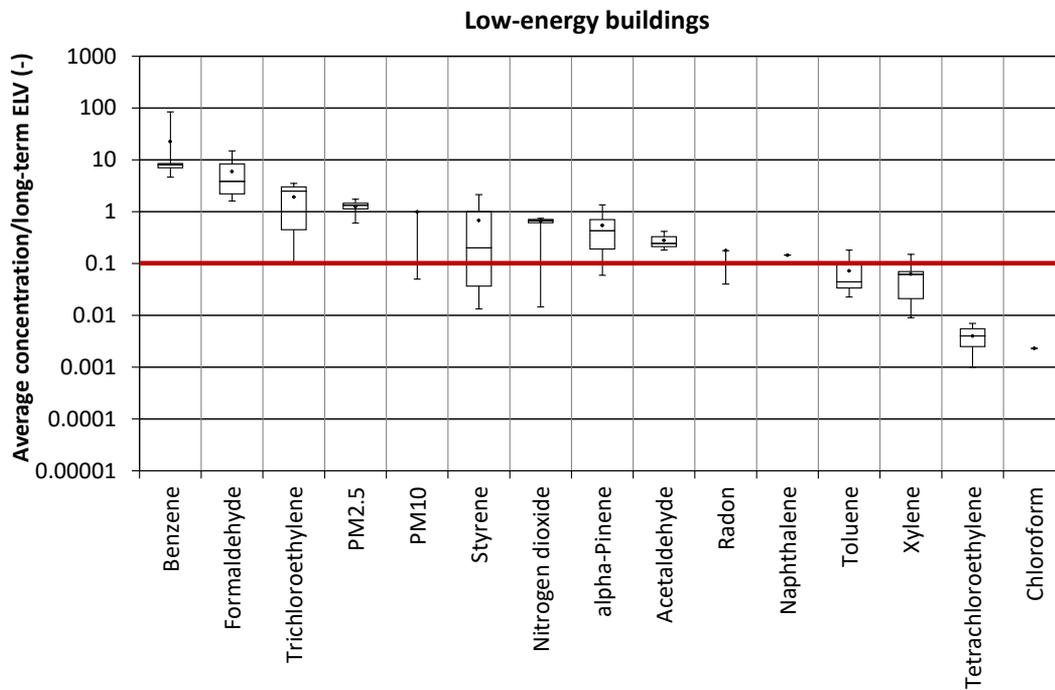
Um eine finale Auswahl der (im Wohnbau) relevantesten Schadstoffe in Niedrigenergiehäusern zu treffen, wurden die in den Monitoringstudien gemessenen Konzentrationen (siehe 5.1.1) mit den jeweiligen Expositionsgrenzwerten ELV_i (siehe Tabelle 2) verglichen. Für die Identifikation der Langzeit-relevanten Schadstoffe wurde der Jahresmittelwert der Messungen durch den jeweiligen Expositionsgrenzwert dividiert. Für Identifikation der Kurzzeit-relevanten Schadstoffe wurde das Jahresmaximum durch den jeweiligen Expositionsgrenzwert dividiert. Diese Verhältnisse wurden für die verschiedenen Messobjekte (Haushalte) bestimmt. Entscheidend für die Auswahl der Schadstoffe war das dritte Quartil (75% Perzentil). Es wurde nicht Mittelwert oder Median verwendet, um auch „unwahrscheinlichere“ Fälle mit höheren Konzentrationen zu berücksichtigen. Zusätzlich kam bei der Auswahl der Schadstoffe ein „Sicherheitsfaktor“ von 10 zur Anwendung, indem jene Schadstoffe gewählt wurden, bei denen das Verhältnis zwischen Schadstoffkonzentration und Expositionsgrenzwert höher als 0,1 war. Das Auswahlkriterium ist in Gleichung (1) bzw. (2) zusammengefasst.

$$\text{Langzeit-relevant: } \frac{C_{avg}^{P75}}{ELV_i} \geq \sim 0,1 \quad (1)$$

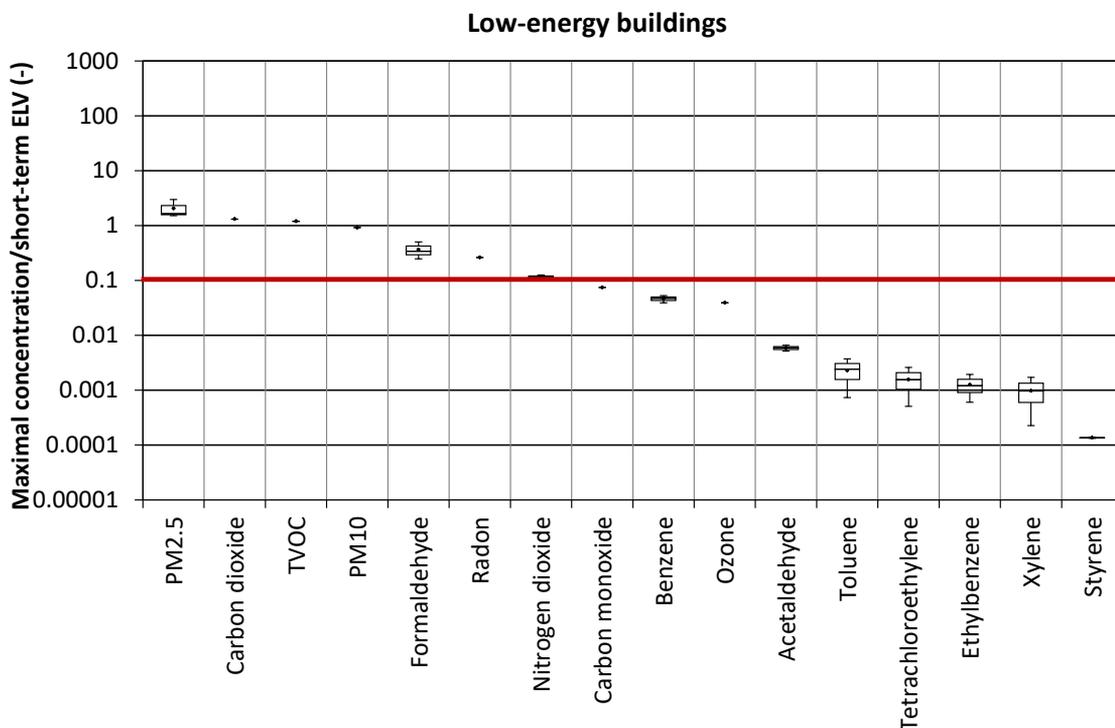
$$\text{Kurzzeit-relevant: } \frac{C_{max}^{P75}}{ELV_i} \geq \sim 0,1 \quad (2)$$

Diese Auswertung wurde für Niedrigenergiehäuser und Nicht-Niedrigenergiehäuser getrennt durchgeführt. Bei den Niedrigenergiegebäuden lagen die Langzeit-relevanten Verhältnisse bei den folgenden 12 Schadstoffen über 0,1: Acetaldehyd, Alfa-Pinen, Benzol, Formaldehyd, Naphthalin, Stickstoffdioxid, PM10, PM2,5, Radon, Styrol, Toluol und Trichlorethylen (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Verhältnis der in Niedrigenergiehäusern gemessenen jahresmittleren Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Langzeit-Exposition.
Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

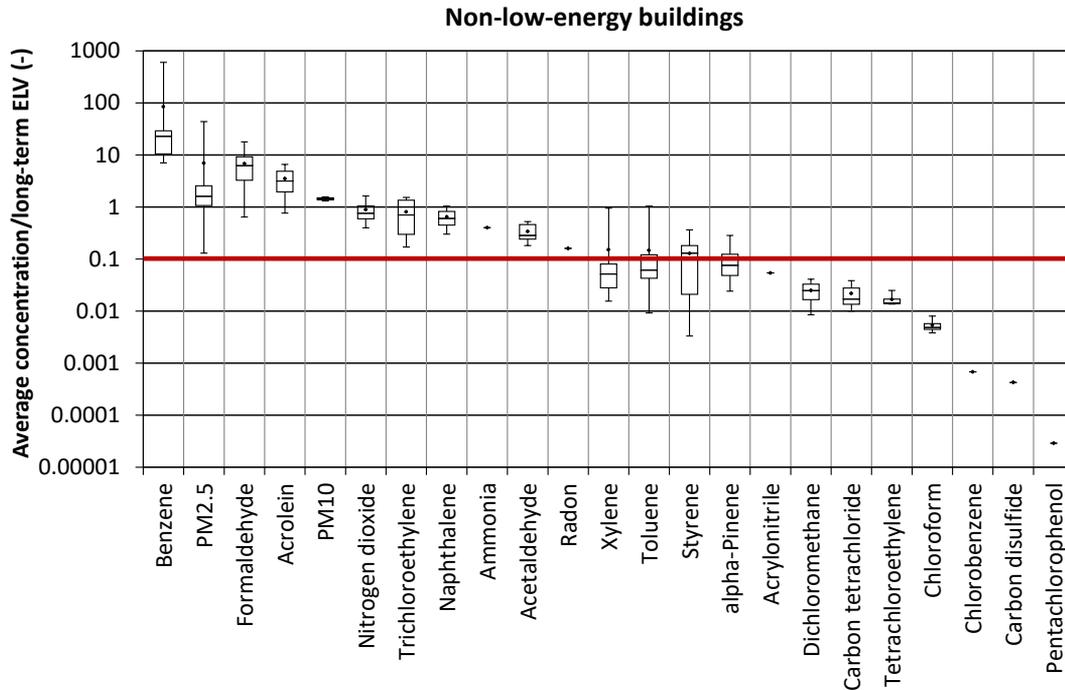


Bei den Nicht-Niedrigenergiehäusern wurden drei weitere Schadstoffe identifiziert: Acrolein, Ammoniak und Xylol (3. Quartil sehr nahe 0,1 das Maximum deutlich darüber, siehe Abbildung 5Abbildung 7: Verhältnis der in Niedrigenergiehäusern gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Kurzzeit-Exposition.
Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)



).

Abbildung 6: Verhältnis der in Nicht-Niedrigenergiehäusern gemessenen jahresmittleren Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Langzeit-Exposition.
Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)



Folgende Kurzzeit-relevante Verhältnisse waren bei den Niedrigenergiehäusern über 0,1: Formaldehyd, Kohlendioxid, Stickstoffdioxid, PM10, PM2,5, Radon und TVOC (siehe Abbildung 7). Bei den Nicht-Niedrigenergiehäusern waren es: Acetaldehyd, Alfa-Pinen, Benzol, Formaldehyd, Kohlendioxid, Naphthalin, Stickstoffdioxid, PM10, PM2,5, Radon, Styrol, Toluol und Trichlorethylen (siehe Abbildung 8). Die Unterschiede sind vor allem darauf zurückzuführen, dass die Spitzenkonzentrationen vieler Verbindungen in den Niedrigenergiehäusern niedriger sind.

Abbildung 7: Verhältnis der in Niedrigenergiehäusern gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Kurzzeit-Exposition.
Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

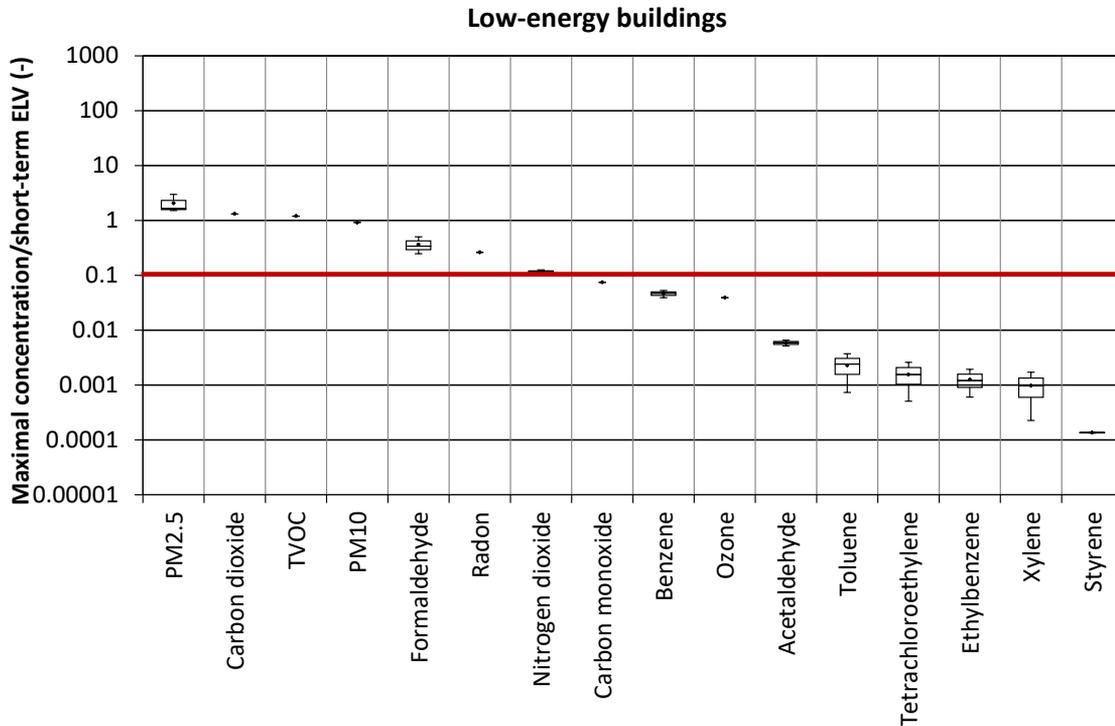
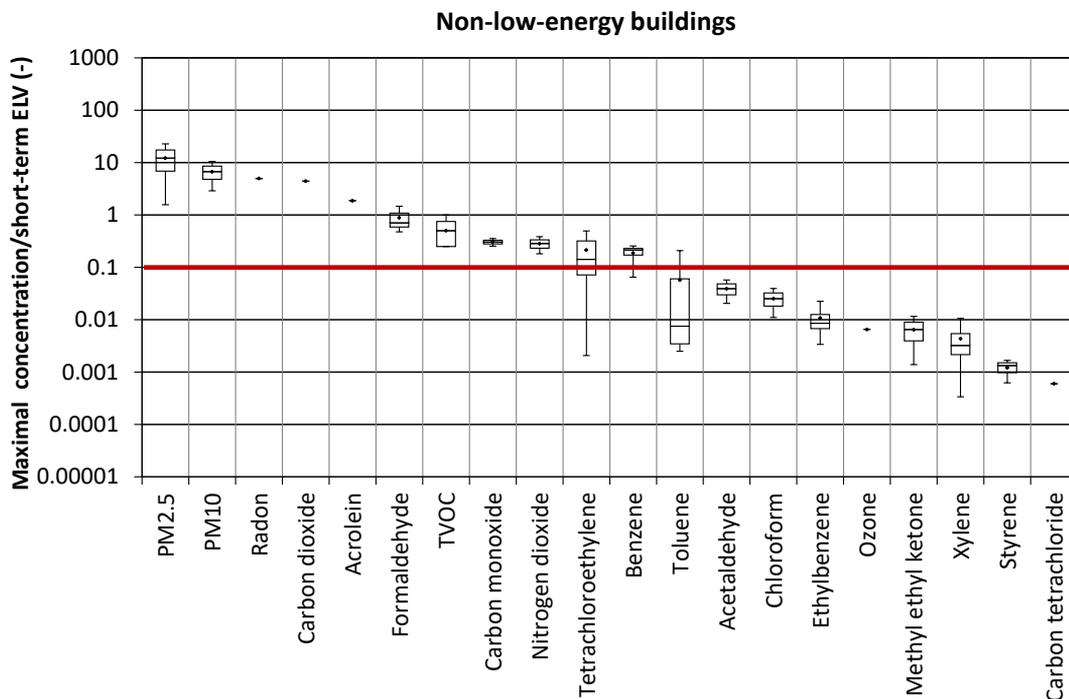


Abbildung 8: Verhältnis der in Nicht-Niedrigenergiehäusern gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Kurzzeit-Exposition.
Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)



Abweichend von den oben beschriebenen Auswahlverfahren wurde Acrolein auch als möglicherweise relevant für Niedrigenergiehäuser erachtet und der Auswahl hinzugefügt, da es in diversen Studien als Schadstoff mit sehr hoher Priorität bewertet wurde (Kirchner et al., 2006; Logue et al., 2012). Schimmel bzw. Schimmelpilzsporen wurden aufgrund ihrer bekannten Auswirkungen

auf die Gesundheit ebenfalls aufgenommen (WHO, 2009). Kohlendioxid hat, wie oben angemerkt, einen Sonderstatus. Bei Konzentrationen unter oder um den definierten Expositionsgrenzwert ist es kein Schadstoff, sondern ein Indikator für die Lüftungseffizienz und für eine Vielzahl von Geruchs- und Schadstoffen, die mit der Anwesenheit von Personen einhergehen.

Tabelle 3 zeigt die Liste an relevantesten Schadstoffen für Niedrigenergie-Wohngebäude, wie sie im Rahmen des IEA EBC Annex 68 nach den oben beschriebenen Verfahren ausgewählt wurden.

Tabelle 3: Liste der in diesem Projekt ausgewählten und für Niedrigenergie-Wohngebäude relevantesten Schadstoffe samt den zugehörigen Expositionsgrenzwerten (ELVs). Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)

	Langzeit Exposition			Kurzzeit Exposition		
	ELV	Betrachtungszeitraum	Source	ELV	Betrachtungszeitraum	Source
Acetaldehyd [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	48	1 year	Japan	-	-	-
Acrolein [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.35	1 year	USA-Kalifornien	6.9	1 h	Frankreich
Alfa-Pinen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	200	1 year	Deutschland	-	-	-
Benzol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.2	lebenslang (karzinogener Risikograd: 10^{-6})	Frankreich	-	-	-
Formaldehyd [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	9	1 year	USA-Kalifornien	123	1 h	Kanada
Naphthalin [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2	1 year	Deutschland	-	-	-
Stickstoffdioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	1 year	Frankreich	470	1 h	USA-Kalifornien
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	1 year	WHO	50	24 h	WHO
PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	10	1 year	WHO	25	24 h	WHO
Radon [Bq/m^3]	200	1 year	Österreich, Kanada	400	8 h	Österreich, China, Portugal
Styrol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	30	1 year	Deutschland	-	-	-
Toluol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	250	1 year	Portugal	-	-	-
Trichlorethylen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2	lebenslang (karzinogener Risikograd: 10^{-6})	Frankreich	-	-	-
TVOOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	-	-	400	8 h	Japan, Korea
Schimmelpilz [CFU/m^3]	200	1 year	EU	-	-	-
Kohlendioxid [ppm]	-	-	-	1000	8 h	Hong-Kong, Korea

5.1.4. Bewertungsmetrik

Nach der Auswahl der relevantesten Schadstoffe wurde der Frage nachgegangen, wie die verschiedenen Schadstoffe zu einer Bewertung der Raumluftqualität zusammengefasst werden können. Details zu den Überlegungen können in (Abadie & Wargocki, 2017) nachgelesen werden. Zusammenfassend wurden insgesamt drei Bewertungsindizes entwickelt. Die Bewertung der Langzeit-Exposition wurde mit Hilfe der oben definierten Expositionsgrenzwerte (ELV) und mit Hilfe der sogenannten DALY-Methode vorgenommen.

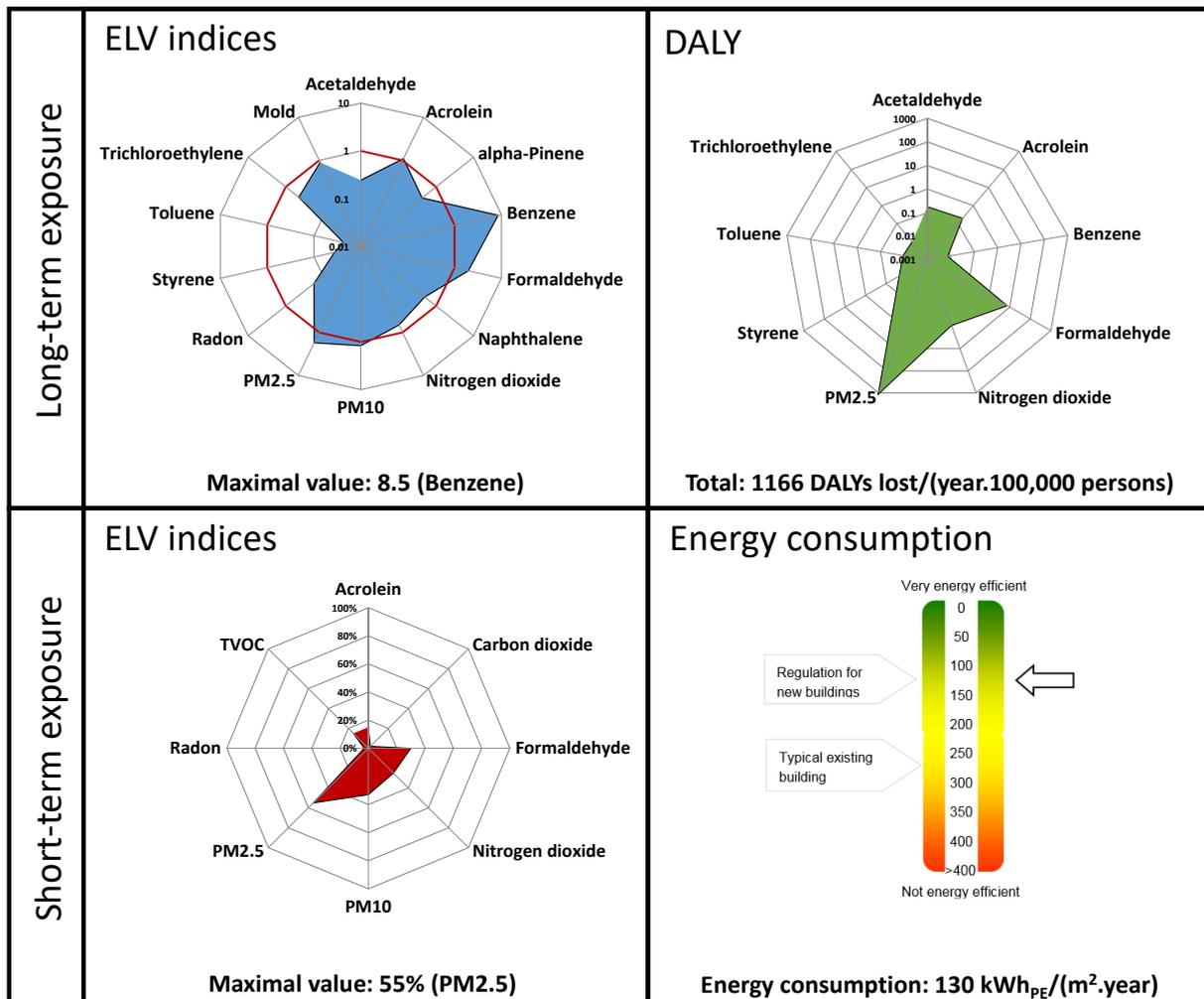
Langzeit-ELV: Der erste Bewertungsindex zielt auf die Einhaltung der Langzeit-ELVs ab, und wird, analog zu dem oben beschriebenen Auswahlverfahren, mit Hilfe des Verhältnisses zwischen der jährlichen mittleren Konzentration und dem ELV für jeden Schadstoff berechnet. Falls keine Jahresdaten vorhanden sind, kann i.d.R. davon ausgegangen werden, dass die jahresmittlere Konzentration mit einigen wenigen saisonalen kürzeren Messreihen (z.B. je 1-2 Wochen pro Jahreszeit) mit guter Näherung bestimmt werden kann. Die gebildeten ELV-Indizes werden in einem Spinnendiagramm (siehe Abbildung 9, links oben) dargestellt. Außerdem wird aus allen ELV-Indizes der Maximalwert als eine Einzahl-Bewertungsgröße ausgegeben. Die Begründung, warum für die Aggregation von den unterschiedlichen Schadstoffen die Maximum-Funktion anstatt einer Summen- oder anderen Funktion gewählt wurde, kann in (Abadie & Wargocki, 2017) nachgelesen werden.

