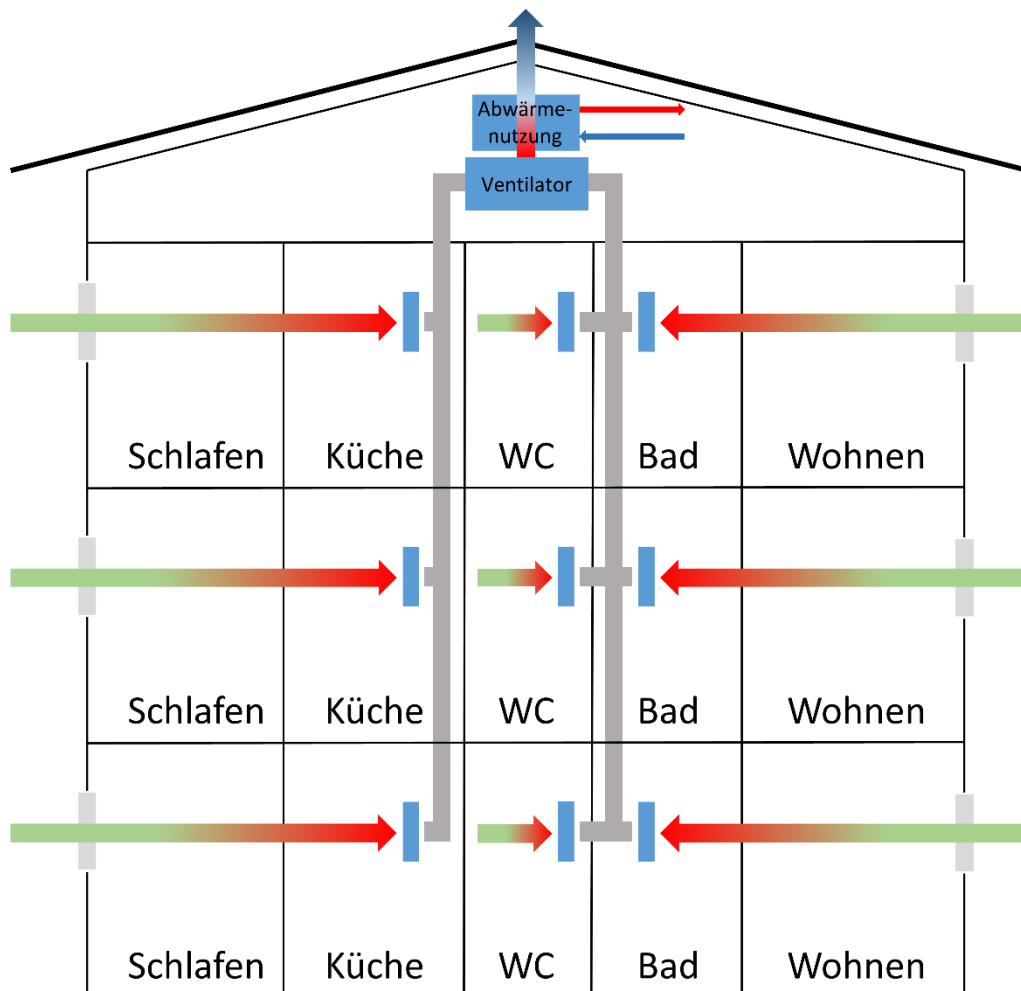




Schlussbericht vom 12.12.2018

ABLEG - Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung





Datum: 12.12.2018

Ort: Bern

Auftraggeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Gebäude und Städte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:
Fachhochschule Nordwestschweiz - FHNW
Institut Energie am Bau - IEBau
Sankt-Jakob-Strasse 84
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/iebau

Autor/in:
Heinrich Huber, IEBau-FHNW,
Christian Stünzi, IEBau-FHNW,
Christoph Sibold, IEBau-FHNW, christoph.sibold@fhnw.ch
Dominique-Stephan Kunz, FHNW, dominique.kunz@fhnw.ch

BFE-Bereichsleitung:	Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Rolf Moser, moser@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer:	SI/500954-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Gebäudelüftungsanlagen mit separat geführter Zu- und Abluft und einer zentralen Wärmerückgewinnung erfüllen höchste Ansprüche an den Raumkomfort und an einen energieeffizienten Betrieb. Dies erkaufen wir mit einer aufwändigen Technik und einem zusätzlichen Raumbedarf für die Lüftungsrohre. Eine Nachrüstung in Gebäuden, welche energetisch saniert werden, ist mit diesen Systemen oft nicht realisierbar. Auf dem Markt sind auch einfachere Systeme erhältlich, welche Frischluft über dezentrale Lufteinlässe in Wohn- und Schlafzimmer führen. Der Luftaustausch wird durch Ventilatoren in Küche, Bad und WC sichergestellt, welcher die Luft aus den Wohn- und Schlafzimmer mittels Überströmer ableiten. Optional kann hier noch eine Abwärmenutzung eingebaut werden. Es stellt sich nun die Frage, ob diese einfacheren Anlagen die normativen Vorgaben, die Ansprüche an den Raumkomfort und die Energieeffizienzanforderungen erfüllen können.

In dieser Arbeit wird der Betrieb von Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen untersucht. Dazu wurden in 8 Wohnungen von 4 Mehrfamilienhäusern Raumklimadaten und Luftvolumenströme messtechnisch erfasst und bewertet.

Zwei Neubauten und zwei erneuerte Gebäude, ausgerüstet mit zwei unterschiedlichen Lüftungsanlagen der Firmen Aereco SA (F) und Trivent AG (LI) konnten während eines Jahres untersucht werden. Luftvolumenströme, Lufttemperatur, Raumluftfeuchtigkeiten und CO₂-Konzentrationen wurden kontinuierlich gemessen und die Messresultate ausgewertet.

Die Messresultate zeigen, dass die realisierten Lüftungsanlagen mit wenigen Einschränkungen in der Lage sind, ein behagliches Raumklima und einen energieeffizienten Betrieb zu gewährleisten. Voraussetzung dazu bildet eine genügend luftdichte Gebäudehülle, die passende Dimensionierung der Anlage, die fachtechnische Ausführung und ein optimierter Betrieb.

Obwohl nutzungsbedingt einzelne Messwerte die Grenz- oder Empfehlungswerte betreffend Luftvolumenstrom, Raumluftfeuchtigkeit oder CO₂-Konzentration kurzzeitig überschreiten, schätzen die Nutzerinnen und Nutzer der untersuchten Wohnungen die Wohnqualität mit den Lüftungsanlagen als gut ein.

Résumé

Les systèmes de ventilation des bâtiments avec des conduits d'alimentation et d'évacuation d'air séparés et la récupération centralisée de la chaleur répondent aux exigences les plus élevées en matière de confort ambiant et d'efficacité énergétique de l'exploitation. Ceci est possible grâce à une technologie complexe et à un besoin supplémentaire d'espace pour les conduits de ventilation. Ces systèmes ne permettent souvent pas de rénover des bâtiments qui font l'objet d'une rénovation énergétique. Des systèmes plus simples sont également disponibles sur le marché, qui conduisent l'air frais dans le salon et la chambre à coucher par des entrées d'air décentralisées. L'échange d'air est assuré par des ventilateurs dans la cuisine, la salle de bains et les toilettes, qui dévient l'air du salon et des chambres à coucher au moyen de trop-pleins. En option, un système de récupération de la chaleur perdue peut également y être installé. La question se pose maintenant de savoir si ces systèmes plus simples peuvent répondre aux spécifications normatives, aux exigences en matière de confort ambiant et aux exigences d'efficacité énergétique.

Dans ce projet, le fonctionnement des équipements de ventilation avec des entrées d'air extérieur est examiné.

Ces intérieur des débits de données climatiques et de débit d'air ont été déterminées par la mesure et évalués dans total 8 appartements de 4 immeubles d'habitation. Deux nouveaux et deux bâtiments rénovés, équipés de deux différentes systèmes de ventilation des sociétés Aereco SA (F) et Trivent AG (LI) ont été examinés qui-cours d'une année. Débit d'air, température de l'air, l'humidité de l'air et la concentration de CO₂ a été continuellement mesurées et évaluées. Les résultats de mesure montrent que les systèmes de ventilation réalisés avec peu de restrictions sont en mesure d'assurer un climat



intérieur confortable et un fonctionnement économe en énergie. Les conditions préalables sont une enveloppe de bâtiment suffisamment étanche à l'air, le dimensionnement approprié du système, la conception technique d'experts et d'optimisation de l'opération. Bien que sur les valeurs de mesure individuelles d'utilisation dépassent les valeurs recommandées concernant débit volumique, la concentration d'humidité ou de CO₂ estimer brièvement les utilisateurs et les utilisateurs des logements étudié la qualité de vie avec les systèmes de ventilation comme bonne.

Abstract

Building ventilation systems with separately ducted supply and exhaust air and central heat recovery meet the highest demands for room comfort and energy-efficient operation. This is achieved with a complex technology and an additional space requirement for the ventilation ducts. Retrofitting in buildings that are being energetically renovated is often not feasible with these systems. Simpler systems are also available on the market, which conduct fresh air into the living room and bedroom via decentralised air inlets. The exchange of air is ensured by fans in the kitchen, bathroom and toilet, which discharge the air from the living room and bedroom by means of overflowers. As an option, a waste heat recovery system can also be installed here. The question now arises as to whether these simpler systems can meet the normative specifications, the requirements for room comfort and the energy efficiency requirements.

In this project the operation of exhaust air systems with external air inlets is investigated. For this purpose, room climates and air volume flows were measured and evaluated in totally 8 apartments of 4 multi-family-buildings.

Two new buildings and two renovated buildings, equipped with two different ventilation systems from the companies Aereco SA (F) and Trivent AG (LI), were examined during one year. Air volume flows, air temperature, room air humidities and CO₂ concentrations were measured continuously and the measurement results were evaluated. The results of the measurements show that the ventilation systems are capable of ensuring a comfortable room climate and energy-efficient operation with few restrictions. A requirement for this is a sufficiently air-tight building envelope, the appropriate dimensioning of the ventilation system, and an optimization of the operation. Although individual values exceed the recommended values regarding air flow, room air humidity or CO₂ concentration during short times, users of the examined dwellings rate the living quality with the ventilation systems as well.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	3
Abstract.....	4
1. Schlussfolgerung	7
1.1 Beantwortung der Fragestellungen	7
1.2 Fazit	10
2. Ausgangslage.....	11
2.1 Kontext.....	11
2.2 Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung	11
3. Ziel der Arbeit	12
3.1 Fragestellungen	12
4. Grundlagen - Randbedingungen.....	13
4.1 Projektteam.....	13
5. Anlagenbeschrieb	14
5.1 Untersuchte Lüftungssysteme	14
5.2 Bedarfsgeführte Lüftung der Firma Aereco S.A.	15
5.3 System „Aquavent“ der Firma Trivent AG	16
5.4 Untersuchte Mehrfamilienhäuser	17
5.4.1 Mehrfamilienhaus in Linthal (GL) Lüftungssystem Trivent AG	18
5.4.2 Mehrfamilienhaus in Malters (LU) Lüftungssystem Trivent AG	19
5.4.3 Mehrfamilienhaus in Genf - Lüftungssystem AERECO	21
5.4.4 Mehrfamilienhaus in Russin (GE) Lüftungssystem AERECO	22
6. Vorgehen und Methoden	24
6.1 Theoretische Betrachtungen	24
6.1.1 Normenvergleich.....	24
6.1.2 Schallschutz gegen Aussenlärm.....	24
6.2 Kurzzeitmessungen: Luftdichtheit und Volumenströme	24
6.2.1 Luftdurchlässigkeits-Messungen	24
6.2.2 Volumenstrommessung.....	25
6.3 Weitere Kurzzeitmessungen	26
6.3.1 Feinstaub-Messung	26
6.3.2 VOC-Messung	27
6.3.3 Tracergas-Messung.....	28
6.4 Langzeitmessungen.....	29
6.4.1 Raumklima: Temperatur, Feuchtigkeit und CO ₂ -Konzentration	29
6.5 Betriebsenergie	32
6.6 Bewohnerbefragung	32
7. Ergebnisse und Diskussion	34
7.1 Theoretische Betrachtungen	34
7.1.1 Normenvergleich.....	34
7.1.2 Schallschutz gegen Aussenlärm.....	38



7.2 Kurzzeitmessungen: Luftdichtheit und Volumenströme	42
7.2.1 Luftdurchlässigkeits-Messungen	42
7.2.2 Luftleckagen.....	44
7.2.3 Volumenstrommessungen Zu- und Abluft	45
7.2.4 Diskussion.....	45
7.3 Weitere Kurzzeitmessungen	46
7.3.1 Feinstaub-Messung	46
7.3.2 VOC-Messung	49
7.3.3 Tracergas-Messung.....	51
7.4 Langzeitmessungen: Raumklima	54
7.4.1 Messung der Raumtemperaturen	56
7.4.2 Messung der Raumluftfeuchtigkeit	59
7.4.3 Messung der CO ₂ -Konzentrationen.....	63
7.4.4 Diskussion Raumklima	67
7.5 Betriebsenergie	68
7.5.1 Energieeffizienz	68
7.5.2 Abschätzung des Energiebedarfs.....	70
7.6 Bewohnerbefragung	72
7.6.1 Generelles Wohlbefinden	72
7.6.2 Lüften	72
7.6.3 Zugluft.....	73
7.6.4 Luftqualität	73
7.6.5 Informationen zur Lüftungsanlage	74
7.6.6 Störung durch Geräusche von aussen und von der Lüftungsanlage	74
7.6.7 Wohnungswahl und abschliessende Fragen.....	75
7.6.8 Diskussion.....	75
8. Ausblick	76
Glossar	77
Literaturverzeichnis	78
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	80



1. Schlussfolgerung

Die einfacheren auf dem Markt verfügbaren Systeme, welche Frischluft über dezentrale Lufteinlässe in die Wohnräume führen und über Ventilatoren ableiten, erfüllen mehrheitlich die normativen Vorgaben, die Ansprüche an den Raumkomfort und die Energieeffizienzanforderungen. Voraussetzung hierzu ist aber eine gute Planung, eine fachgerechte Umsetzung und eine Optimierung im Betrieb. Im folgenden werden die einzelnen Fragestellungen detailliert behandelt und wo nötig, entsprechende Handlungsempfehlungen abgegeben. Die Fragen betreffen die Bereiche der Normung, der Energieeffizienz und dem Wohlfühlen der Bewohner.

1.1 Beantwortung der Fragestellungen

Theoretische Betrachtungen:

1. **Wie unterscheiden sich die Normen für Lüftungsanlagen der Herstellungsländer gegenüber der Schweizer Norm?**

In der Schweiz sind die für Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen wichtigen technischen Randbedingungen mit Angabe konkreter Anforderungen zu Druckdifferenz, Luftvolumenströmen und Behaglichkeit in der Norm SIA 382/1 und Merkblatt SIA 2023 weitgehend definiert. In Deutschland liefert die DIN-Norm 1946-6 mehr detaillierte Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Anforderungswerte, während in Frankreich die "Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements" allgemeine Informationen liefert und für detaillierte Anforderungen auf weitere technische Normen verweist.

2. **Wie wird die Schalldämmung einer Aussenwand durch die Aussenluftdurchlässe beeinflusst?**

Die Standard-Schallpegeldifferenz einer Fassade kann durch einen Aussenluftdurchlass um rund 5dB reduziert sein. Im Regelfall, bei Lärmpegeln bis 60dB(A) am Tag stellen die Aussenluftdurchlässe kein schalltechnisches Problem dar und erhöhte Anforderungen an den Lärmschutz gemäss SIA 181 sind ohne besondere schalltechnische Massnahmen erreichbar. An sehr lauten Stellen ist der Schallschutz aber allenfalls ein Hemmnis für die Realisierung von Abluftanlagen.

Kurzzeitmessungen:

3. **Welchen Einfluss hat die Luftdichtheit der Gebäudehülle auf den Betrieb einer Abluftanlage?**

Luftleckagen in der Gebäudehülle reduzieren die Druckdifferenz und damit die Luftvolumenströme durch die Aussenluftdurchlässe. Grosse Luftleckagen der Gebäudehülle, bzw. der begrenzenden Bauteile einer Wohnung beeinträchtigen die gleichmässige Durchlüftung der Räume und können zu Geruchsbelästigung führen.

Die Grenzwerte der SIA 180:2014 sind für Abluftanlagen zu wenig anspruchsvoll. Um eine planbare Luftführung und Luftverteilung in der Wohnung zu erreichen, sollte etwa höchstens 25% der Aussenluft durch Infiltration nachströmen. Zudem weist die Infiltration eine unbekannte Luftqualität auf (Nachströmung durch Installationszonen, Rollladenkasten, Treppenhäuser, etc). D.h. auch aus Sicht der Raumluftqualität soll die Infiltration begrenzt werden. Bei Abluftanlagen sollte die Gebäudeoberflächen bezogene Luftdurchlässigkeit die Zielwerte der SIA 180:2014 erfüllen.

4. **Werden die empfohlenen Aussenluftvolumenströme nach SIA Merkblatt 2023 eingehalten?**

Zum Zeitpunkt der exemplarischen Volumenstrommessungen wurde der Aussenluftvolumenstrom von 30m³/h in allen betrachteten Fällen nur in Räumen mit zwei Aussenluftdurchlässen erreicht. Erstaunlich ist, dass der Aussenluftvolumenstrom durch die Aussenluftdurchlässe (ALD) nur in zwei von 33 gemessenen Zimmern über 20m³/h lag. In diesen Zimmern waren jeweils zwei ALD installiert. In 12 Zimmern lag der Aussenluftvolumenstrom gar unter



10m³/h. Bei handelsüblichen Produkten sollen daher pro Zimmer zwei ALD installiert werden.

5. **Welche Infiltrationen können in den Wohnungen festgestellt werden?**
Die Momentanmessungen ergaben relativ grosse (berechnete) Luftinfiltrationen durch Aussen- und Innenbauteile der Wohnungen. Zu geringe, durch Infiltration verursachte Luftvolumenströme wurden in den einzelnen Räumen aber nicht festgestellt.
6. **Wie beeinflussen die Filter die Luftvolumenströme durch die Aussenluftdurchlässe?**
Bei der exemplarischen Messung in der Wohnung in Oberweningen resultierte eine Reduktion der Zuluft-Volumenströme durch die Aussenluftdurchlässe bei eingesetzten M5-Filtern um 14 bis 27% im Vergleich zu den ALD ohne Filter. Bei eingesetzten Filtern lag der gesamte Zuluftvolumenstrom um 24%, der Abluftvolumenstrom um 10% tiefer im Vergleich zum Betrieb ohne Filter.
An Lagen mit einer hohen Feinstaubbelastung wird es als angemessen erachtet, dass ALD mit Feinstaubfiltern ausgerüstet werden. Die entsprechende Regelung in SIA 2023, Ziff. 6.7.3 wird als sinnvoll beurteilt.
7. **Welche Wirkung zeigen die eingebauten Filter bezüglich Feinstaub?**
Da die Messung der Feinstaubkonzentration der Aussenluft nicht korrekt durchgeführt wurde und die Messwerte im Innenraum sehr tief waren, konnte die Wirkung der Filter nicht nachgewiesen, bzw. bewertet werden.
8. **Welchen Einfluss hat eine Abluftanlage auf die Konzentration der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Raumluft?**
Die Messung in einer Wohnung ergab, bei eingeschalteter Lüftung (gegenüber ausgeschalteter Lüftung), eine Zunahme der Alkohole und Aromaten. Die Terpene hingegen haben abgenommen. Bei den übrigen VOC ist keine eindeutige Tendenz erkennbar. Alle Konzentrationen wurden als tief bewertet. Erstaunlich war, dass die Konzentration einiger Stoffe, trotz dem Verdünnungseffekt der Lüftung, zunimmt. Ein gleicher Effekt wurde schon bei Messungen im Projekt (LIWOTEV, 2008) festgestellt. Eine mögliche Ursache ist, dass durch die Infiltration Baustoffemissionen in den Raum gelangen. Aufgrund der geringen Anzahl von Messungen und gleichzeitig tiefen Konzentrationen kann aber nicht der Schluss gezogen werden, dass Abluftanlagen die VOC-Konzentration in Räumen allgemein erhöhen. Weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich wären hilfreich.
9. **Können die Luftvolumenströme und weitere Leckagen anhand einer Tracergas-Messung ermittelt werden?**
Die Tracergas-Messung in Malters lieferte ausgeglichene spezifische Luftvolumenströme innerhalb der Wohnung von 0.70 bis 0.88m³/m²h. Folglich werden die Standardwerte für Wohnbauten erreicht. In Ergänzung zu den Blower-Door-Tests wurde mit der Tracergas-Messung die Leckage durch die Wohnungstür nachgewiesen.



Langzeitmessungen:

10. **Werden die Richtlinien der SIA 382/1 bezüglich Temperatur in den Wohnungen eingehalten?**
Die Richtlinien für die Raumlufttemperaturen gemäss Norm SIA 382/1, bzw. SIA 180 (Wärmeschutz im Sommer, thermische Behaglichkeit) werden in der Regel eingehalten. Kurzzeitige Überschreitungen des Temperaturbereichs im Sommer bzw. Unterschreitungen im Winter, in einzelnen Wohnungen, konnten auf das Benutzerverhalten zurückgeführt werden.
11. **Werden die Richtlinien bezüglich Luftfeuchtigkeit in den Wohnungen eingehalten (Behaglichkeit SIA 382/1 und Feuchteschutz SIA 180)?**
In den 7 Wohnungen C bis H liegen die gemessenen Werte in Wohn- und Schlafzimmer während 90% der Zeit im Bereich zwischen 30% und 70% relativer Luftfeuchtigkeit. Lediglich in den Wohnungen in Linthal treten längere trockene Phasen auf (Wohnung A: 17%, Wohnung B: 27% der Zeit im Winter mit relativen Feuchten unter 30%).
12. **Welche Energieverluste entstehen verglichen mit Standardwerten (manuelle Fensterlüftung, Lüftung mit Wärmerückgewinnung)?**
Die Wärmeverluste liegen, primär bedingt durch die kleineren Luftwechselzahlen, tiefer als bei der manuellen Fensterlüftung. Der Elektrizitätsbedarf für die Abluftanlage beträgt ca. die Hälfte im Vergleich zu einer Komfortlüftungsanlage mit Zu- und Abluft. Abluftanlagen mit Abwärmenutzung, durch Einsatz von Abluft-Wärmepumpen¹ können den Energieverlust im Bereich von bis zu 54% reduzieren.

Bewohnerbefragung:

13. **Sind die Bewohner zufrieden mit dem Raumklima (Temperatur, Feuchtigkeit)?**
14. **Spüren die Bewohner Zugluft in den Wohn- und Schlafräumen?**
15. **Wie häufig öffnen die Bewohner die Fenster im Winter?**
16. **Nehmen die Bewohner die Abluftanlage aktiv wahr?**

Decken sich die Antworten der Bewohner mit den Ergebnissen der Langzeitmessung?

Die Bewohnerbefragung bei 25 von 52 Bewohnerinnen und Bewohnern zeigt im Durchschnitt eine grosse Zufriedenheit mit Raumluftqualität und thermischer Behaglichkeit.

Raumlufttemperatur und relative Feuchtigkeit werden mehrheitlich als angenehm empfunden. Mehr als die Hälfte der Befragten empfand manchmal bis immer Zugluft, daher wird dieses Thema als bedenklich erachtet, dem man in Projekten besonderen Stellenwert einräumen sollte. Beanstandet wird von einem Teil der Befragten die Störung durch Lärm (von aussen oder von der Lüftungsanlage) und die fehlenden Informationen zum Lüftungsbetrieb.

Bei Temperatur und Feuchte kann die Wahrnehmung (der Unzufriedenen) in einigen Fällen den Messresultaten, bzw. den Wohnungen zugeordnet werden, teilweise lassen sich gemessene Effekte mit dem Angaben zum Benutzerverhalten erklären. Bei den Angaben zu Raumluftqualität und Lärmempfinden konnte keine Korrelation gefunden werden.

¹ Abluft-Wärmepumpen die zur Warmwassererwärmung oder Heizungsunterstützung eingesetzt werden.



1.2 Fazit

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle erreicht bei allen Wohnungen den aktuellen Grenzwert für Neubauten. Aufgrund der hohen Infiltration (bis zu 50% des gesamten Aussenluftvolumenstroms) ist der Grenzwert der SIA 180:2014 aber nicht zielführend. Bei Abluftanlagen sollten daher die Zielwerte der SIA 180 gefordert werden. Die Anlagen wurden vor Messbeginn durch die Hersteller technisch überprüft und der Betrieb optimiert. Bei den Besichtigungen vor Ort zeigten sich keine technischen Probleme der Anlagen. Es ist jedoch erstaunlich, dass nur bei 2 von 32 Zimmern der durch die Aussenluftdurchlässe strömende Luftvolumenstrom über 20m³/h liegt.

Der häufige Kritikpunkt an diesem Anlagentyp bezieht sich auf bauphysikalische (Feuchteschutz) und Behaglichkeits-Probleme, bedingt durch eintretende kalte Luft durch die Aussenluftdurchlässe im Winter. Die Besichtigungen vor Ort während der Messperiode zeigten keine Feuchteschäden im Bereich der Aussenluftdurchlässe und in der Bewohnerbefragung wird die thermische Behaglichkeit mehrheitlich gut bewertet.

Die Langzeitmessungen des Raumklimas in Wohn- und Schlafzimmern der 8 Wohnungen dokumentieren die weitgehende Einhaltung der geforderten Werte bei Raumlufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration über die betrachtete Messperiode. Im Vergleich mit Erfolgskontrollen von Komfortlüftungen wurden tendenziell höhere mittlere CO₂-Konzentrationen und höhere Raumluftfeuchten festgestellt, was auf die geringere Luftwechselraten, gegenüber der Erfolgskontrollen, zurückgeführt werden kann. Werte die kurzzeitig ausserhalb des geforderten Bereichs aufgetreten sind konnten bei Feuchtigkeit teilweise auf die Klimabedingungen und bei zu hoher CO₂-Konzentration auf das Benutzerverhalten zurückgeführt werden.

Unterschiede in der Performance der untersuchten Lüftungsanlagen zeigen sich primär bei relativer Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration in der Raumluft.

Die Anlagen von Aereco (in Genf und Russin) reagieren durch die feuchteadaptiven Aussenluftdurchlässe und mit der Regulierung des Luftvolumenstroms in den Abluftelementen direkt auf die Innenraumfeuchte. Dadurch kann die Luftfeuchtigkeit gut im behaglichen Bereich gehalten werden. Durch die geringeren Luftvolumenströme ist der Lüftungswärmeverlust einer Aereco-Lüftung in der Regel kleiner als bei Abluftanlagen ohne Feuchterege lung.

Die Anlagen von Trivent (in Linthal und Malters) befördern die Luft aus den Wohnungen mittels dezentraler Ventilatoren in den Sanitärräumen nach aussen. Der Luftvolumenstrom der Abluftventilatoren kann temporär, manuell oder automatisch erhöht werden. Mit konstantem Luftwechsel liegen die gemessenen Luftvolumenströme etwas höher, was zu einem etwas grösseren Lüftungswärmeverlust führt. Bei den Lüftungsanlagen von Trivent wird die Wärme der Abluft typischerweise zu einer Abluftwärmepumpe geführt die zur Deckung des Wärmebedarfs genutzt wird, welche den konstanten Luftvolumenstrom fordert.

Die Energieeffizienz der untersuchten Abluftanlagen ist im Vergleich zur manuellen Fensterlüftung mehrheitlich besser, da diese mit geringeren Luftwechseln betrieben werden, folglich liegt der Wärmeverlust entsprechend tiefer. Der Strombedarf für die Luftumwälzung liegt im Bereich der Hälfte von konventionellen Komfortlüftungen. Die Energieeffizienz kann durch den Einsatz von Abwärmenutzung der Abluft gesteigert werden, was in Linthal und Malters nachgewiesen wurde.

Gesamthaft betrachtet zeigt diese Untersuchung, dass die Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen in der Lage sind, die Anforderung an Wärmeschutz, Behaglichkeit und Raumluftqualität zu erfüllen. Grundvoraussetzungen dafür sind die ausreichende Luftdichtheit der Gebäudehüllen (der einzelnen Wohnungen), die richtig dimensionierten Anlagenkomponenten und ein optimierter Betrieb.



2. Ausgangslage

2.1 Kontext

Das BFE-Projekt „Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung“ (ABLEG) befasst sich prioritär mit dem Einsatz von Abluftanlagen in der energetischen Erneuerung von Mehrfamilienhäusern. Für diese Vorhaben sind besagte Anlagen Alternativen zu Komfortlüftungen mit Zu- und Abluftventilatoren und bringen einige grosse Vorteile mit sich: Der Platzbedarf für die Lüftungsinstallation ist gering, die Investitionen tief und der Energieverbrauch der Ventilatoren geringer als bei einfachen Lüftungsanlagen. Hingegen kann keine Wärmerückgewinnung von der Abluft an die Zuluft realisiert werden und die Filtrierung der Aussenluft erfolgt in der Regel mit tieferen Filterstufen. Über die Funktion und den Nutzen von Abluftanlagen in schweizerischen Mehrfamilienhäusern liegen kaum aktuelle Untersuchungen vor.

Durch automatische Lüftungen kann der Luftaustausch im Gebäude reguliert werden. Damit lässt sich der Lüftungswärmeverlust im Vergleich zum Lüften durch Öffnen der Fenster reduzieren. Die Stadt Zürich hat eine Untersuchung (Zürich, 2012) bei 16 Siedlungen durchgeführt, diese zeigt, dass mit einer Lüftungsanlage die Anzahl offener Fenster an einem Gebäude im Winter von 16% auf ca. 5% reduzieren kann. In der erwähnten Arbeit wird geschätzt, dass mit guten Abluftanlagen die Lüftungswärmeverluste im Vergleich zur manuellen Fensterlüftung um rund 20% reduziert werden können.

2.2 Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung

Viele Mehrfamilienhäuser sind im Bestand mit einer Abluftanlage ausgestattet. Definierte Nachströmeinrichtungen sind aber in der Regel nicht vorhanden. Es ist naheliegend, bei einer energetischen Erneuerung, das bestehende Abluftsystem weiter zu nutzen und die Aussenluft kontrolliert zuzuführen. In Bezug auf Abluftanlagen und Mehrfamilienhäuser konnte nur wenig spezifische Literatur gefunden werden. Beste Grundlage bietet die Arbeit „Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung“ (BFE, 2002). Sie weist darauf hin, dass bei mehrgeschossigen Gebäuden auf eine möglichst gute Luftdichtheit zwischen den Geschossen geachtet werden muss, um den «Stack» Effekt innerhalb des Gebäudes zu verhindern.

Bei der Implementierung von Abluftsystemen bestehen Unsicherheiten im Bereich der Filtrierung der nachströmenden Aussenluft. In der Schweiz gelten in Abhängigkeit der Aussenluftqualität spezifische Anforderungen an die Filter von Aussenluftdurchlass, wobei die Notwendigkeit des Einsatzes von Filtern in Aussenluftdurchlässen durch die Industriepartner unterschiedlich interpretiert wird. Jedenfalls darf der Druckverlust in den Aussenluftdurchlässen nicht zu gross sein, da sonst zu viel Luft durch innere Leckagen und durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle nachströmt. Aussenluftdurchlässe sind deshalb für kleine Druckdifferenzen zu dimensionieren. Gemäss SIA 2023 Ziff. 6.3.1 darf der Unterdruck in eingeschossigen Wohnungen maximal 4 bis 5 Pascal (Pa) und bei zweigeschossigen Lufträumen, etwa in Einfamilienhäusern, im Erdgeschoss maximal 6 Pa betragen.

Im Minergie-Nachweis wird für den Luftvolumenstrom eines Zimmers mit einem Standardwert von 30m³/h angesetzt. Die Auslegung kann auch differenzierter nach SIA 2023, Ziffer 6.4.1 erfolgen.

Bedingt durch die geringen Druckdifferenzen und die passive Einströmung der Aussenluft, ist der Luftführung bei Abluftanlagen besonderes Augenmerk zu schenken. So wurde in der Studie des BFE (2002) beobachtet, dass Räume mit geschlossenen Türen kaum mehr mit Frischluft versorgt werden, wenn in anderen Räumen derselben Wohnung die Fenster und Zimmertüren geöffnet sind. Deshalb fordert SIA 2023, Ziff. 6.3.1, dass der Druckverlust von Überström-Durchlässen zwischen Zimmern maximal 1 Pa betragen soll.



3. Ziel der Arbeit

Das Messprojekt an realisierten Lüftungsanlagen von 4 Mehrfamilienhäusern liefert grundlegende Daten für die Beurteilung von Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen in der Praxis. Es wird gezeigt, ob und wie in den untersuchten Fällen die geforderte Raumluftqualität erreicht wird und welche Voraussetzungen für einen energieeffizienten Betrieb gegeben sein müssen. Das erarbeitete Wissen soll in Energiestandards und weitergehende Empfehlungen für Planung, Realisierung und Betrieb einfließen. Das Projekt soll dazu beitragen, dass insbesondere bei Gebäudeerneuerungen qualifizierte, qualitativ hochstehende Abluftanlagen realisiert werden.

3.1 Fragestellungen

Anhand von Feldmessungen an 4 Gebäuden, der Befragung der Bewohner und Bewohnerinnen und einer exemplarischer Untersuchung einer Wohnung soll der Nutzen der Abluftanlagen beurteilt werden. Konkret werden folgende Fragen beantwortet:

Theoretische Betrachtungen:

1. Wie unterscheiden sich die Normen für Lüftungsanlagen der Herstellungsländer gegenüber der Schweizer Norm?
2. Wie wird die Schalldämmung einer Aussenwand durch die Aussenluftdurchlässe beeinflusst?

