Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO-1234yf zur Bestimmung der Luftwechelrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedingungen**
Diplomandin/Diplomand	**Bienz, Moritz**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Gebäudetechnik| Energie**
Diplomandin/Diplomand	**Bucheli, Kevin**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Gebäudetechnik| Energie**
Semester	**FS21**
Dozentin/Dozent	**Huber, Heinrich; Walser, Stefan**
Expertin/Experte	**Glauser, Andreas**

Abstract Deutsch

Tracergase kommen bereits in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz und so auch in der Luftströmungsbestimmung. In der aktuellen Situation rund um die Coronaviruspandemie gewinnen Möglichkeiten zur Bestimmung von Strömungsbildern in Räumen und der damit zusammenhängenden Bestimmung der Lüftungseffektivität an Bedeutung. Da das weitverbreite Tracergas SF_6 ein hohes Treibhauspotential aufweist, wird nach Alternativen gesucht. Das Gas HFO-1234yf mit einem Global Warming Potential (GWP) von <1 stellt eine dieser möglichen Alternativen dar.

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen dem noch wenig erprobten Tracergas HFO-1234yf mit dem bewährten SF_6. Hierzu werden die bekannten Messverfahren der Konstant- und Pulsdosierungen eingesetzt und deren Aussagekraft hinsichtlich der Verbreitung von Schadstoffen in der Luft und des momentan allgegenwärtigen Coronavirus untersucht. Dabei werden in dieser Arbeit auch Aussagen zur Lüftungseffektivität verschiedener Lüftungssysteme gemacht. Die Arbeit verfolgt somit zwei Ziele.

Messversuche wurden an drei unterschiedlichen Prüfobjekten unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt. Ein erster Versuch fand unter Laborbedingungen ohne Lüftungsanlage statt; die beiden folgenden Versuche in unterschiedlichen Schulzimmern jeweils mit Lüftungsanlagen. Sämtliche Messungen wurden mit den beiden Tracergasen SF_6 und HFO-1234yf parallel durchgeführt und durch Rauchversuche optisch verifiziert.

Die Messversuche haben ergeben, dass eine Vergleichbarkeit der beiden Tracergase HFO-1234yf und SF_6 mit wenigen Einschränkungen gegeben ist. Abweichungen wurden hinsichtlich eines Absorptionsverhaltens des HFO-1234yf bei der Gastrocknung eines Messgerätes festgestellt, welche auch bei Versuchen der HSLU Luzern ausserhalb dieser Arbeit bereits bei beschichteten Rotationswärmetauschern beobachtet werden konnten. Ausserhalb dieser Beobachtungen konnten keine Abweichungen im Verhalten der beiden Gase festgestellt werden.

Hinsichtlich eines Infektionsrisikos im Raum konnten vordergründig die Erkenntnisse aus den Messversuchen der Puls-Methode herbeigezogen werden. Diese haben ergeben, dass bei einer optimalen

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.

Lufteinführung in den Raum das Verbreitungsrisiko von Schadstoffen und somit auch der Virus-Partikel minimiert werden kann. Als Optimum zeigt sich dabei eine Lufteinführung in Bodennähe mit anschliessendem Abtransport der Raumluft nach oben hin zu den Abluftöffnungen in Deckennähe. Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf jene Virenpartikel, welche sich wie Aerosole in der Raumluft bewegen. Das Verhalten von Tröpfchen wurde nicht untersucht.
Nebst diesen zentralen Aussagen konnten durch die Messversuche weiter Erkenntnisse zu den Lüftungssystemen und zum Messverfahren gemacht werden. So zeigt sich, dass ein nicht aktiv belüfteter Raum durch unterschiedliche Temperierung der Oberflächen eine Raumluftwalze begünstigen kann, welche eine rasche Homogenisierung der Raumluft nach sich zieht. Vergleichbar ist die Situation mit einem Wohnzimmer mit schlechter Wärmedämmung. Weiter zeigten sich durch die Messversuche verschiedenste Fehlfunktionen an den Lüftungsanlagen der untersuchten Räume. Diese reichen von Kurzschlussströmungen aufgrund suboptimal angeordneter Luftauslässe bis hin zu regeltechnischen Fehlern. Hinsichtlich der Messverfahren zeigt sich, dass das Multipoint-Sampling seine Vorteile bei einer ersten Standortbestimmung des Raumes sowie bei den Konstantdosier-Verfahren ausspielen kann. Für eine effiziente Analyse der Pulsmethode ist dieses Messverfahren jedoch zu träge. Die kurzen Pulse werden so nicht immer korrekt erkannt, was die Messungen verfälscht. Hier zeigen sich Messverfahren nach dem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer- oder dem Nichtdispersiven Infrarotsensoren-Prinzip als geeigneter.
Abschliessend kann gesagt werden, dass Tracergasmessungen zwar aufgrund der Coronaviruspandemie an Bedeutung gewinnen, die Aussagekraft dieser Messungen aber weit darüber hinausgeht.

Abstract Englisch

Tracer gases are already used in many applications, one of which being ventilation measurements. In the current situation surrounding the Coronavirus-pandemic, possibilities for determining flow patterns in rooms and the associated determination of ventilation effectiveness are gaining in importance. Since the widely used tracer gas SF_6 has a high Global Warming Potential (GWP), alternatives are being sought after. The gas HFO-1234yf with a Global Warming Potential of <1 represents one of these possible alternatives.
The aim of this thesis is to compare the still little tested tracer gas HFO-1234yf with the proven SF_6. For this purpose, the known measurement methods of constant and pulse dosing are used to determine their significance regarding the spread of pollutants in the air and the currently ubiquitous Coronavirus. Furthermore, statements are also made on the ventilation effectiveness of various ventilation systems. The thesis thus pursues two objectives.
Measurement experiments were carried out on three different test objects under different conditions. The first test was carried out under laboratory conditions without a ventilation system. The two subsequent tests were carried out in different classrooms, each with a ventilation system. All measurements were carried out with the two tracer gases SF_6 and HFO-1234yf and verified visually by smoke tests.
The measurement tests showed that the two tracer gases HFO-1234yf and SF_6 are comparable with only a few restrictions. Deviations were found with respect to an absorptive behavior of HFO-1234yf during gas drying of a measuring device. A similar finding was observed in tests of the HSLU Luzern outside of this work with coated rotary heat exchangers. Outside of these observations, no deviations in the behavior of the two gases could be detected.
With regard to the risk of infection in rooms, the findings from the measurement experiments of the pulse method were used. These showed that the risk of spreading contaminants and thus also virus particles can be minimized if the air is optimally introduced into the room. The optimum is shown to be an air intake near the floor with subsequent removal of the room air upwards to the exhaust air openings near the ceiling. The investigations are limited to those virus particles which move like aerosols in the air. The behavior of so-called droplets was not investigated.
In addition to these central statements, the measurement tests provided further insights into the ventilation systems and the measurement procedure. For example, it was shown that a room that is not actively ventilated can favor thermal air circulation due to different temperatures of the surfaces, which results in a rapid homogenization of the room air. The situation is comparable to a living room with poor thermal insulation. Furthermore, the measurement experiments revealed a wide variety of malfunctions in the

ventilation systems of the rooms investigated. These range from short-circuit flows due to badly arranged air outlets to control system errors. With regard to the measurement methods, it can be seen that multi-point sampling can show its advantages in an initial determination of the phenomena of a room, as well as in the constant dosing methods. However, this measurement method is too sluggish for an efficient analysis of the pulse method. The short pulses are thus not always correctly detected, which falsifies the measurements. In this case, measurement methods based on the Fourier-transform infrared spectroscopy or the nondispersive infrared sensor principle are more suitable.
In conclusion, it can be said that although tracer gas measurements are gaining in importance due to the corona pandemic, the informative value of these measurements go far beyond.

Ort, Datum Luzern, 11.06.2021

© Moritz Bienz; Kevin Bucheli, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Inhalt

1 Einleitung 3

2 Vorgehen & Methoden 6

3 Tracergas 8

3.1 Eigenschaften eines Tracergases 8

3.2 Verbreitete Tracergase 10

3.3 CO_2 als Tracergas 11

3.4 SF_6 als Tracergas 13

3.5 HFO-1234yf als Tracergas 14

3.6 Vergleich der Stoffdaten SF_6 und HFO-1234yf 15

4 Messverfahren 17

4.1 Lüftungseffektivität 19

4.2 Konstantdosiermethoden 21

4.3 Pulsdosiermethode 24

5 Arbeitsmittel 26

5.1 Messprinzip photoakustische Spektroskopie 26

5.1.1 Messgerät GASERA ONE 27

5.2 Messprinzip Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) 28

5.2.1 Messgerät Gasmet DX4015 29

5.3 Messprinzip nichtdispersiver Infrarotsensor (NDIR) 30

5.3.1 Messgerät Emerson Rosemount MLT4 31

5.4 Dosierventile 32

5.4.1 Messprinzip Dosierventil 33

6 Messungen «kleiner Raum» / Klimakammer 34

6.1 Messaufbau und Ablauf «kleiner Raum» / Klimakammer 34

6.2 Resultate Messungen «kleiner Raum» / Laborumgebung 35

7 Messungen «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer 40

7.1 Messaufbau und Ablauf «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer 40

7.2 Resultate Messungen «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer 42
8 Messungen «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer 50
8.1 Messaufbau und Ablauf «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer 50
8.2 Resultate Messungen «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer 53
8.2.1 Resultate Probemessungen Donnerstag und Freitag 53
8.2.2 Resultate Pulsdosierungen 55
8.2.3 Resultate Konstantdosierungen 61
8.2.4 Resultate Rauchversuche 67
9 Schlussfolgerungen 70
9.1 Vergleich HFO-1234yf und SF_6 70
9.2 Messverfahren 71
9.3 Aussagen hinsichtlich Covid-19 71
10 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen 73
10.1 Verbesserung Pulsmethode zur Leckage-Bestimmung WRG 73
10.2 Absorptionsverhalten von HFO-1234yf 74
10.3 Vergleichbarkeit Tracergase und Aerosole 74
Danksagung 75
Abkürzungsverzeichnis 76
Abbildungsverzeichnis 77
Tabellenverzeichnis 79
Literaturverzeichnis 80
Anhang 83
Anhang A Allgemein 83
Anhang B Messung Klimakammer 83
Anhang C Messung Suissetec-Schulzimmer 83
Anhang D Messung HSLU-Schulzimmer 83
Anhang E Arbeitsmittel – Ergänzungen zu Kapitel 5 83

1 Einleitung

Die Verbreitungswege von Krankheiten sind bereits seit Tausenden von Jahren ein zentrales Thema, womit sich die Menschheit intensiv auseinandersetzt. Eine gewichtige Art der Verbreitung stellt der Übertragungsweg über die Luft dar. Gerade in Innenräumen zeigt sich diese als bedeutsam. Durch Be- und Entlüftung von Innenräumen versuchen Planer, Forscher und Ingenieure, nebst der Sicherstellung hoher Komfortansprüche, je nach Nutzung auch die Übertragung und Verbreitung von Schadstoffen und somit nicht zuletzt Krankheitserregern einzuschränken. Dies erfolgt durch die sorgfältige Planung der Luftwechselraten, der Lufteinführung und Luftabsaugstellen sowie der Aufbereitungsschritte. Um die strömungstechnischen Phänomene der Raumluft besser verstehen zu können, bedient man sich dabei, nebst den klassischen Berechnungen, zunehmend der computergestützten Strömungssimulation. Da die Wege der Luft in einem Innenraum jedoch von zahlreichen Faktoren abhängig sind, die von einer Simulation nicht immer genügend erfasst werden können, bedarf es für eine genauere Analyse der Raumluftströmung geeignete Verfahren zu deren Messung und Überprüfung. Eine hierfür etablierte Methode stellen Tracergasmessungen dar.

Die Tracergasmessung erfolgt über eine kontrollierte Dosierung des nachzuverfolgenden Gases im Raum selbst oder beispielsweise auch in der Lüftungsanlage mit anschliessender Messung an einem oder mehreren Messpunkten. Die für die Konzentrationsmessung eingesetzten Gasanalysegeräte arbeiten nach unterschiedlichen Prinzipen, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Letztlich ermitteln jedoch alle diese Geräte die prozentuale Konzentration des Tracergases in der Raumluft. Diese Konzentration lässt sich anschliessend mit anderen Messpunkten oder der Eindosierstelle vergleichen. Weiter kann der zeitliche Verlauf bezüglich der Konzentrationsänderung ermittelt werden. Mit diesen Daten lassen sich Lüftungssysteme analysieren und deren Effizienz bestimmen.

Tracergasmessungen finden heute bereits in vielen Teilbereichen der Lüftungstechnik Anwendung. So kann die Methode beispielsweise zur Bestimmung von Luftgeschwindigkeiten und damit auch Luftwechselraten und Luftmengen in Strassen- oder Schienentunnels angewendet werden. Die grossen Luftmengen, welche bei dieser Nutzung bewegt werden, machen die Bestimmung der Luftvolumenströme mittels anderer Verfahren schwierig. Im gleichen Zuge lassen sich mit Tracergasen in dieser Umgebung zusätzlich auch Aussagen zur lokalen Effizienz der Anlage machen. Allfällige «Totzonen» lassen sich somit leicht finden. Ähnlich können Tracergasmessungen im kleineren Rahmen in Wohn- und Gewerbegebäuden angewendet werden, um so Aussagen zur Effizienz von Lüftungsanlagen zu machen. Genau diese Anwendung erlebt mit der aktuell grassierenden Coronaviruspandemie einen Aufschwung, denn die Verbreitungswege von kleinsten Virenpartikeln über die Luft lassen sich gut mit Tracergasen simulieren. Eine weitere Anwendung finden Tracergasmessungen auch in der Leckagemessung von Wärmeübertragungssystemen in Lüftungsanlagen. Diese Messungen finden zumeist unter Laborbedingungen statt. Der klare Vorteil der

Tracergasmessungen gegenüber einfachen optischen Rauchversuchen ist die quantitative Bestimmung der Konzentrationen. Wo es mittels Rauchversuchen möglich ist, Strömungsbilder sichtbar zu machen, können Tracergasmessungen genaue Daten zur lokalen Konzentration liefern. Effekte von Verdrängung oder Verdünnung der untersuchten Luft lassen sich somit berechnen. Zudem sind Tracergasmessungen, im Gegensatz zu Rauchversuchen, nicht sichtbar. Da die eingesetzten Tracergase für den Menschen meist auch gesundheitlich unbedenklich sind, können Messungen so auch in belegten Räumen unter Realbedingungen durchgeführt werden.[1]

Aber Tracergasmessungen haben auch ihre Schattenseiten. Ein wichtiger Punkt stellt dabei die Umweltverträglichkeit der angewandten Gase dar. Das unter anderem in der Schweiz vielfach verwendete Tracergas Schwefelhexafluorid (SF_6) gilt mit einem Global Warming Potential (GWP) von 26'087 als extrem klimaschädlich.

In dieser Arbeit wird Tetrafluorpropen (HFO-1234yf), welches bereits Anwendung als Kältemittel findet, hinsichtlich seiner Eignung als Tracergas untersucht. Grundlage hierfür bildet der Auftrag seitens des Industriepartners, Beat Frei vom Ingenieurbüro Frei Wüest Expert in Willisau sowie der bereits zuvor gestartete und parallel zu dieser Arbeit stattfindende Einsatz des Gases am WRG-Prüfstand der Prüfstelle Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern in Horw. HFO-1234yf stellt mit einem GWP von kleiner als 1 eine klimafreundliche Alternative für das jetzige SF_6 dar. Da sich die Eigenschaften der beiden Gase jedoch unterscheiden, soll die Vergleichbarkeit in dieser Arbeit anhand dreier Versuchsobjekte über mehrere Messungen hinweg untersucht werden.

Ein weiterer zentraler Aspekt dieser Arbeit und der Fragestellung zeigt sich in der Anwendung der Messungen und deren Ergebnisse hinsichtlich der Übertragung von Virenpartikeln, die in der Luft mitgetragen werden und darin schweben bleiben. Die Tröpfchen-Übertragung mit absinkenden, grösseren Aerosolen wird in diesem Zusammenhang in dieser Arbeit nicht untersucht.

In Zusammenhang mit diesen beiden Ansatzpunkten werden an den drei Prüfobjekten auch die verschiedenen Messverfahren der Konstant- und Pulsdosierungen hinsichtlich ihrer Aussagekraft untersucht. Im Zentrum steht dabei die Pulsmethode, welche sich gerade als im Raum eindosierte Quelle als Analogie zu einer infektiösen Person eignet. Des Weiteren stellt die Pulsmethode die sparsamste Messmethode hinsichtlich des Tracergas-Verbrauchs dar. In Bezug auf den weiteren Einsatz von SF_6 lässt sich mit einer Optimierung der Prüfverfahren eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit erreichen. Dazu werden während der Messungen verschiedene Tracergas-Analysegeräte eingesetzt, wovon ein Teil speziell im Rahmen dieser Arbeit und anschliessend für den weiteren Einsatz an der Hochschule Luzern nach jahrelanger Einlagerung wieder in Betrieb genommen werden.

[1] Kriegel und Hartmann 2021.

Im Folgenden wird in dieser Arbeit zunächst die Methode und die Vorgehensweise mit Schwerpunkt auf die Prüfobjekte erläutert. Anschliessend werden die grundlegenden Rahmenbedingungen rund um Tracergasmessungen beleuchtet. Zentrale Bestandteile sind dabei die Tracergase, welche aktuell Anwendung finden, die Messverfahren und deren Besonderheiten, sowie die benötigten Arbeitsmittel für eine aussagekräftige Analyse. Daraufhin wird detailliert auf die drei Prüfobjekte und die darin durchgeführten Messversuche eingegangen. Dies stellt den Hauptteil der Dokumentation dar, da hier nebst der Beantwortung der ursprünglichen Fragestellungen auch viele weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Raumluftströmungen in den Prüfobjekten dokumentiert werden konnten. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung der Erkenntnisse sowie eine Empfehlung für weitere Untersuchungen und damit zusammenhängende Überlegungen. Die umfangreichen Messdaten und Dokumentationen zu den Messversuchen sind, genauso wie weitere Unterlagen zu Hilfsmaterialien und dem Prozess der Arbeit, in den Anhängen zu finden. Zur vertieften Auseinandersetzung mit der Materie wird empfohlen, die Quellenangaben im entsprechenden Verzeichnis zu konsultieren.

2 Vorgehen & Methoden

In diesem Kapitel werden das Vorgehen und die Methoden zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit genauer beschrieben, was das logische Verständnis für die getätigten Arbeitsschritte vermitteln soll. Nachdem das Ziel der Arbeit genau definiert war, wurde ein Terminprogramm erstellt, welches mit den wichtigsten Eckdaten ergänzt wurde. Dieses ist im Anhang A ersichtlich. Zentral waren dabei die drei Versuchsmessungen, welche jeweils Absprachen mit externen Stellen verlangten. Daraufhin wurden mittels einer umfangreichen Literaturrecherche die bedeutendsten Tracergase sowie die gängigen Messverfahren und die Anwendungsgebiete in Erfahrung gebracht. Gerade hinsichtlich dem Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Tracergas war die Recherche wichtig, da diese Teilthematik der Aufgabenstellung in Absprache mit dem Betreuungsteam und dem Industriepartner lediglich theoretisch behandelt wird. Die gewichtigsten Informationen und Erkenntnisse der bestehenden sowie der beiden in dieser Arbeit zu vergleichenden Tracergase sind im Kapitel 3 zusammengefasst. In diesem Zuge wurden auch die wichtigsten Begrifflichkeiten der Aufgabenstellung zu den verschiedenen Berechnungsmethoden recherchiert. Zu diesen gehören vordergründig die verschiedenen Methoden der Konstant- und Pulsdosierungen, welche im Kapitel 4 umschrieben werden. Die hieraus gewonnen Erkenntnisse sind wichtig für die korrekte Planung der Messversuche und der anschliessenden Auswertungen. Als weitere Vorbereitung für die folgenden Versuche wurden die Arbeitsmittel analysiert. Im Fokus standen die drei Tracergasmessgeräte, welche während den Messungen zur Detektierung der Tracergase benutzt wurden. Alle Messgeräte befinden sich im Eigentum der Hochschule Luzern und wurden für die Versuchsmessungen zur Verfügung gestellt. Das GASERA ONE mit dem Multipoint-Sampler wird von der Hochschule auch am WRG-Prüfstand laufend verwendet. Zwei weitere Geräte, das Gasmet DX4015 sowie das Emerson Rosemount MLT4, wurden von der Hochschule Luzern über längere Zeit nicht mehr verwendet und mussten zunächst in Zusammenarbeit mit der Prüfstelle wieder in Betrieb genommen werden. Weiter sind die Dosierventile, vor allem für die pulsförmige Einführung der Gase, von entscheidender Wichtigkeit. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit dem Ventilhersteller die Adjustierung an das neue Tracergas HFO-1234yf vorgenommen sowie die computergestützte Ansteuerung der Ventile neu erprobt und eingesetzt. Die erwähnten Arbeitsmittel sind im Kapitel 5 ersichtlich und erklärt. Im Fokus liegen dabei die verschiedenen Messprinzipien der Messgeräte, da sich diese jeweils in ihrer Art unterschieden. Anschliessend folgte die Planung der Messversuche. Vor jeder Messung wurde dafür ein Messaufbau sowie ein Konzept des Ablaufes geplant. Um die Messverfahren und die Geräte näher kennenzulernen, wurde die erste der drei Messungen in Laborumgebung durchgeführt. Eingesetzt wurden dabei die beiden Tracergase parallel mit den Konstantdosiermethoden. Die Plausibilisierung der gemachten Messungen erfolgt mittels ebenfalls parallel durchgeführter Rauchversuche, welche das Gemessene auch optisch visualisieren sollen. Der Ablauf und die Ergebnisse sind im Kapitel 6 genauer beschrieben und der umfassende Laborbericht ist im Anhang B abgelegt. An die erste Messung anschliessend folgte

um nur einen Tag verzögert die Messung im Suissetec-Schulzimmer. Aufgrund der kurzen Vorbereitungszeit zwischen den beiden Versuchen konnten die Erkenntnisse aus den ersten Messungen nur reduziert in der Planung berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den an diesem Punkt bereits bekannten Konstantdosiermethoden wurde in diesen Versuchen im Speziellen die Pulsmethode eingesetzt und analysiert. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Messgeräte zur Verfügung standen und die Dosierventile noch nicht via Computer angesteuert werden konnten, musste für die erfolgreiche Durchführung improvisiert werden, was sich nicht zuletzt auch an den gemachten Erkenntnissen aus diesem Versuch widerspiegelt. Die genaue Durchführung der Messungen ist im Kapitel 7 dargelegt. Nach den Messungen folgte die detaillierte Auswertung sämtlicher Messungen. Dazu wurden in Microsoft Excel eigens spezifische Tabellenverarbeitungen programmiert, um die Analyse zu vereinfachen und übersichtlich zu halten. In diesem Zusammenhang fanden auch die Berechnungsformeln aus der vorhergehenden Literaturrecherche Anwendung; beispielsweise bei der Berechnung von lokalen Luftwechselraten oder der umgewälzten Luftmenge. Aus diesen beiden Messungen gingen nebst Erkenntnissen zum Einsatz von HFO-1234yf und zur Anwendung der Pulsmethode auch verschiedenste technische Probleme mit den Arbeitsmitteln hervor. Diese wurden im Folgenden als Vorbereitung für den dritten Messversuch behoben. Wie bereits zuvor erwähnt, ging es dabei um die Inbetriebnahme weiterer Messgeräte und der verbesserten Ansteuerung der Eindosierventile. Mit den gemachten Erkenntnissen und neuen Möglichkeiten hinsichtlich der Arbeitsmaterialien wurde schliesslich die Vorbereitung der letzten Messungen im Schulzimmer C210 der Hochschule Luzern in Horw vollzogen. Speziell zu erwähnen ist hierbei, dass für diese Messungen drei Tage eingeplant werden konnten, was eine Vielzahl an Messversuchen zugelassen hat. Der genaue Ablauf des Versuchs und die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sind im Kapitel 8 ersichtlich. Die zusammenfassenden Schlussfolgerungen und die Diskussion zu weiteren zu untersuchenden Schritten stellen nicht nur das Ende der Arbeit, sondern auch das vorläufige Ende dieser Untersuchungen dar und sollen das Feld gleichzeitig für weiterführende Analysen und Messungen öffnen.

3 Tracergas

In diesem Kapitel werden die grundsätzlichen Anforderungen an die eingesetzten Tracergase sowie deren Eigenschaften genauer beschrieben. Weiter sind anschliessend die heute verbreiteten Tracergase für Strömungsermittlungen und Luftvolumenstromberechnungen in Gebäuden aufgeführt, mit welchen schliesslich das Tracergas HFO-1234yf, welches im Fokus dieser Arbeit steht, verglichen wird. Nebst den Vorteilen, welche eine Nutzung als Tracergase erst zulassen, stehen vordergründig die Nachteile im Zentrum der Analyse, da diese stetig minimiert werden sollen. Das untersuchte HFO-1234yf stellt hierfür eine vielversprechende Alternative dar.

3.1 Eigenschaften eines Tracergases

Die Tracergasmessung wird auch als Spurengasmessung oder Indikatorgasmessung bezeichnet. Diese Bezeichnung stammt vom Verhalten des Tracergases und seiner Fähigkeit in der Luft getrackt zu werden. Hierzu wird ein von einem Gasanalysator detektierbares Gas kontrolliert in einen Raum eindosiert und an den definierten Analysepunkten gemessen und dokumentiert. Meist wird ein Tracergas verwendet, welches nicht natürlich in der Umgebungsluft vorkommt, damit es einfach nachzuverfolgen ist. Die Genauigkeit der Messungen kann so gesteigert und Fehlinterpretationen aufgrund bestehender Hintergrundkonzentrationen ausgeschlossen werden. So kann auch bereits mit einer sehr kleinen Menge an Tracergas von beispielsweise einem Gramm und den sehr genauen Messgeräten eine stichhaltige Aussage getroffen werden. Als Ausnahme lässt sich hier das Tracergas Kohlenstoffdioxid (CO_2) nennen, da es in der Umgebungsluft bereits in grosser Konzentration vorkommt und somit eine grössere Menge an zusätzlichem Gas eindosiert werden muss, um die entstehende Ungenauigkeit bestmöglich zu eliminieren. Der im Vergleich geringe GWP sowie die einfache Handhabung führen jedoch dazu, dass Kohlenstoffdioxid noch immer weit verbreitet Anwendung findet. Überleitend kann daraus die Anforderung nach einer unbedenklichen Handhabung herausgelesen werden. So sollen die eingesetzten Gase nicht brennbar oder explosiv sein, was deren Lagerung, Transport und Anwendung massgeblich erschweren würde. Toxikologisch sollen die Gase ebenfalls unbedenklich für Mensch und Tier sein, da ein grosser Vorteil der Tracergasmethode der Einsatz in einer Realsituation mit entsprechender Belegung ist. Ein giftiges Tracergas ist somit nicht nur in der Handhabung schwierig, sondern auch in der Anwendung beschränkt einsatzbar. Diesem Umstand ist somit besondere Beachtung zu schenken. Weitere Anforderungen an die Tracergase sind ihr stabiles Verhalten in der Luft und somit kein rascher Abbau in der Atmosphäre. Dies stellt sicher, dass Messungen auch über einen längeren Zeithorizont durchgeführt werden können und dabei verlässliche Resultate erzielt werden. Dies stellt allerdings gleichzeitig einen Konflikt mit der Umweltverträglichkeit dar, wie das Beispiel Schwefelhexafluorid (SF_6) zeigt, welches durch seinen extrem langsamen Abbau auch sehr treibhauswirksam ist. Ein Absinken der Gase in der Luft soll zudem nicht stattfinden, da dieses Verhalten nicht mehr jenem der Luft und der sich darin beweglichen Schadstoffe entspricht. Auch dies würde Messungen verfälschen, respektive deren Aussagekraft

schmälern. Die Gase sollen zudem nicht von Oberflächen absorbiert werden können, was abermals eine Verfälschung der Messungen zur Folge hätte. Und nicht zuletzt sollen Tracergase über einen tiefen GWP und eine gute Umweltverträglichkeit verfügen. Gerade in den aktuellen Diskussionen rund um den Klimawandel und Nachhaltigkeit wird dieser Aspekt immer wichtiger. Dies auch deswegen, da mit Tracergasmessungen Hinweise auf energetische Verbesserungen von Lüftungsanlagen erarbeitet werden können. Ein umweltschädliches Tracergas wäre dabei kontraintuitiv. Letztlich bestimmt aber auch die geplante Anwendung mit, welches Tracergas für welches Messsetup am besten geeignet ist. So variieren beispielsweise die Anforderungen an ein Tracergas, welches zur Analyse von Raumluftströmungen in einem belegten Schulzimmer eingesetzt wird im Vergleich zu den Voraussetzungen eines Tracergases zur Lecksuche in einer Gasleitung. Die untenstehende Darstellung fasst die oben erwähnten Anforderungen nochmals zusammen.