DALY-Bewertung: Der DALY-Index zielt darauf ab, die Auswirkungen auf die Gesundheit durch eine Langzeit-Exposition zu bewerten. DALY steht für „disability adjusted life years“, also „Anzahl der Lebensjahre mit Beeinträchtigungen“, und wird genutzt, um die Auswirkungen einer langfristigen Schadstoffexposition in „verlorenen gesunden Lebensjahren“ auszudrücken. Details zur DALY-Berechnung können in diversen Literaturstellen nachgelesen werden, z.B. (Logue et al., 2012). Unter der Annahme, dass die gesundheitlichen Folgen durch die verschiedenen Schadstoffe unabhängig sind und sich nicht gegenseitig beeinflussen, werden die DALY's der verschiedenen Schadstoffe zu einer Bewertungsgröße addiert (siehe Abbildung 9, rechts oben).

Kurzzeit-ELV: Der dritte Index bewertet die Kurzzeit-Exposition mit Hilfe der ELVs. Hier werden jene Betrachtungszeiträume (meist 1 Stunde, siehe Tabelle 3) gezählt, bei denen die über den Betrachtungszeitraum gemittelte Schadstoffkonzentration den jeweiligen Kurzzeit-ELV überschreitet. Die Anzahl der Betrachtungszeiträume mit ELV-Überschreitung wird auf die Gesamtanzahl der beobachteten Betrachtungszeiträume normiert. Es ergibt sich somit ein Wert zwischen 0 und 100% für jeden Schadstoff (siehe Abbildung 9, links unten). Wie beim Langzeit-ELV wird auch hier der Maximalwert aus den verschiedenen Schadstoffen als Einzahl-Bewertungsgröße ausgegeben.

Ein Excel-Tool mit der hier beschriebenen Bewertungsmethode wurde umgesetzt und kann von der [Projektwebseite des IEA EBC Annex 68](#) (Rode, 2020) unter „Results/Tools“ heruntergeladen werden. Darin können Messdaten oder Simulationsdaten eingegeben werden, um die drei Bewertungsindizes als Ergebnis samt graphischer Darstellung zu erhalten.

Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung der im IEA EBC Annex 68 entwickelten Raumlufqualitäts-Bewertungsmetrik. Links oben: Darstellung der Langzeit-ELV-Indizes für alle relevanten Schadstoffe und Maximalwert; Rechts oben: Darstellung der gesundheitlichen Belastung aufgrund Langzeit-Exposition mit Hilfe der DALY-Kennzahl für relevante Schadstoffe und gesamt; Links unten: Darstellung der Kurzzeit-ELV-Indizes für alle relevanten Schadstoffe und Maximalwert; Rechts unten: Darstellung des lüftungsinduzierten Energieverbrauchs. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)



5.2. Schadstoffquellen-Modelle

5.2.1. Formaldehyd-Emissionen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte

Die folgenden empirischen Formeln für die temperatur- und feuchteabhängigen Schadstoffmodellierung wurden im Rahmen einer Masterarbeit an der University of Gent, Belgien durch Klaas De Jonge (De Jonge, 2018), einem Teilnehmer im Projekt IEA EBC Annex 68 recherchiert und für die Integration in Gebäudesimulationsmodellen aufbereitet. Im Rahmen der österreichischen Teilnahme am Projekt wurden diese inhaltlich überprüft, getestet und mit Hilfe von (von anderen Projektteilnehmern zur Verfügung gestellten) Messdaten aus bewohnten Gebäuden kalibriert. Im Folgenden werden die im Rahmen einer Gebäudesimulation für eine Modellierung relevanten Formeln und Parameter zusammengefasst.

Die Emissionsrate aus einem Baumaterial kann gemäß folgender empirischer Formel (Xiong et al., 2013) als Funktion der Zeit abgeschätzt werden (Formelzeichen siehe Tabelle 4).

$$E(t) = 2.1 \frac{D_m C_0}{\delta} e^{(-2.36 \frac{D_m t}{\delta^2})} \quad (3)$$

Der Diffusionskoeffizient D_m kann in Abhängigkeit der Temperatur T folgendermaßen dargestellt werden (Deng et al., 2009) (Formelzeichen siehe Tabelle 4 und Tabelle 5):

$$D_m(T) = d_1 T^{1.25} e^{(-\frac{d_2}{T})} \quad (4)$$

Die im Material zu Beginn enthaltene und emittierbare Formaldehyde-Konzentration bezogen auf das Materialvolumen wurde in der Arbeit von (Liang et al., 2016) basierend auf Messdaten, in Abhängigkeit der Temperatur- und Feuchtebedingungen, denen das Material ausgesetzt ist, wie folgt ausgedrückt (Formelzeichen siehe Tabelle 4 und Tabelle 5):

$$C_0(T, x) = (1 + C_1 x) C_2 T^{-0.5} e^{(-\frac{C_3}{T})} \quad (5)$$

Tabelle 4: Auflistung von Formelzeichen, Einheiten und Bezeichnungen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$E(t)$	[mg/m ² s]	Emissionsrate
D_m	[m ² /s]	Diffusionskoeffizient
C_0	[mg/m ³]	Emittierbare Anfangskonzentration
δ	[m]	Materialdicke
T	[K]	Temperatur
d_1	[m ² /(s K ^{1.25})]	Material-Schadstoff-Parameter
d_2	[K]	Material-Schadstoff-Parameter
x	[g/kg]	Absolute Feuchte
C_1	[kg/g]	Material-Schadstoff-Parameter
C_2	[mg/m ³ K ^{0.5}]	Material-Schadstoff-Parameter
C_3	[K]	Material-Schadstoff-Parameter

In (Liang et al., 2016) (siehe auch „supplemental materials“) wurden die erforderlichen Materialparameter für MDF-Holzplatten experimentell bestimmt (siehe Tabelle 5). Hinweis: In (Liang et al., 2016) wurden die Parameter C_1 bis C_3 auch in Abhängigkeit der relativen Feuchte bestimmt. Hier wurden jene für die Formulierung in Abhängigkeit der absoluten Feuchte herangezogen.

Tabelle 5: Materialparameterwerte für MDF-Holzplatten aus (Liang et al., 2016) bezogen auf die Formulierung mit Hilfe der absoluten Feuchte

Formelzeichen	Wert
d_1	7.14 * 10 ⁻¹⁷ m ² /(s K ^{1.25})
d_2	284 K
C_1	0.19 kg/g
C_2	1.0 * 10 ¹⁷ mg/m ³ K ^{0.5}
C_3	6640 K

Soll die so bestimmte Emissionsrate „wohnflächenspezifisch“ anstatt „materialflächenspezifisch“ ausgedrückt werden, bedarf es eines Kalibrierfaktors, um bei vorgegebenen Raumbedingungen (z.B. 20°C, 6 g/kg) zu Beginn (t=0) die gewünschte mittlere Konzentration zu erhalten.

Aus den Daten einer Feldmesskampagne in zehn französischen Niedrigenergiehäusern (Guyot et al., 2015) wurde die mittlere Formaldehyd-Konzentration ca. 1-2 Jahre nach Bezug an zwei Messstellen (Wohnzimmer und Schlafzimmer) während einer Winterwoche mit Hilfe „passiver Sampler“ bestimmt. Unter Berücksichtigung der auf Basis von Messungen bestimmten Luftwechselrate wurden die Formaldehyd-Emissionsraten wohnflächenspezifisch bestimmt, siehe Tabelle 6. Damit konnte das hier beschriebene Formaldehyd-Emissionsmodell an die Emissionsrate in einer realen Wohnsituation angepasst werden.

Wird das Formaldehyd-Emissionsmodell auf Basis dieser Messergebnisse kalibriert, ergeben sich folgende Kalibrierfaktoren (Tabelle 7) für die Formaldehyd-Emissionsrate. Diese Faktoren drücken aus, wie viele Fläche emittierendes Material gemäß dem beschriebenen Modell pro Wohnfläche vorhanden sind.

Tabelle 6: Mittlere wohnflächenspezifische Formaldehyd-Emissionsraten (Guyot et al., 2015)

Bezeichnung	Wert
Haus mit geringstem Wert	4.5 µg/(hm ²)
Median	12 µg/(hm ²)
Haus mit höchstem Wert	24 µg/(hm ²)

Tabelle 7: Kalibrierfaktor um das materialflächenspezifische Emissionsmodell an ein wohnflächenspezifisches Modell anzupassen.

Bezeichnung	Wert
Niedrige Emissionen	0.12 m ² /m ²
Median	0.32 m ² /m ²
Hohe Emissionen	0.64 m ² /m ²

5.2.2. Modellierung der größenabhängigen Feinstaubpartikel-Konzentration

Um verschiedene Lüftungskonzepte in Bezug auf die resultierende Feinstaubexposition in Innenräumen bewerten zu können, wurde ein detailliertes Modell einer typischen Wohneinheit eines energieeffizienten Gebäudes (sehr luftdicht) in der Software CONTAM erzeugt. Details zum Wohnungsmodell und zur Simulationsstudie, die mit Hilfe des Modells durchgeführt wurde, können in (Rojas, 2019) nachlesen werden. Im Folgenden werden die relevanten Auszüge mit weiteren Informationen mit Bezug „Modellierung der Feinstaubpartikelkonzentration“ zusammengefasst.

Bei der Modellierung und Simulation von Feinstaubkonzentrationen in Innenräumen müssen neben innerer Emissionsquellen weitere Aspekte berücksichtigt und modelliert werden. Dazu gehören Außenluftkonzentration, Abscheidung durch Filter bzw. bei der Infiltration durch Gebäudeundichtheiten und die Absetzung durch Gravitation. Da die relevanten Phänomene stark von der Größe der Partikel abhängig sind, sollte die Größenabhängigkeit bei der Modellierung berücksichtigt werden. Bei dem hier vorgestellten Feinstaub (PM) Modell wurden daher 21 Größenklassen zwischen 0,001 µm und 10 µm generiert.

Außenluftkonzentration: Man kann mittlerweile verschiedene Datenquellen zur Feinstaubbelastung der Außenluft finden. Zum Teil handelt es sich dabei um offene Datenbanken von bekannten nationalen Umweltorganisation oder um cloud-basierte „Citizen Science“ Projekte, wie z.B.

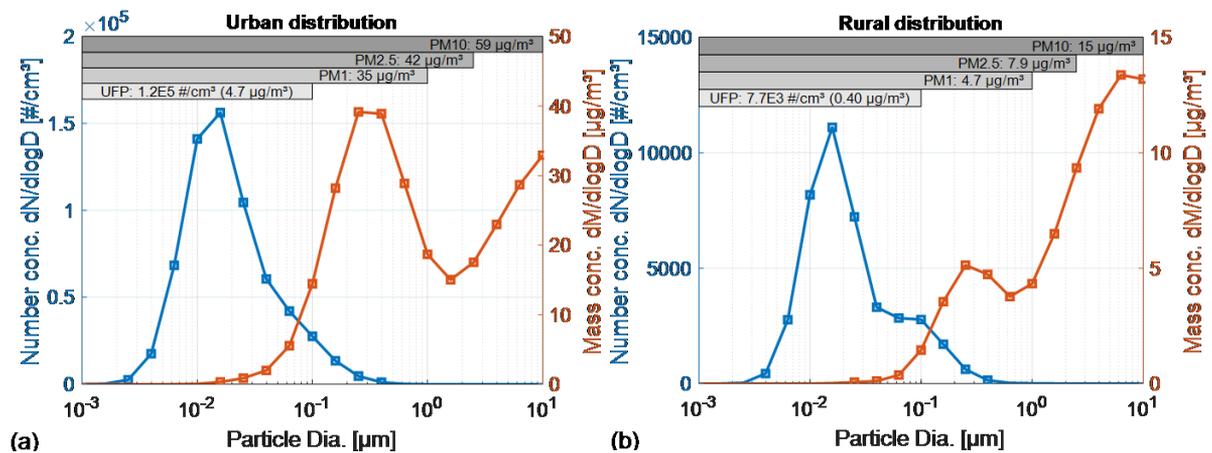
- Umweltbundesamt Österreich: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/daten-luft>
- Umweltbundesamt Deutschland: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten>
- Bayrisches Landesamt für Umwelt: <https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/messwertarchiv/index.htm>
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft>
- USA-EPA: <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/download-daily-data>
- Citizen Science Projekt “Luftdaten.info”: <http://deutschland.maps.sensor.community/#6/51.165/10.455>
- Citizen Science Projekt “openSenseMap”: <https://opensensemap.org/>

Bei den genannten Datenbanken stehen meist nur PM10 oder bestenfalls PM2.5 Messwerte zur Verfügung. Die vereinfachte Definition von PM10 bzw. PM2.5 beinhaltet die Masse aller Partikel kleiner gleich 10 µm bzw. 2,5 µm. Für eine detaillierte größenabhängige Modellierung bedarf es aber auch einer Größenverteilung der Feinstaubkonzentration. Die für eine wissenschaftlich fundierte Messung erforderlichen Messgeräte sind komplex und kostenintensiv in Anschaffung, Betrieb und Wartung. Daher stehen solche Daten meist nur aus wissenschaftlichen Messkampagnen aus begrenzten Zeiträumen zur Verfügung.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Generierung eines Datensatzes über den zeitlichen Verlauf der Feinstaubbelastung der Außenluft für bestimmte Standorte mit entsprechender Auflösung der Größenverteilung, wäre die Kombination aus oben genannten Messdaten aus Datenbanken mit den zu erwartenden Größenverteilungen aus wissenschaftlichen Studien. Da sich die Größenverteilung je nach Schadstoffquelle, somit auch je Standort und weiteren Umweltparametern unterscheiden kann, wären für diese Art der Datengenerierung entsprechendes Knowhow und genügend Zeitressourcen erforderlich. Dies konnte im Rahmen dieses Projekt nicht geleistet werden, darum wurde auf Literaturwerte aus wissenschaftlichen Studien ohne zeitliche Variation zurückgegriffen.

Aus (Riley et al., 2002; Ruprecht, 1993) wurde die Partikelverteilung bzw. deren beschreibende Parameter, für städtische (urban) und ländliche (rural) Gebiete entnommen (Abbildung 10). Mit Hilfe des webbasierten Software-Tools des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technologie (NIST, n.d.-b) wurden die Datensätze mit der Partikelverteilung für die Nutzung in der Software CONTAM generiert. Siehe Anhang A.1 und Anhang A.2.

Abbildung 10: Partikelgrößenverteilung für städtische (a) und ländliche (b) Gebiete mit Daten aus (Ruprecht, 1993). Die Diagramme zeigen die log-normalisierten Verteilungen für Partikelanzahl und Massenkonzentration unter der Annahme einer Partikeldichte von 1 g/cm^3 . Die Integralwerte für UFP ($\leq 0,1 \mu\text{m}$), PM1 ($\leq 1 \mu\text{m}$), PM2,5 ($\leq 2,5 \mu\text{m}$), PM10 ($\leq 10 \mu\text{m}$) sind ebenfalls in den Diagrammen dargestellt. Grafiken aus (Rojas, 2019).



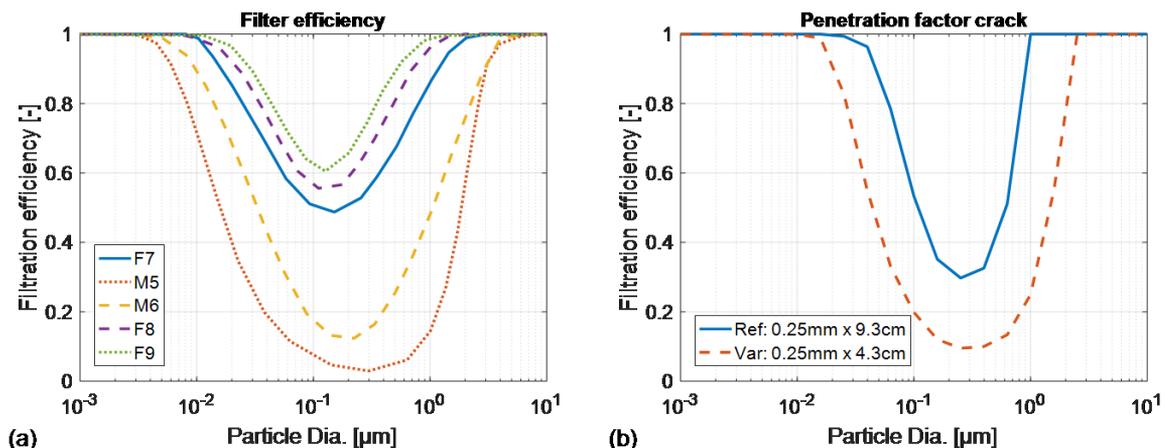
Es sei angemerkt, dass die Konzentrationswerte für den Referenzfall (PM2,5: $42 \mu\text{g/m}^3$) nicht unbedingt einen typischen langfristigen Durchschnittswert für eine europäische Stadt darstellen. So ist beispielsweise der jährliche PM2,5-Durchschnitt in österreichischen Städten rückläufig und lag 2017 bei etwa $15 \mu\text{g/m}^3$. Die verwendete Verteilung kann jedoch sehr wohl eine kurzfristige Situation in einem städtischen Gebiet in Europa oder eine langfristige Situation in einer mäßig verschmutzten asiatischen Stadt darstellen.

Filterabscheidegrad: Die Effizienz von Lüftungsfiltren wird in der Regel nach ASHRAE 52.2, EN 779 oder der neuen Norm ISO 16890 eingestuft. Diese Normen definieren Prüfverfahren zur Bestimmung des Abscheidegrads (Partikelgrößen-spezifisch) für Partikel $>0,3 \mu\text{m}$, was die untere Grenze für die meisten optischen Partikelspektrometer darstellt. Daher ist es schwierig, von den Filterherstellern Effizienzkurven für Partikelgrößen $<0,3 \mu\text{m}$ zu erhalten. Dennoch haben einige wenige Studien Filtrationseffizienzkurven für das gesamte (relevante) Größenspektrum berichtet (González et al., 2016; Hanley et al., 1994; Shi, 2012; Shi et al., 2013). Es konnten jedoch keine Daten für Filter, die nach der neuen Norm ISO 16890 klassifiziert sind, z. B. ISO ePM1 70%, gefunden werden. Daher wurden in dieser Studie die Filterklassen M5, M6, F7, F8 und F9 (gemäß EN 779) simuliert. Die Kurven für den Abscheidegrad wurden aus (Shi, 2012) entnommen und sind in Abbildung 11 (a) eingezeichnet. Es ist zu beachten, dass außer der Filterabscheidung keine anderen Partikelverluste innerhalb des Lüftungssystems modelliert wurden, obwohl verschiedene Verlustmechanismen die Partikelkonzentration auf dem Weg durch das Lüftungssystem verändern können. Diese Verluste können jedoch im Vergleich zur Abscheidung durch den Filter als sehr gering und damit vernachlässigbar angesehen werden, siehe z.B. (Siegel & Nazaroff, 2003; Sippola & Nazaroff, 2003).

Abscheidegrad bei Gebäudeundichtheiten: Das Eindringen von Feinstaubpartikeln durch Undichtheiten in der Gebäudehülle kann mit Hilfe des Eindringfaktors (penetration factor p) beschrieben werden. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen Außenluftkonzentration und Partikelkonzentration der durch Gebäudeundichtheiten eindringenden Außenluft. Der Eindringfaktor wurde in zahlreichen Studien untersucht und charakterisiert (Chao et al., 2003; Lee et al., n.d.; Liu & Nazaroff, 2003; Long et al., 2001; Stephens & Siegel, 2012; Thatcher & Layton, 1995; Tian et al., 2009). Allerdings erlauben nur wenige die Extraktion des partikelgrößenaufgelösten Eindringfaktors

für die Simulation sehr luftdichter Gebäude. Für diese Studie wurden die Daten aus (Liu & Nazaroff, 2003) für einen Aluminiumriss mit einer Breite von 0,25 mm und einer Strömungslänge von 9,4 cm herangezogen. Außerdem wurden die Daten für einen Riss mit einer Breite von 0,25 mm und einer Strömungslänge von 4,3 cm für die Verwendung in der Simulation aufbereitet. Der resultierende Abscheidegrad (1-p) für diese beiden Rissabmessungen ist in Abbildung 11 (b) dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Anhang A.3 dokumentiert.

Abbildung 11: Größenabhängiger Abscheidegrad für Partikel bei Lüftungsfiltern (a) und Gebäudeundichtheiten/Rissen (b). Daten aus (Shi, 2012) und (Liu & Nazaroff, 2003). Grafiken aus (Rojas, 2019).



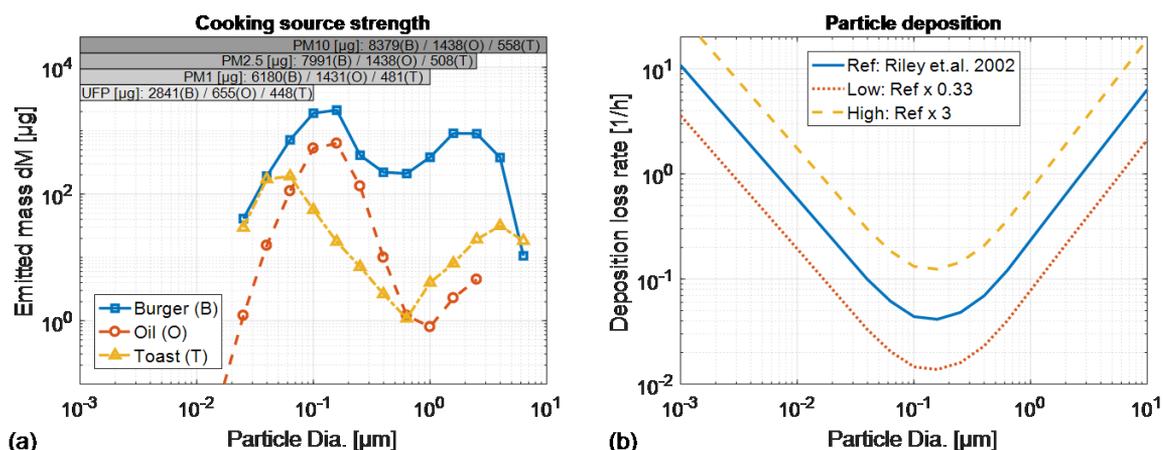
Innenraumquellen: Partikelkonzentrationen in Innenräumen werden durch Eintrag von außen und von inneren Emissionsquellen bestimmt. Partikelemissionen in Wohngebäuden werden vor allen durch menschliche Aktivitäten verursacht, und wurden schon in einer Reihe von Studien charakterisiert, z. B. (Géhin et al., 2008; Hussein et al., 2006; L. Wallace, 2006). Eine der Hauptquellen bildet das Kochen. Vor allem Aktivitäten wie Braten, Frittieren, Erhitzen von Ölen können beachtliche Mengen an Feinstaub- und Ultrafeinstaubpartikel generieren, siehe auch (Abdullahi et al., 2013; Buonanno et al., 2009; Poon et al., 2016; See & Balasubramanian, 2008; Sjaastad et al., 2008; Torkmahalleh et al., 2012; L. A. Wallace et al., 2004).