Kurzzeitmessungen:

3. Welchen Einfluss hat die Luftdichtheit der Gebäudehülle auf den Betrieb einer Abluftanlage?
4. Werden die minimalen Aussenluftvolumenströme nach SIA Merkblatt 2023 eingehalten?
5. Welche Infiltrationen können in den Wohnungen festgestellt werden?
6. Wie beeinflussen die Filter die Luftvolumenströme durch die Aussenluftdurchlässe?
7. Welche Wirkung zeigen die eingebauten Filter bezüglich Feinstaub?
8. Welchen Einfluss hat eine Abluftanlage auf die Konzentration der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Raumluft?
9. Können die Luftvolumenströme und weitere Leckagen anhand einer Tracergas-Messung ermittelt werden?

Langzeitmessungen:

10. Werden die Richtlinien der SIA 382/1 bezüglich Temperatur in den Wohnungen eingehalten?
11. Werden die Richtlinien bezüglich Luftfeuchtigkeit in den Wohnungen eingehalten (Behaglichkeit SIA 382/1 und Feuchteschutz SIA 180)?
12. Welche Energieverluste entstehen verglichen mit Standardwerten (Natürliche Lüftung, Lüftung mit Wärmerückgewinnung)?

Bewohnerbefragung:

13. Sind die Bewohner zufrieden mit dem Raumklima (Temperatur, Feuchtigkeit)?
14. Spüren die Bewohner Zugluft in den Wohn- und Schlafräumen?
15. Wie häufig öffnen die Bewohner die Fenster im Winter?
16. Nehmen die Bewohner die Abluftanlage aktiv wahr?
17. Decken sich die Antworten der Bewohner mit den Ergebnissen der Langzeitmessung?



4. Grundlagen - Randbedingungen

4.1 Projektteam

Folgende Firmen und Institutionen waren am Projekt beteiligt:

Fachhochschule Nordwestschweiz
Institut Energie am Bau, Muttenz

Projektleitung, Sachbearbeitung,
Auswertung der Messresultate

Hochschule Luzern, HSLU

Gebäude Linthal und Malters
Durchführung der Messungen

Industriepartner:



Trivent AG, Triesenberg (LI)

Industriepartner
Gebäude Linthal und Malters,
Ausrüstung und Support



Aereco SA, France

Industriepartner
Gebäude Genf und Russin
Ausrüstung und Support
Durchführung der Messungen vor Ort



5. Anlagenbeschreibung

5.1 Untersuchte Lüftungssysteme

Die vorliegende Untersuchung wurde in Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern durchgeführt. In Genf und Russin konnten 2 Gebäude mit dem von der Aereco SA ausgerüsteten Lüftungssystem untersucht werden und in Linthal und Malers wurden 2 Mehrfamilienhäuser mit dem Lüftungssystem der Trivent AG messtechnisch erfasst. Beide Systeme nutzen eine Abluftanlage zur Lüfterneuerung und die Frischluft strömt über Aussenluftdurchlässe in der Fassade nach. Im Detail unterscheiden sich die Systeme entscheidend:

Das Lüftungssystem von Aereco verfügt über feuchteadaptive Aussenluftdurchlässe, welche den Zuluftstrom abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum regeln. Ebenfalls feuchtegeregelter Abluftstellen in den Wohnungen bestimmen den Abluftvolumenstrom, der über einen zentralen Abluftventilator über Dach abgeführt wird. Der Abluftventilator läuft permanent mit gleichbleibender Druckdifferenz und bedarfsgeführtem Luftvolumenstrom.

Das Lüftungssystem von Trivent arbeitet mit dezentralen, bedarfsgesteuerten Abluftventilatoren in den Wohnungen, die einen Grundluftwechsel gewährleisten. Der Luftwechsel kann automatisch (Nachlauf gekoppelt mit Lichtschalter in den Nassräumen oder bei entsprechender Installation von Hand) erhöht werden. Die Aussenluft strömt über Aussenluftdurchlässe mit Filtern nach.

Zusätzlich wird in einer zentralen Abluftwärmepumpe aus der Abluft Wärmeenergie für Warmwasserbereitung gewonnen.

Die Funktionsweise der Lüftungssysteme wird von den Industriepartnern wie folgt beschrieben.



5.2 Bedarfsgeführte Lüftung der Firma Aereco S.A.

Den Luftwechsel im Gebäude gewährleistet ein Dach- bzw. Unterdachventilator. Er befindet sich zum Beispiel im Dachgeschoss oder auf der Terrasse eines Gebäudes. Der zentrale Ventilator erzeugt einen kontinuierlichen Luftwechsel und ist druckdifferenzgeregelt.

Bei der mechanischen feuchtegeregelten Wohnungslüftung führt die Absaugung der verbrauchten Luft durch die Abluftelemente in den Ablufträumen zu einer Lufterneuerung im Gebäude. Die Abluftelemente, mit oder ohne automatischer Auslösung der Intensivlüftung, bestimmen die Luftmengen in jeder Wohneinheit. So werden Räume oder Wohneinheiten mit hohen Anforderungen an frischer Luft mit größeren Luftmengen als unbenutzte Räume oder Wohneinheiten versorgt (zonen- und raumweise Lastanpassung- Einzelraumregelung).

Das Lüftungssystem Aereco kann mit einer Abwärmenutzung ausgestattet sein. Beide Systeme, mit oder ohne Abwärmenutzung eignen sich für Neubauten und Gebäudeerneuerungen. Alle Komponenten erfüllen bei richtiger Planung und Ausführung die Anforderungen der SIA-Normen und können für Bauten im Minergie-Standard eingesetzt werden.

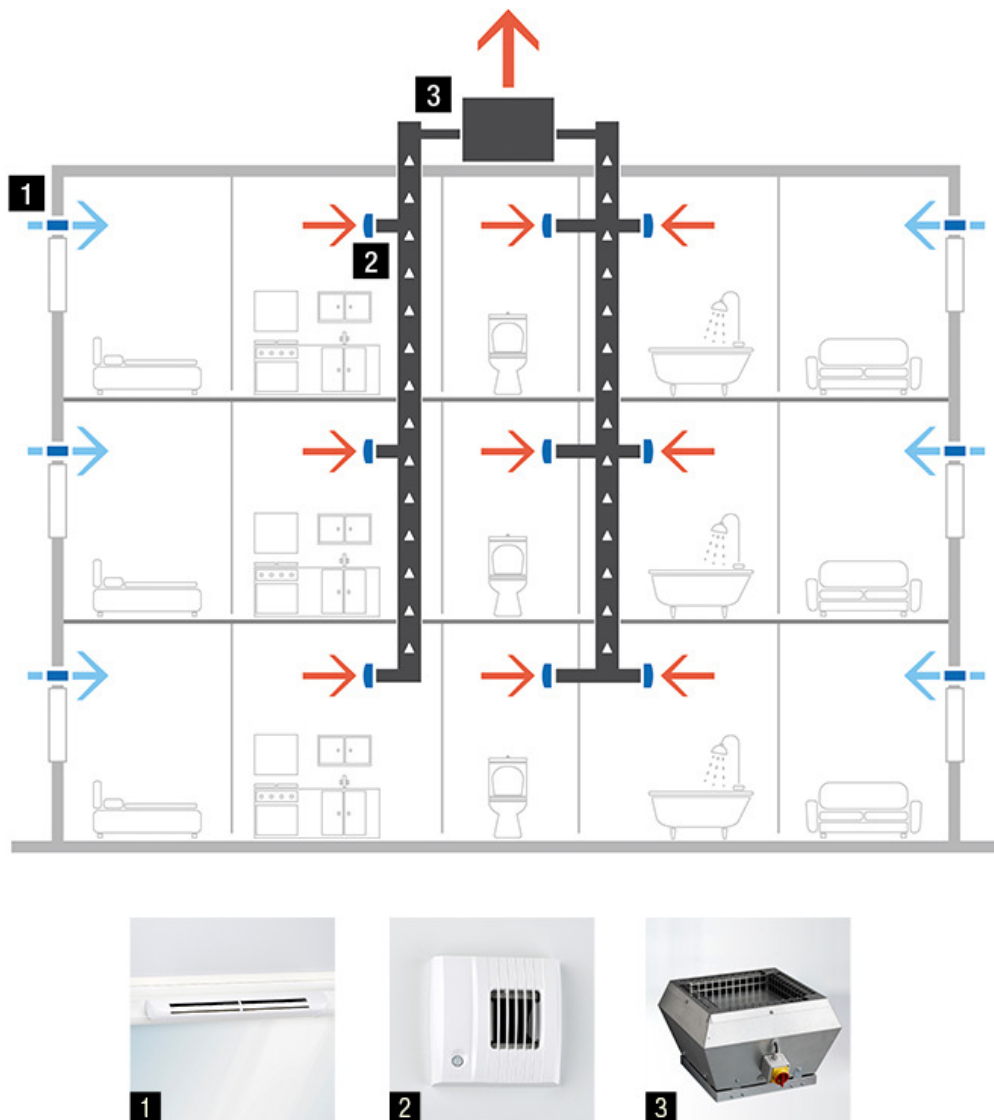


Abbildung 1: Aereco S.A.: Schema Lüftungssystem

5.3 System „Aquavent“ der Firma Trivent AG

Das Lüftungssystem Aquavent ist eine vereinfachte Lösung einer kontrollierten Wohnungslüftung. Diese Lösung basiert auf einem Abluft-System mit Abwärmenutzung. Mittels bedarfsgesteuerten Ventilatoren in Nebenräumen wird ein Unterdruck erzeugt. Durch Aussenluftdurchlässe in Fenstern, in der Fassade oder in der Decke strömt Frischluft natürlich (ohne Antrieb) nach. Die Aussenluftdurchlässe sind in verschiedenen Bauarten mit verschiedenen Filterklassen erhältlich um ein angenehmes Wohlbefinden mit hygienisch sauberer Luft auch für Allergiker zu gewährleisten. Die Abluft wird zentral über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe geführt, welche die vorhandene Wärmeenergie entzieht und dadurch das Brauchwarmwasser bis zu 100% (ganzjährig) erzeugen kann.

Das System ist modular ausführbar und eignet sich deshalb sowohl für Neubau- wie auch Sanierungsanlagen. Sämtliche Komponenten erfüllen bei richtiger Planung die Anforderungen der SIA und können für Anlagen in Minergie-Standard verwendet werden.

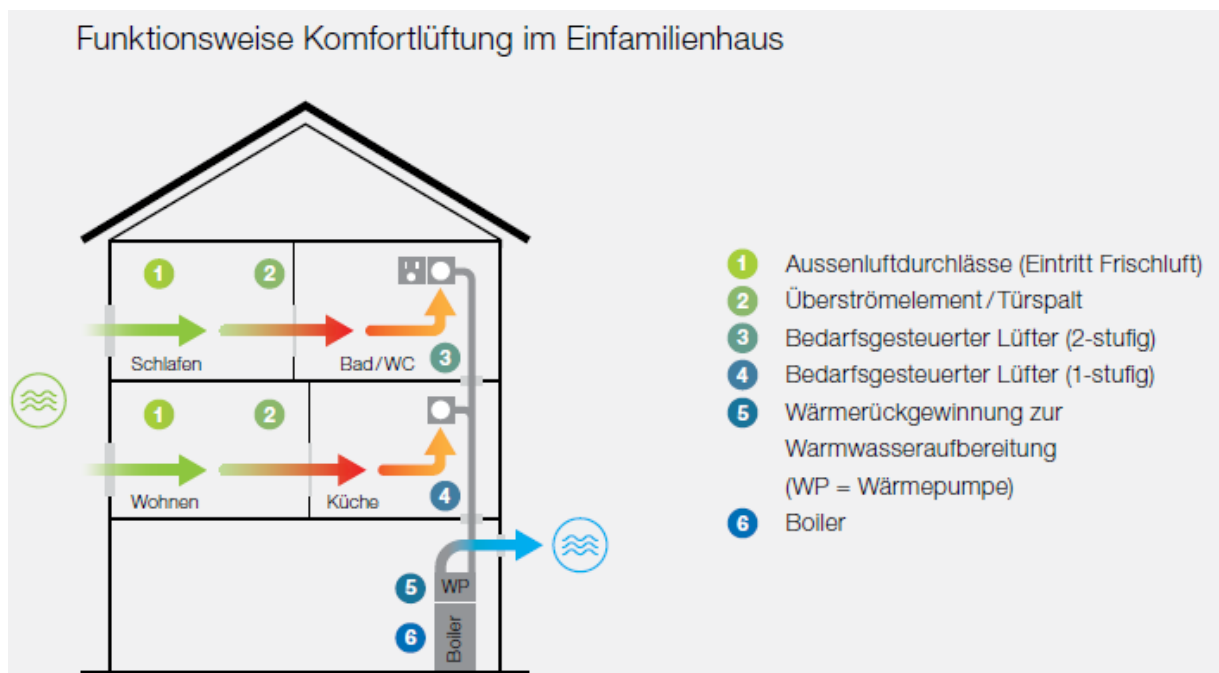


Abbildung 2: Trivent AG: Schema Lüftungssystem Aquavent



5.4 Untersuchte Mehrfamilienhäuser

Diese Studie basiert auf Messdaten sowie Bewohnerbefragungen von vier verschiedenen Mehrfamilienhäusern in der Schweiz. Um allfällige Einflüsse der Bausubstanz auf die Funktionsweise der Abluftanlagen untersuchen zu können, wurden zwei Gebäude, welche in den letzten Jahren einer Modernisierung unterzogen wurden und zwei Neubauten gewählt. Ein modernisiertes Gebäude und beide Neubauten wurden nach dem Minergie-Standard realisiert. Da die Gebäude von den Projektpartnern gesucht wurden und diese ihr hauptsächliches Tätigkeitsfeld in unterschiedlichen Landesteilen haben, liegen zwei Untersuchungsobjekte in der Deutschschweiz und zwei in der Romandie. Die Wohnungen sind anonymisiert mit Grossbuchstaben (A bis H) gekennzeichnet, damit keine Rückschlüsse auf die Bewohner gezogen werden können.

Die Mehrfamilienhäuser sind wie folgt ausgerüstet:

Linthal	Wohnung A Wohnung B	Lüftungssystem Trivent
Malters	Wohnung C Wohnung D	Lüftungssystem Trivent
Genève	Wohnung E	Lüftungssystem Aereco
Russin	Wohnung F Wohnung G Wohnung H	Lüftungssystem Aereco

Nachfolgend werden die vier Gebäude mit Gebäudedaten, Wohnungsgrundrissen mit Zu- und Abluftstellen und Standorte der Messgeräte aufgeführt.



5.4.1 Mehrfamilienhaus in Linthal (GL) Lüftungssystem Trivent AG



Baujahr:	1973
Modernisierung:	2008
Standard:	Minergie
EBF:	927m ²
Wohneinheiten:	4 x 4,5-Zimmerwhg. 4 x 3,5-Zimmerwhg.
Heizung:	Holzwärmeverbund (H 100% / WW 30%) Abluft-WP (WW 70%)
Lüftung:	Trivent AG
Untersuchte Wohnungen:	Whg. A: 4,5 Zimmer Whg. B: 3,5 Zimmer

Abbildung 3: MFH Linthal: Ansicht und Gebäudedaten

Wohnungsgrundrisse

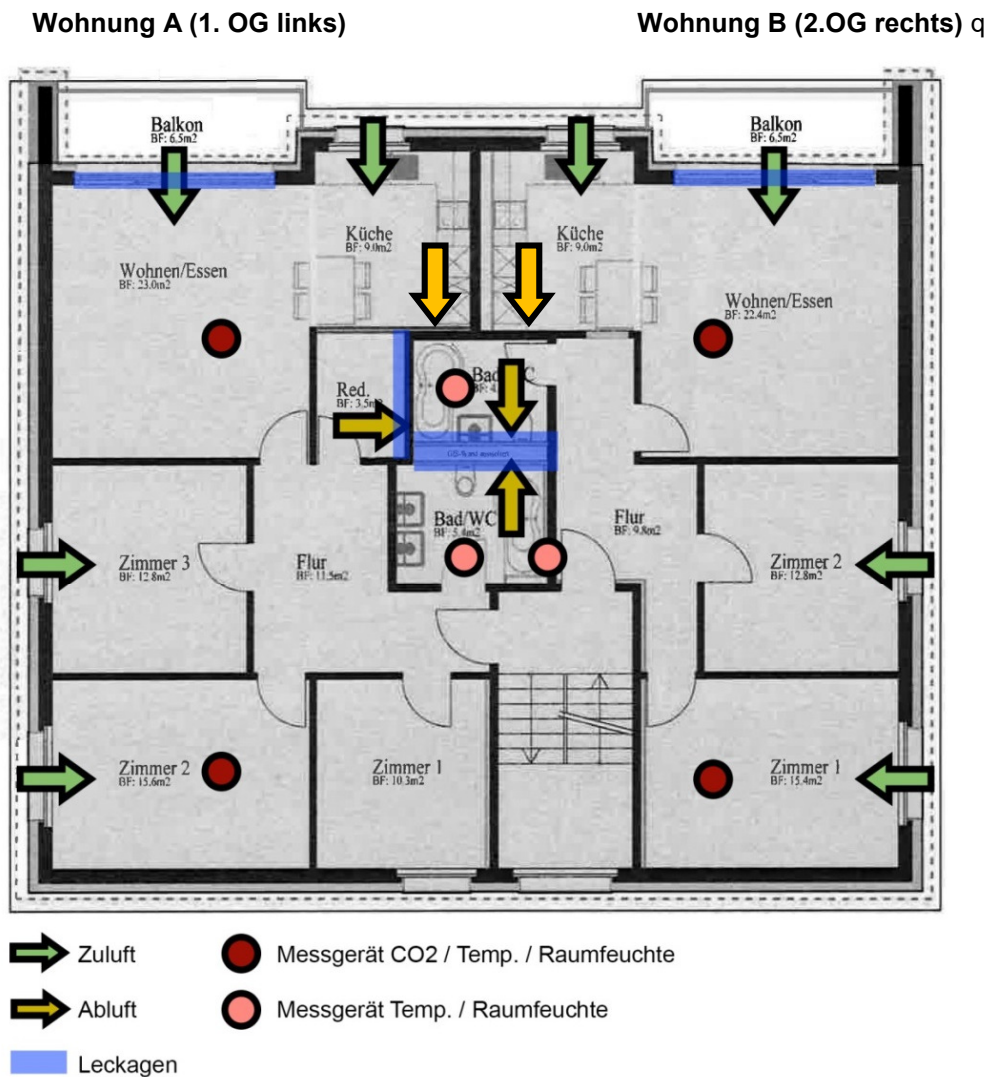


Abbildung 4: MFH Linthal: Grundrisse Wohnungen A und B

5.4.2 Mehrfamilienhaus in Malters (LU) Lüftungssystem Trivent AG



Baujahr:	2014 (Neubau)
Standard:	Minergie
EBF:	1022m ²
Wohneinheiten:	4 x 4,5-Zimmerwhg. 3 x 3,5-Zimmerwhg.
Heizung:	Grundwasser-WP (H & WW 100%)
Lüftung:	Trivent AG
Untersuchte Wohnungen:	Whg. C: 3,5 Zimmer Whg. D: 4,5 Zimmer

Abbildung 5: MFH Malters: Ansicht und Gebäudedaten

Wohnungsgrundrisse

Wohnung C (1. OG links)

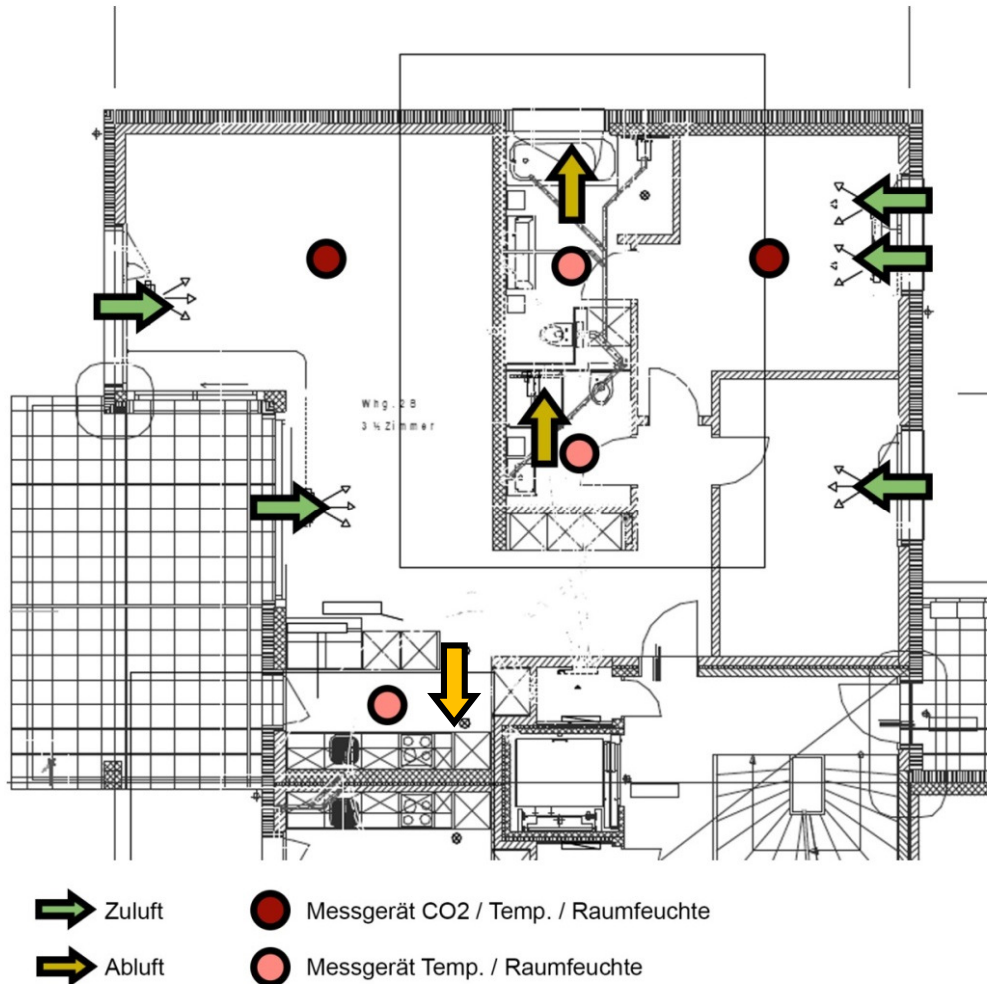


Abbildung 6: MFH Malters: Grundriss Wohnung C



Wohnung D (2. OG rechts)

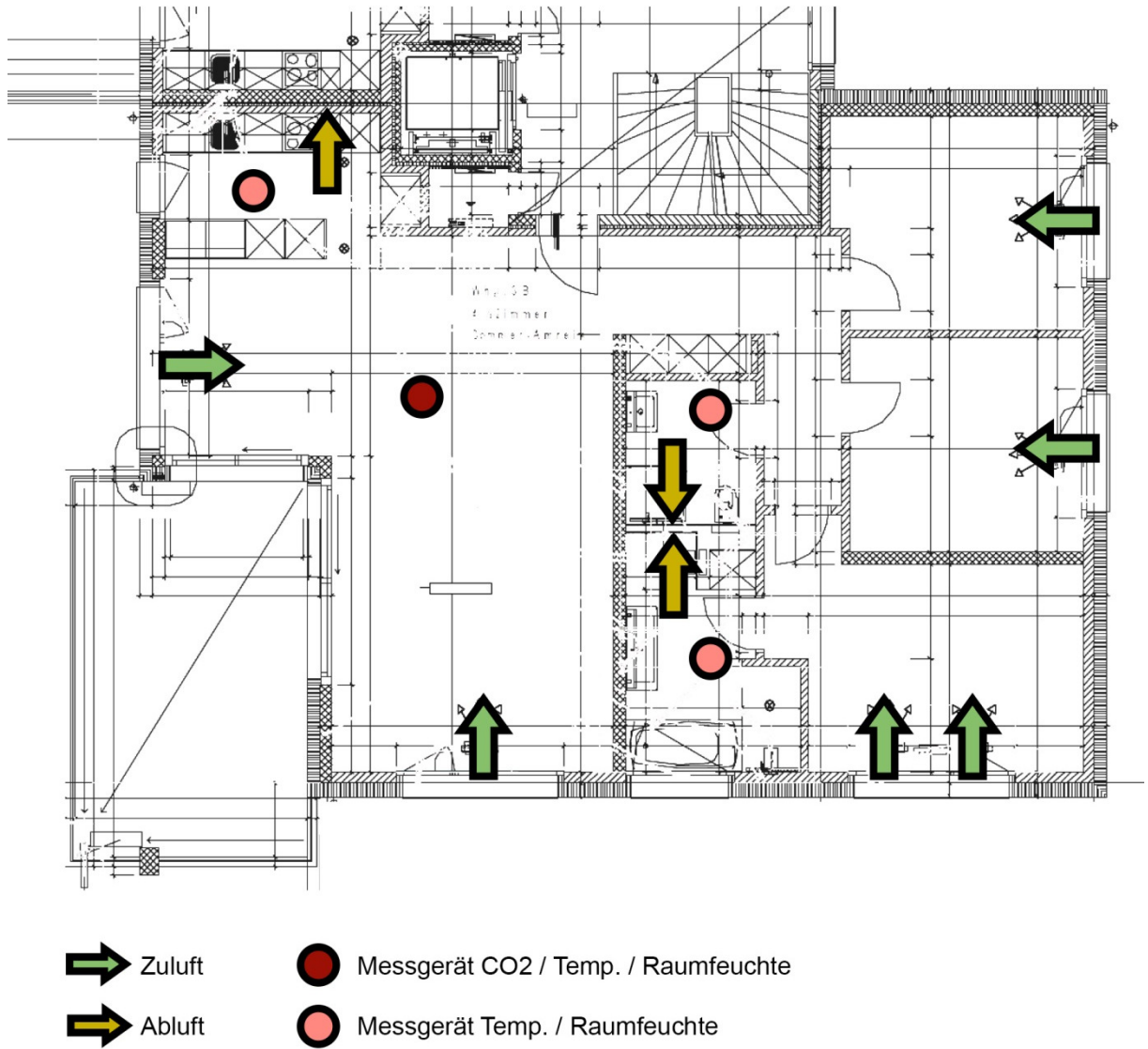


Abbildung 7: MFH Malters: Grundriss Wohnung D



5.4.3 Mehrfamilienhaus in Genf - Lüftungssystem AERECO



Baujahr:	1950
Modernisierung:	2012
Standard:	-
EBF:	2826m ²
Wohneinheiten:	Total 40 Wohnungen
Heizung:	Gasfeuerung (H & WW 100%)
Lüftung:	Aereco SA
Untersuchte Wohnung:	Whg. E: 4 Zimmer

Abbildung 8: MFH Genf: Ansicht und Gebäudedaten

Wohnungsgrundriss

Wohnung E

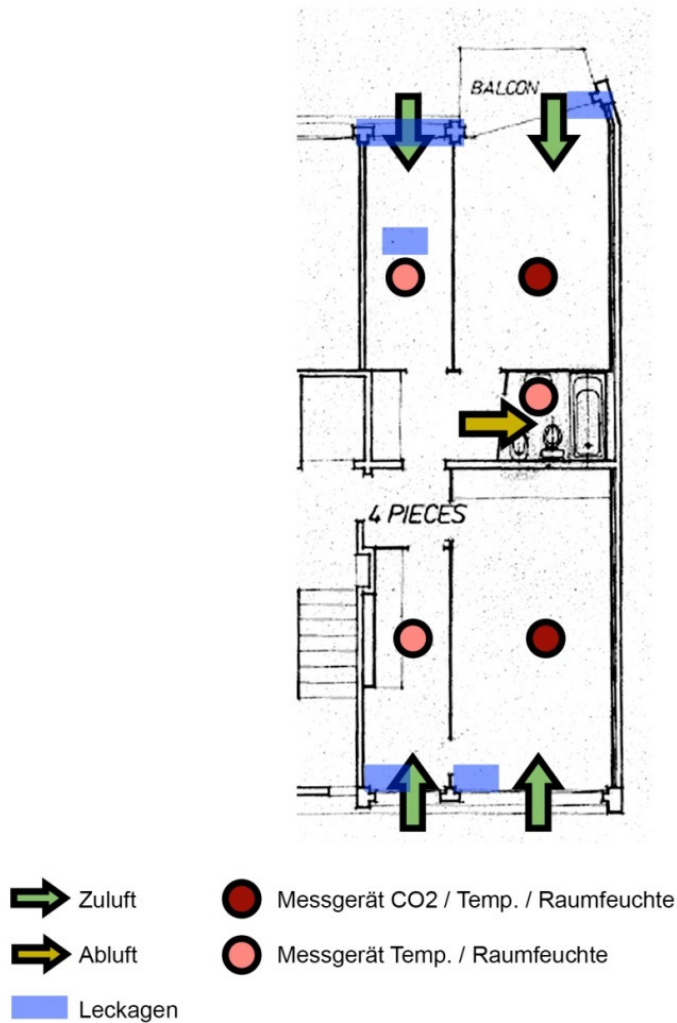


Abbildung 9: MFH Genf: Grundriss Wohnung E



5.4.4 Mehrfamilienhaus in Russin (GE) Lüftungssystem AERECO



Baujahr:	2008
Standard:	Minergie
EBF:	1222m ²
Wohneinheiten:	3 x 2,5-Zimmerwhg. 3 x 4,5-Zimmerwhg.
Heizung:	Pelletfeuerung (H & WW 100%)
Lüftung:	Aereco SA
Untersuchte Wohnungen:	Whg. F: 4,5 Zimmer Whg. G: 2,5 Zimmer Whg. H: 2,5 Zimmer

Abbildung 10: MFH Russin: Ansicht und Gebäudedaten

Wohnungsgrundrisse

Wohnung F (EG)

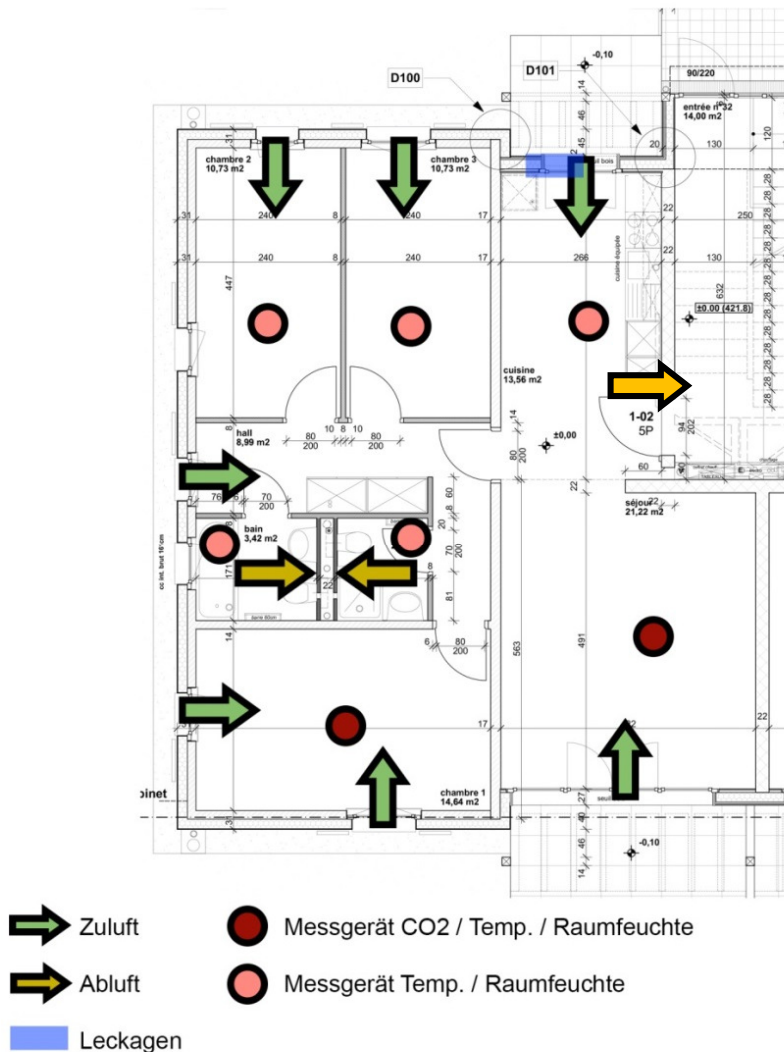


Abbildung 11: MFH Russin: Grundriss Wohnung F



Wohnung G (1.OG) und Wohnung H (2.OG)

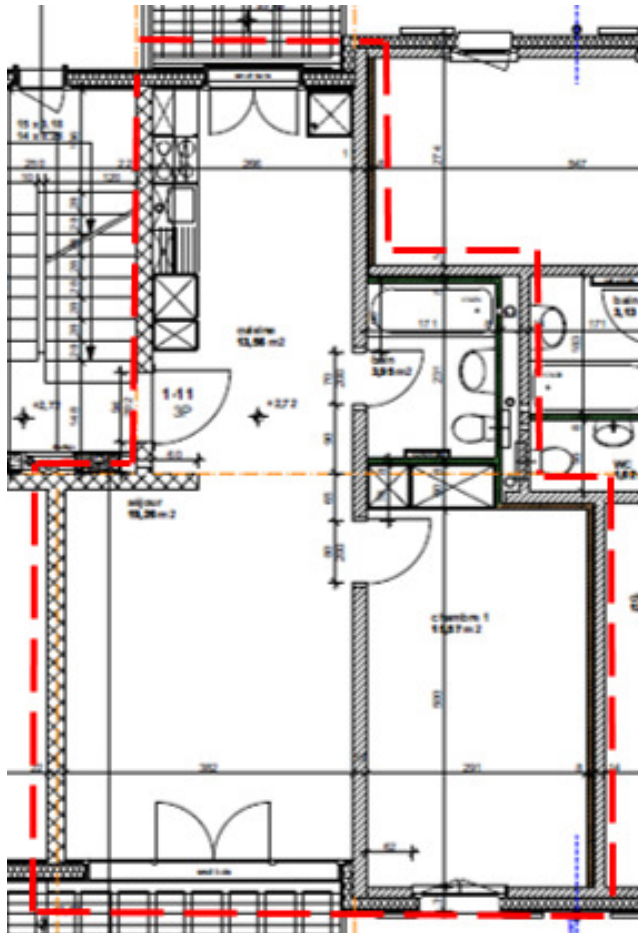


Abbildung 12: MFH Russin Grundriss Wohnung G und H



6. Vorgehen und Methoden

6.1 Theoretische Betrachtungen

6.1.1 Normenvergleich

In der Schweiz behandeln die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) viele Fragestellungen im Baubereich und legen die Anforderungen fest.