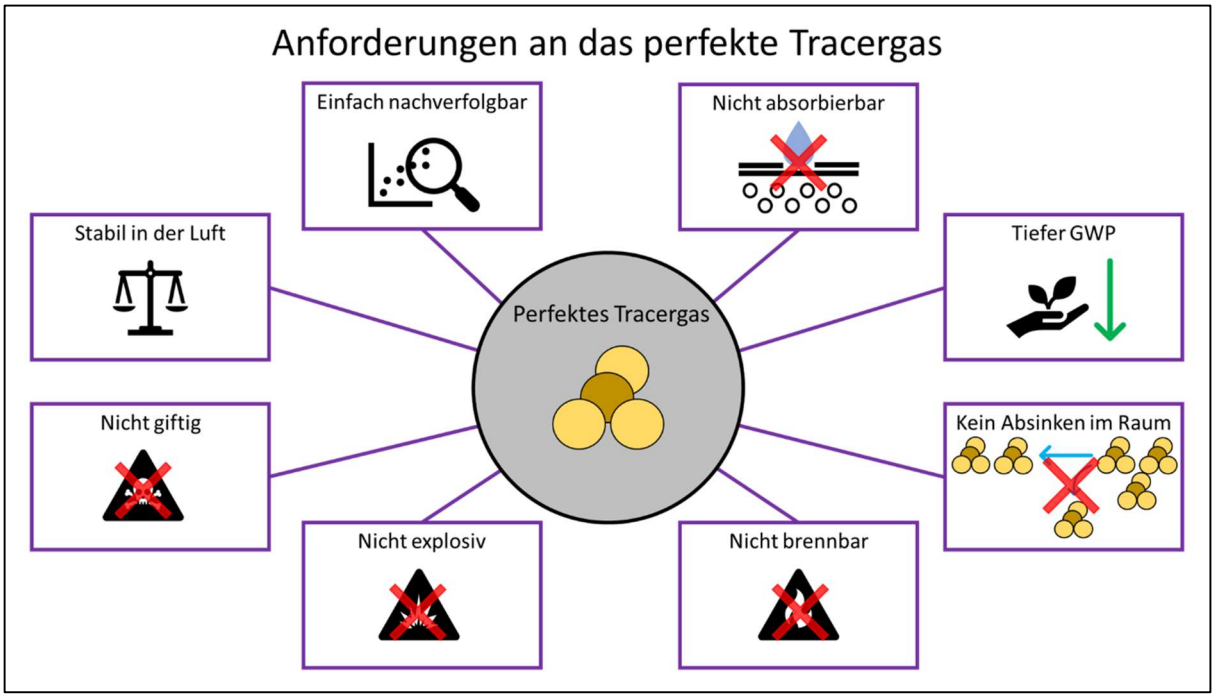


Abbildung 1: Anforderungen an das perfekte Tracergas

3.2 Verbreitete Tracergase

In der untenstehenden Tabelle 1 sind die gemäss EN ISO 12569:2017 einzusetzenden Tracergase aufgeführt. Ersichtlich sind zusätzlich die wichtigsten Eigenschaften jedes Tracergases. In der Schweiz ist im Moment vordergründig Schwefelhexafluorid (SF_6) relevant, welches oft, so auch an der Hochschule Luzern, zum Einsatz kommt. Wie in den Anmerkungen der Tabelle ersichtlich, wird auch in der Norm auf das hohe Treibhausgaspotential von SF_6 verwiesen. Das in dieser Arbeit neu untersuchte HFO-1234yf ist in der Norm aktuell noch nicht berücksichtigt. [2]

Tabelle 1: Tracergase gemäss EN ISO 12569:2017

Gasart	**Helium[a]**	**Kohlendioxid[b]**		**Schwefel-Hexafluorid[c]**		**Perfluor-Kohlenstoff[d]**	**Ethylen[e]**	**Distickstoff-monoxid[f]**
Chemisches Symbol	He	CO_2[b]		SF_6[c]		CF_4 (PFC-14) C_2F_6 (PFC-16)	C_2H_4	N_2O
Mess-verfahren	GC-TCD	Infrarot-Gasab-sorption	GC-ECD	Infrarot-Gasab-sorption	GC	GC-ECD	Infrarot-Gas-Absorption und FID und GC	Infrarot-Gasabsorption
Beispiel der unteren Nachweis-grenze	$300x10^{-6}$	1x10	70x10-6	$0.001x10^{-6}$		-	$0.1x10^{-6}$	$0.1x10^{-6}$
Zulässige Konzen-tration	-	$5000x10^{-6}$		$1000x10^{-6}$		-	-	$25x10^{-6}$
Relative Dichte in Bezug auf Luft [-]	0.138	1.545		5.302		Beispiel: PDF-14: 3.06 PFC-16: 4.80	0.974	1.53
Treibhaus-Potential (GWP)	-	1		23900		Beispiel: PDF-14: 6500 PFC-16: 9200	-	310

ANMERKUNG 1 zusätzlich zu den vorstehenden Gasen können auch Stickstoff, Kohlenmonoxid, Ethan, Methan, Isobuten (2-Methylpropen), Octafluorcyclobutan, Trifluorbrommethan, Dichlordifluormethan und Dichlortetrafluorethan als Indikatorgas verwendet werden.
ANMERKUNG 2 Das GC in der Tabelle steht allgemein für Gaschromatographie, das GC-TCD für Gaschromatographie mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor und GC-ECD für Gaschromatographie mit Elektroneneinfangdetektor.
ANMERKUNG 3 Das Treibhauspotential ist definiert als relatives Treibhauseffektpotential je Masseeinheit, bezogen auf Kohlendioxid.
ANMERKUNG 4 Die Infrarot-Gasabsorption umfasst sowohl Transmissionsspektroskopie (TS) als auch photoakustische Spektroskopie (PAS).

a Helium ist chemisch stabil.
b CO_2 löst sich in Wasser und kann an Baustoffen oder Möbeln adsorbiert werden und ist daher nicht für eine genaue Messung geeignet. Ist für die Messung jedoch keine kritische Genauigkeit erforderlich, wird häufig CO_2 verwendet. Das durch Anwesende oder einer anderen im Inneren vorhandenen Quelle erzeugte CO_2 muss berücksichtigt werden. Ist diese CO_2-Emissionsrate unbekannt, kann CO_2 nicht als Indikatorgas verwendet werden.
c SF_6 hat ein hohes Treibhauspotential und sollte daher nicht in großen Mengen eingesetzt werden. SF_6 ist ein inaktives Gas. Wenn es auf 500 °C erwärmt wird, erzeugt es toxische Gase. Daher sollte es nicht an Orten eingesetzt werden, an denen ein Heizlüfter eingesetzt wird und SF_6 durch die Wärmequelle fließt.
d PFC hat ein hohes Treibhauspotential und sollte daher nicht in großen Mengen eingesetzt werden.
e Ethylen ist entflammbar und sollte mit großer Vorsicht behandelt werden.
f N_2O hat ein hohes Treibhauspotential und sollte daher nicht in großen Mengen eingesetzt werden. N_2O löst sich in Wasser und reagiert mit Aluminium. Es entzündet sich bei hoher Temperatur. Es muss unbedingt darauf geachtet werden, es nicht über seiner zulässigen Konzentration anzuwenden, da es gesundheitsschädlich ist.

[2] EN ISO 12569:2017.

3.3 CO_2 als Tracergas

Das Gas CO_2, meist als Kohlenstoffdioxid oder umgangssprachlich auch als Kohlendioxid bezeichnet, ist in der Lüftungstechnik vor allem als Schadstoff bekannt. Der Erhöhung seiner Konzentration in belegten Innenräumen ist deshalb mit geeigneten lüftungstechnischen Massnahmen entgegenzuwirken. Ebenfalls bekannt ist die Verwendung von Kohlstoffdioxid in der Lebensmittelindustrie als Zusatzstoff in Getränken. Hierbei wird Kohlenstoffdioxid fälschlicherweise oft mit Kohlensäure gleichgesetzt. Bei der Zugabe von Kohlenstoffdioxid im Wasser reagiert allerdings nur rund 0.2% zu Kohlensäure. Weitere Anwendungsgebiete liegen in der Verwendung als Kältemittel oder zu Feuerlöschzwecken. Nebst diesen bekannten Rahmenbedingungen lässt sich Kohlenstoffdioxid auch als Tracergas einsetzen. Begünstigt wird dieser Einsatz durch die einfache Handhabung des Gases, welches ungiftig und nicht brennbar ist sowie durch die einfachen und bewährten Messgeräte zur Detektierung und Quantifizierung. Die untenstehende Tabelle 2 gibt eine Übersicht zum Gas.[3] [4] [5]

Tabelle 2: Stoffdaten CO_2

Bezeichnung	**CO_2**
Chemische Bezeichnung	Kohlenstoffdioxid (Kohlendioxid)
Chemische Formel	CO_2
Molekülaufbau	O=C=O
Treibhauspotential	1
Gefahrenpiktogramme	GHS04
Gefahrenhinweise	H280
MAK-Wert	5000 ppm; 9000 mg/m^3
Mol-Masse	44.01g/mol
Explosionsgrenze	-
Spezifische Bedingungen 20°C und 101.3 kPa	
Relative Dichte zu Luft	1.5
Wasserlöslichkeit	2 g/l
Selbstentzündung	-
Spezifische Bedingungen 25°C und 100 kPa	
Spez. Wärmekapazität c_p	0.6524 kJ/(kg*K)[6]
Wärmeleitfähigkeit z.B. Luft 26.2 mW/(m*K)	16.24 mW/(m*K)[7]

[3] IFA Gestis-Stoffdatenbank 2021.
[4] VDI-Wärmeatlas 2013a.
[5] LUMITOS AG 2007.
[6] VDI-Wärmeatlas 2013a.
[7] VDI-Wärmeatlas 2013a.

Bei Kohlenstoffdioxid handelt es sich um eine chemische Verbindung von einem Kohlenstoff- mit zwei Sauerstoffatomen. Der Kohlenstoff ist dabei mit Doppelbindungen an die Sauerstoffatome gebunden, welche beide zwei freie Elektronenpaare aufweisen. Durch die unterschiedlichen Elektronegativitäten von Sauerstoff und Kohlenstoff sind die Bindungen zwar polarisiert, die elektrischen Dipolmomente werden aber durch die Molekülsymmetrie nach aussen aufgehoben. Das Molekül hat somit kein elektrisches Dipolmoment.

Das Gas ist für das menschliche Auge nicht sichtbar und in niedrigen Konzentrationen geruchlos. Bei höheren Konzentrationen entwickelt sich ein scharfer bis saurer Geruch, der jedoch, ähnlich wie bei Blausäure, nicht von allen Personen wahrgenommen werden kann. Hinzu kommt, dass es nicht brennbar ist. Dies sind gute Voraussetzungen für den Einsatz als Tracergas. Ebenfalls ist das Treibhauspotential im Vergleich zu anderen gängigen Tracergasen klein und wird als Verhältnisgrösse für alle Treibhauspotentiale genutzt, was dazu führt, dass es einen GWP von 1 aufweist. Da Kohlenstoffdioxid jedoch bereits in hoher Konzentration in der Umgebungsluft vorkommt und durch Personen im Raum ebenfalls abgegeben wird, macht es eine Messung gerade in belegten Räumen schwieriger. Um diese Ungenauigkeitsfaktoren zu minimieren, können höhere Konzentrationen eindosiert werden. Dies kann bei den anwesenden Personen jedoch zu Unbehagen führen. [8]

Im auf ScienceDirect veröffentlichten Research Paper von N. Edouard, J. Mosquera, H. van Dooren, L. Mendes und N. Ogink wird Kohlenstoffdioxid als Tracergas mit dem bewährten Schwefelhexafluorid verglichen. Dies geschah mittels Messungen in einem natürlich belüfteten Viehstall. Die Untersuchungen haben dabei ergeben, dass die Abweichung zwischen beiden Tracergasen bei 10-12% liegt und die Ursache für diese Differenz weder dem einen noch dem anderen Tracergas, respektive dessen Nachweisverfahren gänzlich zugeschrieben werden kann. Als möglicher Grund für die Abweichung wird unter anderem auch der zusätzliche Eintrag an CO_2 durch das Vieh sowie dessen Exkrementen genannt. Auch diese Untersuchung zeigt, dass Kohlenstoffdioxid als Tracergas zwar grundsätzlich geeignet ist, jedoch der Berücksichtigung zusätzlicher Umstände bedarf.[9] Gestützt wird diese Erkenntnis weiter durch andere Untersuchungen, wie beispielsweise jener von A. Mikola, T. Koiv, J. Rehand und H. Voll am Departement of Civil Engineering and Architecture der Tallinn University of Technology. Auch diese Untersuchung kommt zum Schluss, dass die durchgeführten Tracergasmessungen mit Kohlenstoffdioxid, gegenüber herkömmlicher Bestimmungsmethoden zum Luftwechsel in Innenräumen, für viele Anwendungen genügend genaue Messresultate liefern können. Speziell bei der hier erwähnten Untersuchung ist aber der Einbezug der Belegung und somit des zusätzlichen Eintrags an CO_2, was im Gegensatz zu anderen Tracergasen einen Mehraufwand hinsichtlich der Messung bedeutet.[10]

[8] Mikola et al.
[9] Edouard et al. 2016.
[10] The Usage of CO2 Tracer Gas Methods for Ventilation Performance Evaluation in Apartment Buildings.

Abschliessend lässt sich sagen, dass Kohlenstoffdioxid durchaus eine Berechtigung als Tracergas hat. Die bestehende, schwankende und durch Belegung beeinflussbare Hintergrundkonzentration stellt gegenüber anderen Tracergasen aber einen erheblichen Nachteil dar, welcher nur durch zusätzlichen Aufwand aus den Messresultaten herausgerechnet werden kann oder eine bleibende Ungenauigkeit darstellt.

Aus Gründen des begrenzten Zeitumfangs, wie auch des limitierten Vorhandenseins der Einsatzmaterialien wurde im Folgenden für die Messversuche auf einen Einsatz von Kohlenstoffdioxid als Tracergas verzichtet.

3.4 SF_6 als Tracergas

Das Gas SF_6 – Schwefelhexafluorid wird bereits seit Jahren erfolgreich als Tracergas eingesetzt. Es ist eine chemische Verbindung eines Schwefelatoms und sechs Fluoratomen, dessen Vorkommen in der Umgebung ausschliesslich anthropogener Natur ist. Die Gewinnung erfolgt synthetisch aus den Elementen Schwefel (S_8) und Fluor (F_2). Nach der Synthese bilden sich nebst dem reinen Schwefelhexafluorid auch Dischwefeldecafluoride (S_2F_{10}), welche durch eine Erhitzung auf 400°C in Schwefelhexafluoride und Schwefeltetrafluoride (SF_4) disproportioniert werden. Das anschliessende Waschen in Lauge zerstört die Schwefeltetrafluoride und lässt nur das reine Schwefelhexafluorid zurück.[11]

Das farb- und geruchlose Gas ist eines der am häufigsten eingesetzten Tracergase in Europa und der Schweiz. Nebst der oben erwähnten Unsichtbarkeit für den Menschen ist es zudem weder toxisch noch brennbar, was seine Handhabung entsprechend vereinfacht. Da es wie erwähnt nicht natürlich vorkommt, sind vorhandene Hintergrundkonzentrationen für die meisten Messversuche vernachlässigbar. Mit gängigen Gasanalysegeräten ist es zudem einfach detektierbar und mischt sich homogen mit der Luft ohne abzusinken. Dieser Umstand wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen bestätigt. Die Tatsache, dass das Gas über sehr lange Zeit in der Luft stabil ist, stellt für die Messtechnik einen Vorteil dar, ist aber zugleich hinsichtlich seiner Umweltbelastung der grösste Nachteil von Schwefelhexafluorid. Mit einem Treibhauspotential von 26'087 stellt es ein extrem klimawirksames Gas dar, dessen Einsatz mit dem Hintergrund bezüglich Erderwärmung zurecht hinterfragt wird. Zum Vergleich: Schwefelhexafluorid weist einen mehr als doppelt so hohen GWP auf wie die klimaaktivsten (und längst verbotenen, respektive eingeschränkten) Kältemittel R-13 und R-23. Dieser Umstand bildet den grundlegenden Anstoss für das Erproben von Alternativen für SF_6 im Einsatz als Tracergas.[12] [13]

[11] Walter C. Schumb und McGraw-Hill 2009.
[12] Bundesamt für Umwelt BAFU 2020.
[13] J. Schnitzer und M. Schuh 2016.

3.5 HFO-1234yf als Tracergas

Das Gas 2,3,3,3-Tetrafluorpropen oder auch HFO-1234yf genannt ist eine chemische Verbindung aus der Stoffgruppen der Hydrofluorolefine. Bekannt ist es im Moment vordergründig durch seinen Einsatz als Kältemittel unter dem Namen R1234yf. Durch die damit zusammenhängenden Nutzung in Personenkraftwagen geriet es ab ca. 2010 gehäuft in die Schlagzeilen, da sich Sicherheitsbedenken hinsichtlich der Entzündbarkeit des Kältemittels breit gemacht haben. Mittlerweile haben sich diese aufgrund weiterer Untersuchungen aber wieder gelegt. Aufgrund des Patentrechtes halten die Unternehmen Honeywell und Chemours momentan ein Monopolposition bezüglich der Herstellung des Gases inne, welches mehrerer Herstellungsschritte bedarf. [14] [15]

Bei HFO-1234yf handelt es sich um ein farbloses Gas, welches einen schwachen Eigengeruch aufweist, der allerdings bei den geringen Mengen verwendeten Gases während der Durchführung von Tracergasmessungen nicht aktiv wahrnehmbar ist. Mit einem Treibhauspotential kleiner 1 stellt es nicht nur hinsichtlich seiner Nutzung als Kältemittel, sondern auch in Bezug auf den Einsatz als Tracergas eine klimafreundliche Alternative zu bewährten Mitteln dar. Weiter schädigt HFO-1234yf, im Gegensatz zu chlorhaltigen Kohlwasserstoffen, auch die Ozonschicht nicht. Das bereits zuvor erwähnte Risiko in Bezug auf die Entzündbarkeit des Gases stellt den gewichtigsten Nachteil des Gases dar. Die Explosionsgrenzen liegen zwischen 6.2% und 12.3% und die Gefahr besteht, dass sich das HFO-1234yf an heissen Oberflächen entzündet. Bei der Verbrennung entstehen Fluorwasserstoff, umgangssprachlich als Flusssäure bekannt, und Carbonylfluorid. Beide Stoffe sind giftig und ätzend, was das Gefahrenpotential des Gases weiter erhöht. Aus diesem Grund ist der Bildung einer zündfähigen Atmosphäre strikt entgegenzuwirken. Hinsichtlich dem Einsatz als Tracergas kann diese Gefahr jedoch gut kontrolliert werden. Die Raumluftkonzentrationen des Gases liegen bei Messversuchen jeweils um mehr als den Faktor 100 tiefer als die untere Explosionsgrenze. Gefahr besteht somit nur an der direkten Eindosierstelle, wo diesem Umstand mit organisatorischen Massnahmen während der Messungen entgegengewirkt werden kann. Und nicht zuletzt stellt HFO-1234yf nicht das einzige brennbare Tracergas dar. So ist beispielsweise auch Ethylen brennbar, welches oft als Tracergas eingesetzt und auch in der Norm EN ISO 12569:2017 erwähnt wird. [16] [17] [18] [19] [20]

[14] Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza 2013.
[15] Deutsche Umwelthilfe DUH 2011.
[16] Christoph Ruhkamp 2011.
[17] Bundesamt für Gesundheit BAG 2013.
[18] Infraserv GmbH & Co. Höchst KG 2021.
[19] cold.world GmbH 2021.
[20] BITZER Kühlmaschinenbau GmbH 2021.

Hinsichtlich den weiteren Anforderungen an optimale Tracergase zeigt sich HFO-1234yf als durchaus geeignet. Der geringe GWP von kleiner 1 kommt zustande, da das Gas in der Atmosphäre lediglich 12 Tage stabil bleibt. Der im Vergleich zu anderen eingesetzten Gasen schnelle Abbau ist für die Nutzung als Tracergas wenig einschränkend, da einzelne Messversuche selten länger als einige Stunden dauern. Mit geeigneten Messverfahren lassen sich gar in weniger als einer Stunde erfolgreich Messreihen durchführen. Die Stabilität des Gases über diese Zeit ist gewährleistet. Für Messverfahren, welche teils über mehrere Wochen andauern, stellt diese Tatsache allerdings ein Ausschlusskriterium dar. Da HFO-1234yf nicht giftig ist, spricht aber auch einem Einsatz in belegten Raumsituationen nichts entgegen. Und wie sich in den kommenden Kapitel zeigen wird, findet auch kein ungewolltes Absinken in der Raumluft statt – das HFO-1234yf verteilt sich im Raum und bildet eine homogene Mischung mit der Luft. [21]

Eine weitere Problemstellung in der Nutzung konnte einzig hinsichtlich des Absorptionsverhaltens einiger Materialien gegenüber dem HFO-1234yf beobachtet werden, auf die im Folgenden noch weiter eingegangen wird. So konnte durch Messversuche der HSLU gezeigt werden, dass bei zum Feuchteübertrag beschichteten Rotationswärmetauschern eine Absorption des Gases stattfindet. Eine ähnliche Beobachtung konnte bei der Gastrocknung für die Gasanalyse über das Rosemount Emerson MLT4 gemacht werden. Nach einer anfänglichen zu kleinen gemessenen Konzentration durch die Absorption hat sich anschliessend eine konstante Hintergrundkonzentration eingestellt. Dieser Umstand wird im Folgenden noch weiter thematisiert und muss durch weitere Untersuchungen im Detail analysiert werden.

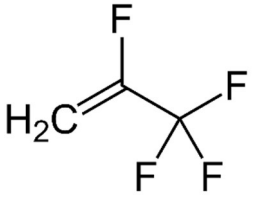
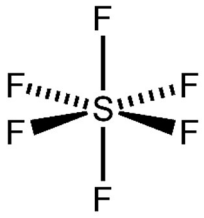
3.6 Vergleich der Stoffdaten SF_6 und HFO-1234yf

Ein zentraler Aspekt der vorliegenden Untersuchungen stellt der Vergleich von SF_6 und HFO-1234yf dar. Dies erfolgt im Folgenden durch mehrere Messversuche. Zunächst aber zeigt eine theoretische Analyse, dass die beiden Gase hinsichtlich Tracergasmessungen durchaus vergleichbar sind. Durch ihr über kürzere Zeit ähnlich stabiles Verhalten in der Luft sowie die über Zeit entstehende homogene Durchmischung mit der Umgebungsluft, eignen sich beide gleichermassen für Tracergasmessungen. So sind beide Gase im Raum rein additiv zu den Luftmolekülen wahrnehmbar und erzeugen keine Wechselwirkung mit ihnen. Des Weiteren ist die Detektion der jeweiligen Konzentrationen mit verschiedenen Analysemethoden gleichermassen möglich.

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Eigenschaften der beiden Gase ist der Tabelle 3 auf der Folgeseite zu entnehmen. Die theoretische Vergleichbarkeit wird im Folgenden in den drei Messversuchen praktisch validiert.

[21] Honeywell 2008.

Tabelle 3: Vergleich HFO-1234yf und SF_6

Bezeichnung	**HFO-1234yf**[22]	**Schwefelhexafluorid**[23]
Chemische Bezeichnung	2,3,3,3-Tetrafluorpropen	Schwefelhexafluorid
Chemische Formel	$C_3H_2F_4$	SF_6
Molekülaufbau		
Treibhauspotential (über einen Zeitraum von 100 Jahren)	<1	26087
Gefahrenpiktogramme	GHS02; GHS04	GHS04
Gefahrenhinweise	H220; H280	H280
MAK-Wert	200 ppm; 950 mg/m^3	1000 ppm; 6000 mg/m^3
Mol-Masse	114.04g/mol	146g/mol
Explosionsgrenze	6.2-12.3%	-
Spezifische Bedingungen 20°C und 101.3 kPa		
Relative Dichte zu Luft	3.9	5.3
Wasserlöslichkeit	0.2 g/l	0.041 g/l
Selbstentzündung	405 °C	-
Spezifische Bedingungen 25°C und 100 kPa		
Spez. Wärmekapazität c_p	0.9050 kJ/(kg*K)[24]	0.6580 kJ/(kg*K)[25]
Wärmeleitfähigkeit z.B. Luft 26.2 mW/(m*K)	13.5 mW/(m*K)	13.65 mW/(m*K)

GHS02: Flamme (Wirken oxidierend und verstärken Brände. Bei Mischung mit brennbaren Stoffen entstehen explosionsgefährliche Gemische.)

GHS04 Gasflasche (Gasflaschen unter Druck können beim Erhitzen explodieren, tiefkalte Gase erzeugen Kälteverbrennungen)

H220 Extrem entzündbares Gas

H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren

[22] Multigas 2018a.
[23] Multigas 2018b.
[24] VDI-Wärmeatlas 2013b.
[25] Messer Schweiz AG 2019.

