

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	Bestimmung der Lüftungseffektivität mit Tracermethoden in Räumen unterschiedlicher Nutzung unter Berücksichtigung der Lüfterneuerung (Hygiene) und des Schadstoffabtransports (Sars-CoV-2) BAT G_22_18
Diplomandin/Diplomand	Dübendorfer, Petra
Bachelor-Studiengang	Bachelor Gebäudetechnik Energie
Diplomandin/Diplomand	Ambühl, Nicola
Bachelor-Studiengang	Bachelor Gebäudetechnik Energie
Semester	FS22
Dozentin/Dozent	Huber, Heinrich; Alimpic, Zoran
Expertin/Experte	Glauser, Andreas

Abstract Deutsch

Bei der Revision der SIA 382/1 ist ein informativer Anhang geplant, welcher sich unter anderem mit dem Thema der Lüftungseffektivität auseinandersetzen soll. Die Bedeutung der Lüftungseffektivität hat durch die COVID-19 Pandemie an Bedeutung zugenommen. Der langjährig verfolgte Aspekt der Energieeffizienz ist etwas in den Hintergrund gerückt und es wurde hinterfragt, ob der Weg der richtige ist und die Lüftungsanlagen überhaupt noch einen guten Schutz gegen Krankheitsübertragungen bieten. Das Lüftungssystem kann durch den Luftaustauschwirkungsgrad (Hygiene) und die Lüftungswirksamkeit (Schadstoff) charakterisiert werden. Im amerikanischen und europäischen Raum sind diverse Literaturen vorhanden, welche sich diesem Thema annehmen. Das Normenkomitee stellte sich die Frage, inwiefern diese Werte für die in der Schweiz üblichen Lüftungssysteme übernommen werden können.

In der Arbeit zu Lüftungseffektivität in Räumen unterschiedlichen Nutzung wurden mehrere experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Messresultate mit den vorhandenen Literaturwerten zu vergleichen. Als Ausgangslage standen verschiedene Literaturquellen zu Messmethoden und Kennzahlen zur Verfügung sowie als Vorarbeit zum eingesetzten Tracergas die Bachelor-Thesis, BAT_G_21_07, zur Erprobung des Tracergases HFO-R1234yf. Die experimentellen Untersuchungen basieren auf den in der Schweiz meistverwendeten Luftführungsarten, Mischlüftung und Quellaufströmung, und behandeln den Kühlbetrieb. Um die Kennwerte zu der Lüftungswirksamkeit und zum Luftaustauschwirkungsgrad zu berechnen, werden verschiedenen Messprinzipien mit Tracergas angewendet. Es wurden 3 Versuchsreihen durchgeführt, welche sich durch unterschiedliche Messmethoden unterscheiden und an 2 Prüforten durchgeführt wurden. Als Prüforte kam die Klimakammer im Labor der Hochschule Luzern in Horw und das Sitzungszimmer bei der Firma Durrer Technik AG in Adligenswil zur Anwendung. Die Messmethode für Lüftungswirksamkeit und Luftaustauschwirkungsgrad beruht auf der Step-Down-Methode, bei dieser dient das Abklingen der

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Gaskonzentration für die Berechnung der Kennzahlen. Die lokale Lüftungswirksamkeit beruht auf der Pulsmethode wobei nur für kurze Zeit eine definierte Gasmenge injiziert und über die Messeinrichtungen die Gaskonzentration aufgezeichnet wird. Daraus lassen sich Aussagen zum Schadstoffabtransport des Lüftungssystems machen. Als Messgeräte wurden zwei Gasanalytoren mit unterschiedlichen Messprinzipien eingesetzt und zur Beurteilung von möglichen Komfortproblemen hinsichtlich von Zugluft, wurden Strömungsmesssonden verwendet. Aus den Auswertungen geht hervor, dass sich die Kennzahlen für die Quelllüftung im Bereich einer homogenen Mischlüftung befanden und leicht unter den Literaturwerten lagen. Die hohen Lüftungswirksamkeiten aus der Literatur konnten durch die in der Schweiz üblichen kleinen Luftwechselzahlen nicht erreicht werden. Zusätzlich spielt die Raumform eine grosse Rolle bei der Lüftungseffektivität. Die Kennzahlen der Messungen der Mischlüftung lagen im Bereich der Literaturwerte und können so übernommen werden.

Das Thema Lüftungseffektivität konnte mit dieser Bachelor-Thesis nicht abschliessend behandelt werden. Es ist klar eine Tendenz ersichtlich, in welchen Bereichen sich die Kennwerte befinden könnten. Um spezifische Werte für den informativen Anhang der SIA 382/1 zu definieren, sind weiterführende Untersuchungen unerlässlich.

Abstract English

In the revision of SIA standard 382/1, an informative appendix is planned, which should deal with the topic of ventilation effectiveness. The importance of ventilation effectiveness has increased due to the COVID-19 pandemic. The aspect of energy efficiency, which has been pursued for many years, has receded somewhat into the background and it was questioned whether the path is the right one and whether the ventilation systems still offer good protection against disease transmission. The ventilation system can be characterized by the air change efficiency (hygiene) and the contaminant removal effectiveness (pollutant). In the American and European area, there are various literatures that deal with this topic. The standards committee asked itself how these values can be adopted for the ventilation systems which are common in Switzerland.

In this work on ventilation efficiency, several experimental studies were carried out in different rooms. The aim is to compare the measurement results with the existing literature values. As a basis, various sources of literature on measurement methods and indicators were available. There was also a bachelor thesis available, which dealt with the use of the tracer gas HFO-R1234yf for measurement purposes. The experimental investigations are based on the types of ventilation most common in Switzerland. These are mixing and displacement ventilation in cooling operation. To calculate the different values for contaminant removal effectiveness and air change efficiency, various measuring principles with tracer gas are used. 3 series of experiments were carried out, which differ due to different measurement methods and were carried out at 2 test locations. The climate chamber in the laboratory of the Lucerne University of Applied Sciences and Arts in Horw and the meeting room at the company Durrer Technik AG in Adligenswil were used as test locations. The measurement method for contaminant removal and air change is based on the step-down method, in which the decay of the gas concentration is used to calculate the indicators. The local contaminant removal is based on the pulse method. In which a defined quantity of gas is only injected for a short time and the gas concentration is recorded by the measuring devices. This allows statements about the effectiveness of the pollutant transport of the ventilation system. Two gas analyzers with different measuring principles were used as measuring devices for the gas concentration and flow measurements were used to evaluate possible comfort problems related by drafts.

The evaluations show that the indicators for the displacement ventilation were in the range of a homogeneous mixing ventilation and were slightly below the literature values. The high ventilation effectiveness from the literature could not be reached due to the low air exchange rates that are common in Switzerland. In addition, the shape of the room plays an important role in ventilation effectiveness. The indicators of the mixing ventilation measurements were in the range of the literature values and can be taken over for Switzerland.

The topic of ventilation effectiveness could not be treated conclusively with this bachelor thesis. A trend can be seen in which areas the indicators could be. To define specific values for the informative appendix of SIA standard 382/1, further investigations are essential.

Ort, Datum

Horw, 10.06.2022

© **Petra Dübendorfer; Nicola Ambühl, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Aufgabenstellung	2
3.	Zielsetzung	3
4.	Abgrenzung	4
5.	Vorgehen & Methoden	5
6.	Grundlagen	6
6.1	Kennzahlen	6
6.2	Luftführungsarten	15
6.3	Messmethode	17
7.	Messtechnik	20
7.1	Photoakustische Multigasanalytatorplattform - GASERA ONE	20
7.2	FTIR-Gasanalytator - Gaset DX4015	21
7.3	Mehrpunkt-Strömungsmesssonden – Dantec ComfortSense	22
7.4	Massendurchflussregler für Gas - Bronkhorst	23
8.	Versuchsreihe 1 – Konstantdosierung	24
8.1	Messaufbau und Ablauf	24
8.2	Rahmenbedingungen	27
8.3	Auswertung Messungen	28
9.	Versuchsreihe 2 – Pulsdosierung	39
9.1	Messaufbau und Ablauf	39
9.2	Rahmenbedingungen	42
9.3	Auswertung Messungen	43
10.	Versuchsreihe 3 - Sitzungszimmer Durrer Technik	51
10.1	Messaufbau und Ablauf	51
10.2	Rahmenbedingungen	54
10.3	Auswertung Messungen	55
11.	Diskussion	61
11.1	Zulufttemperatur	61
11.2	Heiz- und Kühlbetrieb	62
11.3	Kennzahlenvergleich zu Literatur	64
11.4	Energieeffizienz vs. Schadstoffabtransport	66

11.5 Exkurs zu Covid-19	67
12. Schlussfolgerung.....	68
13. Empfehlung für weiterführende Untersuchungen	69
13.1 SIA 382/1 informativer Anhang	69
13.2 Durchführung Messung	70
Danksagung	72
Abkürzungsverzeichnis.....	73
Abbildungsverzeichnis.....	74
Tabellenverzeichnis	76
Literatur- und Quellenverzeichnis	77
Anhang.....	80

1. Einleitung

Der Mensch verbringt 90 % seines Lebens in geschlossenen Räumen. Ohne Belüftungsstrategie ist oftmals die Luftqualität in Innenräume schlechter als im Freien. Grund dafür sind chemische Schadstoffe aus Baumaterial, neue Möbel und im Büro Bereich Tonerpartikel. Durch die COVID-19 Pandemie ist das Bewusstsein für Viren in geschlossenen Räumen gestiegen. Vor der COVID-19 Pandemie war bei der Planung einer lufttechnischen Anlage die Regel möglichst geringer Frischluftvolumenstrom in den Raum einzubringen. Der Fokus lag dabei auf die Energieeffizienz, da der Energiebedarf der Gebäudetechnik der Hauptenergiebedarf eines Gebäudes ausmacht und somit hohe Betriebskosten verursacht. Zusätzlich bedeutet hoher Energiebedarf vermehrter Treibhausgasausstoss. Die Anforderung zu Frischluftvolumenstrom wächst somit von möglichst geringen Luftvolumenstrom (Energieeffizient) zu hohe Luftvolumenstrom für einen möglichst guten Schadstoffabtransport (Gesundheit). Die Lüftungseffektivität ist eine gute Bewertungsgrösse für diese beide Anforderungen zum Frischluftvolumenstrom. Das Lüftungssystem kann charakterisiert werden durch den Luftaustauschwirkungsgrad (Hygiene) und die Lüftungswirksamkeit (Schadstoff) und daraus lässt sich auf die Lüftungseffektivität schliessen. Die Literaturwerte für Lüftungseffektivität können nicht aus den European Guidebooks auf schweizerische Verhältnisse übernommen werden, da mit anderen Luftwechselraten und Luftführungssysteme angewandt werden. Ziel ist es, die Lüftungseffektivität mit Hilfe von Tracermethoden in Nicht-Wohnräume unter Berücksichtigung des Luftaustausches und des Schadstoffabtransports zu bestimmen. Hierzu werden unterschiedliche Räume und Luftführungen durch Einsatz des Tracergases HFO-R 1234yf untersucht. Der Schwerpunkt liegt bei Nutzung Büro mit Mischlüftung oder Quelläftung. Die experimentellen Untersuchungen für den Kennzahlenvergleich finden in der Klimakammer IGE in Horw und im Sitzungszimmer der Firma Durrer Technik AG in Adligenswil statt. In der Thesis wird die Grundlagen zu Kennzahlen, Luftführungsarten und Messmethoden nähergebracht. Die verwendete Messtechnik wird vorgestellt und die Anwendung ist in den Versuchsreihen wieder gegeben. Die Versuchsreihe sind gegliedert in Konstantdosierung und Pulsdosierung in der Klimakammer sowie der Messtag im Sitzungszimmer. Die Versuchsreihen bestehen aus Messaufbau, Rahmenbedingung und Auswertung. Für die Erkenntnisse zu Lüftungseffektivität zu vertiefen, werden Diskussionen geführt zu Heiz- / Kühlbetrieb sowie zum Spannungsfeld zu Energieeffizienz und Schadstoffabtransport. Zuletzt folg eine Schlussfolgerung zu der Thesis sowie weiter Empfehlungen zum informativen Anhang der SIA 382/1 und Durchführung von Messungen.

2. Aufgabenstellung

Nachfolgend wird die offizielle Aufgabenstellung zur Bachelor-Thesis G_22_18 zitiert von der Hochschule Luzern – Institut Gebäudetechnik und Energie, 2022.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Lüftungseffektivität mit Tracermethoden in Räumen unterschiedlicher Nutzung unter Berücksichtigung des Luftaustausches (Hygiene), des Schadstoffabtransports und des Übertragungsrisikos (Sars-CoV-2) zu bestimmen. Hierzu werden Nicht-Wohnräume durch Einsatz des neuen Tracergases HFO-R 1234yf mit Mehrpunktsampling untersucht. Bei den experimentellen Untersuchungen soll die Lüftungswirksamkeit ϵ_C zuerst bei Auslegungsbedingungen bestimmt werden. Bei weiteren Messungen wird der Luftvolumenstrom, sofern technisch möglich so weit reduziert, bis entweder die Lüftungswirksamkeit unter 1 liegt oder der Standardwert des Luftvolumenstroms der SIA 2024:2021 unterschritten ist.

In einer ersten Phase werden Messungen in der Klimakammer des Labors Gebäudetechnik der HSLU, T&A durchgeführt. Neben der Einarbeitung in die Messtechnik, sollen Situationen nachgebildet und gemessen werden, die einem Büroraum mit der Grundfläche der Klimakammer entsprechen. Dabei sollen drei unterschiedliche Luftführungen untersucht werden:

- Mischlüftung
- Quelllüftung
- Statisches Kühlelement kombiniert mit Zuluftdurchlass

Die Firma Durrer-Technik AG stellt den Quellluftdurchlass, den Drallauslass und das statische Kühlelement zur Verfügung. Die Auslegung dieser Komponenten erfolgt durch die Studierenden in Rücksprache mit der Firma Durrer-Technik AG. Bei der Mischlüftung wird vom gleichen Auslegungsluftvolumenstrom wie bei der Quelllüftung ausgegangen.

In einer zweiten Phase sind Messungen in realen Räumen vorgesehen. Dazu steht ein Sitzungszimmer mit Quelllüftung der Firma Durrer-Technik AG zur Verfügung. Eine weitere Option wird durch den Industriepartner und die Betreuung noch geprüft. Allenfalls kommt auch eine Messung infrage, die mit Untersuchungen der BAT G_22_03 kombiniert wird.

Bei allen untersuchten Fällen werden folgende Kennwerte ausgewiesen:

- Lüftungswirksamkeit ϵ_C
- Luftaustauschwirkungsgrad η_L
- Wirksamkeit bezüglich der Vermeidung von Schadstoffübertragungen

3. Zielsetzung

An den erforderlichen Frischluftvolumenstrom werden unter Berücksichtigung hygienischer und energetischer Anforderungen sowie durch die COVID-19 Pandemie zusätzliche gesundheitliche Anforderungen gestellt. Die Anforderungen erzeugen teilweise Spannungsfelder zueinander. Die Energieeffizienz fordert möglichst geringe und bedarfsgerechte Luftvolumenströme. Die gesundheitlichen Aspekte benötigen hohe Luftvolumenströme für einen möglichst guten Schadstoffabtransport. Das Lüftungssystem kann durch den Luftaustauschwirkungsgrad η_L (Hygiene) und die Lüftungswirksamkeit ϵ_C (Schadstoff) charakterisiert werden und stellt die Kennzahlen der Lüftungseffektivität ϵ_V dar.

Eines der Ziele ist es, die meistverwendeten Luftführungsarten Mischlüftung und Quelllüftung, mit Hilfe von Tracergas, bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen hinsichtlich der Lüftungswirksamkeit ϵ_C und des Luftaustauschwirkungsgrades η_L , zu vergleichen. Die Luftvolumenströme sind Anhand des Stands der Technik (100m³/h), des Merkblattes SIA 2024 (70m³/h) und des reduzierten Luftvolumenstroms gemäss SIA 382/1 Ziffer 2.2.6.5 (35m³/h) gewählt worden. Gemäss der SIA 382/1 darf der Luftvolumenstrom bei tiefen und hohen Aussenlufttemperaturen (Aussenlufttemperatur unter 0°C und über 25°C) bis zu 50% reduziert werden. Die durch die Messversuche erhaltenen Kennwerte werden untereinander und mit denen in vorhandenen Literaturen verglichen. «Bei der laufenden Revision der SIA 382/1 wurde festgestellt, dass die Literaturwerte nicht einfach auf schweizerische Verhältnisse angewendet werden können.» (Hochschule Luzern - Institut Gebäudetechnik und Energie, 2022) Bei dieser Problemstellung zur SIA 382/1 werden die Kennzahlen aus der Literatur analysiert. Der Fokus liegt dabei, auf welchen Grundlagen die Kennzahlen entstanden sind und ob sie auf schweizerische Verhältnisse angewendet werden können. Zusätzlich wird eine Empfehlung ausgearbeitet zum Vorgehen für den informativen Anhang der SIA 382/1. Der lokale Schadstoffabtransport im Aufenthaltsbereich wird zusätzlich über die Pulsmethode gemessen und berechnet, da die Thematik durch die COVID-19 Pandemie grosse Aufmerksamkeit erhalten hat. Ziel ist dabei, plausible Messwerte zu den lokalen Schadstoffabtransporten zu erhalten und eine Empfehlung fürs weitere Vorgehen der Messmethodik zu erarbeiten. Um die Kennzahlen zu ermitteln, werden Messmethoden mit Tracergas und Mehrpunktsampling angewendet. Dabei wird das Wissen der Bedienbarkeit der Messgeräte sowie die zugehörige Methodik angeeignet. Mögliche Komfortprobleme sollen hinsichtlich Zugluft aufgezeigt und die Raumluftströmungen in den Betrachtungen mitberücksichtigt werden. Eine Interpretation zu Heizbetrieb wird ausgearbeitet, da die Versuchsreihe anhand einer Übergangszeit mit Kühlbetrieb aufgebaut ist.

4. Abgrenzung

Für die Bearbeitung der Bachelor-Thesis stand ein Semester mit einem vorgesehenen Umfang von 360 Stunden pro Person zur Verfügung und die Thesis zu Lüftungseffektivität wurde durch zwei Diplomanden erarbeitet. Das Thema der Aufgabenstellung hat einen grösseren Umfang, als in diesen 720 Stunden bearbeitbar war. Aus diesem Grund wird eine Abgrenzung deklariert, um den Fokus der Thesis näher zu bringen. Der Tiefgang der Literaturrecherche basiert auf Grundlagenwissen, um die Versuchsreihen durchzuführen und die Kennzahlen berechnen und auswerten zu können. Für eine vertiefte Literaturrecherche und einen umfangreichen Vergleich der Kennzahlen war der Zeitrahmen zu knapp. Das Lüftungssystem wird jeweils mit Aussenluft betrieben und die Betrachtungsweise mit Umluft entfällt. Die in der Aufgabenstellung beschriebenen reduktionsschritte für den Luftvolumenstrom konnten nicht wie vorgegeben realisiert werden. Aufgrund der kleinen Anzahl an möglichen Messungen, wurden vorgängig die Luftvolumenströme definiert und aufgrund der Höhe der Kennzahlen. Ausgehend von der Luftmenge gemäss dem SIA Merkblatt 2024, wurden für die Messungen der Lüftungswirksamkeit höhere und tiefere Volumenströme definiert. Die effektiv gewählten Luftvolumenströme sind in den verschiedenen Kapiteln zu den Messreihen aufgeführt. Zu Anfang der Thesis stand zusätzlich eine Feldmessung, eine weitere Option zum Sitzungszimmer bei der Firma Durrer Technik, zur Diskussion. Aus Zeitmangel, da die Versuchsreihe mit den Pulsdosierungen in der Klimakammer wiederholt werden musste, entfiel diese Option. Als Möglichkeit für eine zusätzliche Messung stand die Idee im Raum, eine Untersuchung mit der Bachelor-Thesis BAT G_22_03 durchzuführen. Der Arbeitsstand der beiden Arbeiten war jedoch bereits früh sehr verschieden und der Fokus blieb auf der Hauptaufgabenstellung. Aufgrund der begrenzten Zeit im Labor IGE, der Reservation der Messgeräte sowie des Prüfungsorts, konnte keine Messung zur Untersuchung des Heizbetrieb durchgeführt werden.

5. Vorgehen & Methoden

Das Vorgehen und die Methoden dienen zum Erreichen der Aufgabenstellung und widerspiegeln die Lösungsstrategie zum Erreichen der Zielsetzung. In der Aufgabenstellung sind sehr offen gehaltene Ziele formuliert. Diese sind konkretisiert und zusätzlich neu definiert worden. Die Zielsetzung half den Inhalt der Thesis zu erfassen und eine Grobstruktur für die zu bearbeitenden Themenfelder aufzubauen. Mit der zeitlichen Abfolge der Themenfelder ist das Terminprogramm entstanden, bei dem die Meilensteine wie Präsentation, Besprechungen und Abgaben integriert wurden. Für eine reibungslose Vorbereitung des Ablaufs der Versuchsreihen wurde möglichst schnell Kontakt zu den involvierten Personen und Firmen hergestellt. Nebenbei lief die Literaturrecherche, um das benötigten Basiswissen von den Messprinzipien bis hin zur Berechnung der Kennzahlen zu erhalten. Der wesentliche Fokus der Recherchen lag auf den Messmethoden Step-Down und Puls sowie bei den Definitionen und Höhen der Kennzahlen des Luftaustauschwirkungsgrads und der Lüftungswirksamkeit. Für eine reibungslose Versuchsdurchführung ist es unabdingbar, die benötigten Messgeräte bedienen zu können und ein Gefühl für das Handling zu erhalten. Das Wissen zur Bedienung der Gasanalysatoren, der Massendurchflussregler für das Tracergas, der Strömungsmesssonden und des Prozessleitsystems (PLS) ist vor den Versuchsreihen angeeignet worden. Mit den Testmessungen ist die angewandte Messtechnik erprobt worden und half beim Planen des weiteren Versuchsverlaufes. Es wurden drei Versuchsreihen konstruiert, davon fanden zwei in der Klimakammer des Labors IGE in Horw und eine im Sitzungszimmer der Firma Durrer Technik AG in Adligenswil statt. Der Messaufbau mit der Prüfeinrichtung sowie die Reihenfolge der unterschiedlichen Messungen wurde vorgängig geplant. Detailliertere Angaben zum Aufbau der Versuchsreihen sind in den Berichten des jeweiligen Versuchs vorhanden. Von Versuchsreihe zu Versuchsreihe sind anhand Reflektierens der Messergebnisse und Erkenntnisse des Messablaufs Ausbesserungen im Aufbau und bei der Durchführung vorgenommen worden. Die Messergebnisse der Versuche sind durch die Kennzahlenvergleiche der Literaturen plausibilisiert und falls sinnvoll mit Messunsicherheiten ausgewiesen worden. Die Auswertung der Messresultate basiert auf der Gaskonzentrationskurve sowie den Berechnungsformeln zu der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades. Damit lassen sich Aussagen hinsichtlich Effektivität der Raumbelüftung machen. Für ein Reflektieren der Thesis wird in der Schlussfolgerung auf die wichtigsten Erkenntnisse eingegangen, weitere Diskussionen angestossen und eine Empfehlung für weiterführende Betrachtungen abgegeben.

6. Grundlagen

Als grundlegende Literatur der Theorie und der Messmethodik gelten die REHVA Guidebooks No. 2 (Mundt et al., 2004), No. 19 (Müller, 2013) und ASHRAE Standard 62.1 User's Manual (ASHRAE 62.1, 2016). Im deutschsprachigen Raum dient zur Lüftungseffektivität die Veröffentlichung von KI Luft und Kältetechnik (Wildeboer & Müller, 2006). Im Kapitel Grundlagen werden die relevanten Kennzahlen, die Luftführungsarten und Messmethoden vorgestellt.

6.1 Kennzahlen

Das Thema rund um die Effektivität einer Raumbelüftung wird als Lüftungseffektivität bezeichnet und umfasst im Wesentlichen drei Kennzahlen. Es ist der Luftaustauschwirkungsgrad, die Lüftungswirksamkeit und die Wirksamkeit bezüglich der Vermeidung von Schadstoffübertragungen vorhanden. Als Kennzahl sind sie aussagekräftig, messbar und reproduzierbar. Die Kennzahlen stehen in Abhängigkeit zueinander, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

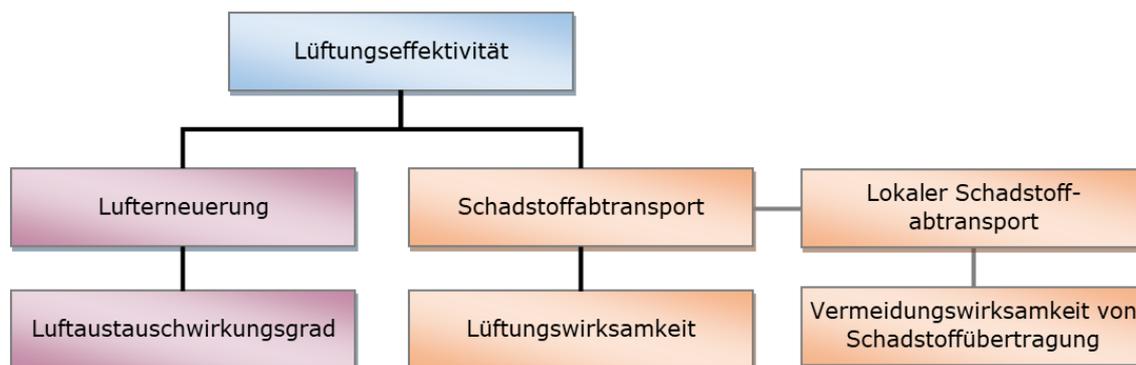


Abbildung 1: Abhängigkeit der Begrifflichkeiten

Zusätzlich werden die Raumluftrömungen in Hinblick auf Zugluft und mögliche Behaglichkeitsprobleme betrachtet und die Anzahl an unzufriedenen ausgewiesen. In einem Büroraum mit mechanischer Lüftung sollte die Anzahl an Unzufriedenen unter 15% liegen. Um auch thermisch einen gewissen Komfort zu erreichen, darf die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Knöchel eine maximale Differenz von 3.3 Kelvin aufweisen.

6.1.1 Lüftungseffektivität ϵ_V

Die Lüftungseffektivität definiert die Eigenschaft des Lüftungssystems hinsichtlich der Luftführung und des Luftaustausches im Raum. Es beschreibt, wie wirksam der gegebene Luftvolumenstrom im Aufenthaltsbereich eines Raumes ist und dabei die verbrauchte Raumluft und Schadstoffe abführt. Die Lüftungseffektivität setzt sich zusammen aus den Aspekten der Lüfterneuerung (in der Abbildung 1 violette) und des Schadstoffabtransports (in Abbildung 1 orange). Durch diese Unterteilung kann das Lüftungssystem spezifischer auf Lufthygiene und Schadstoffbelastung beurteilt werden. Ein wesentlicher Einfluss auf die Lüftungseffektivität hat die Luftführung im Raum und wird im Kapitel 6.2 weiter erläutert. In der nachfolgende Abbildung 2 ist das Zusammenspiel der Lüftungswirksamkeit und Luftaustauschwirkungsgrad ersichtlich welche die Lüftungseffektivität darstellen.

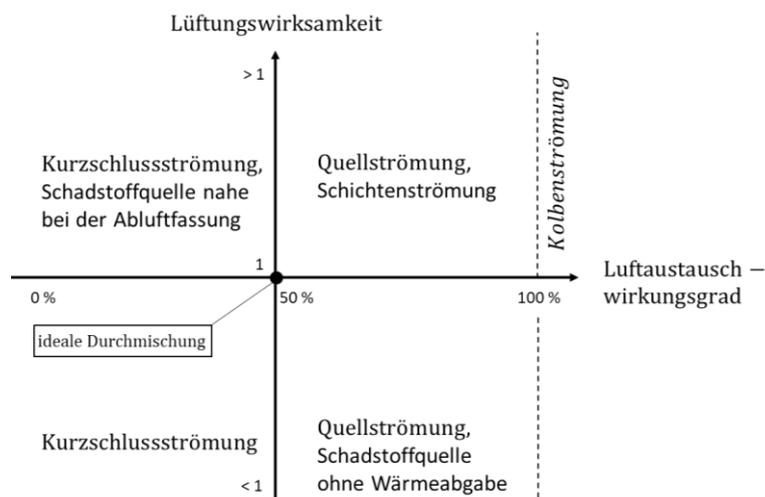


Abbildung 2: Zusammenspiel der Kennzahlen

6.1.2 Luftaustauschwirkungsgrad η_L

Der Luftaustauschwirkungsgrad ist definiert aus der durchschnittlichen Verweilzeit τ_v und der kürzest möglichen Verweilzeit τ_n im Raum. Die Einflussfaktoren sind der Frischluftvolumenstrom, das Raumvolumen und die Verweilzeit der Luft, welche durch die Luftführungsart bestimmt wird. Das Messverfahren beruht auf der Tracer Step-Down-Methode. Dabei wird für die Ermittlung der kürzest möglichen Verweilzeit die Summe aus dem Verhältnis der Gaskonzentrationen zum jeweiligen Zeitpunkt in der Abluft, der Grösse des Zeitschrittes zwischen den Messungen und der Konzentration zu Beginn der Messung gebildet.

Die durchschnittliche Verweilzeit im Raum wird über die vorhandene Gaskonzentration in der Abluft, den Zeitschritten zwischen den Messungen und den Zeitpunkten im Messvorgang berechnet.

Die mit Tracergas angereicherte Zuluft tritt bei Punkt 1 in den Raum ein und erreicht nach einer Verweilzeit die Position des Empfängers. Die Luft strömt weiter Richtung Abluffassung, dabei kann die Frischluft vom Raumeintritt (1) bis Raumaustritt (3) unterschiedliche Wege nehmen. Ein Luftführungssystem hat einen hohen Luftaustauschwirkungsgrad, wenn die durchschnittliche Verweilzeit der Luft im Raum möglichst nahe bei der kürzest möglichen Verweilzeit liegt.