Durch einen Normenvergleich soll ermittelt werden, inwiefern sich die schweizerischen Normen von den deutschen und französischen Normen unterscheiden. Es soll aufgezeigt werden, welche Norm die einzelnen Themengebiete abhandelt und welche Anforderungen gestellt werden. Ziel dieser Auswertung ist es, die nachfolgenden Resultate, welche sich auf die SIA Normen beziehen, in einen grösseren Kontext zu setzen. Es wird die Möglichkeit gegeben, die Resultate in Bezug auf die Normen der Nachbarländer zu bewerten.

Die Recherche zeigt, dass zum Thema "Einsatz von Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung von Mehrfamilienhäusern" nur wenig Literatur vorhanden ist. Zudem gibt es zwischen den untersuchten nationalen Normen in gewissen Teilbereichen Unterschiede bezüglich Anforderungen und Auslegung der Abluftanlagen. Die vorliegende, auf Felduntersuchungen basierende Studie soll daher Unsicherheiten ausräumen und einen Beitrag für die Aktualisierung von Schweizer Normen und Energiestandards liefern.

6.1.2 Schallschutz gegen Aussenlärm

Aussenluftdurchlässe stellen eine Schwächung der Luftschalldämmung einer Fassade dar. Die Auswirkungen auf den Schallschutz und die Einhaltung der Anforderungen gemäss Norm SIA 181, Schallschutz im Hochbau wurde für zwei Raumtypen mit einer Aussenwand rechnerisch überprüft.

Die Berechnung der Schallpegeldifferenzen bezüglich Aussenlärm zeigt die schalltechnische Qualität des Lüftungskonzepts und lässt Rückschlüsse auf die Einsatzmöglichkeit von Aussenluftdurchlässen an lärmexponierten Lagen zu.

Für die Schallpegeldifferenz der Aussenluftdurchlässe standen Messprotokolle beider Produkte zur Verfügung. Die Werte liegen zwischen 35 und 37dB, mit Spektrumanpassungswerten C_{tr} bei 0 bis 2dB. Für die Beurteilung des Schallschutzes wurde in dieser Betrachtung der Wert $D_{n,e,w} = 37\text{dB}$ (mit $C_{tr}=0\text{dB}$) für einen Aussenluftdurchlass eingesetzt. Werden zwei Aussenluftdurchlässe in einem Raum eingebaut, verringert sich $D_{n,e,w}$ um 3dB.

6.2 Kurzzeitmessungen: Luftdichtheit und Volumenströme

6.2.1 Luftdurchlässigkeits-Messungen

Die Luftdichtheit der einzelnen Wohnungen wurde mittels eines Blower-Door-Tests (Differenzdruckverfahren) geprüft. Das Messverfahren richtet sich nach der Norm EN 13829 "Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden". Dabei gibt es zwei Verfahren A (Prüfung des Gebäudes im Nutzungszustand) und B (Prüfung der Gebäudehülle). Für die hier vorliegende Studie wurde das Verfahren B gewählt, bei der alle vorhandenen Öffnungen (Fenster, Türen, etc.) geschlossen wurden. Im Speziellen wurden alle Zuluft-Stellen (Aussenluftdurchlässe) und Abluft-Stellen einer Wohnung abgeklebt.

Der Ventilator war jeweils in der Wohnungstüre eingebaut. In zwei Messreihen mit Unterdruck und Überdruck werden im Bereich zwischen 20 und 60 Pascal Druckdifferenz innen-aussen die



Luftvolumenströme gemessen. Mit den geometrischen Daten der Wohnung lassen sich die Luftwechselrate n_{50} (volumenbezogen) und die Luftdurchlässigkeit q_{50} (bezogen auf die innere Gebäudehüllfläche) für die Druckdifferenz von 50 Pascal berechnen.



Abbildung 13: Installation Blower Door in Wohnungstür



Abbildung 14: Einstellung des Blower Door-Tests in untersuchter Wohnung

6.2.2 Volumenstrommessung

Mit dem Messgerät FlowFinder-mk2 wurden die Luftvolumenströme der einzelnen Zuluft- und Abluftstellen in verschiedenen Betriebszuständen (offene und geschlossene Zimmertüren, Abluftventilator auf unterschiedlichen Stufen, usw.) gemessen. Um den Durchfluss bei den schlitzartigen Aussenluftdurchlässen messen zu können, wurde ein Adapter angefertigt. Mit den Momentanwerten der Luftvolumenströme liess sich für jede Wohnung der Luftvolumenstrom durch Infiltration für einen typischen Betriebszustand errechnen.



Abbildung 15: Flow Finder-Messgerät inkl. Adapter



Abbildung 16: Messung des Luftvolumenstroms durch einen ALD mit dem Flow Finder

6.3 Weitere Kurzzeitmessungen

6.3.1 Feinstaub-Messung

Die Firma Bau- und Umweltchemie, Beratungen und Messungen AG führte im Auftrag der FHNW in einem Gebäude in Oberweningen eine Luftpartikelmessung durch. Das Gebäude ist mit der Abluftanlage der Firma Trivent ausgestattet.

Das untersuchte Gebäude befindet sich auf 465 m ü. M. an einer Einfahrtstrasse in der Agglomeration von Zürich. Die Messung wurde nach einer mehrwöchigen niederschlagsarmen Periode durchgeführt, wodurch sich aufgrund der fehlenden Auswaschung mehr Feinstaub in der Luft befinden sollte. Während der Messung hielten sich fünf bis sechs Personen sowie eine Katze in der Wohnung auf. Von insgesamt fünf Aussenluftdurchlässen befindet sich einer auf der Strassenseite des Gebäudes..

An zwei aufeinanderfolgenden Tagen im Juli 2015 wurden während mehrerer Stunden aussen an der Fassade und in Schlaf- und Wohnzimmer die Feinstaub-Partikelkonzentrationen (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ (Particulate Matter, Durchmesser in μm) registriert. Am Tag 1 waren M5-Filter in die Aussenluftdurchlässe eingebaut, die Messung am Tag 2 erfolgte ohne Filter. An beiden Tagen wurden exemplarisch die Luftvolumenströme von Zuluft und Abluft mit FlowFinder gemessen.



Abbildung 17: Partikelmessung Aussen (inkl. Referenzmessung) / Partikelmessung Zuluft Schlafzimmer



Abbildung 18: Partikelmessungen Raumluft (Schlafzimmer und Wohn-/Esszimmer)



6.3.2 VOC-Messung

Flüchtige organischen Verbindungen (VOC, Volatile Organic Compounds) in der Raumluft sind mit ein Indikator für die Luftqualität und für das Wohlbefinden der Menschen im Raum. Zur Abklärung der Auswirkung einer Abluftanlage auf die Raumluftqualität führte die Firma GanzKlima in der Wohnung D des Mehrfamilienhauses in Malter eine VOC-Messung durch. An zwei aufeinanderfolgenden Tagen im Juli 2015 wurden während mehrerer Stunden die VOC-Konzentrationen gemessen. Am 14. Juli 2015 erfolgte eine erste Messung bei ausgeschalteter Lüftungsanlage und geschlossenen Fenstern und Türen. Am 15. Juli 2015 wurde die Messung bei vergleichbaren Bedingungen mit laufender Lüftungsanlage wiederholt.

Es sollte festgestellt werden, ob in der Raumluft chemische Verbindungen in auffälligen Konzentrationen vorliegen und ob der Betrieb der Abluftanlage die Konzentrationen beeinflusst.



Abbildung 19: Installationsaufbau für die VOC-Messung



6.3.3 Tracergas-Messung

Die Messung der Luftvolumenströme der Lüftungsanlagen zeigte bei mehreren Wohnungen grosse Diskrepanzen zwischen Zu- und Abluft mit entsprechend sehr hohen Infiltrationswerten. Eine Tracergas-Messung mit dem Indikatorgas SF₆ (Schwefel-Hexafluorid) bietet die Möglichkeit, weitere Infiltrationen festzustellen. Gleichzeitig kann mit der Anreicherung von SF₆ im Wohnraum und der laufenden Messung der Konzentration des Spurengases in der Raumluft das Abklingverhalten festgestellt und damit der Luftwechsel im Raum bestimmt werden.

In der Wohnung D in Malters wurden durch Mitarbeiter der HSLU 2 Tracergas-Messungen durchgeführt.



Abbildung 20: Installationsaufbau für die Tracergas-Messung

6.4 Langzeitmessungen

6.4.1 Raumklima: Temperatur, Feuchtigkeit und CO₂-Konzentration

Im Zeitraum Juli 2014 bis Juni 2015 wurde das Raumklima der insgesamt acht untersuchten Wohnungen kontinuierlich messtechnisch erfasst. Die Platzierung der Messgeräte in den Räumen wird in Kapitel 4.4 gezeigt. Raumlufthemperaturen, relative Raumlufffeuchten und CO₂-Konzentrationen in Schlaf- und Wohnräumen wurden im Minutenintervall aufgezeichnet. Die Temperatur- und Feuchtigkeitswerte wurden in allen Räumen im Minutenintervall aufgenommen. Durch das Ermitteln und Darstellen von Mittelwerten, 80%-Werten (Bereiche, welche nur während 20% aller Messungen verlassen werden), Wochenganglinien und Prozentdarstellungen von verschiedenen Klassen, sollen Aussagen zum Raumklima und der allgemeinen Behaglichkeit im Raum gemacht werden. Insbesondere sollen die Messdaten mit den Ziel- und Richtwerten aus den SIA Normen 382/1 und 180 verglichen werden.







Standort	Messgeräte	Bezeichnung / Funktionen
Linthal	 	<p>Opus20 TCO:</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst CO₂, rel. Feuchte und Temperatur <p>MSR 145 S / MSR 145-800 mAh:</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst Temperatur und Feuchte Speicherdaten auf SD-Karten
Malters	 	<p>Opus20 TCO:</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst CO₂, rel. Feuchte und Temperatur <p>MSR 145 S / MSR 145-800 mAh:</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst Temperatur und Feuchte Speicherdaten auf SD-Karten
Genf		<p>E+E HUMLOG 20 (CO₂ T RH):</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst CO₂, rel. Feuchte und Temperatur
Russin		<p>E+E HUMLOG 20 (CO₂ T RH):</p> <ul style="list-style-type: none"> Misst CO₂, rel. Feuchte und Temperatur

Abbildung 21: verwendete Messgeräte



Die Messungen der Anlagen von Trivent in Linthal und Malters wurden durch die Hochschule Luzern (HSLU) und die Messungen in Genf und Russin, mit Anlagen der Firma Aereco wurden durch Mitarbeiter von Aereco durchgeführt. Die Messdaten wurden periodisch ausgelesen und an die FHNW übermittelt. Dies ermöglichte es, Zwischenergebnisse auszuwerten und allfällige Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben. In der folgenden Abbildung ist der Ablauf der Langzeitmessungen schematisch dargestellt.

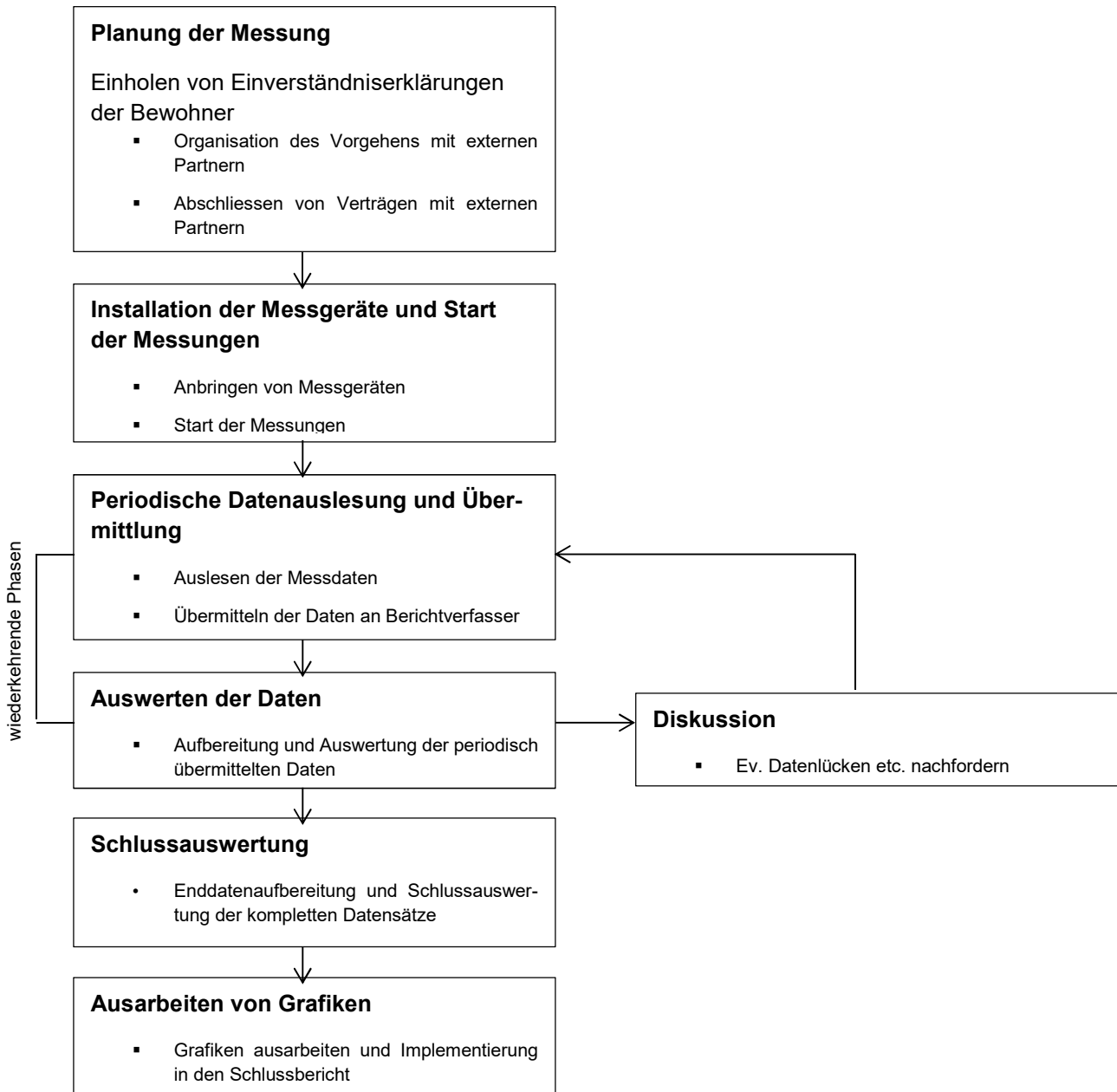


Abbildung 22: Ablaufschema der Langzeitmessungen

Messung der Temperatur

Die SIA Norm 382/1 gibt unter Ziffer 2.2.3 Raumlufttemperatur an, welche Temperaturen, unter Einbezug eines gleitenden Mittelwertes der Aussentemperatur über 48 Stunden, erreicht werden sollen. Dies unter der Voraussetzung, dass kein Unterschied zwischen empfundener Temperatur und Lufttemperatur im Raum gemacht wird. Demnach müssen sowohl die Aussen- sowie Innentemperaturen gemessen werden.

Messung der Feuchtigkeit

Die SIA Norm 180 sagt unter Ziffer 3.5.1.3 aus, dass die relative Raumluftfeuchte von beheizten oder mechanisch belüfteten Räumen eine Grenze von 30% rel. Luftfeuchtigkeit während maximal 10% der 30/80



jährlichen Nutzungszeit unterschreiten darf. Die Nutzungszeiten sind in der SIA Norm 2024 festgelegt. Ferien- oder andere längere Abwesenheiten werden in der Norm jedoch nicht berücksichtigt. Für diese Analyse wurde die effektive Nutzungszeit der Wohnungen anhand der CO₂-Messungen festgelegt, unter der Annahme, dass ab einer gemessenen CO₂-Konzentration von 600ppm die Wohnung benutzt wird. Die durchschnittliche CO₂-Konzentration der Aussenluft in der Schweiz liegt im Bereich von 430ppm (Monn, 2012). In Arbeits- und Wohnräumen ist die Raumluft eher höher belastet. Demnach kann mit Werten ab 600ppm und höher von der Präsenz von einer oder mehreren Personen in einer Wohnung ausgegangen werden.

Messung der CO₂-Konzentration

Angaben zu Anforderungen an die Raumluftqualität in Bezug auf CO₂ Belastungen werden ebenfalls in der SIA Norm 382/1 gemacht. Die Norm beschreibt unter Ziffer 1.7.3 Raumluft (RAL) anhand von vier RAL-Kategorien die Luftqualität.

Kategorie	Beschreibung	Beispiele
RAL 1	<u>Raumluft mit hoher Luftqualität</u> Luft mit besonderen Anforderungen an den Gehalt von Fremd- und Geruchsstoffen in der Raumluft	Labor- und Produktionsräume für empfindliche Arbeiten bzw. Güter
RAL 2	<u>Raumluft mit mittlerer Luftqualität</u> Luft in Räumen, die dem Aufenthalt von Personen dienen und bei denen erhöhte Ansprüche gestellt werden; CO ₂ -Pegel < 1000 ppm*, Luftvolumenstrom >18 bis 30m ³ /h Person	Räume mit speziellen Ansprüchen an Gerüche, insbesondere für neu eintretende Personen
RAL 3	<u>Raumluft mit mässiger Luftqualität</u> Luft in Räumen, die dem Aufenthalt von Personen dienen und bei denen erhöhte Ansprüche gestellt werden CO ₂ -Pegel von 1000 ppm* bis 1400 ppm, Luftvolumenstrom >18 bis 30m ³ /h Person	Typische Wohn- und Büroräume
RAL 4	<u>Räume mit niedriger Luftqualität</u> Luft in Räumen, in denen sich nur selten oder keine Personen aufhalten, sowie Luft in Räumen, in denen geraucht wird	Lagerräume, Korridore; alle Räume, in denen geraucht wird
	* Die angegebenen CO ₂ -Pegel gelten für einen CO ₂ Gehalt der Aussenluft von 400 ppm und eine CO ₂ Emission pro Person von 18 l/h	

Tabelle 1: RAL-Kategorien gemäss SIA Norm 382/1 Ziffer 1.7.3

Für die hier vorliegende Untersuchung ist demnach die Kategorie RAL 3 von Bedeutung. Die CO₂ Belastung in den einzelnen Räumen sollte daher nicht über 1400 ppm steigen.



6.5 Betriebsenergie

Eine Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen ermöglicht die kontinuierliche Erneuerung der Luft in den Wohnräumen. Im Vergleich zur benutzerabhängigen Fensterlüftung werden die Luftvolumenströme kontrolliert und können den Bedürfnissen angepasst werden.

Messungen Technikraum

Bei den untersuchten Gebäuden wurden die gesamten Abluft- bzw. Fortluftvolumenströme und Lufttemperaturen kontinuierlich gemessen. Aus diesen Daten wurden die Lüftungswärmeverluste ermittelt und mit Standardwerten für die natürliche Lüftung verglichen.

Lüftungswärmeverluste

Mit der Lüftung der Räume entstehen unabhängig vom gewählten Lüftungskonzept Wärmeverluste. Die von aussen nachströmende Luft wird auf Raumtemperatur erwärmt. Ohne Wärmerückgewinnung geht diese Energie mit der Fortluft verloren.

Hier wird das Lüftungskonzept mit Abluftanlage und Aussenluftdurchlässen der natürlichen Lüftung mit Standardwerten gegenübergestellt und es wird gezeigt, wieviel Wärmeenergie durch die Abluftwärmepumpe beim System Trivent zurückgewonnen wird.

Die Lüftungswärmeverluste werden vereinfacht mit folgender Formel berechnet:

$$Q_V = \dot{V} \times c_a \times \rho_a \times (\theta_i - \theta_e) \times t$$

Dabei sind:

Q_V	Lüftungswärmeverluste in kWh
\dot{V}	Luftvolumenstrom in m ³ /h
c_a	Wärmespeicherfähigkeit der Luft in kWh/(kg.K)
ρ_a	Dichte der Luft in kg/m ³
θ_i	Lufttemperatur innen ("warm") in °C
θ_e	Lufttemperatur aussen ("kalt") in °C
t	Zeitschritt in h

Die Wärmespeicherfähigkeit der Luft ($\rho_a \times c_a$) ist abhängig von der Höhe des Gebäudestandorts. Der Wert wird gemäss dem Berechnungsansatz nach SIA 380/1, Ausgabe 2009, Kapitel 3.5.2.3 korrigiert.

6.6 Bewohnerbefragung

Anhand einer Befragung wurde die Zufriedenheit der Bewohner aller vier Mehrfamilienhäuser ermittelt. Des Weiteren erlauben die Aussagen zu Raumklima, Lärm und Lüftungsverhalten einen Vergleich mit den Messergebnissen aus den Kurz- und Langzeitmessungen. Unerwartete Ergebnisse können so allenfalls erklärt werden.

In einer ersten Phase (Planung der Bewohnerbefragung) wurde festgelegt, welchen Fragen und Antworten zu einzelnen Gegebenheiten und Empfindungen erhoben werden sollen. Da durch die vier Untersuchungsgebäude die Interviewgruppe bestimmt ist, wurde nicht explizit auf die Zielgruppe als Thema eingegangen.

Es wurde ein Fragebogen in Deutsch und Französisch verfasst und an 53 Bewohnerparteien versendet. Alle Fragen, bis auf die letzte Frage, wurden als geschlossene Fragen mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten gestellt. Diese Art der Fragen ermöglicht eine genaue und aussagekräftige



Auswertung. Ein detailliertes Schema, wie die Bewohnerbefragung und der Fragebogen geplant, versandt und ausgewertet wurden, finden sich in Abbildung 23. Der Fragebogen befindet sich als Muster im Anhang.

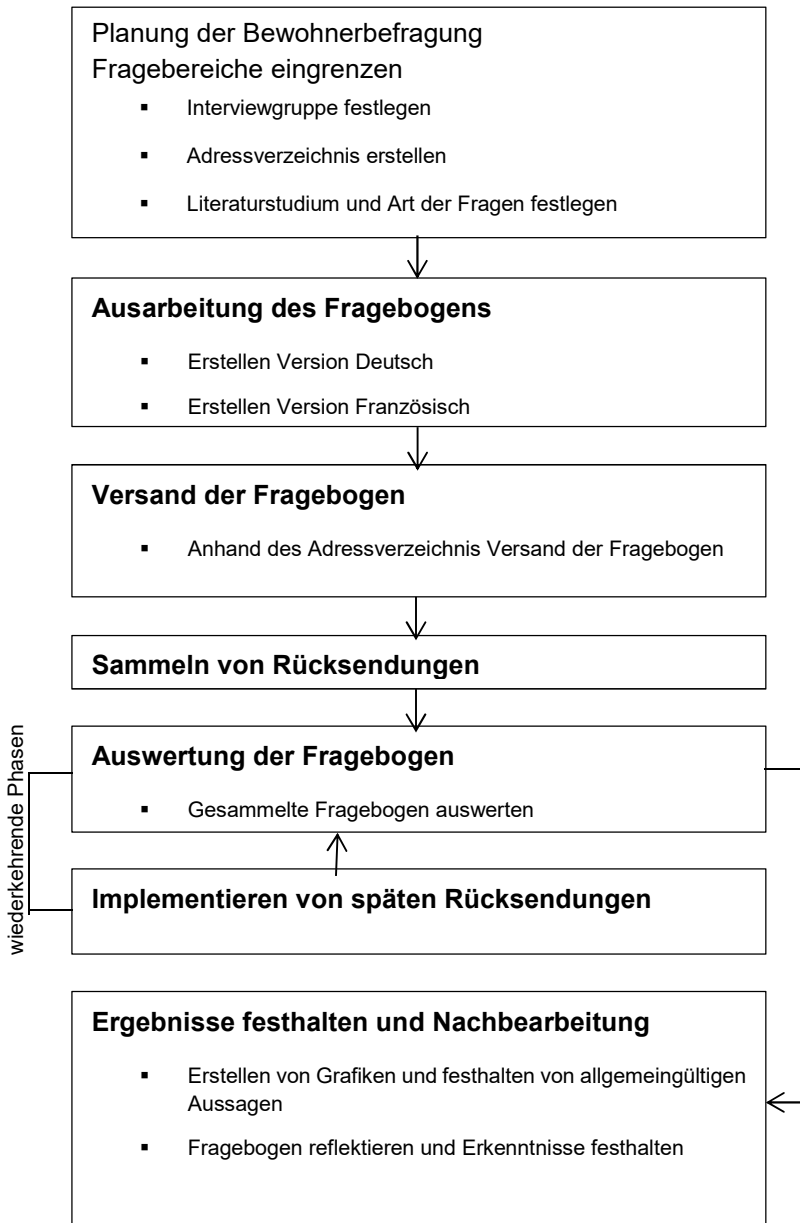


Abbildung 23: Ablaufschema der Bewohnerbefragung



7. Ergebnisse und Diskussion

7.1 Theoretische Betrachtungen

7.1.1 Normenvergleich

Schweiz

In der Schweiz legt die Norm SIA 382/1 die allgemeinen Anforderungen für Lüftungsanlagen fest. Sie macht Vorgaben zu den baulichen Anforderungen, der Behaglichkeit, dem Energiebedarf, der Betriebssicherheit und der Wartung. Aus der SIA 382/1 leitet sich das SIA Merkblatt 2023 ab, das die Lüftung in allen Arten von Wohnbauten regelt. Das System der "Einfachen Abluftanlage" wird darin wie folgt beschrieben. In Nassräumen wird Luft abgesaugt, die Ersatzluft strömt über Aussenluft-Durchlässe in den Wohn-, Schlaf-, und Arbeitszimmern nach. Die Druckverhältnisse im Gebäude werden hauptsächlich durch die Aussenluft-Durchlässe bestimmt. Neben Anlagen mit zentralen Ventilatoren gibt es Systeme mit einem Ventilator pro Nassraum.

Damit die Schweizer Baufachleute einen Einblick in andere Normen erhalten, wurden die Schweizer Normen mit denen von Deutschland und Frankreich verglichen, um allfällige Unterschiede zu eruieren.

Deutschland

In Deutschland ist die Norm DIN 1946-6 des Deutschen Instituts für Normen e.V. (2009) ausschlaggebend für die Regelung der Anforderungen an Lüftungsanlagen. Sie definiert Abluftsysteme als abluftseitige, Ventilator gestützte Lüftungssysteme. Diese können ohne oder mit Abwärmenutzung mittels Abluftwärmepumpe geplant, ausgelegt und betrieben werden. Bei Abluftanlagen wird in Einzelventilator-Lüftungsanlagen und Zentralventilator-Lüftungsanlagen unterschieden.

In der SIA 382/1 werden Aussenluft, Raumlufte, Abluft, Druckbedingungen und Behaglichkeit ausführlich beschrieben und definiert. Im Gegensatz dazu fehlen in der DIN 1946-6 diesbezügliche Angaben. Einzig bei der Behaglichkeit wird auf das Risiko von Zugluft hingewiesen. Nach SIA liegt das Zugluftrisiko DR unter Normalbedingungen bei 15% während in der DIN 20% angegeben werden.

Beim Aussenluftvolumenstrom werden in der SIA pauschale Volumenströme bei gegebener Raumluftequalität pro Person und Stunde angegeben. Bei der DIN muss der Volumenstrom für jede(n) Anwendung/Raum einzeln berechnet werden.

Die Punkte: Druckverlust, spezifische Ventilatorleistung, Abwärmenutzung, Anforderungen an Aussenluffassung und Filter werden in der DIN nicht erwähnt oder es wird auf zusätzliche Normen verwiesen (z.B. DIN EN 779). Die SIA-Norm mit dem Merkblatt ergänzt, ist in diesem Punkt ausführlicher.

Beim Thema Schall/Akustik wird in der DIN auch auf andere Normen (DIN EN 4719 oder 4109) verwiesen.

Frankreich

In Frankreich ist der "Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements" eine wichtige Grundlage für die Normierung im Bereich der Lüftungsanlagen. Diese Norm ist im Vergleich zur SIA 382/1 kurzgefasst und macht keine spezifischen Aussagen zur Abluftanlage. Im Bereich der Abluftvolumenströme enthält sie detaillierte Werte, die bei einem Lüftungssystem beachtet werden müssen. Die anderen Themen werden kurz behandelt. Anforderungen an CO₂-Konzentrationen und Raumlufffeuchten sind in weiteren Normen geregelt (z.B. DTU.68.1).



Die folgenden Tabellen zeigen auf, welche Themen im Bereich der Lüftungs-/Abluftanlage in welchen Normen behandelt werden. Die Tabellen 2 bis 5 gehen auf die konkreten Unterschiede in den Normen ein und zeigen wie, sofern die Norm aussagen macht, mit dem Themengebiet umgegangen wird.

Relevante Punkte/Norm	SIA 382/1 inkl. Merkblatt 2023	DIN 1946-6: Raumlufttechnik Teil 6	Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements
Definition Anlagentyp: Abluftanlage	✓	✓	✗
Aussenluft	✓	✗	✗
Raumluft	✓	✗	✗
Abluft	✓	✗	✓ ✗
Druckbedingungen	✓	✗	✓
Raumlufttemperatur	✓	✗	✗
Raumluftfeuchte	✓	✗	✗
CO ₂	✓	✗	✗
Zugluft	✓	✓	✗
Aussenluftvolumenstrom	✓	✓	✗
Abluftvolumenströme	✓	✓	✓
Druckverluste	✓	✗	✗
Spezifische Ventilatorleistung	✓	✗	✗
Nutzung von Abwärme	✓	✗	✗
Anforderungen an Aussenluftfassungen	✓	✗	✓
Filterung	✓	✓	✗
Schallschutz /Akustik	✓	✓	✗
Aussenluftdurchlässe	✗	✓	✗
Hinweise auf Einsatzgrenzen von Abluftanlagen	✓	✗	✗

Tabelle 2: Übersicht Normenvergleich Bereich Lüftung

Diese Übersicht zeigt thematisch den Vergleich der Norm SIA 382/1 mit ihren Pendanten in Deutschland und Frankreich. Weitergehende Anforderungen an die Lüftungstechnik, an Luftqualität, Behaglichkeit oder Energieeffizienz werden länderspezifisch in einigen weiteren Normen behandelt. Im Folgenden werden die Unterschiede in den Normen genauer ausgeführt.

Vergleich/Norm	SIA 382/1 inkl. Merkblatt 2023	DIN 1946-6: Raumlufttechnik Teil 6	Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements
Angaben zu Unterdruck	In eingeschossigen Wohnungen soll der Unterdruck max. 4 bis 5 Pa betragen. In zweigeschossigen Lufträumen soll er im Erdgeschoss max. 6 Pa, im Obergeschoss 3 Pa nicht übersteigen.	Keine Angaben	Bei einer mechanischen Lüftung muss darauf geachtet werden, dass der erzeugte Unterdruck nicht grösser ist, als der natürlich erzeugte Unterdruck in Kaminen und anderen natürlichen Lüftungsschächten.

Tabelle 3: Vergleich Bedingungen Unterdruck



Vergleich/Norm	SIA 382/1 inkl. Merkblatt 2023	DIN 1946-6: Raumluftechnik Teil 6	Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements
Angaben zu Aussenluftvolumenströmen	Um die geforderte Raumlufqualität RAL 3 zu erreichen, ist eine Aussenluft- rate von 22 bis 36m ³ /h pro Person anzuwenden. In Schlafräumen, bei nur kurzzeitigem Aufenthalt und wenn der Dimensionierungszustand für die Personenbelegung nur selten eintritt, kann die Luftrate auf 15m ³ /h pro Person reduziert werden. In Räumen in denen geraucht wird ist die Aussenluft- rate auf 72m ³ /h Person zu erhöhen.	Der in Gebäuden bzw. Nutzungseinheiten wirksame Gesamt-Aussenluftvolumenstrom $q_{v,ges}$ addiert sich anhand der folgenden Gleichung aus drei Aussenluftvolumenstrom—Anteilen (alle in m ³ /h) $q_{v,ges} = q_{v,LTM} + q_{v,Inf,wirk} + q_{v,Fe,wirk}$ Dabei ist $q_{v,ges}$ der gesamte Aussenluftvolumenstrom, $q_{v,LTM}$ der Luftvolumenstrom durch Lüftungstechnische Massnahmen, $q_{v,Inf,wirk}$ der wirksame Luftvolumenstrom durch Infiltration, $q_{v,Fe,wirk}$ der wirksame Luftvolumenstrom durch manuelles Fensteröffnen. Der Gesamt-Aussenluftvolumenstrom $q_{v,ges}$ wird in Tabellen definiert und richtet sich nach verschiedensten Perimeter. Die Norm bezieht dabei die Nutzungsfläche mit ein.	Keine Angaben gefunden

Tabelle 4: Vergleich Bedingungen Aussenluftvolumenströme

Aus dem Normenvergleich geht hervor, dass die deutsche Norm in den meisten Neubau und Sanierungsfällen höhere Aussenluft- raten fordert. Dies durch die Gegebenheit, dass die Nutzungsflächen mit einbezogen werden. Die deutschen Normen gehen offenbar von einer geringeren Belegungsdichte (Fläche pro Bewohner) als die schweizerischen." (ich hatte mal versucht das herauszufinden, die Normen geben aber dazu keine eindeutigen Hinweise.).