Um die Emissionsmodelle und deren Interpretation so einfach wie möglich zu halten, wurden in der Simulationsstudie nur Feinstaubquellen implementiert, die Kochaktivitäten repräsentieren. Konkret wurde „Toasten“, „Burger braten“ und „Öl erhitzen“ im Modell abgebildet. Diese drei Quellenergebnisse, die in der CONTAM Simulation als Burst-Quelle modelliert wurden (instantane Freisetzung während eines Simulationszeitschritts von 5 Minuten), wurden jeweils morgens (7:30 Uhr), mittags (12:00 Uhr) und abends (18:30 Uhr) angesetzt. Die Emissionsquellstärke dieser drei Prozesse wurde aus vorhandenen Messdaten des Autor:innen dieses Berichts im Rahmen dieses Projekts extrahiert. Details zu den experimentellen Untersuchungen sind in (Rojas et al., 2018) dokumentiert. Im Gegensatz zu den meisten Publikationen konnten so die Emissionsraten partikelgrößen-spezifisch bestimmt werden, sodass eine größen aufgelöste Modellierung/Simulation möglich wird, siehe Abbildung 12 (a). Die Zahlenwerte für die 21 Größenklassen sind in Anhang A.4 zusammengefasst.

Absetzraten der Partikel: Das Absetzen der Partikel aufgrund der Gravitation ist ein wichtiger Mechanismus für den „Verlust“ von Partikeln aus der Raumluft. Die Absetzrate hängt ebenfalls stark

von der Partikelgröße ab und wurde bereits in verschiedenen Studien untersucht. Messergebnisse und/oder eine Literaturübersicht finden sich z. B. in (He et al., 2005; Howard-Reed et al., 2003; Riley et al., 2002). Im Rahmen dieses Projekts wurde die Partikelgrößenabhängigkeit der Absetzrate für das Referenzmodell aus (Riley et al., 2002) verwendet. Sie basiert auf experimentellen Daten für Partikeldurchmesser $>0,06 \mu\text{m}$ und auf der Theorie der Partikelablagerung an glatten Innenraumbooberflächen von (Lai & Nazaroff, 2000) für kleinere Durchmesser. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird hier vorgeschlagen, diese Werte durch einen Faktor von drei zu teilen bzw. mit diesem zu multiplizieren. Die sich daraus ergebenden Absetzraten sind in Abbildung 12 (b) dargestellt und im Anhang A.5 gelistet.

Abbildung 12: Im Modell abgebildete Partikelemissionsraten (a) und Partikelabsetzraten (b). Die Referenzkurve in (b) wurde aus (Riley et al., 2002). Grafiken aus (Rojas, 2019).



5.3. Gekoppelte Simulation / Co-Simulation

Die Planung und Bewertung von energieeffizienten, komfortablen und gesunden Gebäuden erfordert zunehmend fortschrittliche Simulationsprogramme. Anspruchsvolle Energie- und Raumluftqualitätsziele erfordern eine thermische/energetische Modellierung, sowie die Modellierung des Luft- und Schadstofftransports. Erst eine gekoppelte Simulation von Wärme-, Luft-, Feuchte- und Schadstofftransport ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung und Optimierung von Gebäuden in Bezug auf Energieeffizienz, Komfort und Gesundheit. Solch gekoppelte Simulationen werden aber in der Praxis aufgrund der Komplexität nicht durchgeführt.

Deshalb wurden hier Methoden zur gekoppelten Simulation von Raumluftqualität (RLQ) und Energiebedarf untersucht. Unter „gekoppelter Simulation“ ist hier nicht unbedingt die numerische Lösung mathematisch gekoppelter Gleichungssysteme für jeden Zeitschritt gemeint, sondern ganz allgemein Simulationsmethoden, die eine gegenseitige Beeinflussung von Energie- und Raumluftqualitätsmodellen in den Ergebnissen abbilden können - diese werden i.d.R. allgemein als Co-Simulationsmethoden bezeichnet. Details zum allgemeinen Stand der Technik in Bezug auf Co-Simulation kann z.B. in (Taveres-Cachat et al., 2021) nachgelesen werden.

Auch im Rahmen dieses internationalen Projekts wurden Stand der Technik, Potential und neue Entwicklungen im Bereich einer integralen Gebäudesimulation beleuchtet. Die Erkenntnisse sind in Subtask 3 Bericht (Grunewald, 2020), siehe Kapitel 2 und 3 zusammengefasst. Des Weiteren wurden

„Common Exercises“ (gemeinsame Simulationsaufgaben) durchgeführt, um verschiedene Simulationswerkzeuge bzw. verschiedene Simulationenmethoden direkt miteinander zu vergleichen (siehe Kapitel 4). Im Kapitel 5 des Subtask 3 Berichts wurden neue Entwicklungen präsentiert um den Schadstofftransport innerhalb der Bauteilaufbauten im Detail simulieren zu können. Diese Entwicklungen basieren auf der Weiterentwicklung der hygrothermischen Simulationssoftware DELPHIN 6, um neben Wärme- und Feuchtetransport auch den Transport (und die Sorption) von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) im Baumaterialien abbilden zu können.

Im Gegenzug dazu wurden im Rahmen des nationalen Projekts einige bereits verfügbare Simulationswerkzeuge für eine gekoppelte Bewertung von Energiebedarf und RLQ getestet. Der Fokus lag darauf, einen Kompromiss zwischen Modellkomplexität und Anwendbarkeit bzw. Verfügbarkeit der erforderlichen Modellparameter zu finden. Viele der gängigen Gebäudesimulationsprogramme bieten Möglichkeiten an um auch die Raumluftqualität zu untersuchen. In der Regel können CO₂-Emissionen der Personen modelliert und die zugehörige Massenbilanz gelöst werden, um die sich ergebende CO₂-Konzentration zu ermitteln. Die für die Massenbilanz erforderlichen Luftwechsel müssen entweder als Eingabe bereitgestellt werden oder die Gebäudesimulationssoftware integriert multizonale Druckknoten Netzwerk-Berechnungen, um diesen Luftaustausch zu berechnen, z.B. in TRNSYS (Weber et al., 2002). Jedoch sind bei diesen Lösungen die Auswahl an verfügbaren Luftwegmodelle (z.B. Spaltmodelle, Luftöffnungen, HLK Komponenten, etc.) und Schadstoffmodelle (Quellmodelle zur Abbildung verschiedener Schadstoffe und deren Emissionsverhalten) meist deutlich eingeschränkt.

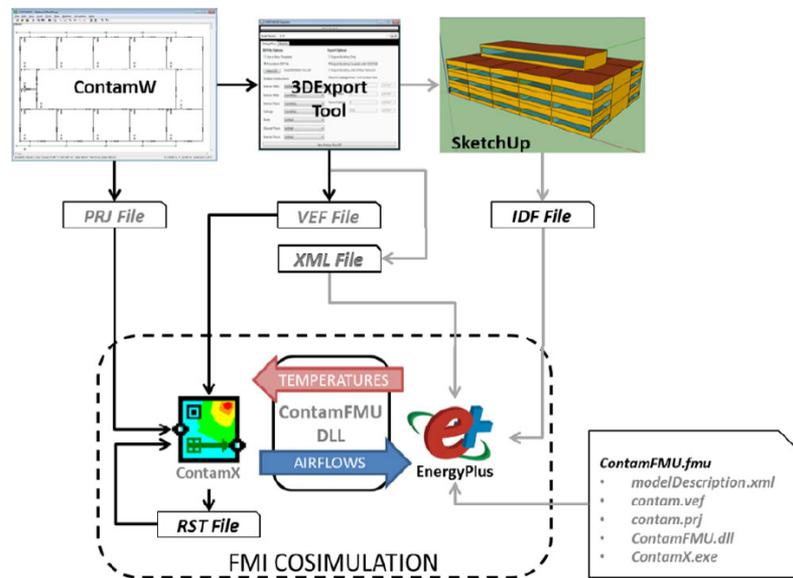
Darum wurden hier die Möglichkeiten einer Co-Simulation zwischen CONTAM und verschiedenen Gebäudesimulationsprogrammen untersucht. CONTAM ist ein vom „National Institut of Standardization and Technology“ (NIST) entwickeltes, frei verfügbares Simulationsprogramm zur Berechnung des Luft- und Schadstofftransports zwischen verschiedenen Zonen eines Gebäudes und der Außenluft (NIST, n.d.-a). Es stehen generische Luftweg- und Quellen-/Senken-Modelle sowie ein einfaches kinetische Reaktionsmodell (first order) zur Verfügung. Es ist ein weit verbreitetes Werkzeug für die Bewertung der Raumluftqualität und erfreut sich einer breiten und aktiven Nutzer:innen-Community. Es erlaubt aber keine thermische Simulation des Gebäudes.

EnergyPlus – CONTAM: EnergyPlus ist eines der weit verbreitetsten Gebäudesimulationsprogramme. Es wurde vom US-Department of Energy (DoE) herausgegeben (DoE, n.d.). Für die Kopplung zwischen EnergyPlus und CONTAM wurde vor einigen Jahren eine Co-Simulation entwickelt (Dols et al., 2016). Abbildung 13 veranschaulicht den Datenfluss zwischen den beiden Programmen. Das CONTAM Handbuch beschreibt den Kopplungsprozess und die dafür erforderlichen Schritte (Dols & Polidoro, 2015). Im Überblick sind die Schritte wie folgt:

- Projekt im CONTAM anlegen, inklusive (vereinfachte) Geometrie (Grundrisse) definieren
- IDF Datei (für EnergyPlus) mit Hilfe eines Programmzusatzes (CONTAM3DExport) erzeugen
- IDF Datei anpassen/modifizieren (z.B. Heizung definieren, Geometrie verfeinern...)
- Simulation laufen lassen (dazu sind einige manuelle Unterschritte erforderlich)

Diverse Publikationen bestätigen die Anwendbarkeit dieser Simulationenmethode um Lüftungskonzepte zu bewerten bzw. zu optimieren (Alonso et al., 2019; Dols et al., 2021; Ng et al., 2018).

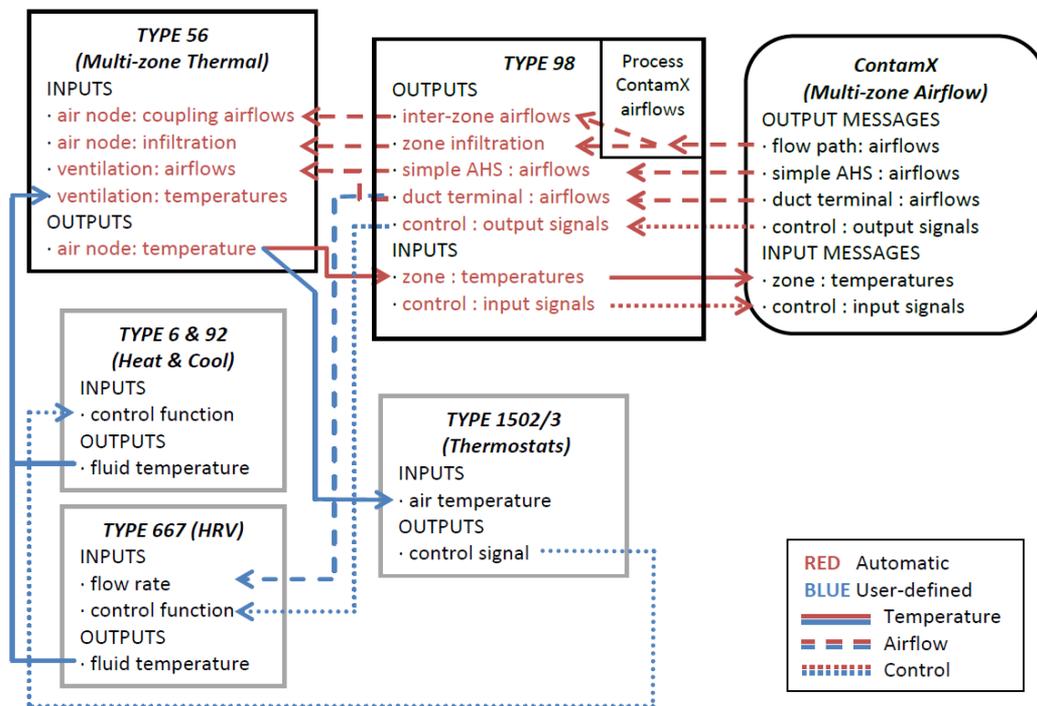
Abbildung 13: Schematische Darstellung des EnergyPlus-CONTAM Kopplungsprozesses. Quelle: (Dols et al., 2016)



TRNSYS – CONTAM: Wie für EnergyPlus wurde auch für TRNSYS eine Möglichkeit zur Co-Simulation von NIST entwickelt (Dols, Wang, et al., 2015). TRNSYS ist ebenfalls ein sehr weit verbreitetes Gebäudesimulationsprogramm (TRNSYS, n.d.) welches Modular aufgebaut ist. Das Gebäudegrundmodul „Type 56“ kann mit weiteren Modulen zur Simulation von Gebäudesysteme erweitert bzw. kombiniert werden. Für die Kopplung mit CONTAM gibt es das Modul „Type 98“, welches den Datenaustausch und die Co-Simulation koordiniert, siehe Abbildung 14. Weitere Details bzw. Anwendungsbeispiele zur Kopplung zwischen TRNSYS und CONTAM findet man in (Dols, Emmerich, et al., 2015; Dols, Wang, et al., 2015; Dols & Polidoro, 2015). Zusammenfassend kann man den Kopplungsprozess wie folgt beschreiben:

- Projekt im CONTAM anlegen, inklusive (vereinfachte) Geometrie (Grundrisse) definieren
- IDF Datei (für TRNSYS) mit Hilfe eines Programmzusatzes (CONTAM3DExport) erzeugen
- Evtl. IDF Datei anpassen/modifizieren (z.B. Geometrie verfeinern...)
- TRNSYS Simulation Studio öffnen und zugehöriges Gebäudefile erzeugen
- Type56-98Coupler Programm öffnen um ein aktualisierten Gebäudefile zu erzeugen
- Proforma Datei erzeugen bzw. in richtigen Ordner kopieren
- TRNSYS Simulation Studio öffnen und oben generierten Dateien auswählen
- Projekt-spezifische Type98-Proforma hinzufügen
- TRNSYS Input Deck-File generieren und mit Type56-98Coupler aktualisieren
- Neues Deck-File in TRNSYS Projekt importieren

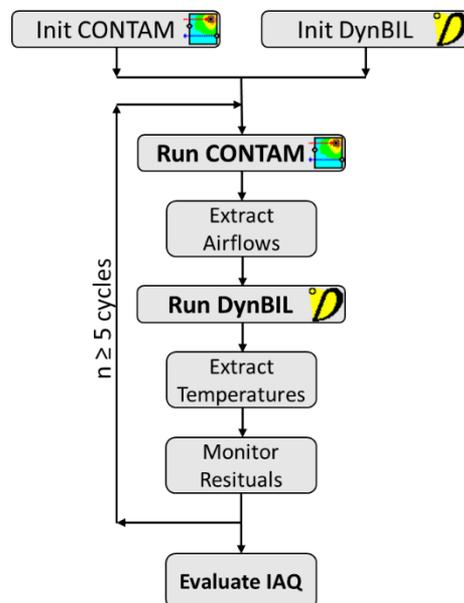
Abbildung 14: Schematische Darstellung des TRNSYS-CONTAM Kopplungsprozesses. Das Modul „Type 98“ betreibt den Datenaustausch zwischen den eigentlichen Recheneinheiten „Type 56“ und „ContamX“. Quelle: (Dols, Wang, et al., 2015)



An dieser Zusammenfassung erkennt man, dass der Kopplungsprozess scheinbar (noch) nicht sehr anwenderInnenfreundlich ist. In den verschiedenen Tests und Simulationsaufgaben, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden (Calabrese et al., 2017; Calabrese & Rojas-Kopeinig, 2017; Shandilya & Rojas-Kopeinig, 2021), erwies sich der Kopplungsprozess unpraktisch und fehleranfällig. Diese Erfahrungen wurden durch zwei TRNSYS-erfahrene MitarbeiterInnen unabhängig voneinander gemacht. Wenn die Kopplung lauffähig erstellt war, zeigte sie sich stabil und die Ergebnisse waren zufriedenstellend und plausibel. So wurden im Zuge dieser Tests auch Vergleiche mit dem Simulationsprogramm MATLAB/Simulink, mit guter Übereinstimmung, durchgeführt (Calabrese et al., 2017). Wenn Modelländerungen erforderlich waren, so musste i.d.R. die Kopplung neu aufgesetzt werden, was Optimierungsvorgänge etwas träge gestaltet.

DynBil-CONTAM: Da sich die oben beschriebene TRNSYS-CONTAM Kopplung als nicht sehr flexibel und handhabbar erwies, wurde ein alternativer Lösungsansatz gesucht, um die in Kapitel 5.5 vorgestellten Simulationsstudien sinnvoll durchführen zu können. Dazu wurde ein im Rahmen von Subtask 3 diskutierter Ansatz umgesetzt. Mit Hilfe einer Pre- und Postprocessing-Umgebung, umgesetzt in MATLAB, wurden beide Simulationsprogramme, CONTAM und DynBil, abwechselnd angesteuert. DynBil ist thermisches Gebäudesimulationsprogramm, welches anfangs von Wolfgang Feist, später von Mitarbeiter:innen des Passivhaus Instituts für die Entwicklung des Passivhauskonzeptes, entwickelt und eingesetzt wurde (PHI, n.d.). Es wurde schon mehrfach validiert, z.B. (Rojas & Schnieders Juergen, 2016; Strachan et al., 2015), und zeichnet sich durch eine einfach Nutzer:innen-Oberfläche und sehr schnelle Rechenzeiten aus, was vorteilhaft für den folgenden Co-Simulation Ansatz ist. Der folgende Absatz wurde teilweise aus (Rojas, 2020b) übersetzt übernommen.

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Co-Simulation mit CONTAM und dem Gebäudesimulationsprogramm DynBil.



Die Co-Simulation wurde sehr vereinfacht in einer so genannten "Ping-Pong"-Methode durchgeführt, d.h. die beiden Tools berechneten abwechselnd den gesamten Simulationszeitraum. Es wurde ein MATLAB-Skript entwickelt, um die Simulationsaufrufe zu automatisieren und den Konvergenzfortschritt zu überwachen. Der Simulations- und Bewertungszeitraum wurde auf eine Winterperiode von zwei Monaten (Januar und Februar) beschränkt, um die Berechnungen zu beschleunigen. Dieser Zeitraum kann als die kritischste Zeit in Bezug auf die Raumluftqualität angesehen werden, welche den Fokus der in Kapitel 5.5 vorgestellten Simulationsstudie bildet. Jeder DynBil-Simulationslauf umfasste einen einmonatigen Vorberechnungszeitraum, um sicherzustellen, dass die Anfangsbedingungen keinen Einfluss auf den Bewertungszeitraum haben. Der Prozess wurde mit einer CONTAM-Simulation begonnen. Die Ergebnisse der interzonalen Luftströme wurden in Form einer Eingabedatei für die nachfolgende DynBil-Simulation bereitgestellt. Dafür wurden für jede Zone alle Luftströme zu je zwei Werten pro Austauschzone (Nachbarräume, Umgebung und Lüftungssystem) aggregiert. Die unbekanntenen Werte wurden für den ersten Simulationslauf geschätzt. Die Ergebnisse (Temperaturen) dieser DynBil-Simulation wurden extrahiert, um eine Eingabedatei für die nächste CONTAM-Simulation zu erhalten. Dieser Zyklus wurde mehrfach wiederholt, siehe Abbildung 15. Konkret wurden für jede Zone die Luftknoten-Temperatur und die Temperatur der obersten Schicht der diskretisierten Bodenkonstruktion in Form einer Eingabedatei für den gesamten Simulationszeitraum bereitgestellt. Nach mindestens fünf Zyklen lag der quadratische Mittelwert der Residuen der Zonentemperaturen und der interzonalen Strömungen unter 0,01 K und 7 % des Strömungswertes, was als ausreichend genau angesehen wurde. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Konzentrationsergebnisse von CONTAM zur Bewertung der RLQ verwendet.

Diese Methode stellte sich überraschenderweise als sehr robust dar. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Einsatzbedingungen vorteilhaft waren: Mechanische Lüftung, wenige natürliche Lüftungsvorgänge, keine temperaturabhängige Lüftungssteuerung, kurzer Zeitraum, etc. Weitere Tests mit dieser Methode mit ungünstigere Bedingungen wie z.B. längere Phasen mit natürlicher Lüftung wären empfehlenswert.

5.4. Wohnraumlüftung – normative Vorgaben, Hürden und Herausforderungen in Umsetzung und Betrieb

Die große Mehrheit der teilnehmenden ExpertInnen dieses IEA Projekts war sich einig, dass eine mechanische Lüftung die erforderliche Raumluftqualität unabhängig vom Nutzer:innenverhalten gewährleisten kann. Es stellte sich daher die Frage, warum im Wohnbau mechanische Lüftungssysteme nicht öfter zum Einsatz kommen.

Daher wurde in der Anfangsphase dieses Projekts die Treiber, Hürden, Herausforderungen, etc. für die Umsetzung und den Betrieb in den folgenden europäischen Ländern erhoben: Belgien, Dänemark, Estland, Frankreich, Norwegen, Vereinigtes Königreich und Österreich. Die folgenden Kapitel sind eine Zusammenfassung oder eine direkte Übersetzung aus Textpassagen der publizierten Journal- und Konferenzartikel (Bocanegra-Yanez et al., 2017; Zukowska et al., 2021).

5.4.1. Nationale Vorgaben und Richtlinien

Die Recherche der nationalen Bauvorschriften und Normen konzentrierten sich auf Vorgaben, wie z.B.:

- empfohlene Lüftungssysteme
- Grund- bzw. Nennluftstraten
- Zu- bzw. Abluftvolumenströme für Wohnräume, Bad, Toilette und Küche
- Stand der Technik bei Systemtypologie
- Anforderungen an Wärmerückgewinnung bzw. spezifische Stromaufnahme (SPI)
- Anforderungen für bedarfsgesteuerte Systeme (DCV)

Eine mechanische Lüftung ist in keinem der Länder ausdrücklich vorgeschrieben und es gibt keine ausdrückliche Empfehlung bzw. Priorität in Bezug auf mechanische Belüftung (MV), natürliche Belüftung (NV) oder Lüftung. Anforderungen in Bezug auf die Effizienz der Wärmerückgewinnung gelten nur für Dänemark und Norwegen, im Vereinigten Königreichs gibt es eine entsprechende Empfehlung. In Estland ist es erlaubt, MV ohne Wärmerückgewinnung (WRG) zu bauen, wenn die Energieanforderungen erfüllt sind, jedoch ist es in der Praxis ohne WRG fast unmöglich den vorgeschriebenen Niedrigstenergiestandard zu erfüllen.