4 Messverfahren

In diesem Kapitel werden die Messverfahren genauer beschrieben, welche in der vorliegenden Arbeit für die Messversuche angewendet wurden. Es wird dahingehend eingegrenzt, als dass lediglich die für die Analyse von Lüftungsphänomenen in Innenräumen relevanten Messmethoden beschrieben werden, welche im Folgenden auch in den Messversuchen angewendet wurden. Weitere Messverfahren hinsichtlich anderer Einsatzgebiete von Tracergasmessungen, beispielsweise bei der Leckagemessung von Gasleitungen, werden hier nicht erwähnt. Die angewendeten Messverfahren sind gestützt auf die gemäss SIA 180.213 verfügbaren Messarten hinsichtlich der Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden gewählt. Die SIA 180.213 basiert auf der EN ISO 12469:2017 «Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen – Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden – Indikatorgasverfahren». Es werden daraus die beiden angewendeten Konstantdosiermethoden (Aufdosierung & Abklingen) sowie die Pulsmethode erläutert. Die Norm beschreibt insgesamt acht verschiedene Messverfahren, mit welchen die Luftwechselrate oder der spezifischen Volumenstrom errechnet werden kann. Die Verfahren stellen jedoch allesamt Anforderungen an den untersuchten Raum, dessen Lüftungssystem und den Messaufbau. Diese Anforderungen sind teils nur mit hohem technischen und analytischen Aufwand zu erfüllen, was einige der Verfahren hinsichtlich der hier vorgenommenen Untersuchungen untauglich macht. Als Beispiel kann hier die Methode der konstanten Konzentration genannt werden, die über die gesamte Messdauer eine gleichbleibende Konzentration an Tracergas im Raum bedingt. Erfüllt werden kann dies nur mit hochspezifischen Analysegeräte, welche die eindosierte Menge an Tracergasen automatisch an die gemessenen Werte anpasst. Aus diesem Grund erfolgte die Einschränkung auf die zuvor erwähnten Verfahren für die folgenden Messungen. Im Fokus steht insbesondere die Pulsmethode, die zusätzlich zur Aussage hinsichtlich der Luftwechselrate auch angesichts der Verbreitung von Schadstoffen im Raum Aussagen zulässt. Die Tabelle 4 zeigt die Übersicht der Messverfahren aus der bereits erwähnten SIA 180.213. Diese bekannte Betrachtung der Tracergasmessungen zur Ermittlung der Luftwechselrate und des spezifischen Volumenstroms wurde in den Messversuchen hinsichtlich der Analyse der direkten Schadstoffausbreitung im Raum erweitert, was zuletzt auch eine Bewertung hinsichtlich der Covid-19-Randbedingung erlaubt.[26]

Im Folgenden wird aber vor der Beschreibung der angewendeten Messverfahren noch auf den Begriff der Lüftungseffektivität eingegangen, dessen Verständnis zentral für die folgenden Ausführungen ist.

[26] Grieve 1990.

Tabelle 4: SIA 180.213 - EN ISO 12569:2017 - Verfahren, Anwendung und Messgrössen[27]

Verfahren		**Anwendung und Messgrössen**						
		Anwendung					**Folgendes wird gemessen**	
		Raumkonzentration kann nur in der Anfangsphase gleichmässig gehalten werden	Raumkonzentration kann zu allen Zeiten gleichmässig gehalten werden	Mittlere Abluftkonzentration kann gemessen werden	Bekanntes Volumen der wirksamen Mischzone	Schwankungen in der Luftwechselrate können ignoriert werden	Luftwechselrate oder spezifischer Luftvolumenstrom	Flexibilität gegenüber einer wesentlichen transienten Luftwechselrate
Verfahren mit abfallender Konzentration	2-Punkt-Abklingverhalten	—	•	—	—	—	Spezifischer Luftvolumenstrom	Δ
	Mehrpunkt-Abklingverfahren	—	•	—	—	•	Spezifischer Luftvolumenstrom	□
	Verfahren mit abklingender Abluftkonzentration	•	—	•	—	•	Spezifischer Luftvolumenstrom	□
	Impulsverfahren	—	—	•	—	•	Luftwechselrate	□
Verfahren mit konstanter Injektion	Verfahren mit mittlerer Umkehrkonzentration	—	•	—	•	—	Luftwechselrate	Δ
	Verfahren mit mittlerer Konzentration	—	•	—	•	•	Luftwechselrate	□
	Verfahren mit stationärer Konzentration	—	—	•	—	•	Luftwechselrate	□
Verfahren mit konstanter		—	•	—	—	—	Luftwechselrate	Δ

Die Kennzeichnung „•“ weist auf die notwendige Bedingung für die Anwendung zur Messung der Menge nach jedem Verfahren hin.

Die Kennzeichnung „—“ weist darauf hin, dass keine notwendige Bedingung für jedes anzuwendende Verfahren vorliegt.

Die Kennzeichnung „Δ“ weist auf eine angemessene Anwendbarkeit hin, da die Grundgleichung zum Ableiten des Messverfahrens eine zeitliche Änderung der Luftwechselrate zulässt.
Die Kennzeichnung „□“ weist auf eine Schwierigkeit hin, da bei der Grundgleichung zum Ableiten des Messverfahrens von einer konstanten Luftwechselrate ausgegangen wird.

[27] EN ISO 12569:2017.

4.1 Lüftungseffektivität

Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der globalen Luftwechselzahl, um so das durchschnittliche Alter der Luft in einem Raum zu bestimmen. Oft wird diese vereinfacht mithilfe des Volumenstromes der Lüftungsanlage (theoretisch oder beispielsweise über Kanal-Luftgeschwindigkeitsmessungen bestimmt) und dem Raumvolumen berechnet. Diese Methode kann jedoch nicht die lokale Lüftungseffektivität bestimmen, welche anhand der Aufenthaltsdauer der Luft im Raum ermittelt wird. Willigert Raatschen hat sich im Jahre 1988 in einer dreiteiligen Publikation intensiv dem Begriff der Lüftungeffektivität gewidmet, wobei die untenstehenden Definitionen eine tragende Rolle einnehmen.

$$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} = \frac{1}{n}$$

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_{r,v}}$$

$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom
V_{RA}	Raumvolumen
τ_n	Aufenthaltszeit (mit Hilfe von Luftvolumenstrom und Raumvolumen)
$\tau_{r,v}$	Effektive Aufenthaltsdauer der Luft

Für die Werte η_a kann gemäss untenstehender Auflistung, eine Abschätzung der Strömung gemacht werden. Der Wert stellt den Luftaustauschwirkungsgrad dar.

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideale Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung (ideale Mischlüftung)
$0 < \eta_a < 0{,}5$	Kurzschlussströmung

[28] [29] [30]

[28] Willigert Raatschen 1988a.
[29] Willigert Raatschen 1988b.
[30] Fachverband Gebäude-Klima e. V. 2021.

In der folgenden Abbildung 2 ist der Begriff der Lüftungseffektivität anhand des obigen Beschriebs und der Publikation von Willigert Raatschen dargestellt. Ein Molekül gelangt über die Zuluft der Lüftungsanlage in den Raum, verweilt dort eine bestimmte Zeit und wird dann über die Abluftdurchlässe wieder aus dem Raum entfernt. Die Verweilzeit stellt dabei den gesamten Zeitraum dar, in welchem das betreffende Molekül im Raum verweilt, ab dem Moment des Eintritts durch den Zuluftauslass bis zum Austritt über den Abluftdurchlass. Das durchschnittliche Alter der Luft stellt dabei genau die Hälfte der gesamten Verweilzeit dar. Da es sich hierbei um einen durchschnittlichen Wert handelt, ist auch klar, dass sich die einzelnen Moleküle grundsätzlich diffus verhalten und unterschiedliche Wege durch den Raum zurücklegen. Die diffuse Bewegung entsteht dabei lediglich durch die ohnehin vorherrschende Raumluftströmung und wird bei der Tracergasmessung nicht durch die Zugabe von Tracergasen beeinflusst.[31] [32]

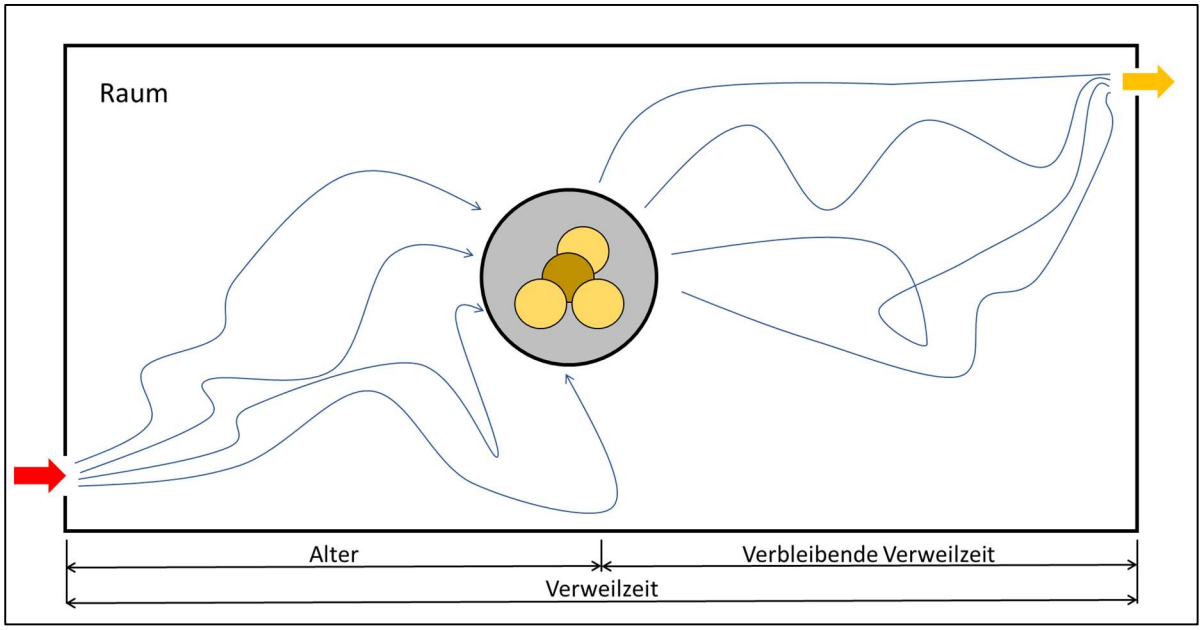


Abbildung 2: Verweilzeit im Raum eines Partikels

[31] Willigert Raatschen 1988c.
[32] Mats Sandberg 1992.

4.2 Konstantdosiermethoden

Für die folgenden Versuche wurden zwei verschiedene Konstantdosiermethoden eingesetzt, welche sich aufgrund ihres Ablaufes gut ergänzend einsetzen lassen und die Messergebnisse gegenseitig verifizieren und ergänzen können. Die grundsätzlichen Rahmenbedingungen für die Durchführung der beiden Methoden sind der Norm EN ISO 12469:2017 entnommen. Die Auswahl der Messverfahren wurde anhand der zur Verfügung stehenden Arbeitsmittel und der Prüfobjekte gemacht.

Die erste dieser beiden Methoden stellt das Abklingen von Tracergas im Raum dar. Sie wird deshalb als Abklingmethode oder Decay-Methode bezeichnet. Dafür wird entweder im Raum direkt oder in der Zuluftleitung der Lüftungsanlage Tracergas aufgegeben, welches sich so mit der Raumluft zu einer homogenen Konzentration vermischt. Die gleichmässige, homogene Durchmischung bei Messbeginn stellt dabei eine Grundvoraussetzung für einen korrekten Messablauf dar. Je nach Raumsituation bedarf es für eine solche Durchmischung zusätzlicher Massnahmen. Meist beinhalten diese eine zusätzliche Durchmischung der Raumluft mit im Raum aufgestellten Umluftventilatoren. Bei einer vorhandenen Lüftungsanlage mit guter Lüftungseffizienz ist diese Massnahme jedoch nicht zwangsläufig notwendig. Durch die Aufgabe eines konstanten Tracergasmassenstroms stellt sich bei entsprechender Durchmischung der Raumluft mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand ein, in dem die Tracergaskonzentration im Raum und auch in der Abluftleitung sowohl über verschiedene Messpunkte als auch über die Zeit konstant bleibt. Zu diesem Zeitpunkt wird die Tracergaszufuhr gestoppt. Ab diesem Moment reduziert sich die Konzentration des Tracergases im Raum und in der Abluftleitung kontinuierlich. Die Zeit, die das Abtragen des Tracergases beansprucht, stellt anschliessend den Bezug zum spezifischen Luftvolumenstrom und zur lokalen Lüftungseffektivität her. Die Anordnung von verschiedenen Messpunkten im Raum ermöglicht damit auch die Lokalisierung von allfällig schlecht belüfteter Zonen. Die Abbildung 3 stellt sinnbildlich einen solchen Messablauf, die typischen Messwertverläufe und das allgemeine Mess-Setup dar. Die nachstehende Formel beruht auf demselben Prinzip wie die Schadstoffabfuhr gem. SIA 382/1. Sie kann auch für den Abtransport von Tracergasen herangezogen werden und stellt damit die Möglichkeit zur Bestimmung des Luftvolumenstroms dar. [33]

[33] SIA 382/1.

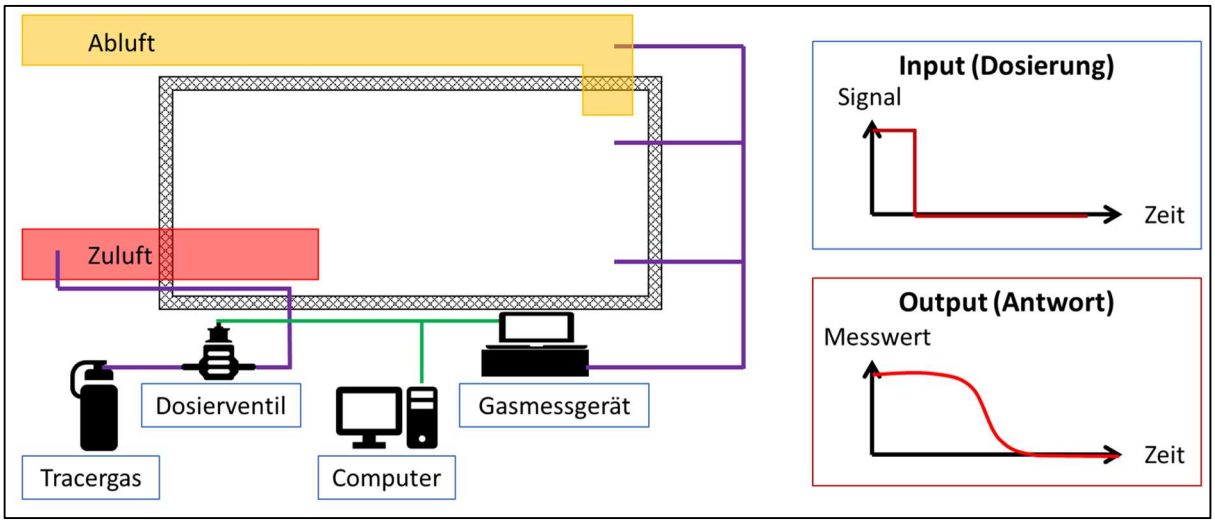


Abbildung 3: Messaufbau Abklingmethode

Abklingmethode

Bei der Abkling-Methode gilt: Stoffemission $G = 0$ und Konzentration der Zuluft $C_{ZUL} = 0$. Somit ist

$$C_{RAL,t} = C_{RAL,0} * e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} * t}$$

$C_{RAL,t}$ Konzentration Raumluft zu der Zeit t in ppm

$C_{RAL,0}$ Konzentration Raumluft zu der Zeit 0 in ppm

$q_{v,ZUL}$ Volumenstrom Zuluft in m^3/h

V_R Volumen Raum in m^3

t Zeit t in h

Sind diese Definitionen nicht zutreffend, so ist die Formel entsprechend um weitere Terme zu ergänzen.

Die zweite der angewandten Konstantdosiermethoden stellt den Verlauf ab dem Start der konstanten Dosierung von Tracergas bis zum Erreichen des vorher erwähnten Gleichgewichtszustand dar. Sie wird als Step-Up-Methode oder Aufdosiermethode bezeichnet. Auch hier können mit der Anordnung mehrere Messpunkte Rückschlüsse auf die lokale Lüftungseffektivität gezogen werden. Grundsätzlich stellt diese Methode aber eine verlässliche Variante zur Bestimmung der Luftwechselrate dar, wobei lediglich eine Messstelle in der Abluftleitung notwendig ist. In der Abbildung 4 ist sinnbildlich wieder ein solcher Messablauf mit den typischen erwarteten Messwertverläufen und dem allgemeinen Mess-Setup dargestellt. Im Vergleich mit der Abbildung 3 ist festzustellen, dass beide Konstantdosiermethoden mit demselben Mess-Setup durchgeführt werden können.[34]

[34] SIA 382/1.

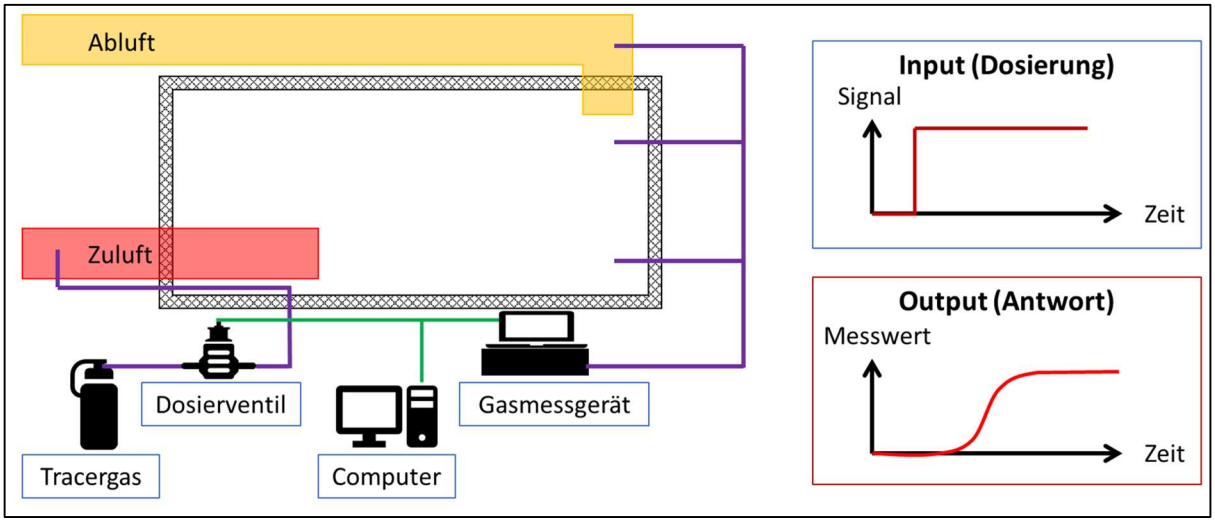


Abbildung 4: Messaufbau Step-Up-Methode

Konstante Dosierung

Bei einer konstanten Dosierung ist $C_{RAL,0} = 0$ und $C_{ZUL} = 0$. Somit ist

$$C_{IDA,t} = \frac{10^{-6} * G}{q_{v,ZUL}} * \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} * t}\right) = C_{IDA,\infty} * (1 - e^{-n*t})$$

$C_{IDA,\infty}$ Stoffkonzentration in der Raumluft im Gleichgewichtszustand, in ppm

n Exponent für rechnerischen Luftwechsel, in h-1

$$C_{IDA,t} = C_{IDA,\infty} * \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} * t}\right)$$

Lokale Lüftungswirksamkeit

$$\varepsilon_{C,i} = \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{C_{IDA,i} - C_{SUP}}$$

$\varepsilon_{C,i}$ Lüftungswirksamkeit an der Position i

C_{ETA} Verunreinigungskonzentration der Abluft, in ppm

$C_{IDA,i}$ Verunreinigungskonzentration der Raumluft an der Position i, in ppm

C_{SUP} Verunreinigungskonzentration der Zuluft, in oder ppm

[35]

[35] SIA 382/1.

4.3 Pulsdosiermethode

Die Pulsdosiermethode stellt grundsätzlich auch ein Verfahren mit abfallender Konzentration dar. Der zentrale Unterschied zur Abklingmethode stellt die Tatsache dar, dass lediglich ein kurzer Stoss an Tracergas eindosiert wird und sich somit zu Messbeginn kein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Für die Analyse der Pulsdosiermethode ist es zwingend notwendig nebst der gemessenen Konzentration an den bestimmten Messpunkten auch die eindosierte Menge an Tracergas genau zu kennen. Eine computergestützte Ansteuerung und Auswertung des Dosierventiles ist somit unabdingbar. Anhand des in der Norm EN ISO 12569.2017 beschrieben Verfahrens über die Messung der mittleren Abluftkonzentration lässt sich so die Luftwechselrate bestimmen. Das Verfahren hat im Gegensatz zu den Konstantdosiermethoden den klaren Vorteil, dass eine erheblich geringere Menge an Tracergas benötigt wird. Gerade in Hinsicht auf die klimaschädigenden Auswirkungen von einigen Tracergasen, allen voran SF_6, lässt sich somit auch ohne Wechsel des Tracergases selbst ein Verbesserung bezüglich der Umweltverträglichkeit erzielen.[36] [37]

Impulsverfahren gemäss EN ISO 12569.2017(D) [38]

$$Q_v = \frac{V_{gas}(t_1)}{\int_{t1}^{\infty} C_E(t)dt}$$

t	die Zeit, in h
t_1	die Anfangszeit der Messung, in h;
Q_V	die Luftwechselrate, in m^3/h
$V_{gas}(t_1)$	das dem Raum zu Beginn der Messung zugeführte Indikatorgasvolumen, in m^3/h
$C_E(t)$	die Konzentration in der entlüfteten Abluft, in m^3/m^3

In Anbetracht der aktuellen Situation rund um die Coronaviruspandemie öffnet sich eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Pulsdosiermethode. So lässt sich über einen zeitlich begrenzten Puls eines Tracergases, welcher im Raum aufgegeben wird, eine ebenso punktartige Schadstoffquelle nachbilden. Hinsichtlich der Virenausscheidung beschränkt sich diese Betrachtung auf die in der Luft mitgetragenen kleinsten Aerosole, welche auch längere Zeit nach deren Ausscheiden in der Raumluft schweben und dem Strömungsprofil der Raumluft folgen. Die Pulsdosierung kann so beispielsweise als Niesen oder Sprechen einer infektiösen Person betrachtet werden. Die anschliessende Messung der durch die Pulsdosierung verursachten Konzentration an Tracergas an unterschiedlichen Standorten im Raum und der Vergleich mit der ursprünglich eindosierten Menge lässt Rückschlüsse zur Effizienz der Lüftungsanlage und dem allgemeinen Strömungsbild zu. Nebst der beschriebenen Verteilung lässt sich

[36] Persily und Axley 1990.
[37] Yukihiro Hashimoto 2007.
[38] EN ISO 12569:2017.

dabei auch auf die zeitliche Beständigkeit der Tracergaskonzentration an verschiedenen Standorten im Raum schliessen. So kann, wie bei den folgenden Messversuchen, gezeigt werden, welche Bereiche eines Raumes einer erhöhten und länger anhaltenden Exposition ausgesetzt sind, was letztlich Aussagen zum Infektionsrisiko mit in der Luft mitgetragenen Viren zulässt. Durch Kenntnis der ursprünglich eindosierten Menge an Tracergas und den Konzentrationen an den Messpunkten werden solche Messungen zudem skalierbar. Dies soll heissen, dass die Menge an Tracergas nicht mit der effektiv ausgestossenen Menge an Schadstoffen oder Viren einer bestimmten Situation übereinstimmen muss. Die Abbildung 5 zeigt wieder einen möglichen Messablauf mit den typischen erwarteten Messwertverläufen und dem allgemeinen Mess-Setup.

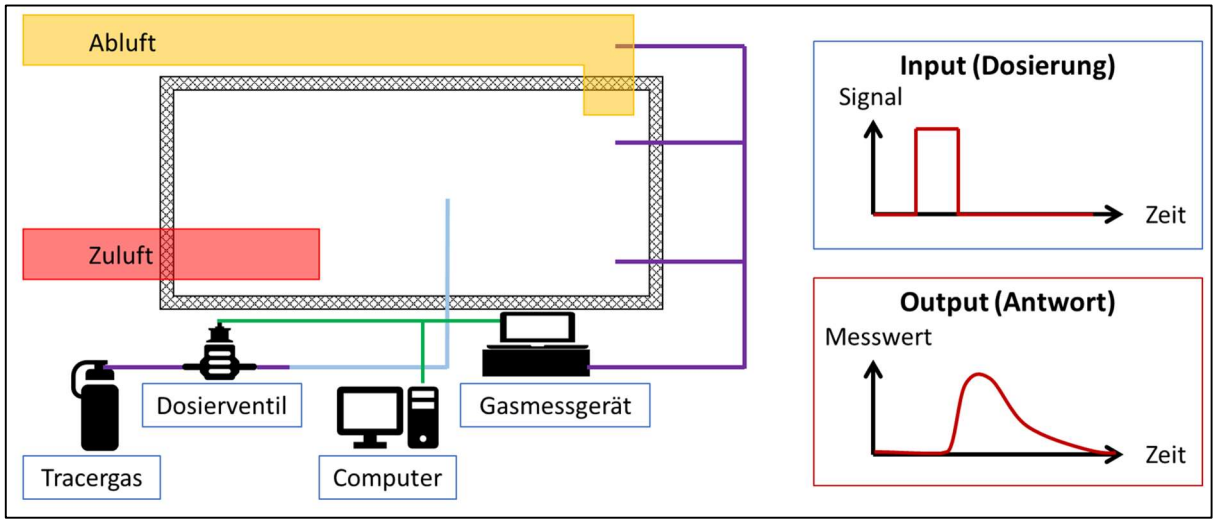


Abbildung 5: Messaufbau Pulsdosierungsmethode

5 Arbeitsmittel

In diesem Kapitel werden die Hauptarbeitsmittel, allen voran die Gasanalysegeräte, in Kurzfassung vorgestellt. Zunächst werden dazu die drei verschiedenen Messprinzipien, inklusive der verwendeten Geräte, welche in den folgenden Versuchen verwendet wurden, erklärt. Danach wird auf die Dosierventile eingegangen, da diese eine tragende Rolle bei der Eindosierung der Pulse innehalten. Die übrigen Arbeitsmittel, wie beispielsweise die verwendeten Dummies, sind im Anhang E dokumentiert.