Vergleich/Norm	SIA 382/1 inkl. Merkblatt 2023	DIN 1946-6: Raumluftechnik Teil 6	Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements
Angaben zu Abluftvolumenströmen	Die SIA Norm gibt Richtwerte an, diese beziehen sich entweder auf den Raum, die Sanitäreinrichtungen oder die Nettogeschossfläche. Es gibt sowohl Werte für den Betrieb nach Bedarf sowie den konstanten Betrieb.	Die Deutsche Norm bezieht sich wiederum auf Gleichungen. Welche Gleichung angewendet werden soll, ist abhängig von der Lüftungsart und den Räumen.	Die französische Norm dimensioniert die Abluftvolumenströme anhand der Anzahl Schlafzimmer der Wohnung oder des Hauses. Unter gewissen Umständen können diese Werte unterstritten werden. Absolute Minimalwerte sind wiederum, anhand der Anzahl Schlafzimmer gegeben.

Tabelle 5: Vergleich der Bedingungen Abluftvolumenströme



Die Französische und die Schweizer Norm basieren auf ähnlichen Ansätzen. Auch von den geforderten Werten bewegen sich die beiden Normen in einem ähnlichen Bereich.

Vergleich/Norm	SIA 382/1 inkl. Merkblatt 2023	DIN 1946-6: Raumluftechnik Teil 6	Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements
Angaben zu Filterung der Aus- senluft	<p>SIA 382/1.5.13.2.1: Zuluftanlagen müssen mit einer Filterung der Aussenluft ausgerüstet sein.</p> <p>Filterklasse bis F7 in Abhängigkeit der Aussenluftqualität gemäss Tabelle 14 aus MB SIA 2023.</p> <p>Empfehlung Filter gemäss SN EN 13779.</p> <p>Ausnahmeregelung SIA 2023, 6.7.3 für Aussenluftdurchlässe:</p> <p>Abweichung bei Aussenluftdurchlässen falls:</p> <ul style="list-style-type: none">- Aussenluft sauber- Verschmutzung gut erkennbar- Zugang zu verschmutzten Teilen ohne Werkzeug- Kein Eindringen von Insekten oder grobem Staub	<p>Abluftfilter müssen mindestens der Filterklasse G2 nach DIN EN 779 entsprechen</p> <p>Aussenluftfilter müssen mindestens der Filterklasse G3, Luftfilter für höhere Anforderungen, z.B. zur Abscheidung von Pollen, mindestens M5 nach DIN EN 779 entsprechen.</p>	Keine Angaben gefunden

Tabelle 6: Vergleich Bedingungen Filterung

7.1.2 Schallschutz gegen Aussenlärm

Mit einer einfachen Berechnung der Schallpegeldifferenzen von zwei typischen Räumen mit einer Aussenwand: ohne, mit 1 bzw. 2 Aussenluftdurchlässen wurde die Luftschalldämmung überprüft und mit den Anforderungen der Norm SIA 181 verglichen. Für die Untersuchung wurden die Raumtypen A und B mit folgender Geometrie definiert:

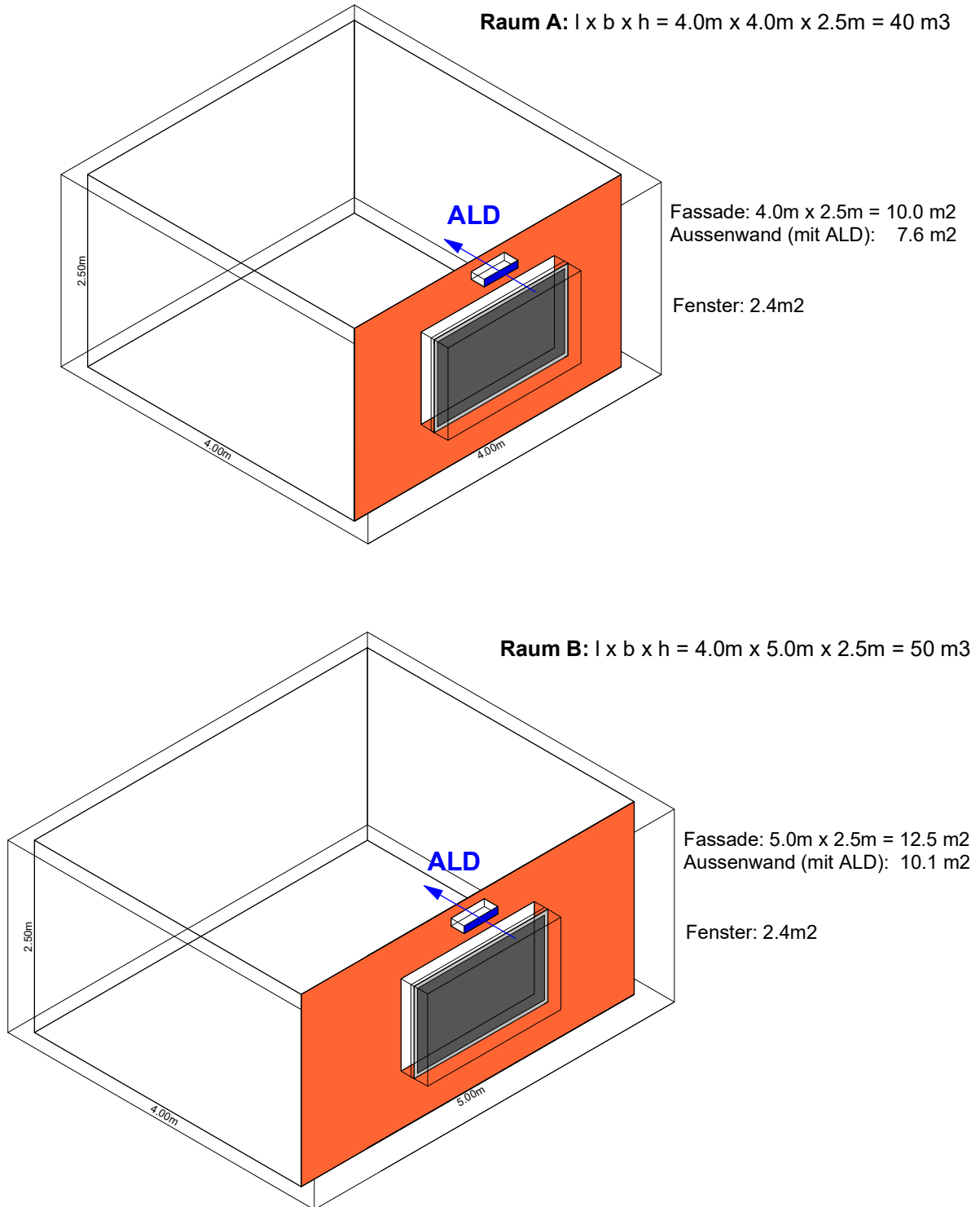


Abbildung 24: Raumtypen A und B für die Schallschutzbetrachtung

Die Bauteileigenschaften und Randbedingungen wurden wie folgt in die Berechnung eingesetzt:



	Raum A	Raum B
Abmessungen l x b x h (innen)	4.0m x 4.0m x 2.5m	4.0m x 5.0m x 2.5m
Fläche NGF	16m ²	20m ²
Volumen Raum	40m ³	50m ³
Lärmempfindlichkeit (Schlafzimmer)	mittel	mittel
Fassadenfläche	10m ²	12.5m ²
Aufbau Aussenwand	1.0 cm Innenputz 17.5 cm Backstein 16.0 cm Wärmedämmung (Mineralfasern) 2.0 cm Aussenputz	1.0 cm Innenputz 17.5 cm Backstein 16.0 cm Wärmedämmung (Mineralfasern) 2.0 cm Aussenputz
R` _w Wand	52 dB	52 dB
Aussenwand Fläche	7.6 m ²	10.1 m ²
Fenster	3-fach Wärmeschutzglas	3-fach Wärmeschutzglas
R` _w Fenster	34 dB	34 dB
Fensterfläche	2.4 m ²	2.4 m ²
Aussenluftdurchlässe		
D _{,n,e,w} für 1 ALD	37 dB	37 dB
D _{,n,e,w} für 2 ALD	34 dB	34 dB
Beurteilungspegel L _r (Strassenlärm)	60 dB	60 dB

Tabelle 7: Raumdefinitionen für Berechnung Schutz gegen Luftschall von aussen

Mit folgender Formel (Huber, 2012) kann die bewertete Standardschalldifferenz der Fassade eines Raums berechnet werden:

$$D_{nT,w} + C_{tr} = (R'_{w,res} + C_{tr,res}) - 10 \cdot \lg \left\{ \frac{T_0}{V \cdot 0.163} \cdot [S_{tot} + A_0 \cdot (10^{0.1 \cdot [(R'_{w,W} + C_{tr,res}) - (D_{n,e,w} + C_{tr,ALD})]})] \right\}$$

Symbole, Bezeichnungen und Einheiten:

- $D_{nT,w}$ Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz, in dB
- C_{tr} Spektrum-Anpassungswert der Gebäudehülle, in dB
- $R'_{w,res}$ Bewertetes Bau-Schalldämmmass der Gebäudehülle (Wand, Fenster, Dach) ohne ALD, in dB
- $C_{tr,res}$ Spektrum-Anpassungswert der Gebäudehülle ohne ALD in dB
- T_0 Bezugsnachhallzeit, T0=0.5s
- V Netto-Raumvolumen, in m³
- S_{tot} Fläche der Gebäudehülle inkl. ALD, in m²
- A_0 Bezugs-Schallabsorptionsfläche, A0=10m²
- $D_{n,e,w}$ Bewertete absorptionsflächenbezogene Schallpegeldifferenz des ALD, in dB
- $C_{tr,ALD}$ Spektrum-Anpassungswert des ALD in dB



In der Norm SIA 181, Schallschutz im Hochbau sind die Anforderungen an den Schallschutz einer Fassade abhängig vom Grad der Störung durch Aussenlärm und der Raumnutzung (Lärmempfindlichkeit) definiert. Die folgende Tabelle zeigt die in die Berechnung einzusetzenden Beurteilungspegel (Schallquelle) und die Anforderungen an das Luftschalldämmmass.

Lärmbelastung	Grad der Störung durch Aussenlärm			
	klein bis mässig		erheblich bis sehr stark	
Lage des Empfangsortes	abseits von Verkehrsträgern, keine störenden Betriebe		im Bereich von Verkehrsträgern oder störenden Betrieben	
Beurteilungsperiode	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Beurteilungspegel	$L_r < 60 \text{ dB(A)}$	$L_r < 52 \text{ dB(A)}$	$L_r > 60 \text{ dB(A)}$	$L_r > 52 \text{ dB(A)}$
Lärmempfindlichkeit	Anforderungswerte D_e			
gering	22 dB	22 dB	$L_r - 38 \text{ dB}$	$L_r - 30 \text{ dB}$
mittel	27 dB	27 dB	$L_r - 33 \text{ dB}$	$L_r - 25 \text{ dB}$
hoch	32 dB	32 dB	$L_r - 28 \text{ dB}$	$L_r - 20 \text{ dB}$

Tabelle 8: SIA 181: Mindestanforderungen an Schutz gegen Luftschall von aussen

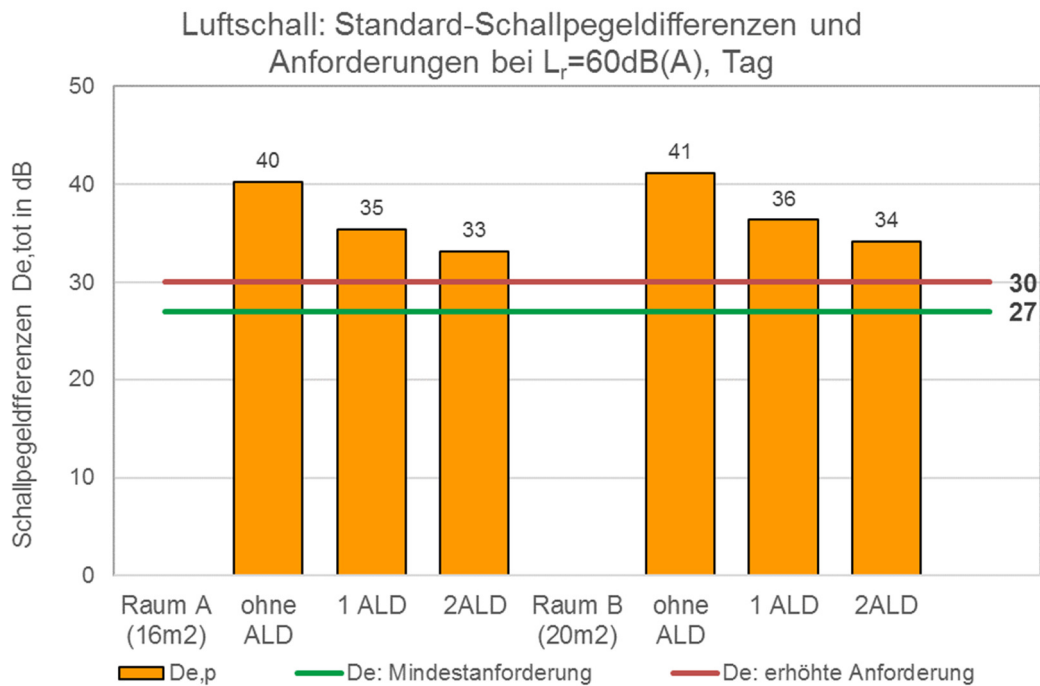


Tabelle 9: Anforderungen Luftschall bei klein bis mässiger Störung durch Aussenlärm

Schlaf- und Wohnräume mit Aussenluftdurchlässen erfüllen, bei kleiner bis mässiger Störung durch Aussenlärm (berechnet: $L_r=60 \text{ dB(A)}$, Tag), sowohl Mindest- als auch erhöhte Anforderungen an den Schallschutz gegen Aussenlärm, problemlos. Durch die Aussenluftdurchlässe wird die Schallpegeldifferenz zwar um ca. 5dB reduziert, jedoch übertreffen beide betrachteten Räume die Anforderungen, auch beim Einbau von 2 Aussenluftdurchlässen, deutlich.

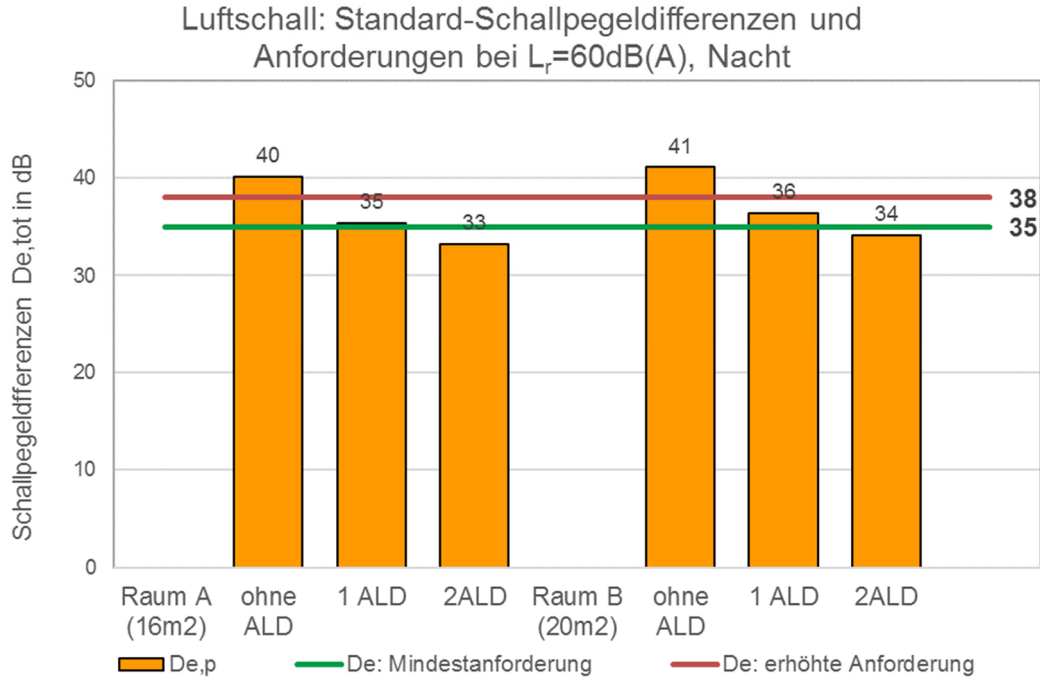


Abbildung 25: Anforderungen Luftschall bei erheblich bis sehr starker Störung durch Aussenlärm

Bei erheblicher bis sehr starker Störung durch Aussenlärm (Berechnung mit Beurteilungspegel $L_r=60\text{dB(A)}$) in der Nacht, sind die Anforderungswerte deutlich verschärft und die Einhaltung ist nicht selbstverständlich erreichbar. Mit einem Aussenluftdurchlass erfüllen beide Räume die Mindestanforderungen. Beim Einsatz von 2 ALD werden auch diese knapp unterboten.

Im Regelfall stellen die Aussenluftdurchlässe kein zusätzliches Lärmschutzproblem dar. Bei erhöhten Anforderungen und hohen Lärmpegeln erreicht ein Fassadensystem aus Wand, Fenster und Aussenluftdurchlass zuerst bei kleinen Räumen seine schalltechnischen Grenzen. In diesen Fällen soll das System gesamthaft optimiert werden und es ist auf eine möglichst exakte Ausführung der lärmschutz-relevanten Bauteile zu achten.

7.2 Kurzzeitmessungen: Luftdichtheit und Volumenströme

7.2.1 Luftdurchlässigkeits-Messungen

In gesamthaft sieben Wohnungen (A bis H, ohne G) wurden zur Beurteilung der Gebäudehüllen und als Basis für die Langzeitmessungen Blower-Door-Tests durchgeführt.

Die auf die Gebäudeoberfläche bezogene Luftdurchlässigkeit $q_{a,50}$ [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] und die volumenbezogene Luftwechselrate n_{50} [h^{-1}] (standardisierter Wert) wurden erfasst und mit geltenden Anforderungen und Empfehlungen für Neubauten verglichen. Die Resultate sind in folgenden Grafiken dargestellt.

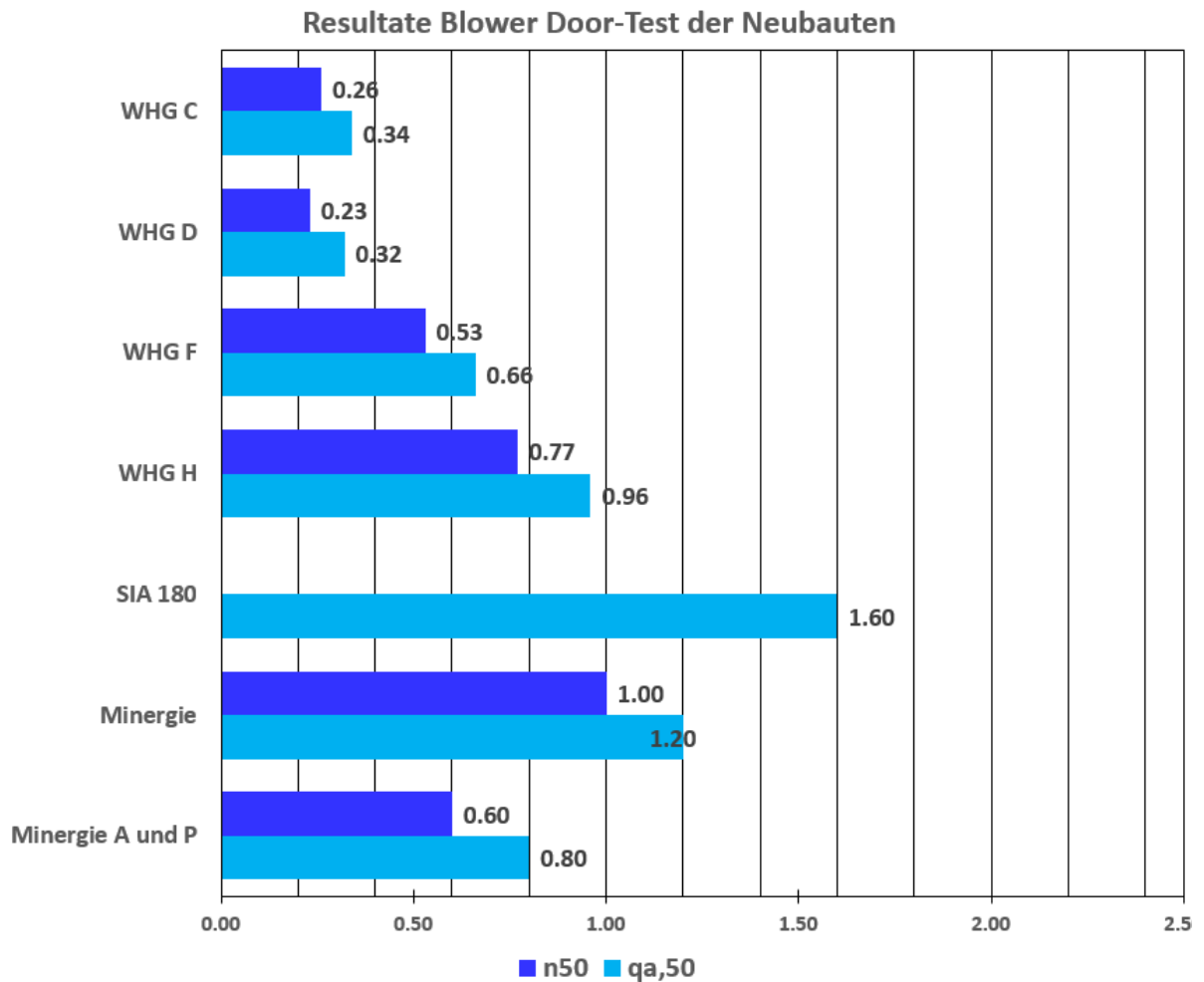


Abbildung 26: Resultate der Blower Door-Tests mit Neubau-Grenzwerten SIA 180 und Minergie-Empfehlungen

Die neuen Gebäude in Malters und Russin (Wohnungen C, D, F und H) erreichen die empfohlenen für Minergie (Minergie, 2017.2) und SIA Grenzwerten für Neubauten.

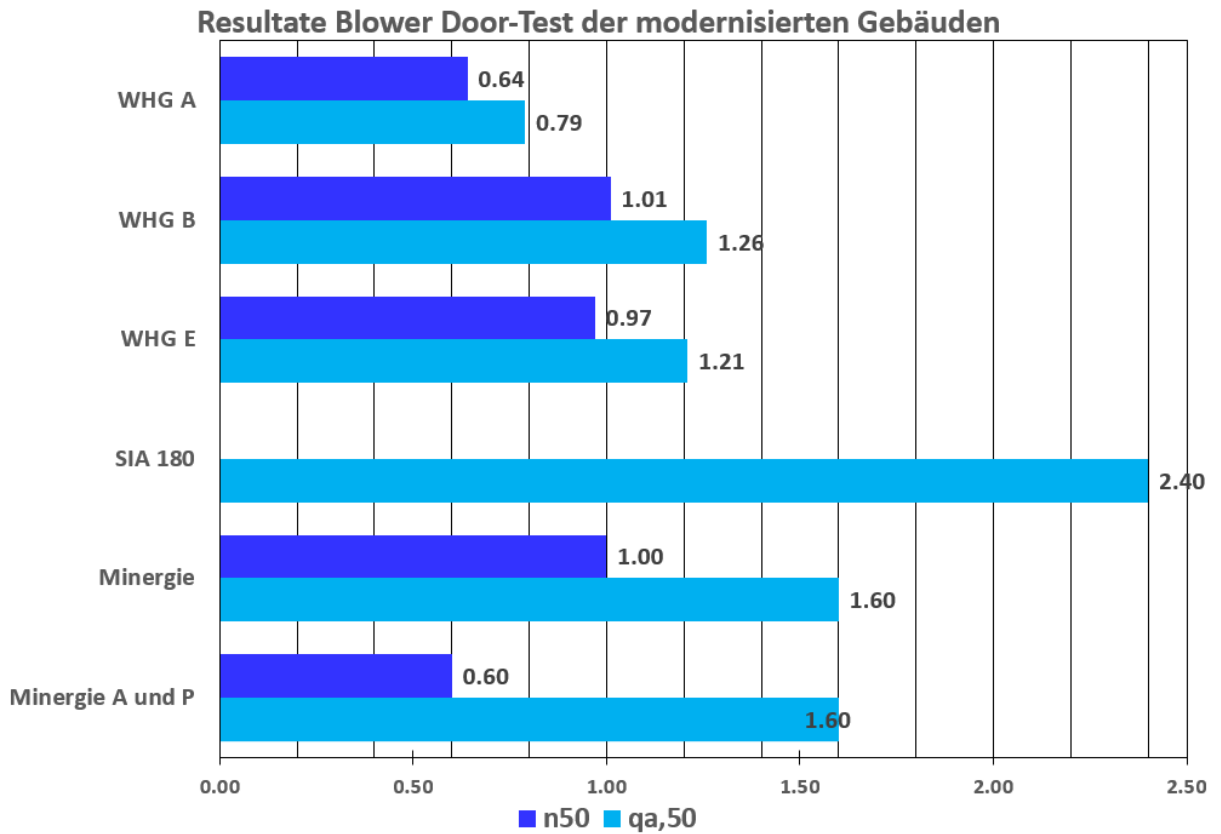


Abbildung 27: Resultate der Blower Door-Tests in den modernisierten Gebäuden mit Grenzwerten SIA 180 und Minergie-Empfehlungen

Die erneuerten Gebäude in Linthal und Genf (Wohnungen A, B und E) erreichen die empfohlenen Werte für Minergie und SIA Grenzwerten für modernisierte Gebäude.

Im Resultat liegen die Luftdichtheitswerte aller Wohnungen (Neubau und modernisiert), gemäss aktueller Norm SIA 180 (2014), deutlich unter dem geforderten Wert für Neubauten.

Somit liegen die gemessenen Luftdichtheiten aller Wohnungen deutlich unter den normativen Anforderungen und die Wohnungen bilden damit eine gute Basis für den Einbau einer Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen in der Gebäudehülle.



7.2.2 Luftleckagen

In Ergänzung zur offiziellen Luftdichtheitsmessung wurden die Wohnungen auf lokale Infiltrationen untersucht. Qualitativ konnten mit Rauch verschiedene Leckagen gefunden werden. Markante Leckagen sind in Kapitel 4 in den Wohnungsgrundrissen blau markiert.



Abbildung 28 Leckage bei einem Fenster

Analog zu den Resultaten des Blower Door-Tests zeigen die Neubauten wenige Leckagen, während die sanierten Gebäude in Genf und Linthal mehrere undichte Stellen aufweisen. Im Folgenden werden die einzelnen Fundorte der Leckagen je Wohnung aufgeführt.

Linthal, Wohnung A:

- Im Reduit strömt Luft durch die Vorwandinstallation der Steigzone.
- Im Bad strömt Luft durch die Abdeckung des Installationsbereichs der sanitären Anlagen.
- Das Schiebefenster im Wohnzimmer schliesst nicht ganz dicht.

Linthal, Wohnung B:

- Das Schiebefenster im Wohnzimmer schliesst nicht ganz dicht.

Malters, Wohnungen C und D

- Die im Blower-Door-Test gemessenen Luftvolumenströme liegen im Mehrfamilienhaus in Malters extrem tief und betragen nur rund die Hälfte der empfohlenen Werte des Minergie-P-Standards für Neubauten. Entsprechend wurden nur marginale lokale Undichtigkeiten gefunden

Genf, Wohnung E:

- Beim Rollladenkasten im Schlafzimmer hat es auf der linken Seite beim Revisionsbrett einen Spalt, durch welchen Luft eindringen kann.
- Beim Rollladenkasten im Schlafzimmer befindet sich beim Gurt auf der rechten Seite eine Leckage.
- Beim Leuchtenanschluss an der Decke im Schlafzimmer strömt Luft durch die Leitungen nach.
- Im Arbeitszimmer beim Fenster unten rechts befindet sich eine Leckage am Rahmenanschluss.
- Bei der Heizungssteigleitung in der Küche hat es oben und unten eine erhebliche Leckage.
- Beim Rollladenkasten im Wohnzimmer befindet sich beim Gurt auf der rechten Seite eine Leckage.

Russin, Wohnung F:

- Beim Fenster in der Küche oben rechts ist die Fensterleiste für die Glasscheibe nicht gut abgedichtet.

Russin, Wohnung G und H:

- In der Wohnung G wurde keine Blower-Door-Test durchgeführt
- Luftleckagen in Wohnung H sind nicht dokumentiert

7.2.3 Volumenstrommessungen Zu- und Abluft

Gleichzeitig mit der Luftdichtheitsprüfung der Gebäudehülle wurden in allen betrachteten Wohnungen die Luftvolumenströme aller Aussenluftdurchlässe und der Abluftstellen mittels Flow-Finder gemessen. Die folgende Grafik zeigt die Messresultate.

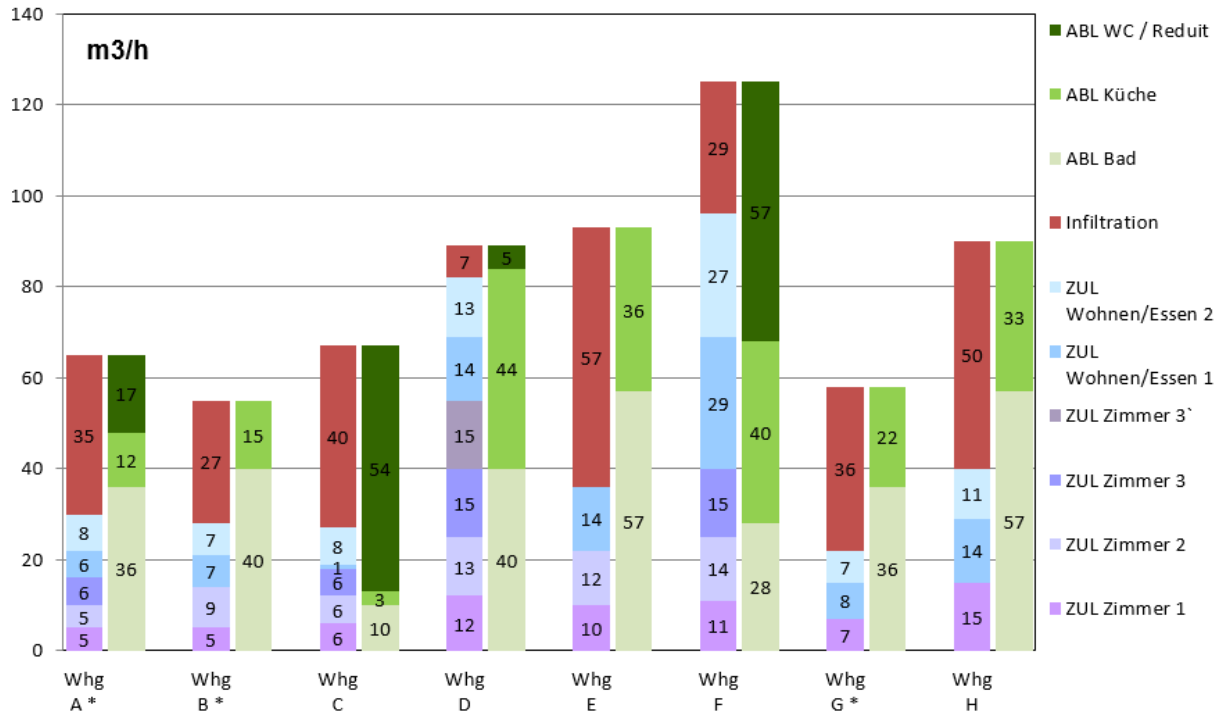


Abbildung 29: Volumenstrommessung der Zu- und Abluftstellen

* Bei einem Luftvolumenstrom von unter 10m³/h lässt sich das verwendete Messgerät Flow-Finder nicht mehr eindeutig einstellen. Aufgrund des Messprinzips kann vermutet werden, dass die wahren Werte in diesem Bereich systematisch über den Messwerten liegen. Bei Messwerten von 7m³/h und weniger kann aber klar davon ausgegangen werden, dass der wahre Wert unter 10m³/h liegt. In den Wohnungen A, B und G dürften demnach die Luftvolumenströme durch die Aussenluftdurchlässe höher liegen als in Abbildung 28 angegeben ist. Entsprechend ergeben sich tiefere Infiltrationswerte als in der Grafik dargestellt. Z.B. kann für Wohnung A geschätzt werden, dass die wahre Infiltration eher zwischen 20 bis 30m³/h liegt als bei 35m³/h. Aufgrund der Messungen kann aber trotzdem gesagt werden, dass in den Wohnungen A, B und G 30 bis 50 % der Aussenluft durch Infiltration nachströmt.