Alle Länder stellen Anforderungen an die Nennluftstraten. Die Anforderungen variieren von Land zu Land und werden in einigen Ländern als Luftwechselrate (ACH) angegeben, während in anderen Ländern die Luftströme von der Anzahl der BewohnerInnen, der Grundfläche, der Anzahl der bewohnbaren Räume (d. h. Wohn-, Schlaf- und Büroräume usw.) oder nur von der Anzahl der Schlafzimmer abhängen. In Belgien und Frankreich ist es nicht erlaubt ist, die mechanische Lüftung vollständig abzuschalten. Die dänischen Bauvorschriften lassen dies zu, unter der Voraussetzung, dass ein Mindestluftwechsel über Fensterlüftung gewährleistet werden kann. In einigen Ländern ist es erlaubt, den Luftstrom bei Nicht-Anwesenheit oder bedarfsgeführt unter den Nennluftstrom zu senken.

Unterschiede gibt es auch in Bezug auf Dunstabzugshauben und deren Integration im Lüftungssystem. Dies wird z.B. dezidiert in der österreichischen Normung ausgeschlossen. Hier

müssen separate Systeme (Abluft- oder Umluftdunstabzug) eingesetzt werden. In anderen Ländern wiederum ist die Integration des Dunstabzugs in die Lüftungsanlage (mit WRG) erlaubt (und üblich). In Dänemark muss die Dunstabzugsluft nach außen geführt werden.

Details bzw. eine tabellarische Übersicht aller verglichenen Vorgaben findet man in (Zukowska et al., 2021).

5.4.2. Stakeholder-Befragungen

Die derzeitige Praxis bei Planung, Betrieb und Inbetriebnahme von Lüftungsanlagen wurde in Rahmen von semistrukturierten Interviews gesammelt. Der Fragenkatalog wurden entsprechend der fünf Zielgruppen (Lüftungsplaner:innen (Anhang B.1), Gebäudemanagement (Anhang B.2), Behörden (Anhang B.3), Wohnungsbaugesellschaften (Anhang B.4) und Lüftungsgerätehersteller:innen (Anhang B.5)) geringfügig angepasst. Die Befragung gliederte sich in zwei Teile. Der erste Teil befasste sich mit dem Stand der Technik mit Bezug auf Niedrigenergie-Wohnbau. Der zweite Teil befasste sich mit Hürden und Herausforderungen bei Planung, Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung. Wichtige Änderungen in der Gesetzgebung, bei technischen Maßnahmen, finanziellen Anreizen, Marktanforderungen und Informationsprogrammen, die nach Ansicht der Beteiligten erforderlich wären, um eine hohe Raumluftqualität in energieeffizienten Wohnungen zu gewährleisten, wurden ebenfalls abgefragt. Insgesamt wurden 44 Stakeholder aus der Bauwirtschaft interviewt, in Österreich waren es sechs. Dies kann nicht als repräsentative Umfrage gewertet werden, liefert aber dennoch eine wertvolle Momentaufnahme der aktuellen Praktiken bei Planung, Ausführung und Betrieb von Wohnraumlüftungssystemen und gibt Einblicke in mögliche Hindernisse für die weitere Verbreitung.

Die Umfrage ergab, dass mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung in Ländern mit entsprechenden finanziellen Anreizen hohe Akzeptanz genießt, wenn zudem die klimatischen Bedingungen eine Wärmerückgewinnung zu einem wichtigen Bestandteil zur Erfüllung strenger Energieanforderungen machen. In der Praxis wird meist ein Gegenstrom-Plattenwärmetauscher verwendet, gefolgt von einem Kreuzstrom-Wärmetauscher. Die Bauvorschriften und -normen schreiben die Verwendung von bedarfsgeregelten Systemen nicht vor, und in der Praxis scheinen sie aufgrund höherer Kosten und Komplexität selten zu sein. Nur in Frankreich und Belgien dominieren bedarfsgeregelte Abluft-Systeme (über Raumluftfeuchte) den Markt.

Mehrere befragte Personen wiesen darauf hin, dass die Investitionskosten für Wohnraumlüftungen mit Wärmerückgewinnung deutlich höher sind als bei herkömmlichen Lüftungskonzepten, was einer breiteren Umsetzung entgegensteht. Außerdem benötigen diese Systeme mehr Platz, und die Verlegung der Kanäle kann schwierig sein. Schlechte oder fehlende Wartung und Nichteinhaltung gesetzlicher Vorschriften wurden ebenfalls als Probleme genannt. Lärm und die angenommenen Betriebskosten wurden als die häufigste Ursache genannt, warum bereits installierte Wohnraumlüftungssysteme nicht verwendet / eingeschaltet werden.

Um vorherrschenden Probleme und Hindernisse zu überwinden, wurden in der Umfrage vor allem folgende gesetzgeberische Verbesserungsmaßnahmen genannt: eine flexiblere Gestaltung von Vorschriften und Baunormen, ein koordinierter Ansatz für Energieeffizienz und Raumluftqualität, sowie Kontrollmechanismen zur Qualitätssicherung bei Umsetzung und Betrieb. Technische Verbesserungen, finanzielle Anreize, Marktanreize und Outreach-Programme wurden ebenfalls

genannt, um einen breiteren Einsatz von mechanischen Lüftungssystemen in Niedrigenergie-Wohngebäude zu unterstützen.

5.5. Wohnraumlüftung – Lösungen, Innovationen und deren Bewertung

5.5.1. Bewertung von zwei innovativen mechanischen Lüftungskonzepten

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen dieses IEA-Projekts, werden zwei innovative Lüftungskonzepte hinsichtlich Raumlufthqualität (RLQ) und Energieeffizienz bewertet - die **erweiterte Kaskadenlüftung** und die **aktive Überströmung**. Das erste Konzept basiert auf der Idee, keine eigene Zuluft für das Wohnzimmer vorzusehen, sondern mit Überströmluft aus den Schlafräumen zu versorgen, sofern der Grundriss dies zulässt. Die aktive Überströmung bietet eine Lösung für Sanierungsprojekte, bei denen es nicht möglich ist, Luftkanäle in jedes Schlafzimmer zu verlegen. Beide Konzepte eignen sich sowohl für zentrale (ein Gerät für mehrere Wohnungen) als auch für dezentrale (ein Gerät pro Wohnung) Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung. Diese neuartigen Lüftungskonzepte wurden im Rahmen einer Simulationsstudie mit Hilfe der oben beschriebenen Simulations- und Bewertungsmethoden mit herkömmlichen mechanischen Lüftungssystemen verglichen. Bei den beiden herkömmlichen Vergleichssystemen handelt es sich um eine mechanische Wohnraumlüftung mit klassischer Zonierung (d.h. Zuluft auch in Wohnzimmer), sowie einem Abluftsystem. Die folgende Zusammenfassung wurde größtenteils aus dem englischen Konferenzbeitrag (Rojas, 2020b) übernommen.

Motivation

Als Konsequenz aus der heutigen luftdichten Bauweise müssen Lüftungsmaßnahmen berücksichtigt und entsprechend ausgelegt werden. Gebäudesimulationen können dabei helfen, ein sinnvolles Lüftungskonzept zu ermitteln und ermöglichen Optimierungen in Bezug auf die Raumlufthqualität (RLQ), den Energieverbrauch und die Kosteneffizienz. In der Regel berücksichtigen Gebäudesimulationen die RLQ jedoch nicht, und wenn, dann nur in sehr vereinfachter Form, z.B. mit Hilfe der CO₂-Emissionen, welche mit menschlicher Aktivität korreliert. Bei der Planung der Gebäudelüftung sollten jedoch auch andere Schadstoffquellen berücksichtigt werden, wie in Kapitel 5.1 bereits beschrieben.

Methode/Untersuchungsobjekt

In einem einfachen Co-Simulationsansatz werden mit dem Gebäudesimulationsprogramm DynBil und der Software CONTAM (Kapitel 5.3) die Raumkonzentration von CO₂, Formaldehyd und Feinstaub sowie die Luftfeuchtigkeit für eine repräsentative österreichische Wohnung berechnet. Neben Quellen und Senken für CO₂, Luftfeuchtigkeit und Feinstaub wird auch die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Emissionsrate von Formaldehyd aus Baumaterialien modelliert (Kapitel 5.2).

Der Grundriss mit einer Wohnfläche von 76 m² wurde von einem realen Niedrigenergie-Wohnbauprojekt (Ploss & Hatt, 2016) entnommen und ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Belegung und Fensternutzung basiert auf Literaturrecherchen aus vorhergegangenen Simulationsstudien (Rojas et al., 2016, 2012) mit drei Belegungsplänen, die eine vollzeitbeschäftigte Person, eine Person, die zu

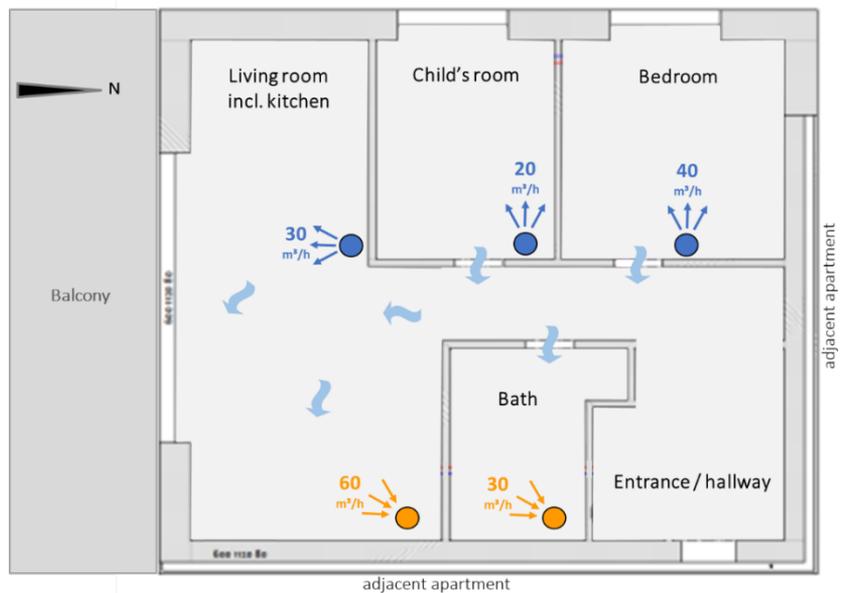
Hause bleibt, und ein Schulkind darstellen. Das thermische Modell spiegelt eine Ziegelbauweise im Passivhausstandard wider. Die Außenwände bestehen aus einer äußeren Putzschicht, 30 cm EPS-Dämmung, 12 cm Ziegel und einer inneren Putzschicht, so dass sich ein U-Wert von $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergibt. Das Wohnzimmer hat eine Verglasungsfläche von $6,3 \text{ m}^2$ (Südausrichtung), das Kinderzimmer und das Schlafzimmer haben jeweils eine Verglasungsfläche von $2,0 \text{ m}^2$ (Westausrichtung). Die Dreischeibenverglasung wurde mit einem U-Wert von $0,72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und einem g-Wert von $0,53$ modelliert. Die Heizung wurde mit einer Solltemperatur von 22°C für Wohn-, Kinder- und Schlafzimmer und 23°C für das Badezimmer als ideal geregelt modelliert. Weitere Details zum BES-Modell sind in (Rojas et al., 2015) dokumentiert.

Das Druckknotenmodell zur Simulation des Luft- und Schadstofftransports wurde wie folgt modelliert. Die Leckagen in der Gebäudehülle wurden mit zwei Undichtheiten in jeder Außenwand in zwei verschiedenen Höhen modelliert (1 m und $2,2 \text{ m}$ für die Standardfenster und 0 m und $2,2 \text{ m}$ für hohen Fenster zum Balkon). Dadurch wird die durch den Kamineffekt bedingte Infiltration im Modell ermöglicht. Die Undichtheiten wurden gleichmäßig verteilt und so dimensioniert, dass sich ein Luftaustausch von $0,6 \text{ h}^{-1}$ bei 50 Pa ergibt, dem Grenzwert für die Passivhaus-Zertifizierung. Der Winddruck wurde mit Hilfe bekannter Berechnungsmethoden (ASHRAE, 2005) berechnet. Die eingesetzten empirischen Parameter repräsentierten eine Gebäudehöhe von 10 m in vorstädtischem/urbanen Gelände (für die Umrechnung der lokalen Windgeschwindigkeit) und das Winddruckprofil wurde entsprechend eines Flachbaus (low-rise building) gewählt (ASHRAE, 2005). Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperaturen wurden durch eine standardisierte Wetterdatei für die Stadt Wien definiert. Diese wurde mit Hilfe einer einschlägigen Software (Meteotest, n.d.) erstellt. Die Türen der Schlaf- und Kinderzimmer, welche als bidirektionale Luftöffnungen modelliert wurden, wurden im Referenzmodell während der Nacht als geschlossen und tagsüber als geöffnet angenommen. Die Badezimmertür wurde im Modell im Laufe des Tages fünfmal für jeweils 10 Minuten geöffnet. Die Öffnung zwischen Flur und Wohnzimmer wurde ebenfalls als permanent geöffnete bidirektionale Luftöffnung mit $2,5 \text{ m}$ Höhe und $1,2 \text{ m}$ Breite modelliert.

Beschreibung der untersuchten Zonierungskonzepte

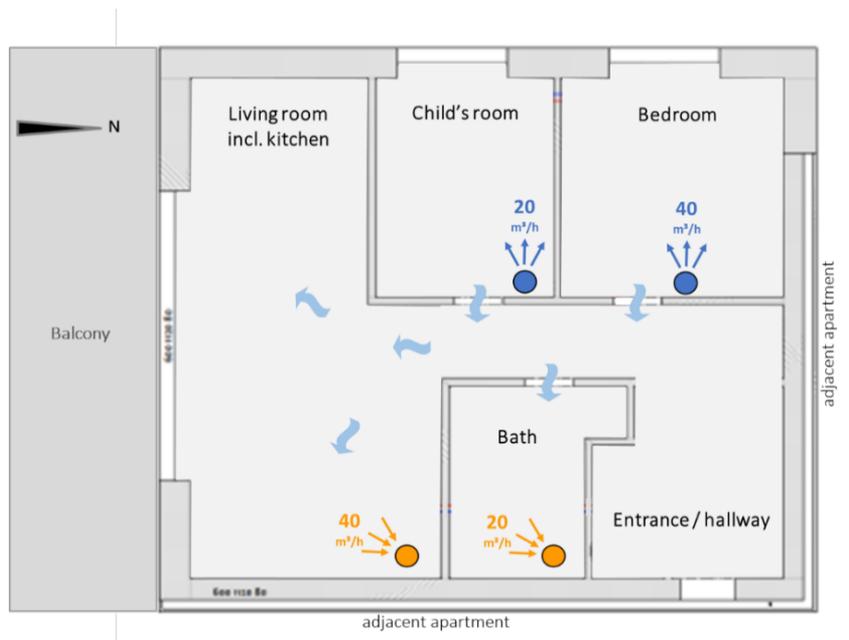
Ein herkömmliches Wohnraumlüftungssystem erfordert entweder Zu- oder Abluftkanäle zu jedem Raum der Wohnung (außer Flur). Die Zuluft wird in Wohn-, Schlaf-, Arbeitszimmer usw. eingebracht, während die "verbrauchte" Luft aus den Nassräumen, d.h. Küche, Bad und Toilette (bei Bedarf auch aus den Abstellräumen) abgesaugt wird. Flure dienen als Überströmzonen, in denen die Luft aus den Zulufräumen in die Ablufträume strömen kann. Auf diese Weise werden auch die Flure ausreichend belüftet. Abbildung 16 zeigt diese Standardzonierung für mechanische Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung, sie wird hier als „**Standardkaskadenlüftung**“ bezeichnet.

Abbildung 16: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der Standardkaskadenlüftung. Zuluft (blau) in Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer und Abluft (orange) in Küche und Bad.



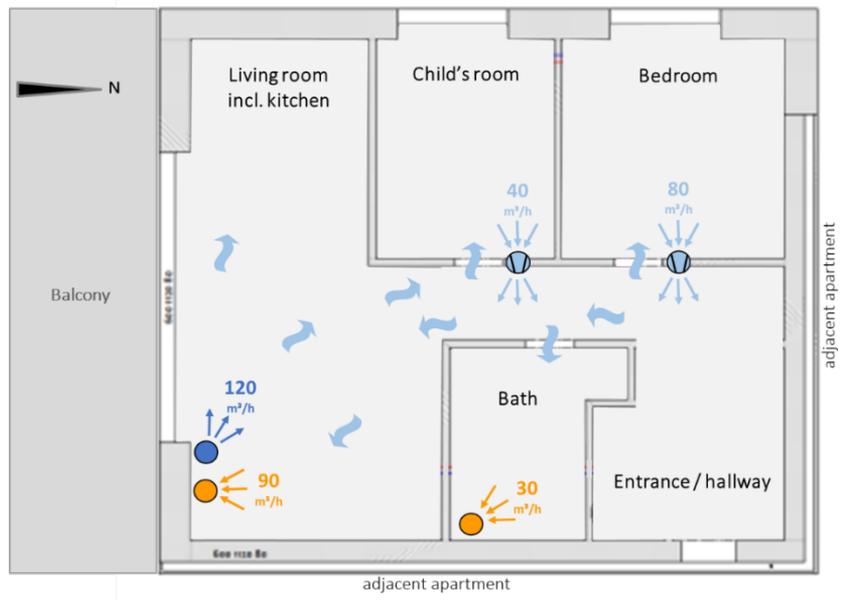
Das Prinzip der sogenannten **"erweiterten Kaskadenlüftung"** wurde erstmals in Schweizer Projekten dokumentiert (Fraefel, 1999) und in einem österreichischen Forschungsprojekt systematisch untersucht (Sibille et al., 2013). Es basiert auf der Standardkaskadenlüftung, lässt aber, sofern es der Grundriss zulässt, die Zuluftöffnung im Wohnraum weg. In diesem Forschungsprojekt wurde festgestellt, dass viele moderne Grundrisse so beschaffen sind, dass die überströmende Luft aus den Schlafzimmern auf dem Weg zu den Ablufträumen den Wohnbereich passieren muss. Neben der Einsparung von Luftkanälen, Schalldämpfern und einem Auslass wird die Luft am effektivsten genutzt und die Gesamtluftwechselrate kann im Vergleich zur Standardkaskade reduziert werden. Abbildung 17 zeigt die Umsetzung dieses erweiterten Kaskadenprinzips für den simulierten Grundriss. Man beachte, dass die Gesamtzuluftmenge für die gesamte Wohnung auf 60 m³/h reduziert wurde, verglichen mit 90 m³/h für die Standardkaskadenlüftung.

Abbildung 17: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der erweiterten Kaskadenlüftung. Zuluft (blau) in Schlaf-, und Kinderzimmer und Abluft (orange) in Küche und Bad. Das Wohnzimmer wird nur mit Überströmluft versorgt.



Das so genannte **"aktive Überströmprinzip"** bietet eine mögliche Lösung für Sanierungsprojekte, bei denen es nicht möglich ist, Luftkanäle zu jedem Zulufttraum, z.B. Schlafzimmer, zu verlegen. Stattdessen wird in jedem Raum ein aktives Überströmelement (AOE) und ein passives Überströmelement installiert. Es fördert die Luft aus dem Verbindungsraum, z.B. Flur oder Wohnzimmer, in den jeweiligen Raum und wieder hinaus. In seiner Minimalform besteht ein solches aktives Überströmelement aus einem schallgeschützten Durchgang, einem geräuscharmen Ventilator und einer einfachen Steuerung, die sicherstellt, dass der Ventilator nur läuft, wenn die Tür des betreffenden Raums geschlossen ist. Das aktive Überströmelement ist häufig in die Tür selbst integriert, was den Sanierungsprozess vereinfachen kann (Sibille & Pfluger, 2015). Der Verbindungsraum, d.h. der Flur oder das Wohnzimmer, muss durch mechanische Lüftungssystem gut belüftet werden. Ablufträume sollten über konventionelle Kanäle an die Lüftungsanlage angeschlossen werden, was in der Regel kein Problem darstellt (z.B. innerhalb einer abgehängten Decke). **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** zeigt die Umsetzung dieses Konzepts im Grundriss der hier untersuchten Wohnung. Man beachte, dass die Gesamtzuluftmenge für die gesamte Wohnung $120 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt, verglichen mit $90 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Standardkaskadenlüftung.

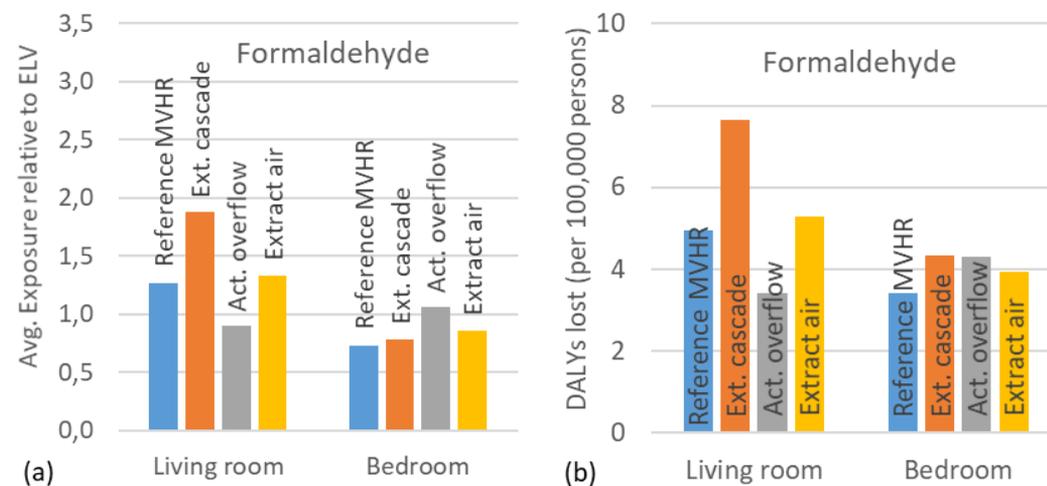
Abbildung 18: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der aktiven Überströmung. Zuluft (blau) nur im Wohnzimmer/Küchen-Bereich und Abluft (orange) in Küchenbereich und Bad. Schlaf- und Kinderzimmer werden mit aktiven Überströmelementen aus dem Flur mit Luft versorgt.



Ergebnisse

Abbildung 19 quantifiziert die **Formaldehydbelastung** anhand der Bewertungsgrößen „Langzeit-ELV“ und „DALY-Index“. Ersterer vergleicht die simulierte durchschnittliche Formaldehydexposition mit dem empfohlenen langfristigen Expositionsgrenzwert (ELV), während letzterer die gesundheitlich beeinträchtigten Lebensjahre quantifiziert (siehe Kapitel 5.1.4). Es ist zu beachten, dass die ELV-Richtwerte für Formaldehyd weltweit sehr unterschiedlich sind und dass nur wenige Länder einen Langzeit-Innenraumluftrichtwert definieren (Abadie & Wargocki, 2017). Kurzzeitrichtwerte reichen z.B. von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (30-Minuten-Mittelwert; Österreich) bis $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8-Stunden-Mittelwert; Kalifornien). Der hier für die Bewertung herangezogene Langzeit-ELV basiert auf dem strengsten verfügbaren Wert der Kalifornischen Umwelt- und Gesundheitsbehörde (OEHHA, n.d.).