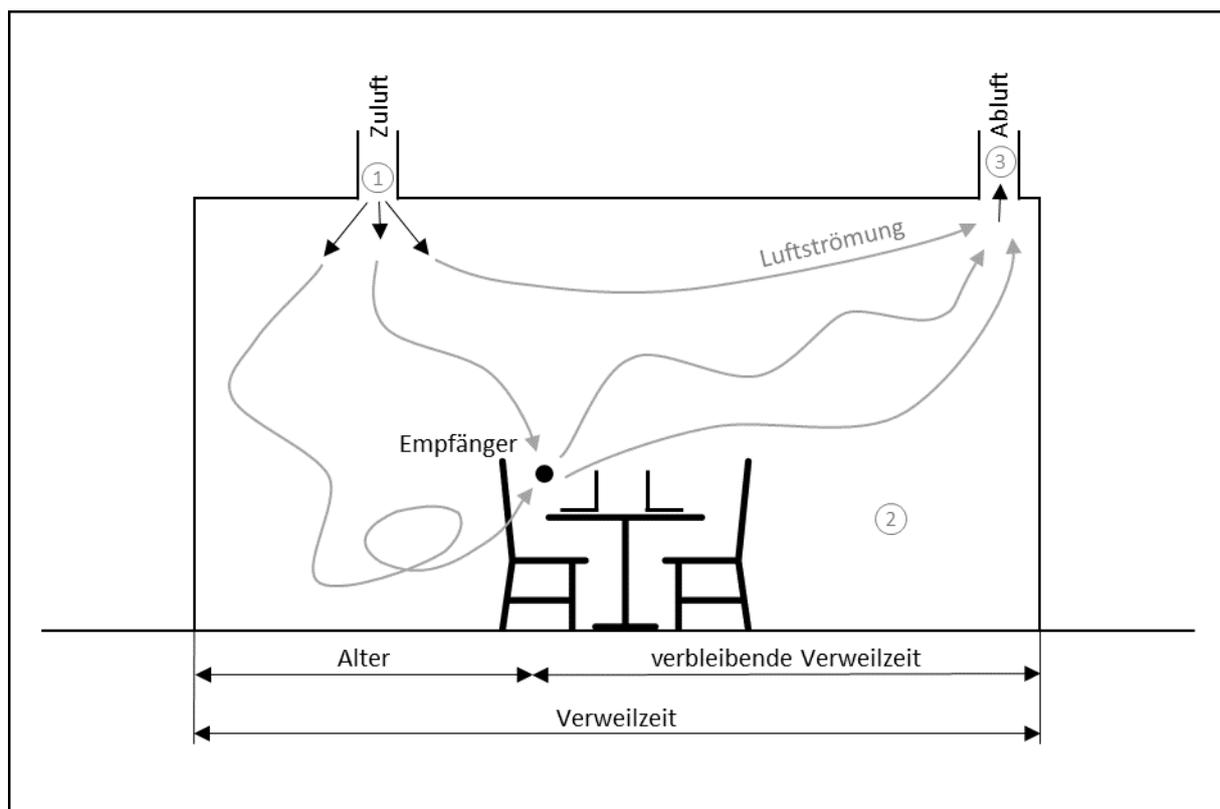


Abbildung 3: Luftstrompfade zum Punkt Empfänger

Bei der Step-Down Methode wird durch die Messung der Tracergaskonzentration, während einer Stunde, die Abklingkurve ersichtlich und der Luftaustauschwirkungsgrad kann berechnet werden.

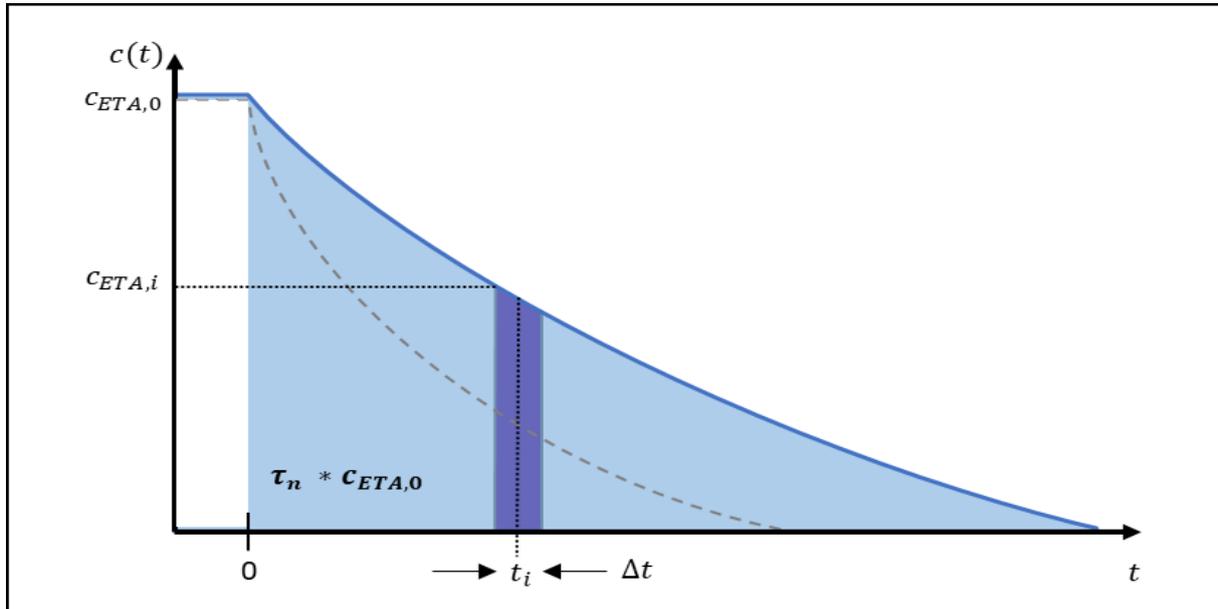


Abbildung 4: Abklingkurve bei Betrachtung von Luftaustauschwirkungsgrad

Formelzusammenstellung:

$$\tau_n = \frac{V_R}{q_{v,a,SUP}} = \sum \left(\frac{c_{ETA,i}}{c_{ETA,0}} * \Delta t \right)$$

$$\tau_V = 2 * \langle \bar{\tau} \rangle = 2 * \frac{\sum (t_i * c_{ETA,i} * \Delta t)}{\sum (c_{ETA,i} * \Delta t)}$$

$$\eta_L = \frac{\tau_n}{\tau_V} * 100\%$$

$c_{ETA,0}$	Verunreinigungskonzentration der Abluft am Punkt 0 [ppm]
$c_{ETA,i}$	Verunreinigungskonzentration der Abluft am Punkt i [ppm]
Δt	Zeitschritt [h]
η_L	Luftaustauschwirkungsgrad [%]
$q_{v,a,SUP}$	Volumenstrom Zuluft [m^3/h]
t_i	Zeitpunkt i [h]
τ_n	kürzest mögliche Verweilzeit [h]
τ_V	durchschnittliche Verweilzeit im Raum [h]
$\langle \bar{\tau} \rangle$	mittleres Alter der Raumluft [h]
V_R	Raumvolumen [m^3]

Der Luftaustauschwirkungsgrad ist hauptsächlich abhängig von der Luftführungsart und des Zuluftvolumenstroms. In der Literatur werden die Werte zum Luftaustauschwirkungsgrad mit identischen Begrifflichkeiten beschrieben, wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich ist. Die Literaturwerte werden jeweils nur nach Luftströmungsart unterschieden und es sind keine weiteren Rahmenbedingungen wie Temperatur oder Luftwechselzahl ausgewiesen.

Tabelle 1: Literaturvergleich von Luftaustauschwirkungsgrad

REHVA Guidebook No. 2 Ventilation Effectiveness (2004)	
ideale Kolbenströmung	100 %
Verdrängungslüftung	$50 \% \leq \eta_L \leq 100 \%$
vollständige Durchmischung	50 %
Kurzschlussströmung	$\leq 50 \%$
KI Lüftungseffektivität Was ist Lüftungseffektivität? 2. Teil (1988)	
unidirektionale Strömung ideale Kolbenströmung	100 %
Verdrängungslüftung	$50 \% \leq \eta_L \leq 100\%$
ideale Durchmischung	50 %
Kurzschlussströmung	$0 \% \leq \eta_L \leq 50 \%$

6.1.3 Lüftungswirksamkeit ϵ_C

Die Lüftungswirksamkeit ist eine Beurteilungsgrösse für die Schadstoffbeseitigung in Bezug auf Schadstoffkonzentration aus Zuluft, Abluft und im Raum. Die Lüftungswirksamkeit beschreibt die Art und Weise, wie sich die Zuluft und die Raumluft in der Aufenthaltszone vermischt. Die Luftbewegung im Raum wird durch das Zusammenspiel vom Impuls der eintretenden Zuluft und den konvektiven Strömungen erzeugt. Es werden drei Strömungsarten unterschieden: Verdrängungsströmung, vollständige Durchmischung und die Kurzschlussströmung. Das Messverfahren beruht auf der Tracer Step-Down-Methode.

Eine Lüftungswirksamkeit von 1 bedeutet, dass eine homogene Mischung der Raumluft vorhanden ist. Bei einem Wert von 0 wird die Belastung nicht abgeführt, dies kann auf eine Kurzschlussströmung zurückzuführen sein. Ein Wert über 1 bedeutet, die Schadstoffe werden effizienter abgeführt als bei einer Mischlüftung. Die Verdrängungsströmung kann Werte grösser als 1 erreichen. Es gilt: Je höher der Wert ist, desto besser ist die Wirksamkeit des Schadstoffabtransportes.

Bei einer homogenen Durchmischung der Raumluft ist die Lüftungswirksamkeit $\epsilon_C = 1$ und der Luftaustauschwirkungsgrad $\eta_L = 0.5$.

Formelzusammenstellung:

$$\varepsilon_C = \frac{c_{ETA} - c_{SUP}}{c_{IDA} - c_{SUP}} = [-]$$

ε_C	Lüftungswirksamkeit [-]
c_{ETA}	Verunreinigungskonzentration Abluft [ppm]
c_{IDA}	Verunreinigungskonzentration Raumlufte [ppm]
c_{SUB}	Verunreinigungskonzentration Zuluft [ppm]

Aus dem technischen Bericht zu Energieeffizienz von Gebäuden, PD CEN/TR, gehen folgende Kennzahlen bei Kühl- und Heizbetrieb hervor. Die Lüftungswirksamkeit wird nach Luftführungsart ausgewiesen.

Tabelle 2: Literaturvergleich von Lüftungswirksamkeit nach Luftführungsart

PD CEN/TR (2017)		
Luftführungsart	Kühlbetrieb	Heizbetrieb
turbulenzarme Verdrängungslüftung	1.0 - 2.0	0.2 – 0.7
horizontaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.8 – 1.0
vertikaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.6 – 0.8

Die Kennzahlen vom ASHRAE Standard 62.1 User's Manual (ASHRAE 62.1, 2016) beziehen sich auf einen Kühlbetrieb und sind nach Nutzung ausgewiesen. Die Zuluft Temperaturen liegen je nach Nutzung zwischen 16.5 °C und 17.0°C und die Luftwechselzahlen liegen mit dem 3.0 bis 8.0-fachen Raumvolumen pro Stunde wesentlich höher als nach dem SIA Merkblatt 2024.

Tabelle 3: Literaturvergleich von Lüftungswirksamkeit nach Nutzung

Standard 62.1 User's Manual (2016)		
Nutzung	TDV System Quelllüftung	Mischlüftung
Büro	1.15 [-]	-
Schulzimmer	1.30 [-]	-
Restaurant	1.45 [-]	-
Werkstätten	1.90 [-]	-
Verkauf	1.50 [-]	-
Hörsaal	2.05 [-]	-
Nutzungsunabhängig	1.20 [-]	0.70 - 1.00

Hinsichtlich Zuluft Temperatur ist das ASHRAE Standard 62.1 User's Manual (ASHRAE 62.1, 2016) vergleichbar mit dem schweizerischer Planungsstandard. Für den Vergleich von Luftwechselzahlen im Raum wird die nachfolgende Tabelle herangezogen.

Tabelle 4: Literaturvergleich von Luftwechsel

Nutzung	Standard 62.1 User's Manual (2016)	SIA Merkblatt 2024 (2021)	Planungshilfe Lüftungstechnik (2011)
	Indiana (USA)	Schweiz	Deutschland
Büro	8.0 [h ⁻¹]	0.9 [h ⁻¹]	3 - 6 [h ⁻¹]
Schulzimmer	6.0 [h ⁻¹]	2.4 [h ⁻¹]	3 - 8 [h ⁻¹]
Restaurant	6.0 [h ⁻¹]	4.8 [h ⁻¹]	6 - 8 [h ⁻¹]
Werkstätten	2.5 [h ⁻¹]	0.5 [h ⁻¹]	3 - 6 [h ⁻¹]
Verkauf	5.5 [h ⁻¹]	0.5 [h ⁻¹]	4 - 8 [h ⁻¹]
Hörsaal	3.0 [h ⁻¹]	3.2 [h ⁻¹]	8 - 10 [h ⁻¹]

Es ist offensichtlich, dass die schweizerische Planung von einer geringeren Luftwechselzahl pro Stunde ausgeht als das ASHRE Standard 62.1 User's Manual (ASHRAE, 2016) und die Planungshilfe Lüftungstechnik aus Deutschland. Die Luftwechselzahl ist nicht direkt im SIA Merkblatt 2024 ausgewiesen und wird für die tabellarische Übersicht aus dem hygienischen Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche und der Raumhöhe errechnet.

Berechnungsformel zu SIA Merkblatt 2024:

$$Lw = \frac{q_{V,e}}{h_r} = [h^{-1}]$$

L_W Luftwechsel [h⁻¹]

$q_{V,e}$ hygienischen Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche [m³/(h*m²)]

h_r Raumhöhe [m]

6.1.4 Lokale Lüftungswirksamkeit mit Pulsdosierung $\epsilon_{C,i}$

Der Unterschied zur vorherigen Lüftungswirksamkeit ist, dass die Emissionsquelle lokal im Raum ist und eine definierte Menge Tracergas für eine gewisse Zeit ausgestossen wird. Bei der Lüftungswirksamkeit mit Pulsdosierung wird das Lüftungssystem hinsichtlich Schadstoffübertragung von einer Quelle zu einem Empfänger im Aufenthaltsbereich beurteilt. Je nach Luftführungsart (1) breitet sich die Schadstoffe, Tracergas, unterschiedlich im Raum aus, dabei können die Schadstoffe im Raum (2) verdünnt oder abgeführt werden. Bei einer homogenen Durchmischung mit der Raumluft, ist die Konzentration in der Abluft (3) gleich gross wie die im Raum und die Lüftungswirksamkeit liegt bei 1. Bei einem Schadstoffabtransport mit geringer oder keiner Durchmischung mit der Raumluft, ist die Konzentration in der Abluft höher als im Raum und die Wirksamkeit liegt über 1. Bei einem Wert von 0 wird die Belastung nicht abgeführt. Dabei handelt es sich um eine Kurzschlussströmung, wobei die Frischluft ohne Raumwirksamkeit direkt wieder abgeführt wird. Es gilt: Je höher der Wert ist, desto besser ist die Wirksamkeit des Schadstoffabtransportes.

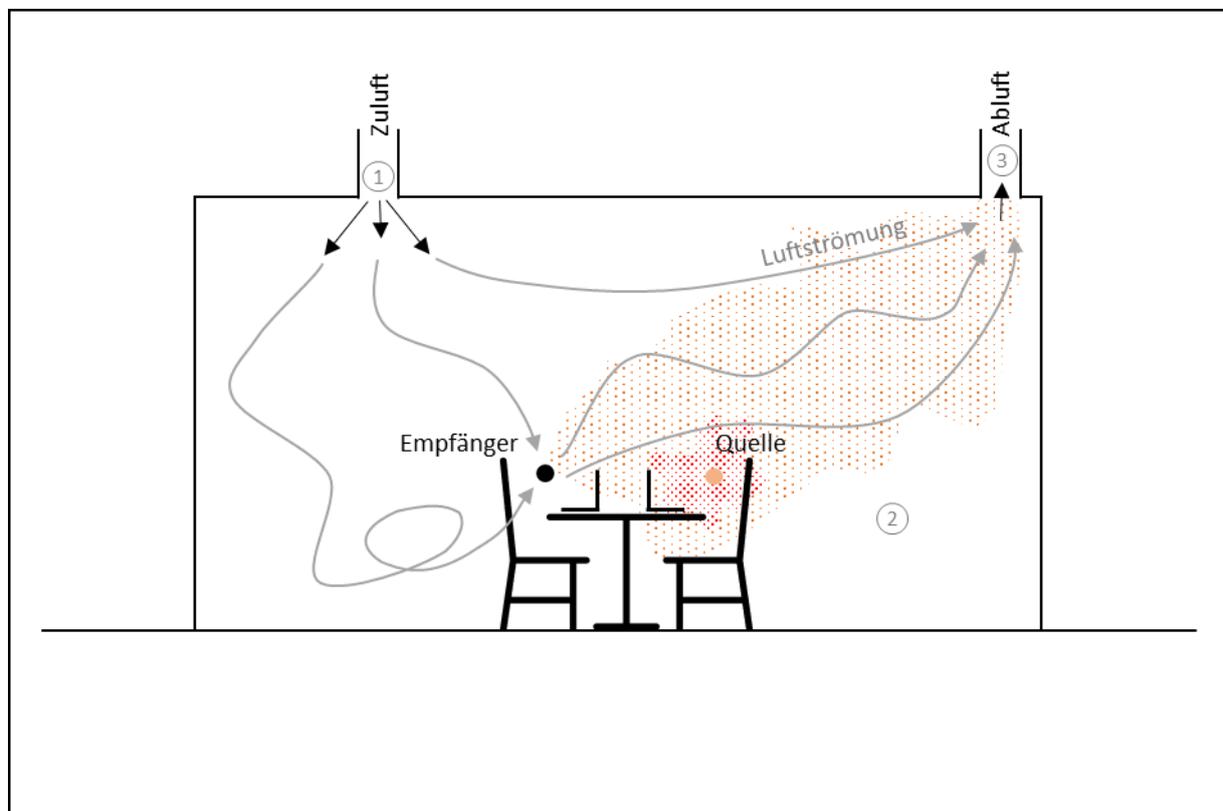


Abbildung 5: Luftstrompfade und Schadstoffströmung im Raum

Ein Literaturvergleich zu Lüftungswirksamkeit mit Pulsdosierung ist nicht möglich, da diese Methode geringe Anwendung findet und erst kürzlich durch die COVID-19 Pandemie mehr Aufmerksamkeit erhalten hat.

Die Höhe der Kennzahl wird in Luftführungsarten unterteilt. Die Verdrängungslüftung erreicht Werte über 1, die Mischlüftung rund um 1 und bei einer Kurzluftströmung liegt der Wert der lokalen Lüftungswirksamkeit nahe 0. (Frei et al., 2022)

Die zugehörige Formel stammt aus dem Bericht «Determination of ventilation effectiveness with tracer gas methods under COVID-19 conditions» zum REHVA 14. HVAC World Congress.

Formelzusammenstellung:

$$\varepsilon_{c,i} = \frac{m_{tr,em}}{\dot{V}_{air} \cdot \rho_{air}} * \frac{1}{\sum(\Delta C_{IDA,i}(t) \cdot \Delta t)}$$

$\varepsilon_{c,i}$	lokale Lüftungswirksamkeit
$m_{tr,em}$	Spurengasmasse bei Schadstoffquelle [g]
\dot{V}_{air}	Luftvolumenstrom [m ³ /s]
ρ_{air}	Luftdichte Zuluft [g/ml]
$\Delta C_{IDA,i}(t)$	Differenz der Gaskonzentration im Raum [ppm]
Δt	Zeitschritt [s]

6.2 Luftführungsarten

Die Luftführungsarten unterscheiden sich in der Einbringung der Frischluft und in der Wirksamkeit, die verunreinigte Luft abzuführen und dabei die Luftqualität aufrechtzuerhalten. Für eine funktionierende Durchströmung des Raumes, ist die Luftführung entsprechend auszuwählen. Es gibt drei Führungsarten: Die Mischlüftung, die turbulenzarme Verdrängungslüftung sowie die laminare Strömung.

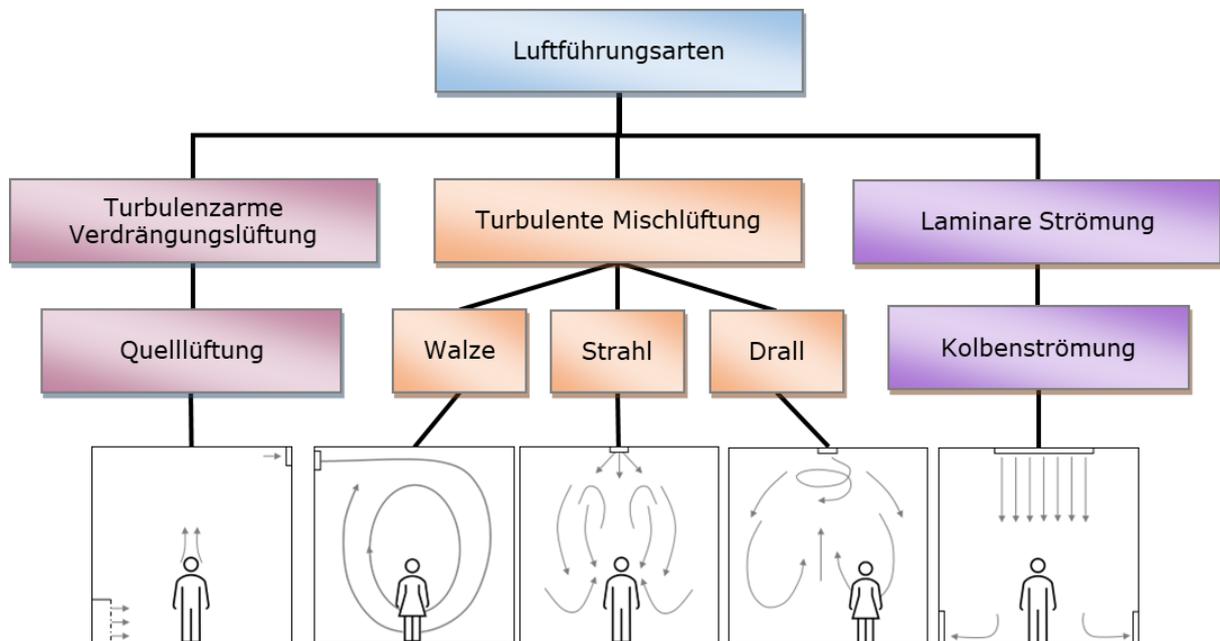


Abbildung 6: Übersicht der Luftführungsarten

6.2.1 Turbulente Mischlüftung

Bei der Mischlüftung vermischt sich die Zuluft durch Induktion von Sekundärluft rasch mit der Raumluft. Die Zuluft strömt dabei mit einer Geschwindigkeit zwischen 2 m/s und 4 m/s aus dem Luftdurchlass. Die Luftgeschwindigkeits- und Temperaturunterschiede zwischen der Zuluft und Raumluft bauen sich schnell ab. Mit der beigemischten Sekundärluft erhöht sich der Luftvolumenstrom bei abnehmender Luftgeschwindigkeit bis zum Strahlende. So können lange Strömungsweiten erreicht werden und eine Durchmischung des gesamten Raumes ermöglichen. Eine hohe Induktion ermöglicht grosse Temperaturunterschiede zwischen Zuluft und Raumluft. Dadurch ist, im Vergleich zur Verdrängungslüftung, ein kleinerer Zuluftvolumenstrom möglich. Die Mischlüftung ist geeignet zum Heizen und Kühlen. Bei hoher Kühllast besteht die Gefahr von Zugluftbildung. Im Heizfall besteht ausserdem die Gefahr einer Kurzschlussströmung vom Zuluft- zum Abluftauslass.

6.2.2 Turbulenzarme Verdrängungslüftung

Das Prinzip einer turbulenzarmen Verdrängungslüftung basiert auf den temperaturbedingten Unterschieden der Luftdichten, welche zu einer Schichtung der Raumluft führen. Die Quellsüftung ist eine Sonderform einer nach oben gerichteten Verdrängungsströmung. Bei der Quellsüftung wird die kühlere Zuluft in Bodennähe von der Seite her eingebracht und ein Kaltluftsee erzeugt. Der Aufenthaltsbereich von Personen soll thermisch behaglich und mit hoher Luftqualität gehalten werden. Die Zuluft wird mit einer geringen Geschwindigkeit von ca. 0.2 m/s eingebracht. Die Wärmequellen im Raum fördern die Luft durch die Konvektion nach oben. Somit wird die verunreinigte Luft in die obere Raumhälfte gebracht und dort über die Abluft abgezogen. Diese Luftführungsart eignet sich zum Kühlen. Für den Heizbetrieb ist sie nicht geeignet, da die warme Luft direkt nach oben steigt.

6.2.3 Laminare Strömung

Für die laminare Strömung gibt es mehrere Begrifflichkeiten wie Verdrängungslüftung und Kolbenströmung. Die laminare Strömung wird hauptsächlich in Anlagen angewendet, in welchen hohe Anforderungen an die Partikelreinheit, Spitalbauten & Laboratorien, gestellt werden. Die Raumluft soll sich nicht mit der Zuluft vermischen und dafür werden hohe Luftwechsel (bis über 100 h^{-1} in Reinräumen) erbracht. Nur im Kühlbetrieb kann das Lüftungssystem die Anforderung der Spitalbauten oder Laboratorien erfüllen.

6.3 Messmethode

Die Messmethode beschreibt die Vorgehensweise bei der Messung und zeigt die Art und Weise der Durchführung auf. Die Messmethoden basieren auf dem Messprinzip des Tracergases. Aus diesem Grund wird zuerst das Tracergas näher erläutert und anschliessend auf die angewandte Tracer Methoden eingegangen.

6.3.1 Messprinzip mit Tracergas HFO-R 1234yf

Als Tracergas werden Gase bezeichnet, die für Spurengasmessungen eingesetzt werden und gut durch Messgeräte in der Luft erfasst werden können. Das Tracergas sollte nicht auf natürlicher Weise in der Luft vorkommen, somit kann die Dosierung im tiefen Konzentrationsbereich sein. Das HFO-R 1234yf ist eine Alternative zu heute häufig eingesetzten Schwefelhexafluorid (SF₆), dies hat sich aus der Bachelor-Thesis Gebäudetechnik|Energie 2021 von Moritz Bienz und Kevin Bucheli herausgestellt. Zusätzlich ist HFO-R 1234yf umweltverträglicher und weist mit einem Wert von 4 ein massiv tieferes Global Warming Potential (GWP) auf als SF₆ mit 23'900. Das HFO-R 1234yf ist ein farbloses Gas mit schwachem Geruch.

Tabelle 5: Eigenschaften HFO-R 1234yf

HFO-R 1234yf	
Stoffklasse	Hydrofluorolefine (HFO)
Chemische Bezeichnung	2,3,3,3-Tetrafluorpropen
Chemische Formel	C ₃ H ₂ F ₄
Treibhauspotential über einen Zeitraum von 100 Jahren	4
Gefahrenhinweis	hochentzündlich, nicht toxisch
MAK-Wert	200ppm; 950mg/m ³
Mol-Masse	114 g*mol
Spezifische Bedingung 20°C und 101.3 kPa	
Dichte	4.8 kg/m ³
Spezifische Bedingung 25°C und 100 kPa	
Spezifische Wärmekapazität	0.9050 J/(kg*K)

6.3.2 Tracer Step-Down-Methode

Bei dieser Methode wird über das Zuluftnetz das Tracergas konstant in den Raum injiziert und der Konzentrationsabfall über die Zeit gemessen. Die konstante Injektion wird über ein Masendurchflussregler eingestellt. Für die Analyse des Konzentrationsabfalls wird im Abluftnetz gemessen und für die mittlere Raumkonzentration sind drei Positionen im Aufenthaltsbereich vorhanden. Mit der Abklingkurve lässt sich das Durchschnittsalter der Raumluft und die durchschnittliche Verweilzeit herleiten. Mit der Step-Down-Methode ist es möglich, den Luftaustauschwirkungsgrad und die Lüftungswirksamkeit eines Lüftungssystems zu analysieren und zu beurteilen.

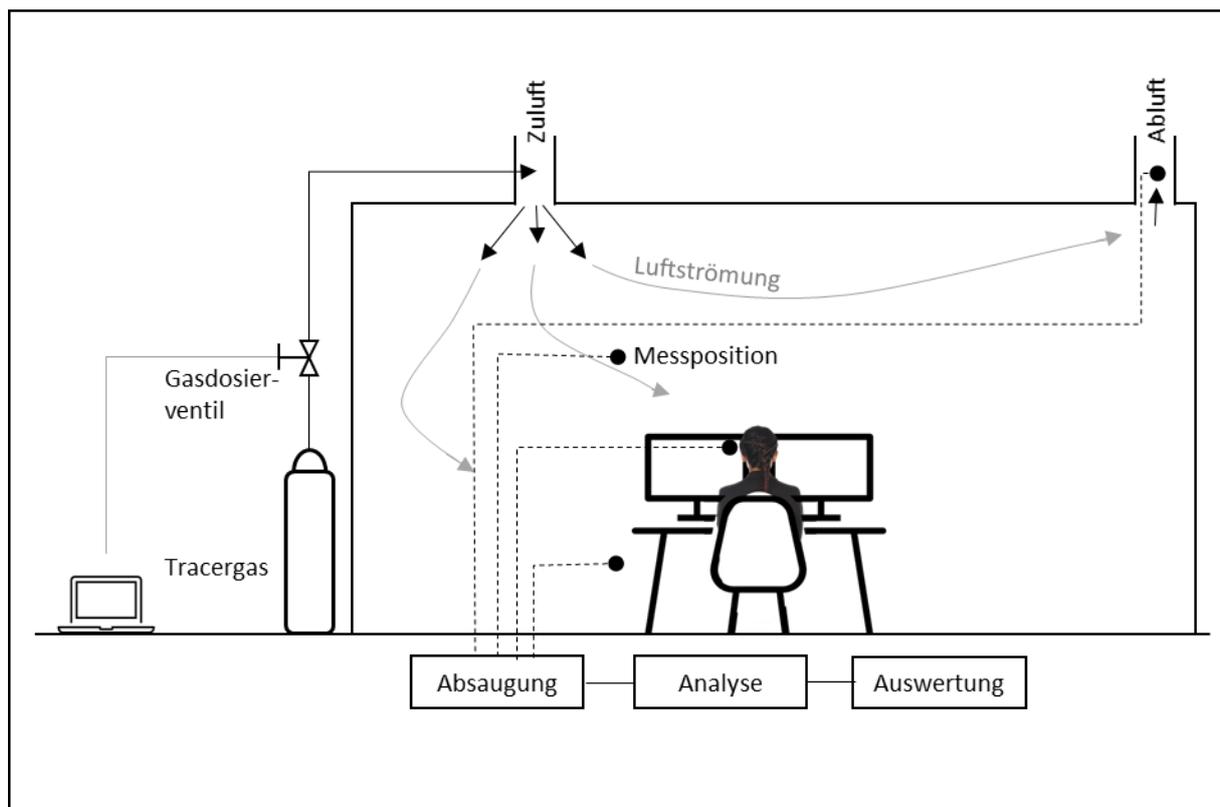


Abbildung 7: Schematische Darstellung Messeinrichtung für Step-Down-Methode

6.3.3 Tracer Pulsmethode

Die Pulsmethode kann für zwei Betrachtungsweisen angewandt werden. Zum einen für die lokale Schadstoffzufuhr über das Zuluftnetz, dabei wird im Zuluftkanal Tracergas injiziert und im Bereich der Aufenthaltszone im Raum gemessen. Zum anderen für die Vermeidungswirksamkeit von Schadstoffübertragungen von Person zu Person. Bei dieser Betrachtung wird bei einem Dummy eine Schadstoffquelle simuliert und eine gewisse Gasmenge dosiert und beim zweiten Dummy die noch vorhandene Gaskonzentration gemessen. Es ist wichtig bei dieser Methode zu wissen, wieviel Tracergas beim Impuls ausgestossen wird. Auf diese Weise kann die lokale Lüftungswirksamkeit in Büroräumlichkeiten analysiert werden. Die Pulsmethode ist hinsichtlich des Tracergasverbrauchs sparsamer als die Step-Down-Methode.