7.2.4 Diskussion

Die Blower-Door-Tests zeigen eine gute Luftdichtheit der Gebäudehüllen. Alle Messwerte liegen unter dem gemäss SIA 180 geforderten Grenzwert für Neubauten. Naturgemäss schneiden die Neubauten besser ab als Bestandsgebäude.

Der im Merkblatt SIA 2023 empfohlene Luftvolumenstrom von 30m³/h pro Zimmer wird zum Zeitpunkt der Messung nur in Räumen mit zwei Aussenluftdurchlässen erreicht (Wohnung D, Malters und Wohnung F, Russin. Der empfohlene Abluftvolumenstrom (40m³/h im Bad, 20m³/h im WC) wird in der Regel erreicht oder überboten.

Tests mit offenen Fenstern in einem Raum und geschlossenen Fenstern in den übrigen Räumen haben gezeigt, dass der Luftvolumenstrom durch die ALD in den Räumen mit geschlossenen Fenstern nahezu zum Erliegen kommt. Nur bei geschlossenen Fenstern ist somit die kontinuierliche Durchlüftung aller Räume gegeben. Tests mit geschlossenen und geöffneten Zimmertüren haben hingegen gezeigt, dass bei geschlossener Zimmertür die Nachströmung durch die ALD unwesentlich beeinflusst wird. Dabei ist

allerdings zu bemerken, dass mit Ausnahme von 2 Zimmern in Wohnung F, die Aussenluftvolumenströme durch die ALD markant unter den Dimensionierungswerten von SIA 2023 oder dem Minergie-Standardwert von 30m³/h liegen.

Die Frage der Grösse der Anteile der Infiltration durch die Gebäudehülle und durch die Innenbauteile einer Wohnung kann nur qualitativ beantwortet werden. Zwar wurden bei allen Bauten Infiltrationen durch Aussenbauteile (vor allem im Bereich der Fensterfälze) und durch Innenbauteile (bei Steigzonen in Küche, Bad und Reduits, bei Sanitär-Vorwandinstallationen und der Elektroverteilung) festgestellt, in Anbetracht des grösseren Ausmasses (Fugenlänge Fensterfalz) kann nur vermutet werden, dass die Infiltration mehrheitlich durch die Aussenbauteile erfolgt. Diese typischen Leckagen an den Fenstern (Fensteranschlag, Fensterfalz, Beschläge, etc.) sollten durch eine regelmässige Kontrolle und Nachstellen der Beschläge minimiert werden.

Nebenbei wurde auch untersucht, ob bei starkem Wind auf der windabgewandten Seite des Gebäudes durch die ALD Luft ausströmt. Bei exemplarischen Volumenstrommessungen mehrerer Aussenluftdurchlässe im Mehrfamilienhaus in Linthal konnte dieses Phänomen aber nicht beobachtet werden.

7.3 Weitere Kurzzeitmessungen

7.3.1 Feinstaub-Messung

In der Wohnung in Oberwenigen wurden Feinstaub-Konzentrationen und exemplarisch die Luftvolumenströme durch die Aussenluftdurchlässe gemessen. Die 4.5-Zimmer-Wohnung, ausgerüstet mit dem Lüftungssystem von Trivent, verfügt über 3 Abluftventilatoren in (Wohn-) Küche und zwei WC-Räumen. Fünf Aussenluftdurchlässe sind jeweils unter den Fenstern eingebaut.

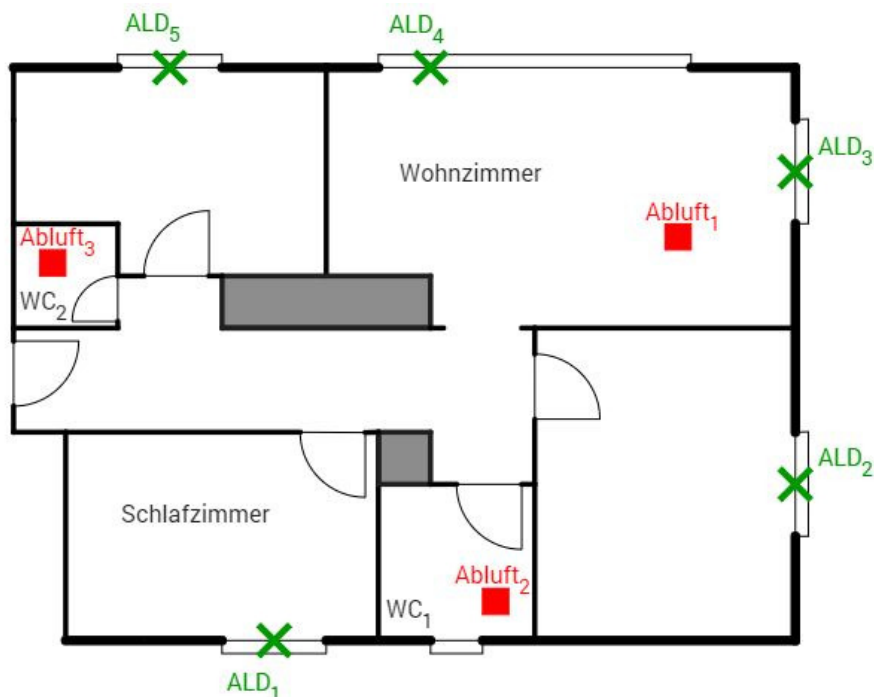


Abbildung 30: schematischer Grundriss der Wohnung in Oberwenigen mit Zu- und Abluftstellen



Einfluss der Filter auf die Luftvolumenströme der ALD

Die Momentanmessung der Luftvolumenströme mit FlowFinder lieferte folgende Resultate:

Messstelle	Luftvolumenstrom (m ³ /h)	
	mit Filter M5	ohne Filter
ALD 1	11	15
ALD 2	14	17
ALD 3	10	13
ALD 4	10	13
ALD 5	12	14
ZUL gesamt	55	72
ABL 1	36	40
ABL 2	25	32
ABL 3	38	38
ABL gesamt	99	110
Differenz (mutmassliche Infiltration)	44	38

Tabelle 10: Luftvolumenströme Zuluft und Abluft, mit M5-Filter und ohne Filter

Die Zuluftmenge über alle Aussenluftdurchlässe liegt mit 55m³/h um 24% tiefer als bei der Messung ohne Filter (72m³/h), während die Abluftmenge mit Filtern, mit 99m³/h nur ca. 10% tiefer liegt als ohne Filter (110m³/h).

Feinstaub-Messung der Firma BUC

Die Firma BUC lieferte folgende Messresultate der Feinstaub-Konzentrationen für die Partikelgrössen PM10, 2.5 und 1µm/m³:

Messpunkte	Aussen Aussenluft	Schlafzimmer Zuluft	Schlafzimmer Raumluft	Wohnzimmer Raumluft
Messung mit F5 Filter am 15. Juli 2015				
Feinstaubklassen	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
PM ₁₀	5.2	5.7	9.5	9.6
PM _{2.5}	4.8	5.1	7.6	5.2
PM ₁	3.9	3.9	5.2	5.1
Messung ohne F5 Filter am 16. Juli 2015				
Feinstaubklassen	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
PM ₁₀	6.3	6.3	7.2	15.3
PM _{2.5}	6.0	6.0	6.2	13.1
PM ₁	5.2	5.1	4.9	8.0

Tabelle 11: Resultate Feinstaub-Messung



Schlussfolgerungen der Firma BUC

«Die Partikelkonzentrationen liegen in der Zu- und Raumlufte in einem niedrigen Bereich und erfordern aus gesundheitlicher Sicht kein Handlungsbedarf. Der zeitweise eingesetzte F5 Filter konnte jedoch die Abscheidung von Partikeln gegenüber der Messung ohne Filter nicht relevant erhöhen. Aufgrund des eingesetzten F5 Filters wäre dies besonders für die grösseren Partikel (PM₁₀) zu erwarten.

Im Schlafzimmer sowie im Wohnzimmer führen neben der Aussenluft weitere Quellen wie Aktivitäten im Raum und die Aufwirbelung von Staubdepots zu vergleichsweise höheren Partikelkonzentrationen. Hierbei handelt es sich um eine für Innenräume typische Beobachtung.»

«Zur gesundheitlichen Bewertung der Innenraumlufte können die von der WHO festgelegten Luftgüteleitwerte herangezogen werden. Der von der WHO vorgeschlagene Jahresmittelwert liegt für die Fraktion PM₁₀ bei 20 µg/m³ und für die Fraktion PM_{2.5} bei 10 µg/m³, die 24-Stunden-Mittelwerte betragen 50 µg/m³ (PM₁₀), bzw. 25 µg/m³ (PM_{2.5}). Letztere Werte werden auch als Orientierungswerte für die Innenraumlufte empfohlen.

Die Messserie zeigt durchgängig Werte unterhalb dieser Richt- und Orientierungswerte. Die nachgewiesenen Konzentrationen können als niedrig eingestuft werden.»

Kommentar zu den Resultaten

Die Messungen mit Filter wurden bewusst mit F5 durchgeführt. Dies stellt ein Kompromiss dar, zwischen Druckabfall und einer nicht ganz optimalen Feinstaubfilterung. Um den Feinstaub optimal zu reduzieren wären F7 bis F9 Filter notwendig, jedoch führen diese bei den untersuchten Lüftungsanlagen zu unzulässig hohen Druckabfällen.

Fast alle gemessenen Feinstaub-Konzentrationen im Innenraum liegen gleich hoch oder höher als in der Aussenluft. Demnach müsste in der Wohnung Feinstaub emittiert werden. Während die Konzentrationen beim Aussenluftdurchlass (Zuluft) im Schlafzimmer in der Grössenordnung gleich wie die Werte aussen erscheinen, steigen sie in der Wohnzimmer-Raumlufte deutlich an. Folglich war der Feinstaubgehalt PM₁₀ der Wohnzimmer Raumlufte ca. 85% höher als in der Zuluft.

Am Tag 2 der Messung (ohne Filter) wurden in der Aussenluft um 20 bis 33% höhere Konzentrationen gemessen im Vergleich zur Messung an Tag 1 (mit M5-Filter).

Der Vergleich der Raumlufte-Werte im Schlafzimmer mit den Zuluft-Werten zeigt bei der Messung mit Filter einen grösseren Anstieg als bei der Messung ohne Filter. Jedoch sind die im Wohnzimmer gemessenen Feinstaub-Konzentrationen mit Filter tiefer als ohne Filter.

Aus diesen Messungen Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Filter in den Aussenluftdurchlässen zu ziehen ist kaum möglich, unter anderem da generell tiefe Werte vorliegen und die Nutzung der Wohnung nicht explizit abgeklärt werden konnte.



7.3.2 VOC-Messung

Am 14. Juli 2015 erfolgte die VOC-Messung im Wohnzimmer der Wohnung D in Malters.

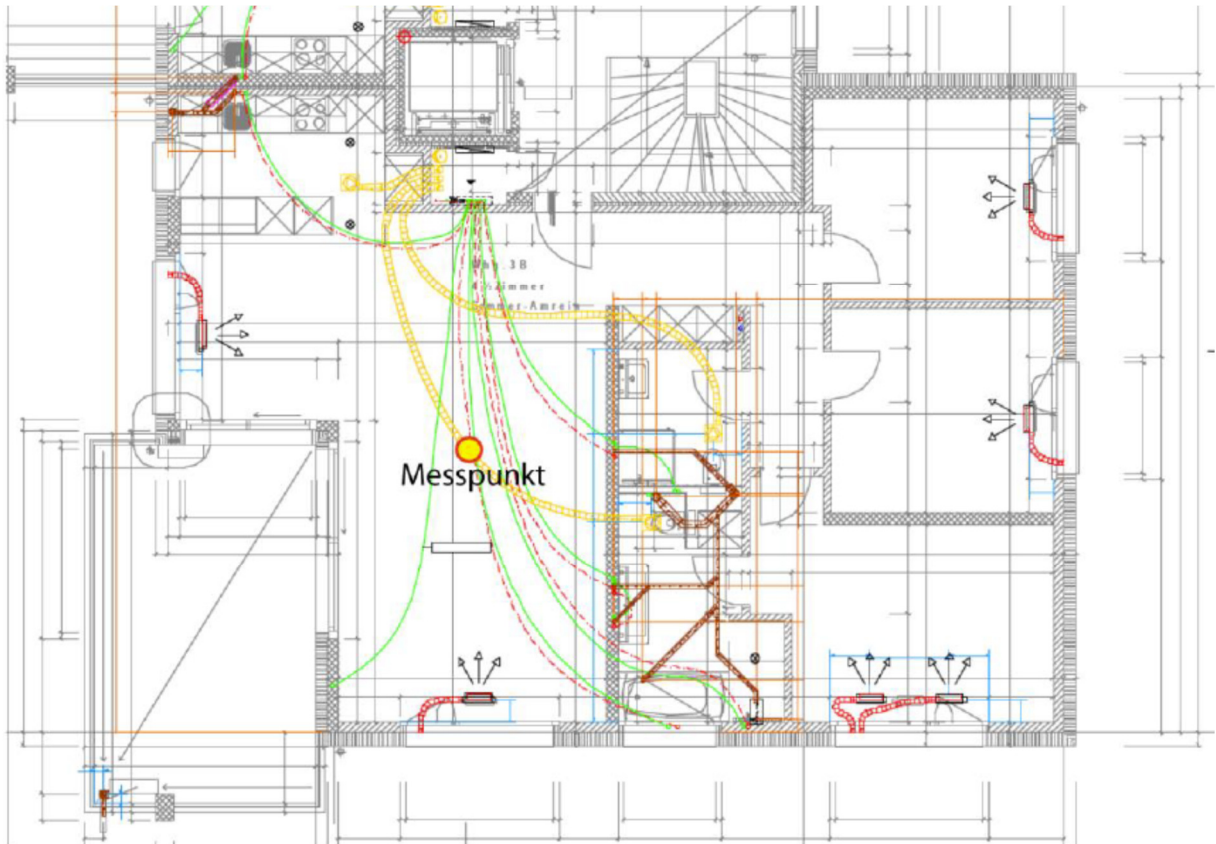


Abbildung 31: Grundriss 4.5Zi-Wohnung in Malters mit Messpunkt VOC

Der Bericht der Firma GanzKlima liefert folgende Resultate:



Stoffgruppe	Stoff	Wohnzimmer	Wohnzimmer
		RLT-Anlage ausser Betrieb	RLT-Anlage in Betrieb
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Alkohole	1-Butanol	19	22
Alkohole	Benzylalkohol	12	62
	Summe Alkohole	31	84
Aromat	1,2,4-Trimethylbenzol	13	29
Aromat	Styrol	11	20
Aromat	m/p-Xylol	n.n.	11
	Summe Aromaten	24	60
Terpene	3-Caren	45	35
Terpene	Limonen	17	n.n.
Terpene	Alpha-Pinen	73	54
Terpene	Beta-Pinen	18	13
	Summe Terpene	153	102
Aldehyd	n-Hexanal	17	12
Aldehyd	n-Nonanal	28	23
Aldehyd	Benzaldehyd	18	24
	Summe Aldehyde	63	59
Sonstige	Hexamethylcyclotrisiloxan	n.n.	10
Sonstige	Decamethylcyclopentasiloxan	25	32
Sonstige	Kohlenwasserstoffgemisch	400	400
	TVOC	700	750
	Ausserhalb VOC-Bereich	n.n.	n.n.
	TVOC gemäss VDI	700	750

Tabelle 12: Resultate VOC-Messung

Die flüchtigen organischen Verbindungen werden einerseits anhand der Summenkonzentration (TVOC), und andererseits anhand der Einzelstoff-Konzentrationen beurteilt. Der Messwert TVOC in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt bei eingeschalteter Lüftungsanlage um $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher als bei der Messung ohne Lüftung.

Bei 5 Stoffen wird eine Erhöhung bei eingeschalteter Lüftung festgestellt (Benzylalkohol, 1,2,4-Trimethylbenzol, Styrol, Xylol und Hexamethylcyclopentasiloxan). Eine klare Senkung der Konzentration bei eingeschalteter Lüftung wurde nur bei den Terpene registriert. Beim Kohlenwasserstoffgemisch, mit $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dem höchsten Anteil, bleibt die Konzentration unverändert.

Veränderung der VOC-Konzentrationen bei laufender RLT-Anlage

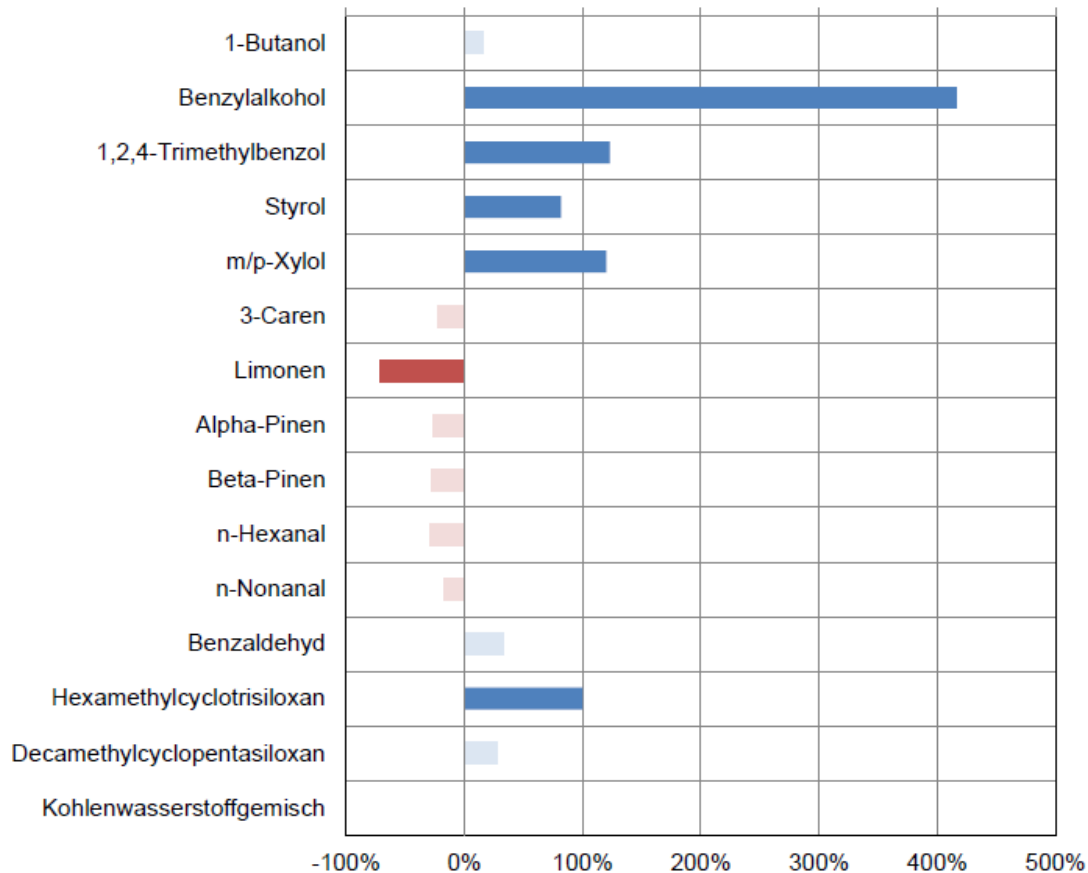


Abbildung 32 Veränderung der VOC-Konzentration bei laufender Abluftanlage

Schlussfolgerungen der Firma GanzKlima

«In der Raumluft der Wohnung in Malters werden keine auffälligen chemischen Verbindungen nachgewiesen. Alle Stoffe liegen unterhalb der entsprechenden Richtwerte.

Grundsätzlich hat der Betrieb der RLT-Anlage wenig Einfluss auf die VOC-Konzentrationen im untersuchten Wohnzimmer.

Bei 5 Stoffen ist eine Erhöhung durch den Betrieb der Anlage feststellbar. Die Konzentrationen sind mit maximal $62\mu\text{g}/\text{m}^3$ allerdings als tief zu bewerten. Eine Verminderung der Konzentration bei Betrieb der Anlage wird nur für die Verbindung Limonen nachgewiesen.»

7.3.3 Tracergas-Messung

Infiltration durch Wohnungstüre

Die Tracergas-Messung wurde im Mehrfamilienhaus in Malters, Wohnung D durchgeführt. Um die Eingangstüre auf Undichtheiten zu untersuchen, wurde die Luft im Treppenhaus mit Spurengas angereichert. Anschliessend wurden im Treppenhaus sowie im Eingangsbereich der Wohnung, hinter der geschlossenen Eingangstüre die SF_6 -Konzentration gemessen. Diese Art der Messung lässt keine genaue Bestimmung des Infiltrationsvolumenstroms über die Eingangstüre zu, dient jedoch einer qualitativen Aussage.



Bei einer Konzentration der Treppenhausluft von 37.6 ppm wurde in der Wohnung im Eingangsbereich eine Konzentration von 19 ppm registriert. Damit sichergestellt werden konnte, dass während der Messung kein SF₆ über die Aussenluft in die Wohnung eingedrungen ist, wurden an den Aussenluftdurchlässen Messstellen platziert. Sämtliche Messwerte an den Durchlässen wiesen Konzentrationen kleiner als 0.5 ppm auf, was gegen eine Aufdosierung über die Aussenluft spricht. Wie zu erwarten war findet, bei normalem Betrieb der Abluftanlage, eine gewisse Infiltration über die Eingangstüre statt.

Lokaler Luftwechsel

Zur Bestimmung der lokalen Luftwechselzahlen wurden an verschiedenen Standorten im Wohn- und Essbereich Messstellen platziert. Die Abgabe des Spurengases erfolgte zentral im Wohnzimmer. Die nachfolgende Abbildung zeigt Dosier- und Messstellen:

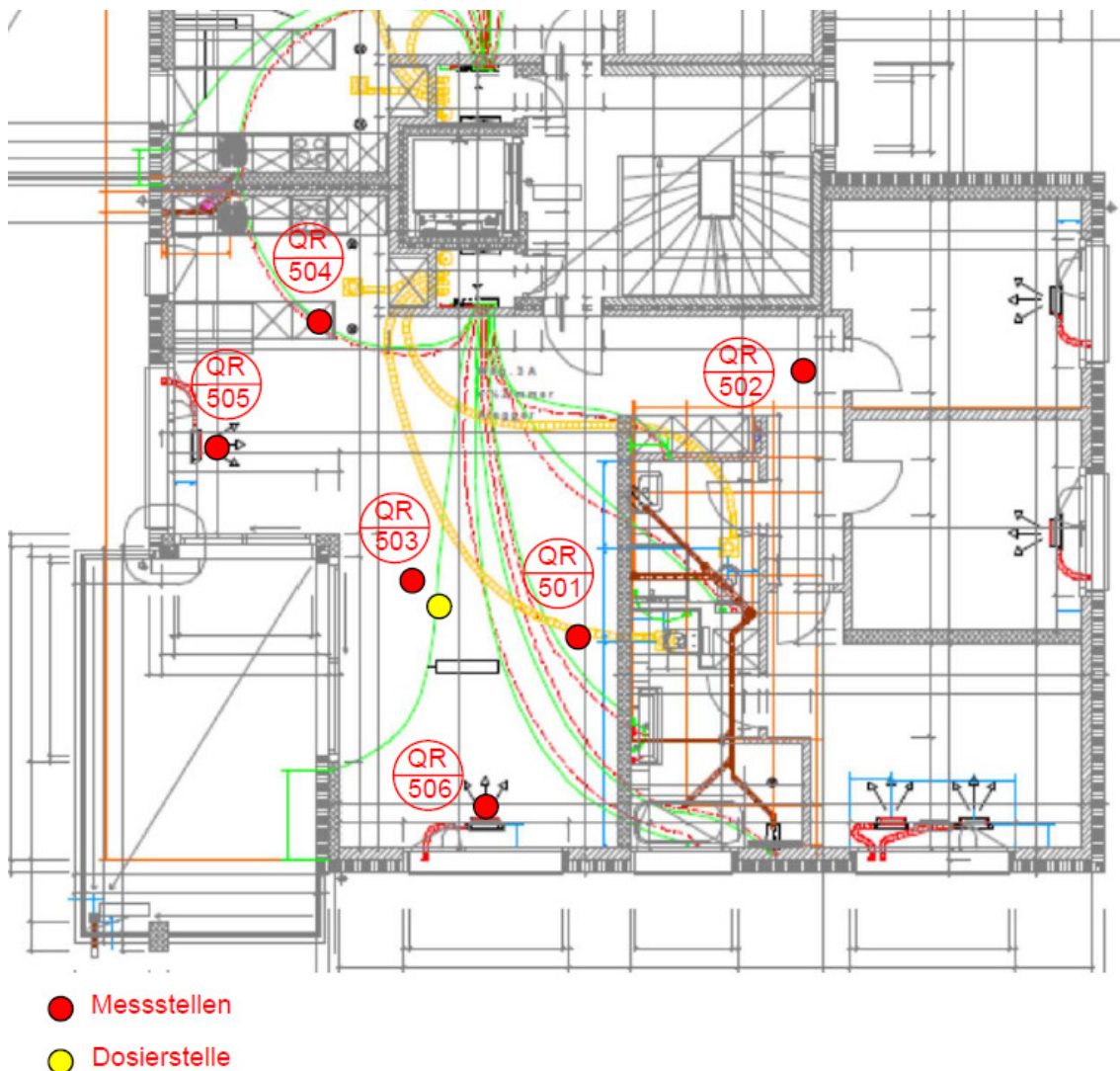


Abbildung 33: Grundriss 4.5-Zimmer-Wohnung in Malers mit Messstellen der Tracergas-Messung

An der Dosierstelle wurde die Raumluft im Wohnzimmer mittels konstanter Dosierung auf eine Konzentration von ungefähr 38 ppm gebracht. Nach dem Erreichen der Sollkonzentration im ganzen Raum wurde die Dosierung gestoppt und durch die Lüftungsanlage wurde die belastete Raumluft anschliessend allmählich ausgetauscht. Über mehr als drei Stunden wurde die SF₆-Konzentration an den Messstellen laufend erfasst.



Die Abklingkurven in nachfolgender Abbildung zeigen, wie die Gaskonzentration mit eingeschalteter Abluftanlage an den Messstellen im Raum sinkt. Die Vergleichsmessungen an 2 ALD zeigen nahezu gleichbleibende Gaskonzentrationen.

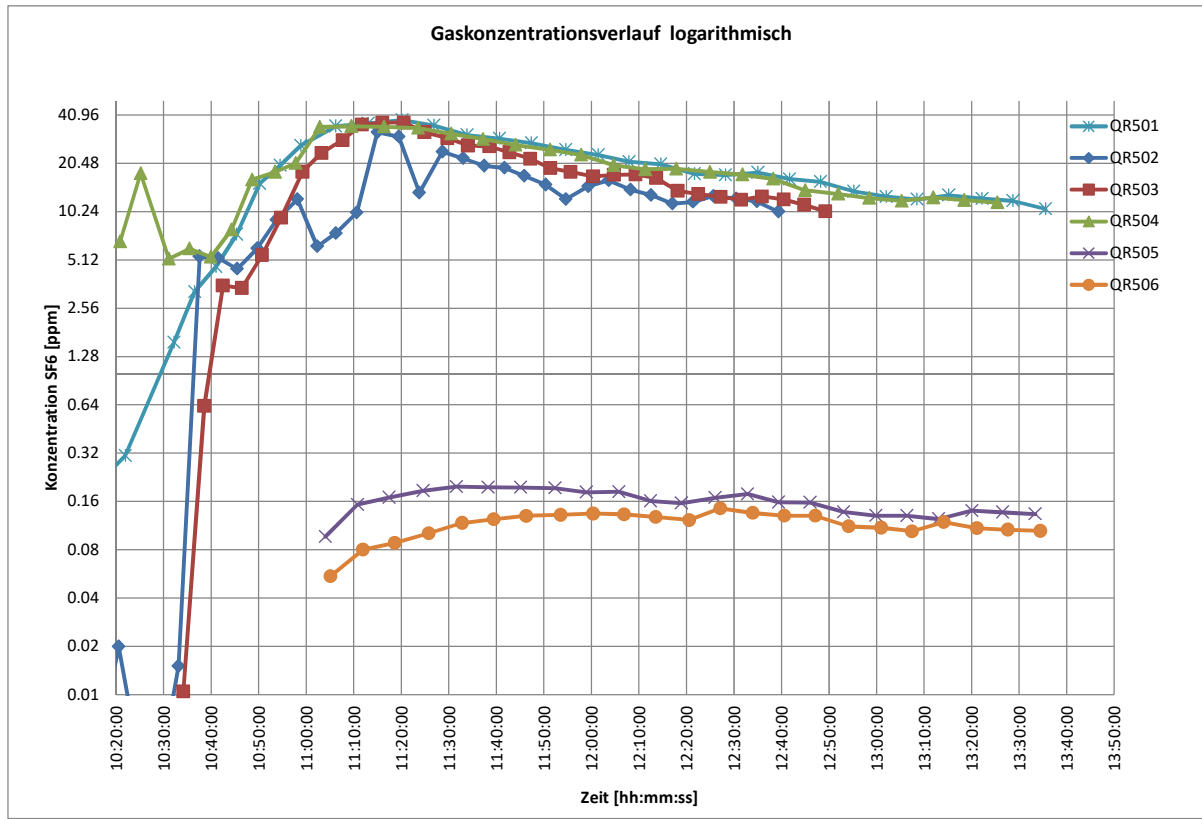


Abbildung 34: Logarithmische Darstellung des Gaskonzentrationsverlaufs

Mit folgendem Rechnungsansatz können die lokalen Luftwechselraten berechnet werden:

$$n = \frac{\ln c(\tau_0) - \ln c(\tau_1)}{\tau_1 - \tau_0}$$

- n: 1/h Luftwechselrate
- c: ppm SF₆-Konzentration
- τ₀, τ₁: h Zeitpunkt der ersten resp. letzten Probenahme

Die Berechnung lieferte folgende Resultate:

Messstelle	Luftwechselrate /(1/h)
QR 501	0.70
QR 502	0.72
QR 503	0.88
QR 504	0.66

Tabelle 13: Luftwechselraten

Kommentar zur Messung (HSLU)

«Die Resultate deuten auf eine homogene Luftverteilung im Raum hin. Die unterschiedlichen Luftwechselzahlen der beiden Messstellen QR 501 und QR 503 könnten mit der Raumgeometrie und der Möblierung in Verbindung gebracht werden. Das beinahe raumhohe Regal gegenüber der Haupteingangstüre könnte somit die Raumströmung auf der Balkonseite verstärken und die geringe Differenz der Luftwechselzahlen ausmachen.»



7.4 Langzeitmessungen: Raumklima

Die Langzeitmessungen, welche von Juni 2014 bis Juli 2015 liefen, haben eine grosse Menge auswertbarer Daten geliefert. Die Mittelwerte der durchgeführten Langzeitmessungen zu Temperatur, Feuchtigkeit und CO₂ befinden sich in der nachfolgenden Tabelle und dienen als Überblick. Die detaillierteren Auswertungen der Resultate werden in den folgenden Kapiteln wiedergegeben.

Die CO₂-Messungen in den Schlafzimmern wurden zudem spezifisch auf die Nachtwerte (zwischen 22.00 – 06.00 Uhr) ausgewertet. Die Mittelwerte sind in den Tabelle 16 dargestellt.

		Wohnen / Essen						Schlafzimmer					
		Sommer			Winter			Sommer			Winter		
		Temp. (°C)	Feuchte (%)	CO ₂ (ppm)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	CO ₂ (ppm)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	CO ₂ (ppm)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	CO ₂ (ppm)
Linthal	Whg A	21.4	51	546	23.1	32	631	19.0	57	502	17.7	39	553
	Whg B	21.8	50	630	22.3	34	644	21.1	54	888	21.3	38	920
Malters	Whg C	23.3	45	486	21.8	39	467	24.1	43	567	22.1	38	568
	Whg D	25.0	43	545	23.7	41	598	24.9	43	613	23.1	41	731
Genf	Whg E	23.5	48	784	19.3	51	858	24.2	46	840	21.7	46	993
Russin	Whg F	23.4	54	844	22.9	48	1088	23.0	47	651	22.8	40	801
	Whg G	23.4	45	603	22.3	40	669	22.5	43	599	21.5	42	709
	Whg H	23.0	44	512	20.6	40	536	22.7	46	511	20.5	41	536

Tabelle 14: Mittelwerte der Langzeitmessungen (Temperatur, Feuchte, CO₂)

		Küche				Bad 1				Bad 2			
		Sommer		Winter		Sommer		Winter		Sommer		Winter	
		Temp. (°C)	Feuchte (%)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	Temp. (°C)	Feuchte (%)	Temp. (°C)	Feuchte (%)
Linthal	Whg A	Küche/Wohnen/Essen in einem Raum.				21.3	54	23.7	35	-	-	-	-
	Whg B					22.3	54	23.6	34	-	-	-	-
Malters	Whg C	Messresultate: siehe "Wohnen/Essen"				24.0	48	23.1	40	-	-	-	-
	Whg D					25.0	45	23.7	43	-	-	-	-
Genf	Whg E	24.7	45	21.5	44	24.3	51	22.6	47	-	-	-	-
Russin	Whg F	23.4	52	22.6	48	24.3	48	24.3	41	24.0	47	23.7	41
	Whg G	23.4	44	22.2	39	23.1	46	22.3	40	-	-	-	-
	Whg H	23.1	45	20.9	39	23.6	45	21.7	39	-	-	-	-

Tabelle 15: Mittelwerte der Temperaturen und Raumluftfeuchten in Küche und Bad



		Schlafzimmer						
		Sommer			Winter			
		CO ₂ Max	CO ₂ Min	CO ₂ Mittel	CO ₂ Max	CO ₂ Min	CO ₂ Mittel	
Linthal	Whg A	1149	367	535	**4192	466	1138	Lüftungssystem Trivent
	Whg B	**5238	422	1182	1235	375	641	
Malters	Whg C	1310	377	698	1222	392	645	Lüftungssystem Aereco
	Whg D	1258	*314	581	1804	*320	633	
Genf	Whg E	1507	439	794	1925	482	1087	Lüftungssystem Aereco
Russin	Whg F	**3511	392	756	**3565	403	926	
	Whg G	1549	352	608	1723	410	806	
	Whg H	1415	404	585	1728	392	592	

Tabelle 16: Mittel- / Max- / Minimalwerte der CO₂ Belastung in der Nacht in den Schlafzimmern

* Messwerte unter dem atmosphärischen Standardwert von 430ppm sind eher unüblich. Es kann jedoch sein, dass einzelne Baustoffe einen gewissen Teil des CO₂ binden (Bsp.: Beton) oder dass es sich um Messfehler handelt.