5.1 Messprinzip photoakustische Spektroskopie

Die photoakustische/optoakustische Spektroskopie oder auch Erkennungstechnologie basiert auf der Umwandlung von optischer in thermische Energie. Modulierbare Infrarotstrahlung wird durch eine photoakustische Zelle geleitet und vom Messgas, welches in die Zelle gepumpt wird, absorbiert. Davon wird ein Teil der Grundmolekülpopulation auf ein höheres Energielevel gebracht und entspannt sich mit Hilfe der strahlenden und nicht-strahlenden Transaktionen wieder. Die nicht-strahlenden Teile erwärmen das Messgas, was zu einer thermischen Expansion führt. In einer in sich geschlossenen Messzelle führt dies durch einen Propeller zwischen der Strahlungsquelle und der Gaszelle zu periodisch wiederholenden thermischen Expansionen. Diese Expansionen können als Schallwellen mit einem Mikrophon aufgenommen werden. Die photoakustische Erkennungstechnik bietet mit der hohen Sensibilität sehr kurze Absorption-Weglängen von wenigen Zentimetern. So kann die Grösse der Gaszelle minimiert werden, ohne dabei Einbussen in der Sensibilität zu riskieren. Die Temperatur der Gaszelle wird konstant gehalten, um für die Messungen eine Stabilität zu erschaffen und eine Kondensation in der Gaszelle zu verhindern. Je nach Bandpassfilterart können verschiedene Gase erkannt werden. In der folgenden Abbildung 6 ist die das beschrieben Prinzip grafisch dargestellt. [39]

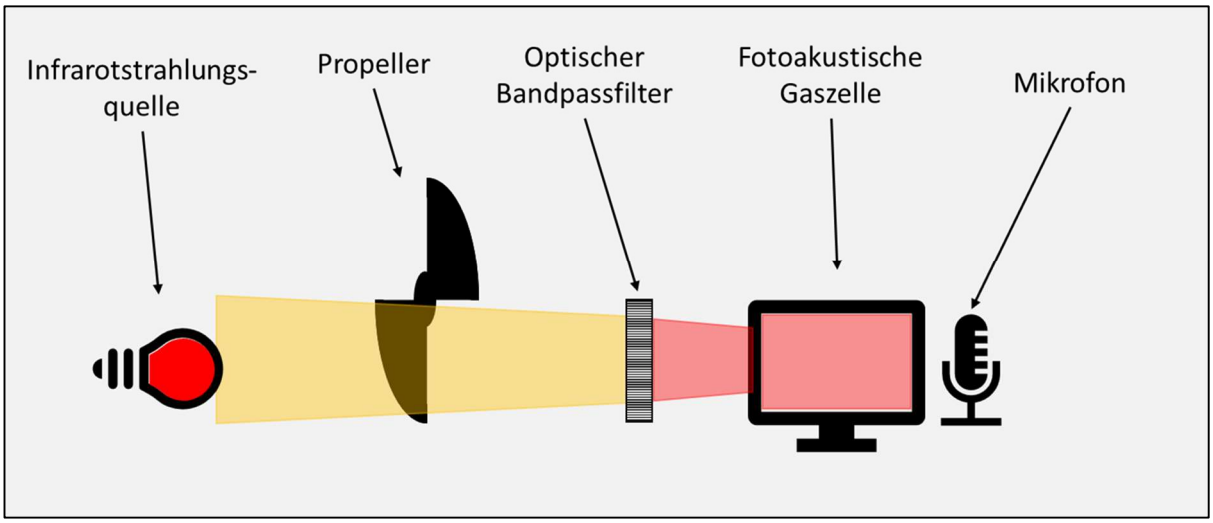


Abbildung 6: Photoakustische Erkennungstechnik

[39] Gasera Headquarters 2019.

5.1.1 Messgerät GASERA ONE

Das eingesetzte GASERA ONE basiert auf der zuvor beschriebenen photoakustischen Erkennungstechnik. Dieses ist mit einem einzigartigen extrem-sensiblen auskragenden Sensor ausgestattet und kann durch die entsprechende Auswahl der Lichtquelle für verschiedene Anwendungen konfiguriert werden. In Kombination mit dem GASERA ONE wird ein Multipoint-Sampler eingesetzt. Dieser ermöglicht es, mehrere Standorte mit einem einzigen Mess-Setup zu messen. Die verschiedenen Messpunkte werden dabei nacheinander gemessen. Durch mehrere Standorte wird die Messdauer dabei jeweils erhöht, was als Nachteil gewertet werden kann. Die Handhabung des GASERA ONE ist auch für Laien einfach und die Bedienung erfolgt über einen Drehknopf in Kombination mit einem Farbdisplay. Das Display erlaubt eine Echtzeit-Kontrolle der Messwerte. Gerade für das Anstreben eines Gleichgewichtszustandes im Raum hilft die Anzeige so dem Mess-Team. Die Aufstellung der Messzelle erfolgt meist an einem zentralen Standort und wird von dort aus mit nichtabsorbierenden Kunststoff-Messschläuchen mit den im Raum verteilten Messpunkten verbunden. Aufgrund der Möglichkeit für mehrere Messpunkte eignet sich das GASERA ONE mit dem Multipoint-Sampler ideal für die gleichzeitige Analyse von mehreren Messpunkten im Raum und in der Abluft, was den Einsatz beim Anwenden der Konstantdosiermethoden sinnvoll macht. Die Messdauer von rund einer Minute pro Messpunkt zeigt aber gerade beim Einsatz der Pulsmethode die Grenzen des Gerätes auf. Ein zu kurzer Puls wird durch das Gerät unter Umständen nicht erkannt. Das für die Messversuche verwendete Gerät ist in der Abbildung 7 ersichtlich.

Dem Anhang E liegt eine Übersicht über die technischen Daten des GASERA ONE bei.

Abbildung 7: Messgerät GASERA ONE inkl. Multipoint-Sampler

5.2 Messprinzip Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR)

Das Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer ist ein Messgerät dessen Herzstück ein Interferometer darstellt, mit welchem durch die Überlagerung, respektive Interferenz von Wellen, die zu ermittelnde Grösse gemessen wird. Die auch unter der abgekürzten Bezeichnung FTIR-Spektrometer bekannten Geräte haben ein grosses Anwendungsfeld, da sich grundsätzlich mit jeder Art von Welle Interferenzen erzeugen lassen. Nicht zuletzt kommen sie damit auch bei der Gasanalyse für Tracergasmessungen zur Anwendung. Die Anordnung der Spiegel kann variieren. Im hier beschriebenen und in der Abbildung 8 visualisierten Beispiel bilden sie ein Michelson-Interferometer. Dabei fällt der Strahl von der Quelle zuerst auf einen Strahlteiler und spaltet sich in zwei (im idealen Falle gleich intensive) Einzelstrahlen auf. Der erste Strahl wird auf einen festen Spiegel gelenkt und reflektiert, der zweite auf einen beweglichen. Durch die Reflexion werden die beiden Strahlen wieder zusammengeführt, sodass diese abhängig von den im Strahl enthaltenen Frequenzen und vom Spiegelweg, interferieren. Daraus ergibt sich ein Interferogramm mit einem grossen Maximum, wo die beiden Spiegel gleich weit vom Strahlteiler entfernt waren und somit alle Frequenzen additiv interferiert haben, mit gleichzeitig möglichst flachen Ausläufern. Im Rechner wird das daraus gebildete Interferogramm anschliessend mittels Fourier-Transformation zu einem Spektrum zusammengesetzt. [40] [41] [42]

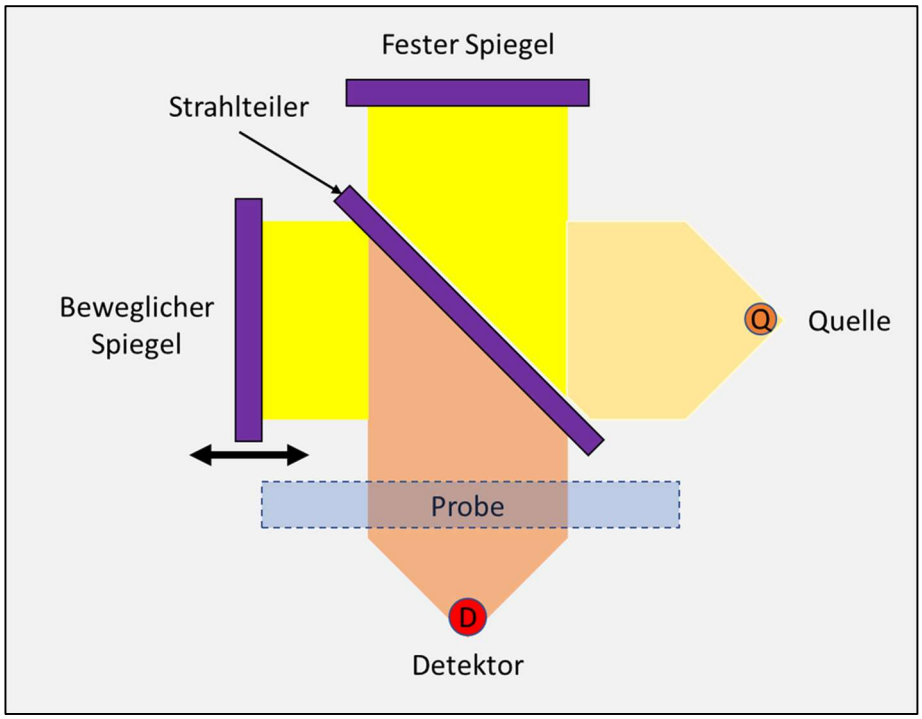


Abbildung 8: Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer

[40] Bruker Corporation 2021.
[41] Dr. Ralf Arnold.
[42] Kiehl und Trenberth 1997.

5.2.1 Messgerät Gasmet DX4015

Das Gerät Gasmet DX4015 ist ein bewegliches Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer mit beheizbarer Messzelle. Der Analysator bietet ein breites Arbeitsspektrum und liefert so für die verschiedensten Anwendungen sehr gute Ergebnisse bei der Gasanalyse. So kann das Gasmet DX4015 für verschiedenste Tracergasmessungen eingesetzt werden und durch die Portabilität können Messungen an verschiedenen Standorten durchgeführt werden. Ebenfalls kann das Gerät auch bei feuchten oder korrosiven Gasen eingesetzt werden. Die Messzelle kann auf bis zu 50°C beheizt werden und wird typischerweise bei Messungen hinsichtlich der Arbeitssicherheit und bei Feuerwehreinsätzen eingesetzt. Die Kalibrierung des Gasmet DX4015 ist einfach, da jeweils nur die Spektren von Einzelkomponenten verwendet werden und keine Gemische. Durch die einfache Umstellung auf neue Gasgemische ist es sehr anwenderfreundlich, wobei die Software spektrale Überlagerungen automatisch kompensiert. Das für die folgenden Messungen im Einsatz gestandene Gasmet DX4015 ist in der Abbildung 9 ersichtlich. [43]

Dem Anhang E liegt eine Übersicht über die technischen Daten des Gasmet DX4015 bei.

Abbildung 9: Messgerät Gasmet DX4015

[43] Gasmet Technologies GmbH 2019.

5.3 Messprinzip nichtdispersiver Infrarotsensor (NDIR)

Das Messprinzip des nichtdispersiven Infrarotsensores, abgekürzt NDIR, wird für die Erhebung der Konzentration von verschiedensten Gasen eingesetzt. Im Unterschied zum zuvor behandelten FTIR-Spektrometer arbeitet der nichtdispersive Infrarotsensor ohne eine feingliedrige Zerlegung von infrarotem Licht. Das zu analysierende Gas wird für die Messung in die Probenkammer, die Glasküvette, gepumpt. Daraufhin wird die Konzentration des gesuchten Gases elektro-optisch über das Ausmass der Absorption einer spezifischen Wellenlänge im Infrarot Spektrum gemessen. Da die Wellenlänge zuvor definiert werden muss, können nur die Gase eben jener Wellenläge analysiert werden. Dabei durchstrahlt das Licht der Infrarot-Quelle das in der Prüfkammer befindliche Gas sowie den Filter und trifft zum Schluss auf den Infrarot-Sensor. Der Filter hat die Aufgabe aus dem Spektrum der Lichtquelle nur ein sehr schmales Spektrum durchzulassen. Idealerweise sollten im Gasgemisch der Probe keine anderen der enthaltenen Gase das Licht in der Wellenlänge des gesuchten Gases absorbieren. Da jedoch viele Gase im Bereich der Infrarotstrahlung absorbieren, müssen je nach Anwendung Kompensationen einbezogen werden. Ein einfaches Beispiel hierzu sind die zwei Gase CO_2 und H_20, welche beide ähnliche Frequenzen absorbieren. Aus diesem Grund wird bei den Messungen an der Hochschule Luzern ein Gaskühler vorgeschaltet, welcher das Wasser (H_2O) durch Auskondensieren vom zu messenden Gas trennt. Der Glasküvette mit dem Messgas steht eine baugleiche Küvette mit Referenzgas gegenüber. Über die Differenz der beiden Glasküvetten errechnet sich die Konzentration des gesuchten Gases.[44] [45]

In der Abbildung 10 ist beispielhaft der Aufbau eines nichtdispersiven Infrarotsensores dargestellt.

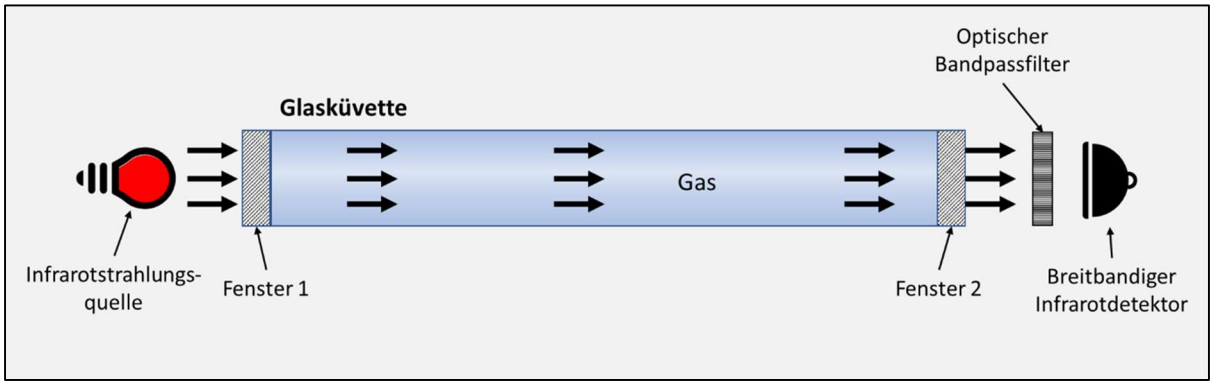


Abbildung 10: Nichtdispersives Infrarot-Spektrometer

[44] Stephan Schmidt 2003.
[45] Emerson Electric Co 2021.

5.3.1 Messgerät Emerson Rosemount MLT4

Das Messgerät Emerson Rosemount (NGA 2000) MLT4 ist ein der obigen Beschreibung entsprechendes NDIR-Spektrometer. Durch den kompakten Aufbau des Gerätes ist es, wie auch das Gasmet DX4015, sehr mobil und kann somit an verschiedenen Standorten aufgebaut und eingesetzt werden. Durch die im Gerät eingebauten Filter können beim MLT4 gleichzeitig vier verschiedene Gase eingestellt und gemessen werden. Die von der Hochschule Luzern gewählten Gase sind die weitverbreiteten Tracergase CO_2, SF_6, N_2O und R152. Durch Abklärungen und Tests der Hochschule Luzern wurde vorgängig festgestellt, dass die beiden Gase R152 und HFO-1234yf mit demselben Filter gemessen werden können.

Da bei den Vorbereitungsarbeiten und bei der Durchführung der Messversuche Fehlverhalten in der Auswertung der Messungen aus dem MLT4 beobachtet wurden, konnte das Gerät bei den in dieser Arbeit gemachten Messversuchen nicht eingesetzt werden. Da das Gasanalysegeräte in der Abbildung 11 allerdings auf diese Initiative hin instand gestellt wurde und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in Betrieb genommen werden konnte, wird es an dieser Stelle trotzdem erwähnt.

Dem Anhang E liegt eine Übersicht über die technischen Daten des Emerson Rosemount MLT4 bei.

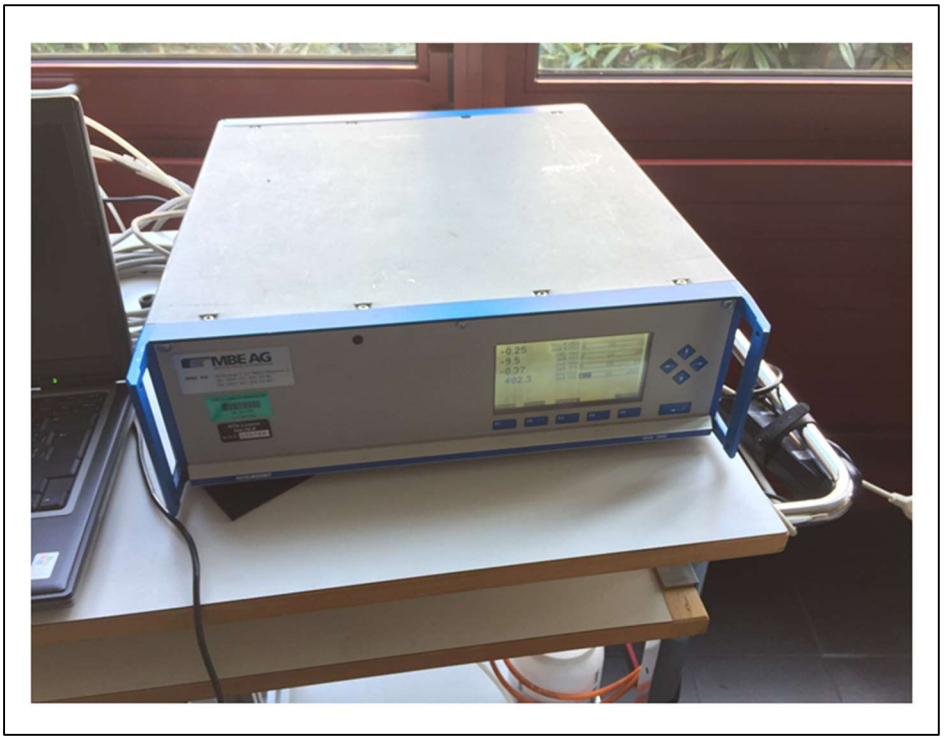


Abbildung 11: Messgerät Emerson Rosemount MLT4

5.4 Dosierventile

Die genaue Dosierung der Tracergase bedingt den Einsatz von präzisen Dosierventilen. Die bei den folgenden Messversuchen eingesetzten Ventile werden bereits in den unterschiedlichsten Branchen und Märkten zur Massendurchfluss-Messung und -Regelung eingesetzt. Da die Auswertung der Durchflussmessung aufgrund der computergestützten Ansteuerung auf einfache Weise exportiert werden kann, bildet dies eine ideale Voraussetzung für die Anwendung der Pulsmethode. Bei den folgenden Messungen wurde auf die Dosierventile von Bronkhorst zurückgegriffen, welche die Hochschule Luzern bereits am WRG-Prüfstand im Einsatz hat.

Abbildung 12: Dosierventil EL-FLOW Select Bronkhorst

Die beiden Ventile, welche für die Messungen benutzt wurden, sind in der Tabelle 5 genauer beschrieben. Beide sind auf das Tracergas SF_6 kalibriert. Für die Anwendung von alternativen Gasen, wie im vorliegenden Fall HFO-1234yf, kann aber gem. Abklärungen mit der Herstellerfirma ein Umrechnungsfaktor herbeigezogen werden. Die Umrechnung ist dem Anhang E zu entnehmen.

Tabelle 5: Technische Daten Dosierventile Bronkhorst

Beschreibung	**Dosierventil 1**	**Dosierventil 2**
Modellnummer	F-201CV-2K0-AAD-44-E	F-201CV-5K0-AAD-44-E
Seriennummer	142221219002H02903	082781219002G2085
Gas-Konfiguration	SF_6	SF_6
Umrechnungsfaktor auf HFO	0.9 g_{HFO}/g_{SF6}	
Druckstufe	64 bar	64 bar
Max. Durchfluss	0.07g/s	0.11g/s
Kommunikation (1/0)	RS232 + analog (n/c Control)	RS232 + analog (n/c Control)
Ausgang/Sollwert (analog)	0...5 Vdc	0...5 Vdc
Versorgungsspannung	15...24Vdc	15...24Vdc
Prozessanschlüsse (Ein/Aus)	2x12mm Klemmenringverschraubung	2x12mm Klemmenringverschraubung

[46]

[46] Bronkhorst High-Tech B.V. 2021.

5.4.1 Messprinzip Dosierventil

Das Herzstück des thermischen Massendurchflussreglers ist sein Sensor, welcher aus einem dünnen, zusätzlich zum eigentlichen Durchflusselement ausgebildeten, Edelstahlrohr mit thermischen Widerstandselementen besteht. Ein Teil des Gasstromes fliesst durch diesen Bypass-Sensor und wird über die zwei Heizelemente (Heizung 1 & 2) erwärmt. Die Temperaturen T1 & T2 beginnen bei Gasdurchfluss auseinander zu driften. Dies erfolgt durch den Wärmetransfer an das Gas. Die Temperaturdifferenz ist direkt proportional zum Massendurchfluss durch den Sensor. Im Hauptkanal ist ein von Bronkhorst patentiertes Laminar-Durchfluss-Element, zusammengesetzt aus Edelstahlscheiben mit präzisionsgeätzten Durchflusskanälchen, eingesetzt. Durch die perfekte Teilung zwischen dem Haupt- und Nebenstrom im laminaren Strömungsbereich ist das Sensorsignal proportional zum totalen Massendurchfluss, welcher so berechnet werden kann. Die Abbildung 13 zeigt den Aufbau der Ventile schematisch. [47]

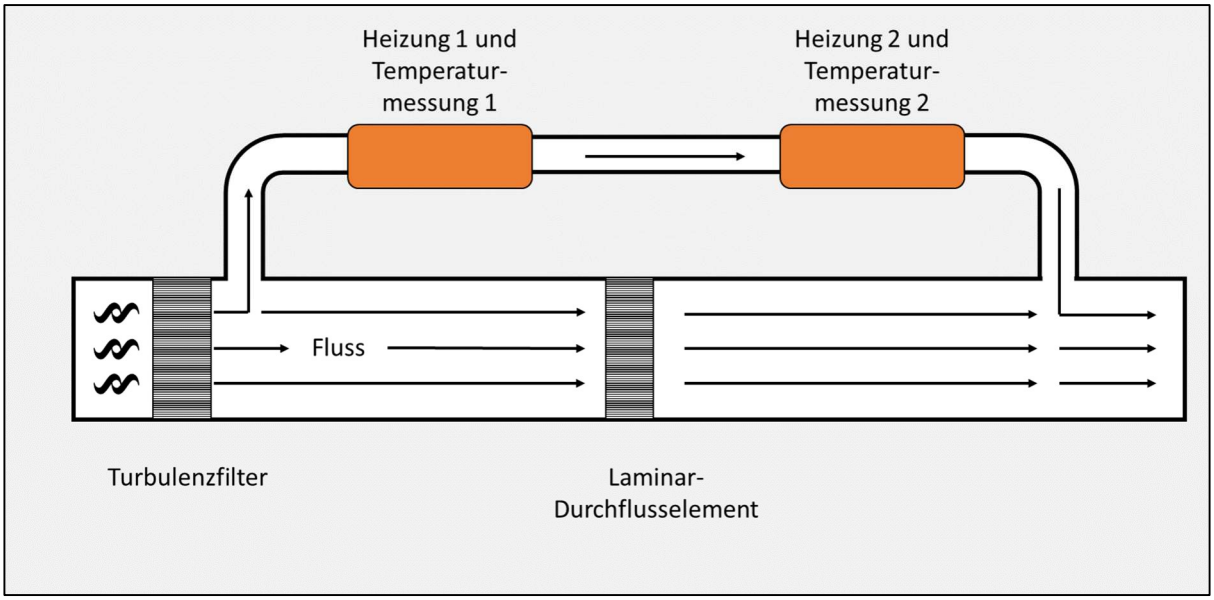


Abbildung 13: Messprinzip Dosierventil Bronkhorst

[47] Bronkhorst High-Tech B.V. 2021.

6 Messungen «kleiner Raum» / Klimakammer

In diesem Kapitel werden die ersten Messungen mit Tracergas und Rauch in der Klimakammer der Hochschule Luzern in Horw beschrieben. Die Klimakammer stellt eine Laborumgebung dar. Das wichtigste Ziel dieser Versuchsreihe war das Kennenlernen und Anwenden der Arbeitsmittel, um Rückschlüsse für die Planung der weiteren Messreihen ziehen zu können. Ergänzend zu den hier gekürzten Ausführungen kann der vollständige Laborbericht dem Anhang B entnommen werden.

6.1 Messaufbau und Ablauf «kleiner Raum» / Klimakammer

Die erste Messung fand in der Klimakammer der Hochschule Luzern Technik und Architektur in Horw am Donnerstag, den 11. März 2021 statt. In der 91m^3 grossen Klimakammer wurde mit dem GASERA ONE als Gasanalysegerät eine Konstantdosierung mit den Tracergasen SF_6 und HFO-1234yf parallel durchgeführt. Während der Messungen befanden sich zwei Personen in der Mitte des Raumes, welche sich dort als Wärmelasten bemerkbar machen. Das GASERA ONE wurde mit 6 Messpunkten (Inlets) betrieben, welche an drei verschiedenen Standorten im Raum auf jeweils zwei unterschiedlichen Höhen die Tracergaskonzentrationen gemessen haben. Die genauen Aufstellung ist dem Übersichtsplan im Anhang B zu entnehmen. Weiter wurden Datenlogger für die Messung der Temperatur, der rel. Feuchte und der CO_2-Konzentration an verschiedenen Standorten, korrespondierend mit den Tracergasmessstellen aufgestellt. Deren Daten sind ebenfalls dem Anhang B, als Teil des Laborberichtes, zu entnehmen.

Die Lüftungsanlage der Klimakammer wurde für den Messversuch nicht in Betrieb genommen. Die Eingangstüre zur Klimakammer wurde zur Simulation einer Fensterlüftung genutzt.

Eine Besonderheit der Klimakammer stellt die Möglichkeit zur Temperierung der Wandoberflächen dar. So können Raumsituationen mit wärmeren oder kälteren Nachbarräumen oder Aussenwände simuliert werden. Für die vorliegenden Messungen wurden die Oberflächen gemäss der Tabelle 6 temperiert, was eine leicht überspitzte Situation eines kleinen Wohnzimmers mit einer wärmeren Innenwand und eine kälteren, schlecht gedämmten Aussenwand simulieren soll.

Tabelle 6: Einstellungen Temperatur der Klimakammer

Bauteil (Ausrichtung)	**Einstellwert Temperatur [°C]**	**Messwert Temperatur [°C]**	**Gemessene maximal Abweichung [K]**
Wand Nord	10	11.0 - 11.3	+1.3
Wand Ost	21	20.0	-1.0
Wand Süd	30	29.3	-0.7
Wand West	21	20.2 - 21.4	-0.8 / +0.4
Boden		21.5	
Decke		23.3	

Die beiden Tracergase SF_6 und HFO-1234yf wurden mit jeweils 5g/s über das direkt am Ventil aufgebaute Bedienelement konstant in den Raum eindosiert. Beide Dosierstellen wurden in der Mitte des Raumes auf dem Tisch platziert, welcher auch in der Abbildung 14 des Aufbaus zu sehen ist. Da sich bei Beginn der Messung ein Leck in der SF_6 Leitung befand, musste dieses zunächst behoben und der Raum wieder ausgelüftet werden. Daraufhin konnte die Konstantdosierung gestartet werden. Es wurde über einen Zeitraum von insgesamt 65 Minuten aufdosiert. Nach 40 Minuten Dosierung wurde die Türe geöffnet, um eine Fensterlüftung zu simulieren und den stattfindenden Abtrag der Tracergase beobachten zu können. Während der letzten 25 Minuten mit anhaltender Dosierung konnte eine Abklingkurve hin zu einem Gleichgewichtszustand festgehalten werden. Der Gleichgewichtszustand konnte jedoch aufgrund zeitlich eingeschränkter Nutzbarkeit der Klimakammer nicht gänzlich erreicht werden. Anschliessend wurde die Dosierung gestoppt und mit Hilfe der Abklingformel wurde der spezifische Volumenstrom bestimmt. Während der Messung des Abklingverhaltens fanden gleichzeitig die Rauchversuche zur optischen Verifizierung der Tracergasmessungen statt.