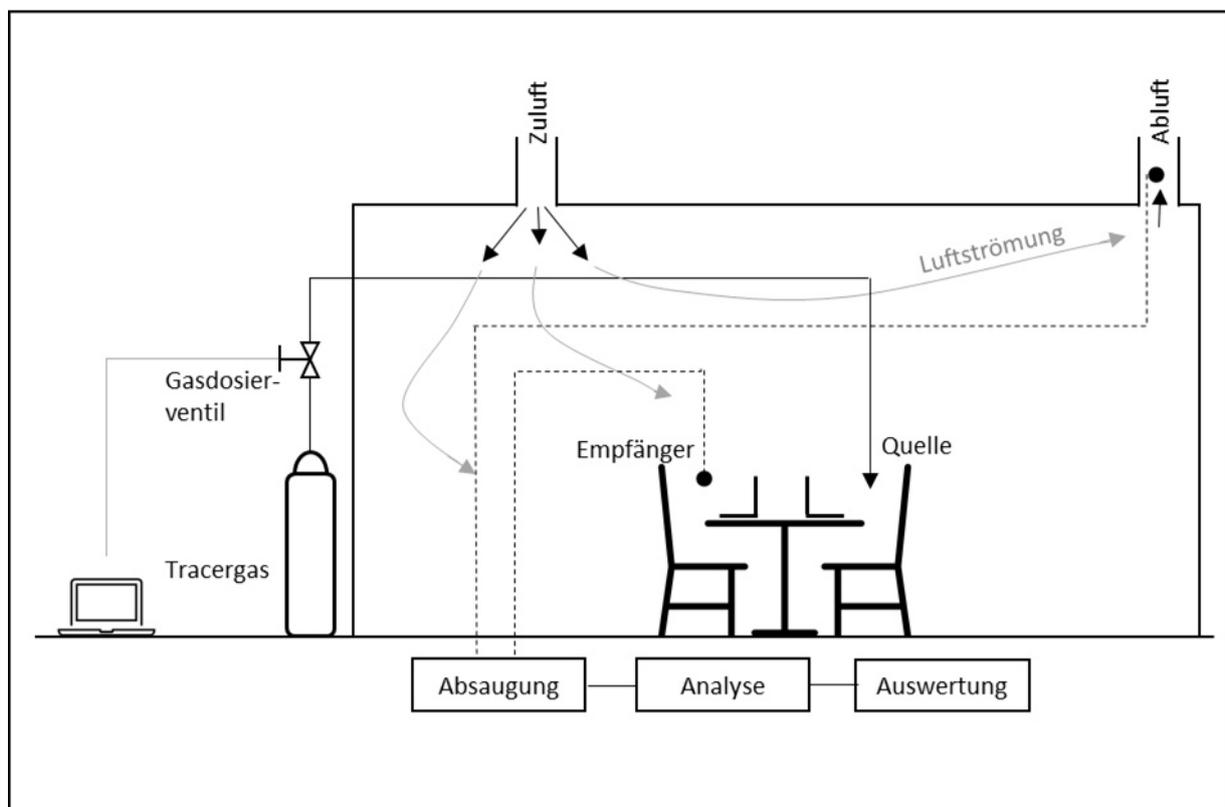


Abbildung 8: Schematische Darstellung Messeinrichtung für Pulsmethode

7. Messtechnik

In diesem Kapitel werden die relevanten Messgeräte vorgestellt. Dies sind die Gasanalytoren GASERA ONE und Gaset DX4015, sowie das Strömungsmessgerät Dantec mit den Strömungsmesssonde. Diese Messgeräte wurden für die Bearbeitung der verschiedenen Versuchsreihen verwendet. Sie liefern die Messwerte zur Berechnung der Kennzahlen und zur Qualifizierung der Raumluftrömungen.

7.1 Photoakustische Multigasanalytatorplattform - GASERA ONE

Das Messprinzip basiert auf der photoakustischen Spektroskopie mit Cantilever optimiertem optischem Mikrofon. Die photoakustische Infrarotspektroskopie beruht darauf, dass das Infrarotlicht von den durchströmenden Gasmolekülen absorbiert wird. Bei der photoakustischen Spektroskopie wird die Lichtenergie in Druckänderungen bzw. Schallenergie umgewandelt. Die Schallenergie im Messgasgefäß wird dann mit einem Mikrofon in ein elektrisches Signal umgewandelt. Beim photoakustischen Prinzip wird das Probegas in eine photoakustische Messkammer eingeschlossen und mit Infrarotlicht einer Frequenz bestrahlt, welche der Resonanzfrequenz eines bekannten Probegasmoleküls entspricht. Wenn dieses Probegas in der Messkammer vorhanden ist, wird ein Teil der Infrarotenergie von diesem Gas absorbiert. Dadurch erhöht sich lokal die Wärmeenergie in den Gasmolekülen und der Druck und die Temperatur des Messgases steigen. Wenn die Infrarotstrahlung mit einer bestimmten Frequenz moduliert wird, erzeugt die Druckänderung in der photoakustischen Probenkammer eine akustische Welle der gleichen Frequenz. Diese akustische Welle wird dann mithilfe eines Mikrofons in ein elektrisches Signal umgewandelt. Der Cantilever-Drucksensor verbessert die Empfindlichkeit der photoakustischen Spektroskopie. Ein extrem dünner Auslegerabschnitt bewegt sich aufgrund der Druckschwankungen im umgebenden Gas wie eine flexible Tür. Die Bewegung des freien Endes des Cantilevers kann in etwa zwei Größenordnungen größer sein als die Bewegung des Mittelpunkts der gespannten Membran unter der gleichen Druckänderung. Denn der Cantilever biegt sich nur und dehnt sich nicht. Die Auslenkung des Cantilevers wird optisch gemessen. Zur präzisen Messung der Cantilever-Bewegung wird mit einem laserbasierten Auslese-Interferometer gemessen, das in der Lage ist, Verschiebungen von weit unter einem

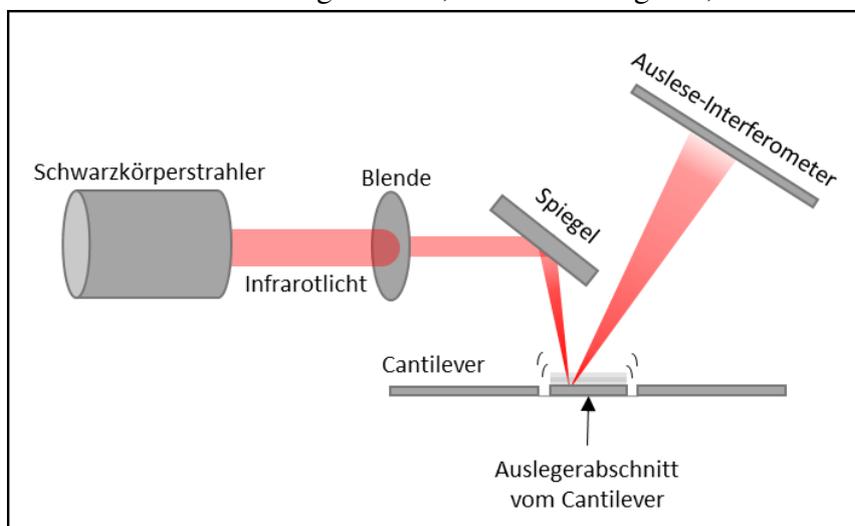


Abbildung 10: Messprinzip GASERA ONE
Nicola Ambühl, Petra Dübendorfer



Abbildung 9: GASERA ONE
20

Picometer genau zu erfassen. Zusammen bilden der Cantilever-Sensor und das Auslese-Interferometer ein optisches Mikrofon. (Gasera, 2021)

7.2 FTIR-Gasanalysator - Gasmeter DX4015

FTIR steht für das Messprinzip Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie und basiert auf der Schwingungsenergie der Molekülbindungen. Die Schwingungsenergie der Bindung, die im Molekül vorhanden ist, steht in Zusammenhang mit der Frequenz. Der Infrarotstrahl fällt auf den halbdurchlässigen Spiegel und spaltet sich in zwei Einzelstrahlen auf. Der erste Strahl wird auf den beweglichen Spiegel gelenkt und der zweite Strahl trifft den festen Spiegel, dabei werden die Strahlen reflektiert. Die Reflektion der beiden Strahlen werden wieder zusammengeführt und passieren die Probezelle. Wenn die Energie des Infrarotlichts und die Bindungsenergie der Schwingung gleich sind, kann die Bindung diese Energie absorbieren. Die verschiedenen Bindungen in einem Molekül schwingen mit unterschiedlicher Energie und absorbieren daher verschiedene Wellenlängen der Infrarotstrahlung. Das Gesamtspektrum besteht aus der Frequenz und der Intensität der einzelnen Absorptionsbanden und erzeugen einen charakteristischen Fingerabdruck des Moleküls, das von der Messzelle erfasst wird.

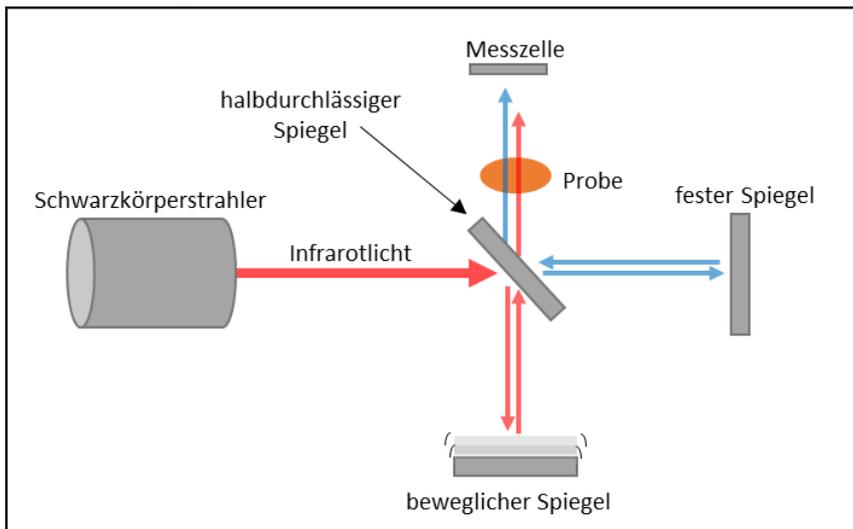


Abbildung 11: Messprinzip Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie

Das Gasmeter Typ DX4015 verfügt über ein FTIR-Spektrometer, eine temperaturgesteuerte Probenzelle mit eingebauter Pumpe und Signalverarbeitungselektronik. Die Technologie ermöglicht eine niedrige Konzentration in der Umgebungsluft, auch unter erschwerten Bedingungen mit feuchten und korrosiven Gasen, zu detektieren (Gasmeter.de, 2022).



Abbildung 12: Gasmeter DX4015

7.3 Mehrpunkt-Strömungsmesssonden – Dantec ComfortSense

Die Strömungsmesssonden werden auch als Zugluftsonden bezeichnet. Das ComfortSense-System führt thermische Komfortmessungen durch. Das System besteht aus einem Hauptgerät mit bis zu 16 Eingangskanälen für Messsonden. Die Strömungsmesssonden messen lokal die Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Lufttemperatur. Zusätzlich berechnet das Programm Dantec Sensitiv aus den Messdaten den Turbulenzgrad und die Zugluftrate. (Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors, 2022)

Die Strömungsmesssonden sind an drei Messbäume angebracht. Die Höhe der Sonden liegen auf Höhe der Knöchel (0.1m), Höhe der Knie (0.6m), Höhe des Kopfes einer sitzenden Person (1.1m) und auf der Höhe des Kopfes einer stehenden Person (1.70m).

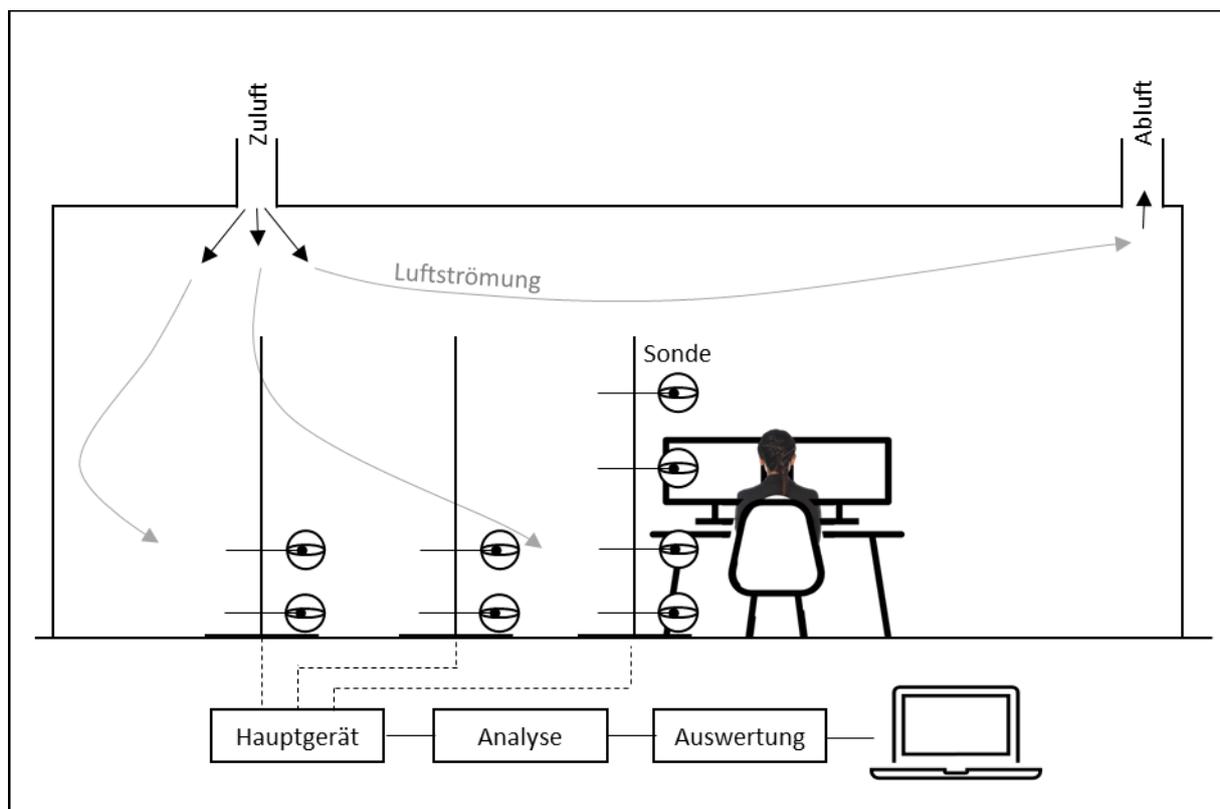


Abbildung 13: Schematische Darstellung Messeinrichtung Dantec ComfortSense

7.4 Massendurchflussregler für Gas - Bronkhorst

Der Massendurchflussregler (MFC) besteht aus einem elektromagnetischen Regelventil. Zum Einsatz kamen bei den Versuchen das EL-Flow®*Select* mit einer Ventilstellung von 0.05 - 2.5 mg/s und das EL-Flow®*Select* mit einem Durchfluss von 0.8 – 40 NI/min. Die Charakteristiken des Reglers sind eine kurze Ansprechzeit, eine hohe Genauigkeit und die digitale Ansteuerung.



Abbildung 14: Massendurchflussregler für Gas mit 0.05mg/s bis 2.5mg/s

Für die Tracergasdosierung wird über das Programm (FlowPlot) von Bronkhorst die Ventilstellung eingestellt. Mit dem online Programm FLUIDAT® kann der für SF₆ bemessene Durchfluss für den Einsatz mit HFO-R 1234yf umgerechnet werden. In der nachfolgende Tabelle 6 ist eine Zusammenstellung von der Ventilstellung und dem entsprechenden Gasdurchfluss.

Tabelle 6: Adjustierung und Durchfluss zu EL-Flow®*Select*

MFC von 0.05 - 2.5 mg/s			MFC von 0.8 – 40 NI/min		
Ventilstellung	HFO-R 1234yf	SF ₆	Ventilstellung	HFO-R 1234yf	SF ₆
10 %	0.200	0.244	5 %	2.33	2.097
25 %	0.500	0.608	25 %	11.63	10.44
50 %	1.000	1.208	50 %	23.25	20.70
75 %	1.500	1.795	75 %	34.88	30.66
100 %	2.000	2.362	100 %	46.51	40.00

8. Versuchsreihe 1 – Konstantdosierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Versuchsreihe 1 in der Klimakammer im Labor IGE der Hochschule Luzern. In dieser Versuchsreihe geht es primär darum, verschiedenen Luftführungsarten hinsichtlich der Lüftungswirksamkeit sowie des Luftaustauschwirkungsgrads zu vergleichen und zu bewerten. Zusätzlich dient die Versuchsreihe als Einstieg in das Messen mit Tracergasen. Der vollständige Laborbericht der Versuchsreihe 1 befindet sich im Anhang 2 und wird hier in gekürzter Form wiedergegeben.

8.1 Messaufbau und Ablauf

Für die Messungen in der Klimakammer ist ein Nutzungsszenario erstellt worden. Die 26m² der Klimakammer stellen ein Gruppenbüro mit 2 Arbeitsplätzen für sitzende Büroarbeiten dar. Zum Nachbilden einer realen Nutzung wird die Klimakammer möbliert und mit Bürogeräten ausgestattet. Um eine reale Bürosituation darzustellen, werden verschiedene Wärmequellen und Dummies im Raum positioniert, welche unter anderem eine Personenbelegung und Computer simulieren sollen.

Die Luftaufbereitung erfolgte über das vorhandene Lüftungsgerät der Klimakammer. Das Lüftungsgerät verfügt über einen Rotationswärmeüberträger, welcher, um die baulich bedingte Leckage zu minimieren, blockiert wurde. Das Lüftungsgerät verfügt über einen Vor- und Nacherwärmer sowie über einen Luftkühler, womit die Zuluft auf die vorher definierten Temperaturen konditioniert werden kann. Es besteht auch die Möglichkeit, das Lüftungsgerät teilweise oder vollständig mit Umluft zu betreiben. Von dieser Möglichkeit wird bei dieser Versuchsreihe jedoch kein Gebrauch gemacht und die Anlage vollständig mit Aussenluft betrieben. Die Luftverteilung erfolgt grösstenteils über ein Rohrnetz, welches über verschiedene Anschlussmöglichkeiten verfügt, um Luftauslässe anzuschliessen. Jede Anschlussmöglichkeit verfügt über einen variablen Volumenstromregler und kann individuell eingestellt werden.

Zur Lufteinbringung können individuell 3 verschiedene Luftauslässe gewählt werden. Im Bereich der Eingangstüre befindet sich am Boden ein Quellluftauslass, dieser führt die Frischluft turbulenzarm in den Raum ein. Die Quelllüftung ist für die ordnungsgemässe Funktion auf die Wärmequellen im Raum angewiesen, wodurch die Frischluft durch den Auftrieb aufsteigt und die Personen mit Frischluft versorgt. An der Decke ist ein Drallauslass installiert, welcher die Frischluft turbulent in den Raum einbringt, so dass sie sich mit der Raumluft vermischt und die Schadstoffkonzentration sinkt. Ebenfalls im Deckenbereich befindet sich ein Deckensegel mit integriertem Induktionsauslass. Dieser bläst, wie der Drallauslass, seine Frischluft turbulent ober und unterhalb des Deckensegels aus und reduziert so die Schadstoffkonzentration im Raum. Die Abluft wird in der nord-westlichen Raumecke an der Decke über ein Lüftungsrohr gefasst und über das Rohrnetz zur Luftaufbereitung zurückgeführt.

Die räumliche Einrichtung mit der Möblierung, der Luftverteilung und den Wärmequellen ist für allen Messungen in der Versuchsreihe 1 gleich und wird nicht verändert.

Zum Nachweisen der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades, wird im Zu-
luftkanal eine konstante Tracergasmenge von 2mg/s injiziert und über die Luftverteilung dem
Raum zugeführt. Für beide Kennzahlen können dieselben Messstellen für die Gaskonzentration
verwendet werden, welche bei allen Auslastypen gleich positioniert sind. Es sind im Raum 3
Messpunkte positioniert, womit die Gaskonzentration in den verschiedenen Schichten des
Raums aufgezeichnet werden. Die Messpunktpositionen befinden sich in einer Höhe von 0.3m,
1.2m und 2.1m über Boden und sind an verschiedenen Standorten im Raum positioniert. Um
die Lüftungswirksamkeit und den Luftaustauschwirkungsgrad berechnen zu können, wird ein
weiterer Messpunkt im Abluftkanal positioniert. Diese 4 Messpunkte werden mit Hilfe des
Multisamplers des GASERA ONE Messgerätes aufgezeichnet. Die Gasdosierung erfolgt über
ein Bronkhorst Durchflussregler mit einer maximalen Durchflussmenge von 2.5 mg/s
Schwefelhexafluorid. Dieses kann über einen Computer angesteuert werden und regelt den
Gasdurchfluss mit hoher Genauigkeit. Der Durchflussregler ist für den Einsatz mit
Schwefelhexafluorid konzipiert und muss für die Anwendung mit dem HFO-R 1234yf mit
einem Massenkorrekturfaktor korrigiert werden.

Zur Kontrolle von möglichen Kom-
fortproblemen werden, mit Hilfe von
Strömungsmesssonden, welche je-
weils pro Auslastyp unterschiedlich
positioniert sind, die Strömungen im
Aufenthaltsbereich erfasst und hin-
sichtlich Zugluft ausgewertet. Es
werden insgesamt 8 Messsonden an 3
Messbäumen zwischen dem Luftaus-
lass und einem der Dummies aufge-
stellt. Die Sonden messen die Luftge-
schwindigkeit sowie die Lufttempe-
ratur und das Programm Dantec Sen-
sitiv errechnen daraus die Anzahl an
Unzufriedenen.

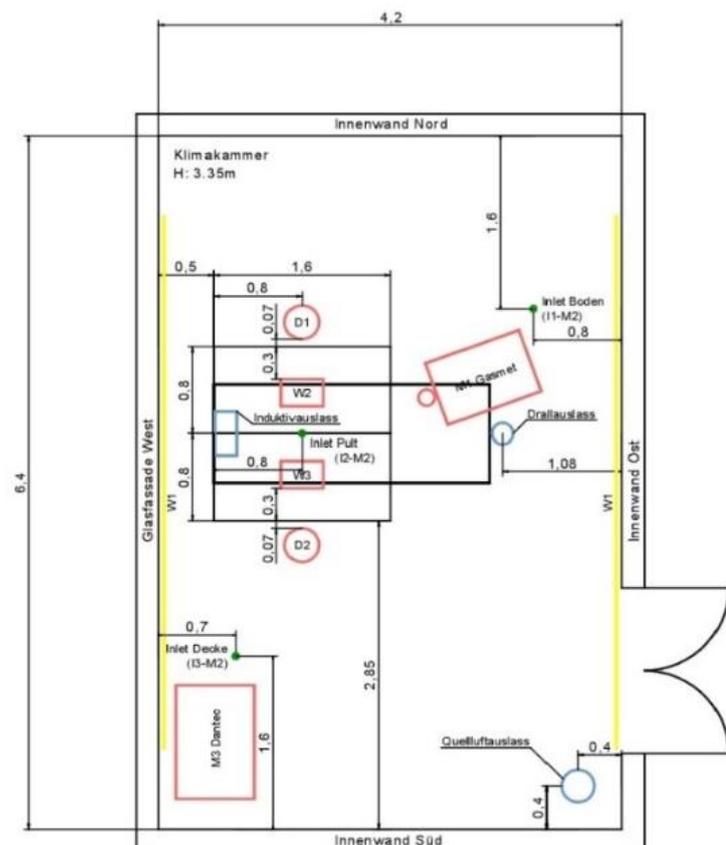


Abbildung 15: Versuchsaufbau Konstantdosierung

In der Versuchsreihe 1 wurden insgesamt 10 Step-Down-Messungen durchgeführt. Nach den Aufbauarbeiten haben die Messungen am Samstag, dem 19. März gestartet und dauerten bis Montag, dem 21. März an. Die Messaufbauten für die Gasmessungen wie auch die Möblierung blieben über alle 10 Messungen unverändert, einzig die Luftmengen wie auch die Lufteinbringung über die verschiedenen Auslaststypen variierte. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zeiten der Versuche sowie die Arten der Messungen aufgeführt.

Tabelle 7: Messprogramm Versuchsreihe 1

Datum/Zeit	Messung	Typ/Luftmenge
19.03.2022 / 11:40 Uhr	Step-Down-Messung	Quellluftauslass 100m ³ /h
19.03.2022 / 15:00 Uhr	Step-Down-Messung	Quellluftauslass 70m ³ /h
19.03.2022 / 19:05 Uhr	Step-Down-Messung	Quellluftauslass 35m ³ /h
20.03.2022 / 09:48 Uhr	Step-Down-Messung	Drallauslass 100m ³ /h
20.03.2022 / 12:35 Uhr	Step-Down-Messung	Drallauslass 70m ³ /h
20.03.2022 / 15:25 Uhr	Step-Down-Messung	Drallauslass 35m ³ /h
20.03.2022 / 18:42 Uhr	Step-Down-Messung	Induktionsauslass 35m ³ /h
21.03.2022 / 08:08 Uhr	Step-Down-Messung	Induktionsauslass 100m ³ /h
21.03.2022 / 10:40 Uhr	Step-Down-Messung	Induktionsauslass 70m ³ /h
21.03.2022 / 14:00 Uhr	Step-Down-Messung	Quellluftauslass 50m ³ /h

8.2 Rahmenbedingungen

Die Klimakammer kann über das Lüftungsgerät individuell belüftet werden. Für die Versuchsreihe werden 3 Luftmengen definiert, bei welchen Messungen durchgeführt werden. Die grösste Luftmenge ist, die nach Stand der Technik dimensionierte. Diese umfasst $100\text{m}^3/\text{h}$ und entspricht einem spezifischen Luftvolumenstrom von $3.8\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ und widerspiegelt die bisherige Praxis bei der Lüftungsauslegung. In einem weiteren Schritt wird die spezifische Luftmenge auf $2.6\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ und somit auf $70\text{m}^3/\text{h}$ reduziert, welche den Vorgaben gemäss dem SIA Merkblatt 2024 (SIA MB 2024, 2021) entsprechen. Gemäss der SIA 382/1, kann zur Vermeidung von zu tiefen Raumlufffeuchten, bei Aussenlufttemperaturen von unter 0°C oder unerwünschten Wärmeeinträgen bei Aussenlufttemperaturen über 25°C , der Aussenluftvolumenstrom um maximal 50% reduziert werden (SIA 382/1, 2014). Diese Reduktion auf die Luftmenge gemäss dem SIA Merkblatt 2024, ergibt die dritte Luftmenge mit $35\text{m}^3/\text{h}$. Da das Hauptinteressen auf den Kennwerten für die Quelllüftung liegt, wurde für diesen Auslaststyp eine weitere Messung bestimmt. Diese Luftmenge befindet sich bei $50\text{m}^3/\text{h}$, welches 50% des Stand der Technik entspricht, und die 10. Step-Down-Messung ergibt.

Ein grosser Vorteil der Klimakammer sind die temperierbaren Raumboflächen. Die Wände der Klimakammer werden für die Versuchsreihe 1 so temperiert, dass die Wand auf der Westseite eine kühle Aussenwand an einem Frühlingstag darstellt und eine Temperatur von 18.5°C aufweist. Die restlichen Wandoberflächen dienen zur Regelung der Raumtemperatur von 21.0°C und werden individuell temperiert. Der Boden der Klimakammer wird nicht thermisch aktiviert. Die Zulufttemperaturen variieren je nach Luftauslaststyps und sind in der nachfolgenden Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Temperatursollwerte für die Klimatisierung der Klimakammer Versuchsreihe 1

Grösse	Solltemperatur	Hysterese
Raumtemperatur	21.0°C	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
Wandtemperatur West	18.5°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Quellauslass	17.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Drallauslass	18.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Induktionsauslass	18.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

8.3 Auswertung Messungen

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe 1 zur Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades und der Lüftungswirksamkeit

8.3.1 Leckage Lüftungsgerät

Da für diese Versuchsreihe primär das GASERA ONE Messgerät zum Einsatz gekommen ist und dieses eine lange Messdauer hat, wurde vorher zu den Step-Down-Messungen eine Messung zur Bestimmung der Leckage des Lüftungsgerätes durchgeführt. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, ob die Zuluftkonzentration in der Formel zur Lüftungswirksamkeit vernachlässigt und auf diesen Messpunkt verzichtet und so die Zeit zwischen zwei Messungen minimiert werden kann. Um die Leckage zu berechnen, wurde bei der Abluftfassung eine konstante Gasmenge dosiert und über 2 Messpunkte die Gaskonzentration gemessen. Die Messpunkte befanden sich im Zuluft- wie auch im Abluftkanal. Die Messstellen wurden nahe des Lüftungsgerätes angeordnet, um äussere Einflüsse zu minimieren. Es wurde ein Luftvolumenstrom von $100\text{m}^3/\text{h}$ am Lüftungsgerät eingestellt und über den Quellluftauslass dem Raum zugeführt.

In der Abbildung 16 sind die Gaskonzentrationen der Leckagemessung aufgeführt. Da das Tracergas HFO-R 1234yf in der Natur nicht vorkommt, kann das Tracergas in der Zuluft nur durch Leckagen im Lüftungsgerät aus der Abluft in die Zuluft gelangen. Das Verhältnis zwischen der Abluftkonzentration und der Konzentration in der Zuluft bildet die Leckage des Lüftungsgerätes. Wie in der Abbildung ersichtlich ist, weisen beide Messpunkte zu Beginn der Messung über eine höhere Konzentration auf und sinken danach auf einen relativ konstanten Wert ab. Zu Beginn der Messung befindet sich die Leckage in einem Bereich von 0.8%. Nach dem Erreichen des Konstantwerts liegt die Leckage im Mittel bei 0.48%. Eine Leckage in diesem Grössenbereich kann für die weiteren Messungen vernachlässigt werden, ohne dass die Messresultate stark von den Realwerten abweichen. Aus diesem Grund wurde bei den weiterführenden Messungen in der Klimakammer auf eine Zuluftmessstelle verzichtet.