** Die vereinzelt und kurzzeitig auftretenden Extremwerte der CO₂-Konzentration in den Wohnungen A, B und F sind nutzungsbedingt und entstammen nicht von einem ungenügenden Lüftungskonzept.

7.4.1 Messung der Raumtemperaturen

Die Auswertung der Langzeitmessdaten hat gezeigt, dass ein Grossteil der Wohnungstemperaturen im Zielbereich der Norm liegen. Die Wohnung A weicht am weitesten von der Norm ab. Da die gemessenen Temperaturwerte der Wohnung B, welche sich im gleichen Gebäude befindet, jedoch im Zielbereich der Norm zu finden sind, ist davon auszugehen, dass die tiefen Temperaturen von den Bewohnern gewollt sind. Es wird demnach nicht oder nur wenig geheizt. In normalen Sommerwochen bewegen sich die Raumtemperaturen ebenfalls im Zielbereich. Es muss jedoch festgehalten werden, dass in sehr warmen Perioden, wie z.B. im Juli 2015, der Zielbereich verlassen wurde und zu hohe Temperaturen gemessen wurden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieses Problem bei allen Wohnungen und Häusern in der Schweiz ohne aktive Kühlanlage auftritt.

Die Fensterlüftungsvorgänge (welche über eine längere Zeit erfolgen) können in den einzelnen Wohnungen deutlich abgelesen werden (siehe Abbildung 29). Bei diesen Vorgängen sinkt die Temperatur kurz ab und verlässt den Zielbereich. Anschliessend steigen die Temperaturen wieder in den Zielbereich, weshalb diesen Vorgängen zur Beantwortung der Untersuchungsfrage keine Beachtung geschenkt werden muss.

Abschliessend kann (in Bezug auf die vorgegangenen Ausführungen) festgehalten werden, dass sich die Raumtemperaturen unter Einsatz einer Abluftanlage im Zielbereich der SIA Norm 382/1 bewegen können. Diese Aussage wird auch von den nachfolgenden Auswertungen gestützt, welche aufzeigen, wie die Temperaturverteilung in den Schlaf- und Wohnzimmern in den einzelnen Wohnungen im Winter- bzw. im Sommerhalbjahr ist.

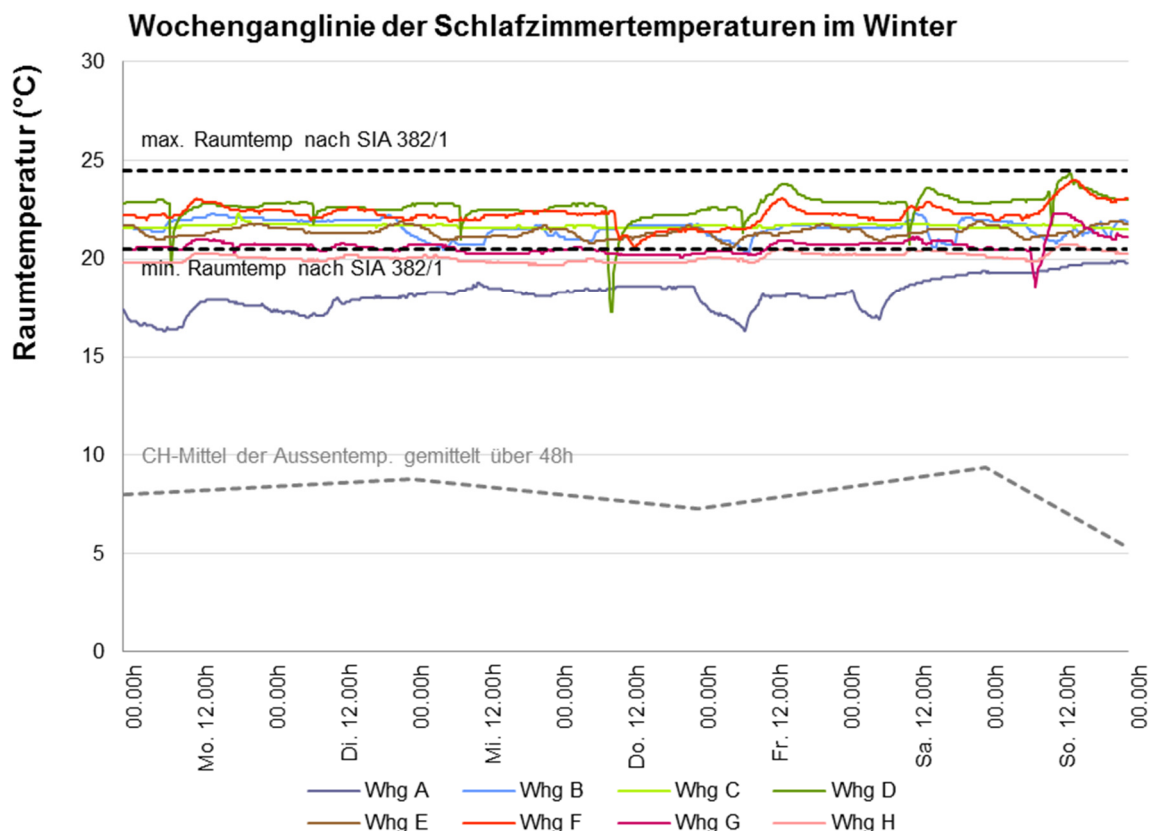


Abbildung 35: Wochenganglinien der Temperaturen vom 15.12.2014 bis 21.12.2014

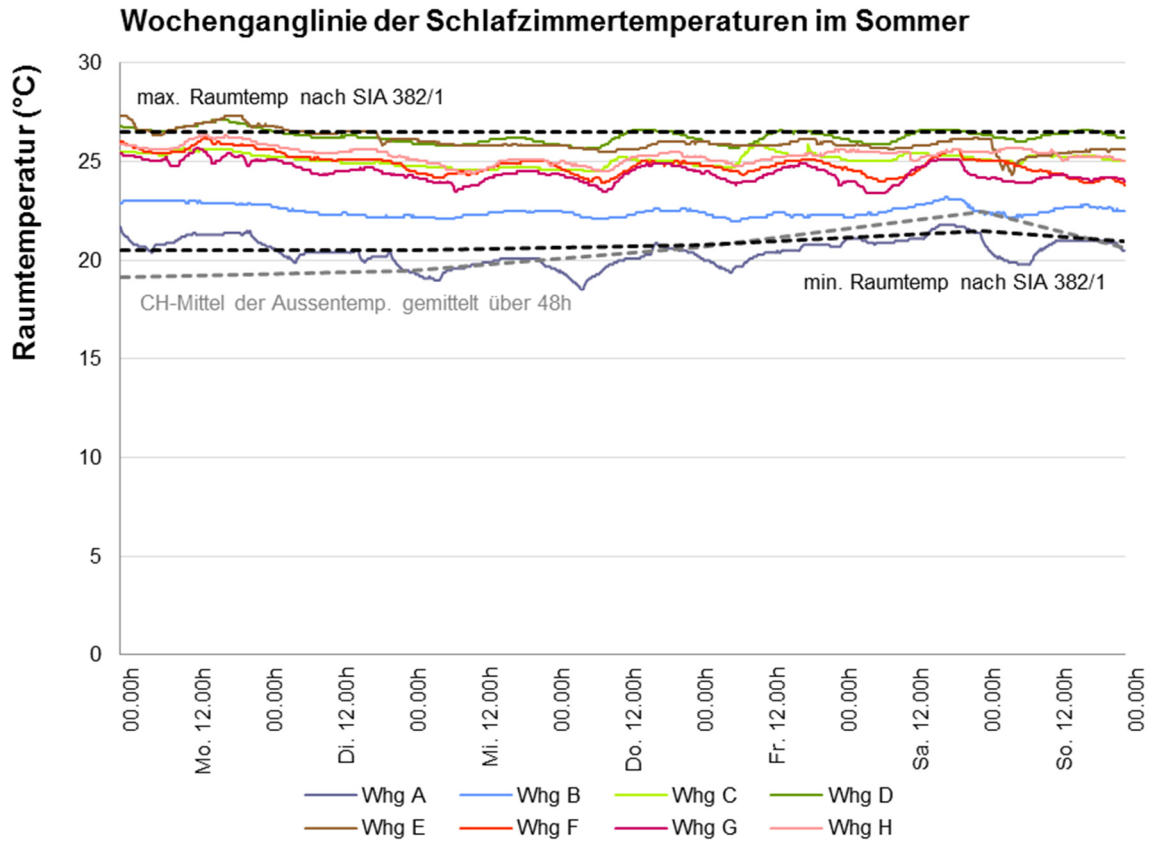


Abbildung 36: Wochenganglinien der Temperaturen vom 08.06.15 bis 14.06.15

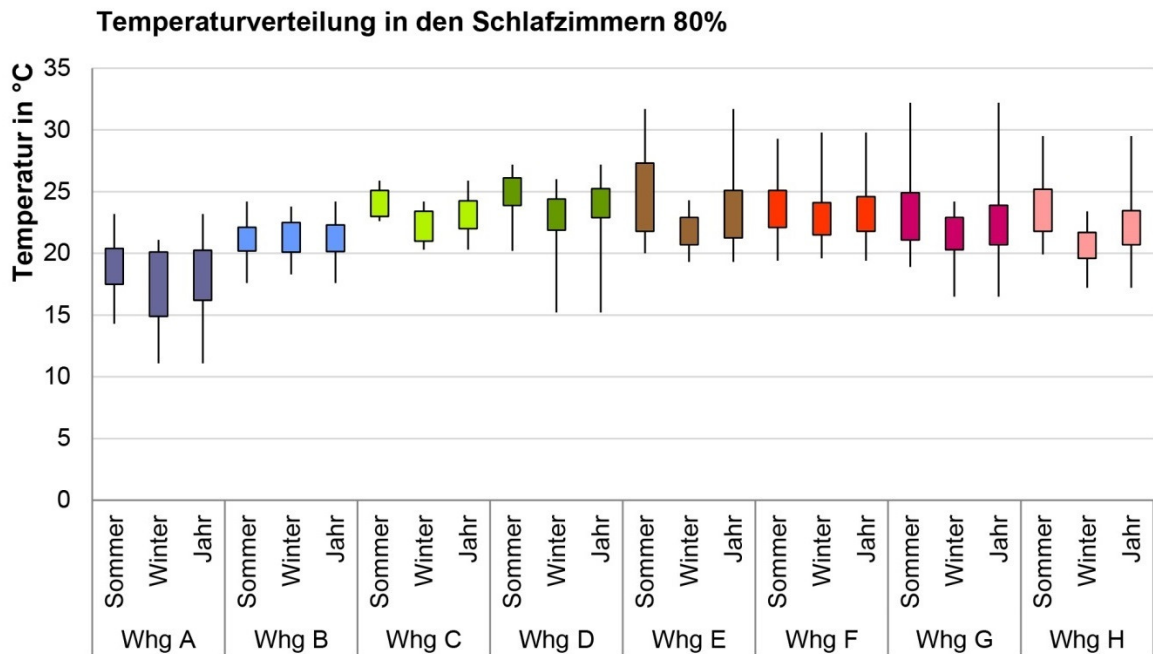


Abbildung 37: Temperaturverteilung in den einzelnen Schlafzimmer

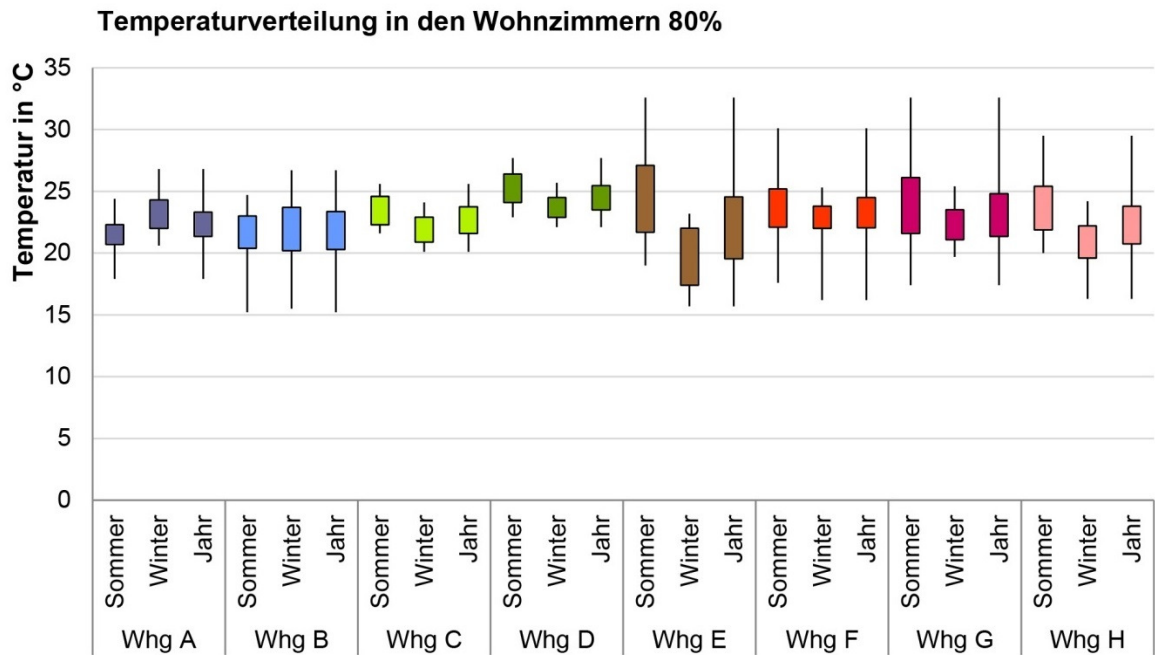


Abbildung 38: Temperaturverteilung in den einzelnen Wohnzimmer

Die tiefen Temperaturen im Wohnzimmer der Wohnung E (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38) sind wohl bewusst durch den Bewohner herbeigeführt, indem ein Fenster über längere Zeit offen steht oder die Heizung sehr tief eingestellt, wurde. Die Schlafzimmer Temperaturen bewegen sich in einem normalen Bereich, weshalb diese Auffälligkeit als nicht beachtenswert eingestuft wird.



7.4.2 Messung der Raumluftfeuchtigkeit

Die Mehrheit der Wohnungen zeigen keine Auffälligkeiten bezüglich der relativen Luftfeuchtigkeit. Die beiden Wohnungen A und B, welche geografisch höher gelegen sind, weisen im Winter häufig tiefe Feuchtigkeitswerte auf. Im Wohnzimmer ist es über das ganze Jahr gemittelt so trocken, dass die Zielwerte der SIA Norm 180 nicht eingehalten werden. In den Schlafzimmern dieser beiden Wohnungen ist zudem während den Sommermonaten eine ungewöhnlich hohe Anzahl an Messwerten verzeichnet worden, bei welchen die rel. Raumluftfeuchtigkeit höher als 70% war.

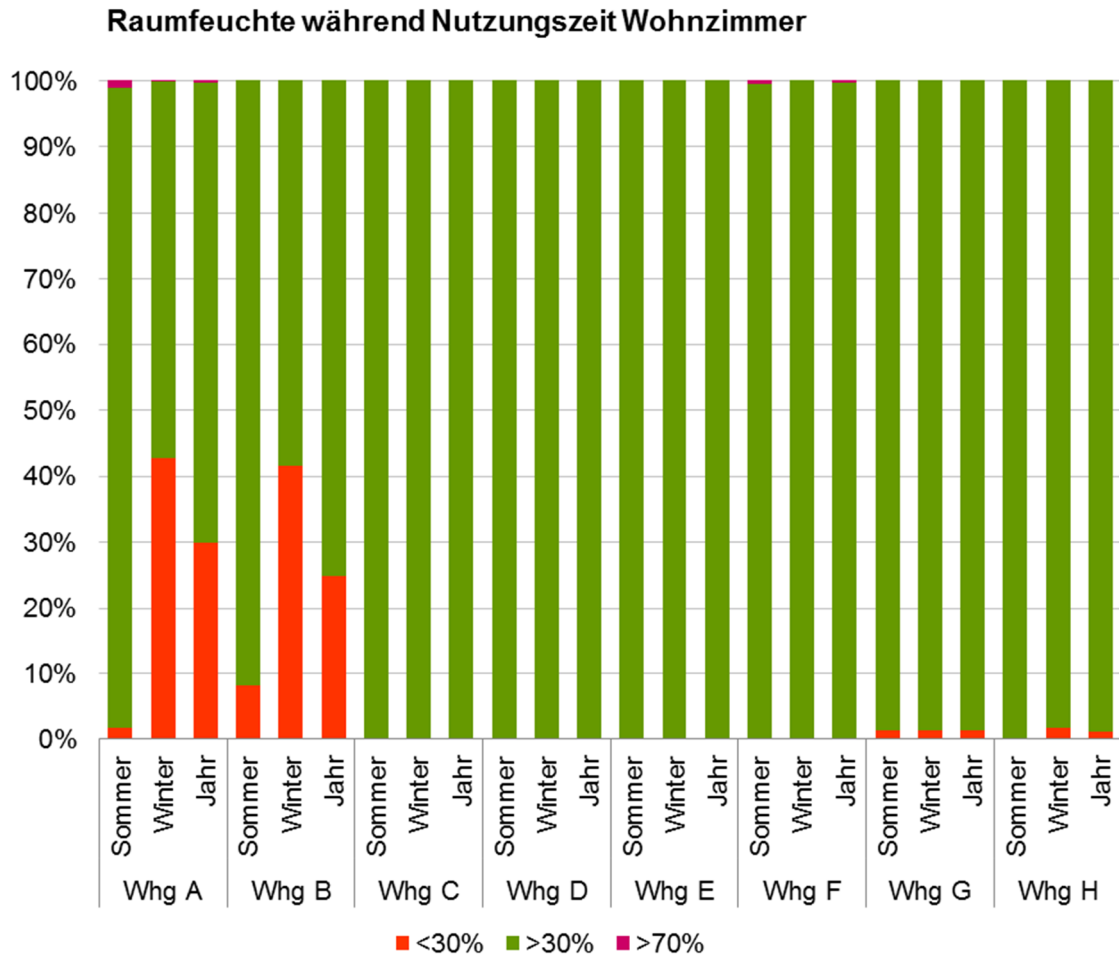


Abbildung 39: Prozentuale Verteilung der rel. Raumluftfeuchtigkeit während der Nutzungszeit des Raumes



Raumfeuchte während Nutzungszeit Schlafzimmer

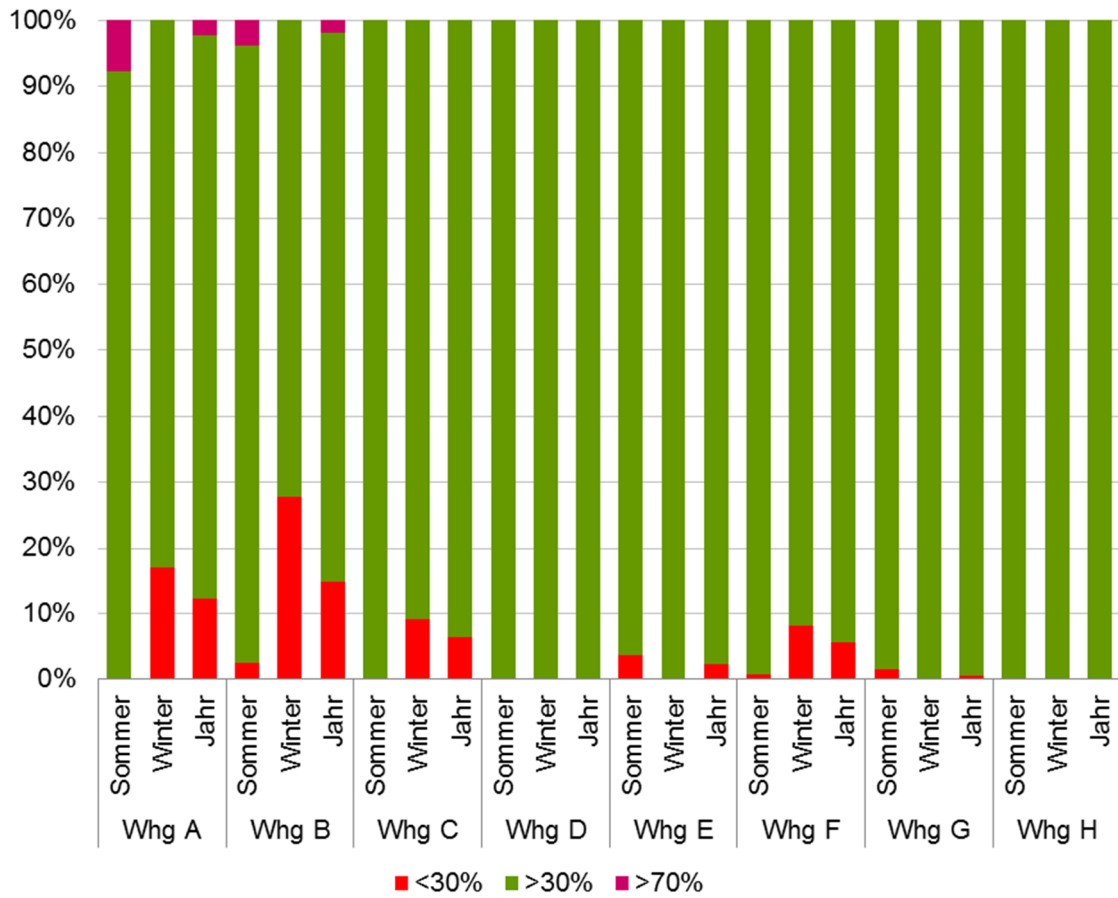


Abbildung 40: Prozentuale Verteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während der Nutzungszeit des Raumes

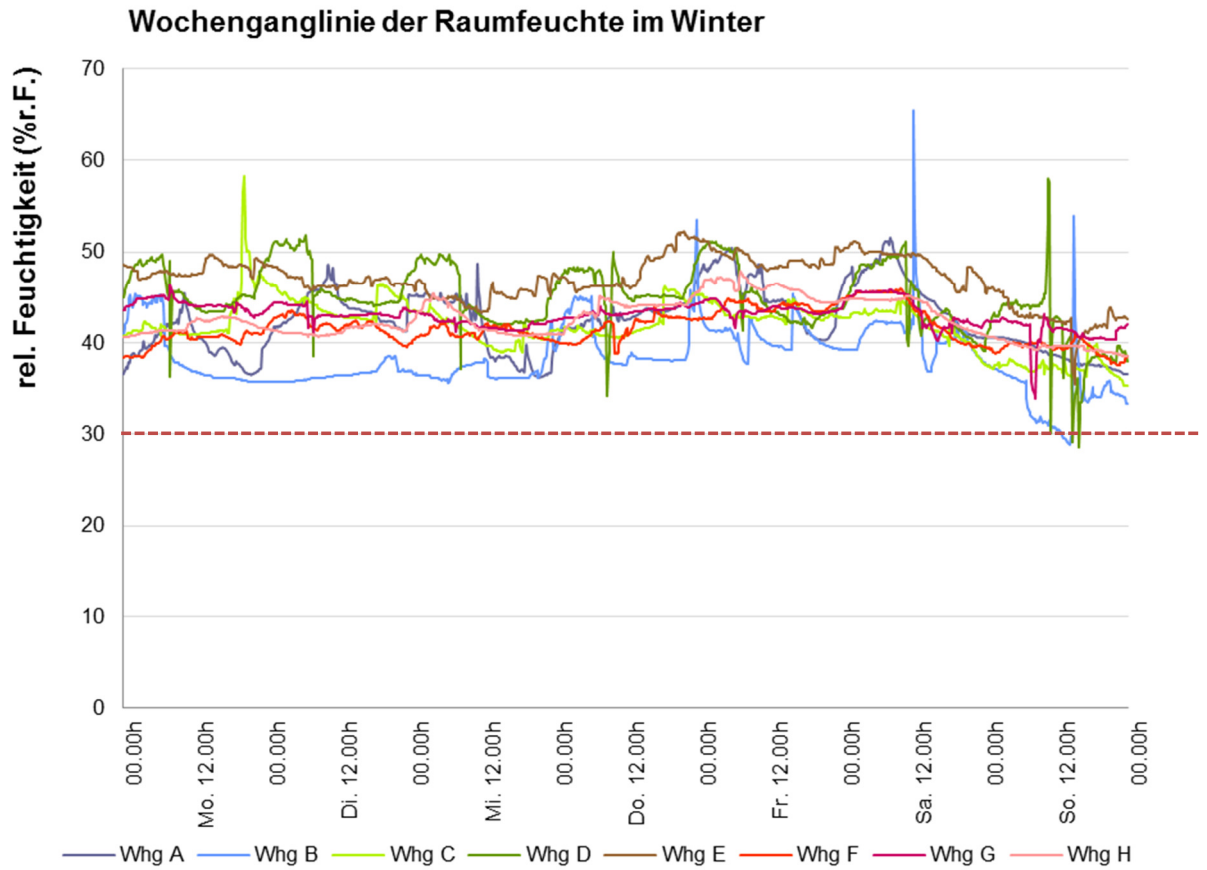


Abbildung 41: Wochenganglinie der Schlafzimmer Feuchtigkeit vom 15.12.2014 bis 21.12.2014

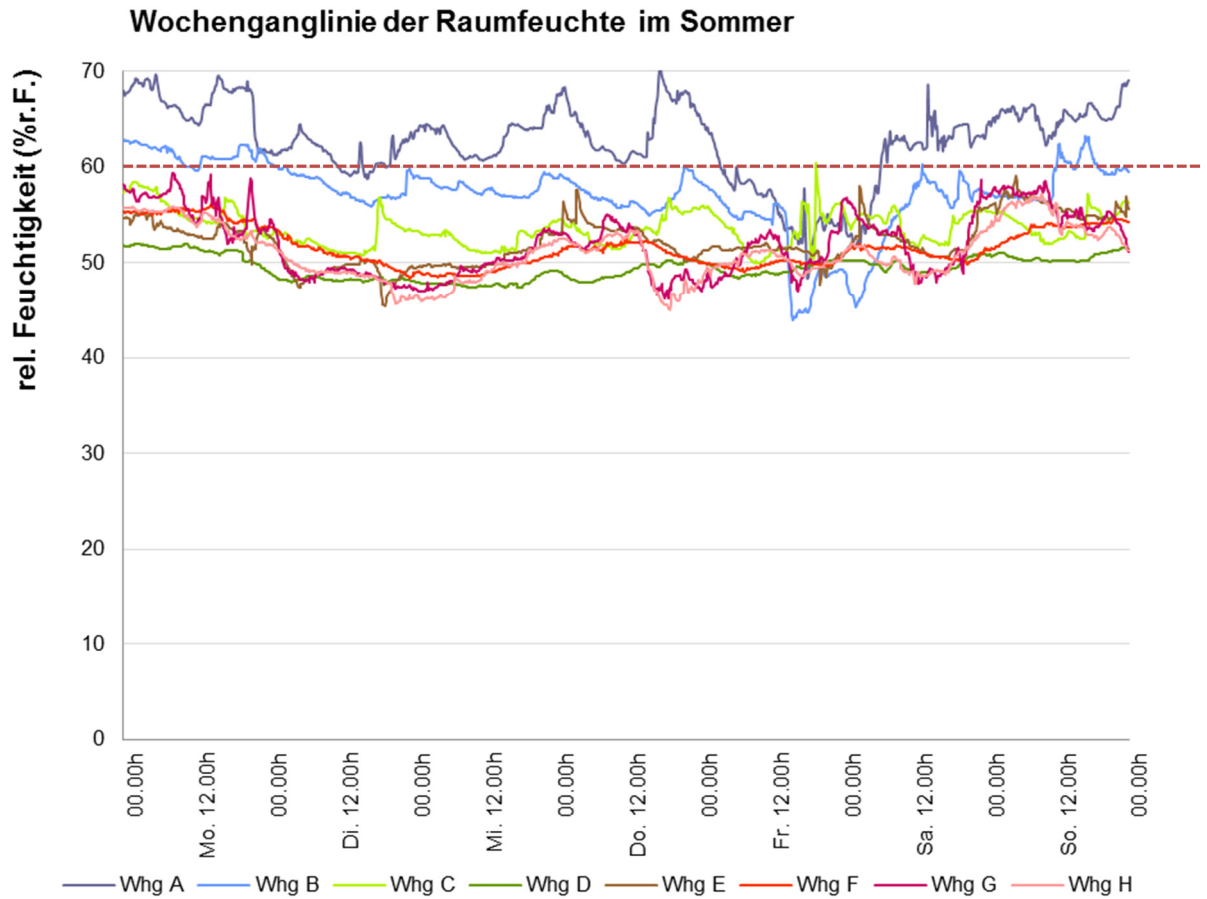


Abbildung 42: Wochenganglinie der Schlafzimmer Feuchtigkeit vom 08.06.2015 bis 14.06.2015

7.4.3 Messung der CO₂-Konzentrationen

Die CO₂-Konzentration liegt in den Wohn- und Schlafräumen der untersuchten Wohnungen während über 90% der Zeit unter dem Wert von 1400 ppm. Auffällig verhält sich die Raumluftqualität im Schlafzimmer der Wohnung B, bei welcher während ca. 15% der Zeit eine Konzentration von über 1400 ppm erreicht wird. Die Wohnung F weist im Wohnzimmer ebenfalls erhöhte CO₂-Werte auf. Es werden während rund 13% der Zeit Werte über 1400 ppm erreicht.

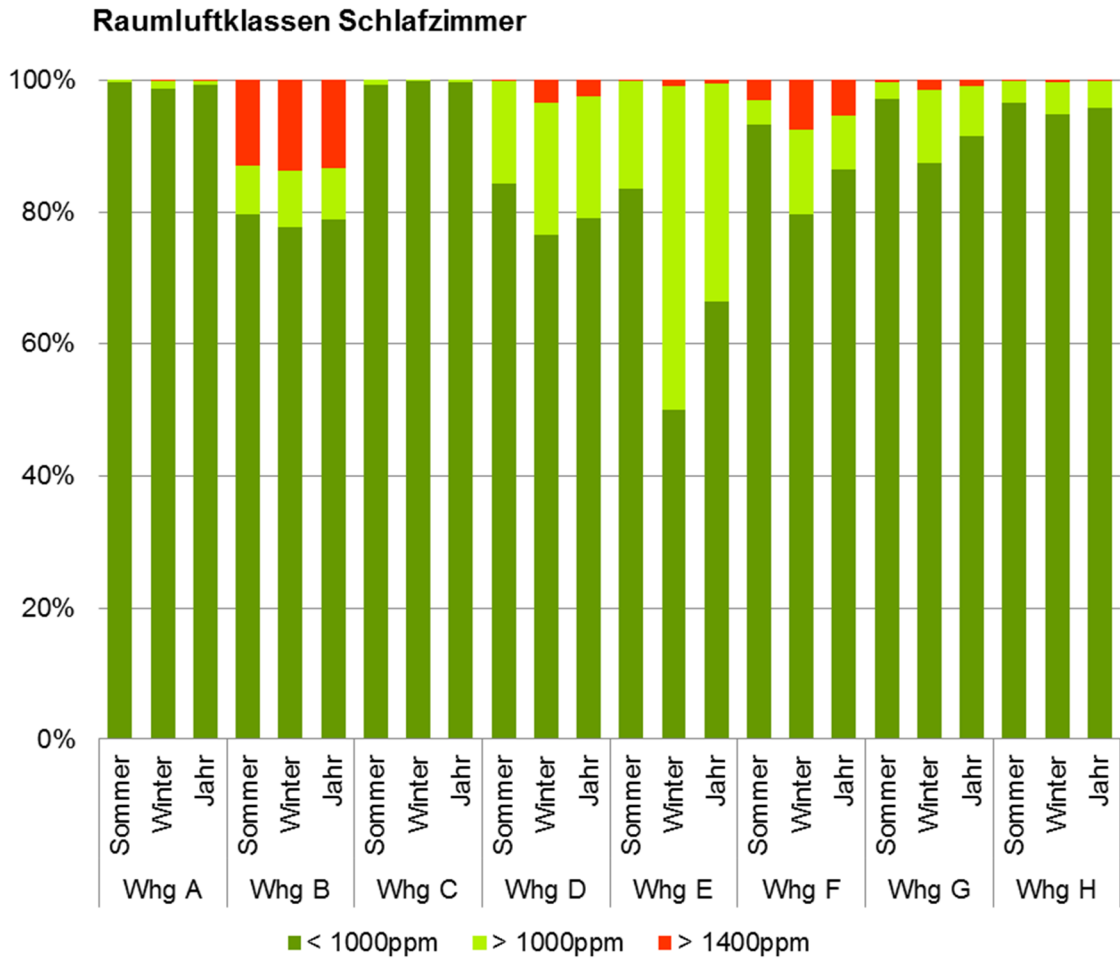


Abbildung 43: CO₂-Konzentration in den Schlafzimmern während der ganzen Messperiode

Das Benutzerverhalten wirkt sich entscheidend auf die CO₂-Konzentration in der Raumluft aus. Entsprechend sind die erhöhten Konzentrationen in den Schlafzimmern zu bewerten. Die Ursachen sind nur teilweise bekannt, da das Benutzerverhalten nicht detailliert abgeklärt werden konnte.