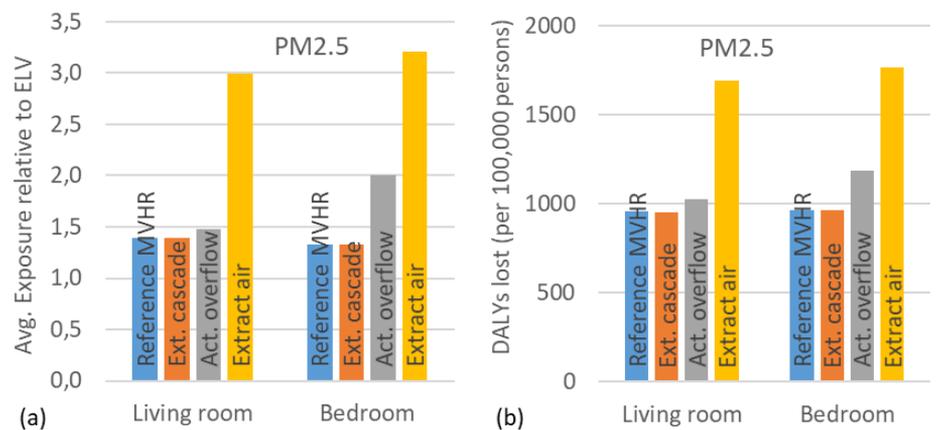
Abbildung 19: Bewertung der simulierten Formaldehyd Langzeit-Exposition in Wohn- und Schlafzimmer mit Hilfe des Langzeit-ELV (a) und mit Hilfe des DALY-Index (b).



Es zeigt sich, dass im Schlafzimmer alle vier Lüftungskonzepte die durchschnittlichen Konzentrationen während der Belegung (nachts) um oder unter dem ELV von $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ halten können, wobei das aktive Überströmkonzept den höchsten Wert aufweist. Im Gegensatz dazu weist es im Wohnzimmer den niedrigsten Wert auf. Hier weist das erweiterte Kaskadenlüftungskonzept den höchsten Expositionswert auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wohnzimmer nur über die Überströmung aus den Schlafzimmern belüftet wird und die niedrigste Gesamtluftwechselrate aller vier Konzepte besitzt. Eine sehr ähnliche Rangfolge zwischen den verschiedenen Lüftungskonzepten ist auch bei der Betrachtung des DALY-Index zu beobachten, siehe Abbildung 19 (b).

Abbildung 20 zeigt die **Bewertung der simulierten Feinstaubpartikel (PM_{2,5}) Exposition**. Die Ergebnisse zeigen deutlich den Nutzen von Lüftungskonzepten mit Außenluftfilter. Da das Abluftsystem ungefilterte Luft durch die Außenluftdurchlässe ansaugt, ist die PM_{2,5}-Belastung durch Außenquellen in diesem Simulationsfall deutlich höher. Es ist zu beachten, dass die PM_{2,5}-Außenluftkonzentration mit etwa $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ konstant angenommen wurde, was im internationalen Vergleich eine mittelstark verschmutzte Stadt darstellt und nicht unbedingt der mittleren Luftverschmutzung einer österreichischen Stadt entspricht. Der gemessene Jahresmittelwert in österreichischen Städten ist in den letzten zehn Jahren langsam von $15\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf $10\text{-}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gesunken (Buxbaum und Nagl 2018). Kurzfristig (einige Tage) können auch in österreichischen Gebieten durchaus diese Werte auftreten, siehe (UBA, n.d.).

Abbildung 20: Bewertung der simulierten PM_{2,5}-Langzeit-Exposition in Wohn- und Schlafzimmer mit Hilfe des Langzeit-ELV (a) und mit Hilfe des DALY-Index (b).

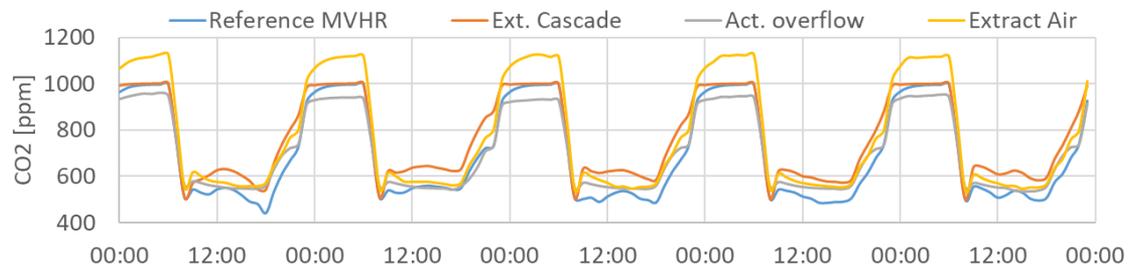


Insgesamt erkennt man, dass bei mäßiger bis schlechter Außenluftkonzentration die Feinstaubexposition in Innenräumen mit Hilfe von Lüftungssystemen mit entsprechenden Außenluftfiltern (F7 bzw. ISO ePM1 50%) zwar deutlich reduziert werden kann, aber noch ca. dem Langzeit-ELV entspricht. Das drückt sich auch in der DALY-Bewertung aus mit ca. 1000 „verlorenen“ DALY's (pro 100.000 Personen). Dieser Wert unterstreicht auch die Relevanz der Feinstaubexposition bei der Bewertung von Lüftungskonzepten. Im Vergleich dazu wurde die Formaldehyd-Exposition mit ca. 5 „verlorenen“ DALY's (pro 100.000 Personen) bewertet. Um den Einfluss der PM_{2,5}-Außenluftkonzentration, der Filterqualität und der Innenraumquellen auf die Feinstaubpartikel-Exposition zu untersuchen, wurde im Rahmen dieses Projekts eine weitere Simulationsstudie durchgeführt (siehe Kapitel 5.5.2).

Die Bewertung der **Kurzzeit-Exposition**, d.h. die Überschreitungshäufigkeit des Kurzzeit-ELVs zeigt, dass alle vier Lüftungskonzepte bei den Schadstoffen Formaldehyd und PM_{2,5} gut abschneiden. In der Simulation wird keine ELV-Überschreitung festgestellt. Jedoch wird der CO₂-ELV (1000 ppm) beim Abluftsystem regelmäßig überschritten.

Der Kurzzeit-Bewertungsindex für CO₂ ergibt somit 33 % für das Abluftsystem gegenüber 0 % für die anderen drei Lüftungskonzepte. Die Simulation zeigt keine Überschreitung im Wohnzimmer. Die Überschreitungen beim Abluftsystem spiegeln lediglich die Tatsache wider, dass das Abluftlüftungskonzept bei der Luftzufuhr in das Schlafzimmer etwas weniger effektiv ist, da ein erheblicher Teil der Gesamtzufuhr durch (unkontrollierte) Leckagen in der Gebäudehülle erfolgt. Infolgedessen erreichen die simulierten CO₂-Konzentrationen im Schlafzimmer regelmäßig Spitzenwerte um 1100 ppm. Dies ist geringfügig höher als bei den anderen Konzepten. Voraussetzung dafür sind gut dimensionierte Außenluftdurchlässe in den Schlafräumen. Nicht untersucht wurde ein Abluftsystem ohne Außenluftdurchlass. Hier wäre ein deutlich schlechteres Ergebnis zu erwarten.

Abbildung 21: Exemplarischer Verlauf der simulierten CO₂-Konzentration im Schlafzimmer für die vier untersuchten Lüftungskonzepte.



5.5.2. Bewertung von Außenluftfilter von Wohnraumlüftungsanlagen

Wie in Kapitel 5.1.3 und 5.5.1 gezeigt, ist die Feinstaubpartikel-Exposition bei der Bewertung der Raumluftqualität (RLQ) äußerst relevant. Es stellt sich die Frage, inwieweit eine mechanische Wohnraumlüftung mit Außenluftfilter die Exposition verringern kann. Welchen Beitrag liefern Innenraumquellen bzw. der Eintrag von außen? Welchen Einfluss hat die gewählte Filterqualität unter Berücksichtigung von in der Realität auftretenden bzw. nicht ganz vermeidbaren Fenster- und Türöffnungen? Um diese Fragen zu beantworten, wurde im Rahmen dieses Projekts eine Simulationsstudie auf Basis der oben beschriebenen Schadstoffmodellierung (Kapitel 5.2.2) durchgeführt. Die folgende Zusammenfassung wurde größtenteils aus dem englischen Konferenzbeitrag (Rojas, 2019) bzw. dem REHVA Journal Beitrag (Rojas, 2020a) übernommen.

Methode/Untersuchungsobjekt

Die untersuchte Wohneinheit wurde mit einer mechanischen Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung modelliert. Die gefilterte Außenluft wurde in das Schlafzimmer (40 m³/h), Kinderzimmer (20 m³/h) und Wohnzimmer (30 m³/h) zugeführt, und die "verbrauchte" Luft aus dem Küchenbereich (60 m³/h) und dem Badezimmer (30 m³/h) abgesaugt, siehe Abbildung 16. Weitere Informationen zur modellierten Wohneinheit sind in Kapitel 5.5.1 zusammengefasst. Die Details zur Modellierung der Feinstaubpartikelkonzentration sind im Kapitel 5.2.2 ausführlich beschrieben. Die Simulationen wurden mit der Software CONTAM (Dols & Polidoro, 2015) durchgeführt.

Bewertungsmethode

Die Partikelkonzentration der Außenluft wurde, aus den im Kapitel 5.2.2 beschriebenen Gründen, als zeitlich konstant (mit einer für Außenluft repräsentativen Größenverteilung) modelliert. Die Zeitpläne der simulierten Nutzung wiederholen sich täglich. D.h. ohne Berücksichtigung der zeitlich variierenden Infiltration (bzw. der variierenden Luftwechselraten bei geöffneten Fenstern oder Türen) könnte sich der Simulationszeitraum auf einen einzelnen Tag limitieren. Um auch die Wettergetriebenen Variationen der natürlichen Lüftung zu berücksichtigen, wurde ein gesamter Wintermonat (Januar) mit einem Zeitschritt von 5 Minuten simuliert. Für die Bewertung der Simulationsergebnisse wurde die zeitlich gemittelte Schadstoffexposition herangezogen. Konkret wurde die durchschnittliche Exposition des/der "ständig anwesenden Bewohner:in" während des gesamten Monats bewertet, d. h. es wurde immer die Partikelkonzentration in jenen Räumen, in denen sich diese Person laut Zeitplan aufhielt, ausgewertet. Es sei angemerkt, dass auf diese Weise die Partikelkonzentration im Zimmer des Kindes nicht berücksichtigt wurde.

Die im Rahmen dieses Projekts festgelegten Expositionsgrenzwerte (ELV) für Kurzzeit- bzw. Langzeitexposition mit PM_{2,5} betragen 25 µg/m³ für ein 24-Stunden-Mittel bzw. 10 µg/m³ für ein Jahresmittel. Diese Werte basieren auf den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, 2005). Den AutorInnen dieser Arbeit sind keine Normen oder Leitlinien bekannt, welche Expositionsgrenzwerte für Ultrafeine Partikel (UFP) definieren.

Ergebnisse

Abbildung 22 zeigt die Simulationsergebnisse als UFP-Konzentration (Anzahl aller Partikel <100 nm pro cm³) und als PM_{2,5}-Konzentration (Masse aller Partikel <2,5 µm pro m³) für das Referenzmodell im Verlauf eines Wintertages. Da eine konstante Außenluftkonzentration modelliert wurde, werden die Schwankungen durch interne Quellen (modellierte Kochvorgänge) sowie Tür- und Fensteröffnungen dominiert. Es gibt nur geringe Unterschiede zwischen den PM₁-, PM_{2,5}- und PM₁₀-Werten, d. h. die meiste Zeit über wird die Innenraumbelastung hauptsächlich von Partikeln im Submikrometerbereich dominiert.

Abbildung 22: Simulierte Tagesverlauf der UFP (Ultrafeinpartikel) und PM_{2,5} Konzentration im Wohn-/Küchenbereich (a) und im Schlafzimmer (b) für den Referenzfall mit F7 Filter. Die sich als Folge nur von außen eingetragener Partikel ergebende Innenraumkonzentration ist strichliert dargestellt.

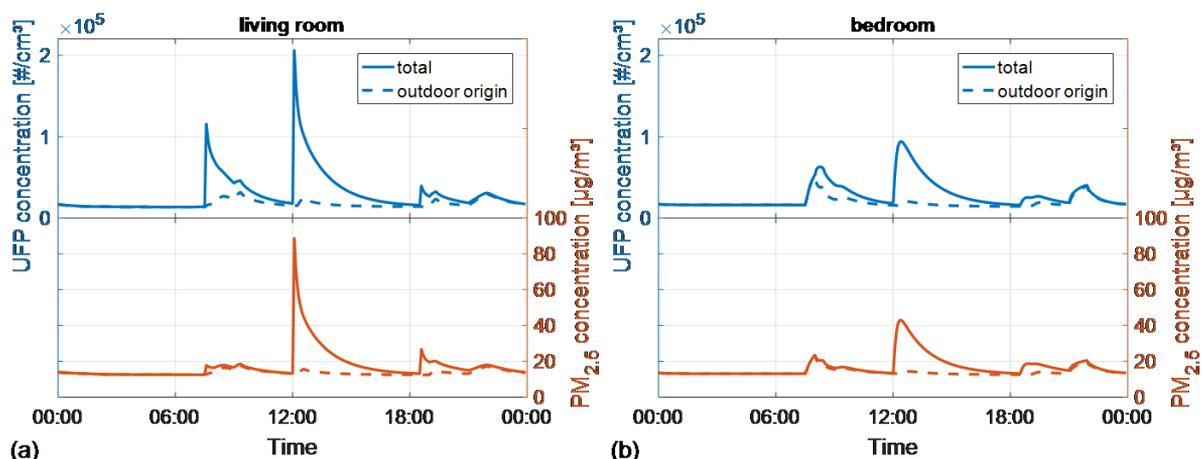
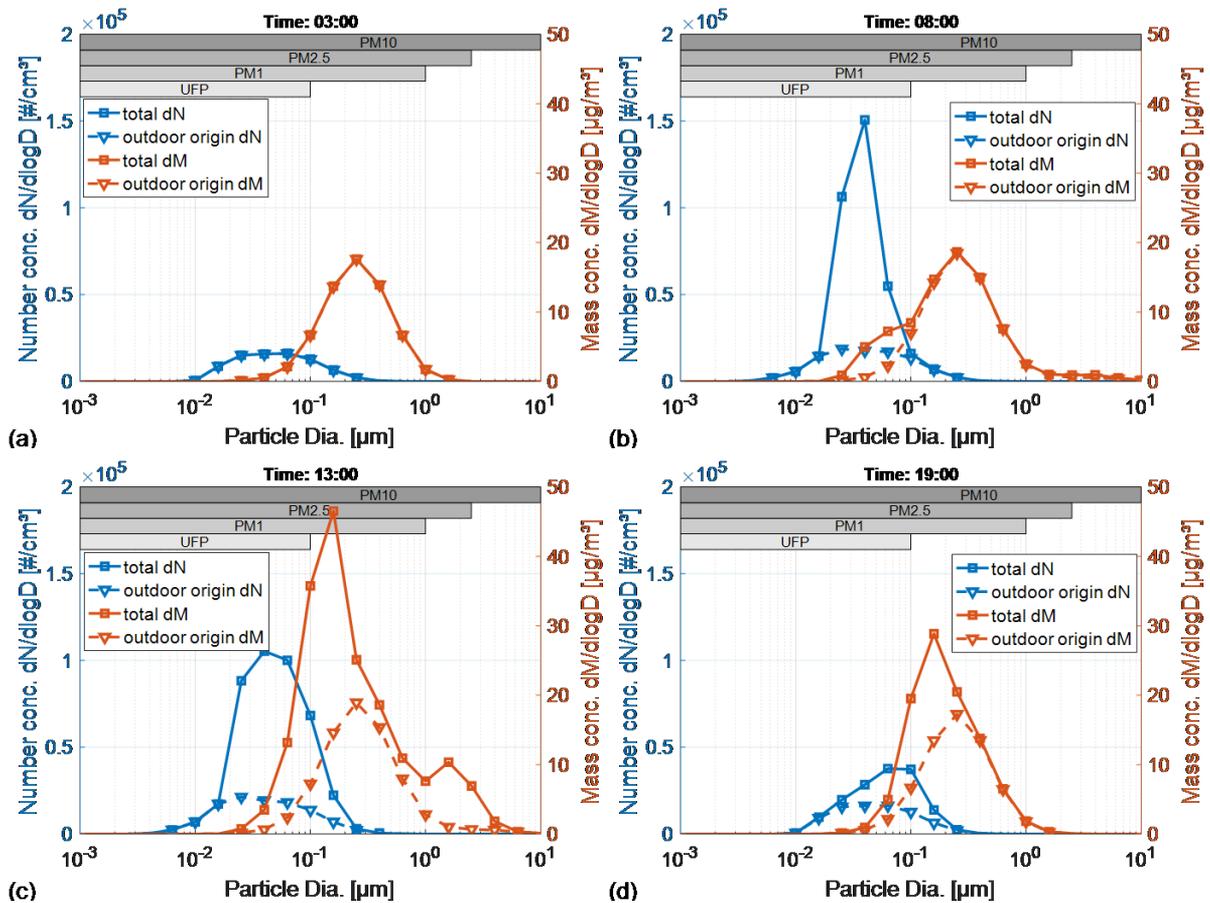


Abbildung 23 zeigt die Größenverteilung für vier verschiedene Tageszeiten: (a) nachts - es sind nur Partikel aus der Außenluft vorhanden; (b) nach dem Frühstück (Toasten) - die Anzahlkonzentration ist durch Partikel aus Innenräumen stark erhöht, die Massenkonzentration wird jedoch immer noch von Partikeln aus der Außenluft dominiert (erhöht durch das morgendliche Lüften); (c) nach dem Mittagessen - das Kochen (Burger braten) erhöht die Anzahl- und Massenkonzentration erheblich; (d) nach dem Abendessen - die Anzahl- und Massenkonzentration wird durch eine weitere Kochaktivität (Öl erhitzen) deutlich erhöht.

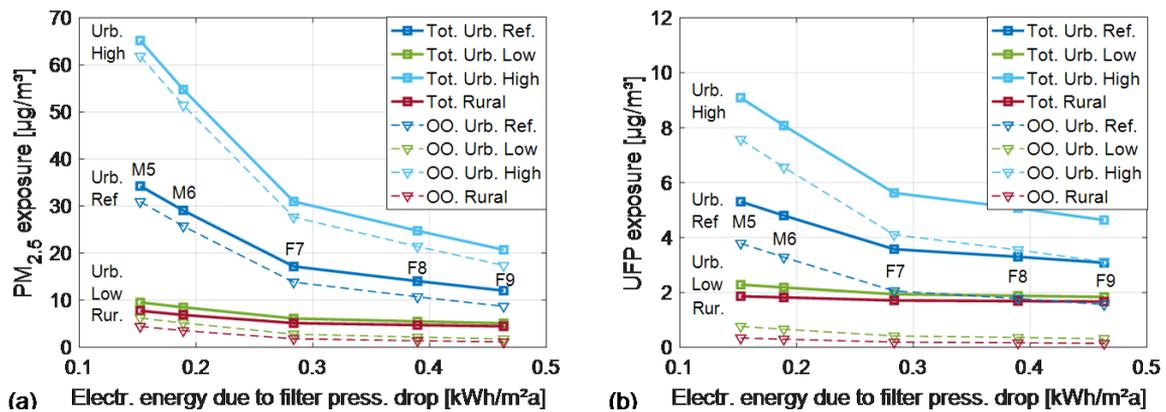
Abbildung 23: Log-normierte Partikelgrößenverteilung für Partikelanzahl (blau) und Partikelmasse (rot) im Wohnzimmer zu vier unterschiedlichen Tageszeiten: nachts (a), nach dem Frühstück (b), nach dem Mittagessen (c) und nach dem Abendessen (d). Die sich als Folge nur von außen eingetragener Partikel ergebende Größenverteilungen sind ebenfalls dargestellt (strichliert/Dreieck).



Einfluss Filterqualität

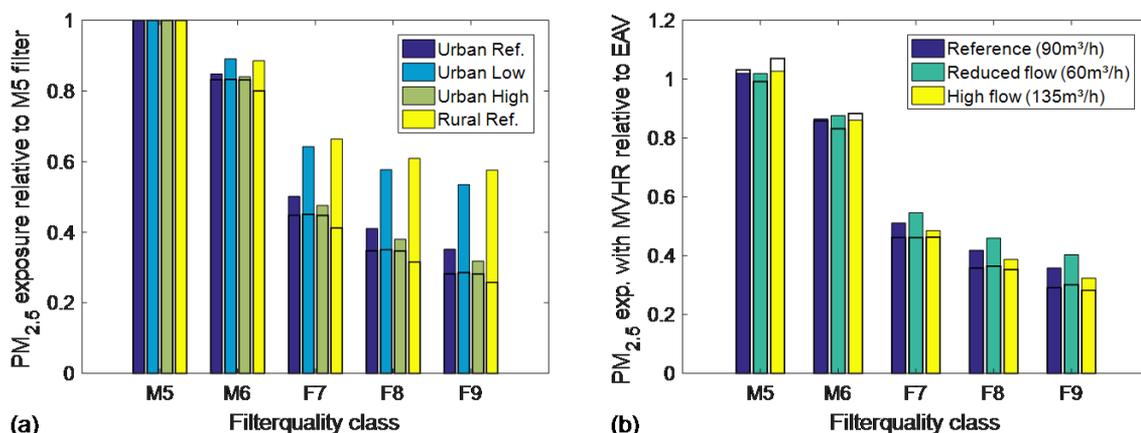
Um zu untersuchen, welche Filterqualität für die angenommenen Randbedingungen (sehr luftdichtes Gebäude mit Wohnraumlüftung) am günstigsten ist, wurde die resultierende mittlere PM_{2,5}- und UFP-Belastung gegen den geschätzten zusätzlichen Stromverbrauch aufgrund des filterinduzierten Druckabfalls aufgetragen, siehe Abbildung 24. Der Druckabfall (Durchschnitt über die Lebensdauer) für jede Filterklasse wurde aus (Shi, 2012), darin in Abbildung 8.5a entnommen. Wie man sieht, wird die PM_{2,5}- und UFP-Exposition durch die Verwendung höherer Filterklassen erheblich reduziert. Allerdings sind die zusätzlichen Verbesserungen bei den Filterklassen F8 und F9 gering. Bei niedrigeren Außenluftkonzentrationen, wie sie in den Fällen "Urban Low" und "Rural" angenommen werden (siehe Abbildung 10), ist ein erheblicher Teil der Exposition auf Partikel zurückzuführen, die beim Kochen entstehen. Daher hängt bei hohen Filterklassen die relative Verringerung der Gesamtexposition deutlich stärker von den Außenluftbedingungen ab (siehe Abbildung 25a). Die relative Verringerung der von außen eingetragener Partikel, ist jedoch praktisch unabhängig von der Außenluftkonzentration. Ein F7 Filter würde die Exposition gegenüber Partikel von außen gegenüber einem M5 Filter um ca. 55 % verringern, ein F9-Filter dagegen um ca. 72 %.

Abbildung 24: Mittlere PM_{2,5} (a) und UFP (b) Exposition als Funktion des Ventilator-Stromverbrauchs aufgrund des Filter-induzierten Druckabfalls für verschiedene Außenluftbedingungen. Die Verbrauchseinheiten beziehen sich auf kWh pro m² Wohnfläche und Jahr bei kontinuierlichem Betrieb. Der Beitrag durch Außenluftpartikel ist ebenfalls dargestellt.