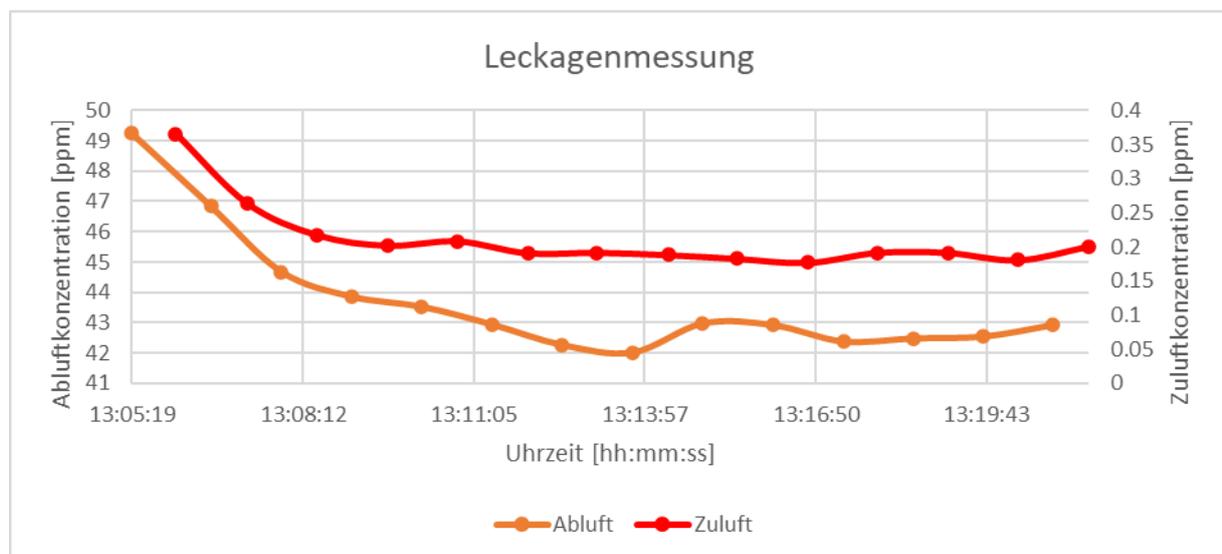


Abbildung 16: Tracergaskonzentrationen Leckagemessung Versuchsreihe 1 - $100\text{m}^3/\text{h}$

8.3.2 Quellluftauslass

Bei den Tracer-Step-Down-Messungen wurde, wie im Kapitel 6.3.2 Tracer Step-Down-Methode aufgeführt, für eine gewisse Zeit eine konstante Gasmenge dosiert. Nach dem Stoppen der Gaszufuhr wurde die Lüftungsanlage weiter betrieben und die Abklingkurve aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurven und den Berechnungsformeln zu der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Effektivität der Raumbelüftung machen.

Sinnbildlich für die Tracer-Step-Down-Messungen mit dem Quellluftauslass, ist in der Abbildung 17 die Abklingkurve des Versuchs mit dem Quellluftauslasses bei $100\text{m}^3/\text{h}$ aufgeführt. Darin ist erkennbar, wie die Gaskonzentrationen an den verschiedenen Messpunkten nach dem Starten der Gasdosierung gleichmässig zunehmen und über mehr oder weniger grosse Schwankungen verfügen. Es ist erkennbar, dass je nach Positionierung der Messstelle eine höhere Konzentration vorhanden ist oder die Kurve stärkere Schwankungen aufweist. Diese Schwankungen bei der Messstelle im Bodenbereich können auf unkontrollierte Raumluftströmungen, welche im Raum vorherrschten, oder auf die ungünstige Positionierung des Gasmessgerätes zurückgeführt werden. Nach dem Stoppen der Gasdosierung nehmen die Messstellen am Boden sowie auf dem Arbeitsplatz rasch auf einen Wert nahe der Gaskonzentration der Abluft ab und folgen dieser.

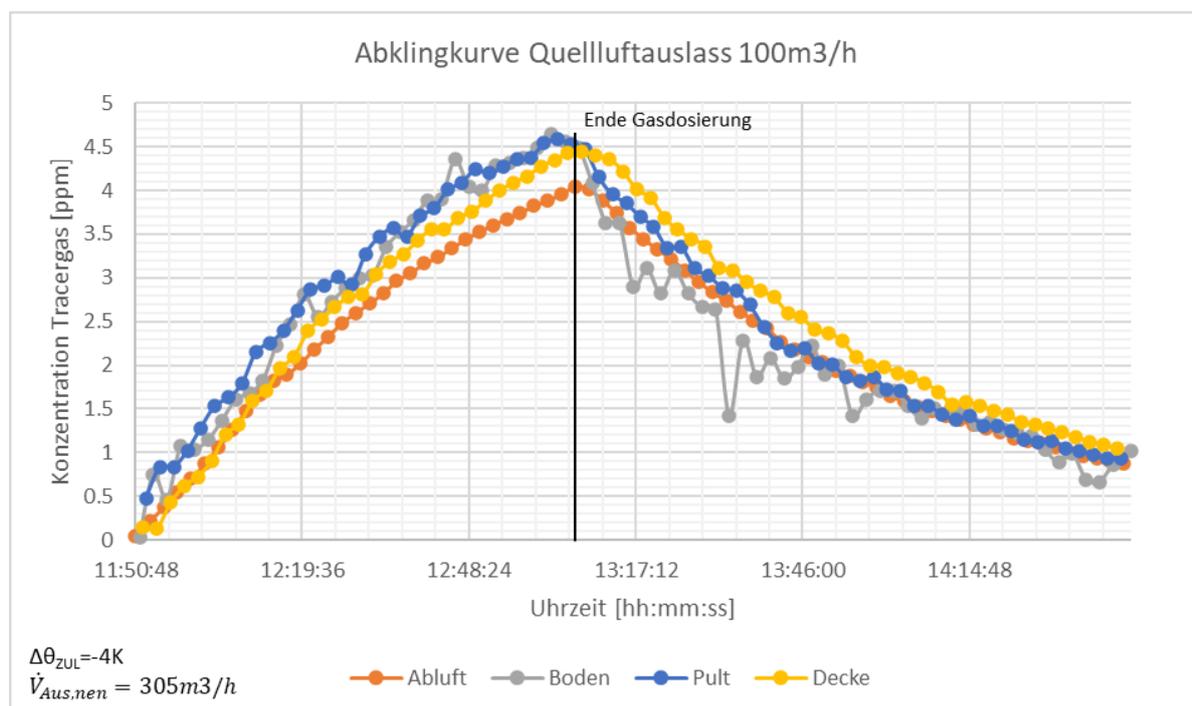


Abbildung 17: Tracergasmessung Quelllüftung $100\text{m}^3/\text{h}$

In der Tabelle 9 sind die verschiedenen Kennzahlen aus den Versuchen mit dem Quellluftauslass aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass sowohl der Luftaustauschwirkungsgrad wie auch die Lüftungswirksamkeit mit sinkender Luftmenge abnimmt. Der Luftaustauschwirkungsgrad liegt bei allen 4 Betriebsfällen im unteren Bereich der Sollwerte aus den Literaturquellen, welche einen Wirkungsgrad grösser als 50% angeben. Beim Luftaustauschwirkungsgrad sind nur kleine Unterschiede zwischen den verschiedenen Luftvolumenströmen ersichtlich, aber die Lüftungswirksamkeit nimmt bei abnehmender Luftmenge stärker ab. Die Wirksamkeiten aller Betriebsfälle liegen unterhalb der Literaturwerte von 1.15. Es ist ersichtlich, dass trotz der Reduktion der Luftmenge von 100m³/h auf 70m³/h, die Wirksamkeit nur geringfügig sinkt. Bei der weiteren Reduktion der Luftmenge auf 50m³/h sinkt die Wirksamkeit schon stärker, liegt jedoch immer noch in einem hohen Bereich. Erst beim Luftvolumenstrom von 35m³/h sinkt sie stärker ab.

Tabelle 9: Kennzahlenvergleich Quelllüftung

Komponente	Luftaustauschwirkungsgrad	Lüftungswirksamkeit
Quellauslass 100m ³ /h	50% ± 3%	0.97 ± 0.06
Quellauslass 70m ³ /h	49% ± 1%	0.96 ± 0.04
Quellauslass 50m ³ /h	49% ± 2%	0.91 ± 0.03
Quellauslass 35m ³ /h	49% ± 2%	0.74 ± 0.02

Ein Grund für das nicht Erreichen der in der ASHRAE RP-1373 (ASHRAE RP-1373, 2009) aufgeführten Lüftungswirksamkeiten können die im amerikanischen Raum üblichen Luftwechselfrequenzen von bis zu 8-fachen Raumvolumen sein. In der Schweiz sind, wie im SIA Merkblattes 2024 (SIA MB 2024, 2021) aufgeführt, in Einzel und Gruppenbüros ein etwa 0.9-facher Luftwechsel üblich.

In der Abbildung 18 sind die verschiedenen Kennzahlen aufgeführt und es ist erkennbar, dass die tiefste Luftmenge etwas abseits der anderen in einem tieferen Bereich der Lüftungswirksamkeit liegt.

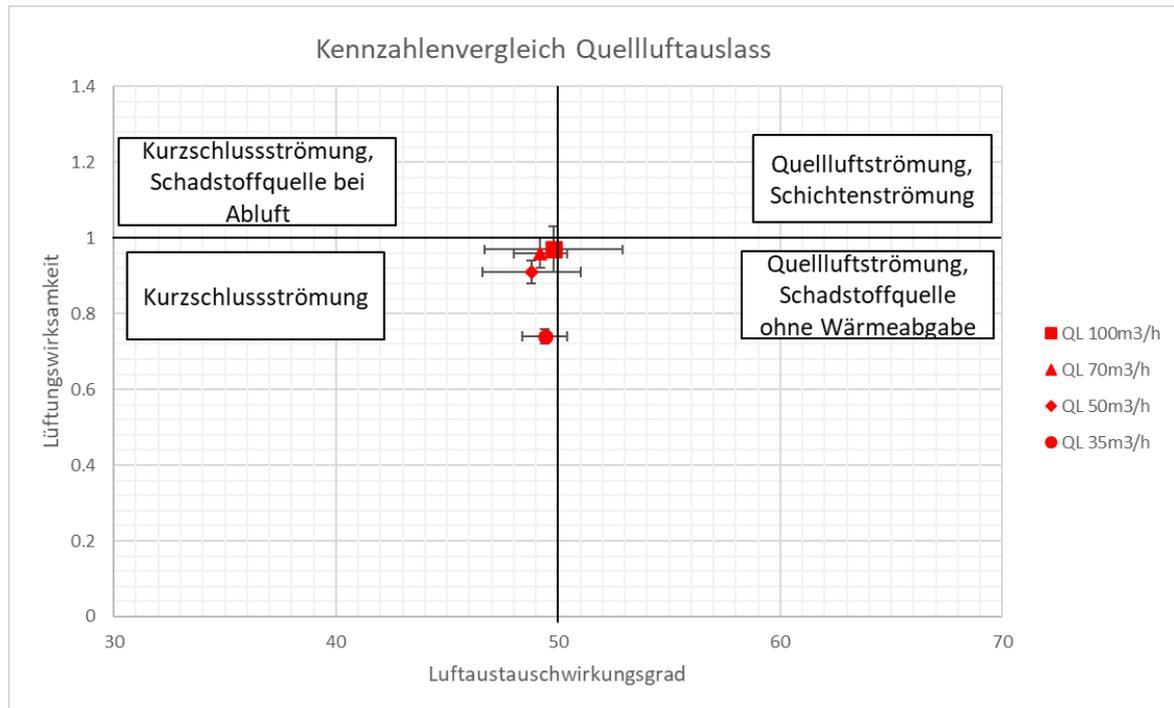


Abbildung 18: Kennzahlenvergleich Quellluftauslass

8.3.3 Drallauslass

Gleich wie bei den Messungen des Quellluftauslasses, wurde auch für den Drallauslass die Tracer-Step-Down-Methode angewendet. Auch hier wurde für eine gewisse Zeit dieselbe Gasmenge konstant dosiert. Nach dem Stoppen der Gaszufuhr wurde die Lüftungsanlage weiter betrieben und die Abklingkurve aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurven und den Berechnungsformeln zu der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Effektivität der Raumbelüftung machen.

Sinnbildlich für die Tracer Step-Down-Messungen mit dem Drallauslass, ist in der Abbildung 19 die Abklingkurve des Versuchs mit dem Drallauslass bei 100m³/h aufgeführt. Es ist erkennbar, dass die verschiedenen Gaskonzentrationen nach dem Starten der Gasdosierung gleichmässig zunehmen und gegenüber den Quellluftmessungen über kleinere Schwankungen verfügen. Die Konzentration der 3 Messstellen im Raum befinden sich in einem ähnlichen Rahmen, was von einer guten Durchmischung des Tracergases mit der Raumluft zeugt. Auch nach dem Stoppen der Gasdosierung, nehmen die Messstellen im Raum gleichmässig ab und erreichen rasch die Konzentration, welche auch im Abluftkanal herrscht. Wie zu erkennen ist, herrscht im Raum eine homogene Mischung und die Mischlüftung reduziert die Konzentration gleichmässig und erfüllt ihre Funktion, die Schadstoffe zu verdünnen.

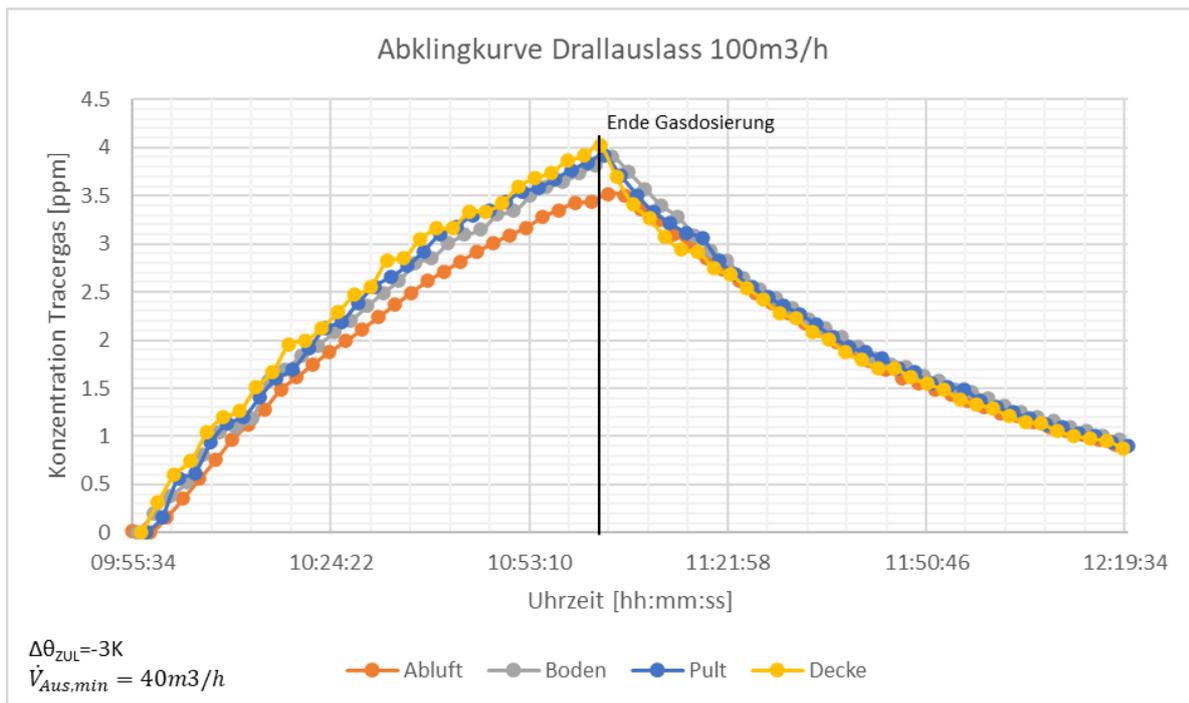


Abbildung 19: Tracergasmessung Drallauslass 100m³/h

In der Tabelle 10 sind die verschiedenen Kennzahlen aus den Versuchen mit dem Drallauslass aufgeführt. Bei der Betrachtung der Kennwerte fällt auf, dass der Luftaustauschwirkungsgrad zu Beginn leicht über der Grenze von 50% zu liegen kommt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Luftzuführung optimal im Raum positioniert wurde und so ein effektives Lüften des Raumes möglich ist. Mit sinkender Luftmenge nimmt sowohl der Luftaustauschwirkungsgrad wie auch die Lüftungswirksamkeit ab. Auch die Lüftungswirksamkeit liegt zu Beginn mit 1 im Bereich der Literaturwerte und widerspiegelt eine gute Durchmischung der Zuluft mit der Raumluft. Auch beim Luftvolumenstrom nach dem SIA Merkblatt 2024 liegen die Kennzahlen noch im Rahmen der Literaturquellen. Bei den 35m³/h, welche den minimalen Volumenstrom des Drallauslasses unterschreiten, sinken beide Werte stark ab. Trotz des tieferen Sollwertes für die Lüftungswirksamkeit, kann dieser bei weitem nicht erreicht werden.

Tabelle 10: Kennzahlenvergleich Drallauslass

Komponente	Luftaustauschwirkungsgrad	Lüftungswirksamkeit
Drallauslass 100m ³ /h	51% ± 5%	1.00 ± 0.02
Drallauslass 70m ³ /h	51% ± 2%	0.92 ± 0.01
Drallauslass 35m ³ /h	44% ± 20%	0.13 ± 0.02

Die Wirksamkeiten dieses Auslasstyps liegen bei Auslegebedingungen im Bereich der CEN/TR 16798-4 (Deutsches Institut für Normung, 2017) von 0.9–1.1 und können ideal für die Beurteilung der in der Schweiz üblichen Mischlüftungen eingesetzt werden. Der Grund für das starke Abfallen der Lüftungswirksamkeit bei der Messung mit $35\text{m}^3/\text{h}$ liegt sicherlich bei der Unterschreitung des minimalen Volumenstroms des Luftauslasses. Dadurch sinkt die Austrittsgeschwindigkeit so stark ab, dass die Zuluft mit zu geringer Impulswirkung keine gute Durchmischung mit der Raumluft ermöglicht. Zusätzlich kommt die Tatsache, dass die Zulufttemperatur, wie in der Praxis, beim Lüftungsgerät geregelt wird und eine Erwärmung der Zuluft bis zum Raumeintritt erfolgt. Durch die geringere Untertemperatur der Raumluft bleibt sie im Deckenbereich und wird ohne eine Raumwirkung wieder über die Abluft abgesogen. Es entsteht eine Kurzschlussströmung und die Messung weist eine hohe Unsicherheit auf.

In der Abbildung 20 sind die verschiedenen Kennzahlen aufgeführt und es ist erkennbar, dass die tiefste Luftmenge weit entfernt zu den anderen liegt und eine schlechte Lüftungswirksamkeit aufweist.

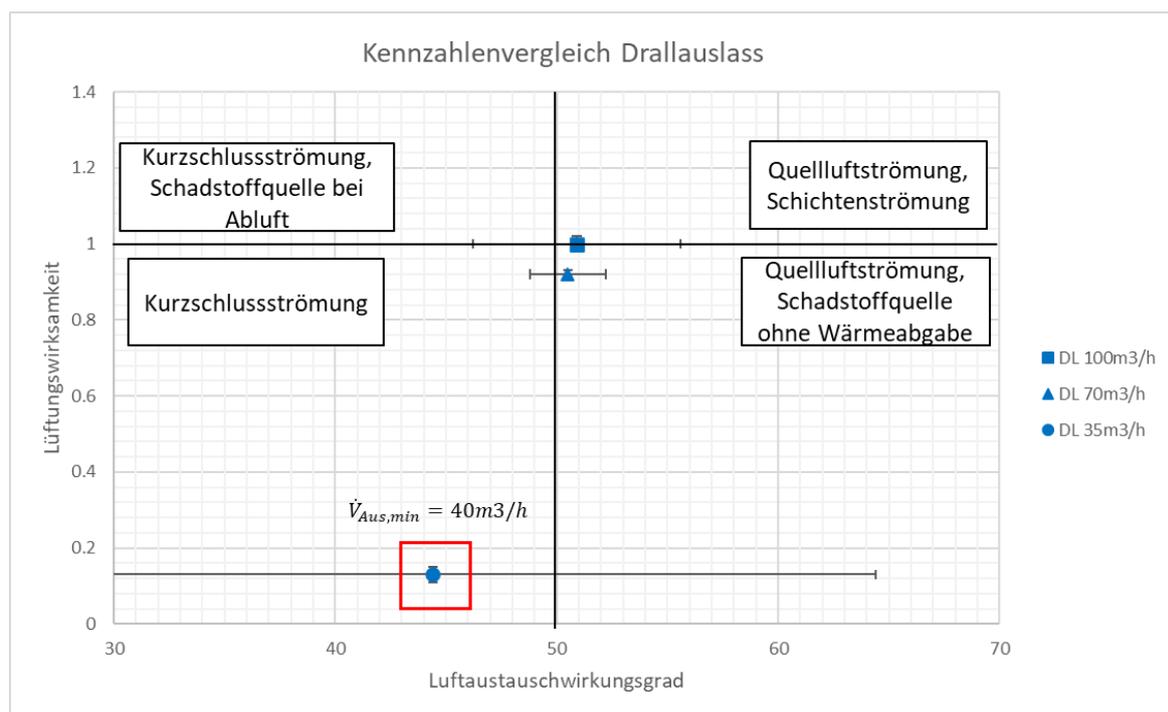


Abbildung 20: Kennzahlenvergleich Drallauslass

8.3.4 Induktionsauslass

Gleich wie bei den Messungen der anderen Auslastypen, wurde auch für den Induktionsauslass die Tracer-Step-Down-Methode angewendet. Auch hier wurde für eine gewisse Zeit dieselbe Gasmenge konstant dosiert. Nach dem Stoppen der Gaszufuhr wurde die Lüftungsanlage weiter betrieben und die Abklingkurve aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurven und den Berechnungsformeln zu der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Effektivität der Raumbelüftung machen.

Sinnbildlich für die Tracer-Step-Down-Messungen mit dem auf dem Deckensegel (ohne Kühlrippen) verbauten Induktionsauslass, ist in der Abbildung 21 die Abklingkurve des Versuchs bei $100\text{m}^3/\text{h}$ aufgeführt. Es ist erkennbar, dass gleich wie bei den Messungen mit dem Drallauslass, die verschiedenen Gaskonzentrationen gleichmässig zunehmen und gegenüber den Quellluftmessungen über kleinere Schwankungen verfügen. Bei dieser Messung befinden sich die Konzentrationen der 3 Messstellen im Raum sich in einem ähnlichen Rahmen, was von einer guten Durchmischung des Tracergases mit der Raumluft zeugt. Auch nach dem Stoppen der Gasdosierung, nehmen die Messstellen im Raum gleichmässig ab und erreichen rasch die Konzentration, welche auch im Abluftkanal herrscht. Einzig die Messstelle am Boden benötigt etwas länger, bis die Gaskonzentration das Niveau der Abluft erreicht. Wie zu erkennen ist, herrscht im Raum eine homogene Mischung und die Mischlüftung reduziert die Konzentration gleichmässig und erfüllt ihre Funktion, die Schadstoffe zu verdünnen.

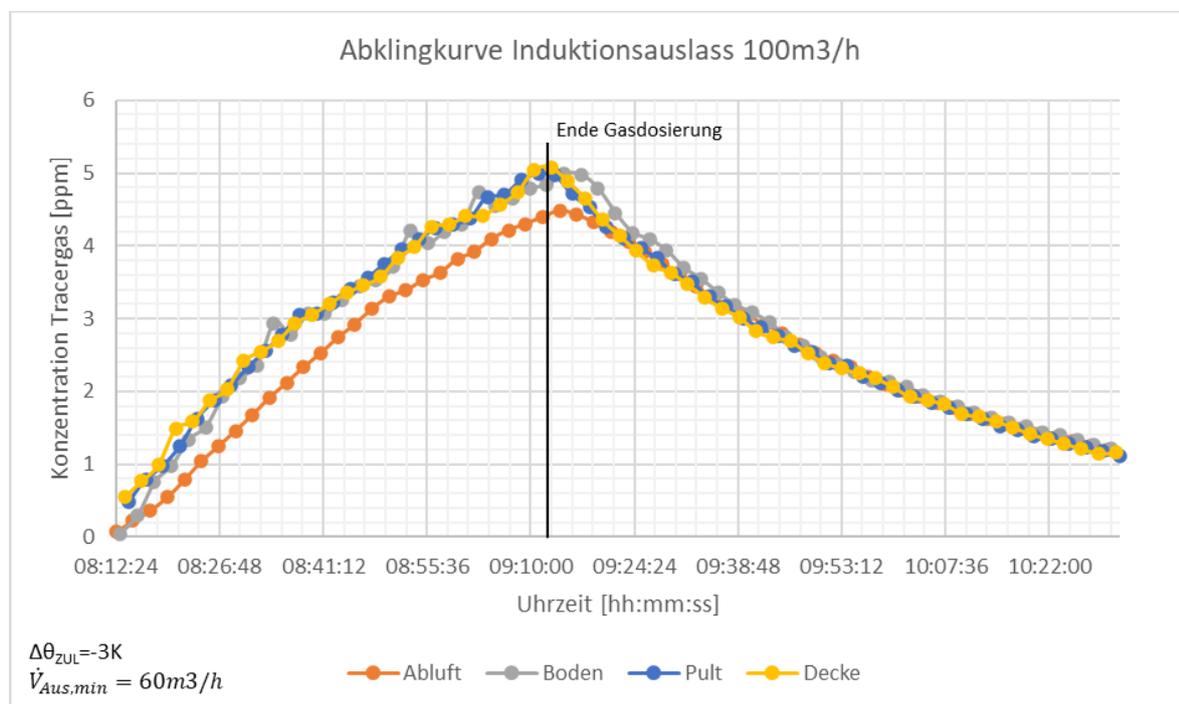


Abbildung 21: Tracergasmessung Induktionsauslass $100\text{m}^3/\text{h}$

In der nachfolgenden Tabelle 11 sind die verschiedenen Kennzahlen aus den Versuchen mit dem Deckensegel und dem Induktionsauslasses aufgeführt. Die Kennwerte der Luftvolumenströme, nach Stand der Technik und SIA MB 2024, liegen im Bereich der Resultate aus den Messungen mit dem Drallauslass. Der Luftaustauschwirkungsgrad liegt mit knapp über 50% im Bereich der Erwartungen und auch die Lüftungswirksamkeit liegt im Bereich der Werte nach der CEN/TR 16798-4 (Deutsches Institut für Normung, 2017). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Lufteinführung optimal im Raum positioniert wurde und so ein effektives Lüften des Raumes möglich ist. Mit sinkender Luftmenge nimmt sowohl der Luftaustauschwirkungsgrad wie auch die Lüftungswirksamkeit ab. Bei den 35m³/h, welche den minimalen Volumenstrom des Induktionsauslasses unterschreiten, sinkt die Wirksamkeit stark ab und weist eine hohe Unsicherheit auf. Trotz des tieferen Sollwertes für die Lüftungswirksamkeit, kann dieser bei weitem nicht erreicht werden. Im Vergleich zu den Lüftungswirksamkeiten des Drallauslasses, weist der Induktionsauslass bei allen Luftmengen einen etwas besseren Wert auf. Dies kann an der Positionierung direkt oberhalb der Arbeitsplätze liegen, wodurch die Schadstoffe, trotz des unterschreiten des minimalen Volumenstroms, etwas besser abgeführt werden können.

Tabelle 11: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass

Komponente	Luftaustauschwirkungsgrad	Lüftungswirksamkeit
Induktionsauslass 100m ³ /h	54% ± 6%	1.00 ± 0.05
Induktionsauslass 70m ³ /h	51% ± 3%	0.96 ± 0.02
Induktionsauslass 35m ³ /h	49% ± 8%	0.22 ± 0.02

Die Wirksamkeiten dieses Auslasstyps liegen bei Auslegebedingungen im Bereich der CEN/TR 16798-4 (Deutsches Institut für Normung, 2017) von 0.9–1.1 und können ideal für die Beurteilung der in der Schweiz üblichen Mischlüftungen eingesetzt werden. Der Grund für das starke Abfallen der Lüftungswirksamkeit bei der Messung mit 35m³/h liegt hauptsächlich bei der Unterschreitung des minimalen Volumenstroms des Luftauslasses. Dadurch sinkt die Austrittsgeschwindigkeit so stark ab, dass die Zuluft mit zu geringer Impulswirkung keine gute Durchmischung mit der Raumluft ermöglicht. Zusätzlich kommt die Tatsache, dass die Zulufttemperatur, wie in der Praxis, beim Lüftungsgerät geregelt wird und eine Erwärmung der Zuluft bis zum Raumeintritt erfolgt. Durch die geringere Untertemperatur der Raumluft bleibt sie im Deckenbereich und wird ohne eine Raumwirkung wieder über die Abluft abgesogen. Es entsteht eine Kurzschlussströmung und die Messung weist eine hohe Unsicherheit auf.

In der Abbildung 22 sind die verschiedenen Kennzahlen aufgeführt und es ist erkennbar, dass die tiefste Luftmenge weit entfernt zu den anderen liegt und eine schlechte Lüftungswirksamkeit aufweist.