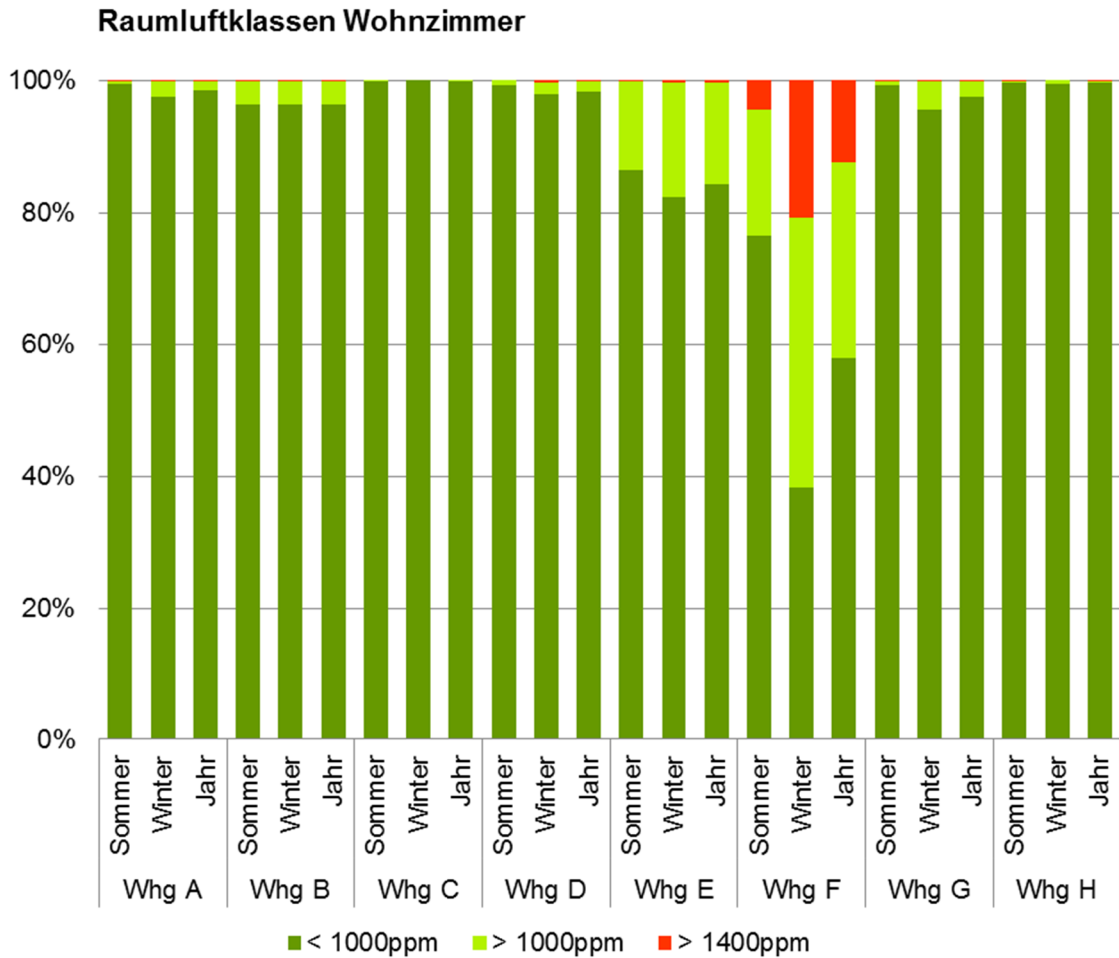


Abbildung 44: CO₂-Konzentration in den Wohnzimmern während der ganzen Messperiode

Die Auswertung der Messwerte während der Nacht (22.00-06.00 Uhr) zeigt in allen Schlafzimmern erhöhte CO₂-Konzentrationen. Wie in folgender Abbildung ersichtlich, steigt in den Nachtstunden der Prozentsatz der gemessenen Konzentration über 1000ppm bzw. 1400ppm in allen Wohnungen an. Besonders in Wohnungen A und B liegen 15% bis knapp 30% der Werte über 1400ppm. Die hohen CO₂-Konzentrationen im Wohnzimmer der Wohnung F kann mit der Anwesenheit von zwei sehr grossen Hunden mit entsprechendem CO₂-Ausstoss erklärt werden.

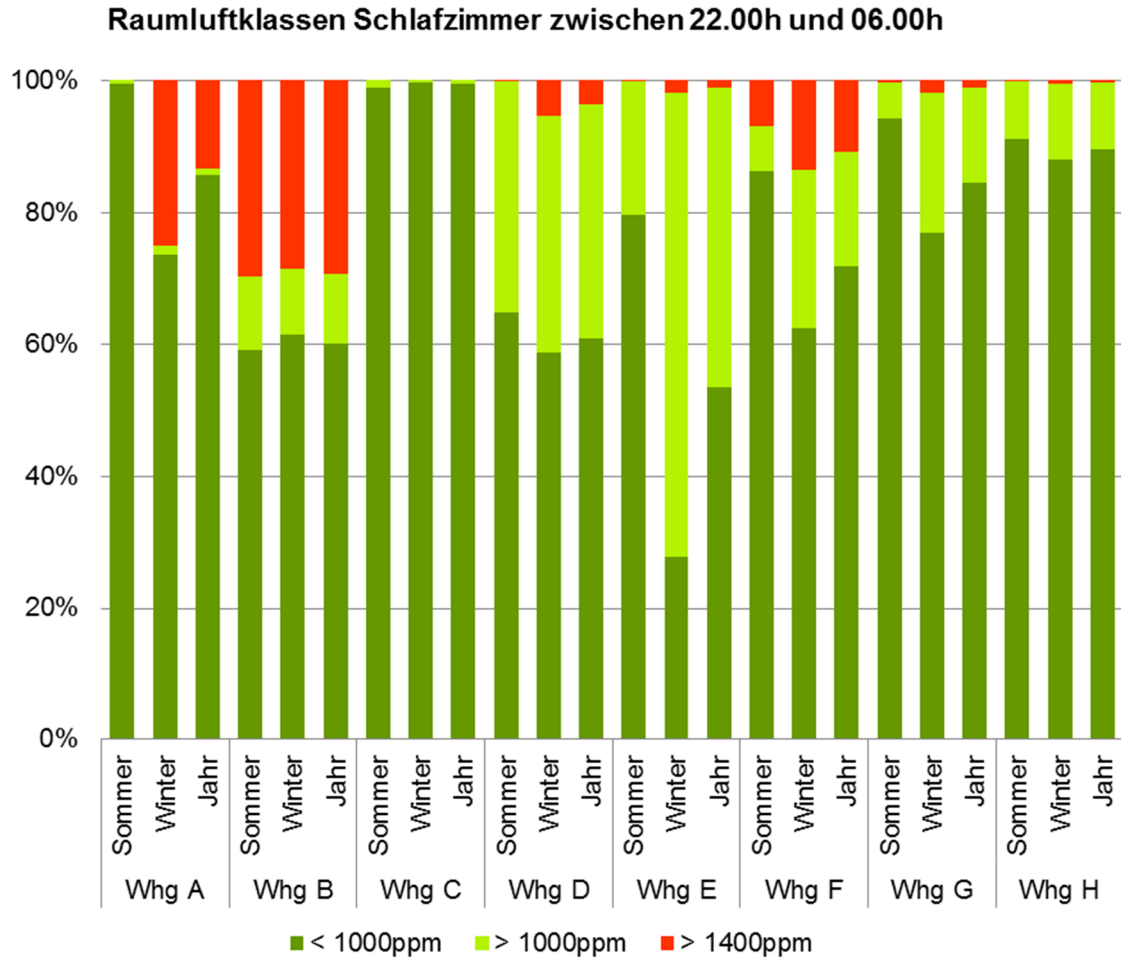


Abbildung 45: CO₂-Konzentration in den Schlafzimmern während der Nacht (22.00h - 06.00h)

Aus dieser Auswertung und unter Einbezug der vorgegangenen Schlafzimmerdarstellung lässt sich ablesen, dass die Belastungsgrenze von 1400ppm hauptsächlich während der Nachtzeiten überschritten wird. Während der Hauptanwesenheitszeit in den Schlafzimmern der Wohnungen A und B sind vor allem im Winterhalbjahr, erhöhte CO₂ Belastungen aufgezeichnet worden. In den meisten Wohnungen wird die Belastungsgrenze von 1400ppm nur selten (unter 10% der Nachtzeit) überschritten. Demnach ist in den meisten Wohnungen, mit Ausnahme der erwähnten Auffälligkeiten, eine ausreichende Raumlufqualität während der Nachtzeiten sichergestellt.

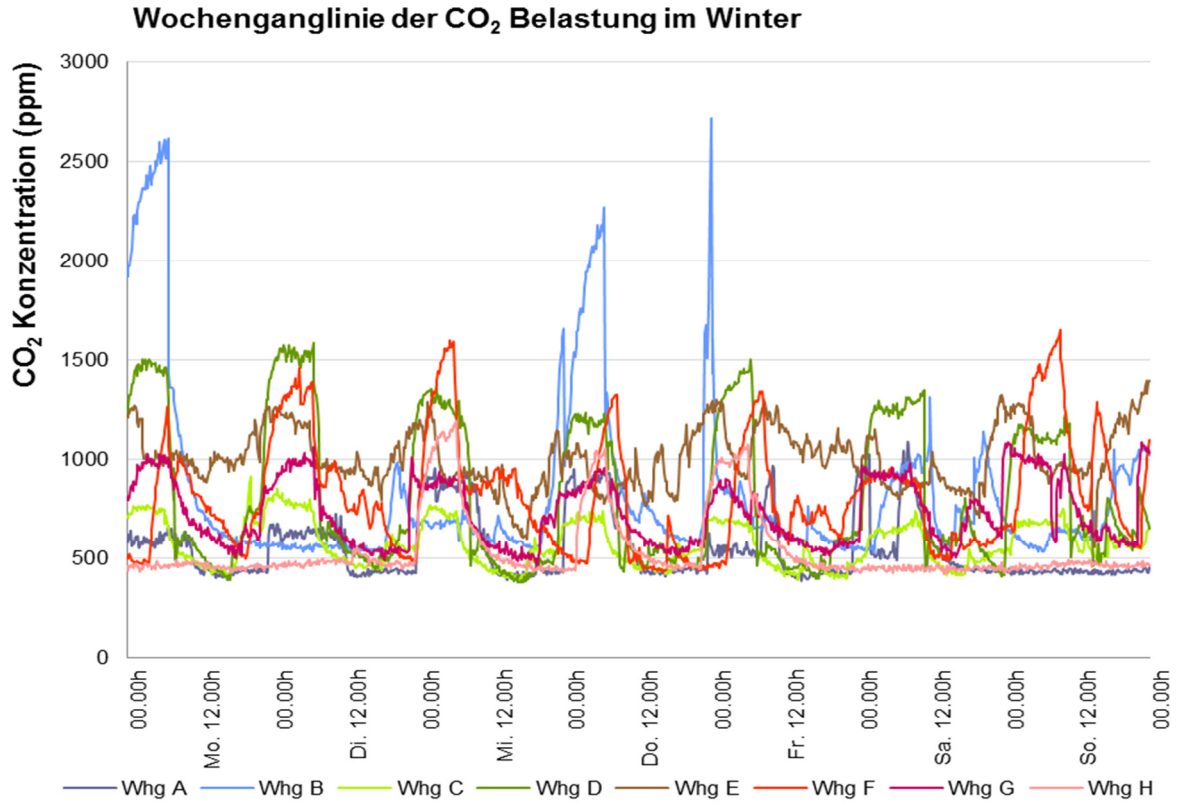


Abbildung 46: Wochenganglinien der CO₂ Belastung vom 15.12.2014 bis 21.12.2014

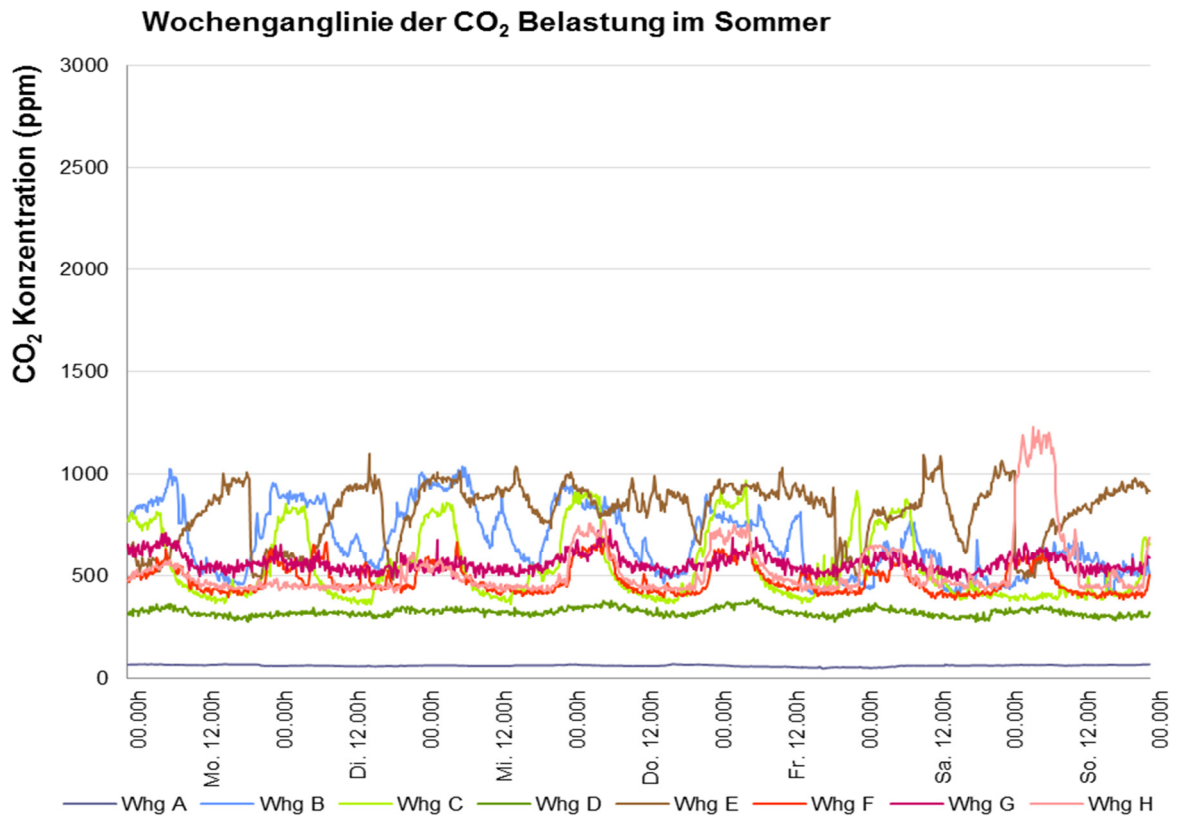


Abbildung 47: Wochenganglinien der CO₂ Belastung vom 08.06.2015 bis 14.06.2015



Die Wochenganglinien zeigen, dass in den Schlafzimmern die Belastung jeweils in der Nacht stark ansteigt. Vor allem die Messwerte der Wohnung B übersteigen die CO₂-Konzentration von 1400 ppm sehr stark. Die Messwerte der anderen Wohnungen verlassen diesen Bereich nur geringfügig oder gar nicht. Die CO₂-Belastung senkt sich am Morgen jeweils wieder ab. Wird zu dieser Grafik die Wochenganglinie der Temperaturen beigezogen, wird erkennbar, dass im Falle der Wohnung B durch Fensterlüftungsvorgänge die CO₂-Belastung gesenkt wird. Im Umkehrschluss kann zudem festgehalten werden, dass die CO₂-Belastung in Wohnungen, welche nicht durch Fensteröffnen oder nur kurzem Fensterlüften, durch die Abluftanlage und den Luftaustausch mit anderen Räumen wieder auf einem Niveau von 400-600 ppm einpendelt.

7.4.4 Diskussion Raumklima

Die Richtlinien der SIA 382/1 bezüglich Temperatur werden in den untersuchten Wohnungen grösstenteils eingehalten. Die Unterschreitungen in den Wohnungen A, E und H sind wohl bewusst durch den Nutzer herbeigeführt worden. Die hohen Temperaturen im Sommer, welche in den Wohnungen D und E gemessen wurden, sind hingegen nicht gewollt. Da die Aussenluft bei Abluftanlagen direkt von aussen angesaugt wird, kann dies im Sommer ein Grund für den Eintrag von Wärme in die Wohnung sein. Da sich die übrigen Wohnungen innerhalb der Richtlinien halten, sind wohl auch noch andere Faktoren wie die Lage/Exposition der Wohnung und das Nutzerverhalten mitverantwortlich. Generell ist festzuhalten, dass die beiden Wohnungen in Linthal deutlich tiefer Temperaturwerte aufweisen, was auf die höhere Lage zurückzuführen ist.

Vergleicht man die Temperaturen in den Wohn- und Schlafzimmern, so wird ersichtlich, dass bei einer Mehrheit der Wohnungen kein grosser Unterschied zwischen diesen beiden Zimmertypen besteht. Einzig bei der Wohnung A kann sowohl im Sommer als auch im Winter eine deutliche Absenkung der Schlafzimmer- gegenüber der Wohnzimmer-Temperatur festgestellt werden.

Bezüglich dem Einhalten der Richtlinien der SIA 382/1 im Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit muss zwischen den Wohnungen A und B in Linthal und den restlichen Wohnungen unterschieden werden. Die Wohnungen C bis H halten die Richtlinien gut ein und zeigen keine Auffälligkeiten bezüglich der relativen Feuchtigkeit. Die Wohnungen A und B hingegen weisen besonders im Winter während ca. einem Viertel der Zeit tiefe Feuchtigkeitswerte von unter 30% auf. Dies ist aus Sicht des Projektteams hauptsächlich auf die geringere Feuchtigkeit in grösseren Höhenlagen zurückzuführen. Der Effekt wird im Schlafzimmer durch den Feuchtigkeitseintrag der schlafenden Bewohner etwas kompensiert. Es gibt sogar Momente in denen die relative Feuchte über 70% steigt. Dies ist wohl auf die geringen Luftvolumenströme in diesen beiden Wohnungen zurückzuführen. Anhand dieses Beispiels zeigt sich, dass tiefe Volumenströme, gerade in trockeneren Regionen, Vorteile für die Bewohner haben können. Neben den geografischen und technischen Aspekten spielt das Nutzerverhalten bezüglich der Feuchtigkeit eine grosse Rolle. Eine hohe Personenbelegung einer Wohnung oder eine hohe Präsenzzeit in der Wohnung, sowie häufiges Duschen/Baden fördern den Feuchtigkeitseintrag erheblich. In der Abbildung sind beispielsweise die Tagesgänge während der Nacht deutlich ersichtlich.

Die CO₂-Werte in den Wohnzimmern steigen wie erwartet kaum über 1400 ppm. Einzige Ausnahme ist die Wohnung F, bei der die erhöhten Werte wohl auf die in der Wohnung lebenden Hunde zurückzuführen ist, welche sich die meiste Zeit im Wohnzimmer aufhalten.

In den Schlafzimmern zeigt sich ein anderes Bild, besonders wenn man nur die Präsenzzeit von 22.00 bis 06.00 Uhr in Abbildung betrachtet. Hier zeigen sowohl Wohnung A, B, D (System Trivent), E, F und G (System Aereco) Messwerte von 1400 ppm und mehr. Bei den Wohnungen D, E und G sind diese Überschreitungen aber nur selten (kleiner 5%). Die hohen Werte in den Wohnungen A und B sind vermutlich auf die tiefen Luftvolumenströme zurückzuführen. Eine klare Begründung für die erhöhten Werte in der Wohnung F zu finden ist hingegen schwieriger, da dieser Raum hohe Luftvolumenströme aufzeigt. Sicherlich trägt die Belegung durch zwei Personen in diesem Schlafzimmer zu einer erhöhten CO₂-Konzentration bei.

Generell fällt auf, dass die CO₂-Werte im Sommer tiefer sind (Beispiel Wohnung A). Dies ist vermutlich auf das Öffnen von Fenstern während der Nacht herzuleiten.

7.5 Betriebsenergie

7.5.1 Energieeffizienz

Die durch die Aussenluftdurchlässe einströmende Luft mit Aussentemperatur wird durch die Heizung auf Raumtemperatur gebracht. Ohne Abwärmenutzung geht diese Wärmeenergie mit der ausströmenden Fortluft verloren. Durch die vorgegebene Dimensionierung der Abluftkanäle ist der Luftvolumenstrom im Vergleich mit der natürlichen Lüftung (Standard-Luftvolumenstrom nach SIA 380/1) in der Regel kleiner. Entsprechend ist auch der Energieverlust der Abluftanlage geringer. Die folgenden Abbildung zeigen exemplarisch die gemessenen Gesamt-Luftvolumenströme der 4 Gebäude während einer Woche im Winter.

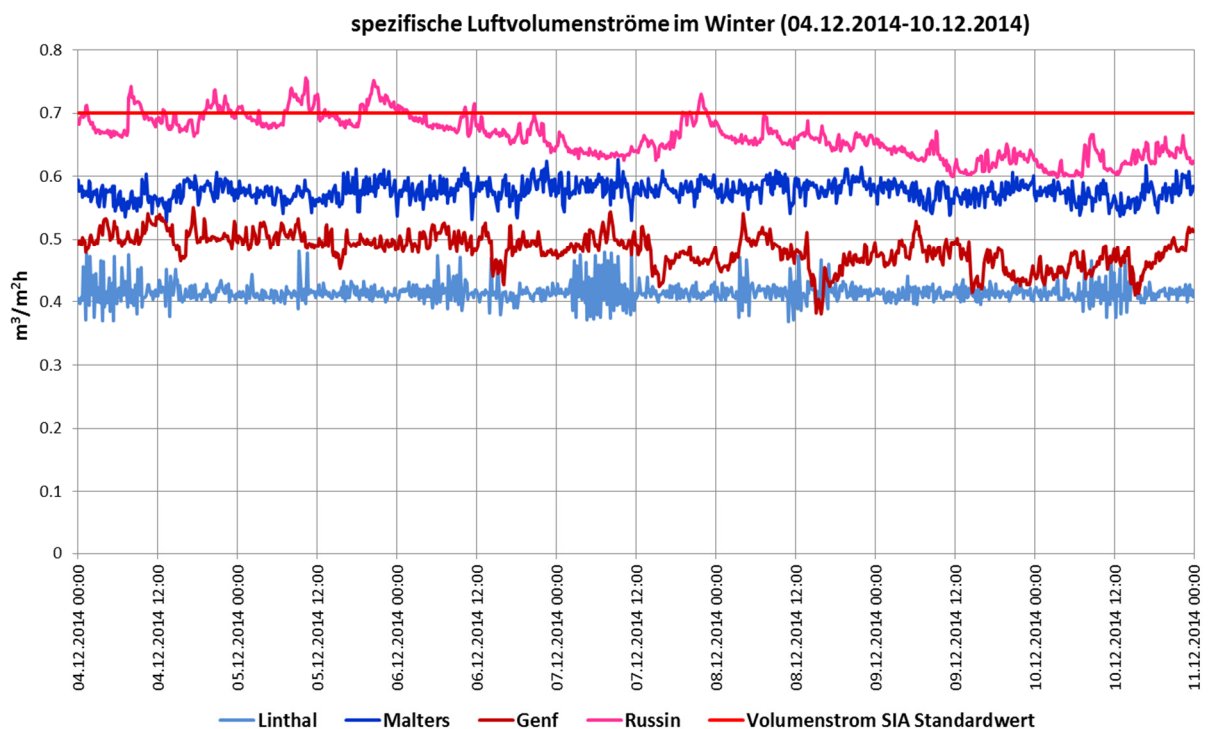


Abbildung 48: spezifische Luftvolumenströme der 4 Gebäude im Winter

In der betrachteten Woche im Dezember 2014 lagen die durchschnittlichen spezifischen Luftvolumenströme der 4 Gebäude im Bereich zwischen 0.36 und 0.75 m³/m²h. Der Unterschied der beiden Systeme ist erkennbar. Während die Volumenströme bei Aereco (rot) stärker aufgrund der Feuchteanpassung variieren, liegen sie bei Trivent (blau) in einem engeren Band. Die Werte schwanken mit dem temporären Betrieb auf der höheren Leistungsstufe der Ventilatoren.

Die Energieeffizienz kann durch den Einsatz von einer Abwärmenutzung gesteigert werden. Bei den Gebäuden in Malters und Linthal ist ein System von Trivent installiert, welches mittels einer Abluftwärmepumpe ein Teil der Wärme zurückgewinnt und für die Erwärmung des Brauchwarmwassers nutzt. Diese Anlage wurde gemessen und der gleiche Zeitraum wie in Abbildung 48 wird in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.



Lüftungsverluste Malters im Winter (04.12.2014-10.12.2014)

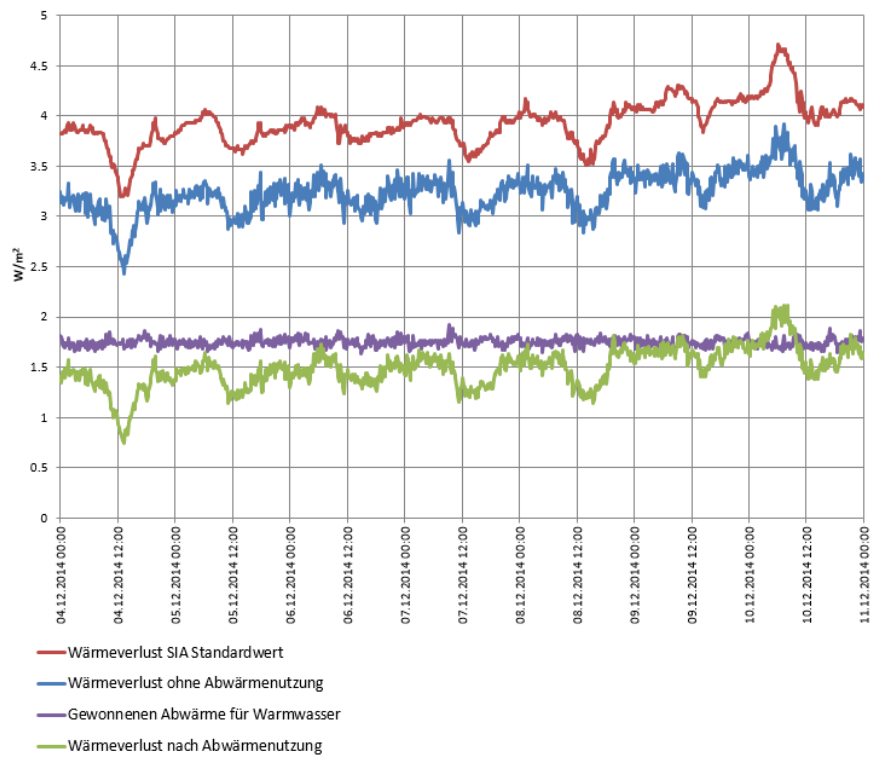


Abbildung 49: Lüftungswärmeverluste MFH Malters

Lüftungsverluste Linthal im Winter (04.12.2014-10.12.2014)

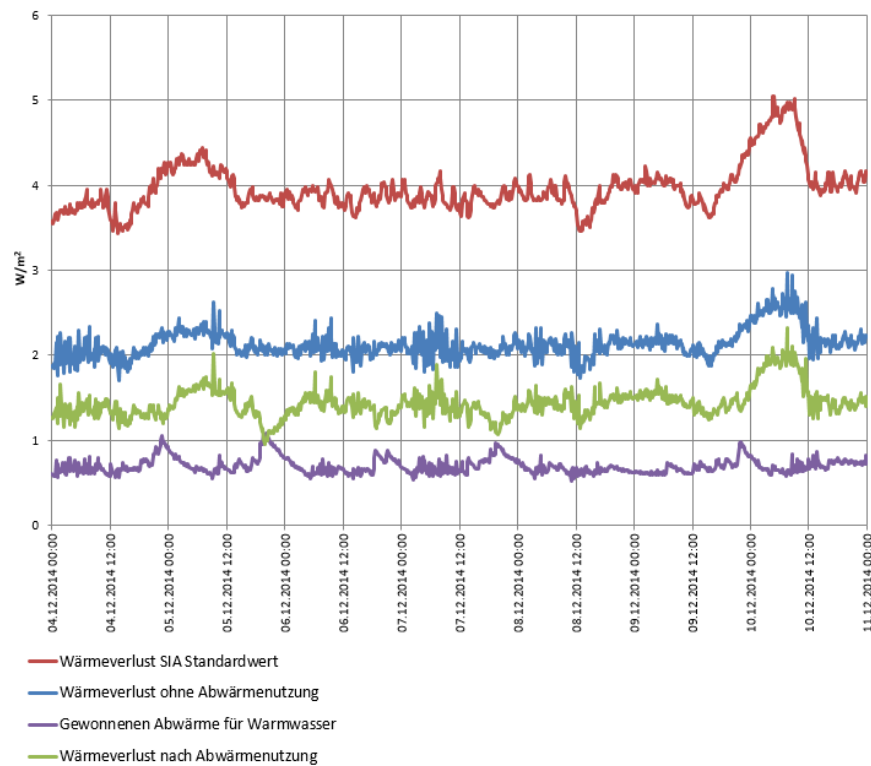


Abbildung 50: Lüftungswärmeverluste MFH Linthal



Die Wärmeverluste variieren in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Die Abwärmenutzung bewerkstelligt, im betrachteten Zeitraum, in Malters eine beinahe konstante Energierückgewinnung von 54% und Linthal von 33%.

7.5.2 Abschätzung des Energiebedarfs

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der Systeme wurden aufgrund der durchschnittlichen Volumenströme die daraus resultierenden Wärmeverluste und die Elektrizitätsbedarfe, während einer Heizperiode approximiert. Diese werden dem Wärmeverlust bei herkömmlichen Gebäuden ohne Lüftung (Fensterlüftung) und dem Wärmeverlust und dem Elektrizitätsbedarf bei einer Komfortlüftung, welche über Zu- und Ablufventilatoren verfügt gegenübergestellt.

Die folgenden Resultate basieren auf Jahres-Messdaten. Bei den Feldmessungen hatten die Bewohner auch manuell gelüftet. Jedoch hatte die manuelle Lüftung keinen Einfluss auf die Messdaten, da diese in der Abluft gemessen wurden. Für die Trivent-Anlagen in Linthal und Malters wurde der Strombedarf der dezentralen Ventilatoren mit Gesamtleistung und Laufzeiten bei kontinuierlichem Betrieb abgeschätzt, da dafür keine Messung installiert war. Bei den Gebäuden in Genf und Russin mit Anlagen von Aereco liegen Messwerte vor. Die Resultate beziehen sich auf eine konstante Innenraumtemperatur von 20°C und wurden mit der mittleren Temperaturdifferenz, auf einen Referenzstandort, klimakorrigiert.