In Abbildung 25 wird die Exposition bei folgenden drei Betriebszuständen mit der Exposition bei einer reinen Abluftanlage verglichen: Referenzmodell mit Wohnraumlüftung (F7 Filter) mit Gesamtvolumenstrom von 90 m³/h und reduzierter bzw. erhöhter Gesamtvolumenstrom. Das Abluftanlagen wurde, so wie das Wohnraumlüftungs-Referenzmodell, mit einem Volumenstrom von 90 m³/h und mit Außenluftdurchlässen ohne Filterfunktion im Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer modelliert. Es wurde angenommen, dass diese Öffnungen bei ihrer Nenneinstellung einen Druckabfall von 10 Pa aufweisen. Es ist zu beachten, dass bei der simulierten Abluftanlage trotz der hohen Luftdichtheit von n₅₀=0,6 h⁻¹ ein erheblicher Teil (ca. 30 %) durch Undichtheiten in der Gebäudehülle angesaugt wird. Infolgedessen ist die PM_{2,5} Exposition zwischen dem Abluftsystem und einem Zu-/Abluftsystem mit einem M5-Filter vergleichbar. Mit einem F7 Filter wird die Exposition gegenüber dem Abluftsystem um etwa 50 % reduziert. Man kann auch sehen, dass der Einfluss des Gesamtvolumenstroms gering ist.

Abbildung 25: Mittlere relative PM_{2,5} Exposition bezogen auf die Exposition bei Verwendung eines M5 Filters (a) bzw. bezogen auf die Exposition bei Einsatz einer Abluftanlage ohne Filter. In (a) sind Ergebnisse bei verschiedenen Außenluftbedingungen, in (b) bei verschiedenen Gesamtvolumenströmen der Referenzlüftungsanlage (Zu-/Abluft mit F7 Filter) dargestellt.



Um die Sensitivität der gezeigten Ergebnisse auf die getroffenen Modellannahmen zu testen, wurde eine Reihe von Parametervariationen durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Öffnungsdauer der Innentüren, der Fensteröffnungsdauer, der Gebäudeluftdichtheit, der Partikelabsetzrate und des Partikel-Eindringfaktors untersucht. Es zeigte sich, dass sich die oben gezeigten Ergebnisse nicht wesentlich ändern, wenn diese Modellannahmen innerhalb plausibler Grenzen variiert werden. Den stärksten Einfluss hatten die Partikelabsetzrate und die Fensterlüftungsdauer. Die Depositionsrate erhöht/verringert die Exposition deutlich, allerdings ist der Effekt für Filterklassen F7 und höher stark reduziert. Dagegen nimmt die Empfindlichkeit gegenüber der Fensterlüftungsdauer für höhere Filterklassen zu. Die gezeigten Ergebnisse zur Wahl der Filterklasse sind somit durch eine Variation der genannten Parameter nicht wesentlich beeinflusst. Details zur durchgeführten Sensitivitätsanalyse sind in (Rojas, 2019) dokumentiert.

Einfluss der inneren Partikelquellen

Die Menge und Häufigkeit der in Innenräumen erzeugten Partikel kann stark variieren, siehe z. B. (Abdullahi et al., 2013). Daher wurden Variationen durchgeführt, um abzuschätzen, wie sich unterschiedliche Erzeugungsraten auf die Ergebnisse des Referenzmodells auswirken könnten. So wurde die Quellstärke auf ein Drittel des Referenzfalls reduziert bzw. um den Faktor drei erhöht. Auf diese Weise variiert die durch das Kochen erzeugte Partikelquellenstärke um etwa eine Größenordnung zwischen dem "niedrigen" und dem "hohen" Fall. Es ist zu beachten, dass bestimmte Kochaktivitäten und/oder Randbedingungen zu noch höheren Innenraumkonzentrationen führen können. Zusätzlich wurde der Einsatz einer Umluft- und einer Dunstabzugshaube simuliert. Die Verwendung einer Umlufthaube wurde modelliert, indem Partikelgrößen-abhängige Reduktionsfaktoren auf die Partikelquellenstärke der Mittagsemissionen (Burger braten) und der Abendemissionen (Öl erhitzen) angewendet wurden. Die Reduktionsfaktoren wurden aus einer Reihe von Experimenten ermittelt, die vom Autor am Lawrence Berkeley National Lab (Rojas et al. 2018) durchgeführt wurden. Dabei wurde Partikelkonzentration in einer Testkammer mit und ohne Verwendung eines in einer Umlufthaube installierten Aktivkohlefilters verglichen. Bei diesen Tests wurde die vollständige Erfassung der Abluftfahne sichergestellt, um die Partikelfiltereffizienz (FE) typischer (Aktivkohle-)Filter handelsüblicher Dunstabzugshauben zu bestimmen. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass Dunstabzugshauben in Wohngebäuden nicht die gesamte Dunstwolke erfassen, wurde in dieser Simulationsstudie für Umluft- und Abluftdunstabzugshaube eine Fangrate, (auf Englisch „capture efficiency“, CE) von 0,7 angenommen. Dies stellt ein eher optimistisches Szenario dar, wo hauptsächlich an den hinteren Herdplatten gekocht wird. Da ist die Fangrate im Allgemeinen höher, siehe z.B. (Rojas et al., 2017). Die resultierende Quellstärke S_{ext} bzw. S_{rec} beim Einsatz einer Abluft- bzw. Umlufthaube wurde nach den folgenden Gleichungen berechnet,

$$S_{ext} = S_0(1 - CE) \quad (6)$$

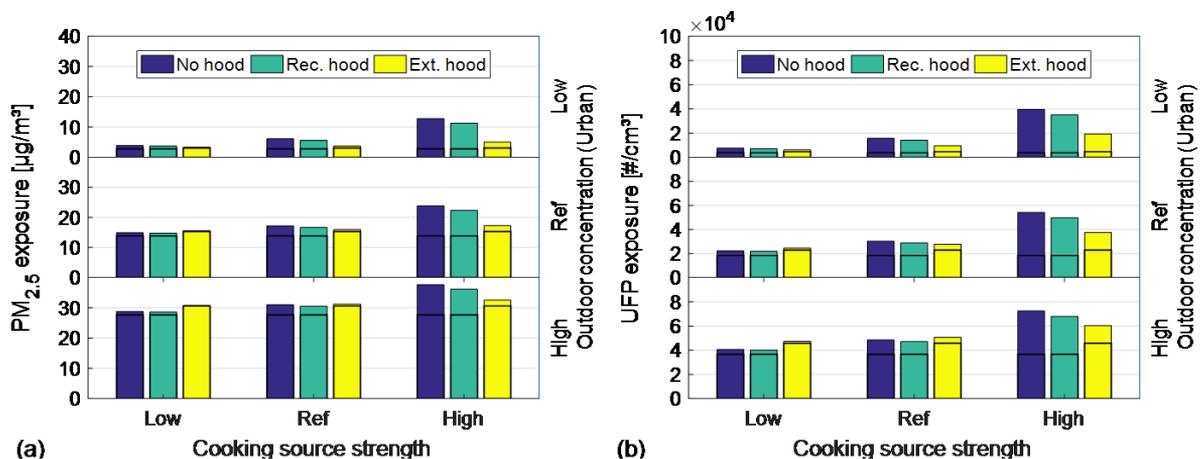
$$S_{rec} = S_0(1 - CE) + S_0CE(1 - FE) \quad (7)$$

wobei S_0 die Quellstärke der Kochtätigkeit ohne Dunstabzugshaube darstellt.

Es wurde angenommen, dass der Dunstabzug (Umluft oder Abluft) während der Zubereitung des Mittag- und Abendessens 30 Minuten lang in Betrieb ist, beginnend mit dem modellierten Emissionsbeginn. Während des Betriebs des Abluftdunstabzugs wurde eine Zuluftöffnung (ohne Filter), die einen Druckabfall von 10 Pa bei einem Volumenstrom von 300 m³/h erzeugt, im Küchenbereich aktiviert.

Abbildung 26 vergleicht die mittlere PM_{2,5}- und UFP-Exposition mit Umluft-, Abluft- und ohne Dunstabzug. Dieser Vergleich ist für unterschiedliche Annahmen in Bezug auf Stärke der Kochquelle und Höhe der Außenluftkonzentration. Für alle Szenarien fällt auf, dass die Partikelexposition durch eine Verwendung eines Umluftdunstabzugs nicht nennenswert reduziert wird. Hier könnten neue Entwicklungen von Umluftgeräten mit Partikelfilterfunktion in Zukunft die Situation verbessern. Betrachtet man die Herkunft der Partikel, so fällt auf, dass die Kochemissionen in den Szenarien mit einer "starken" Kochquelle je nach Außenluftkonzentration einen erheblichen oder sogar dominanten Anteil ausmachen, wenn kein Abluftdunstabzug verwendet wird. Hier kann ein Abluftdunstabzug die Gesamtexposition merklich reduzieren. Für den Fall mit mittlerer Koch-Emissionsstärke und niedriger Außenluftkonzentration entspricht die PM_{2,5}-Exposition durch Kochen in etwa der Exposition durch Partikel von außen. Auch hier kann ein Abluftabzug die bereits niedrige Partikelexposition weiter reduzieren. Dies gilt nicht für alle anderen Fälle, hier führt die Verwendung einer Ablufthaube nicht zu einer nennenswerten Verringerung der Partikelexposition, in einigen Fällen sogar zu einer Erhöhung der Feinstaubbelastung. Dies liegt daran, dass während des Betriebs der Abluftdunstabzugs große Mengen ungefilterter Außenluft in die Wohnung nachströmen.

Abbildung 26: Mittlere PM_{2,5} (a) und UFP (b) Exposition für unterschiedliche Stärken der Kochemissionen (horizontal) und unterschiedliche Außenluftkonzentrationen (vertikal) für drei verschiedene Dunstabzugsszenarien: Ohne (Blau), mit Umluft- (grün) und mit Abluftdunstabzug (gelb). Dargestellt sind die Ergebnisse des Referenzmodells mit Wohnraumlüftung mit F7 Filter. Die von Außenluft verursachte Partikelexposition ist durch die Querstriche gekennzeichnet.



6 Vernetzung und Ergebnistransfer

6.1. Zielgruppen und Relevanz

Das Thema dieses Projekts, die Raumluftqualitätsoptimierte Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Wohngebäuden, betrifft verschiedenste Zielgruppen. Im Folgenden werden die Zielgruppen und die für sie augenscheinlich relevantesten Projektergebnisse gelistet.

Haustechnikplaner:innen und Architekt:innen

Hier sind vor allem die Ergebnisse aus Subtask 4 relevant. Darin wurden Probleme und Hürden bei der Planung, Betrieb und Wartung von mechanischen Lüftungssystemen identifiziert und verschiedene Lösungsansätze aus verschiedenen Ländern zielgruppengerecht (in Form von 2-seitigen Fallstudien) präsentiert. Ein Blick über den jeweiligen „nationalen Tellerrand“ soll die erforderliche Innovationskraft fördern.

Relevante Links:

- [Subtask 4 Bericht](#)
- Webinar [Küchendunstabzüge in Kombination mit Wohnraumlüftung \(2021\)](#)
- Webinar [Nachträgliche Integration der Wohnungslüftung im Bestand - mit einfacher, kostengünstiger und effizienter Luftführung \(2021\)](#)

Hersteller:innen von Lüftungssystemen

Auch für Hersteller:innen bildet die Zusammenstellung der jeweiligen nationalen Anforderungen, der Hürden bei der Planung, Ausführung und Betrieb von Lüftungsanlagen in den verschiedenen Ländern (Subtask 4) eine Grundlage für strategische Entscheidungen für Produktinnovationen.

Relevante Links:

- [Subtask 4 Bericht](#)
- Artikel [Ventilation in low energy residences - a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries \(2020\)](#)
- Webinar [Experience with Low-cost \(MOS VOC\) sensors for residential ventilation - Response to typical pollution activities and suitability for demand control \(2021\)](#)
- Artikel [Particle filtration in energy efficient housing with MVHR \(2020\)](#)

Hersteller:innen von Bauprodukten und Raumausstattungen

Im Rahmen von Subtask 2 wurden Schadstoff-Emissionsraten aus Bauprodukten charakterisiert und Emissionsmodelle entwickelt. Außerdem wird auf das Nachfolgeprojekt IEA EBC Annex 86 verwiesen, darin beschäftigt sich ein Subtask mit dem Thema Raumluftqualitätsmanagement mit Hilfe „Smart materials“.

Relevante Links:

- [Subtask 2 Bericht](#)
- [IEA EBC Annex 86](#)

Anbieter:innen von Gebäude- bzw. Heimautomatisierungssystemen

Neue Entwicklungen in Richtung „Smart Ventilation“ und Bewertung von „Performance based ventilation“ wurden im Subtask 4 untersucht. Des Weiteren wird auf das Nachfolgeprojekt IEA EBC Annex 86 verwiesen, hier wird dieses Thema verstärkt behandelt.

Relevante Links:

- [Subtask 4 Bericht](#)
- Webinar [Experience with Low-cost \(MOS VOC\) sensors for residential ventilation - Response to typical pollution activities and suitability for demand control \(2021\)](#)
- [IEA EBC Annex 86](#)

Bauherren, Wohnbauträger und Facility Manager:innen

Diese Zielgruppe profitiert von der Zusammenstellung der relevanten Schadstoffe (Subtask 1), deren Bewertung und von den unterschiedlichen innovativen Lösungsansätze und zugehörigen Erfahrungen und Bewertungen (Subtask 4 und Subtask 5).

Relevante Links:

- [Subtask 1 Bericht](#)
- [Subtask 4 Bericht](#)
- [Subtask 5 Bericht](#)
- Webinar [Wohnraumlüftung in energieeffizienten Gebäuden in Österreich und Europa \(2020\)](#)
- Webinar [Nachträgliche Integration der Wohnraumlüftung im Bestand - mit einfacher, kostengünstiger und effizienter Luftführung \(2021\)](#)
- Webinar [Küchendunstabzüge in Kombination mit Wohnraumlüftung \(2021\)](#)

Behörden zur Erlassung von Richtlinien, Empfehlungen oder Anforderungen

Hier sind vor allem die Erkenntnisse aus Subtask 1, die Bewertungsgrundlagen für Raumluftqualität in Niedrigenergiehäuser relevant. Des Weiteren bildet die internationale Zusammenstellung des normativen Stands, der Probleme und Hürden und der abgeleiteten Handlungsempfehlungen eine gute Informationsbasis.

Relevante Links:

- [Subtask 1 Bericht](#)
- Artikel [Ventilation in low energy residences - a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries \(2020\)](#)

Wissenschaftler:innen und Entwickler:innen zum Thema Raumluftqualität und Lüftung

Je nach Fokus könnten hier alle behandelten Themen von Relevanz sein. Speziell für Wissenschaftler:innen zum Thema Bewertung der Raumluftqualität bzw. Entwickler:innen von Simulationsprogrammen enthält Subtask 3 interessante Erkenntnisse.

Relevante Links:

- [Überblick aller IEA EBC Annex 68 Publikationen](#)
- [Subtask 3 Bericht](#)

6.2. Einbindung der Stakeholder und Dissemination

6.2.1. Einbindung der Stakeholder

Im Rahmen einer international angelegten Befragung wurden Probleme, Hürden, Erfahrungen und Verbesserungspotentiale für die Planung, Betrieb und/oder Wartung von Wohnraumlüftungssystemen bei involvierten Stakeholdern frühzeitig im Projekt erhoben. Dabei wurden 44 Fachexpert:innen aus sieben Ländern in einem semi-strukturierten Interview (ca. 1 Stunde) befragt, sechs dieser Interviews wurde in Österreich geführt. Sie umfassten zwei Haustechnikplaner:innen, zwei Vertreter:innen von Bauträgern und je eine(n) Vertreter:in von Lüftungsgerätehersteller:innen und Behörden. Die Ergebnisse wurden in Subtask 4 verarbeitet und im Rahmen einer Journalpublikation veröffentlicht (Zukowska et al., 2021). Sie geben einen umfassenden Überblick über den regulativen und technischen Stand der Wohnraumlüftung in den sieben beteiligten EU-Ländern.

6.2.2. Nationale Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse

Aufgrund der Corona-Pandemie wurde die nationale Dissemination zu Projektende im Rahmen einer Webinar-Reihe auf der österreichischen Informationsplattform „bauinformation.com“ umgesetzt.

Diese umfasste vier Vorträge, welche aufgezeichnet wurden und unter folgenden Links abrufbar sind:

- [Wohnraumlüftung in energieeffizienten Gebäuden in Österreich und Europa \(2020\)](#)
12.11.2020; Sprecher: Gabriel Rojas; Dauer: ~30 Minuten
- [Experience with Low-cost \(MOS VOC\) sensors for residential ventilation - Response to typical pollution activities and suitability for demand control \(2021\)](#)
10.12.2020; Sprecher: Jakub Kolarik, DTU; Dauer: ~30 Minuten
- [Küchendunstabzüge in Kombination mit Wohnraumlüftung \(2021\)](#)
20.01.2021; Sprecher: Gabriel Rojas; Dauer: ~30 Minuten
- [Nachträgliche Integration der Wohnungslüftung im Bestand - mit einfacher, kostengünstiger und effizienter Luftführung \(2021\)](#)
18.02.2021; Sprecher: Rainer Pfluger; Dauer: ~30 Minuten

Des Weiteren wurden Projektergebnisse in folgenden Veranstaltungen präsentiert bzw. flossen in folgende transferorientierte Publikationen bzw. studentische Arbeiten ein:

- DACH - Expertentreffen - Lüftung: 31.10.2019, Zürich, vorgetragen durch Rainer Pfluger
- Treffen - Verein Komfortlüftung.at: 19.09.2019, Innsbruck, vorgetragen durch Rainer Pfluger
- E.Vent Ergebnisworkshop: 16.4.2020, Online, Titel: Neues zum Thema Lüftung: Planung, Balance, Betrieb und Brandschutz - Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse aus den Projekten „E.Vent“ und „IEA EBC Annex 68; Veranstalter: AEE Intec
- IEA Vernetzungstreffen: 20.10.2016, Wien; Hohe Raumluftqualität für energieeffiziente Gebäude ohne „Performance Gap“, Sprecher: Gabriel Rojas; Abrufbar auf der [Projektwebseite des BMK](#)
- IEA Vernetzungstreffen: 10.10.2018, Wien, Bewertung der Raumluftqualität mit Hilfe der Gebäudesimulation, Sprecher: Gabriel Rojas

- AIVC Konferenz 2017: Bocanegra-Yanez, M., Rojas, G., Zukowska-Tejsen, D., Burman, E., Cao, G., Hamon, M. P., & Kolarik, J. (2017). Design and operation of ventilation in low energy residences – A survey on code requirements and building reality from six European countries and China. 38th AIVC Conference.
- AIVC Konferenz 2019: Rojas, G. (2019). Ambient air filter efficiency in airtight, highly energy efficient dwellings – A simulation study to evaluate benefits and associated energy costs. 40th AIVC Conference, 920–931.
- AIVC Konferenz 2019: Rojas, G., Pfluger, R. (2019). Alternative ducting options for balanced mechanical ventilation systems in multifamily housing. 40th AIVC Conference, 124–126.
- BauSim Konferenz 2020: Rojas, G. (2020). IAQ Simulation – Going beyond CO2 concentration for the assessment of two innovative ventilation concepts. BauSim 2020 - 8th Conference Auf IBPSA Germany and Austria, 426–433.
- EUROVENT Guidebook 2021: Andersson, J., Astrauskas, V., Boulanger, X., Chlup, J., Grassler, W., Gronbaek, H., Kolacz, A., Kurnitski, J., Rojas, G., Sikonczyk, I., & Val, E. (2021). Residential Heat Recovery Ventilation Units. In EUROVENT Guidebook. Eurovent.
<https://eurovent.eu/?q=content/eurovent-residential-heat-recovery-ventilation-units-guidebook>
- Halbertschlager, M. (2020). Raumlufqualitätsplanung im Rahmen der Gebäudeplanung. In Bachelorthesis. Salzburg University of Applied Sciences.
- Reiter, V. (2020). Bedarfsgeregelte Lüftung - Stand der Technik und Entwicklungen im Bereich der Sensorik. In Bachelorthesis. Salzburg University of Applied Sciences.

Folgend die für Österreich relevantesten wissenschaftlichen Publikationen aus diesem internationalen Projekt. Eine deutsche Zusammenfassung findet man auf der [Projektwebseite](#) des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) auf deutscher Sprache zusammengefasst.

Berichte:

- Abadie, M., & Wargocki, P. (2017). IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings - Subtask 1: Defining the metrics. In AIVC Contributed Report 17. [Link zur AIVC Webseite](#)
- Qin (Ed.), M., Zhang (Ed.), J., Liu, Z., Liang, W., Xudong, Y., Grunewald, J., Nicolai, A., & Abadie, M. (2020). IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings - Subtask 2: Pollutant loads in residential buildings. [Link zur IEA Projekt Webseite](#)
- Grunewald (Ed.), J., Zhang, J., Nicolai, A., Weiß, D., Hirth, S., Zile, J., Kolarik, J., Rojas-Kopeinig, G., De Jonge, K., & Krämer, B. (2020). IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings - Subtask 3: Modelling of Energy Efficiency and IAQ - Review, Gap analysis and Categorization. [Link zur IEA Projekt Webseite](#)
- Kolarik (Ed.), J., Rojas (Ed.), G., Rode (Co-Ed.), C., Zukowska (Co-Ed.), D., Burman (Co-Ed.), E., Gao (Co-Ed.), G., & Smith (Co-Ed.), K. (2020). IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings - Subtask 4: Current challenges, selected case studies and innovative solutions covering indoor air quality, ventilation design and control in residences. In AIVC Contributed Report 19. [Link zur AIVC Webseite](#)

- Paralovo (Ed.), S. L., Laverge, J., Tariku, F., Assefa, A., Burman, E., De Jonge, K., Guyot, G., Jaques, R., Plagmann, M., Pedram, S., Rojas-Kopeinig, G., Spruyt, M., & Stranger, M. (2020). IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings - Subtask 5: Field measurements and case studies. [Link zur IEA Projekt Webseite](#)

Journal Publikationen:

- Cony Renaud Salis, L., Abadie, M., Wargocki, P., & Rode, C. (2017). Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, 152, 492–502. [Link zur Journal Webseite](#)
- Zukowska, D., Rojas, G., Burman, E., Guyot, G., Bocanegra-Yanez, M. del C., Laverge, J., Cao, G., & Kolarik, J. (2021). Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries. *International Journal of Ventilation*, 20(2), 83–102. [Link zur Journal Webseite](#)
- Rojas, G. (2020a). Particle filtration in energy efficient housing with MVHR. *REHVA Journal*, April, 8–11. [Link zur Journal Webseite](#)

Alle Publikationen des internationalen Konsortiums findet man auf der [internationalen Projektwebseite](#).

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Bei Expert:innen der Bauwirtschaft herrscht weitgehend Einigkeit, dass die energieeffiziente Bauweise einen wesentlichen Hebel für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors und somit einen wichtigen Beitrag für die Erfüllung der Klimaschutzziele darstellt, siehe z.B. (Auer et al., 2019). Energieeffiziente Bauweise erfordert eine luftdichte Gebäudehülle. Daher muss das Thema Raumluftqualität bei der Planung und Betriebsführung von energieeffizienten Gebäuden bedacht werden. Auch der thermische Komfort wird direkt durch Entscheidungen betreffend Raumluftqualität und Energieeffizienz beeinflusst. Das Wechselspiel dieser drei wichtigen Aspekte gilt es zu berücksichtigen. Aufgrund ökonomischer Überlegungen wird das Thema Raumluftqualität jedoch gerade im Wohnbau (inkl. Sanierung) oft vernachlässigt.