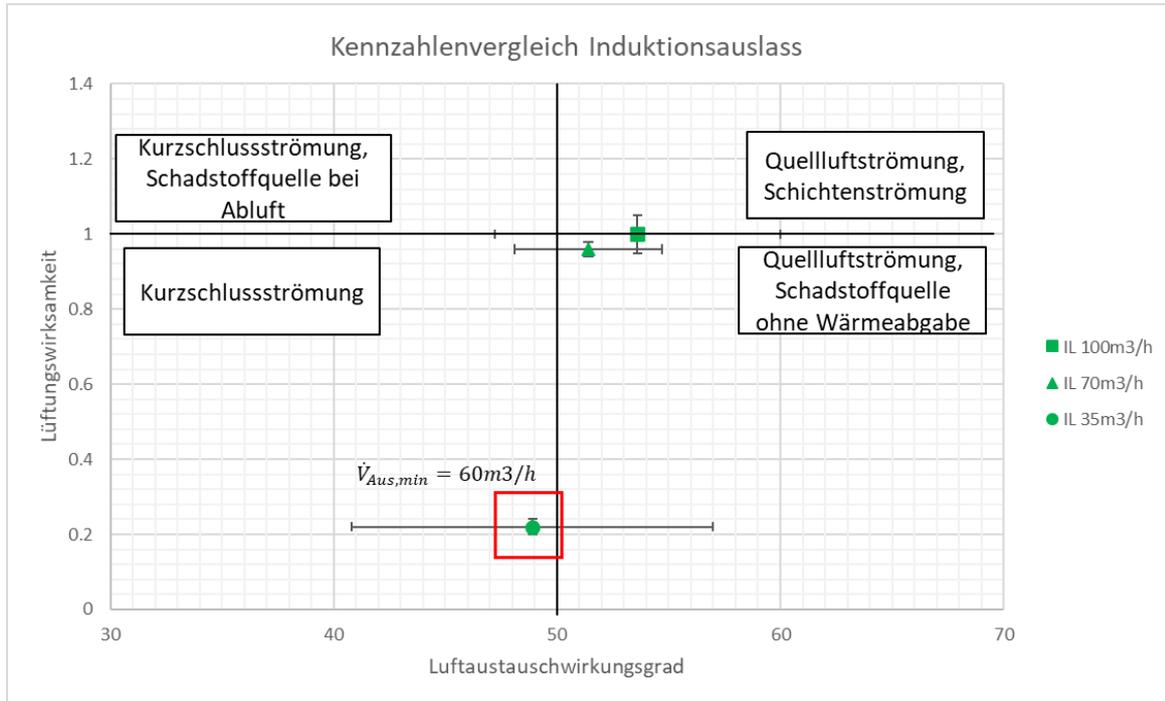


Abbildung 22: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass

8.3.5 Kennzahlenvergleich

Wie in der Abbildung 23 ersichtlich, befinden sich die Kennzahlen aller Messungen in einem ähnlichen Bereich um einen Luftaustauschwirkungsgrad von 50% und eine Lüftungswirksamkeit von 1. Einzig die Messungen mit dem tiefen Volumenstrom von 35m³/h liegen ausserhalb dieses Bereiches. Durch die Unterschreitung der Minimalluftmengen des Drall- wie auch des Induktionsauslasses sowie durch die zu geringe Untertemperatur der Zuluft, ist eine Kurzschlussströmung im Deckenbereich entstanden. Dadurch konnte die Frischluft kaum noch in den Aufenthaltsbereich gelangen. Beim Quellluftauslass mit 35m³/h entsteht keine Kurzschlussströmung, jedoch ist die Frischluftmenge für die im Raum eingesetzten Wärmequellen zu gering und die Schadstoffe können nicht optimal über die Auftriebsströme abgeführt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind alle Kennzahlen aus der Versuchsreihe 1 noch einmal aufgeführt.

Tabelle 12: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass

Komponente	Luftaustauschwirkungsgrad	Lüftungswirksamkeit
Quellauslass 100m ³ /h	50% ± 3%	0.97 ± 0.06
Quellauslass 70m ³ /h	49% ± 1%	0.96 ± 0.04
Quellauslass 50m ³ /h	49% ± 2%	0.91 ± 0.03
Quellauslass 35m ³ /h	49% ± 2%	0.74 ± 0.02
Drallauslass 100m ³ /h	51% ± 5%	1.00 ± 0.02
Drallauslass 70m ³ /h	51% ± 2%	0.92 ± 0.01
Drallauslass 35m ³ /h	44% ± 20%	0.13 ± 0.02
Induktionsauslass 100m ³ /h	54% ± 6%	1.00 ± 0.05
Induktionsauslass 70m ³ /h	51% ± 3%	0.96 ± 0.02
Induktionsauslass 35m ³ /h	49% ± 8%	0.22 ± 0.02

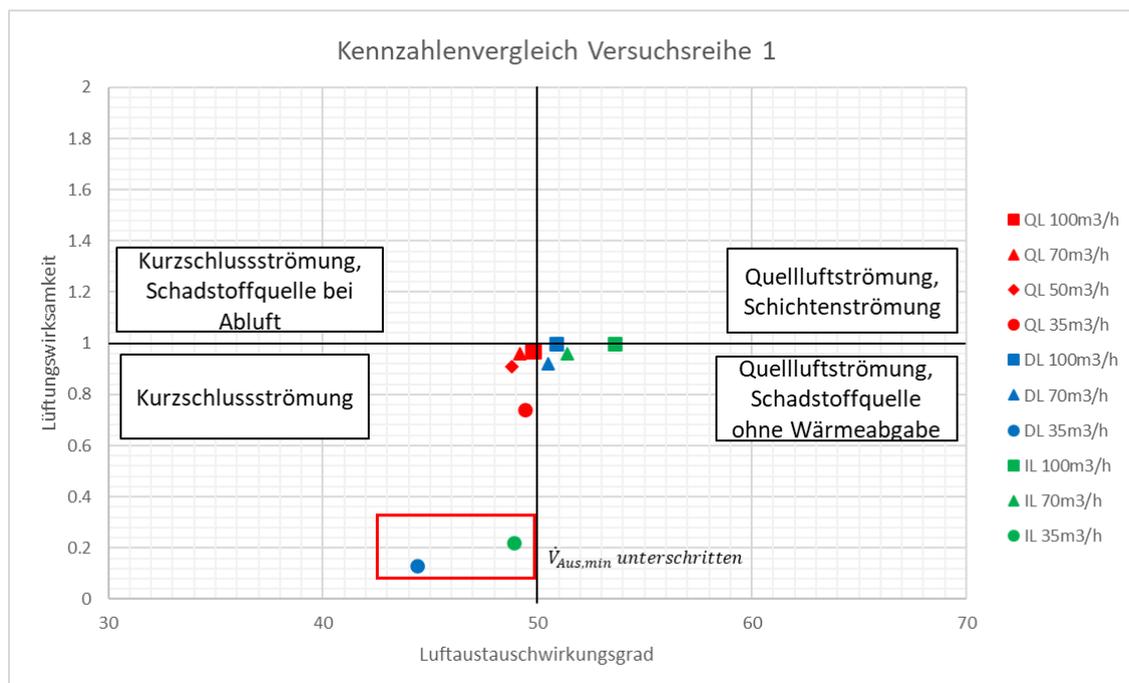


Abbildung 23: Kennzahlenvergleich Versuchsreihe 1

8.3.6 Luftströmungen

Wie in der Zielsetzung definiert, sollen die verschiedenen Lüftungssysteme und Luftmengen in der Versuchsreihe 1 hinsichtlich Komfortprobleme überprüft werden. Dazu wurden die Messstellen, wie im Kapitel Messaufbau und Ablauf beschrieben, zwischen dem Luftauslass und einem der Dummies positioniert. Diese Stellen messen auf verschiedenen Höhen die Luftgeschwindigkeit und die Lufttemperatur. Daraus lässt sich die Anzahl an unzufriedenen Personen hinsichtlich Zugluft berechnen. In einem normalen Büroraum mit mechanischer Lüftung, sollte die Anzahl an Unzufriedener unter 15% liegen. Um auch thermisch einen gewissen Komfort zu erreichen, sollte die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Knöchel eine maximale Differenz von 3.3 Kelvin aufweisen.

Bei den Messungen mit dem Quellluftauslass liegen alle Luftgeschwindigkeiten in einem Bereich unterhalb der Marke von 10% Unzufriedener. Auch bei den Messungen mit dem Drall- und dem Induktionsauslass, liegt die die Anzahl der Unzufriedenen meist im Bereich weit unterhalb der Grenze von 15%. Einzig die beiden Messsonden 626 und 627 im Kopfbereich der sitzenden und der stehenden Person liegen über dieser Grenze. Die Anzahl an Unzufriedener steigt mit sinkendem Luftvolumenstrom an. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass bei den Umbaumaassnahmen zwischen den verschiedenen Messungen, die beiden Messsonden etwas verschoben wurden und nun einen grösseren Einfluss der Auftriebsströme des Dummies hatten. Eine weitere Möglichkeit könnte eine Fehlfunktion der Messsonde sein, dieses kann jedoch als unrealistisch betrachtet werden.

Die maximale Temperaturdifferenz von 3.3 Kelvin zwischen Kopf und Knöchel kann in allen Betriebsfällen eingehalten werden.

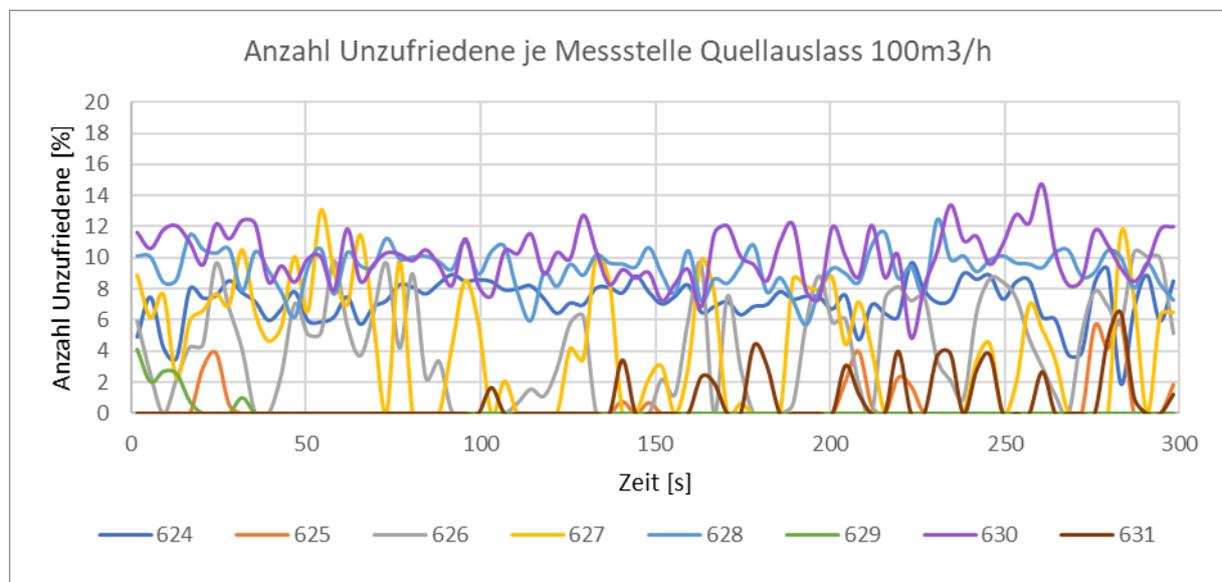


Abbildung 24: Anzahl Unzufriedene Quellluftauslass 100m³/h

9. Versuchsreihe 2 – Pulsdosierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Versuchsreihe 2 in der Klimakammer im Labor IGE der Hochschule Luzern. In dieser Versuchsreihe geht es primär darum, verschiedenen Lüftungsarten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, bezüglich der Schadstoffübertragung, zu vergleichen und zu bewerten. Zusätzlich dient die Versuchsreihe als Einstieg in das Messen mit der Pulsmethode. Der vollständige Laborbericht der Versuchsreihe 2 befindet sich im Anhang 3 und wird hier in gekürzter Form wiedergegeben.

9.1 Messaufbau und Ablauf

Für die Messungen in der Klimakammer ist ein Nutzungsszenario erstellt worden. Die 26m² der Klimakammer stellen, wie in der Versuchsreihe 1, ein Gruppenbüro mit 2 Arbeitsplätzen für sitzende Büroarbeiten dar. Zum Nachbilden einer realen Nutzung, wird die Klimakammer möbliert und mit Bürogeräten ausgestattet. Um eine reale Bürosituation darzustellen, werden verschiedene Wärmequellen und Dummies im Raum positioniert, welche unter anderem eine Personenbelegung und Computer simulieren sollen. Die räumliche Einrichtung mit der Möblierung, der Luftverteilung und den Wärmequellen ist für allen Messungen in der Versuchsreihe 2 gleich und wird nicht verändert.

Die Luftaufbereitung erfolgte über das vorhandene Lüftungsgerät der Klimakammer. Das Lüftungsgerät verfügt über einen Rotationswärmeüberträger, welcher, um die baulich bedingte Leckage zu minimieren, blockiert wurde. Das Lüftungsgerät verfügt über einen Vor- und Nachwärmer sowie über einen Luftkühler, womit die Zuluft auf die vorher definierten Temperaturen konditioniert werden kann. Es besteht auch die Möglichkeit, das Lüftungsgerät teilweise oder vollständig mit Umluft zu betreiben. Von dieser Möglichkeit wird bei dieser Versuchsreihe jedoch kein Gebrauch gemacht und die Anlage vollständig mit Aussenluft betrieben. Die Luftverteilung erfolgt grösstenteils über ein Rohrnetz, welches über verschiedene Anschlussmöglichkeiten verfügt, um Luftauslässe anzuschliessen. Jede Anschlussmöglichkeit verfügt über einen variablen Volumenstromregler und kann individuell eingestellt werden.

Zur Lufteinbringung können individuell 3 verschiedene Luftauslässe gewählt werden. Im Bereich der Eingangstüre befindet sich am Boden ein Quellluftauslass, dieser führt die Frischluft turbulenzarm in den Raum ein. Die Quelllüftung ist für die ordnungsgemässe Funktion auf die Wärmequellen im Raum angewiesen, wodurch die Frischluft durch den Auftrieb aufsteigt und die Personen mit Frischluft versorgt. An der Decke ist ein Drallauslass installiert, welcher die Frischluft turbulent in den Raum einbringt, so dass sie sich mit der Raumluft vermischt und die Schadstoffkonzentration sinkt. Ebenfalls im Deckenbereich befindet sich ein Deckensegel mit integriertem Induktionsauslass. Dieser bläst, wie der Drallauslass, seine Frischluft turbulent über und unterhalb des Deckensegels aus und reduziert so die Schadstoffkonzentration im Raum. Die Abluft wird in der nord-westlichen Raumecke an der Decke über ein Lüftungsrohr gefasst und über das Rohrnetz zur Luftaufbereitung zurückgeführt.

Zum Nachweisen der Wirksamkeit bezüglich von Schadstoffübertragungen, wird im Bereich des Dummy 1 mit der Pulsmethode für eine gewisse Zeit eine konstante Menge Tracergas injiziert und so eine Emissionsquelle simuliert. Jede Messung wird doppelt durchgeführt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. Für alle Messungen können dieselben Messstellen für die Gaskonzentration verwendet werden. Es sind im Raum 1 Messpunkte positioniert, womit die Gaskonzentration bei der Empfängerperson gemessen und aufgezeichnet wird. Die Messposition liegt in einer Höhe von 1.1m über Boden und befindet sich auf dem Pult der Empfangsperson. Um die lokale Lüftungswirksamkeit berechnen zu können, ist eine genaue Gasdosierung zwingend. Dazu wird ein Bronkhorst Durchflussregler mit einer maximalen Durchflussmenge von 2.5 mg/s Schwefelhexafluorid eingesetzt. Dieses kann über einen Computer angesteuert werden und regelt und zeichnet den Gasdurchfluss mit hoher Genauigkeit auf. Der Durchflussregler ist für den Einsatz mit Schwefelhexafluorid konzipiert und muss für die Anwendung mit dem HFO-R 1234yf mit einem Massenkorrekturfaktor korrigiert werden.

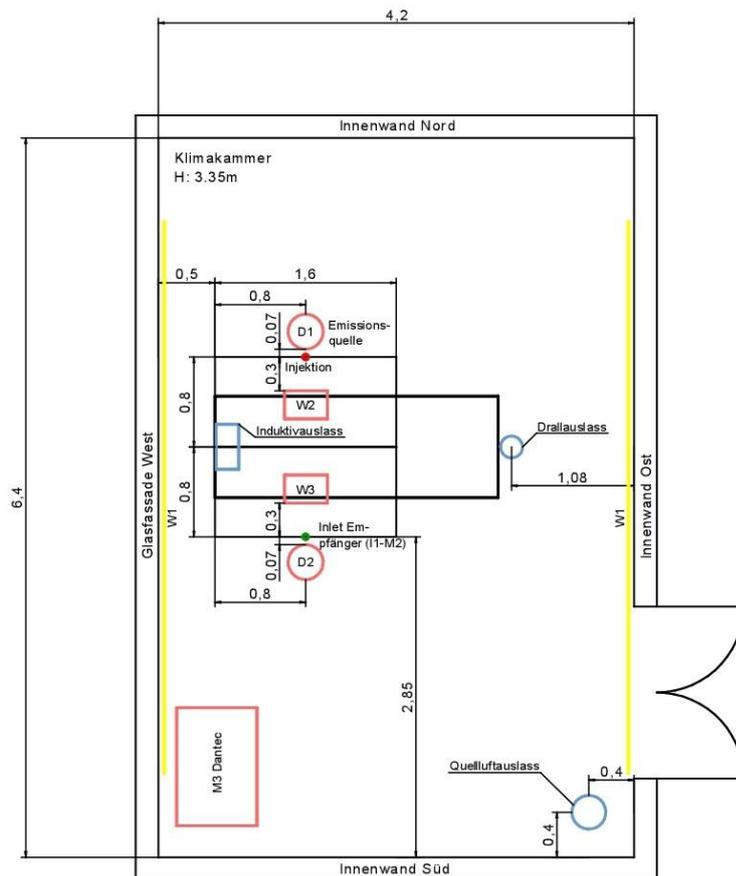


Abbildung 25: Versuchsaufbau Pulsdosierung 1.5m

Nach den Aufbauarbeiten haben die Messungen am Donnerstag, dem 31. März stattgefunden. Aufgrund von Unstimmigkeiten in den Messergebnissen wurden am Donnerstag, dem 05. Mai einige Messungen wiederholt. Die Messaufbauten wie auch die Möblierung blieben über alle Messungen unverändert. Einzig die Luftmengen wie auch die Lufteinbringung über die verschiedenen Auslastypen variierte. Um die Plausibilität der Pulsmessungen zu überprüfen, wurde jede Messung doppelt durchgeführt. Um den Einfluss einer weiteren Messdistanz ebenfalls abschätzen zu können, wurde eine Messsituation mit dem doppelten Abstand zwischen der Emissionsquelle und dem Empfänger aufgebaut und Messungen durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zeiten der Versuche aufgeführt.

Tabelle 13: Messprogramm Versuchsreihe 2

Datum/Zeit	Typ/Luftmenge	Nr. Pulsmessung
31.03.2022 / 09:44 Uhr	Quellluftauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 10:34 Uhr	Quellluftauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 2
31.03.2022 / 11:22 Uhr	Quellluftauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 12:44 Uhr	Quellluftauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 2
31.03.2022 / 13:42 Uhr	Induktionsauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 14:19 Uhr	Induktionsauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 2
31.03.2022 / 14:58 Uhr	Induktionsauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 15:39 Uhr	Induktionsauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 2
31.03.2022 / 16:20 Uhr	Drallauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 17:01 Uhr	Drallauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 2
31.03.2022 / 17:40 Uhr	Drallauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 1
31.03.2022 / 18:18 Uhr	Drallauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 2
05.05.2022 / 14:46 Uhr	Quellluftauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 3
05.05.2022 / 15:14 Uhr	Quellluftauslass 70m ³ /h	Pulsmessung 4
05.05.2022 / 15:54 Uhr	Quellluftauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 3
05.05.2022 / 16:45 Uhr	Quellluftauslass 35m ³ /h	Pulsmessung 4
05.05.2022 / 17:26 Uhr	QL 70m ³ /h - 3m Distanz	Pulsmessung 1
05.05.2022 / 18:06 Uhr	QL 70m ³ /h - 3m Distanz	Pulsmessung 2

9.2 Rahmenbedingungen

Die Klimakammer kann über das Lüftungsgerät individuell belüftet werden. Für die Versuchsreihe 2 werden 2 Luftmengen definiert, bei welchen Messungen durchgeführt werden. Die grösste Luftmenge ist die Luftmenge nach dem SIA Merkblatt 2024 (SIA MB 2024, 2021). Dieses definiert einen spezifischen Luftvolumenstrom von $2.6\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Anhand der Raumfläche ergibt dies eine Luftmenge von $70\text{m}^3/\text{h}$. Die 2. Luftmenge orientiert sich an der SIA 382/1. Gemäss dieser kann zur Vermeidung von zu tiefen Raumlufftfeuchten bei Aussenlufttemperaturen von unter 0°C oder unerwünschten Wärmeeinträgen bei Aussenlufttemperaturen über 25°C , der Aussenluftvolumenstrom um maximal 50% reduziert werden (SIA 382/1, 2014). Diese Reduktion auf die Luftmenge gemäss dem Merkblatt 2024 ergibt eine Luftmenge mit $35\text{m}^3/\text{h}$.

Ein grosser Vorteil der Klimakammer sind die temperierbaren Raumbooberflächen. Die Wände der Klimakammer werden für die Versuchsreihe 2 so temperiert, dass die Wand auf der Westseite eine kühle Aussenwand an einem Frühlingstag darstellt und eine Temperatur von 18.5°C aufweist. Die restlichen Wandoberflächen dienen zur Regelung der Raumtemperatur von 21.0°C und werden individuell temperiert. Der Boden der Klimakammer wird nicht thermisch aktiviert. Die Zulufttemperaturen variieren je nach Luftauslasstyp und sind in der nachfolgenden Tabelle 14 ersichtlich.

Tabelle 14: Temperatursollwerte für die Klimatisierung der Klimakammer Versuchsreihe 2

Grösse	Solltemperatur	Hysterese
Raumtemperatur	21.0°C	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
Wandtemperatur West	18.5°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Quellauslass	17.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Drallauslass	18.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Zulufttemperatur Induktionsausl.	18.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

9.3 Auswertung Messungen

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe 2 zur Bestimmung der lokalen Lüftungswirksamkeit. Anhand dieser Wirksamkeit können Aussagen hinsichtlich der Übertragung von Schadstoffen gemacht werden.

9.3.1 Probleme Gasdosierung

Aufgrund eines Fehlers bei der Ansteuerung des Gasdurchflussregler, wurde zu Beginn eine zu hohe Gasmenge dosiert. Wie in der Abbildung 26 ersichtlich, stieg auch 30 Minuten nach dem Dosieren des Tracergases die Konzentration weiter an. Durch die hohe Gasmenge im Raum sowie die Unsicherheit hinsichtlich effektiv dosierter Gasmenge, lieferten die Pulsmessungen 1 und 2 des Quellluftauslasses sowohl bei $70\text{m}^3/\text{h}$ wie auch bei der kleineren Luftmenge von $35\text{m}^3/\text{h}$ keine plausiblen Ergebnisse. Neben dem Gasmassenstroms wurde auch die Dosierzeit für die weiteren Versuche angepasst. Die Messungen mit dem Quellluftauslass wurden zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt.

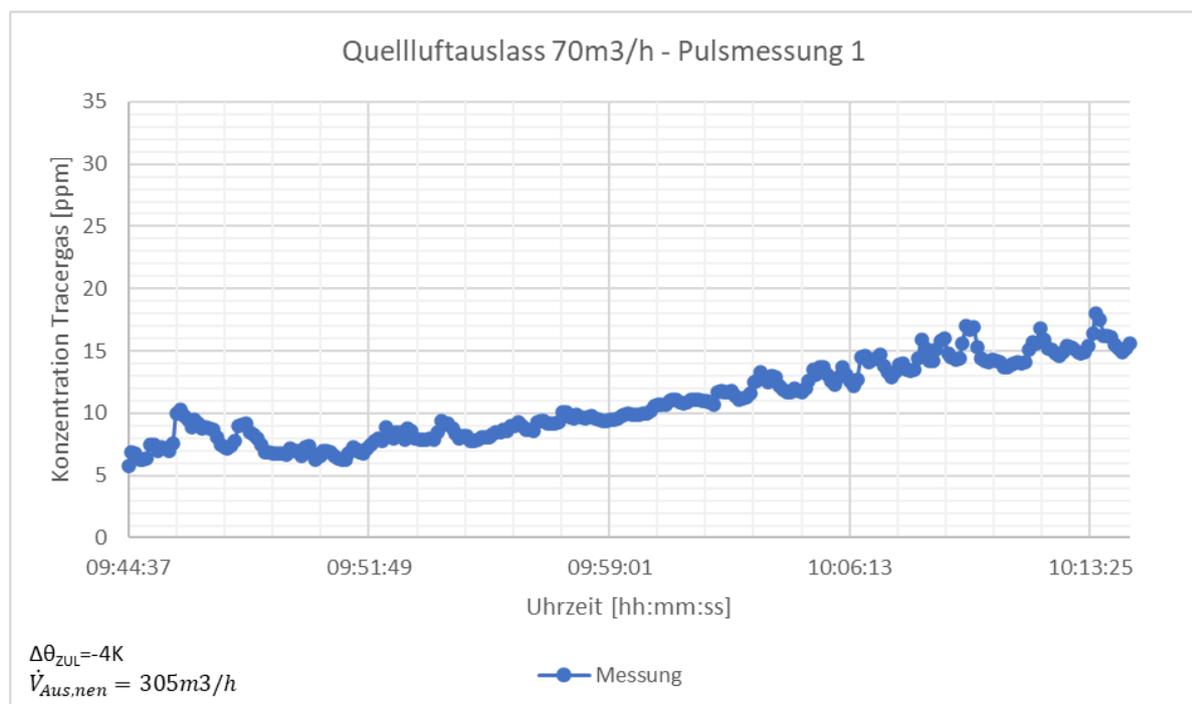


Abbildung 26: Quelllüftung $70\text{m}^3/\text{h}$ – Pulsmessung 1

9.3.2 Pulsmessungen 1.5m

Bei den Puls-Messungen wurde wie im Kapitel 6.3.3 Tracer Pulsmethode aufgeführt, für eine kurze Zeit eine gewisse Gasmenge dosiert. Die Lüftungsanlage wurde über den gesamten Messzeitraum konstant betrieben und über das Gasmessgerät die Gaskonzentration alle 5 Sekunden gemessen und aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurve und der Berechnungsformel für die Pulsmethode, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit bezüglich Schadstoffübertragungen machen.

Sinnbildlich für die Tracer-Pulsmessungen mit 1.5 m Distanz, sind nachfolgend in der Abbildung 27 die Pulsmessung 3 des Quellluftauslasses $70\text{m}^3/\text{h}$ und in der Abbildung 28 die Messung 2 des Drallauslasses $35\text{m}^3/\text{h}$ aufgeführt. Darin ist erkennbar, wie die Gaskonzentrationen nach der Dosierung des Gases stark ansteigen. Die Konzentration erreicht nach wenigen Minuten ihren Höchststand und fällt danach rasch wieder ab. Mithilfe der logarithmischen Darstellung der Gaskonzentration kann festgestellt werden, dass die Abklingkurve näherungsweise exponentiell abfallend ist. Zuerst fällt die Konzentration nach dem Höchststand stark ab, bevor sie einen Knick aufweist und mit geringerer Steigung weiter abfällt. Ein möglicher Grund für die Veränderungen in der Abklingkurve kann eine Restkonzentration im Raum sein, welche durch das Lüftungssystem noch nicht abgeführt worden ist und so die flache Abklingkurve verursacht.

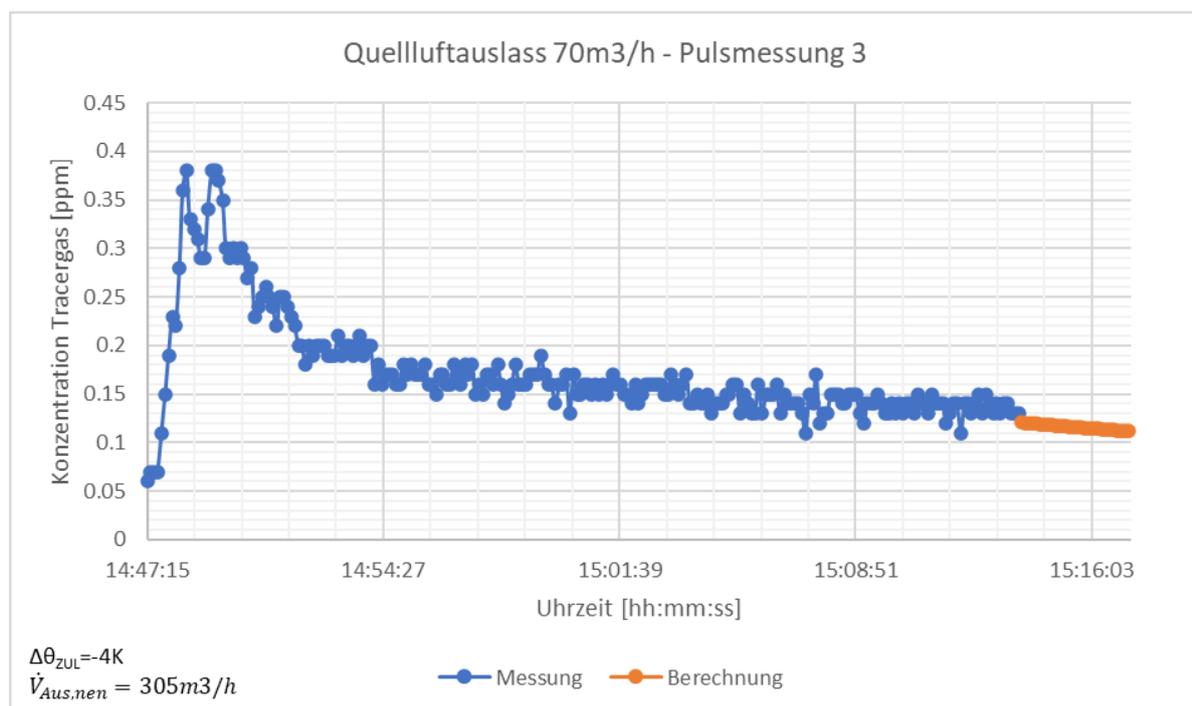


Abbildung 27: Quelllüftung $70\text{m}^3/\text{h}$ – Pulsmessung 3

Anders als bei den Messungen mit dem Quellluftauslass, wird die Gaskonzentration durch die Mischlüftung verdünnt und die Konzentration steigt gleichmässiger an. Der Konzentrationspeak wird bereits nach 7 Minuten erreicht. Nach dem Höchststand sinkt die Konzentration zu Beginn stärker ab und geht danach in ein nahezu exponentielles Abklingen über. Zu Beginn des

Abklingens ist die Steigung noch etwas grösser, sinkt nach wenigen Minuten jedoch. Die Abklingkurve ist relativ flach und nähert sich nur langsam dem Nullpunkt. Auch bei dieser Messung ist es möglich, dass die flache Abklingkurve ihren Ursprung in der noch vorhandenen Restkonzentration im Raum hat.