Jahres-Energieflüsse der Lüftungen und Vergleich mit Standardwerten bei Raumtemperatur 20°C mit Klimakorrektur auf einen Referenzstandort

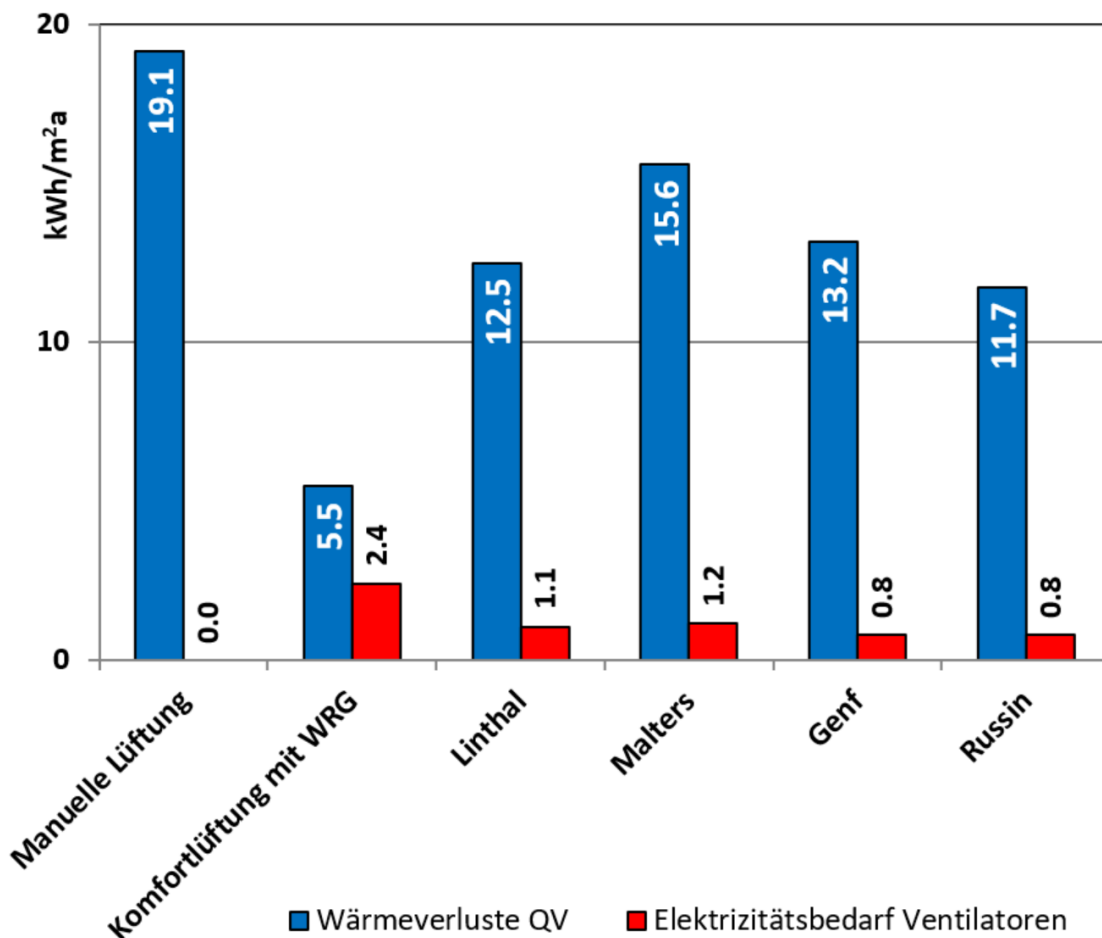


Abbildung 51: Abschätzung Lüftungswärmeverluste und Elektrizitätsbedarf der 4 Gebäude



Für die manuelle Lüftung wurde ein Aussenluftvolumenstrom, gemäss SIA 180/1, von $0.7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ angenommen und dient hier als Referenz.

Der Wärmeverlust und der Elektrizitätsbedarf einer Komfortlüftung mit WRG wurde gemäss Minergie für ein vereinfachtes Mehrfamilienhaus von 1000m^2 EBF berechnet.

Der Vergleich der drei Lüftungsmethoden basiert auf der Annahme, dass die Nutzer nicht zusätzlich Lüften bzw. sich gemäss Norm verhalten. Bei jeder Methode kann die Praxis von dieser Annahme abweichen und müsste entsprechend bei jeder eingerechnet werden. Obwohl bei der Feldmessung auch manuelle gelüftet wurde, ist dies nicht messtechnisch erfasst worden (lediglich der Abluftvolumenstrom wurde gemessen) und folglich kann man diese Messwerte, für den Vergleich, verwenden.

Bei allen Lüftungsanlagen ist der thermisch wirksame Aussenluftvolumenstrom (und damit der Wärmeverlust) geringer als bei der manuellen Lüftung. Durch den Einsatz der WRG hat die Komfortlüftung einen geringeren Wärmeverlust als die Abluftanlagen. Mit Zu- und Abluft besitzt die Komfortlüftung einen höheren Strombedarf als die Abluftanlagen, welche nur über die Abluftventilatoren verfügen.

Wärme und Elektrizitätsbedarf liegen bei den Trivent-Anlagen (Linthal und Malters) im Durchschnitt etwas höher als bei den Systemen von Aereco (Genf und Russin). Da beim Trivent-System die Luftvolumenströme manuell temporär erhöht werden können, bestimmt hier das Benutzerverhalten die Energieeffizienz entscheidend. Im Jahresdurchschnitt sind die spezifischen Luftvolumenströme grösser und gesamthaft verbrauchen die dezentralen Ventilatoren etwas mehr Strom. Diese Berechnung basieren auf Abschätzungen und Annahmen, da das Benutzerverhalten nicht bekannt ist und nicht alle erforderlichen Parameter messtechnisch erfasst wurden.

Beim Lüftungssystem von Aereco mit feuchteabhängiger Regulierung sind die spezifischen Luftvolumenströme in der Regel im Winter geringer als im Sommer, was zu einem etwas geringeren Stromverbrauch führt.

Bei den Gebäuden in Linthal und Malters mit Lüftungssystem Trivent wird mittels einer Abluftwärmepumpe ein Teil der Wärme zurückgewonnen und für die Erwärmung des Brauchwarmwassers genutzt. Dieser Effekt ist in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Analog ist die entsprechende Ausführung der Aereco-Anlagen ebenfalls möglich, lag aber bei den betrachteten Gebäuden nicht vor.

Diese Abschätzung des Energiebedarfs basiert auf gemessenen Daten der 4 Gebäude im betrachteten Zeitraum. Nutzerverhalten und Raumklima sind in jeder Wohnung unterschiedlich. Eine Bewertung bezüglich erreichter Luftqualität in den Wohnräumen fand nicht statt. Entsprechend beziehen sich diese Resultate nur auf den vorgefundenen Betrieb der Anlagen, Aussagen über die effektive Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lüftungsanlagen können nur pauschal erfolgen.



7.6 Bewohnerbefragung

Von den 52 versandten Fragebogen wurden 25 ausgefüllt an das Projektteam retourniert. Das entspricht einer guten Rücklaufquote von 48%. Im Folgenden werden die Ergebnisse in Form von Säulendiagrammen nach Themengebieten erläutert.

7.6.1 Generelles Wohlbefinden

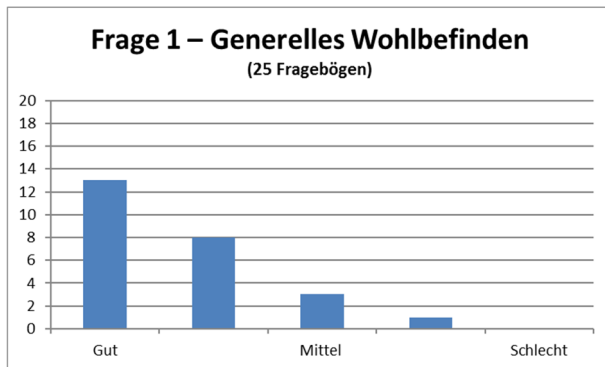


Abbildung 52: Antworten Frage 1:«Generelles Wohlbefinden»

Das generelle Wohlbefinden scheint in allen Wohnungen gut zu sein.

7.6.2 Lüften

Den Befragten wurden im Themenbereich Lüften 3 Fragen gestellt. Es wurde gefragt, wie oft, wie lange gelüftet wird und es wurde nach geöffneten Fenstern im Winter gefragt.

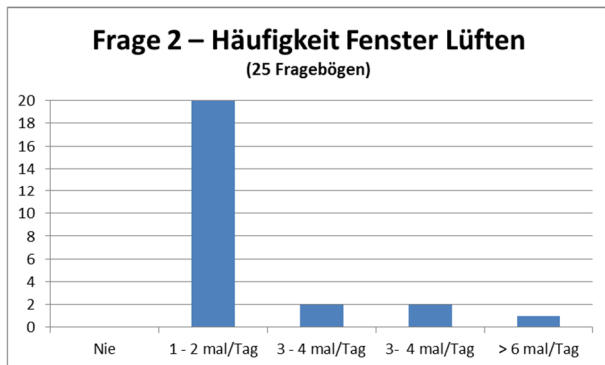


Abbildung 53: Antworten Frage 2

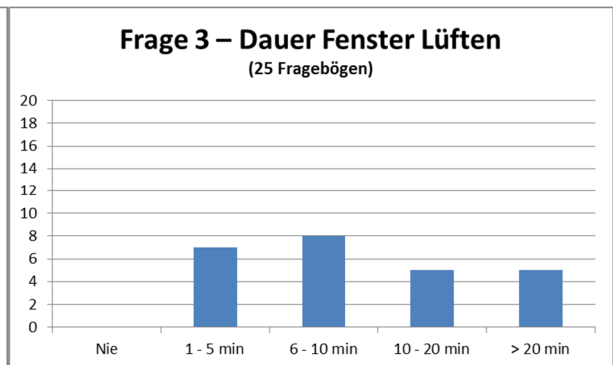


Abbildung 54: Antworten Frage 3

Alle befragten Personen lüften mindestens 1 bis 2 mal pro Tag durch Öffnen der Fenster. 18 der 25 Personen tun dies während mindestens 6 bis 10 Minuten. Vergleicht man diese Aussage mit den Temperaturkurven der einzelnen Schlafzimmer, lässt sich bei den meisten Fällen kein Temperaturabfall beobachten. Erst bei Lüftungsvorgängen, welche länger andauern, ist ein Temperaturabfall erkennbar. Für die Normalisierung der CO₂-Konzentrationen in der Raumluft am Morgen reichen Lüftungen von sehr kurzer Dauer.

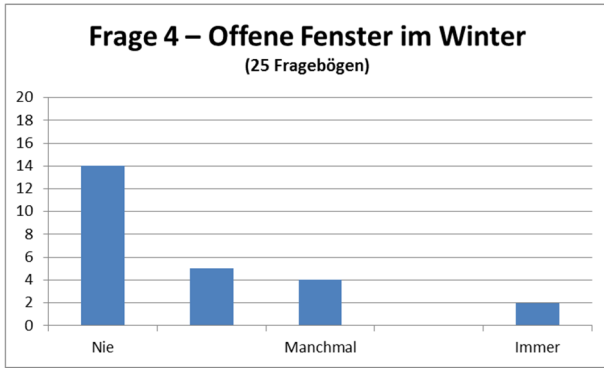


Abbildung 55: Antworten Frage 4

Die meisten Befragten lassen während der Wintermonate keine Fenster offen stehen. Nur zwei Personen bekennen sich als Dauerlüfter.

7.6.3 Zugluft

In einer weiteren Frage wurden die Bewohnenden befragt, ob sie Zugluft wahrnehmen.

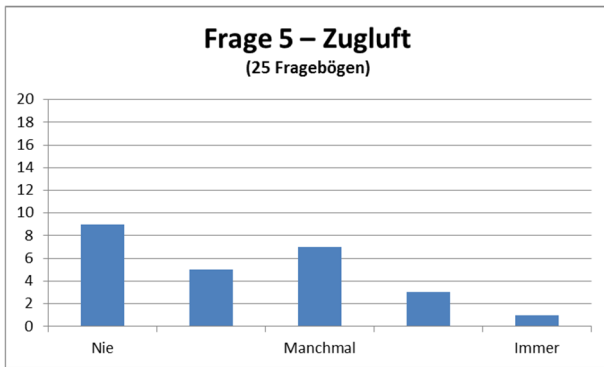


Abbildung 56: Antworten Frage 5

9 der 25 befragten Personen nahmen nie und etwa die Hälfte nur manchmal Zugluft in den Räumen wahr, wobei nur 1 Person aus 25 über permanente Zugluft klagt. Einige Personen haben angegeben, dass sie nur bei starkem Wind Zugluft wahrnehmen.

7.6.4 Luftqualität

Zur Raumluftqualität wurden die Bewohnenden allgemein und speziell zur Zufriedenheit betreffend Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur im Winter befragt.

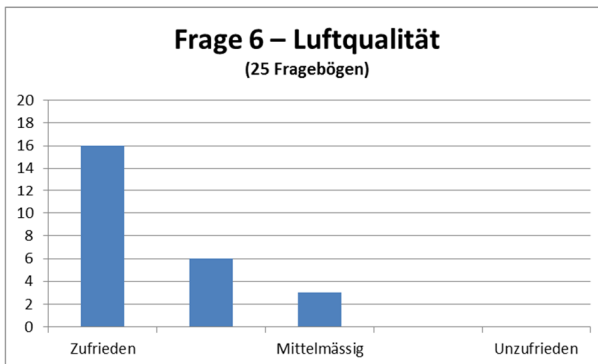


Abbildung 57: Antworten Frage 6

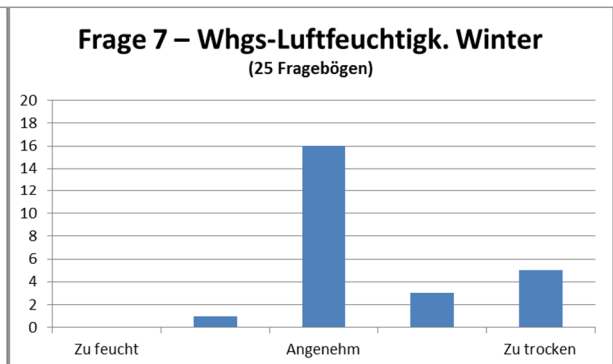


Abbildung 58: Antworten Frage 7



Im allgemeinen sind die Bewohnenden sehr zufrieden mit der Luftqualität. Die Raumluftfeuchtigkeit wird ausser von einer Person als angenehm bis zu trocken empfunden. Die Wahrnehmung von 5 Personen, die die Raumluft im Winter als zu trocken einstufen, deckt sich mit tiefen Messwerten in den entsprechenden Wohnungen.

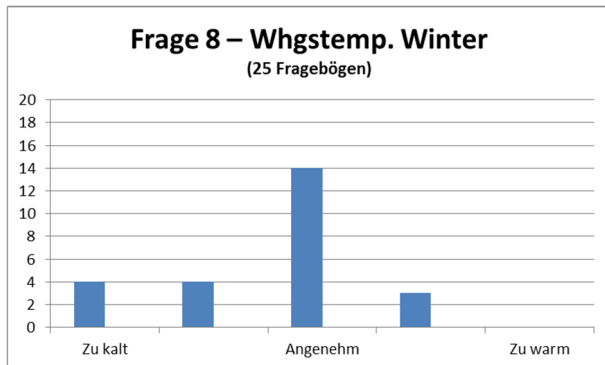


Abbildung 59: Antworten Frage 8

Die Raumlufttemperaturen werden von 14 der 25 Befragten als angenehm empfunden. Für 8 Personen ist es zu kalt, für 3 Personen eher zu warm.

7.6.5 Informationen zur Lüftungsanlage

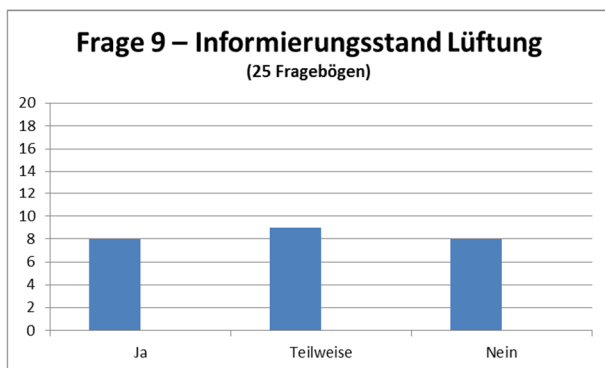


Abbildung 60: Antworten Frage 9

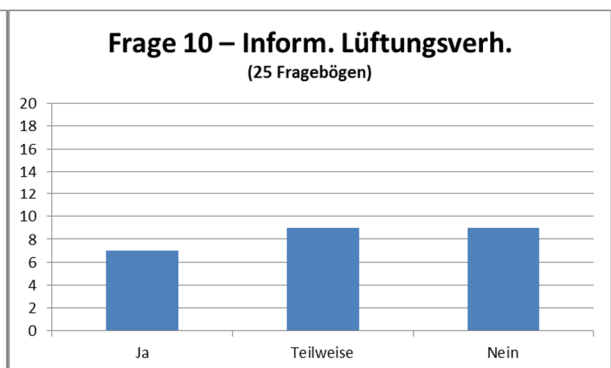


Abbildung 61: Antworten Frage 10

Informationsstand der befragten Personen und erhaltene Informationen zum Lüftungsverhalten zeigen eine gleichmässige Verteilung. Jeweils etwa ein Drittel der Befragten gibt an, nicht, nur teilweise oder vollumfänglich über den Betrieb der Lüftungsanlage informiert zu sein.

7.6.6 Störung durch Geräusche von aussen und von der Lüftungsanlage

Die meisten Befragten geben an, dass sie keine Geräusche von aussen und von der Lüftungsanlage wahrnehmen. Jedoch muss erwähnt werden, dass beinahe genau gleich viele Personen angeben, dass sie "Manchmal" Geräusche wahrnehmen. Die Verteilung der Antworten verhält sich über alle Untersuchungsgebäude proportional.

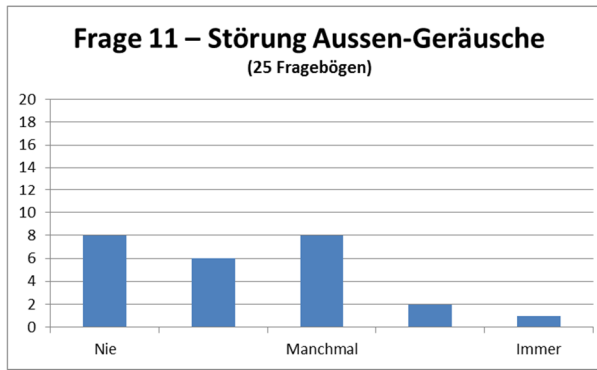


Abbildung 62: Antworten Frage 11

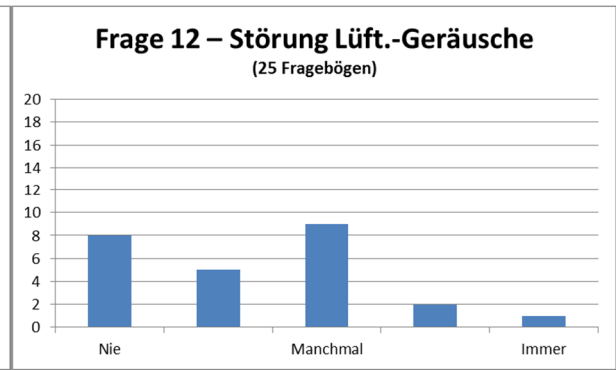


Abbildung 63: Antworten Frage 13

7.6.7 Wohnungswahl und abschliessende Fragen

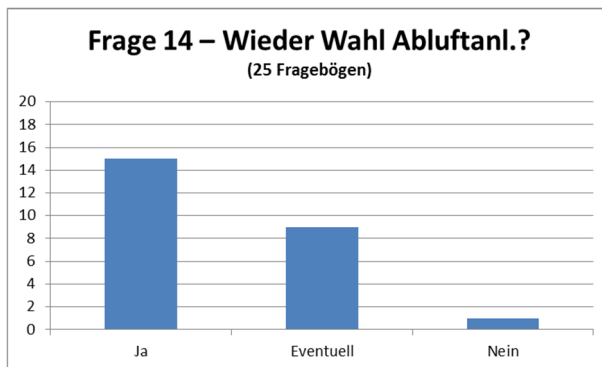


Abbildung 64 Antworten Frage 14

Abschliessend gibt die Hälfte der Befragten an, bei einem allfälligen Wohnungswechsel wieder in eine Wohnung mit technischer Lüftungsanlage einzuziehen. Die andere Hälfte würde sich eventuell um eine Wohnung ohne technischer Lüftung bemühen.

7.6.8 Diskussion

Die Bewohnerbefragung zeigt, dass die Raumluftqualität überwiegend als angenehm wahrgenommen wird. Dies deckt sich mehrheitlich mit den Messergebnissen der Langzeitmessung.

Die Mehrheit der Befragten würden sicher oder eventuell wieder in eine Wohnung mit einer Abluftanlage ziehen. Einzelne Nennungen zur Geräuschemission der Lüftungsanlage gab es in allen vier untersuchten Gebäuden, wobei eine Korrelation mit der Störung durch Aussenlärm besteht. Knapp die Hälfte der Befragten geben an, dass sie manchmal oder mehr Zugluft in ihrer Wohnung wahrnehmen, wobei 9 der befragten 25 Personen gar nie Zugluft wahrgenommen haben. Dieses Zahlenverhältnis wird als bedenklich erachtet und der Zugluft sollte mehr Beachtung geschenkt werden.



8. Ausblick

In diesem Projekt wurden in bestehenden Wohnungen bei vorgefundenem Betrieb Messdaten erfasst und dokumentiert. Kurz- und Langzeitmessungen illustrieren einen Ist-Zustand des Lüftungsbetriebs von 8 verschiedenen Wohnungen mit differierender Nutzung an 4 Standorten.

Dynamische Auswirkungen auf die Performance der Lüftungsanlagen durch das Aussenklima am Gebäudestandort und durch das Benutzerverhalten, bzw. die benutzerabhängige Regelung konnten in der Beurteilung nur implizit berücksichtigt werden. Umfassende Vergleiche zwischen den beiden Lüftungskonzepten und den Wohnungen sind deshalb nur beschränkt möglich.

So kann hier nur vermutet werden, dass eine Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen (bei entsprechenden Luftvolumenströmen) eher wenig Einfluss auf die Raumlufttemperatur hat, dass bauphysikalische Anforderungen erreicht werden können und dass die CO₂-Konzentrationen in der Raumluft weitestgehend im behaglichen Bereich gehalten werden.

Sollen direkte kausale Zusammenhänge für einzelne Raumklima-Parameter wissenschaftlich belegt werden, und allgemein gültige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der Anlagen gewonnen werden, müssen weitere Untersuchungen folgen.

Ein interessantes Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Bewohner trotz der vergleichsweise geringen Aussenluftvolumenströme mehrheitlich mit der Raumluftqualität zufrieden waren. Damit stellt sich die Frage, ob gemäss heutigen Normen mechanische Wohnungslüftungen generell überdimensioniert werden.

Im Hinblick auf Normen stellt sich die Frage, ob heutige Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle für Abluftanlagen angemessen sind.

Es stellt sich auch die Frage, wie die Lüftungsanlagen im Betrieb optimiert werden können, bzw. welche Regelungsmöglichkeiten sie für einen nutzeroptimierten, dynamischen Betrieb bieten.

In Ergänzung zur diesen Arbeiten soll die Betrachtung auch ausgeweitet und das Augenmerk verstärkt auf die Umsetzung in der Praxis gelegt werden, um die Resultate für die Planung und Realisierung zugänglich zu machen und für die Investoren Argumente zu liefern, damit zukünftig vor allem auch in der Gebäudeerneuerung mehr qualitativ hochstehende Lüftungssysteme realisiert werden.

Im Bereich von Feinstaub und VOC wurden einzelne exemplarische Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse können nicht als repräsentativ betrachtet werden. Insbesondere die Ergebnisse VOC-Messungen sind interessant. In einer breiter angelegten Untersuchung sollte der Einfluss von Abluftanlagen auf die VOC-Konzentration in Wohnungen untersucht werden.



Glossar

Begriffserklärungen, Bezeichnungen und Abkürzungen

Abwärmenutzung (AWN)	Bei der Abwärmenutzung wird die bei einem Prozess anfallende Abwärme an andere Prozesse weitergeführt.
Aussenluftdurchlass (ALD)	Öffnung in der Fassade eines Gebäudes zur Nachströmung der Aussenluft (ohne aktive Luftförderung, Luftströmung durch Druckdifferenz)
Energiebezugsfläche (A_E , EBF)	Bezugsgrösse für spezifische Energiekennzahlen gemäss SIA 380
Feinstaub	Feinstaub-Partikelkonzentrationen: PM10, PM2.5, PM1 (Particulate Matter, Durchmesser in μm)
Filter	Partikel-Luftfilter Filterklassen nach DIN EN 779: Grobstaubfilter: G1, G2, G3, G4 (Einteilung nach Abscheidegrad) Feinstaubfilter: M5, M6, F7, F8, F9 (Einteilung nach Wirkungsgrad) (Messpartikelgrösse $0.4\mu\text{m}$)
FlowFinder	Messgerät für Luftvolumenströme, Produktname
Infiltration	SIA 382/1: Unkontrollierter Lufteintritt durch Undichtheiten der Gebäudehülle, verursacht durch Auftrieb, Wind oder Abluftüberschuss des mechanischen Lüftungssystems. In diesem Projekt: Luftströmung durch die begrenzenden Bauteile einer Wohnung, berechnet aus Volumenstrommessungen von Zuluft durch Aussenluftdurchlässe und Abluftstellen
Luftdurchlässigkeits-Prüfung (Methode) Blower-Door (Messgerät, Produktname)	Methode der Luftdichtheitsmessung eines Gebäudes, mittels Differenzdruckverfahren Messresultate: Luftdurchlässigkeit q_{50} ($1/\text{m}^2$ Innenoberfläche Fassade) Luftwechselrate n_{50} ($1/\text{m}^3$ Luftvolumen)
Stack-Effekt	Vertikale Luftströmung durch thermische Konvektion in einem Gebäude (Kamineffekt)
Tracergas-Messung (SF_6)	Messmethode zur Verfolgung von Luftströmungen mittels eines Indikatorgases, z.B. SF_6 (Schwefel-Hexafluorid)
Volatile Organic Compounds (VOC)	Flüchtige organische Verbindungen
Wärmerückgewinnung (WRG)	Bei der Wärmerückgewinnung wird die Abwärme an den gleichen Prozess zurückgeführt.



Literaturverzeichnis

- BFE. (2002). *Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung*. Autoren: Viktor Dorer, Andreas Pfeiffer, EMPA; Peter Hartmann, Adrian Schatz, ZHW. Bern.
- Gossauer, E. (2008). *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden Eine Feldstudie*.
- Huber, H. (6 2012). Einfache Abluftanlagen. *HK-Gebäudetechnik*.
- LIWOTEV. (2008). *Luftqualität in Wohnbauten mit tiefem Energieverbrauch*. Bau- und Umweltchemie. Zürich.
- Mayer, H. o. (2012). *Interview und schriftliche Befragung*. Gruyter, de Oldenbourg .
- Merkblatt SIA 2023. (2008). *Lüftung in Wohnbauten*. Zürich: SIA.
- Minergie. (2017.2). *Produktreglement zu den Gebäudestandards Minergie / Minergie-P /Minergie-A*.
- Monn, C. (2012). Arbeitsleistung und Raumluftqualität - Über den Nutzen guter Raumluft. *Die Volkswirtschaft*.
- Norm DIN 1946-6. (2009). *Raumlufttechnik- Teil 6: Lüftung von Wohnungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- Norm DIN EN 13829. (2001). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- Norm SIA 180. (2014). *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Zürich: SIA.
- Norm SIA 181. (2006). *Schallschutz im Hochbau*. Zürich: SIA.
- Norm SIA 382/1. (2007). *Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: SIA.
- République française. (1983). *Arrête du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements*. Paris.
- Zürich, S. (2012). *Schlussbericht Reales Lüftungsverhalten in Wohnbauten*. Zürich.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aereco S.A.: Schema Lüftungssystem	15
Abbildung 2: Trivent AG: Schema Lüftungssystem Aquavent	16
Abbildung 3: MFH Linthal: Ansicht und Gebäudedaten	18
Abbildung 4: MFH Linthal: Grundrisse Wohnungen A und B	18
Abbildung 5: MFH Malters: Ansicht und Gebäudedaten	19
Abbildung 6: MFH Malters: Grundriss Wohnung C	19
Abbildung 7: MFH Malters: Grundriss Wohnung D	20
Abbildung 8: MFH Genf: Ansicht und Gebäudedaten	21
Abbildung 9: MFH Genf: Grundriss Wohnung E	21
Abbildung 10: MFH Russin: Ansicht und Gebäudedaten	22
Abbildung 11: MFH Russin: Grundriss Wohnung F	22
Abbildung 12: MFH Russin Grundriss Wohnung G und H	23
Abbildung 13: Installation Blower Door in Wohnungstür	25
Abbildung 14: Einstellung des Blower Door-Tests in untersuchter Wohnung	25
Abbildung 15: Flow Finder-Messgerät inkl. Adapter	25
Abbildung 16: Messung des Luftvolumenstroms durch einen ALD mit dem Flow Finder	25
Abbildung 17: Partikelmessung Aussen (inkl. Referenzmessung) / Partikelmessung Zuluft Schlafzimmer	26
Abbildung 18: Partikelmessungen Raumluft (Schlafzimmer und Wohn-/Esszimmer)	26
Abbildung 19: Installationsaufbau für die VOC-Messung	27
Abbildung 20: Installationsaufbau für die Tracergas-Messung	28
Abbildung 21: verwendete Messgeräte	29
Abbildung 22: Ablaufschema der Langzeitmessungen	30
Abbildung 23: Ablaufschema der Bewohnerbefragung	33
Abbildung 24: Raumtypen A und B für die Schallschutzbetrachtung	38
Abbildung 25: Anforderungen Luftschall bei erheblich bis sehr starker Störung durch Aussenlärm	41
Abbildung 26: Resultate der Blower Door-Tests mit Neubau-Grenzwerten SIA 180 und Minergie- Empfehlungen	42
Abbildung 27: Resultate der Blower Door-Tests in den modernisierten Gebäuden mit Grenzwerten SIA 180 und Minergie-Empfehlungen	43
Abbildung 28 Leckage bei einem Fenster	44
Abbildung 29: Volumenstrommessung der Zu- und Abluftstellen	45
Abbildung 30: schematischer Grundriss der Wohnung in Oberweningen mit Zu- und Abluftstellen	46
Abbildung 31: Grundriss 4.5Zi-Wohnung in Malters mit Messpunkt VOC	49
Abbildung 32 Veränderung der VOC-Konzentration bei laufender Abluftanlage	51
Abbildung 33: Grundriss 4.5-Zimmer-Wohnung in Malters mit Messstellen der Tracergas-Messung .	52
Abbildung 34: Logarithmische Darstellung des Gaskonzentrationsverlaufs	53
Abbildung 35: Wochenganglinien der Temperaturen vom 15.12.2014 bis 21.12.2014	56
Abbildung 36: Wochenganglinien der Temperaturen vom 08.06.15 bis 14.06.15	57
Abbildung 37: Temperaturverteilung in den einzelnen Schlafzimmer	57
Abbildung 38: Temperaturverteilung in den einzelnen Wohnzimmer	58
Abbildung 39: Prozentuale Verteilung der rel. Raumluftfeuchtigkeit während der Nutzungszeit des Raumes	59



Abbildung 40: Prozentuale Verteilung der relativen Raumlufffeuchtigkeit während der Nutzungszeit des Raumes	60
Abbildung 41: Wochenganglinie der Schlafzimmer Feuchtigkeit vom 15.12.2014 bis 21.12.2014	61
Abbildung 42: Wochenganglinie der Schlafzimmer Feuchtigkeit vom 08.06.2015 bis 14.06.2015	62
Abbildung 43: CO ₂ -Konzentration in den Schlafzimmern während der ganzen Messperiode.....	63
Abbildung 44: CO ₂ -Konzentration in den Wohnzimmern während der ganzen Messperiode	64
Abbildung 45: CO ₂ -Konzentration in den Schlafzimmern während der Nacht (22.00h - 06.00h).....	65
Abbildung 46: Wochenganglinien der CO ₂ Belastung vom 15.12.2014 bis 21.12.2014	66
Abbildung 47: Wochenganglinien der CO ₂ Belastung vom 08.06.2015 bis 14.06.2015	66
Abbildung 48: spezifische Luftvolumenströme der 4 Gebäude im Winter	68
Abbildung 49: Lüftungswärmeverluste MFH Malters	69
Abbildung 50: Lüftungswärmeverluste MFH Linthal.....	69
Abbildung 51: Abschätzung Lüftungswärmeverluste und Elektrizitätsbedarf der 4 Gebäude	70
Abbildung 52: Antworten Frage 1:«Generelles Wohlbefinden»	72
Abbildung 53: Antworten Frage 2 Abbildung 54: Antworten Frage 3.....	72
Abbildung 55: Antworten Frage 4.....	73
Abbildung 56: Antworten Frage 5.....	73
Abbildung 57: Antworten Frage 6 Abbildung 58: Antworten Frage 7	73
Abbildung 59: Antworten Frage 8.....	74
Abbildung 60: Antworten Frage 9 Abbildung 61: Antworten Frage 10.....	74
Abbildung 62: Antworten Frage 11 Abbildung 63: Antworten Frage 13.....	75
Abbildung 64 Antworten Frage 14.....	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RAL-Kategorien gemäss SIA Norm 382/1 Ziffer 1.7.3	31
Tabelle 2: Übersicht Normenvergleich Bereich Lüftung.....	35
Tabelle 3: Vergleich Bedingungen Unterdruck.....	35
Tabelle 4: Vergleich Bedingungen Aussenluftvolumenströme.....	36
Tabelle 5: Vergleich der Bedingungen Abluftvolumenströme	36
Tabelle 6: Vergleich Bedingungen Filterung	37
Tabelle 7: Raumdefinitionen für Berechnung Schutz gegen Luftschall von aussen.....	39
Tabelle 8: SIA 181: Mindestanforderungen an Schutz gegen Luftschall von aussen.....	40
Tabelle 9: Anforderungen Luftschall bei klein bis mässiger Störung durch Aussenlärm	40
Tabelle 10: Luftvolumenströme Zuluft und Abluft, mit M5-Filter und ohne Filter	47
Tabelle 11: Resultate Feinstaub-Messung.....	47
Tabelle 12: Resultate VOC-Messung.....	50
Tabelle 13: Luftwechselraten	53
Tabelle 14: Mittelwerte der Langzeitmessungen (Temperatur, Feuchte, CO ₂).....	54
Tabelle 15: Mittelwerte der Temperaturen und Raumlufffeuchten in Küche und Bad	54
Tabelle 16: Mittel- / Max- / Minimalwerte der CO ₂ Belastung in der Nacht in den Schlafzimmern	55