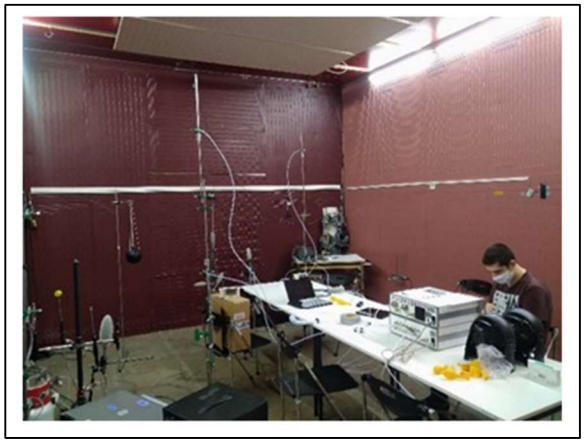


Abbildung 14: Klimakammer

6.2 Resultate Messungen «kleiner Raum» / Laborumgebung

Erkenntnisse Konstantdosierung

Der zeitliche Verlauf der gemessenen Tracergaskonzentrationen an den 6 Messpunkten ist den folgenden Abbildungen 15 und 16 zu entnehmen. Die Abbildungen sind jeweils mit den Zeitpunkten der einzelnen Umstellungsschritte ergänzt. Auffallend ist, dass bei der Messung mit SF_6 ein extrem hoher Peak von 56 ppm erreicht wird. Die Ursache hierfür ist die bereits erwähnte Leckage in der Dosierleitung des Tracergases. Der Wert ist daher für die folgenden Betrachtungen irrelevant. Anhand der Abklingkurve konnte ein Luftwechsel zwischen 2 und 3 h^{-1} ermittelt werden (Durchschnitt über die Betrachtungsperiode: 2.649 h^{-1}). Bei einem Raumvolumen von 91m^3 ergibt das jeweils einen Zu- & Abluft-Volumenstrom durch die Türöffnung von ca. 240 m^3/h. Im Vergleich der beiden Tracergase ist ersichtlich, dass sich beide Gase im Raum fast identisch verhalten. Dies ist durch den gemeinsamen Anstieg und der gut übereinstimmenden Abklingkurve ersichtlich. Aufgrund der Tatsache, dass die Tracergas-Konzentrationen an sämtlichen Messstellen jeweils nach kurzer Zeit vergleichbar wurden und sich keine einzelnen Peaks ermitteln liessen, kann von einer guten Durchmischung der Raumluft in diesem Test-Setup ausgegangen werden. Dies ist nicht zuletzt den geringen räumlichen Abmessungen der Klimakammer geschuldet, aber natürlich auch der Temperierung der Wandoberflächen.

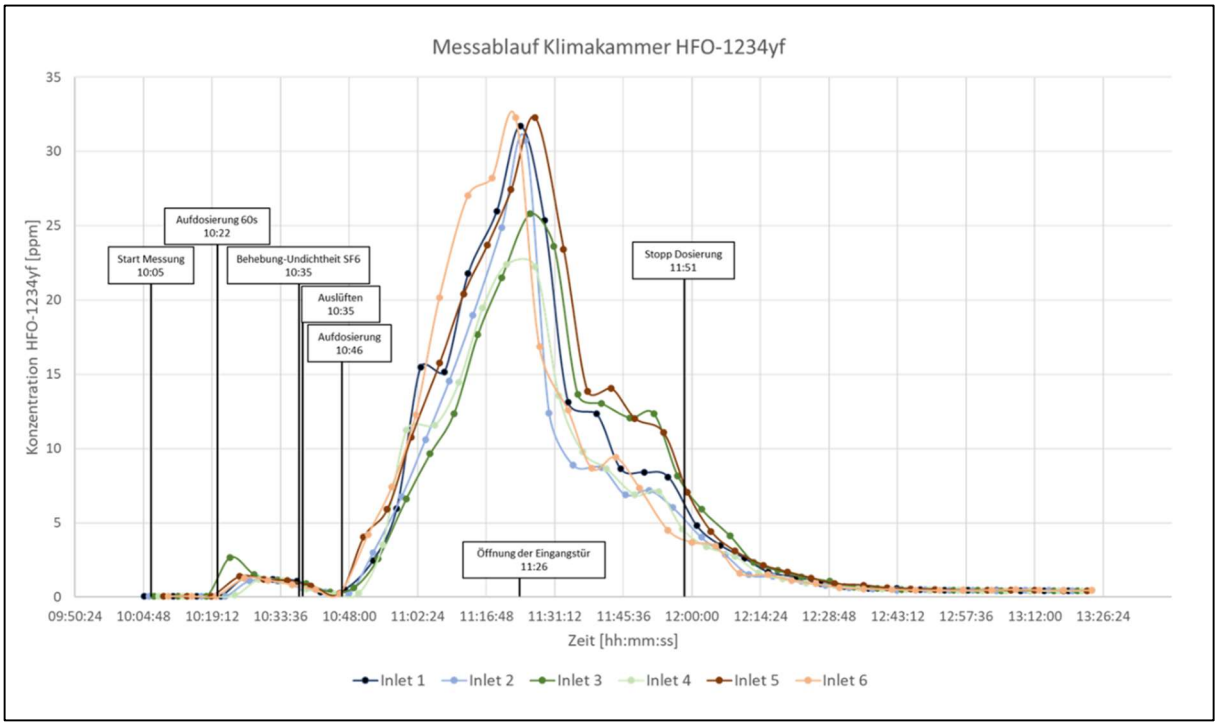


Abbildung 15: Messablauf Klimakammer HFO-1234yf

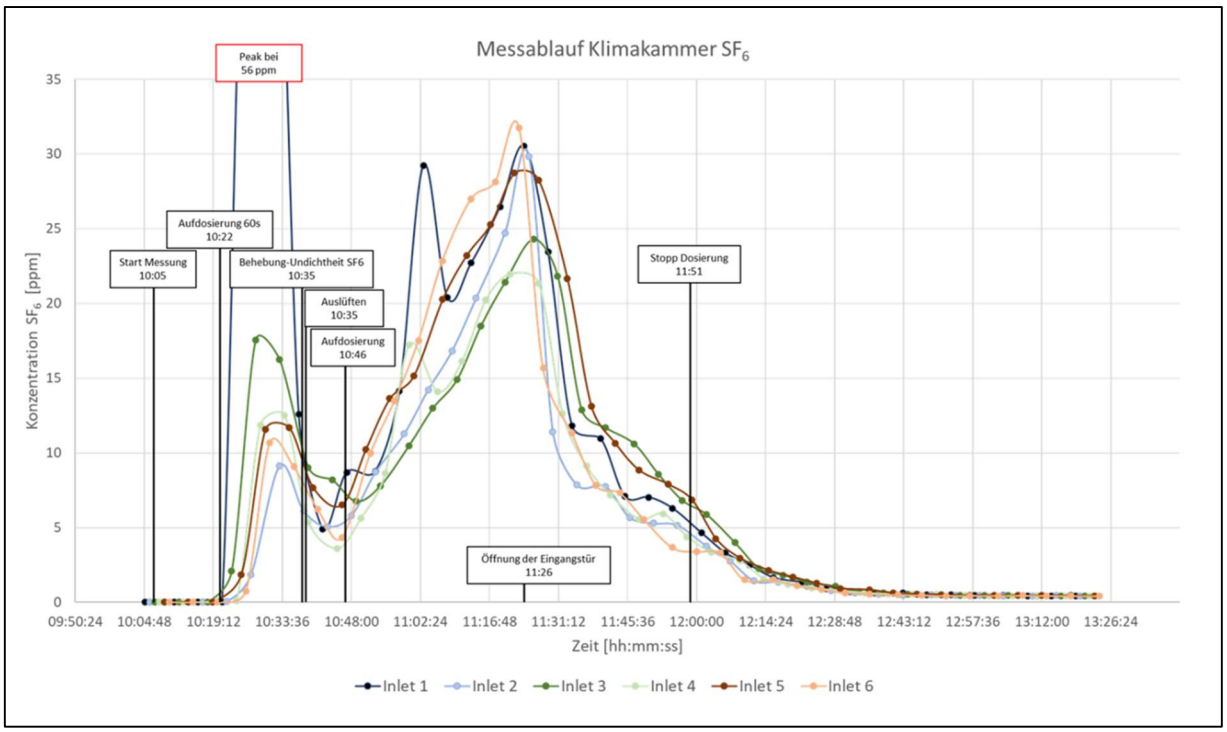


Abbildung 16: Messablauf Klimakammer SF_6

Erkenntnisse Rauchversuche

Die Strömung im 3.36 Meter hohen Raum ist durch die thermischen Randbedingungen gegeben. In der Abbildung 17 zeigt sich, dass die Luft, bedingt durch die im Raum stattfindende Erwärmung durch Apparate und Personen, zur Decke steigt. In der Abbildung 18 ist ersichtlich, dass sich im Raum eine Walze bildet, welche die warme Luft an der Decke entlang zur kalten Wand führt. An dieser kühlt die Luft ab und gelangt über den Boden zurück zur warmen Süd-Wand. Dort wird diese wieder erwärmt und steigt an die Decke. Dieser Zyklus, welcher im Versuch mit Hilfe der einstellbaren Wandtemperaturen erreicht wurde, ist, wie bereits erwähnt, der realen Situation einer Raumluftwalze mit einer kälteren Aussenwand im Winter nachempfunden. Die thermischen Verhältnisse sind sowohl im Anhang im vollständigen Laborbericht als auch in der Beilage über Wärmebildaufnahmen dokumentiert.

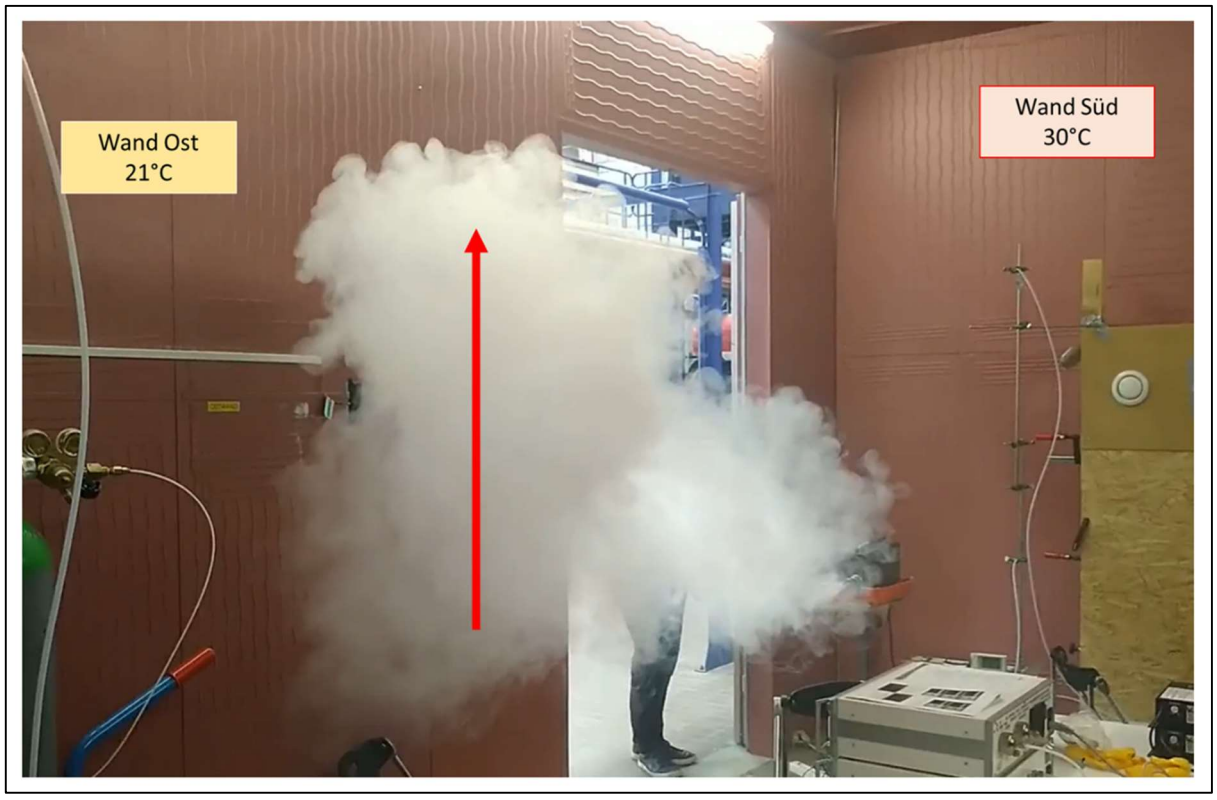


Abbildung 17: Rauchversuch Auftriebsströmung

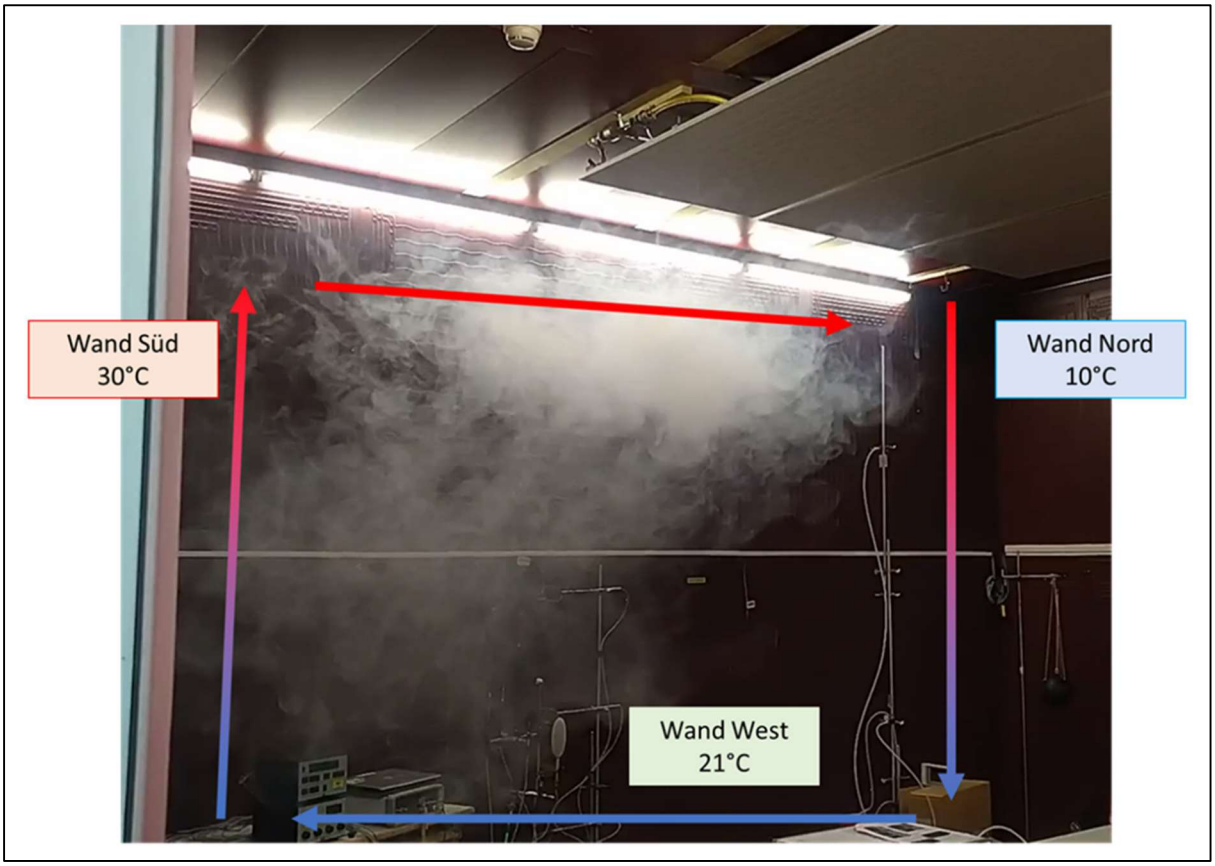


Abbildung 18: Rauchversuch Raumluftwalze

Erkenntnisse Raumluftströmung

Die Raumluftwalze konnte wie erwartet mittels Rauchversuchen ermittelt und visualisiert werden. Dieser Umstand konnte mit der Tracergasmessung allerdings aufgrund der grossen zeitlichen Verzögerung zwischen den einzelnen Messzyklen des GASERA ONE nur bedingt wieder abgebildet werden. Jedoch zeigt sich, dass der Messpunkt 6, welcher nach der Dosierung anhand der Raumluftwalze den nächsten Messpunkt darstellt, sowohl bei der Aufdosierung wie auch bei der Abklingkurve die Veränderung als erstes durchmacht, was dafürspricht, dass sich die mit Tracergas versetzte Luft mit der Raumluftwalze fortbewegt. Die Durchmischung setzt anschliessend allerdings rasch ein.

Nach dem Öffnen der Tür nimmt die Konzentration beider Tracergase an den oben (+2.20m ab Boden) angebrachten Messpunkten schneller ab als an den unten (+1.00m ab Boden) angebrachten. Dies kann damit begründet werden, da ausserhalb der Klimakammer (in der Laborhalle) eine höhere Temperatur herrschte als in der Klimakammer (ca. 2K Temperaturdifferenz). Somit strömte beim Öffnen der Türe und kurz danach die Luft aus dem Labor in den oberen Teil der Klimakammer ein. Die Luft der Klimakammer wurde somit im unteren Bereich der Türe hinausgedrückt. Diese Situation schwächte sich mit fortschreitender Zeit und sich angeleichenden Temperaturen zwischen Innen und Aussen ab.

Die Lüftungswirksamkeit der simulierten Fensterlüftung mit einem ca. 2.6-fachen Luftwechsel stellt für diesen Raum mit den angetroffenen Bedingungen (Aussentemperatur praktisch identisch mit Innentemperatur) einen sehr guten Wert dar. Zu erklären ist dies vordergründig mit dem hohen lichten Öffnungsmass der Türe von 2.60m.

7 Messungen «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer

In diesem Kapitel wird die zweite Messreihe mit Tracergas und Rauch im Suissetec-Schulzimmer an der Baselstrasse 61 in Luzern beschrieben. Das Schulzimmer stellt eine Realsituation dar und die Ziele dieser Messungen sind vielfältig. So wird der mögliche Erkenntnisgewinn aufgrund des Einsatzes zweier verschiedener Tracergase geprüft sowie die Möglichkeiten der Pulsmethode untersucht. Ergänzend zu den hier gekürzten Ausführungen kann der vollständige Laborbericht dem Anhang C entnommen werden.

7.1 Messaufbau und Ablauf «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer

Die zweite Messreihe fand im Schulzimmer der Suissetec an der Baselstrasse am 12. März 2021 statt. Über die gesamte Messzeit befanden sich vier Personen im Raum, welcher in der Abbildung 19 ersichtlich ist. Zur Erschaffung einer Realsituation wurden zudem Dummies im Raum platziert, welche zusätzliche Wärmequellen darstellen. In diesem rund 124m^2 grossen und ca. 2.6 Meter hohen Raum im 3. Obergeschoss des Suissetec-Bildungszentrum Zentralschweiz wird mit einer maschinellen Zu- und Abluftanlage eine Mischlüftung betrieben. Die Lufteinführung erfolgt über Linear-Deckendiffusoren, welche im hinteren Teil des Raumes an der Decke positioniert sind.

Abbildung 19: Suissetec-Schulzimmer

Die Abluft wird mit Diffusionsgittern bei den Präsentationsbildschirmen über die ganze Breite oberhalb der Zwischendecke gefasst. Die Zwischendecke ist seitlich jeweils nicht gänzlich an die Wände gezogen. Für die Kühlung im Sommer sind zwei 4-Wege-Deckenumluftkühlgeräte installiert. Zusätzlich ist der Raum mit öffenbaren Fenstern ausgestattet. Wegen einer kurz zuvor stattgefundenen Messung mit Umluftreinigungsgeräten waren davon ebenfalls zwei Stück im Raum aufgestellt. Die Filter beeinträchtigen die Tracergase allerdings nicht und so sind diese Umluftreinigungsgeräte lediglich als Umluftventilatoren zur Luftverwirbelung zu betrachten. Die Tracergase wurden mit dem GASERA ONE und dem Multipoint-Sampler an drei bis fünf (je nach Messversuch) verschiedenen Messstandorten gemessen. Die genauen Standorte und der Ablauf sind dem Anhang C zu entnehmen. Über die gesamte Messzeit wurden fünf Pulse eingegeben, vier dieser Puls wurden im Raum aufgegeben, der fünfte Puls in der Zuluftleitung. Die Beschreibungen der Pulse und der dabei herrschenden Raumbedingungen sind in der Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: Pulsdosierungen Suissetec-Schulzimmer

Dosierung	Beschreibung
Puls 1 Ca. 14:15	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF_6 / HFO-1234yf jeweils 50g/s während 13 Sekunden im Raum, 3 Messpunkte (inkl. Messung der Verteilung), ohne Lüftung; Fenster geschlossen; ohne Umluftreinigungsgeräte, ohne ULK's
Puls 2 Ca. 15:10	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF_6 / HFO-1234yf jeweils 50g/s während 13 Sekunden im Raum, 3 Messpunkte (inkl. Messung der Verteilung), ohne Lüftung; Fenster geschlossen; **mit Umluftreinigungsgeräten**, **mit ULK's**
Puls 3 Ca. 16:15	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF_6 / HFO-1234yf jeweils 70g/s während 13 Sekunden im Raum, 3 Messpunkte (inkl. Messung der Verteilung), **mit Lüftung**; Fenster geschlossen; ohne Umluftreinigungsgeräte, ohne ULK's
Puls 4 Ca. 17:15	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF_6 / HFO-1234yf jeweils 70g/s während 13 Sekunden im Raum, 4 Messpunkte (inkl. Messung der Verteilung), **mit Lüftung***; Fenster geschlossen; ohne Umluftreinigungsgeräte, ohne ULK's *Die Lüftungsanlage wurde aufgrund Automatik-Vorgabe um 18:00 Uhr automatisch ausgeschalten und erst um 18:25 wieder auf der vorangegangenen Stufe in Betrieb genommen.
Puls 5 Ca. 18:40	Pulsdosierung Tracergas gleichzeitig SF_6 / HFO-1234yf jeweils 70g/s während 120 Sekunden in der Zuluftleitung, 5 Messpunkte (inkl. Messung der Verteilung), **mit Lüftung**; Fenster geschlossen; ohne Umluftreinigungsgeräte, ohne ULK's

Über die gesamte Zeit wurden die Temperaturen, die rel. Feuchte und die CO_2-Konzentration parallel zu den Tracergasversuchen mit Datenloggern gemessen und dokumentiert. Die Daten sind dem Anhang C als Teil des Laborberichtes zu entnehmen. Wie in der Beschreibung oben ersichtlich, erfolgte nach den ersten drei Pulsaufgaben eine Erweiterung des Mess-Setups um eine zusätzliche Messstelle in der Abluft. Zuvor waren lediglich drei Messpunkte im Raum aufgestellt. Für die letzte Pulsaufgabe wurde ein fünfter Messpunkt in der Zuluftleitung platziert.

Die Pulsaufgabe erfolgte jeweils von Hand über das auf den Dosierventilen aufgebaute Bediengerät. Eine allfällige Unsicherheit ergibt sich somit hinsichtlich der exakten Dauer der Dosierung. Gerade bei den kürzeren, nur 13 Sekunden andauernden Pulsen ist die Unsicherheit deshalb gross. Für den längeren Puls von 120 Sekunden fällt der Einfluss entsprechend viel geringer aus.

7.2 Resultate Messungen «mittlerer Raum» / Suissetec-Schulzimmer

Erkenntnisse Pulse 1-3

Die Messungen mit SF_6 und HFO-1234yf haben ergeben, dass sich der Puls an der Messstelle am nächsten zum Einlass durch einen grossen Peak jeweils zuerst bemerkbar macht. Aufgrund der Messzeit von ca. einer Minute pro Messpunkt und einer dadurch theoretischen Verzögerung von bis zu drei Minuten ist die Höhe des Peaks jedoch wenig aussagekräftig. Die stark abweichenden Werte zu Beginn der jeweiligen Messungen suggerieren, dass der reale Peak (deutlich) höher liegt, als dies mit dem Messaufbau detektiert werden konnte. Vielmehr sind in diesem Zusammenhang die qualitativen Aussagen in Bezug auf die unterschiedlichen Anstiegs-, respektive Abkling-Kurven von Bedeutung. Mit diesen können essenzielle Aussagen hinsichtlich der Raumluftdynamik gemacht werden. Es zeigt sich, wie sich Schadstoffe ab einem gewissen Punkt im Raum ausbreiten.

Bei den ersten beiden Impulsen 1 & 2 ist der Einfluss der Umluftkühlgeräte und der Umluftreinigungsgeräte deutlich spürbar. Da diese Geräte das Tracergas nicht filtern, sondern mit der Raumluft zusammen lediglich «aufwirbeln» und vermischen, entsteht mit ihrer Hilfe eine homogenere Verteilung im Raum. Dies wird deutlich gemacht mit Hilfe des entstehenden Gleichgewichtszustandes an allen Messpunkten (Inlets) im Raum. Dieser tritt bei der ersten Pulsaufgabe erst nach ca. 30-40min ein. Bei der zweiten Pulsaufgabe ist er bereits nach 15-20min erreicht; eine zeitliche Halbierung also. Im Vergleich zwischen den beiden Eindosierstellen kann festgestellt werden, dass die Aufgabe in der Raummitte zu einer schnelleren Durchmischung führt als die Aufgabe beim Dozenten am Ende des Raumes. Verdeutlicht wird dies, da bei einem engeren Abstecken der Toleranzbandbreite für eine homogene Durchmischung bis zum Ende der Messung bei der Messstelle des Dozenten, wo das SF_6 eindosiert wurde, eine leicht erhöhte Konzentration gemessen wurde. Dies entspricht grundsätzlich den Erwartungen.

Bei der dritten Pulsaufgabe mit eingeschalteter Lüftungsanlage, zeigt sich, dass die Eindosierstelle der zentrale Einflussfaktor ist. Das SF_6 wurde beim Dozenten eindosiert, wo sich direkt oberhalb im Bereich der Zwischendecke die Abluftgitter befinden. Es ist ersichtlich, dass die Konzentration gegenüber den vorherigen Pulsen um einen Faktor von ca. 2 abgenommen hat, trotz Erhöhung der eindosierten Menge an Tracergas. Bei der Pulsaufgabe in der Raummitte mit dem HFO-1234yf ist dieser Einfluss weit weniger stark ausgeprägt. Hier ist die Anfangskonzentration vergleichbar mit den vorherigen beiden Pulsaufgaben. Weiter ist dann bei dieser Messung der Effekt der mechanischen Lüftungsanlage ersichtlich. Schadstoffe und somit auch die Tracergase werden stetig abtransportiert.

Die bereits angesprochene Unsicherheit hinsichtlich der eindosierten Menge an Tracergasen macht einen quantitativen Vergleich ab der Eindosierstelle schwierig. Zudem ist es aufgrund der Messdauer pro Messstelle über das GASERA ONE ebenfalls unmöglich, den realen Peak zu ermitteln. Klar gezeigt wird dies bei der dritten Pulsaufgabe mit dem HFO-1234yf. Hier lag der gemessene Peak bei 12ppm

gegenüber den sonstigen Spitzenwerten von 1 – 2ppm. Dies deutet klar darauf hin, dass der reale Peak, der am Messpunkt vorbeiströmt, deutlich höher liegt, als gemessen wurde, da der eigentliche Peak durch die längeren Messintervalle schlicht verpasst wurde. (Gestützt wird diese Aussage auch durch die späteren Messungen im HSLU-Schulzimmer.)