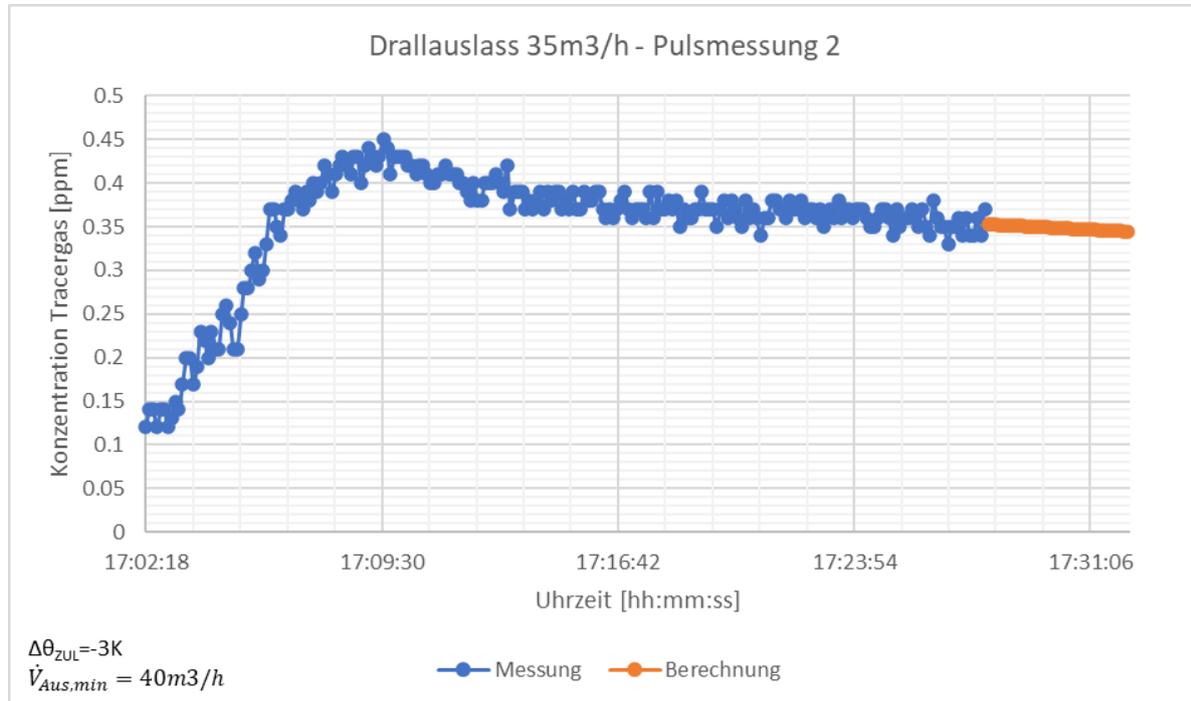


Abbildung 28: Drallauslass 35m³/h – Pulsmessung 2

In der Tabelle 15, auf der nächsten Seite, sind die Lüftungswirksamkeiten der verschiedenen Pulsmessungen aufgeführt. Ausgehend vom REHVA 14th HVAC World Congress Dokuments «Determination of ventilation effectiveness with tracer gas methods under COVID-19 conditions» (Frei et al., 2022) dient die lokale Lüftungswirksamkeit dazu, die Wirksamkeit bezüglich möglicher Schadstoffübertragungen zu beurteilen. Eine Wirksamkeit von 1 stellt eine perfekte Durchmischung mit der Raumluft dar. Liegt der Wert über 1, werden die Schadstoffe besser abgeführt als bei einer homogenen Durchmischung. Liegt die Wirksamkeit unter 1, so werden die Schadstoffe schlechtere oder gar nicht abgeführt.

Für den Quellluftauslass sollte eine Lüftungswirksamkeit grösser als 1 resultieren und für die Belüftung über Drall- oder Induktionsauslässe sollte die Wirksamkeit sich etwa bei 1 befinden.

Es ist ersichtlich, dass die Wirksamkeit des Quellluftauslasses, jeweils bei den Messungen 1 und 2, nicht plausible Werte aufweisen. Wie im vorhergehenden Kapitel erwähnt, mussten diese Messungen wiederholt werden. Diese Werte der Wiederholung sind hier als Messung 3 und 4 aufgeführt. Nach dem Wiederholen dieser Messungen weisen auch diese Messungen plausible Resultate auf.

Die Lüftungswirksamkeiten der Messungen 3 und 4 entsprechen den Erwartungen und liegen in einem ähnlichen Bereich. Mit einer Lüftungswirksamkeit von ca. 4 weist die Quelllüftung mit einem Volumenstrom von $70\text{m}^3/\text{h}$ einen massiv besseren Schadstoffabtransport auf als eine ideale Mischlüftung unter diesen Bedingungen. Auch bei einer Luftmenge von $35\text{m}^3/\text{h}$ liegt die Wirksamkeit weiterhin in einem hohen Bereich. Die Schadstoffe werden effizienter durch die Auftriebsströme an den Personen aus dem Aufenthaltsbereich abgeführt und mit frischer Luft ersetzt.

Bei den Messungen des Drallauslasses fällt auf, dass die Wirksamkeiten der beiden Messungen bei $70\text{m}^3/\text{h}$ weit auseinander liegt. Ein möglicher Grund für die starken Unterschiede kann ein Schwanken der Zulufttemperaturen sein, wodurch Dichteunterschiede ein schnelleres Aufsteigen und Abführen der Schadstoffe ermöglicht haben. Der Schadstoffabtransport bei $35\text{m}^3/\text{h}$ liegt höher als erwartet. Durch die tiefe Luftmenge spielen plötzlich die Auftriebsströme der Wärmequellen eine grössere Rolle. Dadurch werden die Schadstoffe aus dem Aufenthaltsbereich abgeführt und nicht nur mit der Raumluft verdünnt. Die Messungen des Induktionsauslasses entsprechen den Erwartungen aus den Ergebnissen der bis anhin durchgeführten Messungen. Bei der höheren Luftmenge von $70\text{m}^3/\text{h}$ liegt die Wirksamkeit mit einem Wert von ca. 0.9 leicht schlechter als eine optimale Mischlüftung. Diese Abweichung liegt jedoch im Toleranzbereich und kann als optimale Durchmischung der Schadstoffe mit der Raumluft betrachtet werden. Wie bei der Messung des Drallauslasses liegen auch beim Induktionsauslass die Wirksamkeiten der tieferen Luftmenge über 1. Auch hier kann von einem grösseren Einfluss der Auftriebsströme ausgegangen werden und die Schadstoffe werden besser abgeführt als bei einer guten Durchmischung mit der Raumluft.

Tabelle 15: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung

Auslasstyp	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
Quellluftauslass $70\text{m}^3/\text{h}$	-	0.1	4.1	3.9
Quellluftauslass $35\text{m}^3/\text{h}$	0.1	1.1	3.6	3.2
Drallauslass $70\text{m}^3/\text{h}$	0.9	1.6		
Drallauslass $35\text{m}^3/\text{h}$	1.3	1.2		
Induktionsauslass $70\text{m}^3/\text{h}$	0.9	0.9		
Induktionsauslass $35\text{m}^3/\text{h}$	1.4	1.1		

Im Grossen und Ganzen kann gesagt werden, dass die Schadstoffe beim Quellluftauslass besser abgeführt werden. Durch die turbulenzarme Strömung werden die Schadstoffe im Aufenthaltsbereich nicht vollständig mit der Raumluft vermischt und steigen an die Decke, wo sie über die Abluft effizient abgeführt werden können. Bei den beiden Mischlüftungsauslässen liegen die Werte nahe bei 1 und es sind nur kleine Unterschiede vorhanden. Die leicht höheren Werte bei den tieferen Luftmengen können auf die tiefen Austrittsgeschwindigkeiten zurückgeführt werden, wodurch nur eine kleine Impulswirkung und keine gute Durchmischung mit der Raumluft vorhanden ist. Die Auftriebsströme der Wärmequellen erhalten einen höheren Stellenwert.

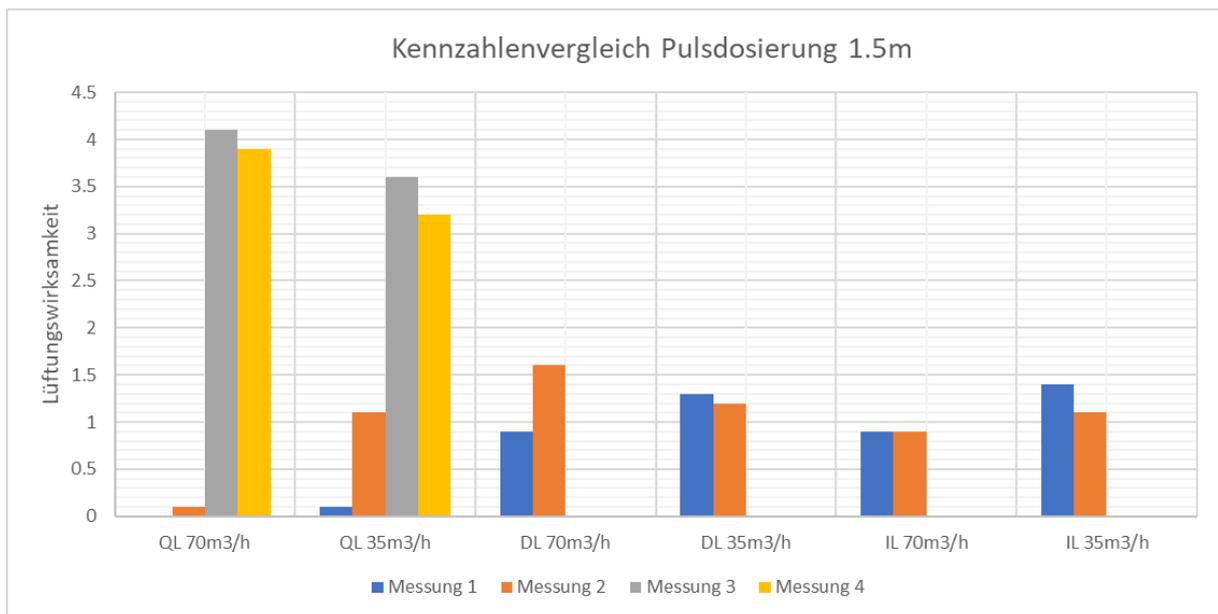


Abbildung 29: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung 1.5m

9.3.3 Quellluftauslass 3.0m

Es wurde eine weitere Situation geprüft, da sich die Zeit des Messintervalls und die des Gaspulses, in derselben Grössenordnung befinden. Das Messintervall entspricht der Zeit, welche der Puls benötigt, um die Strecke von 1.5m von der Emissionsquelle bis zur Messtelle des Empfängers zurückzulegen. Die Distanz zwischen der Emissionsquelle und dem Empfänger wurde verdoppelt, indem die Arbeitsplätze diagonal verschoben angeordnet wurden. Es wurden 2 Messungen mit dem Quellluftauslass und einer Luftmenge von $70\text{m}^3/\text{h}$ durchgeführt und über das Gasmessgerät aufgezeichnet.

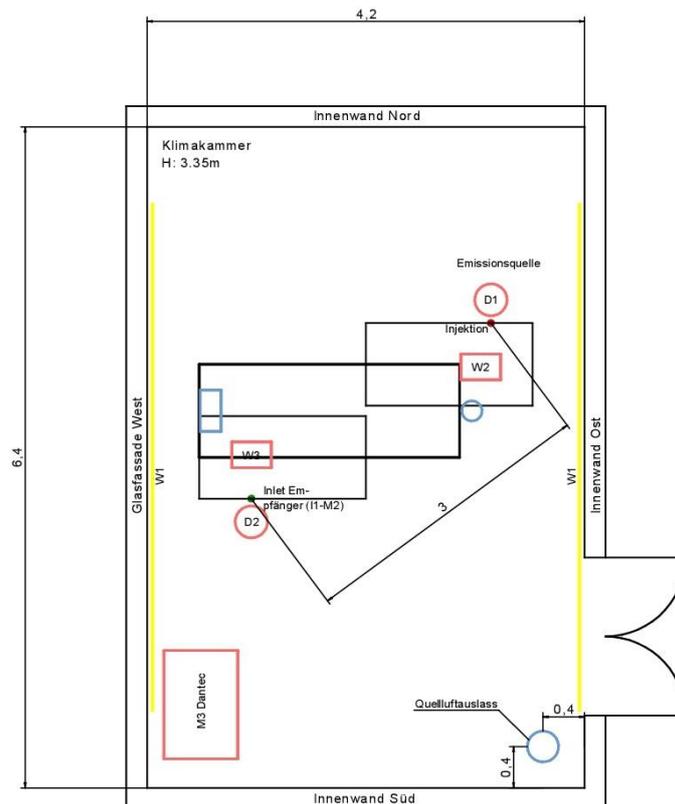


Abbildung 30: Versuchsaufbau Pulsdosierung 3m

In der Abbildung 31 ist die Pulsmessung 1 bei einer Distanz von 3m aufgeführt. Zu Beginn ist ähnlich wie bei der Pulsmessung des Quellluftauslass über die halbe Distanz, ein starker Anstieg der Konzentration ersichtlich. Nach dem Erreichen des Höchststandes weicht jedoch die Abklingkurve von der Pulsmessung mit 1.5m Distanz ab. Während über die kürzere Distanz die Abklingkurve stark abnimmt und somit die Konzentration rasch absinkt, bleibt sie über die Distanz von 3m auf hohem Niveau und fällt nur langsam ab. Die Abklingkurve ist ähnlich einer Kurve einer Mischlüftung. Trotz der vielen Schwankungen verläuft die Abklingkurve nahezu exponentiell.

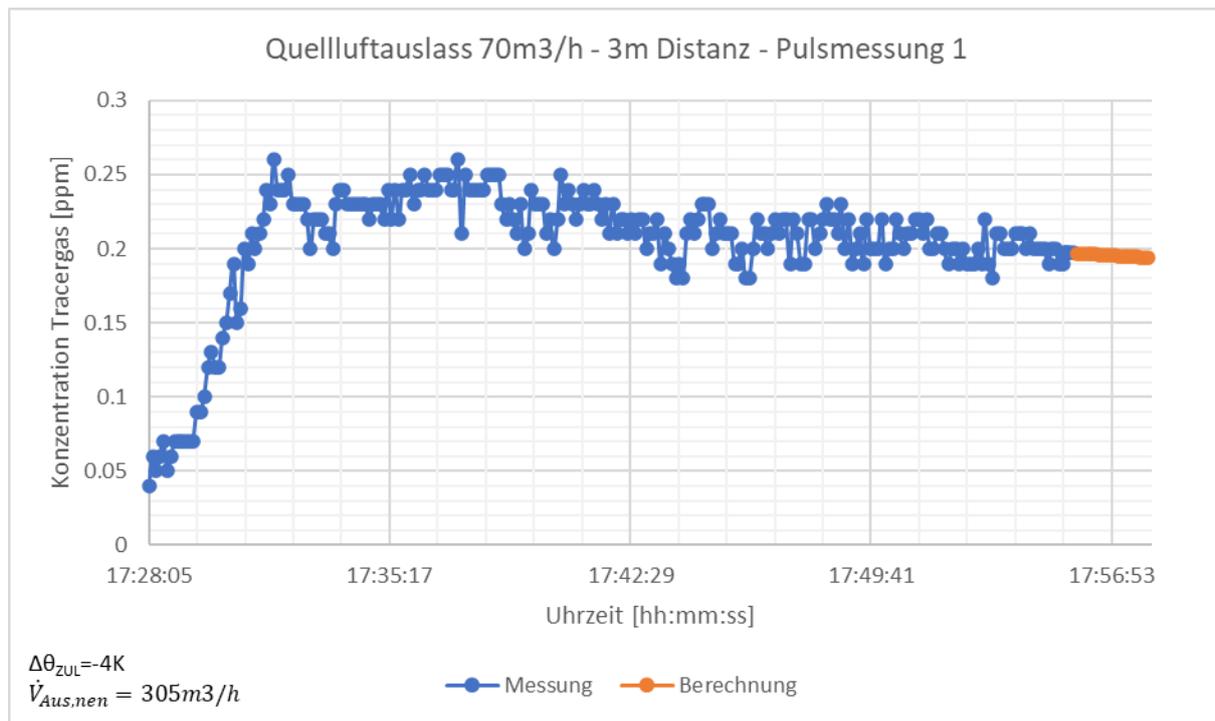


Abbildung 31: Pulsdosierung Quellluftauslass 3m Distanz

Wie in der Tabelle 16 ersichtlich, liegen die Wirksamkeiten und somit der Schadstoffabtransport tiefer als über die kürzere Distanz. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da die Distanz zwischen dem Sender und dem Empfänger verdoppelt wurde und somit die Schadstoffe einen weiteren Weg zurücklegen müssen.

Da die Höhe der lokalen Lüftungswirksamkeit nur eine Aussage zur jeweiligen Situation und im Verhältnis zur optimalen Mischlüftung macht, sind die Werte nur bedingt miteinander vergleichbar. Sicherlich kann gesagt werden, dass die Schadstoffe über die Distanz von 1.5m besser abgeführt werden als über die 3m. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass die Abluffassung nun von der Emissionsstelle etwa gleich weit entfernt ist, wie von der Empfangsstelle und somit die vorher herrschenden positiven Einwirkungen der Raumluftrömungen nicht mehr gleich wirken.

Tabelle 16: Lüftungswirksamkeiten Pulsdosierung - unterschiedliche Distanzen

Auslasstyp	Messung a	Messung b
Quellluftauslass 1.5m	4.1	3.9
Quellluftauslass 3.0m	1.4	1.1

In der nachfolgenden Abbildung sind die unterschiedlichen Höhen der Lüftungswirksamkeit gut ersichtlich.

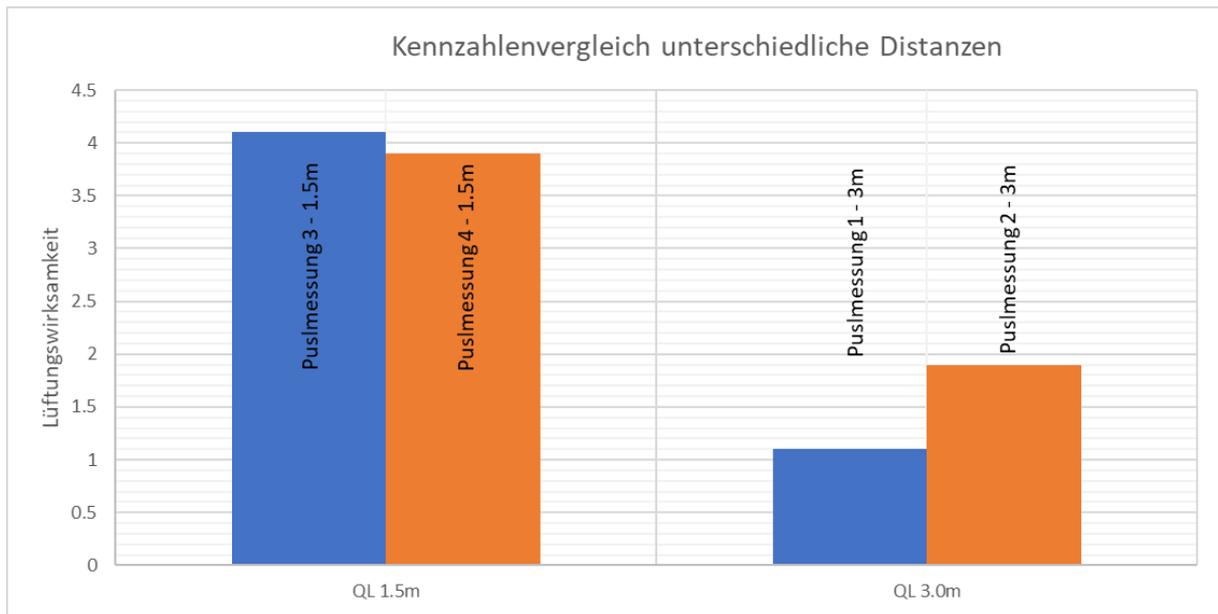


Abbildung 32: Kennzahlenvergleich unterschiedliche Distanzen Pulsdosierung

10. Versuchsreihe 3 - Sitzungszimmer Durrer Technik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Versuchsreihe 3 im Sitzungszimmer der Firma Durrer Technik. In dieser Versuchsreihe geht es primär darum, die erlernten Kenntnisse aus den vorangehenden Versuchsreihen anzuwenden und eine reale Bürosituation hinsichtlich ihrer Lüftungswirksamkeit sowie ihres Luftaustauschwirkungsgrads zu bewerten und Aussagen zu der Wirksamkeit betreffend Schadstoffübertragung zu machen. Der vollständige Laborbericht der Versuchsreihe 3 befindet sich im Anhang 4 und wird hier in gekürzter Form wiedergegeben.

10.1 Messaufbau und Ablauf

Für die Messungen bei der Firma Durrer Technik AG wurde ein Nutzungsszenario erstellt. Auf den 48m² des Sitzungszimmers wird für die Messungen eine Besprechung mit 9 Sitzungsteilnehmern nachgestellt. Um eine reale Sitzungssituation darzustellen, werden verschiedene Wärmequellen und Dummies im Raum positioniert, welche unter anderem eine Personenbelegung und Computer simulieren sollen. Die räumliche Einrichtung mit der Möblierung, der Luftverteilung und den Wärmequellen ist für alle Messungen in der Versuchsreihe 3 gleich und wird nicht verändert.

Die Luftaufbereitung erfolgte über das im Jahr 2015 erstellte Lüftungsgerät, welches sich in einem extra dafür geschaffenen Raum befindet. Das Lüftungsgerät verfügt über einen Rotationswärmeübertrager, welcher für die Wärmerückgewinnung sowie die Konditionierung der Zulufttemperatur dient. Es sind keine weiteren Lufterwärmer oder -kühler vorhanden, welche eine konstante Zulufttemperatur ermöglichen würden. Die Anlage verfügt über ein Raumbediengerät, über welches die Lüftungsanlage auf 2 Stufen betrieben werden kann. Die Lüftungsanlage verfügt über ein kurzes Verteilnetz, da die Lüftungsanlage ausschliesslich für die Belüftung des Sitzungszimmers erstellt wurde und sich nahe dem Sitzungszimmer befindet. Das Leitungsnetz ist sowohl aus Kanälen wie auch Rohren erstellt.

Zur Lufteinbringung sind 2 Quellauslässe im Raum verbaut. Diese befinden sich je auf einer Seite des Präsentationsbildschirms und bringen die Frischluft im Bodenbereich in den Raum ein. Die Quellauslässe sind für die ordnungsgemässe Funktion auf die Wärmequellen im Raum angewiesen, wodurch die Frischluft durch den Dichteunterschied aufsteigt und die Personen mit Frischluft versorgt. Die Abluft wird im Deckenbereich über 6 Abluftgitter gefasst und über einen Lüftungskanal zum Lüftungsgerät zurückgeführt.

Da in dieser Versuchsreihe sowohl mit der Tracer-Step-Down-Methode wie auch mit der Puls-methode gearbeitet wird, werden unterschiedliche Messaufbauten benötigt.

Zum Nachweisen der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades wird beim Quellauslass Süd eine konstante Tracergasmenge von 2 Nl/min injiziert und über die Frischluft dem Raum zugeführt. Für beide Kennzahlen können dieselben Messstellen zur Messung

befindet sich die Schadstoffquelle unterhalb der Abluffassung und die Empfangsperson beim Eingang. Bei der Situation 2 werden diese beiden Positionen gewechselt.

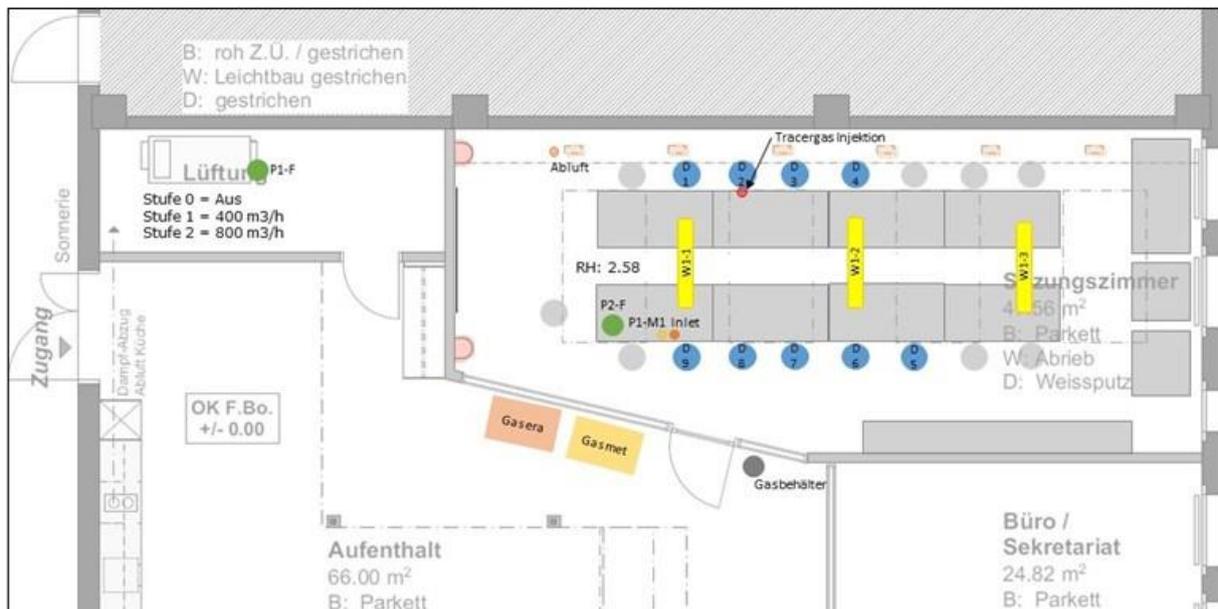


Abbildung 34: Versuchsaufbau Pulsdosierung – Situation 1

Nach den Aufbauarbeiten haben die Messungen am Donnerstag, dem 21. April stattgefunden. Die Möblierung sowie die Wärmequellen blieben über alle Messungen unverändert. Einzig die Luftmengen wie die Mess- und Emissionspositionen variierten je nach Versuch. Um die Plausibilität der Pulsmessungen zu überprüfen, wurden diese Messungen jeweils doppelt durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zeiten der Versuche aufgeführt.

Tabelle 17: Messprogramm Versuchsreihe 3

Datum/Zeit	Typ/Luftmenge	Messung
21.04.2022 / 09:08 Uhr	Quellluftauslass 800m ³ /h	Step-Down-Messung
21.04.2022 / 11:18 Uhr	Quellluftauslass 400m ³ /h	Step-Down-Messung
21.04.2022 / 13:42 Uhr	Quellluftauslass 400m ³ /h	Pulsmessung 1 – Situation 1
21.04.2022 / 14:12 Uhr	Quellluftauslass 400m ³ /h	Pulsmessung 2 – Situation 1
21.04.2022 / 14:55 Uhr	Quellluftauslass 400m ³ /h	Pulsmessung 1 – Situation 2
21.04.2022 / 15:24 Uhr	Quellluftauslass 400m ³ /h	Pulsmessung 2 – Situation 2

10.2 Rahmenbedingungen

Das Sitzungszimmer kann über einen Stufenschalter auf 2 Stufen betrieben werden. Die 1. Stufe weist eine Luftmenge von $400\text{m}^3/\text{h}$ auf, was einem spezifischen Luftvolumenstrom von $8.3\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ entspricht. Dieser Wert liegt etwas unterhalb der $9.7\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$, welche gemäss dem SIA Merkblatt 2024 für ein Sitzungszimmer einzusetzen sind. Auf der 2. Stufe wird das Sitzungszimmer mit einer Luftmenge von $800\text{m}^3/\text{h}$ belüftet. Dies entspricht einem 6.5-fachen Luftwechsel.

Anders als bei den Versuchsreihen 1 und 2, welche in der Klimakammer des IGE an der Hochschule Luzern durchgeführt wurden, besteht keine Möglichkeit die Raumbooberflächen oder die Zulufttemperatur individuell zu regulieren und konstant zu halten. Ausserdem verfügt das Lüftungsgerät über einen Rotationswärmeüberträger, welcher für die Versuchsreihe 3 nicht ohne weiteres ausser Betrieb genommen werden konnte. Die Zuluft wird ausschliesslich über diese Wärmerückgewinnung erwärmt oder gekühlt.

Um sicherzustellen, dass die verschiedenen Messungen untereinander vergleichbar sind, wurde sowohl im Zuluftkanal wie auch im Raum selbst ein Datenlogger aufgestellt, womit die Temperaturen aufgezeichnet werden. In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Temperaturen aufgeführt, welche während des Messprozesses geherrscht haben.

Tabelle 18: Temperaturwerte während Messversuchen bei Durrer-Technik

Grösse	Mitteltemperatur	Abweichungen
Zulufttemperatur	20.0°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$
Raumtemperatur	24.0°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

10.3 Auswertung Messungen

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe 3 bei Durrer Technik und ist in verschiedene Unterkapitel gegliedert. Diese Versuchsreihe dient zur Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades, der Lüftungswirksamkeit sowie der Wirkung bezüglich Schadstoffübertragungen.

10.3.1 Probleme Durchflussregler

Aufgrund der sehr tiefen Gaskonzentrationen in den Versuchsreihen 1 und 2, wurde für die Versuchsreihe 3 bei Durrer Technik der Gasdurchflussregler durch ein grösseres Modell ersetzt. Jedoch wies dieses trotz Minimaldurchfluss einen für die Fläche des Sitzungszimmers zu hoher Volumenstrom auf, wodurch sehr hohe Gaskonzentrationen entstanden sind.

10.3.2 Konstantdosierung

Bei den Tracer-Step-Down-Messungen wurde wie im Kapitel 6.3.2 Tracer Step-Down-Methode aufgeführt, für eine gewisse Zeit eine konstante Gasmenge dosiert. Nach dem Stoppen der Gaszufuhr wurde die Lüftungsanlage weiter betrieben und die Abklingkurve aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurven und den Berechnungsformeln zu der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Effektivität der Raumbelüftung machen.

Als erstes wurde die Messung mit der Luftmenge von $800\text{m}^3/\text{h}$ durchgeführt. In der Abbildung 35 ist die Gaskonzentration über die Tracer Step-Down-Messungen aufgeführt. Darin ist erkennbar, dass die Gaskonzentration rasch ansteigt und nach der Reduzierung der Gasdosierung wieder auf einen relativ konstanten Wert absinkt. Nach dem Stoppen der Gasdosierung, nehmen sowohl die Gaskonzentration in der Abluft sowie die beiden Messstellen im Raum exponentiell ab und befinden sich in ähnlichen Bereichen.

Während des Messvorgangs wurde bemerkt, dass die für die Zuluft vorgesehene Messstelle zu stark von der Raumluft beeinflusst wird und zu hohe Messwerte ergibt. Die Position der Zuluftmessstelle wurde angepasst und die Gaskonzentration sank darauf auf einen realistischen Wert ab.