Ziel dieses Projekts war es, die wissenschaftlichen Grundlagen und Daten für eine gekoppelte Berechnung und Bewertung der Raumluftqualität und der Energieeffizienz von Wohngebäuden zu erarbeiten, und mit Hilfe dieser Methoden mögliche Lösungsansätze für die Erfüllung der genannten Ansprüche (hohe Raumluftqualität, Komfort und Energieeffizienz bei niedrigen Kosten) zu evaluieren.

Um eine umfassende Bewertung der Raumluftqualität zu ermöglichen, wurden im Rahmen dieses IEA Projekts die relevantesten Innenraum-Luftschadstoffe in Niedrigenergiehäusern identifiziert. Von den 16 identifizierten Schadstoffen stechen Benzol, Stickstoffdioxid, Styrol, Trichlorethylen, Formaldehyde und Feinstaubpartikel (PM_{2.5}) als besonders relevant hervor. Die beiden Letzteren können auch durch Innenraumquellen generiert werden und wesentlich zur gesundheitlichen Belastung beitragen und wurden folglich für eine detaillierte Bewertung herangezogen. Kohlendioxid stellt ebenfalls einen wichtigen Indikator (für durch menschliche Aktivität verursachte Luftbelastung) dar. Um die gesundheitliche Belastung durch diese Schadstoffe zusammenfassen zu können, wurde eine Bewertungsmetrik entwickelt. Details, siehe Kapitel 5.1.

Schadstoffquellenmodelle für eine detaillierte Abbildung von Formaldehyde- und Feinstaubpartikelexposition in Innenräumen wurden recherchiert, weiterentwickelt und für den Einsatz in Multizonen-Gebäudemodellen aufbereitet. Formaldehydemissionen aus Baumaterialien sind stark temperatur- und feuchteabhängig, dies wurde in den dargestellten Modellen berücksichtigt. Das Verhalten von Feinstaubpartikel ist stark von der Größe der Partikel abhängig. Die vorgeschlagenen Quellen-, Senken- und Filtermodelle decken einen Größenbereich von 10 nm bis 10 µm ab. Die Partikelemissionsrate beim Kochen, die relevanteste Innenraumquelle im Wohnbereich, wurde aus neuen Messdaten für verschiedenen Kochprozesse extrahiert. Details, siehe Kapitel 5.2.

Eine detaillierte Simulation der Raumluftqualität im Rahmen einer dynamischen Gebäudesimulation stellte sich, trotz neuer Entwicklungen und Möglichkeiten bei verfügbaren Softwaretools, als aufwendig und komplex dar. Im Rahmen dieses Projekts wurden gekoppelte Modelle für die Simulation der Raumluftqualität und des Energiebedarfs entwickelt und mit verfügbaren Softwareprogrammen umgesetzt. So wurde die Co-Simulation zwischen TRNSYS und CONTAM und zwischen Dynbil und CONTAM umfangreich getestet bzw. für Evaluierungen von Lüftungskonzepten

herangezogen. Erstere zeigte sich als unpraktikabel und fehleranfällig. Letztere funktionierte verlässlich, kann aber aufgrund der geringen Verbreitung der Software Dynbil nicht als allgemeintaugliche Methode bei der Planung von Wohngebäuden betrachtet werden. Eine detaillierte (über die Bewertung von CO₂-Konzentration) hinausgehende Modellierung und Bewertung der Raumluftqualität ist mit den derzeit gängigen Gebäudesimulationsprogrammen nur aufwendig umsetzbar. Sie bleibt damit wissenschaftlichen Studien (vorerst) vorenthalten. Siehe Kapitel 5.3.

Der Bedarf an kostengünstigen Lösungen für die Umsetzung mechanischer Lüftungssysteme wurde durch die im Rahmen des Projekts durchgeführte Umfrage bestätigt. Darin wurde auch ein Bedarf nach platzsparenden und sanierungsfreundlichen mechanischen Lüftungslösungen identifiziert. Siehe Kapitel 5.4.

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei innovative, im Rahmen nationaler Forschungsprojekte (weiter)entwickelte Lüftungskonzepte (Knotzer et al., 2015; Sibille et al., 2013), mit den hier dargestellten Methoden bewertet. Diese adressieren den in den Umfragen genannten Bedarf an kostengünstigen und platzsparenden Lösungen. Dabei wurden Formaldehydemissionen temperatur- und feuchteabhängig und Feinstaubpartikel größenabhängig modelliert. Die Simulationsergebnisse dieser detaillierten Schadstoffmodellierung zeigen, dass die sogenannte „erweiterte Kaskadenlüftung“ (ohne Zuluft im Wohnzimmer) vergleichbar gut wie die „herkömmliche“ Kaskadenluftführung (Standardkaskade bzw. gerichtetes Abluftsystem) abschneidet. Nur die Formaldehyd-Exposition im Wohnzimmer ist höher als beim Referenzsystem. Betrachtet man die gesundheitlichen Auswirkungen dieser erhöhten Konzentrationen mit Hilfe der DALY's (disability adjusted life years), so wären diese im Vergleich zur Innenraumluftbelastung durch Feinstaubpartikel (PM_{2.5}) bei mäßig bis schlechter Außenluft vernachlässigbar. Auch das sogenannte „aktive Überströmkonzept“ erzielt generell gute Ergebnisse, jedoch ist die PM_{2.5} Exposition im Schlafzimmer erhöht gegenüber der „erweiterten“ oder „normalen“ Kaskadenlüftung aber deutlich niedriger im Vergleich zum Abluftsystem. Details, siehe 5.5.

Dieses IEA Projekt hat somit wesentliche Beiträge für die oben genannten Ziele geliefert. Es wurden Bewertungsmetrik, Schadstoffmodelle und Simulationsmethoden (weiter)entwickelt und erprobt, um Raumluftqualität und Energieeffizienz umfassend evaluieren zu können. Mögliche Lösungsansätze, welche eine hohe Raumluftqualität bei möglichst geringem Energie- und/oder Ressourceneinsatz für Wohngebäude bereitstellen können, wurden recherchiert, dokumentiert und Methoden evaluiert. Wie die Umfrage zeigen konnte, gibt es aber weiterhin hohen Innovationsbedarf um Planung, Umsetzung, Betrieb und Wartung von raumluftqualitätsoptimierten und energieeffizienten Gebäuden zu verbessern. Dies umfasst z.B. Produktinnovationen für Lüftungssysteme, digitale Werkzeuge, um eine integrale Planung zu erleichtern, innovative Materialien, welche Raumluftschadstoffe (an der Quelle) minimieren können, intelligente Regelungsstrategien für Lüftungssysteme, usw. Zusätzlich gilt es, an den Ergebnissen dieses IEA Projekts anzuknüpfen, um Bewertungsmethoden und Schadstoffmodelle weiterzuentwickeln und die dafür erforderlichen empirischen Daten zu bestimmen.

Um die genannten Aspekte zu adressieren, wurde ein neues IEA-Kooperationsprojekt gestartet. In diesem Projekt mit dem Titel „IEA EBC Annex 86 - Energieeffizientes Raumluftqualitätsmanagement für Wohngebäude“ soll die Bewertungsmethode weiterentwickelt werden (Subtask 1); Schadstoffquellen in Wohngebäuden charakterisiert werden (Subtask 2); „Smarte“ Materialien und

„smarte“ Lüftungsstrategien untersucht werden (ST3 und ST4); Cloud-Daten und „Internet of Things“ (IoT) Technologien für Optimierung und Validierung eingesetzt werden. Es sollen somit Methoden zur ganzheitlichen Bewertung und Optimierung verschiedener Strategien zum Raumluftqualitätsmanagement (RLQM) im Wohnbau erarbeitet werden. Unter RLQM-Strategien werden aufeinander abgestimmte Maßnahmen (für Neubau und Sanierung) zur Verbesserung der Raumluftqualität verstanden. Das übergeordnete Ziel ist es, sinnvolle Managementstrategien zu identifizieren, und in Bezug auf Energieeffizienz, Akzeptanz, Regelung, Qualität und Zuverlässigkeit weiter zu optimieren.

Auch aus österreichischer Sicht sind die gesteckten Ziele hoch relevant. Lüftungskonzepte müssen immer höhere Anforderungen in Bezug auf Raumluftqualität, Energieeffizienz und Komfort erfüllen. Durch die aktuelle Pandemie haben die Aspekte Raumluftqualität und richtiges Lüften an Priorität gewonnen. Die Erarbeitung, Entwicklung und Validierung von kostengünstigen, zuverlässigen und intelligenten Lüftungskonzepten, welche die genannten Kriterien erfüllen können, hat für Österreich höchste Relevanz. Das „Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Gebäuden“ (Tappler (Ed.) & Arbeitskreis Innenraumluft des BMK, 2020) bezeichnet den Einsatz von Lüftungstechnischen Anlagen u.a. für Schlafräume mit hohem Außenlärmpegel als unumgänglich und fordert, dass Luftvolumenströme entsprechend der Luftqualität automatisch geregelt und dem Nutzer:innenverhalten angepasst werden sollten. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung bei Planung und Betrieb von Gebäuden sowie der rasanten Entwicklung der Sensortechnologien eröffnen sich vielversprechende Möglichkeiten, diese Forderungen kostengünstig umzusetzen.

Literaturverzeichnis

- Abadie, M., & Wargocki, P. (2017). *Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings- Annex 68 | Subtask 1: Defining the metrics AIVC Contributed Report 17* (Issue September). <https://www.aivc.org/resource/cr-17-indoor-air-quality-design-and-control-low-energy-residential-buildings-annex-68>
- Abdullahi, K. L., Delgado-Saborit, J. M., & Harrison, R. M. (2013). Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review. *Atmospheric Environment*, *71*, 260–294. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.061>
- Alonso, M. J., Dols, W. S., & Mathisen, H. M. (2019). Using co-simulation between EnergyPlus and CONTAM to develop IAQ and energy-centric demand-controlled ventilation systems. *40th AIVC - 8th TightVent - 6th Venticool Conference*.
- Arlan, L. G., Neal, J. S., Morgan, M. S., Vyszynski-Moher, D. L., Rapp, C. M., & Alexander, A. K. (2001). Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes temperate climates. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *107*(1), 99–104. <https://doi.org/10.1067/mai.2001.112119>
- ASHRAE. (2005). Airflow around buildings. In *ASHRAE Fundamentals* (2005th ed., p. 16.1 ff). ASHRAE.
- Auer, M., Handler, M., Reinprecht, A., Schrottenecker, I., Steinlechner, M., Bayer, G., Trebut, F., Thaler, J., & Fischer, V. (2019). *Prozessbegleitung – Erarbeitung der Wärmestrategie - Endbericht*.
- Baldinger, S., Baumann, R., Damberger, B., Hanus-Ilmar, A., Hutter, H.-P., Kundi, M., Palmisano, G., Püringer, J., Schneider, J., & Tappler, P. (2011). *Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft*. http://www.lebensministerium.at/umwelt/luft-laerm-verkehr/luft/innenraumluft/richtlinie_innenraum.html
- Bekö, G. (2007). *Removal of Particles from the Supply Air of Ventilation Systems Avoiding the Formation of Sensory Pollution Source*. Technical University of Denmark.
- Bocanegra-Yanez, M., Rojas, G., Zukowska-Tejse, D., Burman, E., Cao, G., Hamon, M. P., & Kolarik, J. (2017). Design and operation of ventilation in low energy residences – A survey on code requirements and building reality from six European countries and China. *38th AIVC Conference*.
- Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2009). Particle emission factors during cooking activities. *Atmospheric Environment*, *43*(20), 3235–3242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.044>
- Calabrese, T., & Rojas-Kopeinig, G. (2017). *Annex 68 Subtask 5 – Common Exercise 1 (Interner Bericht)*.
- Calabrese, T., Rojas-Kopeinig, G., & Siegele, D. (2017). *Trnsys/CONTAM VS. MATLAB/Simulink – Simulation of 1-zone model (Interner Bericht)*.
- Chao, C. Y. H., Wan, M. P., & Cheng, E. C. K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. *Atmospheric Environment*, *37*(30), 4233–4241. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00560-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00560-0)
- Cony Renaud Salis, L., Abadie, M., Wargocki, P., & Rode, C. (2017). Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, *152*, 492–502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.054>

- Cros, C. J., Morrison, G. C., Siegel, J. A., & Corsi, R. L. (2012). Long-term performance of passive materials for removal of ozone from indoor air. *Indoor Air*, 22(1), 43–53. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00734.x>
- Darling, E. K., Cros, C. J., Wargocki, P., Kolarik, J., Morrison, G. C., & Corsi, R. L. (2012). Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. *Building and Environment*, 57, 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.004>
- De Jonge, K. (2018). *The impact of demand controlled ventilation on indoor VOC exposure in Belgian dwellings*. University Ghent.
- Deng, Q., Yang, X., & Zhang, J. (2009). Study on a new correlation between diffusion coefficient and temperature in porous building materials. *Atmospheric Environment*, 43(12), 2080–2083. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.052>
- Deng, Q., Yang, X., & Zhang, J. S. (2012). Key factor analysis of VOC sorption and its impact on indoor concentrations: The role of ventilation. *Building and Environment*, 47, 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.026>
- Destailats, H., Chen, W., Apte, M. G., Li, N., Spears, M., Almosni, J., Brunner, G., Zhang, J. J., & Fisk, W. J. (2011). Secondary pollutants from ozone reactions with ventilation filters and degradation of filter media additives. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3561–3568. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.066>
- DoE. (n.d.). *EnergyPlus*. <https://energyplus.net/>
- Dols, W. S., Emmerich, S. J., & Polidoro, B. J. (2015). *Using coupled energy , airflow and indoor air quality software (TRNSYS / CONTAM) to evaluate building ventilation strategies*. <https://doi.org/10.1177/0143624415619464>
- Dols, W. S., Emmerich, S. J., & Polidoro, B. J. (2016). Coupling the multizone airflow and contaminant transport software CONTAM with EnergyPlus using co-simulation. *Building Simulation*, 9(4), 469–479. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0279-2>
- Dols, W. S., Milando, C. W., Ng, L., Emmerich, S. J., & Teo, J. (2021). On the Benefits of Whole-building IAQ , Ventilation , Infiltration , and Energy Analysis Using Co-simulation between CONTAM and EnergyPlus. *8th International Building Physics Conference*, 1–9.
- Dols, W. S., & Polidoro, B. J. (2015). *CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2 - NIST Technical Note 1887*. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1887>
- Dols, W. S., Wang, L., Emmerich, S. J., & Polidoro, B. J. (2015). Development and application of an updated whole-building coupled thermal, airflow and contaminant transport simulation program (TRNSYS/CONTAM). *Journal of Building Performance Simulation*, 8(5), 326–337. <https://doi.org/10.1080/19401493.2014.938699>
- Fraefel, R. (1999). *Die Wohnungslüftung im MinEnergie Haus, Planungshilfe für Baufachleute*. <http://docplayer.org/21896598-Die-wohnungslueftung-im.html>
- Géhin, E., Ramalho, O., & Kirchner, S. (2008). Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8341–8352. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.021>
- González, L. F., Joubert, A., Andrès, Y., Liard, M., Renner, C., & Le Coq, L. (2016). Filtration performances of HVAC filters for PM10 and microbial aerosols— Influence of management in a lab-scale air handling unit. *Aerosol Science and Technology*, 50(6), 555–567.

<https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1167833>

- Grunewald, J. (Ed. . (2020). *IEA EBC Annex 68 - Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings - Subtask 3: Modelling of Energy Efficiency and IAQ - Review, Gap analysis and Categorization*.
- Guyot, G., Bailly, A., Bernard, A., Perez, G., Coeudevez, S., Berlin, S., Parent, E., Huet, A., Berthault, S., Jobert, R., Labaume, D., Ferrier, G., & Justet, S. (2015). Ventilation performance and indoor air pollutants diagnosis in 21 french low energy homes. *AIVC Proceedings*.
- Hanley, J. T., Ensor, D. S., Smith, D. D., & Sparks, L. E. (1994). Fractional aerosol filtration efficiency of in-duct ventilation air cleaners. *Indoor Air*, 4(3), 167–178.
- He, C., Morawska, L., & Gilbert, D. (2005). Particle deposition rates in residential houses. *Atmospheric Environment*, 39(21), 3891–3899. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.016>
- Howard-Reed, C., Wallace, L., & Emmerich, S. J. (2003). *Deposition Rates of Fine and Coarse Particles in Residential Buildings: Literature Review and Measurements in an Occupied Townhouse. NISTIR 7068*. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7068>
- Hussein, T., Glytsos, T., Ondráček, J., Dohányosová, P., Ždímal, V., Hämeri, K., Lazaridis, M., Smolík, J., & Kulmala, M. (2006). Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmospheric Environment*, 40(23), 4285–4307. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.053>
- 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*. 311. <http://www.komfortlftung.at/index.php?id=2008>
- Kirchner, S., Arenes, J.-P., Cochet, C., Derbez, M., Duboudin, C., Elias, P., Gregoire, A., Jédor, B., Lucas, J.-P., Pasquier, N., Pigneret, M., & Ramalho, O. (2006). *National survey Indoor air quality in French dwellings Final report*. 91. internal-pdf://196.4.97.224/oqai.pdf%0Ahttp://www.oqai.fr/userdata/documentsunited_kingdom/1_document_1.pdf
- Knotzer, A., Spoerk-Duer, M., Wagner, W., Suschek-Berger, J., Trojer, A., Greml, A., Sibille, E., Rojas, G., Pfluger, R., & Endbericht, P. (2015). low_vent.com: Konzepte für die „low-tech“ Komfortlüftung in großvolumigen Wohngebäuden und deren Nutzungskomfort [Final report]. In *Endbericht*. <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1087.pdf>
- Lahrz, T., Bischof, W., & Sagunski, H. (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 51(11), 1358–1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Lai, A. C. K., & Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 31(4), 463–476. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)00536-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00536-4)
- Lee, B. H., Yee, S. W., Kang, D., Yeo, M. S., & Woo, K. (n.d.). *Relationship between indoor and outdoor particle concentrations by penetration coefficient and deposition rate in office building*. 1.
- Liang, W., Lv, M., & Yang, X. (2016). The combined effects of temperature and humidity on initial emittable formaldehyde concentration of a medium-density fiberboard. *Building and Environment*, 98, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.024>

- Lin, C. C., & Chen, H. Y. (2014). Impact of HVAC filter on indoor air quality in terms of ozone removal and carbonyls generation. *Atmospheric Environment*, *89*, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.020>
- Liu, D. L., & Nazaroff, W. W. (2003). Particle penetration through building cracks. *Aerosol Science and Technology*, *37*(7), 565–573. <https://doi.org/10.1080/027868203000927>
- Logue, J. M., Price, P. N., Sherman, M. H., & Singer, B. C. (2012). A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in U.S. residences. *Environmental Health Perspectives*, *120*, 216–222. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104035>
- Long, C. M., Suh, H. H., Catalano, P. J., & Koutrakis, P. (2001). Using time- and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior. *Environmental Science and Technology*, *35*(10), 2089–2099. <https://doi.org/10.1021/es001477d>
- Meteotest. (n.d.). *Meteonorm Software*. <http://meteonorm.com>
- Ng, L., Poppendieck, D., Dols, W. S., & Emmerich, S. J. (2018). Evaluating indoor air quality and energy impacts of ventilation in a net-zero energy house using a coupled model. *Science and Technology for the Built Environment*, *24*(2), 124–134. <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1401403>
- NIST. (n.d.-a). *CONTAM - NIST Multizone Modeling*. <https://www.nist.gov/el/energy-and-environment-division-73200/nist-multizone-modeling>
- NIST. (n.d.-b). *CONTAM Particle Distribution Calculator*. Retrieved April 25, 2019, from <https://www.nist.gov/node/1326541/software-tools/contam-particle-distribution-calculator>
- OEHHA. (n.d.). *OEHHA Acute, 8-hour and Chronic Reference Exposure Level (REL) Summary*. <https://oehha.ca.gov/air/general-info/oehha-acute-8-hour-and-chronic-reference-exposure-level-rel-summary>
- PHI. (n.d.). *DYNBIL DYNAmische Gebäude Energie-BILanzen*. Retrieved October 24, 2018, from https://passipedia.de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/dynamische_simulation
- Ploss, M., & Hatt, T. (2016). Modellvorhaben KliNaWo - klimagerechter nachhaltiger Wohnbau. *Economicum*, 8–59. https://www.energieinstitut.at/pdfviewer/economicum_themenband-5/
- Poon, C., Wallace, L., & Lai, A. C. K. (2016). Experimental study of exposure to cooking emitted particles under single zone and two-zone environments. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.026>
- Riley, W. J., McKone, T. E., Lai, A. C. K., & Nazaroff, W. W. (2002). Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms. *Environmental Science and Technology*, *36*(2), 200–207. <https://doi.org/10.1021/es010723y>
- Rode, C. (2020). *Webpage IEA EBC Annex 68*. <https://www.iea-ebc-annex68.org>
- Rojas, G. (2020a). Particle filtration in energy efficient housing with MVHR. *REHVA Journal*, *April*, 8–11. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/particle-filtration-in-energy-efficient-housing-with-mvhr>
- Rojas, G. (2019). Ambient air filter efficiency in airtight, highly energy efficient dwellings – A simulation study to evaluate benefits and associated energy costs. *40th AIVC Conference*, 920–931.
- Rojas, G. (2020b). IAQ Simulation – Going beyond CO2 concentration for the assessment of two

- innovative ventilation concepts. *BauSim 2020 - 8th Conference Auf IBPSA Germany and Austria*, 426–433.
- Rojas, G., Delp, W., & Singer, B. C. (2018). Testing recirculating cooker hoods – Can their filter reduce (ultra) fine particle loads during cooking ? In W. Feist (Ed.), *International Passivhaus Conference* (pp. 623–626). Passive House Institute.
- Rojas, G., Pfluger, R., & Feist, W. (2016). Ventilation concepts for energy efficient housing in Central European climate – A simulation study comparing indoor air quality , mould risk and ventilation losses. *Indoor Air 2016*.
- Rojas, G., Pfluger, R., Greml, A., & Spörk-Dür, M. (2015). LUNA: Lüften und Heizen in Passivhäusern - Variantenvergleich auf Basis von Behaglichkeit und Nachhaltigkeit. In *Endbericht [Final report]*. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id7356>
- Rojas, G., & Schnieders Juergen. (2016). Vorhersagegenauigkeit für Energiebedarf und Raumtemperaturen verschiedener Programme. *20. Internationale Passivhaustagung*, 525–526.
- Rojas, G., Sibille, E., & Pfluger, R. (2012). Sensitivitätsanalyse zur Raumluftqualität mit Wohnraumlüftung. *Enova - Nachhaltige Gebäude*, 323–330.
- Rojas, G., Walker, I., & Singer, B. (2017). Comparing extracting and recirculating residential kitchen range hoods for the use in high energy efficient housing. *38th AIVC Conference*, 117–128.
- Ruprecht, J. (1993). Tropospheric Aerosols. In P. Hobbs (Ed.), *Aerosol-Cloud-Climate Interactions* (pp. 1–31). Academci Press.
- Schnieders, J. (2008). Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung. In *DBU-Bericht*.
- Schöberl, H., & Hofer, R. (2012). *Betriebskosten- und Wartungskostenvergleich zwischen Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern*.
- See, S. W., & Balasubramanian, R. (2008). Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods. *Atmospheric Environment*, 42(39), 8852–8862. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.011>
- Shandilya, A., & Rojas-Kopeinig, G. (2021). *TRNSYS - CONTAM Coupling of Austrian reference dwelling (Interner Berichtsentwurf)*.
- Sherman, M. H., & Hult, E. L. (2013). Impacts of contaminant storage on indoor air quality: Model development. *Atmospheric Environment*, 72, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.027>
- Shi, B. (2012). *Removal of ultrafine particles by intermediate air filters in ventilation systems - Evaluation of performance and analysis of applications ventilation systems* [Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden]. <https://research.chalmers.se/en/publication/165538>
- Shi, B., Ekberg, L. E., & Langer, S. (2013). Intermediate air filters for general ventilation applications: An experimental evaluation of various filtration efficiency expressions. *Aerosol Science and Technology*, 47(5), 488–498. <https://doi.org/10.1080/02786826.2013.766667>
- Sibille, E., & Pfluger, R. (2015). Die Anwendung aktiver Überströmer für die Verteilung der Zuluft in Wohnungen. In W. Feist (Ed.), *19. Internationale Passivhaus Tagung* (pp. 425–430). Passivhaus Institut.
- Sibille, E., Rojas, G., Rothbacher, M., Pfluger, R., & Malzer, H. K. (2013). *“Doppelnutzen” - Komfort-*

- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten [Final report: Extended cascade ventilation - "Double use"]. Austrian Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology. <http://www.hausderzukunft.at/publikationen/view.html/id1158>
- Siegel, J. A., & Nazaroff, W. W. (2003). Predicting particle deposition on HVAC heat exchangers. *Atmospheric Environment*, 37(39–40), 5587–5596. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.033>
- Sippola, M. R., & Nazaroff, W. W. (2003). Modeling particle loss in ventilation ducts. *Atmospheric Environment*, 37(39–40), 5597–5609. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.07.016>
- Sjaastad, A. K., Svendsen, K., & Jorgensen, R. B. (2008). Sub-micrometer particles: Their level and how they spread after pan frying of beefsteak. *Indoor and Built Environment*, 17(3), 230–236. <https://doi.org/10.1177/1420326x08091186>
- Stephens, B., & Siegel, J. A. (2012). Penetration of ambient submicron particles into single-family residences and associations with building characteristics. *Indoor Air*, 22(6), 501–513. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00779.x>
- Strachan, P., Svehla, K., Heusler, I., & Kersken, M. (2015). Whole model empirical validation on a full-scale building. *Journal of Building Performance Simulation*, 1493(September), 1–20. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1064480>
- Tappler (Ed.), P., & Arbeitskreis Innenraumlufte des BMK. (2020). *Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Gebäuden*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- Tappler, P., Hutter, H.-P., Hengsberger, H., Ringer, W., & Energien, N. (2014). *Lüftung 3.0 - Bewohnergesundheit und Raumluftqualität in neu errichteten energieeffizienten Wohnhäuser*.
- Taveres-Cachat, E., Favoino, F., Loonen, R., & Goia, F. (2021). Ten questions concerning co-simulation for performance prediction of advanced building envelopes. *Building and Environment*, 191(October 2020), 107570. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107570>
- Thaler, A. (2010). *Lebenszykluskosten von Wohnraumlüftungsanlagen im mehrgeschossigen Wohnbau*. Fachhochschule Kufstein.
- Thatcher, T. L., & Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487–1497. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00016-R](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00016-R)
- Tian, L., Zhang, G., Lin, Y., Yu, J., Zhou, J., & Zhang, Q. (2009). Mathematical model of particle penetration through smooth/rough building envelop leakages. *Building and Environment*, 44(6), 1144–1149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.007>
- Torkmahalleh, M. A., Goldasteh, I., Zhao, Y., Udochu, N. M., Rossner, A., Hopke, P. K., & Ferro, A. R. (2012). PM 2.5 and ultrafine particles emitted during heating of commercial cooking oils. *Indoor Air*, 22(6), 483–491. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00783.x>
- TRNSYS. (n.d.). *TRNSYS - Transient Simulation Tool*. <http://www.trnsys.com>
- UBA. (n.d.). *Zeitverläufe der Luftschadstoffe - Umweltbundesamt Österreich*. <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/daten-luft/zeitverlaeuftluftschadstoffe>
- Wallace, L. (2006). Indoor Sources of Ultrafine and Accumulation Mode Particles: Size Distributions, Size-Resolved Concentrations, and Source Strengths. *Aerosol Science and Technology*, 40(5),

348–360. <https://doi.org/10.1080/02786820600612250>

Wallace, L. A., Emmerich, S. J., & Howard-Reed, C. (2004). Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with a Gas Stove. *Environmental Science and Technology*, 38(8), 2304–2311. <https://doi.org/10.1021/es0306260>

Weber, A., Koschenz, M., Holst, S., Hiller, M., & Welfonder, T. (2002). TRNFLOW: integration of COMIS into TRNSYS type 56. *Proceedings of the 23rd AIVC and 3rd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate, EPIC 2002*.

Weschler, C. J. (2011). Chemistry in indoor environments: 20 years of research. *Indoor Air*, 21(3), 205–218. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00713.x>

WHO. (2009). *WHO guidelines for indoor air quality : dampness and mould*. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43325/E92645.pdf

Wolkoff, P., & Kjærgaard, S. K. (2007). The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International*, 33, 850–857. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.04.004>

World Health Organization, W. (2005). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005*. 1–21. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90109-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90109-6)

Xiong, J., Wei, W., Huang, S., & Zhang, Y. (2013). Association between the emission rate and temperature for chemical pollutants in building materials: General correlation and understanding. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8540–8547. <https://doi.org/10.1021/es401173d>

Zhang, Y., Luo, X., Wang, X., Qian, K., & Zhao, R. (2007). Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials. *Atmospheric Environment*, 41(15), 3203–3216. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.081>

Zhu, L., Deng, B., & Guo, Y. (2013). A unified model for VOCs emission/sorption from/on building materials with and without ventilation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 734–740. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.092>

Zukowska, D., Rojas, G., Burman, E., Guyot, G., Bocanegra-Yanez, M. del C., Laverge, J., Cao, G., & Kolarik, J. (2021). Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries. *International Journal of Ventilation*, 20(2), 83–102. <https://doi.org/10.1080/14733315.2020.1732056>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitspakete (ST) und deren Zusammenspiel.....	14
Abbildung 2: Kategorisierung der verschiedenen Luftschadstoffe in Innenräumen. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	17
Abbildung 3: Mittlere gemessene Schadstoffkonzentration in Niedrigenergie- (Low-E) und Nicht-Niedrigenergiehäusern (Non-Low-E) aus den untersuchten Studien. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017).....	17
Abbildung 4: Bandbreite der Langzeit-Expositionsgrenzwerte für Auswahl an Schadstoffe entnommen aus verschiedenen internationalen Quellen (>6) für Richtwerte für Innenraumluft (IAGV). Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	19
Abbildung 5: Verhältnis der in Niedrigenergiehäusern gemessenen jahresmittleren Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Langzeit-Exposition. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	21
Abbildung 6: Verhältnis der in Nicht-Niedrigenergiehäusern gemessenen jahresmittleren Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Langzeit-Exposition. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	22
Abbildung 7: Verhältnis der in Niedrigenergiehäusern gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Kurzzeit-Exposition. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	22
Abbildung 8: Verhältnis der in Nicht-Niedrigenergiehäusern gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte für Kurzzeit-Exposition. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	23
Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung der im IEA EBC Annex 68 entwickelten Raumluftqualitäts-Bewertungsmetrik. Links oben: Darstellung der Langzeit-ELV-Indizes für alle relevanten Schadstoffe und Maximalwert; Rechts oben: Darstellung der gesundheitlichen Belastung aufgrund Langzeit-Exposition mit Hilfe der DALY-Kennzahl für relevante Schadstoffe und gesamt; Links unten: Darstellung der Kurzzeit-ELV-Indizes für alle relevanten Schadstoffe und Maximalwert; Rechts unten: Darstellung des lüftungsinduzierten Energieverbrauchs. Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	26
Abbildung 10: Partikelgrößenverteilung für städtische (a) und ländliche (b) Gebiete mit Daten aus (Ruprecht, 1993). Die Diagramme zeigen die log-normalisierten Verteilungen für Partikelanzahl und Massenkonzentration unter der Annahme einer Partikeldichte von 1 g/cm^3 . Die Integralwerte für UFP ($\leq 0,1 \mu\text{m}$), PM1 ($\leq 1 \mu\text{m}$), PM2,5 ($\leq 2,5 \mu\text{m}$), PM10 ($\leq 10 \mu\text{m}$) sind ebenfalls in den Diagrammen dargestellt. Grafiken aus (Rojas, 2019).	30
Abbildung 11: Größenabhängiger Abscheidegrad für Partikel bei Lüftungsfiltren (a) und Gebäudeundichtheiten/Rissen (b). Daten aus (Shi, 2012) und (Liu & Nazaroff, 2003). Grafiken aus (Rojas, 2019).....	31
Abbildung 12: Im Modell abgebildete Partikelemissionsraten (a) und Partikelabsetzraten (b). Die Referenzkurve in (b) wurde aus (Riley et al., 2002). Grafiken aus (Rojas, 2019).	32
Abbildung 13: Schematische Darstellung des EnergyPlus-CONTAM Kopplungsprozesses. Quelle: (Dols et al., 2016).....	34

Abbildung 14: Schematische Darstellung des TRNSYS-CONTAM Kopplungsprozesses. Das Modul „Type 98“ betreibt den Datenaustausch zwischen den eigentlichen Recheneinheiten „Type 56“ und „ContamX“. Quelle: (Dols, Wang, et al., 2015).....	35
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Co-Simulation mit CONTAM und dem Gebäudesimulationsprogramm DynBil.	36
Abbildung 16: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der Standardkaskadenlüftung. Zuluft (blau) in Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer und Abluft (orange) in Küche und Bad.	41
Abbildung 17: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der erweiterten Kaskadenlüftung. Zuluft (blau) in Schlaf-, und Kinderzimmer und Abluft (orange) in Küche und Bad. Das Wohnzimmer wird nur mit Überströmluft versorgt.	42
Abbildung 18: Grundriss der simulierten Wohneinheit mechanisch belüftet mit dem Zonierungsprinzip der aktiven Überströmung. Zuluft (blau) nur im Wohnzimmer/Küchen-Bereich und Abluft (orange) in Küchenbereich und Bad. Schlaf- und Kinderzimmer werden mit aktiven Überströmelementen aus dem Flur mit Luft versorgt.	43
Abbildung 19: Bewertung der simulierten Formaldehyd Langzeit-Exposition in Wohn- und Schlafzimmer mit Hilfe des Langzeit-ELV (a) und mit Hilfe des DALY-Index (b).....	44
Abbildung 20: Bewertung der simulierten PM _{2,5} -Langzeit-Exposition in Wohn- und Schlafzimmer mit Hilfe des Langzeit-ELV (a) und mit Hilfe des DALY-Index (b).	45
Abbildung 21: Exemplarischer Verlauf der simulierten CO ₂ -Konzentration im Schlafzimmer für die vier untersuchten Lüftungskonzepte.	46
Abbildung 22: Simulierte Tagesverlauf der UFP (Ultrafeinpartikel) und PM _{2,5} Konzentration im Wohn-/Küchenbereich (a) und im Schlafzimmer (b) für den Referenzfall mit F7 Filter. Die sich als Folge nur von außen eingetragener Partikel ergebende Innenraumkonzentration ist strichliert dargestellt.....	47
Abbildung 23: Log-normierte Partikelgrößenverteilung für Partikelanzahl (blau) und Partikelmasse (rot) im Wohnzimmer zu vier unterschiedlichen Tageszeiten: nachts (a), nach dem Frühstück (b), nach dem Mittagessen (c) und nach dem Abendessen (d). Die sich als Folge nur von außen eingetragener Partikel ergebende Größenverteilungen sind ebenfalls dargestellt (strichliert/Dreieck).....	48
Abbildung 24: Mittlere PM _{2,5} (a) und UFP (b) Exposition als Funktion des Ventilator-Stromverbrauchs aufgrund des Filter-induzierten Druckabfalls für verschiedene Außenluftbedingungen. Die Verbrauchseinheiten beziehen sich auf kWh pro m ² Wohnfläche und Jahr bei kontinuierlichem Betrieb. Der Beitrag durch Außenluftpartikel ist ebenfalls dargestellt.....	49
Abbildung 25: Mittlere relative PM _{2,5} Exposition bezogen auf die Exposition bei Verwendung eines M5 Filters (a) bzw. bezogen auf die Exposition bei Einsatz einer Abluftanlage ohne Filter. In (a) sind Ergebnisse bei verschiedenen Außenluftbedingungen, in (b) bei verschiedenen Gesamtvolumenströmen der Referenzlüftungsanlage (Zu-/Abluft mit F7 Filter) dargestellt.	49
Abbildung 26: Mittlere PM _{2,5} (a) und UFP (b) Exposition für unterschiedliche Stärken der Kochemissionen (horizontal) und unterschiedliche Außenluftkonzentrationen (vertikal) für drei verschiedene Dunstabzugsszenarien: Ohne (Blau), mit Umluft- (grün) und mit Abluftdunstabzug	

(gelb). Dargestellt sind die Ergebnisse des Referenzmodells mit Wohnraumlüftung mit F7 Filter. Die von Außenluft verursachte Partikelexposition ist durch die Querstriche gekennzeichnet. 51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste abgeschlossener und laufender IEA EBC Annex Projekte mit direktem Themenbezug zu Raumluftqualität und deren Bewertung in Gebäuden	13
Tabelle 2: Liste der in Annex 68 verwendeten Langzeit- und Kurzzeit Expositionsgrenzwerte (ELV) abgeleitet aus international verfügbaren Richtwerten für Innenraumluft (IAGV) Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	19
Tabelle 3: Liste der in diesem Projekt ausgewählten und für Niedrigenergie-Wohngebäude relevantesten Schadstoffe samt den zugehörigen Expositionsgrenzwerten (ELVs). Quelle: (Abadie & Wargocki, 2017)	24
Tabelle 4: Auflistung von Formelzeichen, Einheiten und Bezeichnungen	27
Tabelle 5: Materialparameterwerte für MDF-Holzplatten aus (Liang et al., 2016) bezogen auf die Formulierung mit Hilfe der absoluten Feuchte	27
Tabelle 6: Mittlere wohnflächenspezifische Formaldehyd-Emissionsraten (Guyot et al., 2015)	28
Tabelle 7: Kalibrierfaktor um das materialflächenspezifische Emissionsmodell an ein wohnflächenspezifisches Modell anzupassen.....	28

Abkürzungsverzeichnis

RLQ	Raumluftqualität
IAQ	Indoor Air Quality / Raumluftqualität
MV	Mechanical ventilation / mechanische Lüftung
MVHR	Mechanical ventilation with heat recovery / MV mit Wärmerückgewinnung
WRG	Wärmerückgewinnung
PM	Particulate Matter / Feinstaubpartikel
UFP	Ultrafeine Partikel
DALY	Disability Adjusted Lifeyear / Lebensjahre mit gesundheitlicher Einschränkung
ELV	Exposure limit value / Expositionsgrenzwert
AOE	Active overflow element / Aktives Überströmelement
TRV	Toxicity reference value / Toxizitätsgrenzwerte
IAGV	Indoor air guideline value / Richtwerte für Innenraumluft
OEL	Occupational exposure limits / Arbeitsplatzgrenzwerte (
LE	Low energy
TVOC	Total volatile organic compound / Summe flüchtiger organischer Verbindungen
ST	Subtaks / equiv. zu Arbeitspaket

8 Anhang

Anhang A.1

Verwendete Außenluft-Partikelkonzentration für städtische Gebiete für 21 Partikelgrößenklassen zwischen 1 nm und 10 µm. Originaldaten aus (Ruprecht, 1993).

D_{mp} [µm]	[kg_PM/kg_Air]	dN [1/cm ³]	dN/dlogDp [1/cm ³]	dM [µg/m ³]	dM/dlogDp [µg/m ³]
0.001	1.265E-17	29.09	145	1.52E-08	0
0.001585	1.298E-16	74.96	375	1.56E-07	0
0.002512	3.525E-15	511.40	2557	4.24E-06	0
0.003981	9.624E-14	3507.87	17539	0.000116	0
0.00631	1.495E-12	13684.13	68421	0.0018	0
0.01	1.227E-11	28216.85	141084	0.014774	0
0.01585	5.41E-11	31244.49	156222	0.065142	0
0.02512	1.441E-10	20905.91	104530	0.173511	1
0.03981	3.321E-10	12104.76	60524	0.399882	2
0.0631	9.194E-10	8415.51	42078	1.10705	6
0.1	2.4E-09	5519.19	27596	2.88984	14
0.1585	4.684E-09	2705.16	13526	5.640004	28
0.2512	6.505E-09	943.74	4719	7.832671	39
0.3981	6.462E-09	235.53	1178	7.780894	39
0.631	4.793E-09	43.87	219	5.771251	29
1	3.103E-09	7.14	36	3.736322	19
1.585	2.497E-09	1.44	7	3.006638	15
2.512	2.912E-09	0.42	2	3.506339	18
3.981	3.816E-09	0.14	1	4.594846	23
6.31	4.766E-09	0.04	0	5.738741	29
10	5.469E-09	0.01	0	6.585223	33

Anhang A.2

Verwendete Außenluft-Partikelkonzentration für ländliche Gebiete für 21 Partikelgrößenklassen zwischen 1 nm und 10 μm . Originaldaten aus (Ruprecht, 1993).

D_{mp} [μm]	[kg_PM/kg_Air]	dN [$1/\text{cm}^3$]	dN/dlogDp [$1/\text{cm}^3$]	dM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	dM/dlogDp [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
0.001	6.976E-20	0.16	1	8.4E-11	0
0.001585	1.102E-18	0.64	3	1.33E-09	0
0.002512	4.814E-17	6.98	35	5.8E-08	0
0.003981	2.372E-15	86.46	432	2.86E-06	0
0.00631	6.038E-14	552.67	2763	7.27E-05	0
0.01	7.112E-13	1635.52	8178	0.000856	0
0.01585	3.845E-12	2220.61	11103	0.00463	0
0.02512	9.954E-12	1444.12	7221	0.011986	0
0.03981	1.815E-11	661.55	3308	0.021854	0
0.0631	6.194E-11	566.95	2835	0.074582	0
0.1	2.414E-10	555.14	2776	0.29067	1
0.1585	5.901E-10	340.80	1704	0.710539	4
0.2512	8.527E-10	123.71	619	1.026736	5
0.3981	7.849E-10	28.61	143	0.945098	5
0.631	6.267E-10	5.74	29	0.754609	4
1	7.195E-10	1.65	8	0.86635	4
1.585	1.078E-09	0.62	3	1.29802	6
2.512	1.551E-09	0.23	1	1.867559	9
3.981	1.978E-09	0.07	0	2.38171	12
6.31	2.22E-09	0.02	0	2.673102	13
10	2.191E-09	0.01	0	2.638183	13

Anhang A.3

Abscheidegrad von Feinstaubpartikel bestimmter Größenklassen für einen kurzen (0,25 mm x 4,3 cm) und einen langen (0,25 mm x 9,4 cm) Aluminiumriss.

Dmp [μm]	Kurzer Riss	Langer Riss
0.001	1	1
0.001585	1	1
0.002512	1	1
0.003981	1	1
0.00631	1	1
0.01	1	1
0.01585	0.988	1
0.02512	0.827	0.994
0.03981	0.550	0.964
0.0631	0.331	0.785
0.1	0.199	0.533
0.1585	0.121	0.352
0.2512	0.095	0.298
0.3981	0.100	0.326
0.631	0.134	0.511
1	0.250	1
1.585	0.551	1
2.512	1	1
3.981	1	1
6.31	1	1
10	1	1

Anhang A.4

Partikelgrößenspezifische Emissionsrate für drei unterschiedliche Kochprozesse Burger braten, Rapsöl erhitzen (200°C) und Brot toasten.

Partikel Durchm. [nm]	Burger		Öl erhitzen		Toast	
	Gesamt- emission [µg]	Emissions- rate [µg/min]	Gesamt- emission [µg]	Emissions- rate [µg/min]	Gesamt- emission [µg]	Emissions- rate [µg/min]
1.0	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0
4.0	0	0	0	0	0	0
6.3	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
25	41.0	4.1	1.2	0.1	29.5	5.9
40	191.6	19.2	15.4	1.5	172.0	34.4
63	717.8	71.8	111.6	11.2	190.7	38.1
100	1890.5	189.0	526.9	52.7	56.1	11.2
158	2114.4	211.4	630.8	63.1	17.7	3.5
251	411.5	41.1	133.3	13.3	7.1	1.4
398	221.2	22.1	10.0	1.0	2.6	0.5
631	211.0	21.1	1.2	0.1	1.1	0.2
1000	381.3	38.1	0.8	0.1	4.0	0.8
1585	911.9	91.2	2.3	0.2	8.1	1.6
2512	899.1	89.9	4.5	0.4	19.3	3.9
3981	377.5	37.7	0	0	31.5	6.3
6310	10.6	1.1	0	0	18.3	3.7
10000	0	0	0	0	0	0
UFP	2841		655		448	
PM1	6180		1431		481	
PM2.5	7991		1438		508	
PM10	8379		1438		558	

Anhang A.5

Partikelgrößenpezifische gravitationsbedingte Absetzraten in Innenräumen. Referenzwerte aus (Riley et al., 2002), Min bzw. Max Werte mit eine Faktor 0,33 bzw. 3 abgeschätzt.

D_{mp} [μm]	Ref [1/h]	Min [1/h]	Max [1/h]
0.001000	10.80	3.56	32.39
0.001585	6.02	1.99	18.06
0.002512	3.36	1.11	10.07
0.003981	1.87	0.62	5.61
0.006310	1.04	0.34	3.13
0.01000	0.58	0.19	1.74
0.01585	0.32	0.11	0.97
0.02512	0.18	0.06	0.54
0.03981	0.10	0.03	0.30
0.06310	0.06	0.02	0.18
0.1000	0.04	0.01	0.13
0.1585	0.04	0.01	0.12
0.2512	0.05	0.02	0.14
0.3981	0.07	0.02	0.21
0.6310	0.12	0.04	0.36
1.000	0.23	0.08	0.70
1.585	0.46	0.15	1.37
2.512	0.88	0.29	2.65
3.981	1.70	0.56	5.11
6.310	3.29	1.08	9.86
10.00	6.33	2.09	19.00

Anhang B.1

Fragenkatalog für Lüftungsplaner:innen (siehe „Stakeholder survey A – Ventilation designers and Consultants“ im Dokument Stakeholder survey All.pdf zum Herunterladen auf der [Projektwebseite](#)).

Anhang B.2

Fragenkatalog für Gebäudemanagement (siehe „Stakeholder survey B – Facility management and Building administration“ im Dokument Stakeholder survey All.pdf zum Herunterladen auf der [Projektwebseite](#)).

Anhang B.3

Fragenkatalog für Behörden (siehe „Stakeholder survey C – Public authorities“ im Dokument Stakeholder survey All.pdf zum Herunterladen auf der [Projektwebseite](#)).

Anhang B.4

Fragenkatalog für Wohnungsbaugesellschaften (siehe „Stakeholder survey D – Housing developers“ im Dokument Stakeholder survey All.pdf zum Herunterladen auf der [Projektwebseite](#)).

Anhang B.5

Fragenkatalog für Lüftungsgerätehersteller:innen (siehe „Stakeholder survey E – Producers of ventilation systems“ im Dokument Stakeholder survey All.pdf zum Herunterladen auf der [Projektwebseite](#)).

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)