Nicht zuletzt kann beobachtet werden, dass sich sowohl das HFO-1234yf, eindosiert in der Mitte des Raumes, wie auch das SF_6, eindosiert beim Dozenten, unabhängig vom Betrieb der Lüftungsanlage auch in den hinteren Teil des Raumes ausbreitet. Die Messwerte der beiden Messstellen in der Raummitte und im hinteren Teil des Raumes verlaufen beinahe identisch. Dies ist insbesondere daher interessant, da der Zuluft mit der Einführung über Lineardeckendiffusoren und der Absaugstelle beim Dozenten eigentlich eine gerichtete Strömung aufgezwungen werden soll.

Die Abbildungen 20 & 21 zeigen jeweils den Verlauf der gemessenen Konzentrationen an SF_6 und HFO-1234yf während den ersten drei Pulsen.

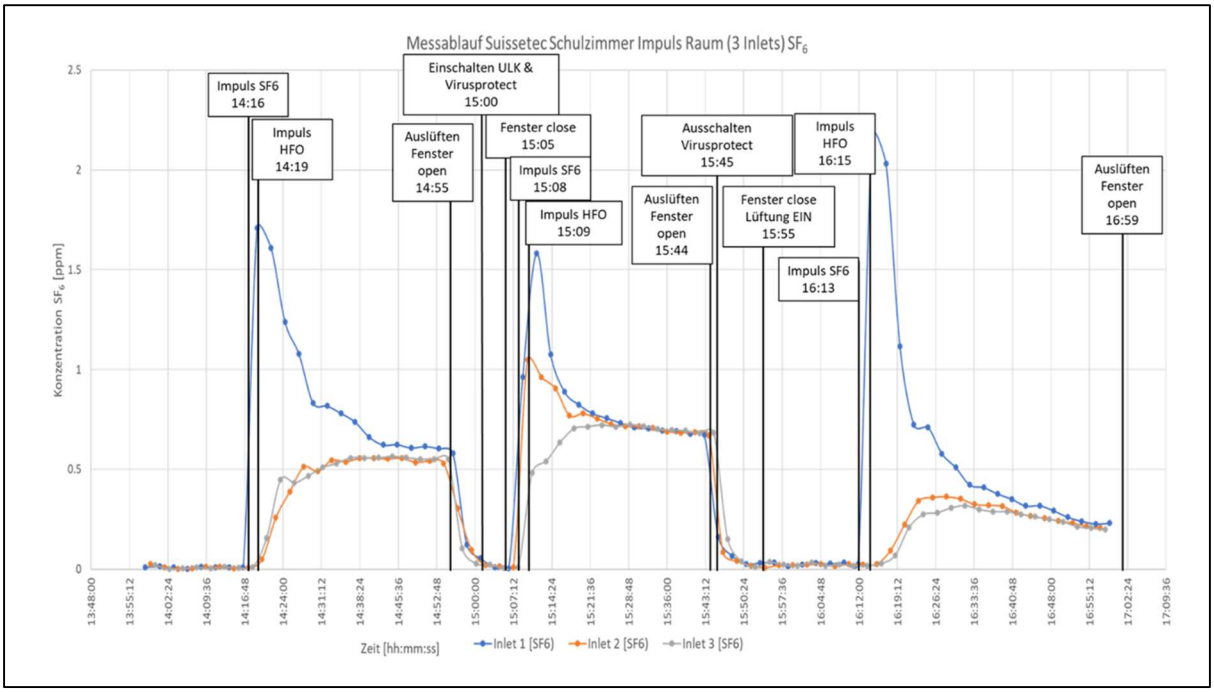


Abbildung 20: Messablauf Suissetec 3 Inlets SF_6

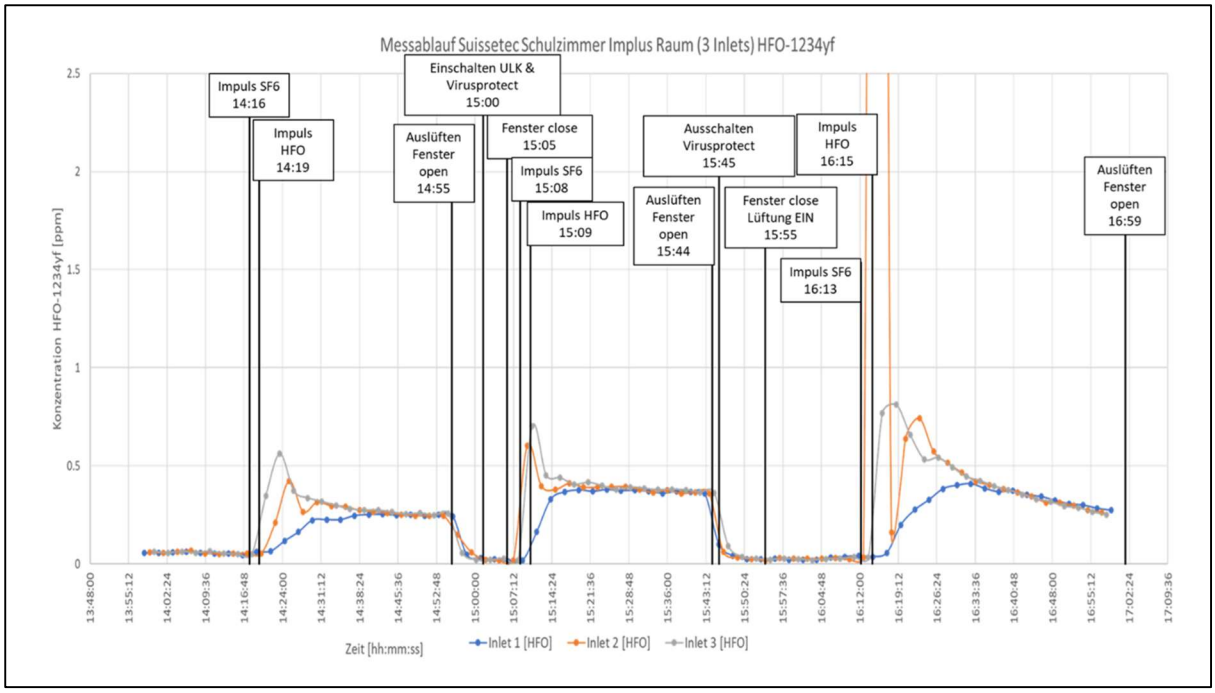


Abbildung 21: Messablauf Suissetec 3 Inlets HFO-1234yf

Erkenntnisse Puls 4

Die Resultate sind vergleichbar mit jenen aus dem Puls 3, da sich an den Randbedingungen nichts geändert hat. Zusätzlich wurde hier im Abluftkanal gemessen und es wird ersichtlich, dass sich die Konzentration im Abluftkanal jeweils an jene der Messstelle beim Dozenten anlehnt. So ist am Anfang der Messung mit dem beim Dozenten eindosierten SF_6 ein klarer Peak zu erkennen, wohingegen bei der Messung mit HFO-1234yf zunächst ein langsamerer Konzentrationsanstieg in der Abluft festzustellen ist.

Auch bei dieser Messung zeigt sich wieder deutlich, wie der eigentliche Peak meist vermutlich verpasst wird. So erreicht die Messung von SF_6 einen einmalig gemessenen Wert von knapp 10ppm, im Vergleich zu den restlichen Spitzenwerten von knapp 1ppm. Ob 10ppm der effektive Peak ist, oder ob zu einem Zeitpunkt eine gar noch höhere lokale Konzentration vorhanden ist, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen.

Eine homogene Verteilung des Tracergases in der Raumluft im Aufenthaltsbereich der Schüler ist nach rund zwölf Minuten erreicht. Bis sich allerdings eine komplett homogene Luftmasse im Raum einstellt, verstreichen rund 30 Minuten.

Der Effekt, den die Lüftungsanlage auf das System hat, ist durch den Zeitpunkt der automatischen Ausschaltung um 18:00 Uhr ersichtlich. Dies war im Versuch eigentlich nicht geplant und wurde festgestellt, als die Tracergase in der Raumluft nicht mehr weiter abklangen. In der Vergrösserung der Diagramme ist dieser Zustand besser ersichtlich. Ab 18:00 Uhr hat sich die Konzentration beider Tracergase eingependelt und sinkt nur noch sehr langsam; ähnlich zum ersten Puls dieser Messreihe. Die Abbildungen 22 und 23 zeigen den Verlauf als Diagramm.

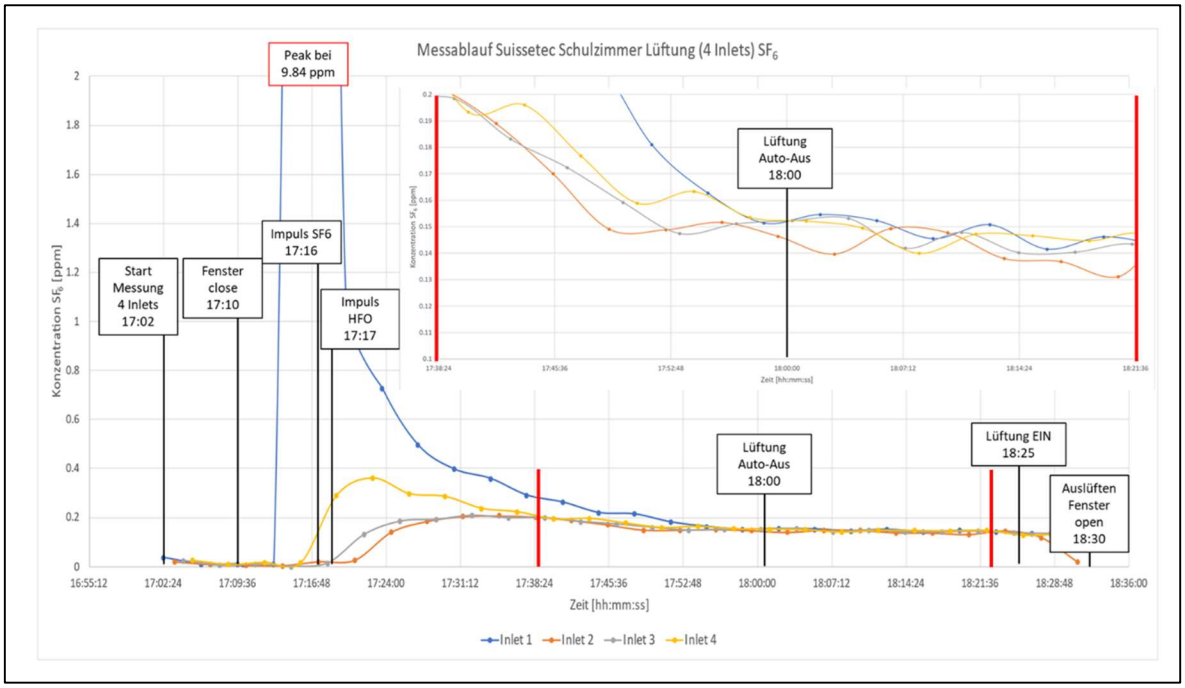


Abbildung 22: Messablauf Suissetec 4 Inlets SF_6

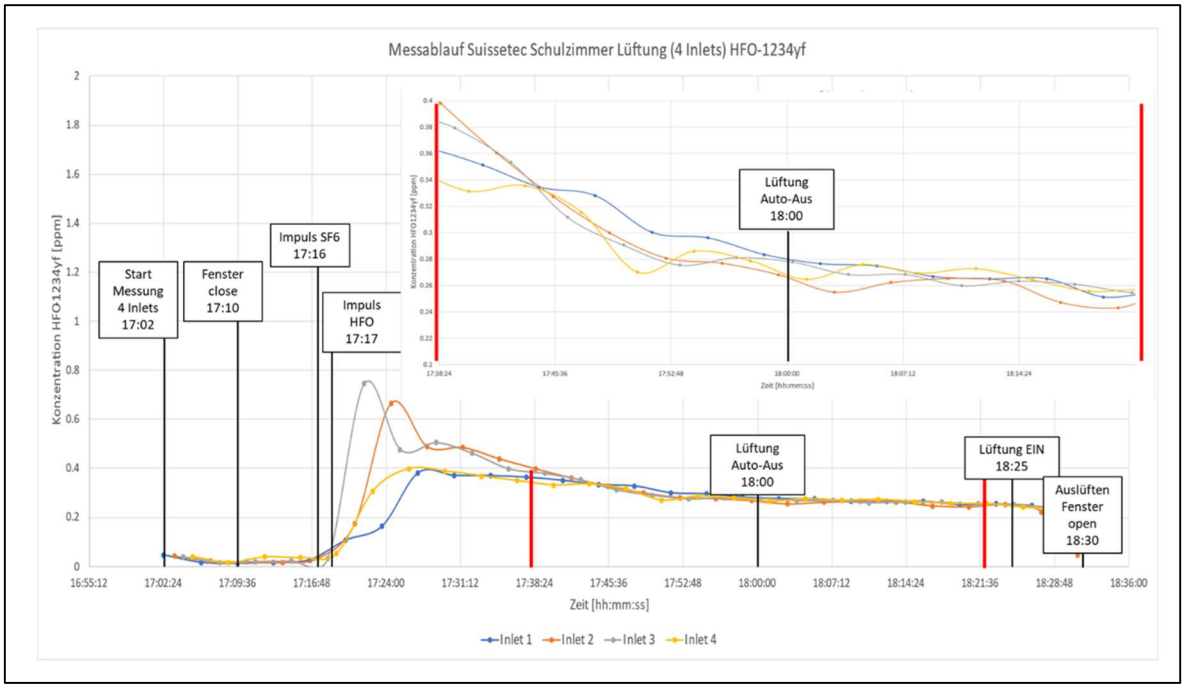


Abbildung 23: Messablauf Suissetec 4 Inlets HFO-1234yf

Erkenntnisse Puls 5

Die Messungen mit SF_6 und HFO-1234yf, jeweils parallel in der Zuluft, haben gezeigt, dass ein im Zuluftnetz aufgegebener Puls im Raum als solcher bemerkbar ist. Die Pulse kommen ähnlich einer Glockenkurve im Raum an und wechseln ihre Form dann beim Abtrag zu einer Abklingkurve. Dies ist der Lufteinführung geschuldet, die grundsätzlich nach dem Prinzip einer Mischlüftung funktioniert. (Bei einer reinen Verdrängungslüftung bleibt der Puls als reine Glockenkurve ersichtlich, was sich beispielsweise bei Messungen in Strassentunnels zeigt.)

Der grösste Peak im Raum wird bei der Messstelle 2 in der Raummitte gemessen. Dies lässt sich damit erklären, dass hier der grösste Anteil der Zuluft hingelangt. Somit sind die Bereiche im hinteren Teil des Zimmers, aber auch am Dozenten-Pult, weniger effizient mit Frischluft versorgt.

Weiter ist ersichtlich, dass kurz nach der Pulsaufgabe in der Zuluft, noch bevor ein Peak in der Raumluft festgestellt wird, der Spitzenwert an der Abluftmessstelle detektiert wird. Da dies bei beiden Tracergasen gleichermassen der Fall ist, wird diese Situation als Tatsache betrachtet und nicht als einzelner Ausreisser aufgrund des Messverfahrens.

Erklären lässt sich dies mit dem Coanda-Effekt. Die über Lineardeckendiffusoren im hinteren Bereich des Schulzimmers in den Raum eingeführte Luft haftet sich an der Decke fest und gelangt so nach vorne zur Abluftansaugung, bevor eine effiziente Durchmischung mit der Raumluft stattfinden kann. Der effektiv wirksame Luftvolumenstrom sinkt so um rund die Hälfte, wie in der Tabelle 8 dargestellt.

Nochmals bestätigt wird diese Beobachtung dadurch, da sich die Verhältnisse nach diesem ersten Peak umkehren und die Konzentration an Tracergasen in der Abluft stets geringfügig kleiner bleibt als in der Raumluft.

Durch die langsamen Messintervalle ist eine genaue Ermittlung der Geschwindigkeit, mit der sich der Puls fortbewegt, schwierig zu vollziehen. Gemäss den Messungen ist der Puls nach 3.5 Minuten im Abluftkanal erkennbar. Dies ist gleichzeitig auch der Zeitraum, der benötigt wird, bis die nächste Messung in der Abluft am Messgerät erfolgte. Die Zeit, welche von der Zuluft bis zur Spitze des Inlet 2 in der Raummitte benötigt wird, beträgt beim SF_6 ca. acht Minuten und beim HFO-1234yf rund fünf Minuten.

Tabelle 8: Spezifischer Luftvolumenstrom GASERA ONE - Standorte Suissetec-Schulzimmer

Tracergas	Inlet 1	Inlet 2	Inlet 3	Inlet 4	Durchschnitt	KVR-Einstellung
SF_6	440.2 m^3/h	467.4 m^3/h	467.0 m^3/h	453.2 m^3/h	**457.7 m^3/h**	**800 m^3/h**
HFO	392.5 m^3/h	422.4 m^3/h	446.3 m^3/h	414.8 m^3/h	**419.0 m^3/h**	**800 m^3/h**

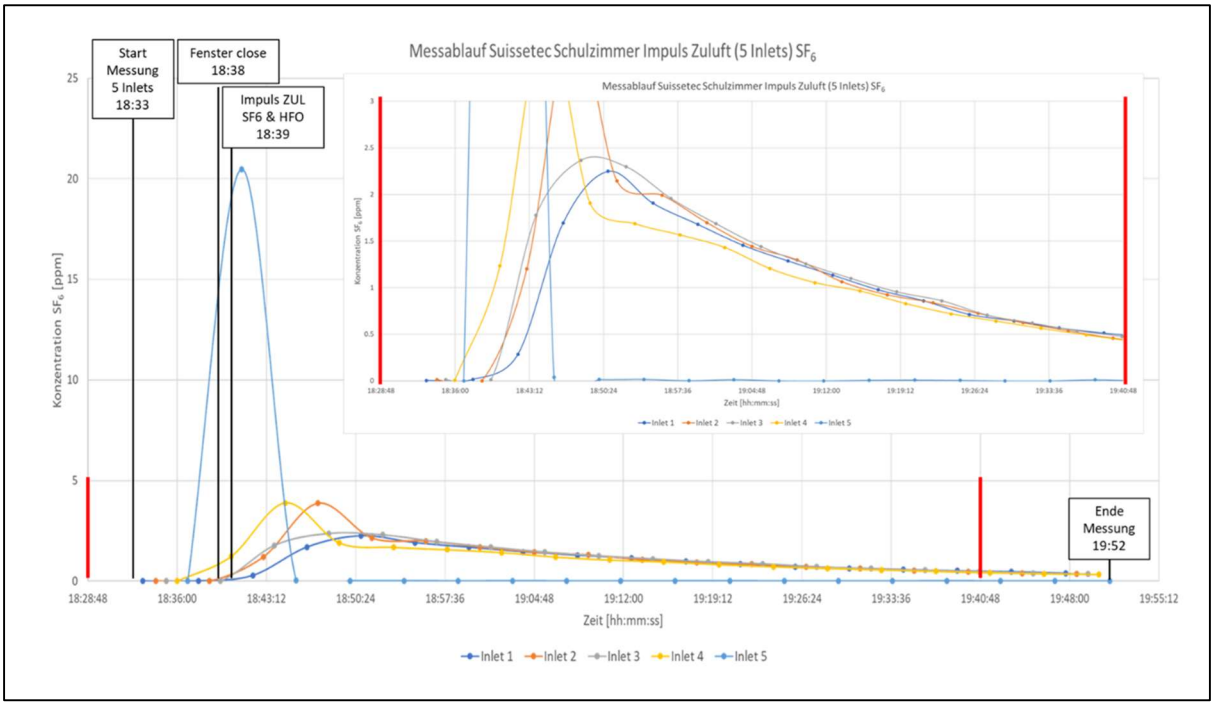


Abbildung 24: Messablauf Suissetec 5 Inlets SF_6

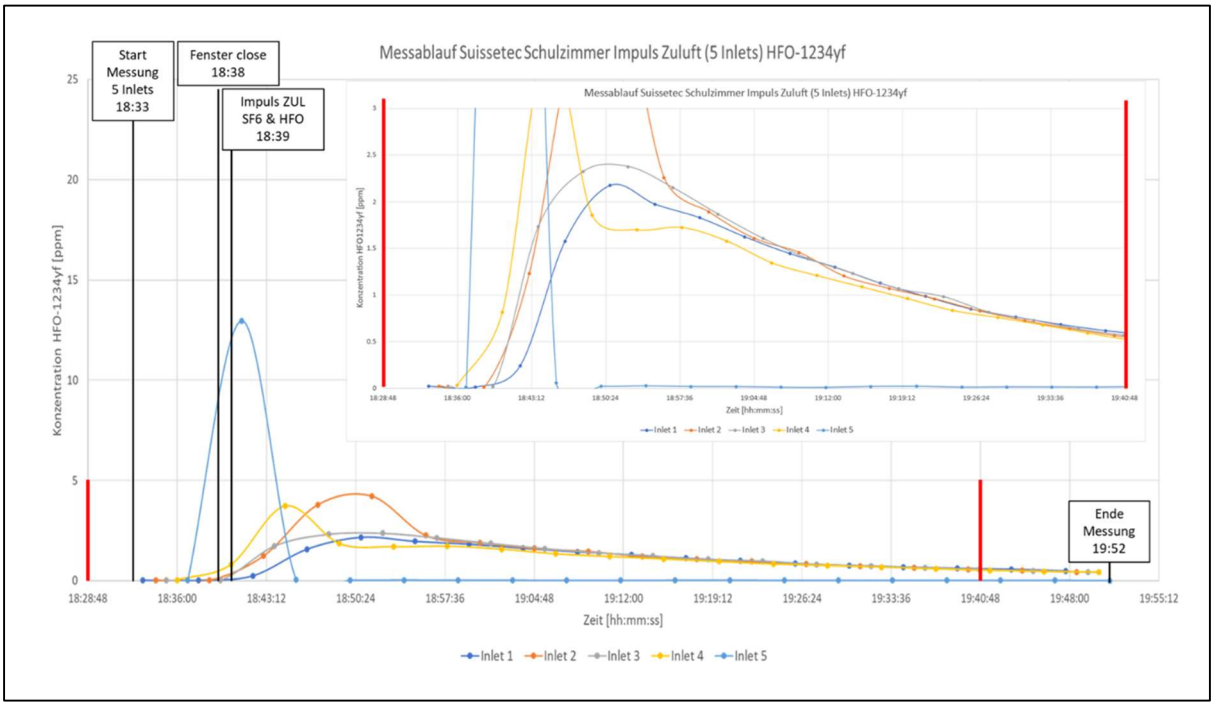


Abbildung 25: Messablauf Suissetec 5 Inlets HFO-1234yf

Erkenntnisse Rauchversuche

Mit Hilfe der Rauchversuche konnten Aussagen über die Strömung im Raum verifiziert werden. Die Strömung im Raum ist durch die thermischen Einträge der Personen und Dummies sowie, bei deren Betrieb, durch die Lüftungsanlage, die Umluftklima- und Umluftreinigungsgeräte bestimmt. In der Abbildung 26 ist ersichtlich, dass der «40°C-Dummy» die Luft erwärmt und aufgrund der thermodynamischen Grundsätze zur Decke befördert. Die Luft wird teils an den Wänden und an kälteren Fenstern abgekühlt und sinkt so wieder in Bodennähe. Eine Raumluftwalze lässt sich damit bestimmen.

Bei eingeschalteter Lüftungsanlage ist die Strömung stark durch die Zu- und Abluftöffnungen bestimmt. Diese befördern die Luft im hinteren Teil des Raumes in das Schulzimmer und saugt sie im vorderen Teil, oberhalb der Zwischendecke, wieder ab. So entsteht eine Längsströmung durch den Raum, welche sich jedoch zu einem nicht vernachlässigbaren Teil an der Decke «festsaugt» (Coanda-Effekt).

Aufgrund eines Gerätedefektes mussten die Rauchversuche an dieser Stelle frühzeitig abgebrochen werden, was einen weiteren Erkenntnisgewinn verhindert hat.

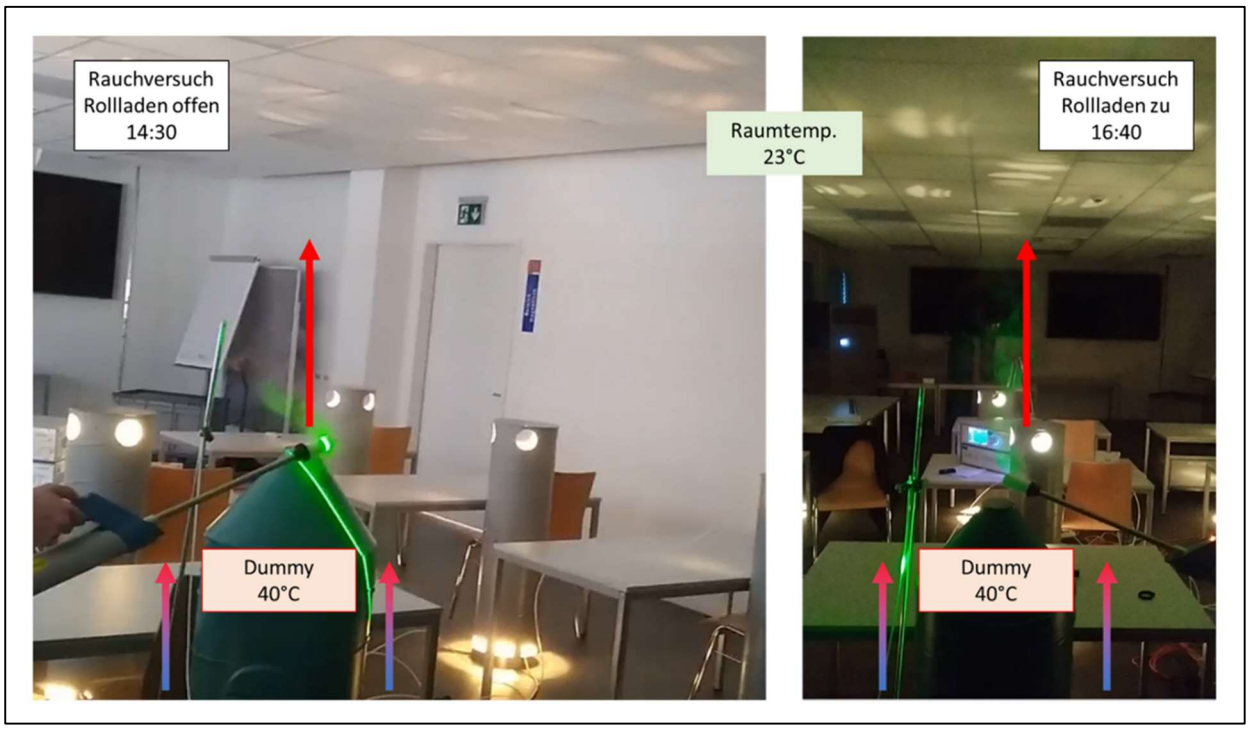


Abbildung 26: Rauchversuche Suissetec

8 Messungen «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer

In diesem Kapitel wird die dritte Messreihe mit Tracergas und Rauch im HSLU-Schulzimmer C210 an der Technikumstrasse 21 in Horw beschrieben. Das Schulzimmer stellt erneut eine Realsituation dar. Die Ziele der Messreihe sind aufgrund der über mehrere Tage geplanten Messdauer vielfältig. So wird der mögliche Erkenntnisgewinn aufgrund des Einsatzes zweier verschiedener Tracergase geprüft sowie die Möglichkeiten der Pulsmethode genauer und mit verschiedenen Gasanalysegeräten untersucht. Ebenfalls steht bei dieser Messreihe nochmals der direkte Vergleich der beiden Tracergase SF_6 und HFO-1234yf im Fokus. Ergänzend zu den hier gekürzten Ausführungen kann der vollständige Laborbericht dem Anhang D entnommen werden.