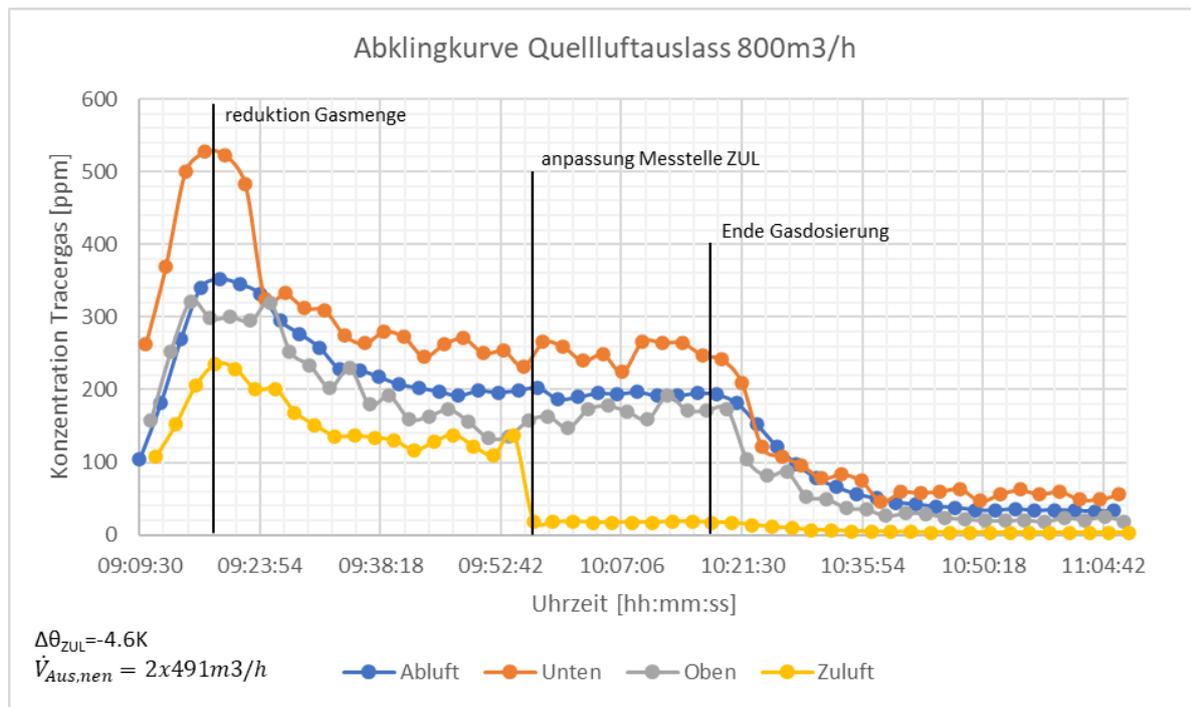


Abbildung 35: Tracergasmessung Quelllüftung 800m³/h

Gegenüber der Messung mit 800m³/h, wurde bei der Messung von Beginn an die korrekte Dosiermenge eingestellt. Daher nähern sich die Konzentrationen an den verschiedenen Messpositionen von unten her dem Maximum an. Gleich wie in der vorangehenden Messung, weist die Messposition in Bodennähe eine höhere Gaskonzentration auf als die anderen. Nach dem Stoppen der Gasdosierung nehmen die Konzentrationen rasch ab und bewegen sich relativ symmetrisch. Die Abklingkurve ist nicht ganz exponentiell und wird mit der Zeit flacher.

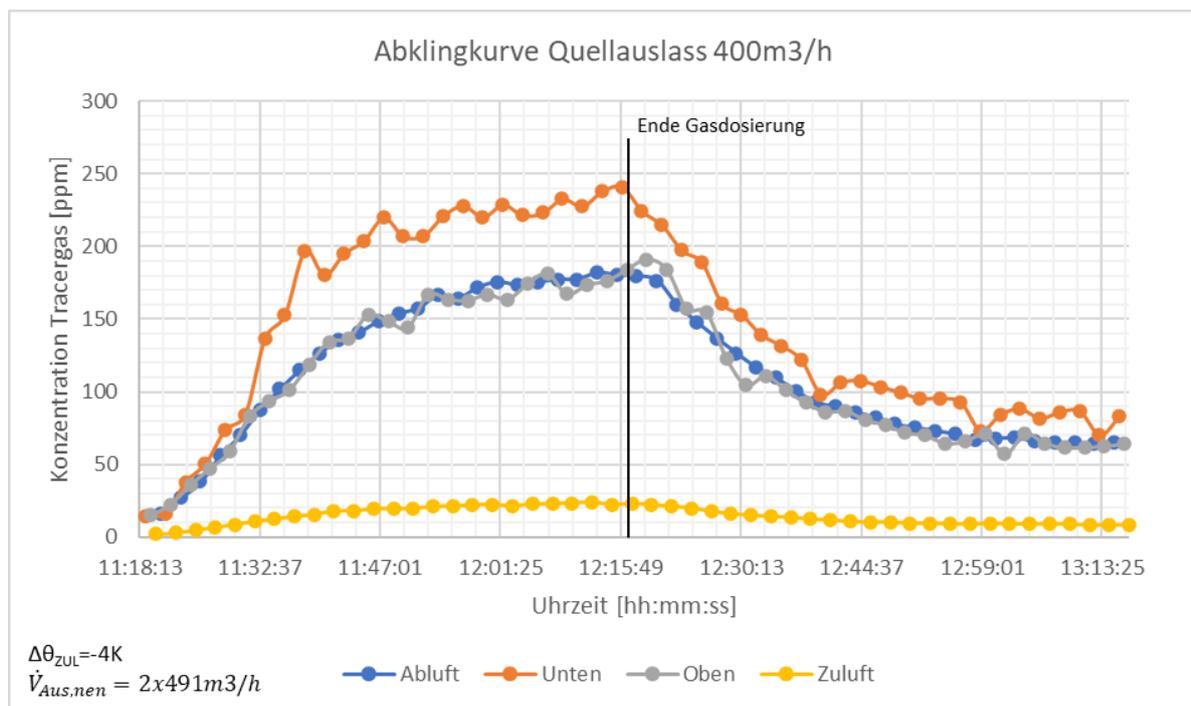


Abbildung 36: Tracergasmessung Quelllüftung 400m³/h

In der Tabelle 19 sind die verschiedenen Kennzahlen aus den beiden Messungen mit dem Quellauslass aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass sowohl der Luftaustauschwirkungsgrad wie auch die Lüftungswirksamkeit mit sinkender Luftmenge abnimmt. Der Luftaustauschwirkungsgrad liegt bei beiden Luftmengen im unteren Bereich der Sollwerte aus den Literaturquellen, welche einen Wirkungsgrad grösser als 50% angeben. Die Lüftungswirksamkeiten liegen beide unterhalb des Literaturwertes aus der ASHRAE RP-1373 (ASHRAE RP-1373, 2009).

Beide Werte liegen in einem Bereich, welcher normalerweise eine gute Mischlüftung darstellt. Jedoch weisen alle Kennwerte eine hohe Unsicherheit auf. Ein möglicher Grund für die tieferen Werte und die hohen Unsicherheiten, kann die ungünstige Raumform sein, da der Raum relativ schmal jedoch lang ist und im Raumbereich bei der Aussenfassade noch lange Tracergas vorhanden ist. Dieses gelangt in den vorderen Teil zu den Wärmequellen und verfälscht die Kennzahlen. Zusätzlich kann bei hohen Gasdosierungen, wie bei diesen Messungen, sich der Plateaueffekt einstellen, wobei eine gewisse Gasmenge im Raum vorhanden ist, welche durch die Lüftungsanlage nur schwer abgeführt werden kann.

Tabelle 19: Kennzahlenvergleich Konstantdosierung

Komponente	Luftaustauschwirkungsgrad	Lüftungswirksamkeit
Quellauslass 800m ³ /h	49% (± 10%)	1.03 ± 0.35
Quellauslass 400m ³ /h	46% (± 5%)	0.90 ± 0.18

10.3.3 Pulsdosierung

Bei den Puls-Messungen wurde wie im Kapitel 6.3.3 Tracer Pulsmethode aufgeführt, für eine kurze Zeit eine gewisse Gasmenge dosiert. Die Lüftungsanlage wurde über den gesamten Messzeitraum konstant betrieben und über das Gasmet Messgerät die Gaskonzentration alle 5 Sekunden gemessen und aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Gaskonzentrationskurve und der Berechnungsformel für die Pulsmethode, lassen sich Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit bezüglich Schadstoffübertragungen machen.

Sinnbildlich für die Tracer Pulsmessungen sind nachfolgend in der Abbildung 37 die Pulsmessung 2 in der Situation 1 und in der Abbildung 38 die Messung 2 der Situation 2 aufgeführt.

Bei der Situation 1 steigt die Konzentration nach der Dosierung stark an und erreicht innerhalb wenigen Minuten den Höchststand. Nach dem Peak klingt die Gaskonzentration nach einer konstanten Phase exponentiell gegen 0. Die Kurve verfügt über einige Schwankungen, welche in der logarithmischen Darstellung jedoch kaum zu sehen sind.

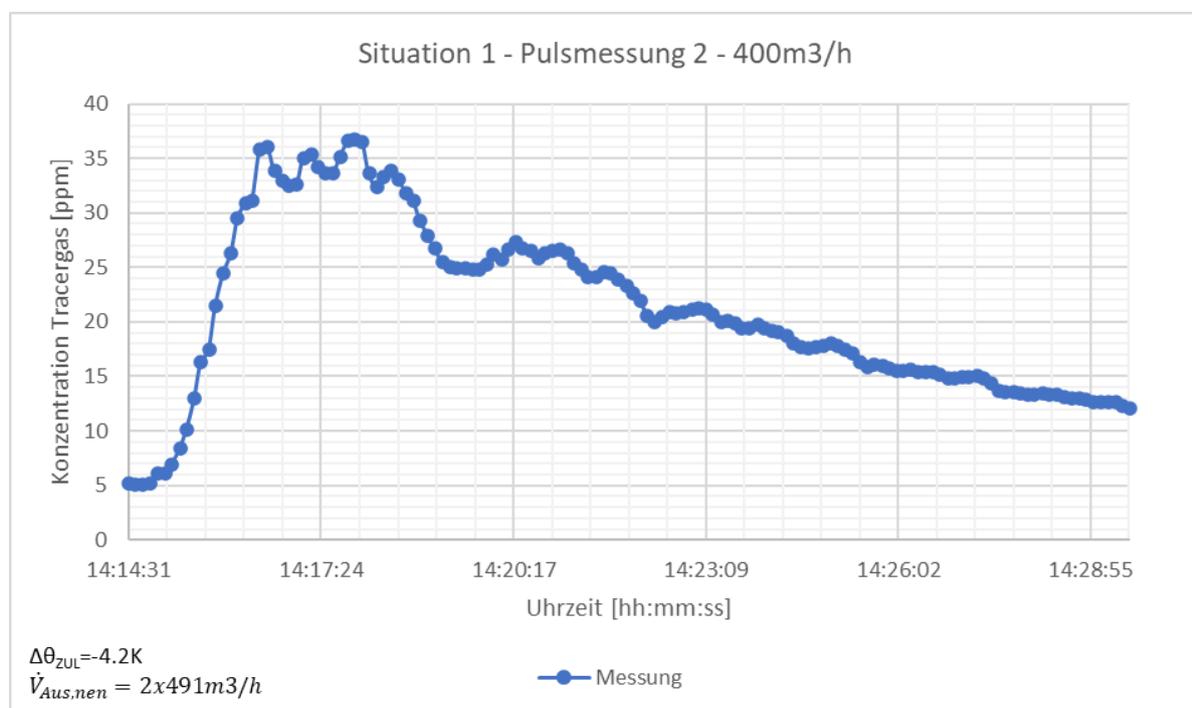


Abbildung 37: Situation 1 – Pulsmessung 2

Anders als bei den Messungen der Situation 1, benötigt der Gaspuls bei der Situation 2 etwas länger, bis er durch das Messgerät detektiert wird. Ebenfalls bei dieser Messung steigt die Gaskonzentration rasch an und geht nach dem Erreichen des Höchststandes in einen exponentiellen Zerfall über.

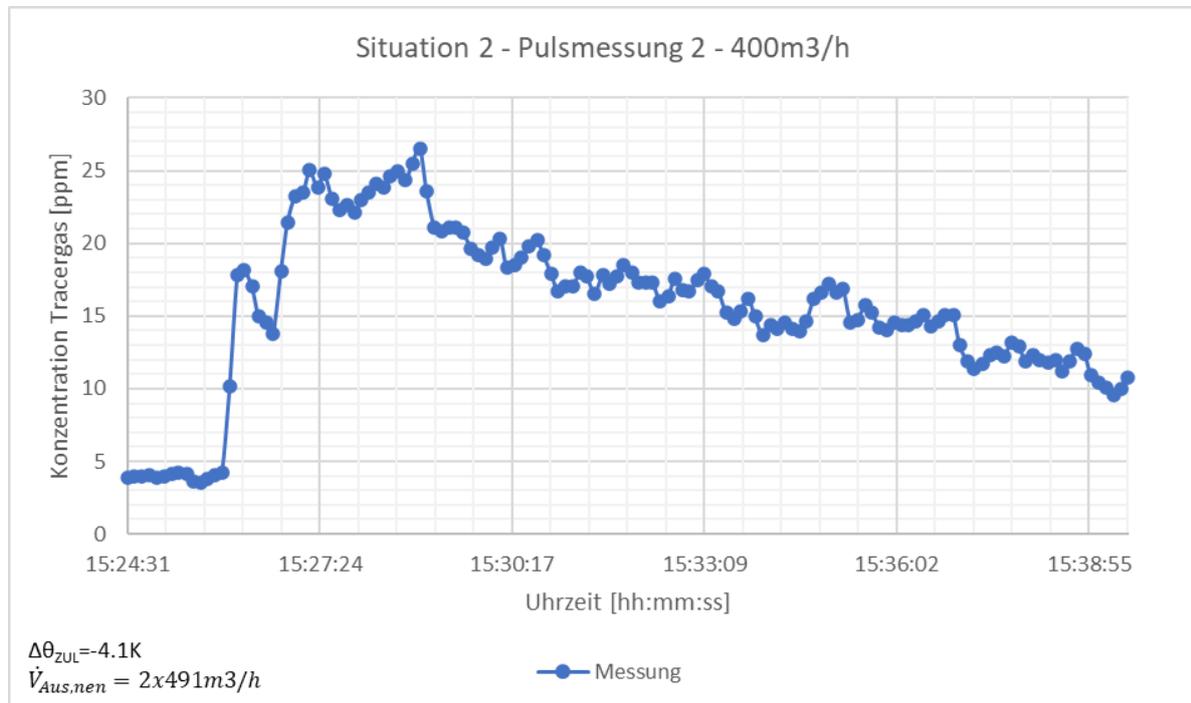


Abbildung 38: Situation 2 – Pulsmessung 2

In der nachfolgenden Tabelle 20 sind die Lüftungswirksamkeiten der verschiedenen Pulsmessungen aufgeführt. Ausgehend vom REHVA 14th HVAC World Congress Dokuments «Determination of ventilation effectiveness with tracer gas methods under COVID-19 conditions» (Frei et al., 2022) dient die lokale Lüftungswirksamkeit dazu die Wirksamkeit bezüglich von möglichen Schadstoffübertragungen zu beurteilen. Eine Wirksamkeit von 1 stellt eine perfekte Durchmischung mit der Raumluft dar. Liegt der Wert über 1, werden die Schadstoffe besser abgeführt als bei einer optimalen Durchmischung. Liegt die Wirksamkeit unter 1, so werden die Schadstoffe schlechter oder gar nicht abgeführt. Für den Quellluftauslass sollte eine Lüftungswirksamkeit grösser als 1 resultieren.

Trotz der Positionierung der Schadstoffquelle in der Nähe der Abluftfassung, weisen die Messungen der Situation 1 schlechtere Lüftungswirksamkeiten auf als die in der Situation 2. Ein möglicher Grund für dies könnten stärkere Auftriebsströmungen auf der Eingangsseite sein, welche im Aufenthaltsbereich eine leichte Luftströmung Richtung Eingang verursachen. Es ist jedoch auch möglich, dass dies nur Zufall ist und bei mehrfacher Wiederholung das Resultat anders ausgefallen wäre.

Tabelle 20: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung

Auslasstyp	Messung 1	Messung 2
Situation 1 – 400m ³ /h	0.9	1.2
Situation 2 – 400m ³ /h	1.6	1.4

Trotz der kleinen Unterschiede zwischen den beiden Situationen, kann festgehalten werden, dass die Schadstoffe effektiv durch die Auftriebsströme an den Personen abgeführt und durch Frischluft ersetzt werden.

11. Diskussion

Zur Diskussion steht die Zulufttemperatur beim Raumeintritt, der Heiz-/ Kühlbetrieb in der Betrachtungsweise der Luftaustauschwirkungsgrade und Lüftungswirksamkeiten, der Kennzahlenvergleich zur Literatur, das Spannungsfeld zwischen Energieeffizienz und Schadstoffabtransport sowie einen kleinen Exkurs zur COVID-19 Pandemie.

11.1 Zulufttemperatur

Die Versuchsreihen in der Klimakammer basieren auf einem Kühlbetrieb mit einer Raumlufttemperatur von 21°C. Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass die Raumlufttemperatur über die Wände der Klimakammer reguliert wird, da eine konstante Zulufttemperatur für die Messung benötigt wurde. Der Sollwert der Zulufttemperatur bei der Quelllüftung lag bei 17°C und bei der Mischlüftung bei 18°C. Der Temperaturfühler ist im Monoblock platziert und die Zulufttemperatur entspricht dem Wert an dieser Position. Hierbei ist zu beachten, dass durch die tiefen Luftvolumenströme und das teilweise ungedämmte Verteilnetz der Klimakammer, sich die Zulufttemperatur dadurch erwärmen kann. Mithilfe der Strömungsmesssonden kann die Vermutung aufgeklärt werden. Die Sonde, die sich am nächsten zum Quellluftauslass befand, wies eine Temperatur auf, welche eine Differenz zur Raumlufttemperatur von -1.5K aufweist. Die Temperaturdifferenz lässt darauf schliessen, dass die Zuluft vom Monoblock bis zum Auslass erwärmt wurde. Es stellt sich die Frage, wie mit dieser Erkenntnis umgegangen werden soll. Zum einen bedeutet dies, dass die Kennzahlen der Versuchsreihe besser ausgefallen wären, wenn der Temperaturfühler für den Sollwert beim Auslass positioniert worden wäre, zum anderen widerspiegelt dies den heutigen Standard. Es entspricht der Praxis, den Temperaturfühler nahe beim Monoblock zu setzen und nicht im verzweigten Kanal-/ Rohrnetz.

11.2 Heiz- und Kühlbetrieb

Für die Betrachtungsweise Heiz- oder Kühlbetrieb wird von einem identischen Luftvolumenstrom bei beiden Betriebsarten ausgegangen, da umso grösser die Luftwechselzahl wird, umso besser ist die Lüftungseffektivität. Zusätzlich wird von einer Über- bzw. Untertemperatur von ± 4 Kelvin ausgegangen. Es wird als Beispiel die Nutzung Büro behandelt, um zu einigen Überlegen anzuregen und den Einfluss zu Heiz- und Kühlbetrieb aufzuzeigen. Die Betrachtungsweise einer idealen Kolbenströmung entfällt, da diese im Heizbetrieb technisch nicht möglich ist. In der Abbildung 39 wird die Tendenz der Luftströmung beim Heizbetrieb in Rot und beim Kühlbetrieb in Blau dargestellt. Wenn bei der Mischlüftung mit Walzenströmung im Heizbetrieb die Abluftfassung deckennah und zur Strömungsrichtung der Primärluft positioniert wird, werden bei einer Kurzschlussströmung, der Luftaustauschwirkungsgrad und die Lüftungswirksamkeit, gegen null laufen. Bei der Quelllüftung im Heizbetrieb wird der Kurzschluss extremer, da die wärmere Primärluft direkt nach dem Ausströmen beim Auslass an die Decke steigt und ohne Durchmischung mit der Raumluft wieder gefasst wird.

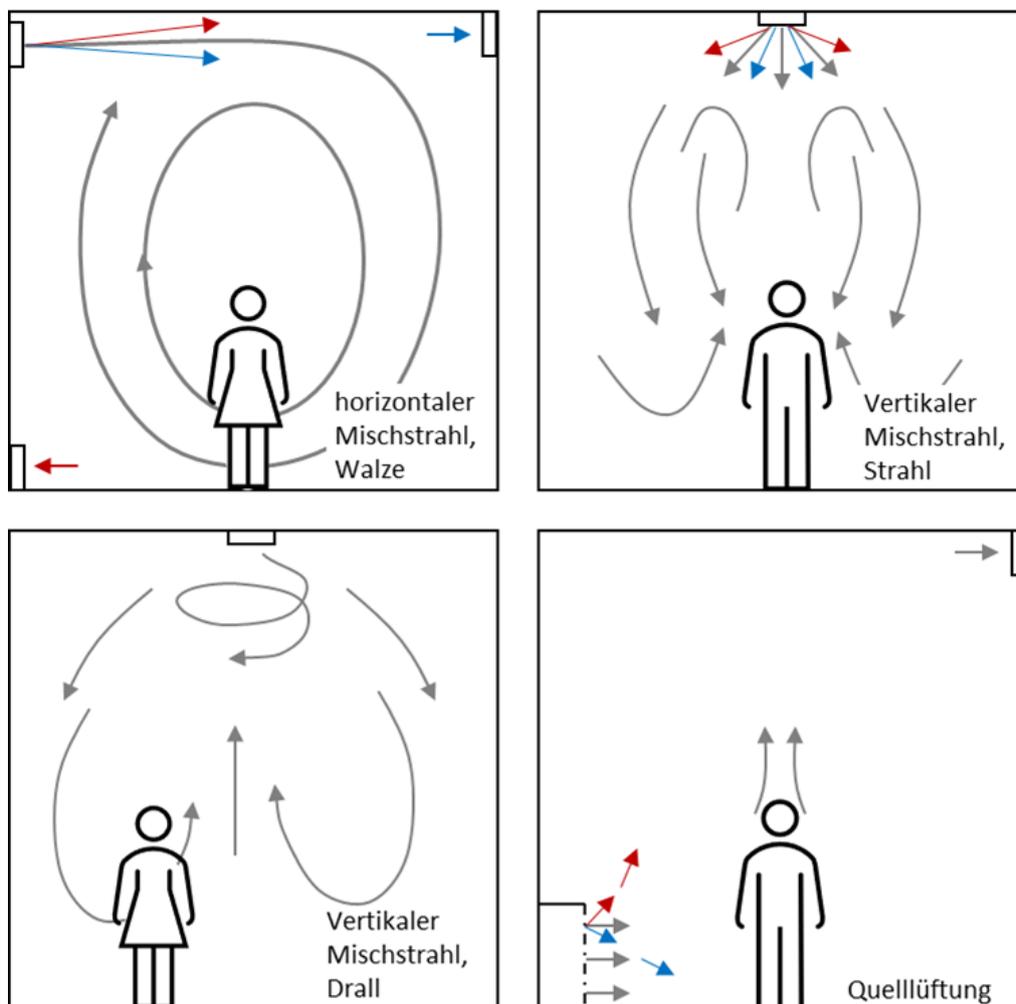


Abbildung 39: Luftführungsarten bei Kühl- / Heizbetrieb

In der Literatur wird beim Luftaustauschwirkungsgrad von einem Kühlbetrieb ausgegangen, da der Heizbetrieb für die turbulenzarme Verdrängungslüftung nicht sinnvoll ist und zu einer Kurzschlussströmung führen würde. Für den Heizbetrieb ist, auf Basis der Strömungslehre und der bekannten Kennzahlen (ASHRAE 62.1, 2016) beim Kühlbetrieb, eine Interpretation ausgearbeitet worden.

Tabelle 21: Übersicht Luftaustauschwirkungsgrad bei Kühl- / Heizbetrieb

Luftführungsart	Kühlbetrieb (Literatur)	Heizbetrieb
turbulenzarme Verdrängungslüftung	$50 \% \leq \eta_L \leq 100 \%$	$0 \% \leq \eta_L \leq 50 \%$
horizontaler Mischstrahl	50 %	< 50 %
vertikaler Mischstrahl		50 %
Kurzschlussströmung	$0 \% \leq \eta_L \leq 50 \%$	$0 \% \leq \eta_L \leq 50 \%$

Für die Kennzahlen vom Heiz- / Kühlbetrieb zur Lüftungswirksamkeit wird der technische Bericht zur Energieeffizienz, PD CEN/TR 1678-4, herangezogen. Die Lüftungswirksamkeit ist beim Kühlbetrieb besser als beim gleichen Heizbetrieb. Dies ist auf den Dichteunterschied von Primär- und Sekundärluft des Strömungsverhaltens zurückzuführen.

Tabelle 22: Übersicht Lüftungswirksamkeit bei Kühl- / Heizbetrieb

Luftführungsart	Kühlbetrieb $\Delta\theta < 0K$	Heizbetrieb $\Delta\theta > 0K$
turbulenzarme Verdrängungslüftung	1.0 - 2.0	0.2 – 0.7
horizontaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.8 – 1.0
vertikaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.6 – 0.8

11.3 Kennzahlenvergleich zu Literatur

Für den Kennzahlenvergleich wird aus den Versuchsreihen die Werte bei einem Luftvolumenstrom mit 100m³/h und 70m³/h herangezogen. Die Werte der Versuchsreihen sind mit Messunsicherheiten aufgeführt, daraus ergeben sich die aufgeführten Wertebereiche. Die Literaturkennzahlen sind aus dem technischen Bericht zu Energieeffizienz von Gebäuden, PD CEN/TR 1678-4.

In der Tabelle 21 ist ersichtlich, dass die turbulenzarme Verdrängungslüftung von den Versuchsreihen einen auffällig tieferen Luftaustauschwirkungsgrad hat, als bei einem Kühlbetrieb gemäss Literatur zu erwarten wäre. Es könnte daran liegen, dass die Zulufttemperatur nur 2 Kelvin, anstelle der vorgesehenen 4 Kelvin, tiefer als die Raumlufttemperatur in den Raum eintritt. Bei der Literatur ist ein Kühlbetrieb vorhanden, sobald die Zulufttemperatur tiefer als die Raumtemperatur liegt. Dies wäre bei allen Versuchsreihen gewährleistet. Zum anderen ist die Mischlüftung im Mittelwert besser als die Literaturwerte und als die Quelllüftung. Bei der Mischlüftung ist wie bei Quelllüftung zu erwarten, dass die Zulufttemperatur erwärmt wird und deswegen die Temperatur des Primärstrahls nahe der Raumtemperatur liegt. Die Zulufttemperatur spielt eine wesentliche Rolle bei der turbulenzarmen Verdrängungslüftung und reagiert empfindlicher als die Mischlüftung. Der Wertebereich liegt bei Mischlüftung weiter auseinander und dies könnte auf ein instabiles System hinweisen.

Tabelle 23: Vergleich Luftaustauschwirkungsgrad zu Literatur

Luftführungsart	Kühlbetrieb	Heizbetrieb	Versuchsreihe
turbulenzarme Verdrängungslüftung	50 - 100 %	0 - 50%	47 - 53 %
horizontaler Mischstrahl	50 %	< 50 %	48 – 60 %
vertikaler Mischstrahl		50 %	46 – 56 %

Die Lüftungswirksamkeit von der Versuchsreihe in der Tabelle 24 entspricht dem Kühlbetrieb. Zusätzlich ist der Wertebereich bei den verschiedenen Luftführungsarten deckungsgleich. Das lässt auf ein ähnlich stabiles System schliessen. Bei der Mischströmung sind die Werte aus der Versuchsreihe im Bereich der Literaturwerte, somit sind die Kennzahlen auch für schweizerische Lüftungssysteme anwendbar.

Der Faktor 2 bei der turbulenzarmen Verdrängungslüftung im Kühlbetrieb ist eher unrealistisch bei der Nutzung Büro. Beim Sitzungszimmer von Durrer Technik mit einem Luftvolumenstrom von 800m³/h liegt die Lüftungswirksamkeit bei 1.03 ± 0.35 , dabei ist mehr als das Doppelte vom geforderten hygienischen Luftvolumenstrom nach SIA Merkblatt 2024, mit 4 Kelvin Untertemperatur, eingebracht worden. Um den Faktor 2 zu erreichen, müsste der Raum quadratisch sein und an einer Wandseite über einen wandbreiten rechteckigen Quellluftauslass verfügen, worüber die Frischluft einströmen sowie an der gegenüberliegenden Wandseite deckennah gefasst werden kann. Der hygienische Luftvolumenstrom müsste höher sein als nach SIA Merkblatt 2024. Eine weitere Möglichkeit wäre, über Bodenquellluftauslässe in den Randzonen, die

Frischlufteinzubringen und an der Decke abströmen zu lassen. Diese Luftführung wird oft in den Literaturen zu den Kennzahlen abgebildet.

Tabelle 24: Vergleich Lüftungswirksamkeit zu Literatur

Luftführungsart	Kühlbetrieb	Heizbetrieb	Versuchsreihe
turbulenzarme Verdrängungslüftung	1.0 - 2.0	0.2 – 0.7	0.91 – 1.03
horizontaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.8 – 1.0	0.95 – 1.05
vertikaler Mischstrahl	0.9 – 1.1	0.6 – 0.8	0.91 – 1.02

11.4 Energieeffizienz vs. Schadstoffabtransport

Die Anforderung an den Frischluftvolumenstrom, ohne Umluftbetrieb, erzeugt Spannungsfelder zwischen Energieeffizienz und Schadstoffabtransport. Die COVID-19 Pandemie und die Klimaerwärmung sind die Treiber dieses Spannungsfelds. Die Energieeffizienz fordert möglichst geringe Luftvolumenströme. Die gesundheitlichen Aspekte benötigen hohe Luftvolumenströme für einen möglichst guten Schadstoffabtransport. Die Luftführung und der Luftaustausch im Raum kann durch den Luftaustauschwirkungsgrad (Hygiene) und die Lüftungswirksamkeit (Schadstoffe) charakterisiert werden und stellen die Kennzahlen der Lüftungseffektivität dar. Die Fragestellung liegt hier beim richtigen Mass an effektiv benötigter Frischluft und des richtigen Konzepts der Luftführungsart. Es gibt keine eindeutigen Lösungsansätze, aber die Umsetzung obliegt der Verantwortung des Gebäudetechnikplaners. Die Versuchsreihen haben aufgezeigt, dass die Luftvolumenströme, Stand der Technik, meistens die Literatur Kennzahlen erreichen und die Luftmengen nach dem SIA Merkblatt 2024 nur leicht tiefer liegen. Aus der Betrachtungsweise der Versuchsreihe ist ein guter Bereich für die Lüftungseffektivität im grünen Feld der nachfolgenden Abbildung vorzufinden.