8.1 Messaufbau und Ablauf «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer

Die dritte Messreihe fand im Schulzimmer C210 der Hochschule Luzern Technik und Architektur in Horw über das Osterwochenende (01.04.2021 – 04.04.2021) statt. Während der Messungen befanden sich zwei Personen im Raum, welche sich in dem 350m^3 grossen Raum frei bewegt haben. Das Schulzimmer C210 ist mit einer maschinellen Lüftungsanlage ausgestattet. Die Zuluftauslässe befinden sich in den Tribünenstufen, auf welchen die Sitzplätze und Tische der Studenten angeordnet sind. Die Abluftdurchlässe sind oberhalb des Dozenten angeordnet. Zum besseren Verständnis der Situation liegen dem Anhang D Pläne des Raumes bei. Für diese Messreihe wurde erneut mit dem GASERA ONE gearbeitet. Durch die Kombination mit dem Multipoint-Sampler konnte über die gesamte Messzeit an sechs Standorten Messungen durchgeführt werden. Das hierzu einmalig aufgestellte Mess-Setup wurde im Verlauf der Messungen nicht verändert. Ergänzend wurde für diese Messreihe das Gasmet DX4015 eingesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass dieses nur einen einzelnen Messpunkt analysieren kann, wurde es je nach Messung verschoben. Die Messpunkte orientierten sich dabei aber grösstenteils an den bestehenden Messpunkten des GASERA ONE. Zusätzlich wurde bei sämtlichen GASERA ONE Messpunkten sowie im Freien ein Datenlogger aufgestellt. Die Tabelle 9 gibt hierzu eine Übersicht.

Tabelle 9: Standorte der Messpunkte im HSLU-Schulzimmer

Standort	GASERA ONE	Datenlogger	FTIR
Hinten Fenster	Inlet 1	HP 201	Variabel
Hinten Wand	Inlet 2	HP 244	
Vorne Fenster	Inlet 3	HP 243	
Vorne Wand	Inlet 4	HP 248	
Zuluft	Inlet 5	HP196	
Abluft	Inlet 6	HP 201	
Aussen	-	HP 242	

Der Aufbau des Mess-Setups erfolgte am Donnerstag, 01.04.2021 und dauerte bis zum Vormittag des 02.04.2021 an. Im Verlauf des Freitages konnten erste Probemessungen durchgeführt werden, welche erhebliche Probleme mit der Auswertung des Emerson Rosemount MLT4 zu Tage förderten. Da diese nicht innert nützlicher Frist behoben werden konnten, musste das Messprogramm angepasst und auf den Einsatz des Emerson Rosemount MLT4 verzichtet werden.

Am Folgetag sowie am Sonntagvormittag wurden Pulsdosierungen an insgesamt fünf verschiedenen Standorten durchgeführt. Es wurden jeweils 15s, 30s und 60s Pulse aufgegeben, um die Aussagekraft von verschiedenen Pulsdauern vergleichen zu können. Dies erfolgte mit beiden Gasen (SF_6 und HFO-1234yf) an identischen Eindosierstellen. Die Eindosierung wurde computergestützt vorgenommen und die genaue Menge an Tracergasen durch die Software dokumentiert. In der folgenden Tabelle 10 sind die einzelnen Pulse mit ihrer Aufgabezeit aufgelistet. Ebenfalls ist daraus der jeweilige Standort des Gasmet DX4015 ersichtlich und mit welchem Inlet des GASERA ONE dieser übereinstimmt.

Tabelle 10: Übersicht Pulsdosierungen HSLU-Schulzimmer

Dosierung Dozent								
	SF_6	SF_6	SF_6	HFO-1234yf	HFO-1234yf	HFO-1234yf	**Samstag**	
Pulsdauer	**15**	**30**	**60**	**15**	**30**	**60**	FTIR	GASERA ONE
Standort 1	13:01:07	13:47:09	14:20:01	12:55:16	13:51:25	14:15:47	Vorne Fenster	Inlet 3
Standort 2	14:59:59	15:37:26	15:58:20	15:03:54	15:34:29	16:02:20	Mitte Fenster	keiner
Standort 3	16:33:08	16:56:21	17:33:01	16:30:06	16:59:00	17:30:05	Hinten Fenster	Inlet 1
Standort 4	17:59:49	18:30:43	18:54:59	18:02:12	18:27:50	18:57:59	Hinten Wand	Inlet 2
Dosierung Mitte-Mitte								
	SF_6	SF_6	SF_6	HFO-1234yf	HFO-1234yf	HFO-1234yf	**Samstag**	
Pulsdauer	**15**	**30**	**60**	**15**	**30**	**60**	FTIR	GASERA ONE
Standort 1	00:03:26	00:28:46	00:47:35	00:05:42	00:26:33	00:50:02	Vorne Fenster	Inlet 3
Standort 2	22:39:41	23:02:00	23:29:22	22:37:57	23:04:37	23:26:55	Mitte Fenster	keiner
Standort 3	20:54:21	21:21:03	21:45:06	20:56:02	21:18:53	21:47:18	Hinten Fenster	Inlet 1
Standort 4	19:26:56	19:49:54	20:19:11	19:24:19	19:51:51	20:16:27	Hinten Wand	Inlet 2
Dosierung Zuluft								
	SF_6	SF_6	SF_6	HFO-1234yf	HFO-1234yf	HFO-1234yf	**Sonntag**	
Pulsdauer	**15**	**30**	**60**	**15**	**30**	**60**	FTIR	GASERA ONE
Standort 1	11:03:30	11:30:14	-	11:01:58	11:32:29	-	Vorne Fenster	Inlet 3
Standort 2	-	-	-	-	-	-	Mitte Fenster	keiner
Standort 3	12:03:06	12:27:37	-	12:01:40	12:29:24	-	Hinten Fenster	Inlet 1
Standort 4	12:57:02	13:19:33	-	12:55:43	13:21:08	-	Hinten Wand	Inlet 2
Standort 5	13:50:52	14:26:24	-	13:49:26	14:28:29	-	Abluft	Inlet 6

Im weiteren Verlauf des Sonntages wurden anschliessend Konstantdosierungen durchgeführt. Ein Zyklus beinhaltet dabei jeweils die Aufdosierung bis zum Gleichgewichtszustand, den anschliessenden Abbruch der Dosierung und die Aufzeichnung des Abklingverhaltens. Die Konstantdosierungen wurden jeweils in der Zuluft und beim Dozenten durchgeführt. In der Tabelle 11 sind diese dokumentiert und mit dem jeweiligen Standort des Gasmet DX4015 (FTIR) ergänzt.

Tabelle 11: Übersicht Konstantdosierungen HSLU-Schulzimmer

Dosierung	**Aufdosieren**		**Abklingen**		**FTIR**	**Bezeichnung**
Zuluft	14:57	15:57	15:57	16:51	Abluft	Zuluft 1
Zuluft	16:55	17:45	17:45	18:28	Vorne Fenster	Zuluft 2
Zuluft	18:35	19:19	19:19	19:40	Hinten Fenster	Zuluft 3
Dozent	20:00	21:18	21:18	21:38	Hinten Fenster	Dozent 1
Dozent	21:44	22:35	22:35	23:15	Vorne Fenster	Dozent 2

8.2 Resultate Messungen «grosser Raum» / HSLU-Schulzimmer

In diesem Unterkapitel sind die Resultate der Messungen des HSLU-Schulzimmers C210, unterteilt in die Aufbau- und Test-Phase, die Pulsdosierungen, die Konstantdosierungen und die Rauchversuche, aufgeführt. Eine weitere Gliederung erfolgt durch Untertitel, welche jeweils ein spezielles Unterthema behandeln.

8.2.1 Resultate Probemessungen Donnerstag und Freitag

Umluftklappe falsch angeschlossen

Während der ersten Probemessung mit dem Tracergas HFO-1234yf wurde eine Leckage im Dosierschlauch gefunden. Diese Leckage konnte rasch und mit wenig Aufwand behoben werden und liess sogleich auch Ungereimtheiten an der Funktionsweise der Lüftungsanlage zum Vorschein treten, da wie in der folgenden Abbildung 27 ersichtlich, die Konzentration der Zuluft phasenverschoben ebenfalls ähnlich stark wie an sämtlichen Messstellen im Raum und der Abluft anstieg.

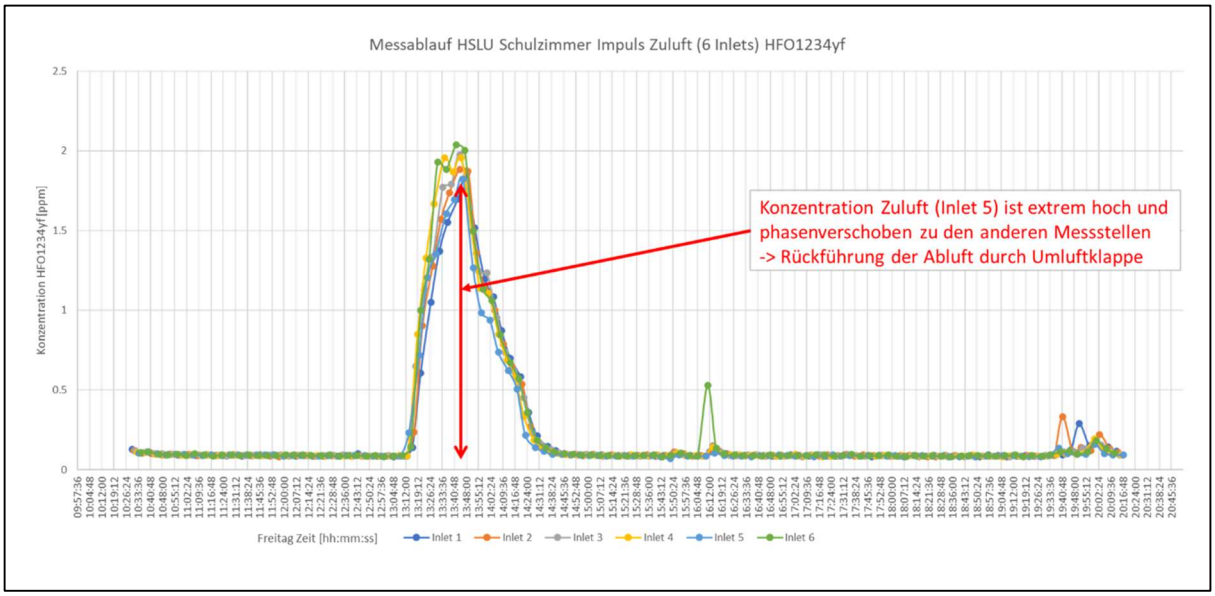


Abbildung 27: Auswertung GASERA ONE hinsichtlich Ansteuerung Umluftklappe

Im Leitsystem war ersichtlich, dass die Umluftklappe gänzlich geschlossen ist, was jedoch mit einem kurzen Blick in das Luftaufbereitungsgerät widerlegt werden konnte. Nach Umstellung der Klappe auf den theoretischen Umluftbetrieb hat sich diese geschlossen. Die Klappe wird somit aufgrund einer nicht näher untersuchten Fehlfunktion der MSRL-Technik falsch angesteuert. In der folgenden Abbildung 28 ist dazu ein Screenshot das Leitsystems vor der Änderung und der mit dieser Ansteuerung offenen Umluftklappe ersichtlich.

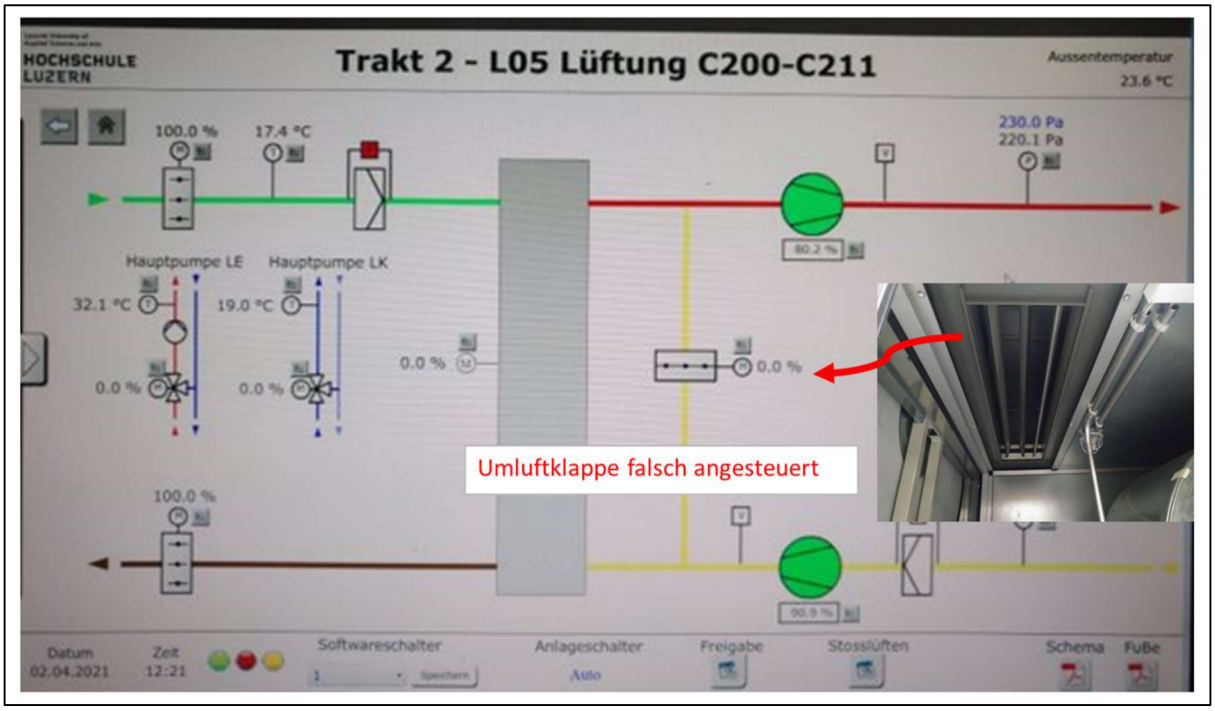


Abbildung 28: Screen-Shot Leitsystem und Foto realer Zustand Klappe

Für die weiteren Messungen wurde die Klappe anschliessend geschlossen und deren Zustand mehrfach geprüft.

Messgerät MLT4

Während des Aufbaus am Donnerstag wurde das MLT4 probehalber in Betrieb genommen. Das Starten der Messungen am Gerät selbst, wie auch die Aufzeichnungen am speziell dafür in Betrieb gehaltenen Windows XP Laptop mit der dafür nötigen LabVIEW-Software, schien nach bereits früheren Problemen mit der Übertragung der Messwerte nun einwandfrei zu funktionieren. Am Probemesstag traten allerdings erneut Probleme auf, da aufgrund von Lizenzproblemen das Schreiben auf eine Excel-Datei unterbunden wurde. Das LabVIEW konnte somit die übermittelten Daten zwar empfangen, diese aber nicht dokumentieren und speichern. Dieser Umstand konnte leider auch durch den extraordinären Einsatz gleichentags durch die HSLU nicht gelöst werden.

Weiter wurde nach der 0-Gas-Kalibrierung, nach anfänglich zu tiefen Messwerten aufgrund einer vermuteten Absorption, eine konstante Abweichung der Messwerte von ca. 2-3 ppm beim HFO-1234yf festgestellt. Die Ursache dafür wird in der externen Gastrocknung vermutet, welche nebst einer Kühlung und Kondensierung eine Trocknungsstufe mit Blaugel durchläuft. Da es sich hierbei um eine beinahe konstante Hintergrundkonzentration handelt, könnte diese für die spätere Auswertung in Abzug gebracht werden, was die Messdaten trotzdem verwertbar machen würde.

Die beiden Umstände haben schlussendlich dazu geführt, dass der Messablauf nochmals angepasst werden musste und ohne das MLT4 gestaltet wurde.

8.2.2 Resultate Pulsdosierungen

Vergleich GASERA ONE mit Gasmet DX4015

Die Pulse wurden plangemäss durchgeführt und von den Geräten GASERA ONE und dem Gasmet DX4015 aufgezeichnet. In diesem Unterkapitel soll aufgezeigt werden, dass die Messungen des GASERA ONE nicht das Gesamtbild hinsichtlich einer Pulsdosierung aufzuzeigen vermögen, wohingegen das Gasmet DX4015 als FTIR-Spektrometer mit schnellerem Analyseintervall klar seine Vorteile zeigen kann.

In den folgenden Abbildungen 29-31 ist ersichtlich, dass die Messung mit dem GASERA ONE in beinahe allen Fällen nicht in der Lage war, den Puls einwandfrei zu detektieren. Die erste Abbildung 29 zeigt den idealen Fall, in dem das GASERA ONE aufgrund seines Messintervalls genau zum richtigen Zeitpunkt die Messungen durchführt und die annähernde Glockenkurve, welche durch die Tracergaskonzentration lokal entsteht, ähnlich zeigt, wie dies mit der Messung über das Gasmet DX4015 der Fall war. Wie aber in den darauffolgenden Abbildungen 30-31 ersichtlich wird, ist dies die Ausnahme. Vielfach ist der Puls praktisch gänzlich unsichtbar und die effektive Maximalkonzentration bleibt unbekannt. Und auch wenn die Messung, wie in der Abbildung 31, an einem fast idealen Punkt hinsichtlich der maximalen lokalen Konzentration erfolgt, so ist der vorherige und nachfolgende Verlauf wiederum unbekannt, was die Bildung eines Flächenintegrals, welches Aufschluss über die vorhandene Menge an Tracergas am Messpunkt geben würde, unmöglich macht.

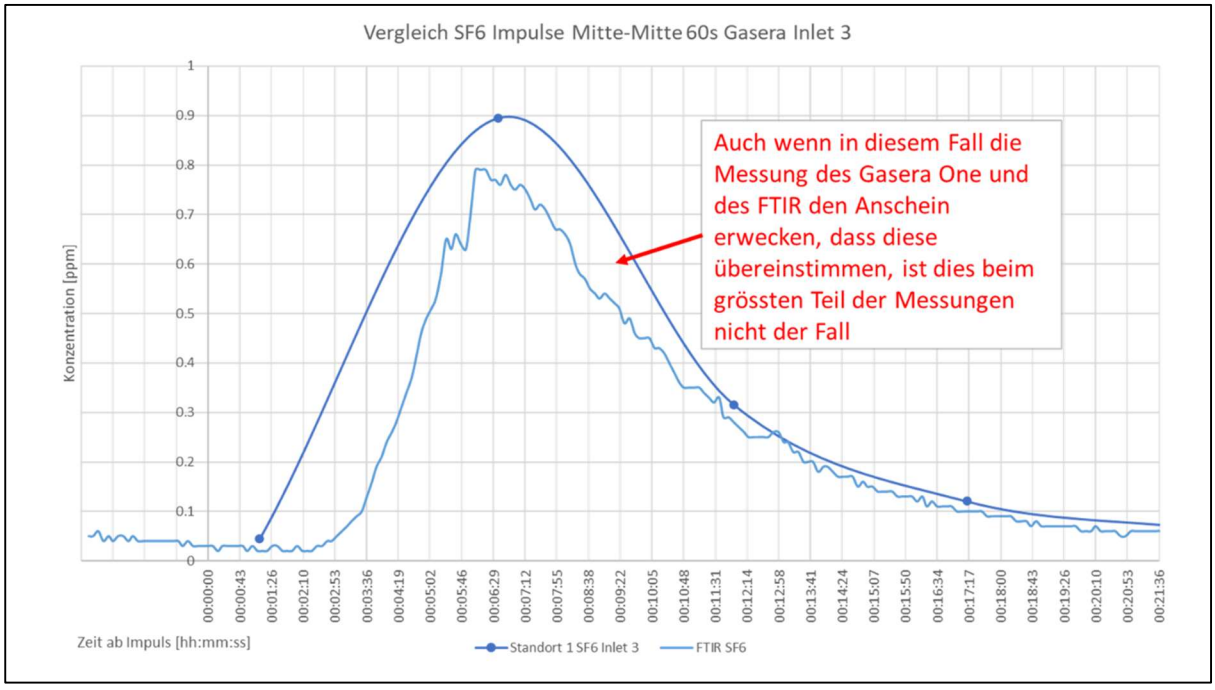


Abbildung 29: Vergleichsdiagramm 1 GASERA ONE – Gasmet DX4015

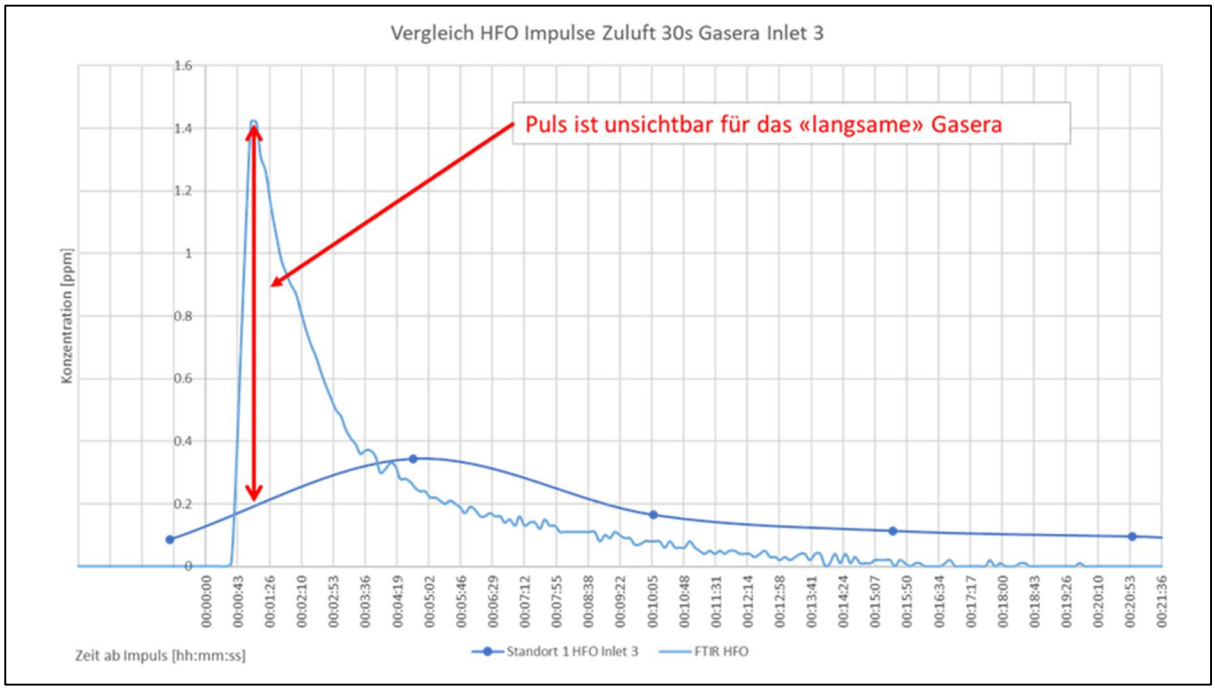


Abbildung 30: Vergleichsdiagramm 2 GASERA ONE – Gasmet DX4015

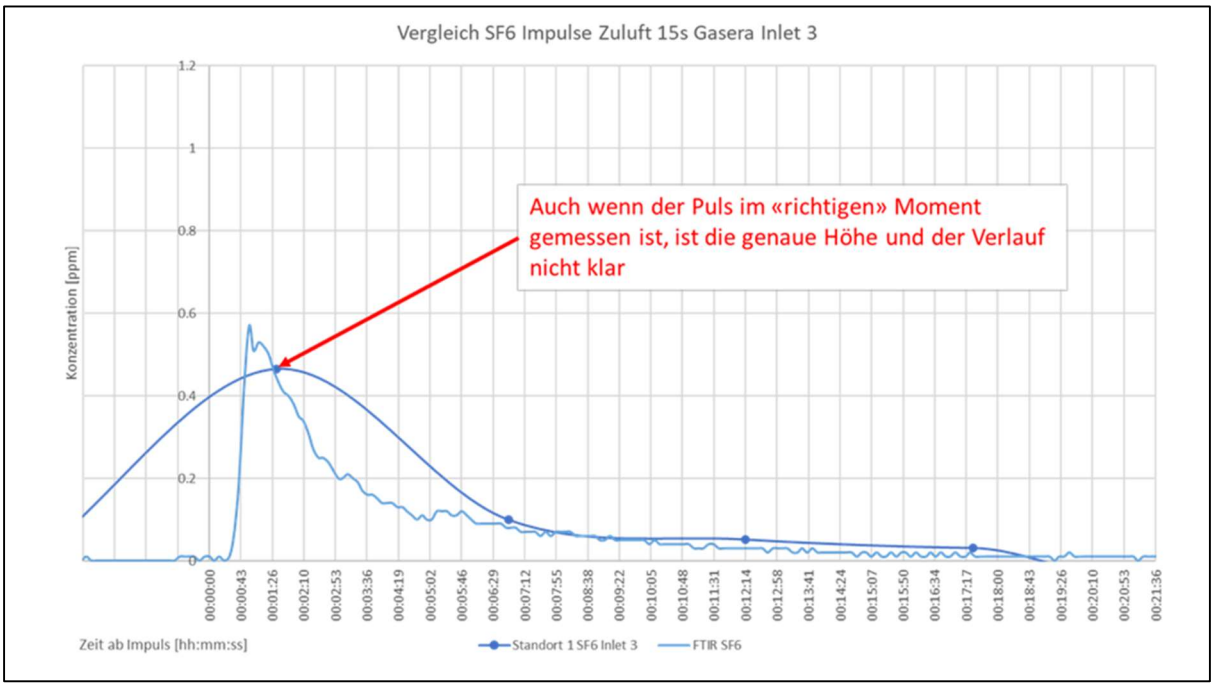


Abbildung 31: Vergleichsdiagramm 3 GASERA ONE – Gasmet DX4015

Verhalten der Luft im Raum

Mithilfe der Pulsdosierung an den verschiedenen Standorten und mit den ebenfalls verteilt angeordneten Messstellen, respektive der Wiederholung der Messszenarien mit unterschiedlichen Standorten des Gasmet DX4015 im Raum, konnte die Lüftungseffektivität bestimmt und interpretiert sowie allgemeine Erkenntnisse zur Raumluftdynamik gemacht werden.