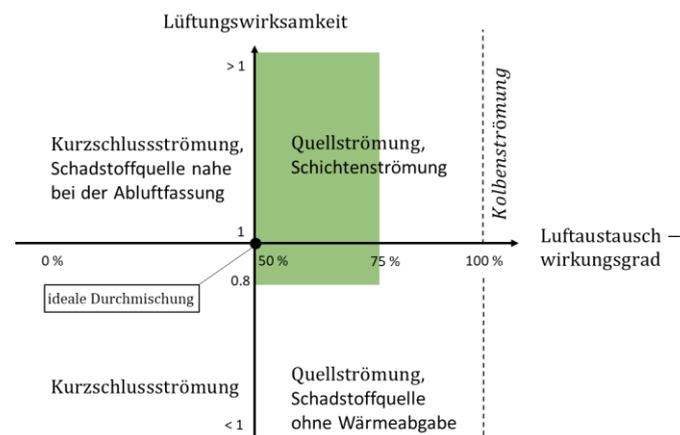


Abbildung 40: Lüftungseffektivität

Wie die Planungsansätze aussehen, um in diesen Bereich zu kommen, kann hier nicht abschließend ausgeführt werden. Zum einen spielt der Luftvolumenstrom eine wesentliche Rolle, dies könnte auch mit Umluft kombiniert werden. Zum anderen ist die Luftführungsart und die Geometrie des Raumes nicht zu unterschätzen. Lange und schmale Räume, die nicht korrekt durchströmt werden können, weisen schlechtere Lüftungseffektivitäten auf als quadratische. Bei einer Emissionsquelle im Raum kann, durch den Plateaueffekt, die verunreinigte Luft nicht abtransportiert werden und strömt in den Aufenthaltsbereich zurück.

Zum Schluss noch einen Denkanstoss zu Energieeffizienz und Lüftungseffektivität, ob es nicht möglich ist die Klassierung der spezifischen Ventilatorleistung mit der Lüftungseffektivität zu kombinieren, da die Kennzahlen auf Luftvolumenstrom basieren.

11.5 Exkurs zu COVID-19

Die Lüftungseffektivität hat durch die COVID-19 Pandemie an Aufmerksamkeit gewonnen und sollte deswegen diskutiert werden. Mit der Tracergas Methoden kann das Verhalten von Partikel analysiert werden, aber nicht die effektive Gefahr einer Infektion durch Krankheitserreger.

Die Viren werden durch Aerosole oder auch Aerosolpartikel verbreitet. Die Aerosole werden beim Atmen, Sprechen, Niesen und Husten vom Menschen ausgestossen. Die Atemluft beträgt 35°C und hat durch den Dichteunterschied zur Raumlufttemperatur die Tendenz aufzusteigen. Die grösseren Aerosole und Tröpfchen haben die Tendenz, schneller zu Boden zu fallen. Es ist dabei auch bekannt, dass eine gewisse Menge an infektiösen Viren (Infektionsdosis) vorhanden sein muss, damit eine weitere Person angesteckt werden kann. (Umweltbundesamt, 2022)

Die Quellluftströmung hat ihre Stärke beim direkten Abtransport von Schadstoffen an der Quelle. Der Nachteil ist, dass falls Schadstoffe z.B. durch Niesen aus dem Radius der Konvektionsströmungen der infizierten Person gelangen, Diese nicht mehr abtransportiert werden und zu anderen Personen gelangen können. Bei der Mischluftströmung ist das Ziel, die mit der Frischluft möglichst homogen mit der Raumluft zu durchmischen. Die Virenkonzentration wird im Raum geringgehalten. Zum jetzigen Stand ist die Dichte oder die Virenkonzentration zu SAR-CoV-2 beim Ausatmen nicht bekannt. Auch wie lange die Aufenthaltsdauer in der belasteten Raumluft sein darf, ist unbekannt. Grundsätzlich sollte ein gut funktionierendes Lüftungssystem, ohne Umluft, nicht die Übertragungsrisiken fördern.

12. Schlussfolgerung

Bei der Literatur Recherche hat sich gezeigt, dass die Kennzahlen vom amerikanischen und europäischen Raum höhere Luftwechsel und andere Luftführungssysteme anwenden und demzufolge nicht den schweizerischen Verhältnissen entsprechen. Aus der Bachelor-Thesis ist eine klare Tendenz ersichtlich, jedoch zu wenig umfänglich für den informativen Anhang im SIA 382/1. Die Mischlüftung aus den Versuchen entspricht den Literaturwerten mit einem Luftvolumenstrom von $100\text{m}^3/\text{h}$ und $70\text{m}^3/\text{h}$. Bei einer Reduktion des Luftvolumenstroms auf $35\text{m}^3/\text{h}$ ist, durch die Unterschreitung der Minimalluftmengen des Drall- wie auch des Induktionsauslasses sowie durch die zu geringe Untertemperatur der Zuluft, eine Kurzschlussströmung im Deckenbereich entstanden. Beim Quellluftauslass mit $35\text{m}^3/\text{h}$ entsteht keine Kurzschlussströmung, jedoch ist die Frischluftmenge für die im Raum eingesetzten Wärmequellen zu gering und die Schadstoffe können nicht optimal über die Auftriebsströme abgeführt werden. Dadurch konnte die Frischluft kaum noch in den Aufenthaltsbereich gelangen. Die Zulufttemperatur wird in der Praxis beim Lüftungsgerät geregelt und eine Erwärmung der Zuluft bis zum Raumintritt erfolgt. Die Lüftungswirksamkeit der Quelllüftung aus den Versuchen erzielen den unteren Wertebereich aus der Literatur. Hier müssten weitere Messungen und Versuchsaufbau durchgeführt werden, um die Literaturwerte mit einem Faktor 2 zu hinterfragen. Bei einem Volumenstromreduktion von 50% von $100\text{m}^3/\text{h}$ auf $50\text{m}^3/\text{h}$, sind die Lüftungswirksamkeit nur gering ab. Es zeigt, dass eine zu starke Belüftung des Raumes nur einen gering höheren Nutzen liefert. Wird die Luftmenge noch weiter gesenkt, sinkt die Wirksamkeit jedoch rapide ab. Der Luftaustauschwirkungsgrad fällt bei Mischlüftung besser aus als bei Quelllüftung, dabei sollte Quelllüftung massgeblich bessere Werte erzielen. Mit einer Vielzahl von Messungen bei verschiedenen Raumsituationen könnte ein besserer Rückschluss zur Luftaustauschwirkungsgrad führen. In jedem Fall werden die Behaglichkeitskriterien bei allen untersuchten Luftführungssystemen eingehalten. Indem die Anzahl an Unzufriedenen unter 15% liegen und die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Knöchel unter der Differenz von 3.3 Kelvin aufweisen. Bei der Messung mit Pulsmethode ist die Quellluftströmung am besten für Schadstoffe abzuführen. Auch beim einer Luftmenge von $35\text{m}^3/\text{h}$ liegt die Wirksamkeit weiterhin in einem hohen Bereich. Bei der Messung des Drall- und Induktionsauslasses liegt die Wirksamkeit der tieferen Luftmengen über 1. Es kann von einem grösseren Einfluss der Auftriebsströme ausgegangen werden und die Schadstoffe werden besser abgeführt als bei einer guten Durchmischung mit der Raumluft. Die Pulsmethode konnte nicht detailliert ausgearbeitet werden und die wesentliche Erkenntnis ist, dass ein Pulsdesigne ausgearbeitet werden muss für die entsprechende Raumsituation. Die Lüftungseffektivität gewann an Aufmerksamkeit durch die COVID-19 Pandemie, aus der Bachelor-Thesis geht hervor, dass eine Quellluftströmung besser Schadstoffe abtransportiert als Mischlüftung, solange die Schadstoffquelle zugleich wärme abgibt.

13. Empfehlung für weiterführende Untersuchungen

Der Umfang der Bachelor-Thesis ist begrenzt, deswegen werden für weiterführende Untersuchungen im Bereich Lüftungseffektivität Empfehlungen abgegeben.

13.1 SIA 382/1 informativer Anhang

Das Normenkomitee stellte sich die Frage, inwiefern diese Werte für die in der Schweiz üblichen Lüftungssysteme übernommen werden können. Aus der Bachelor-Thesis zu Lüftungseffektivität ist keine abschliessende Erkenntnis hervorgegangen. Basierend auf der Literaturrecherche und den Erkenntnissen aus den Versuchsreihen, wird eine Empfehlung zum Umgang mit dem vorgesehenen informativen Anhang SIA 382/1 abgegeben. Die Zahlen zu Lüftungswirksamkeit bei horizontalem Mischstrahl und vertikalem Mischstrahl im Kühlbetrieb sind plausibel im Vergleich mit den Versuchsreihen. Die turbulenzarme Verdrängungslüftung mit dem Faktor 2 ist irreführend, da dies bei einer Büronutzung kaum erreicht wird und nur eine Spezialanwendung ist. Ein Heizbetrieb mit einer turbulenzarmen Verdrängungslüftung ist generell nicht empfohlen. Um genaue Werte anzugeben, sollten für diesen Betriebsfall weitere Messungen unter schweizerischen Verhältnissen durchgeführt werden. Bei der Mischlüftung beim Heizbetrieb, mit einer Übertemperatur von weniger als 10K, sind die Werte auf den ersten Blick plausibel, jedoch werden die Luftführungsarten nicht angeordnet, wie sie oft in der Baubranche anzufinden sind. Ausserdem könnte es auch produktspezifische Unterschiede geben. Hier sollten weitere Messungen, besonders für die Lüftungswirksamkeit mit Zuluft von mehr als 15K Übertemperatur, durchgeführt werden. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass es nicht energieeffizient ist mit dem Medium Luft zu heizen oder zu kühlen. Gemäss der SIA 382/1 darf der Luftvolumenstrom bei tiefen und hohen Aussenlufttemperaturen (Aussenlufttemperatur unter 0°C oder über 25°C) bis zu 50% reduziert werden. Aus den Versuchsreihen mit der Konstantdosierung hat sich gezeigt, dass die Reduktion bezogen auf die Lüftungswirksamkeit beim Quellluftauslass unbedenklich ist. Bei der Mischlüftung kann durch die Reduktion eine Kurzschlussströmung verursacht werden, da der Drall- und Induktionsauslass oft bei halber Luftmenge unter den vom Hersteller definierten minimalen Luftvolumenstrom sinkt. Dadurch kann keine gute Durchmischung der Luft ermöglicht werden. Interessant wäre in Zusammenhang mit der Luftvolumenstromreduktion, welche Faktoren herauskämen, wenn der Frischluftanteil um 50% reduziert wird und 50% mit Umluft betrieben wird. Es wird im Allgemeinen empfohlen, die Betrachtung mit Umluftbetrieb zu verfolgen und im Monoblock abluftseitig einen Filter der Klasse ISO ePM₁ 80% einzubauen für das Zurückhalten von Bakterien und Viren. Mit hygienebedingtem Aussenluftvolumenstrom pro Nettogeschossfläche vom SIA Merkblatt 2024 (2021) wird der untere Bereich der Kennzahlen nach Literatur (Tabelle 24) erreicht. Es ist zu empfehlen dies im informativen Anhang zu erwähnen oder sogar in der nächsten Revision des Merkblatts SIA 2024 der Lüftungswirksamkeit nach Nutzung aufzuführen. Aber die Faktoren sollten nochmals auf schweizerische Verhältnisse verifiziert werden. Die Kennzahlen zu Lüftungswirksamkeit aus ASHRAE Standard 62.1 User's Manual sind mit höheren Luftwechselzahlen entstanden. In der Tabelle 4 sind die Werte aufgeführt. Zu Bedenken

ist, dass die ausgewiesenen Faktoren zu Lüftungswirksamkeit auch bei Einhalten der Temperaturdifferenz, Geschwindigkeit und Deckenhöhe nicht erreicht werden, wenn die Raumgeometrie sowie die Positionen von Ein- / Auslässen ungünstig sind. Es sollten auch für den vertikalen und horizontalen Mischstrahl Anwendungsbeispiele von Luftführungssysteme aufgezeigt werden.

13.2 Durchführung Messung

Bei der Versuchsreihe mit Konstantdosierung besteht die Möglichkeit, welche oft in der Literatur auftaucht, mit einem Standventilator die Raumluft homogener zu mischen. Für eine homogene Tracergas Verteilung im Raum wird ein Standventilator mit Rotationsfunktion im Raum aufgestellt. Der Standventilator wird beim Versuchsstart eingeschaltet und durchmischt die Raumluft, während das Tracergas über die Zuluft in den Raum injiziert wird. Ebenfalls mit dem Stoppen der Gasdosierung, wird der Standventilator ausgeschaltet. Alle Messpunkte im Raum sollten jetzt beim Starten des Abklingvorgangs denselben Wert aufweisen. Dadurch wird beim Abklingen besser ersichtlich, an welchen Positionen im Raum stehende Raumluft vorhanden ist. Es ist unklar, ob eine homogenere Mischung notwendig ist und wie lange es dauert, bis die durch den Ventilator verursachten Strömungen im Raum gelegt haben. Es sollte dazu eine Versuchsreihe durchgeführt werden, um die Vor- und Nachteile eines Standventilators zu bestimmen und zu eruieren, ob diese Versuchserweiterung zu besseren Messresultaten führt. Die Messgeräte, welche einen integrierten Ventilator haben, z.B. der Gasanalysator Gasmeter DX4015, sollten während der Messung nicht im Prüfraum befinden, da dadurch die Raumluftströmungen gestört werden. Es ist wichtig, sich vor den Messungen einige Probemessungen durchzuführen und sich so mit der Handhabung und den Eigenheiten des Massendurchflussreglers vertraut zu machen. Es hat sich herausgestellt, dass beim Bedienen über das Herstellerprogramm (FlowPlot) die Funktion Stopp nicht den Durchflussregler schliesst, sondern nur die Aufzeichnung stoppt und der Durchflussregler auf Stellposition bleibt. Der Gasdurchfluss wird korrekterweise mit der Stellposition 0% gestoppt. Bis die Ventilstellung von 100% auf 0% gesenkt ist und kein Gas mehr durchfließt, dauert es ca. 3 Sekunden. Im Injektionsschlauch vom Durchflussregler bis zur Injektionsposition ist Gas vorhanden, das während der Messung langsam ausströmt. Solange der Durchflussregler keine Erschütterung widerfährt, wird das Nachströmen des sehr geringen Restgases nicht bei der Messung ersichtlich sein. Dieses Nachströmen hat Einfluss auf die Konzentrationskurve, aber nicht auf die Berechnung der Kennzahlen. Bei der Pulsmethode ist wichtig, die richtige Grösse des Massendurchflussreglers zu verwenden. Bei der Klimakammer ist die Ventilstellung von 0.05 - 2.5 mg/s zu klein, da nur eine sehr geringe Gaskonzentration gemessen werden konnte und der Puls nicht zu lange dauern durfte. Der Durchfluss des grösseren Ventils, mit einem Durchfluss von 0.8 – 40 NI/min, wäre für die Klimakammer zu gross, da auch mit dem kleinsten Durchfluss eine zu hohe Gaskonzentration im Raum vorhanden wäre. Bei der Pulsmethode ist das Pulsdesign wichtig. Der Puls sollte in Konzentration und Dauer auf das Raumvolumen und eventuell auch auf die Luftführungsart abgestimmt sein. Es ist zu empfehlen zuerst ein Pulsdesign für ein Prüfort zu entwickeln, dies auszuwerten, zu optimieren und dann erst die Versuchsreihe zu starten. Bei einem Messversuch mit Pulsdosierung sollte die

Messdurchführung fünf Mal wiederholt werden, um die Unsicherheiten zu minimieren und das Vertrauensniveau zu erhöhen.

Die Versuchsreihen sind als Feldmessungen zu deklarieren. Um eine Labormessung durchzuführen, müsste auf mehrere Details geachtet werden. Die Zulufttemperatur müsste kurz vor dem Luftauslass gemessen werden und auf diesen Punkt die Zulufttemperatur geregelt werden. Im Kapitel Diskussion zu Zulufttemperatur ist beschrieben, aus welchen Gründen diese Massnahme anzuwenden ist. Der Prüfraum sollte luftdicht sowie sichergestellt sein, dass die die zugeführte Luftmenge genau dem Sollwert entspricht. Für eine Labormessung sollte ein Gasanalysator mit kleinen Zeitschritten, von wenigen Sekunden wie das Gasmeter DX4015, eingesetzt werden. Die Messgeräte sollte sich alle ausserhalb des Prüfraumes befinden, so dass keine Störungen der Raumluchtströmungen erzeugt werden. Es wäre vorgängig zu prüfen, ob der Standventilator für die homogene Raumluftdurchmischung exaktere Messergebnisse ermöglichen würde. Es sollte ebenfalls im Zuluftkanal die Gaskonzentration gemessen werden, um mögliche Leckagen über die Wärmerückgewinnung oder sonstige Undichtheiten des Monoblocks zu berücksichtigen. Für eine Labormessung sollte der Prüfort mit einer Infrarotwärmekamera sowie mit einer turbulenzarme Nebellanze überprüft werden, um allfällige Störquellen zu eruieren.

Danksagung

Wir möchten uns bei unserem erstbetreuenden Dozenten, Professor Heinrich Huber ganz herzlich bedanken für die kompetente Begleitung durch die Bachelor-Thesis und die grosse Geduld bei den Fragen zu der Messunsicherheit. Bedanken möchten wir uns auch beim Industriepartner Beat Frei. Durch ihn stand dieses interessante Thema zur Auswahl. Mit ihm durften wir anregende Diskussionen zu den Messwerten sowie den Messmethoden führen und er hat uns veranlasst noch weiter im Thema zu recherchieren und gewisse Sachen zu hinterfragen. Bei Fragen im IGT Labor standen uns jederzeit Frank Gubser, Jasin Jasari, Alex Primas und Moritz Bienz hilfsbereit zur Seite. Auf André Lustenberger war Verlass. Vorrasschauend und mit viel Engagement, bereitet er im IGT Labor oder auch für externe Messung alles Material vor. Ohne die Unterstützung der Firma Durrer Technik hätten wir die Messungen mit den drei Luftauslässe und die Messungen in Ihrem Sitzungszimmer nicht durchführen können. Auch hier ein herzliches Dankeschön. Zum Endspurt kam die wertvolle Hilfe von vielen fleissigen Leser:innen und Lektoren:innen hinzu, welche der Arbeit den letzten Feinschliff verliehen haben.

Abkürzungsverzeichnis

Folgende Abkürzungen wurden während der Dokumentation verwendet:

°C	–	Grad Celsius
ABL	–	Abluft
ASHRAE	–	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AUL	–	Aussenluft
CEN	–	Europäisches Komitee für Normung
clo	–	Grad der Kleidung
CO ₂	–	Kohlenstoffdioxid
DIN	–	Deutsche Industrie Norm
EN	–	Europäische Norm
FOL	–	Fortluft
FTIR	–	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie
HFO	–	Hydrofluorolefin
HSLU	–	Hochschule Luzern – Technik und Architektur
IGE	–	Institut für Gebäudetechnik und Energie
K	–	Kelvin
KI	–	Fachzeitschrift für technische Gebäudeausrüstungen
l	–	Liter
m ²	–	Quadratmeter
MB	–	Merkblatt
met	–	Grad der Tätigkeit
MFC	–	Massendurchflussregler
min	–	Minuten
NI	–	Normliter
PD	–	Published document
r.F.	–	relative Feuchte
RP	–	Research Promotion
SF ₆	–	Schwefelhexafluorid
SIA	–	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
TR	–	technical report
VAV	–	Variabler Volumenstromregler
WRG	–	Wärmerückgewinnung
ZUL	–	Zuluft

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abhängigkeit der Begrifflichkeiten	6
Abbildung 2: Zusammenspiel der Kennzahlen	7
Abbildung 3: Luftstropfzade zum Punkt Empfänger	8
Abbildung 4: Abklingkurve bei Betrachtung von Luftaustauschwirkungsgrad	9
Abbildung 5: Luftstropfzade und Schadstoffströmung im Raum	13
Abbildung 6: Übersicht der Luftführungsarten	15
Abbildung 7: Schematische Darstellung Messeinrichtung für Step-Down-Methode	18
Abbildung 8: Schematische Darstellung Messeinrichtung für Pulsmethode	19
Abbildung 9: GASERA ONE	20
Abbildung 10: Messprinzip GASERA ONE	20
Abbildung 11: Messprinzip Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie	21
Abbildung 12: Gasmeter DX4015	21
Abbildung 13: Schematische Darstellung Messeinrichtung Dantec ComfortSense	22
Abbildung 14: Massendurchflussregler für Gas mit 0.05mg/s bis 2.5mg/s	23
Abbildung 15: Versuchsaufbau Konstantdosierung	25
Abbildung 16: Tracergaskonzentrationen Leckagemessung Versuchsreihe 1 - 100m ³ /h	28
Abbildung 17: Tracergasmessung Quelllüftung 100m ³ /h	29
Abbildung 18: Kennzahlenvergleich Quellluftauslass	31
Abbildung 19: Tracergasmessung Drallauslass 100m ³ /h	32
Abbildung 20: Kennzahlenvergleich Drallauslass	33
Abbildung 21: Tracergasmessung Induktionsauslass 100m ³ /h	34
Abbildung 22: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass	36
Abbildung 23: Kennzahlenvergleich Versuchsreihe 1	37
Abbildung 24: Anzahl Unzufriedene Quellluftauslass 100m ³ /h	38
Abbildung 25: Versuchsaufbau Pulsdosierung 1.5m	40
Abbildung 26: Quelllüftung 70m ³ /h – Pulsmessung 1	43
Abbildung 27: Quelllüftung 70m ³ /h – Pulsmessung 3	44
Abbildung 28: Drallauslass 35m ³ /h – Pulsmessung 2	45
Abbildung 29: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung 1.5m	47
Abbildung 30: Versuchsaufbau Pulsdosierung 3m	48
Abbildung 31: Pulsdosierung Quellluftauslass 3m Distanz	49
Abbildung 32: Kennzahlenvergleich unterschiedliche Distanzen Pulsdosierung	50
Abbildung 33: Versuchsaufbau Konstantdosierung	52
Abbildung 34: Versuchsaufbau Pulsdosierung – Situation 1	53
Abbildung 35: Tracergasmessung Quelllüftung 800m ³ /h	56
Abbildung 36: Tracergasmessung Quelllüftung 400m ³ /h	56
Abbildung 37: Situation 1 – Pulsmessung 2	58
Abbildung 38: Situation 2 – Pulsmessung 2	59

Abbildung 39: Luftführungsarten bei Kühl- / Heizbetrieb	62
Abbildung 40: Lüftungseffektivität	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturvergleich von Luftaustauschwirkungsgrad	10
Tabelle 2: Literaturvergleich von Lüftungswirksamkeit nach Luftführungsart	11
Tabelle 3: Literaturvergleich von Lüftungswirksamkeit nach Nutzung	11
Tabelle 4: Literaturvergleich von Luftwechsel	12
Tabelle 5: Eigenschaften HFO-R 1234yf	17
Tabelle 6: Adjustierung und Durchfluss zu EL-Flow®Select.....	23
Tabelle 7: Messprogramm Versuchsreihe 1	26
Tabelle 8: Temperatursollwerte für die Klimatisierung der Klimakammer Versuchsreihe 1	27
Tabelle 9: Kennzahlenvergleich Quelllüftung	30
Tabelle 10: Kennzahlenvergleich Drallauslass.....	32
Tabelle 11: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass	35
Tabelle 12: Kennzahlenvergleich Induktionsauslass.....	37
Tabelle 13: Messprogramm Versuchsreihe 2	41
Tabelle 14: Temperatursollwerte für die Klimatisierung der Klimakammer Versuchsreihe 2 ..	42
Tabelle 15: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung	46
Tabelle 16: Lüftungswirksamkeiten Pulsdosierung - unterschiedliche Distanzen	49
Tabelle 17: Messprogramm Versuchsreihe 3	53
Tabelle 18: Temperaturwerte während Messversuchen bei Durrer-Technik.....	54
Tabelle 19: Kennzahlenvergleich Konstantdosierung.....	57
Tabelle 20: Kennzahlenvergleich Pulsdosierung	60
Tabelle 21: Übersicht Luftaustauschwirkungsgrad bei Kühl- / Heizbetrieb	63
Tabelle 22: Übersicht Lüftungswirksamkeit bei Kühl- / Heizbetrieb.....	63
Tabelle 23: Vergleich Luftaustauschwirkungsgrad zu Literatur	64
Tabelle 24: Vergleich Lüftungswirksamkeit zu Literatur	65

Literatur- und Quellenverzeichnis

- ASHRAE (Hrsg.). (2016). *Standard 62.1 User's Manual*.
- ASHRAE (Hrsg.). (2009). *Air distribution effectiveness with stratified air distribution systems*.
- Bienz, M. & Bucheli, K. (2021). *Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO-1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedingungen*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Horw.
- British Standards Institution. (June 2017). *Energy performance of buildings - ventilation for buildings: Part 4: Interpretation of the requirements in EN 16798-3 - for non-residential buildings - performance requirements for ventilation and room-conditioning systems (Modules M5-1, M5-4) = Performance énergétique des bâtiments : Partie 4: Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air - rapport technique - interprétation des exigences de l'EN 16798-3 = Energieeffizienz von Gebäuden : Teil 4: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Anforderungen an die Leistung von Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsystemen - Technischer Bericht - Interpretation der Anforderungen der EN 16798-3* (BSI standards publication ICS 91.120.10; 91.140.30). Brussels.
- Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors. (2022, 22. Mai). *Thermal Comfort Archives - Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors*. <https://www.dantecdynamics.com/product-category/thermal-comfort/>
- Deutsches Institut für Normung (11. Juli 2017). *Energieeffizienz von Gebäuden Lüftung von Nichtwohngebäuden.: Anforderungen an die Leistung von Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsystemen. Technischer Bericht*. (Technischer Bericht PD CEN/TR 16798-4).
- DIN V 18599-3 (2016). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung* (V 18599-3). 10787 Berlin. Deutsches Institut für Normung e. V.
- (2017). *Rehva guidebook: no. 23. Displacement ventilation*. REHVA.
- Indoor climate and productivity in offices: How to integrate productivity into building services life-cycle cost analysis*. (2006). Rehva Federation of European Heating and Air-conditioning Associations.
- Firma Durrer Technik. D-KH-DS4170-AVACS-Version-CH. <https://durrer-technik.ch/wp-content/uploads/2019/04/D-KH-DS4170-AVACS-Version-CH.pdf>
- Firma Durrer Technik. D-LF-015-Q-R_Q-H_Q-V. https://durrer-technik.ch/wp-content/uploads/2019/06/D-LF-015-Q-R_Q-H_Q-V.pdf
- Firma Durrer Technik. D-LF-DS1175-DD-N-DuTe. <https://durrer-technik.ch/wp-content/uploads/2022/03/D-LF-DS1175-DD-N-DuTe.pdf>

- Frei, B. (2013). *Lüftungseffektivität effizient bewerten* (Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Hg.).
- Frei, B., Huber, H. & Bienz, M. (2022). *Determination of ventilation effectiveness with tracer gas methods under COVID-19 conditions* (REHVA 14th HVAC World Congress, Hg.).
- Gasera. (2021, 9. März). *Photoacoustic spectroscopy - Gasera*.
<http://www.gasera.fi/technology/>
- Gasmet.de. (2022, 22. Mai). *Tragbare Gasanalytoren - Gasmet.de*.
<https://www.gasmet.com/de/produkte/category/gas-analysatoren/>
- Tracer-Gas-Messverfahren: Theoretisches Grundwissen*.
- Hochschule Luzern - Institut Gebäudetechnik und Energie. (2022). *Bachelor-Thesis (BAT) Institut Gebäudetechnik und Energie IGE: Aufgabe für Petra Dübendorfer und Nicola Ambühl* (Hochschule Luzern - Institut Gebäudetechnik und Energie IGE, Hg.).
- Kosonen, R. (Hrsg.). (2017). *Rehva guidebook: no. 23. Displacement ventilation*. REHVA.
- Lichtner, E. & Kriegel, M. (2021). *Pathogen Spread and Air Quality Indoors - Ventilation Effectiveness in a Classroom* (Hermann Rietschel Institut, Hg.).
- Makulla, D. (2003). *Bewertung von Lüftungssystemen mit der Spurengas-Analysetechnik* (KI Luft- und Kältetechnik, Hg.).
- Müller, D. (2013). *Rehva guidebook: no. 19. Mixing ventilation: Guide on mixing air distribution design*. REHVA.
- Müller, D., Rewitz, K., Derwein, D., Burgholz, T. M., Schweiker, M., Bardey, J. & Tappler, P. (2020). *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-11340>
- Mundt, E., Mathisen, H. M., Nielsen, P. V. & Moser, A. (2004). *Rehva guidebook: no. 2. Ventilation effectiveness*. Rehva Federation of European Heating and Air-conditioning Associations.
- Raatschen, W. (1988). *Was ist Lüftungseffektivität?* (KI Luft- und Kältetechnik, Hg.).
- Recknagel, H. & Sprenger, E. (op. 2017). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte* (Prof. Dr.-Ing. Karl-Josef Albers, Hg.) (78. Aufl.). Oldenbourg Industrieverlag.
- Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (17. September 2021). *REHVA COVID-19 Leitfaden* (TRSWKI VA104-01).
- Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (2014). *SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen* (SN SIA 382/1). 8027 Zürich. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (1. Dezember 2021). *2024 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Skistad, H. & Mundt, E. (Hrsg.). (2004). *Rehva guidebook: no. 1. Displacement ventilation in non-industrial premises* (2. Aufl.). Rehva Federation of European Heating and Air-conditioning Associations.

Umweltbundesamt. (2022, 21. März). *Infektiöse Aerosole in Innenräumen*.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektioese-aerosole-in-innenraeumen#wie-entstehen-aerosole-die-sars-cov-2-viren-enthalten>

Wildeboer, J. & Müller, D. (2006). *Lüftungseffektivität als Qualitätskriterium für Quellluftsysteme* (KI Luft- und Kältetechnik, Hg.).

Anhang

[1] Allgemein

- [1.1] Terminprogramm
- [1.2] Auslegung Luftauslässe

[2] Versuchsreihe 1 - Klimakammer

- [2.1] Laborbericht Versuchsreihe 1
- [2.2] Versuchsanordnung Allgemein
- [2.3] Versuchsanordnung Quellluftauslass
- [2.4] Versuchsanordnung Drallauslass
- [2.5] Versuchsanordnung Induktionsauslass

[3] Versuchsreihe 2 - Klimakammer

- [3.1] Laborbericht Versuchsreihe 2
- [3.2] Versuchsanordnung 1.5m
- [3.3] Versuchsanordnung 3.0m

[4] Versuchsreihe 3 – Durrer Technik

- [4.1] Laborbericht Versuchsreihe 3
- [4.2] Versuchsanordnung Allgemein
- [4.3] Versuchsanordnung Step-Down Methode
- [4.4] Versuchsanordnung Pulsmethode Situation 1
- [4.5] Versuchsanordnung Pulsmethode Situation 2