Bei der Dosierung am Standort «Dozent» wurde schnell sichtbar, dass durch die Anordnung der Abluftabsaugstellen direkt oberhalb des Dozenten in Zusammenhang mit der Zulufteinführung in der Tribüne, welche mit der sehr hohen Luftmenge beinahe den Charakter einer Verdrängungslüftung aufweist, eine effiziente Stoffabfuhr gewährleistet werden kann. Die Ausbreitung des Tracergases im Raum fiel im Vergleich zu einer Dosierung in der Raummitte gering aus. Jedoch ist dabei unter anderem aufgefallen, dass während den Messungen in der Zuluft ebenfalls eine Konzentration gemessen werden konnte. Zurückzuführen ist dies auf den Rotationswärmetauscher im Luftaufbereitungsgerät und die suboptimale Anordnung der darin liegenden Ventilatoren. Diese Situation begünstigt trotz der Ausserbetriebnahme des Rotationsrades einen grossen Leckageanteil, der im Bereich von 20% bestimmt werden konnte. Hinsichtlich des Schadstoffabtransportes und der Ausbreitung von Viren muss darauf aber differenziert eingegangen werden. So durchläuft die «Leckage-Umluft» doch einen ISO ePM1 70%-Filter (F7), welcher nebst den üblichen Luftschadstoffen und Partikel auch einen Anteil von bis zu 80% der Virenlast abzuscheiden vermag.[48]

In der folgenden Abbildung 32 sind die Erkenntnisse aus der Dosierung am Standort «Dozent» nochmals festgehalten.

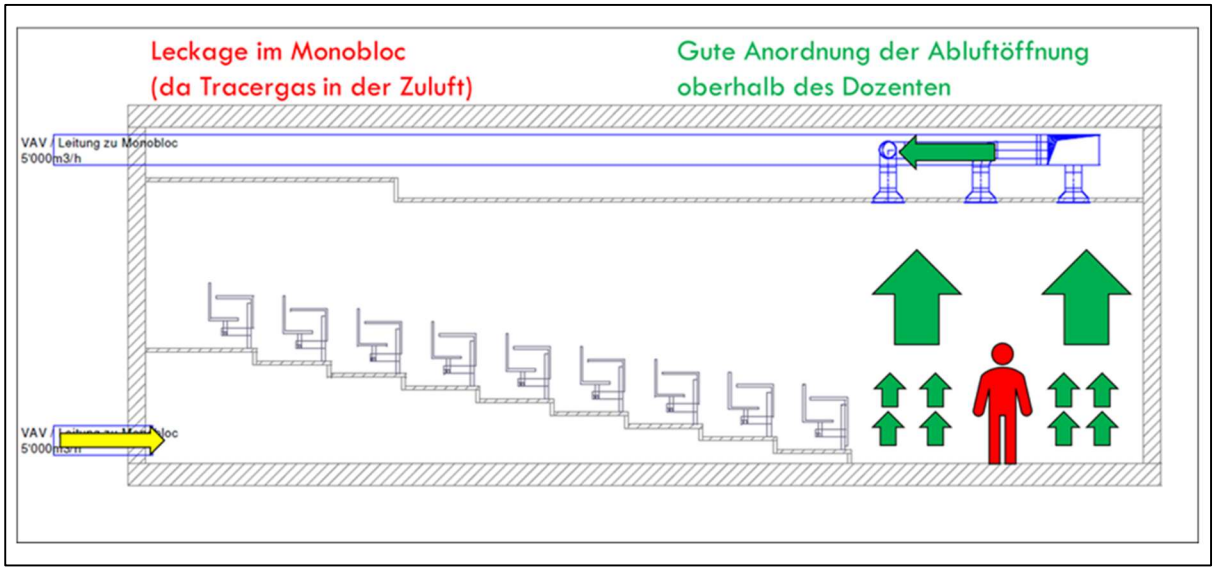


Abbildung 32: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Dozent

[48] Werner Frei und Unifil AG Filtertechnik 2020.

Bei der Dosierung am Standort «Mitte-Mitte» hat sich gezeigt, dass die Luft einerseits nach vorne zum Dozenten hingetrieben wird, was sich durch die Kolbenwirkung der hohen Zuluftmenge und der gleichmässigen Lufteinführung über Stufenluftdurchlässe erklären lässt. Andererseits wird sie aber auch nach hinten, entgegen der Kolbenströmung, getrieben, was sich durch die grundsätzlich turbulente Einströmung und die Wärmelasten im Raum begründen lässt. Weiter ist zudem erkennbar, dass daraufhin die Tracergaskonzentration im Bereich der hintersten Sitzreihe über längere Zeit konstant bleibt. Erklärbar ist dies wiederum mit dem Anteil des Abtrages, der entgegen der Kolbenströmung, eher im oberen Teil des Raumes, nahe der Doppeldecke, in entgegengesetzte Richtung erfolgt. Andererseits wird dieser Bereich aufgrund der Anordnung der Zuluftauslässe in den Stufen der Tribüne auch nicht ausreichend mit Frischluft versorgt. Die ca. 2m Distanz genügen dazu bereits. Die Lüftungseffizienz in der hintersten Sitzreihe bleibt somit markant tiefer als in den übrigen Bereichen des Raumes.

In der folgenden Abbildung 33 sind die aus der Dosierung «Mitte-Mitte» neu gewonnenen Erkenntnisse festgehalten.

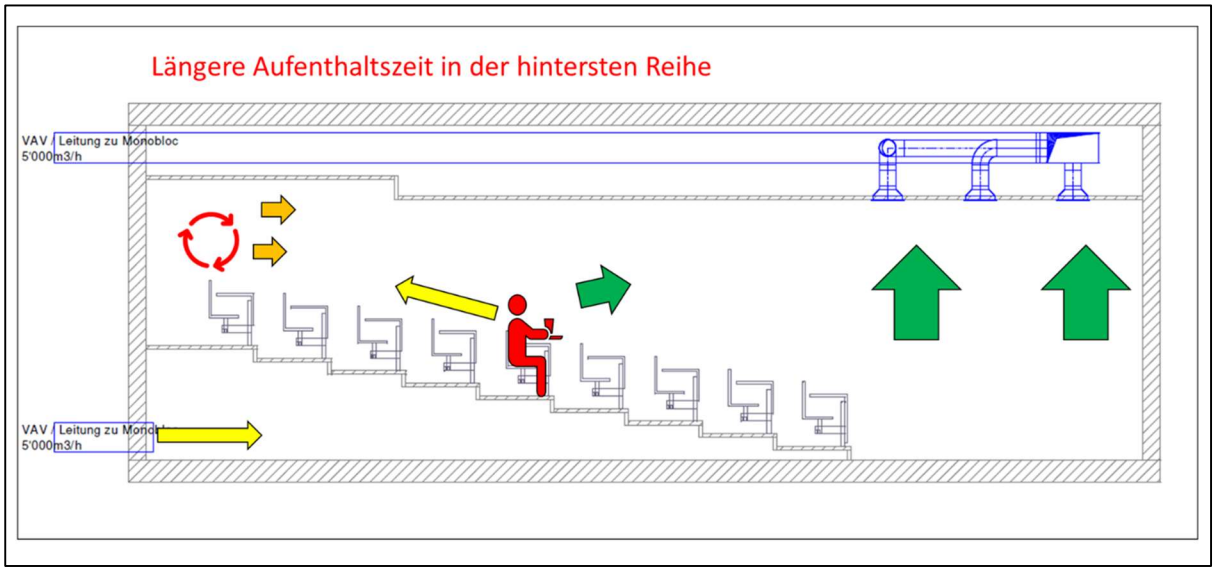


Abbildung 33: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Mitte-Mitte

Bei der Dosierung in der Zuluft wurde weiter verdeutlicht, dass sich die Zuluft mit Hilfe der in der Tribüne verbauten Luftdurchlässe in den meisten Bereichen des Raumes ähnlich einer Verdrängungslüftung verhält. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Luft schliesslich auch in die hinteren, schlecht belüfteten Reihen gelangt. Dies dank der Mischlüftungszone, welche oberhalb des gerichteten Stahles auftritt und die Frischluft so anteilsmässig auch nach hinten transportiert. Dies bestätigt die Erkenntnis aus dem vorangegangenen Versuch mit der Pulsaufgabe in der Raummitte. Naturgemäss ist diese Mischlüftungszone im hinteren Teil des Raumes aber weniger effizient belüftet als jene Zone des Raumes, welche sich im «Frischluftkegel» befindet.

Die Folgerungen aus der Dosierung «Zuluft» sind in der folgenden Abbildung 34 festgehalten.

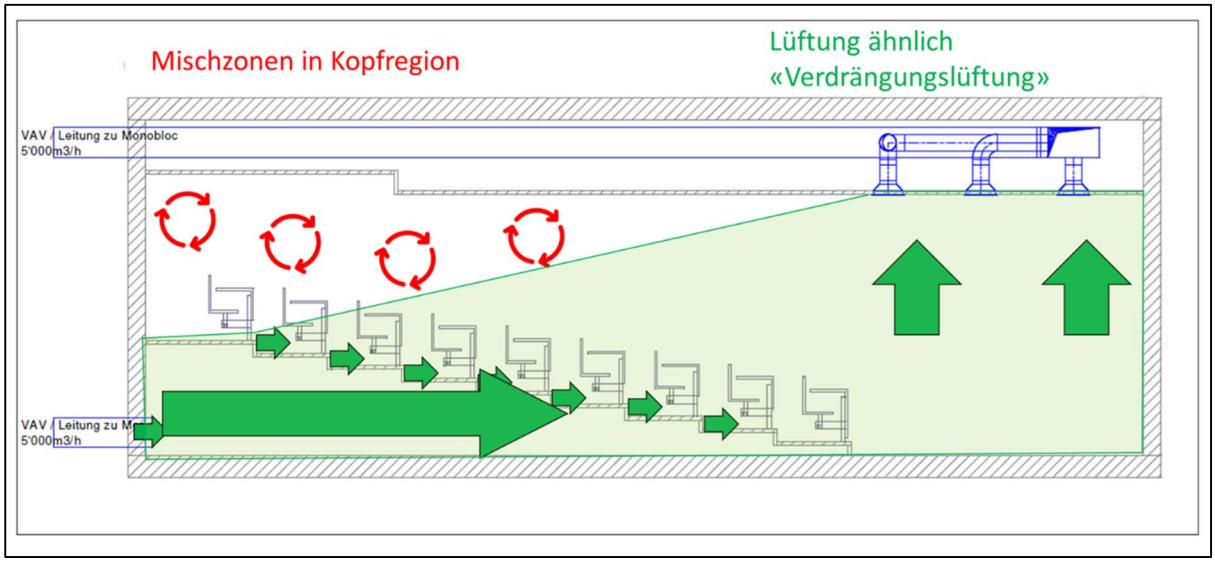


Abbildung 34: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Zuluft

Weiter wurde ersichtlich, dass sich die Luft auf der Wandseite anders verhält als auf der Fensterseite. Dies zeigen die Messungen, welche zur Bestimmung der Luftwechselraten herbeigezogen wurden. An der Fensterseite entstehen, erklärbar durch die Temperaturunterschiede der Oberflächen aufgrund der eher schlecht dämmenden Fenster, eine thermisch induzierte Luftwalze. Der kleine Zwischengang auf der Fensterseite sorgt zudem für eine Luftbewegung nach vorne in Richtung Dozentenpult und schliesslich zu den Abluftöffnungen in der Zwischendecke. Der hintere, wandseitige Raumecken zeigt sich als am schlechtesten belüfteter Teilbereich. Hier treffen sich sämtliche zuvor beschriebenen negativen Effekte und der Bereich kann nicht von thermisch induzierten Luftbewegungen profitieren.

Hinsichtlich einer Empfehlung zur Belegung des Raumes lässt sich daher ableiten, dass die Personen möglichst in der ersten Reihe sitzen sollen. Bei grösserer Belegung sollen die Plätze anschliessend gegen hinten gefüllt werden. Nebst einem geringeren Infektionsrisiko profitieren die Personen dabei von einer besseren Luftqualität

In der folgenden Abbildung 35 wird die Situation grafisch erläutert. Die Fensterfront ist auf dem Plan unten angeordnet, wo auch der Zwischengang direkt bei der Fensterfront sichtbar ist.

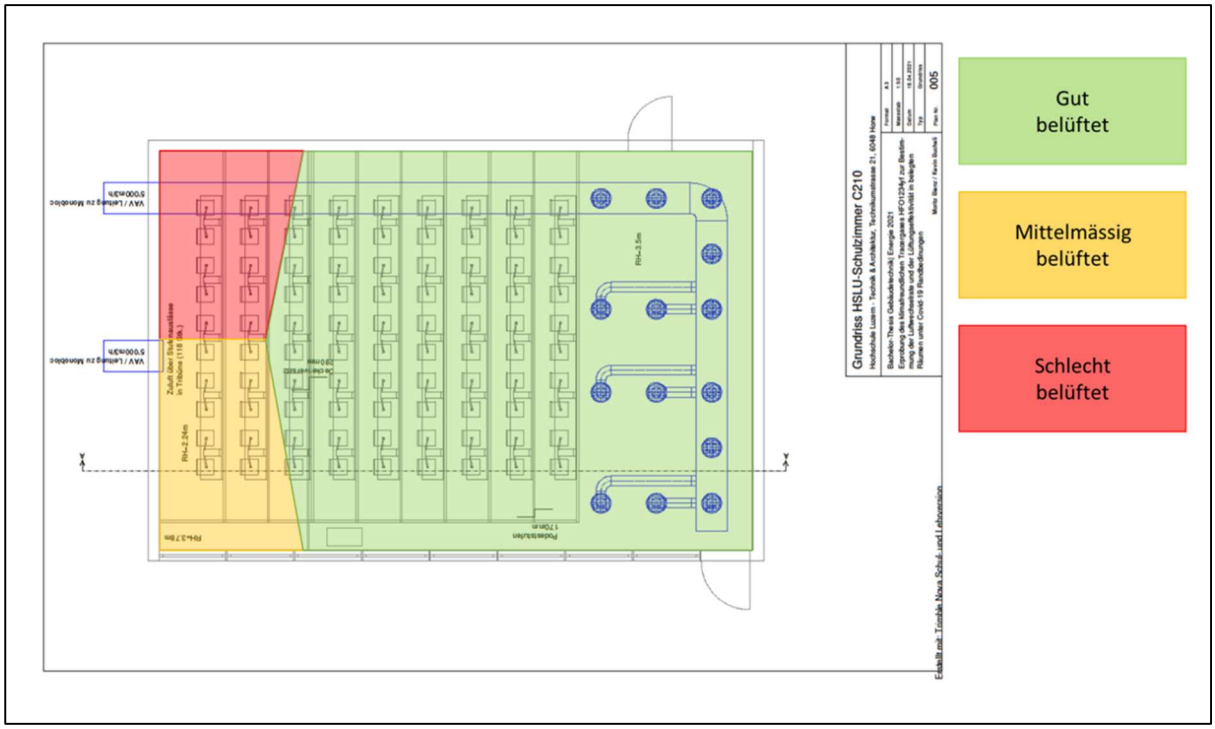


Abbildung 35: Zoneneinteilung Lüftungseffizienz

8.2.3 Resultate Konstantdosierungen

Aufdosierung

Grundsätzlich: Die Ergebnisse aus den Messungen nach den Konstantdosiermethoden mit SF_6 und HFO-1234yf haben die Resultate aus den Pulsdosierungen erhärtet und plausibilisiert.

In der folgenden Tabelle 12 sind die Konstantdosierungen mit den jeweiligen Start- und End-Zeiten aufgelistet. Daraus sind auch die Aufenthaltszeiten ersichtlich. Es wurden die Mittel- und Median-Werte analysiert. Über die Auswertung mit dem Median können die Ausschläge reduziert und so die Aufenthaltszeiten berechnet werden. Zur Plausibilisierung wurde der Mittelwert beider Aufenthaltszeiten ermittelt und weiterverwendet.

Tabelle 12: Übersicht Aufdosierung HSLU-Schulzimmer

Aufdosierung				SF6				HFO			
		Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom Mittelwert	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Median	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Mittelwert	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Median	Aufent-haltszeit
Input	Messstandort	[hh:mm:ss]	[m^3/h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]
Zuluft	Abluft	14:58:00	5000	3870	0.09	3816	0.09	3735	0.09	3682	0.10
Zuluft	Vorne Fenster	16:55:30	5000	5352	0.07	4487	0.08	5715	0.06	4633	0.08
Zuluft	Hinten Fenster	18:36:00	5000	3465	0.10	3506	0.10	3565	0.10	3610	0.10
Dozent	Hinten Fenster	20:03:00	5000	3240	0.11	3194	0.11	3146	0.11	3140	0.11
Dozent	Vorne Fenster	21:46:00	5000	7943	0.04	5335	0.07	5544	0.06	3561	0.10

In der folgenden Abbildung 36 sind die Konzentrationen der ersten Aufdosierung ersichtlich. Erkennbar ist über die Messung in der Abluft, dass diese nicht mit den anhand der Daten aus dem Leitsystem berechneten Aufdosier-Kurve übereinstimmt. Zu erklären ist dies damit, dass der Startpunkt der Aufdosierung nicht auf die Sekunde genau bestimmt ist und so durch die Berechnungs-Formel eine Rest-Ungenauigkeit besteht. Ergänzend kommt hinzu, dass sich auch aufgrund der vorliegenden Raumluftströmungen eine Abweichung ergeben kann. Da sich die Luft im Raum, wie in den vorangegangenen Pulsversuchen festgestellt wurde, nicht gleichmässig verteilt, dauert die Aufdosierung in den hintersten Sitzreihen länger als in den übrigen Bereichen. Aus dieser wenig mit Tracergas versetzten Raumluft gelangt ebenfalls ein Teil in die Abluft, was das gegenüber den Erwartungen langsamere Ansteigen der Abluftkonzentration ebenfalls erklären würde. Im vorliegenden Fall tragen wohl beide Effekte zur (relativ geringen) Abweichung bei. Einen grösseren Unsicherheitsfaktor stellt die festgestellte Undichtigkeit über den Rotationswärmetauscher dar. Dies wird in der Analyse der Abklingkurve ebenfalls nochmals aufgegriffen, da dieser Einfluss auch dort wirkt.

Der Verdacht des langsameren Mitreissens der nicht mit Tracergas angereicherten Luft aus den letzten Sitzreihen wird erhärtet durch die Messung Zuluft 2, bei der der Messpunkt vorne fensterseitig angeordnet war und die Messung Zuluft 3, bei der der Messpunkt hinten fensterseitig platziert wurde. Es ist gut ersichtlich, dass die Konzentration im vorderen Teil des Raumes schneller ansteigt als erwartet. Umgekehrt zeigt sich im hinteren Teil des Raumes ein verzögerter Anstieg, was die vorhergehende Erkenntnis bestätigt.

Die Konzentration in der Abluft stellt einen Mittelwert aus diesen beiden Messungen im Raum dar. Die Abbildung 37 zeigt die zwei Konstantdosierungen vorne und hinten, jeweils fensterseitig.

Weiter lässt sich anhand dieser Abbildungen 36 und 37 erneut der praktisch identische Verlauf der Konzentration der beiden Tracergase SF_6 und HFO-1234yf ablesen. Jede kleinste Abweichung, welche sich aufgrund minimer Strömungen ergeben, wird von beiden Gasen mitgemacht. Der zuletzt leicht abweichende Gleichgewichtszustand lässt sich damit erklären, dass für die Eindosierung von HFO-1234yf ein auf SF_6 kalibriertes Dosierventil verwendet wurde. Nach Auferlegung des entsprechenden Korrekturfaktors wird diese Abweichung faktisch inexistent und ist nur noch abhängig von der Ungenauigkeit des Dosierventils selbst.

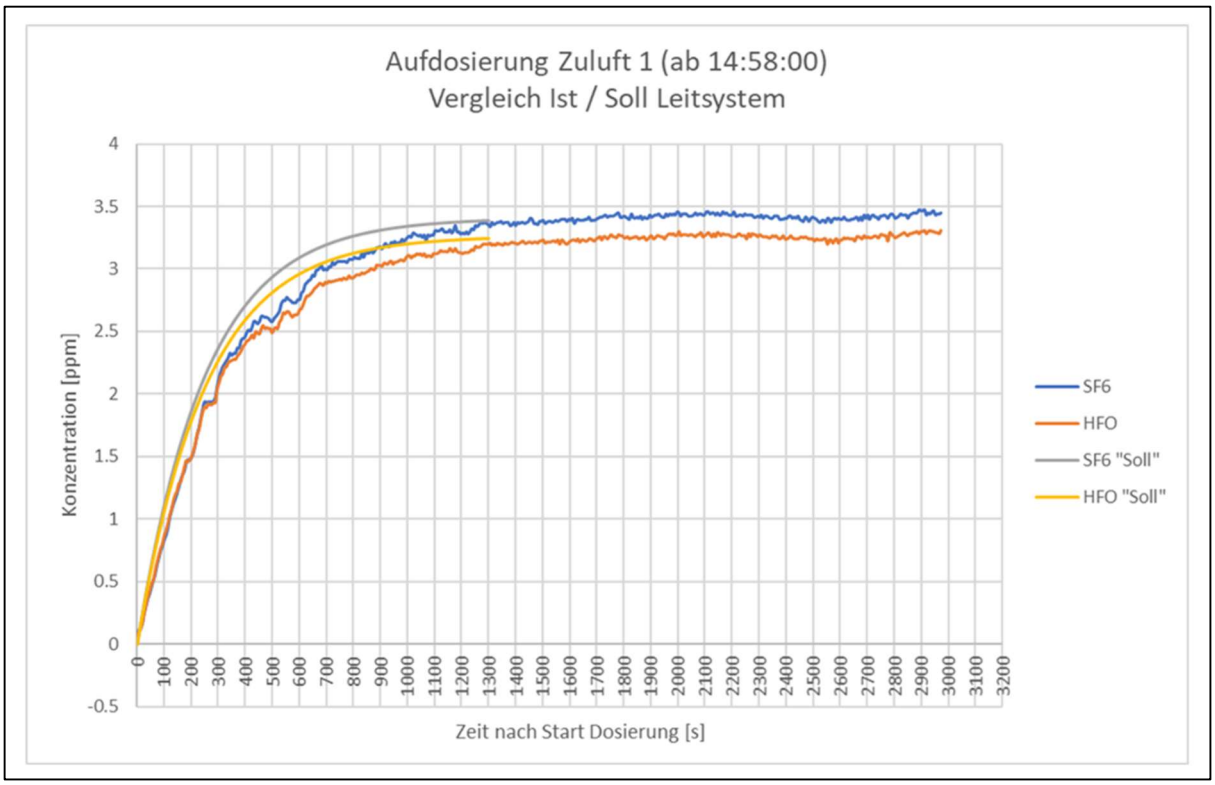


Abbildung 36: Konstantdosierung Zuluft 1

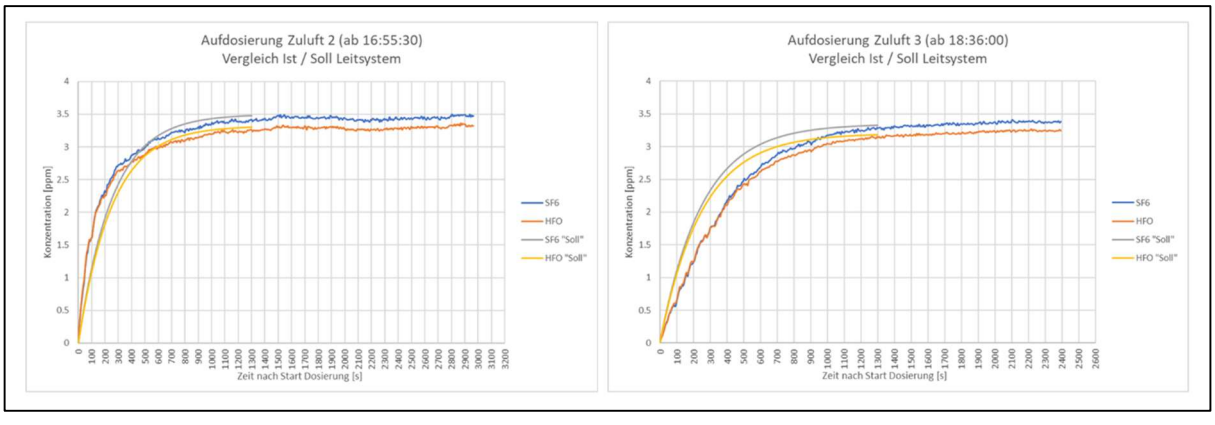


Abbildung 37: Konstantdosierungen Zuluft 2 & 3

Abklingen

Die Messungen des Abklingverhaltens mit SF_6 und HFO-1234yf haben die Erkenntnisse aus den Messungen der Aufdosierung nochmals bestätigt. Sie zeigen dieselben Phänomene auf.

In der folgenden Tabelle 13 ist das Abklingen der verschiedenen Konstantdosierungen mit den jeweiligen Start- und End-Zeiten aufgelistet. Daraus sind wieder die Aufenthaltszeiten ersichtlich. Es wurden wiederum die Mittel- und Median-Werte ausgewertet. Zur Plausibilisierung wurde der Mittelwert beider Aufenthaltszeiten ermittelt und weiterverwendet.

Tabelle 13: Übersicht Abklingen Konstantdosierungen HSLU-Schulzimmer

Abklingkurve				SF6				HFO			
		Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom Mittelwert	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Median	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Mittelwert	Aufent-haltszeit	Volumenstrom Median	Aufent-haltszeit
Input	Messstandort	[hh:mm:ss]	[m^3/h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]	[m^3/h]	[h]
Zuluft	Abluft	15:59:00	5000	3402	0.10	3296	0.11	3044	0.11	3099	0.11
Zuluft	Vorne Fenster	17:45:00	5000	4666	0.08	4132	0.08	4191	0.08	3673	0.10
Zuluft	Hinten Fenster	19:20:00	5000	3701	0.09	3676	0.10	3340	0.10	3332	0.11
Dozent	Hinten Fenster	21:21:00	5000	3582	0.10	3322	0.11	3419	0.10	3314	0.11
Dozent	Vorne Fenster	22:38:00	5000	3477	0.10	3493	0.10	2542	0.14	3427	0.10

In der nachfolgenden Abbildung 38 sind die Konzentrationen der ersten Aufdosierung, respektive hier des ersten Abklingens, ersichtlich. Es zeigt sich dasselbe Phänomen, welches bereits bei der Aufdosierung beobachtet werden konnte. Der erwartete Verlauf ist nicht deckungsgleich mit den Messungen. Ersichtlich ist, dass sich die Konzentrationen zu Beginn gemäss dem berechneten theoretischen Wert aus den Daten des MSRL-Leitsystems entwickeln. Dies, da im Raum ein homogener Gleichgewichtszustand herrscht. Nachdem die Luft, welche sich in direkter Nähe der Abluftabsaugstelle befindet, erfasst wurde, wird anschliessend eine Mischung aus höher mit Tracergasen konzentrierter Raumluft und weniger konzentrierter Zuluft, welche aufgrund der Leckage ebenfalls mit Tracergas versetzt ist, abgesaugt. Da die Leckage als konstanter Faktor des Messwerts angenommen wurde, ist es möglich, dass die Leckage nicht gänzlich korrekt eingerechnet wird, da sich diese im zeitlichen Verlauf leicht verändern kann. Der konstante Leckageanteil wird somit als Mittelwert berücksichtigt. Da die Konzentration in der Abluft (ppm_{ABL} * 18.6%) grösser ist als die berechnete Leckage ($ppm_{Messpunkt}$ / 118.6%), ist es schwierig den genauen Wert der Lüftungseffektivität zu berechnen, da hierfür eine simultane Messung in kurzen Zeitabständen in der Zuluft von Nöten wäre.

Zur Ergänzung und Verdeutlichung sind die Abbildungen 39 und 40 der restlichen Messungen ebenfalls ergänzt.

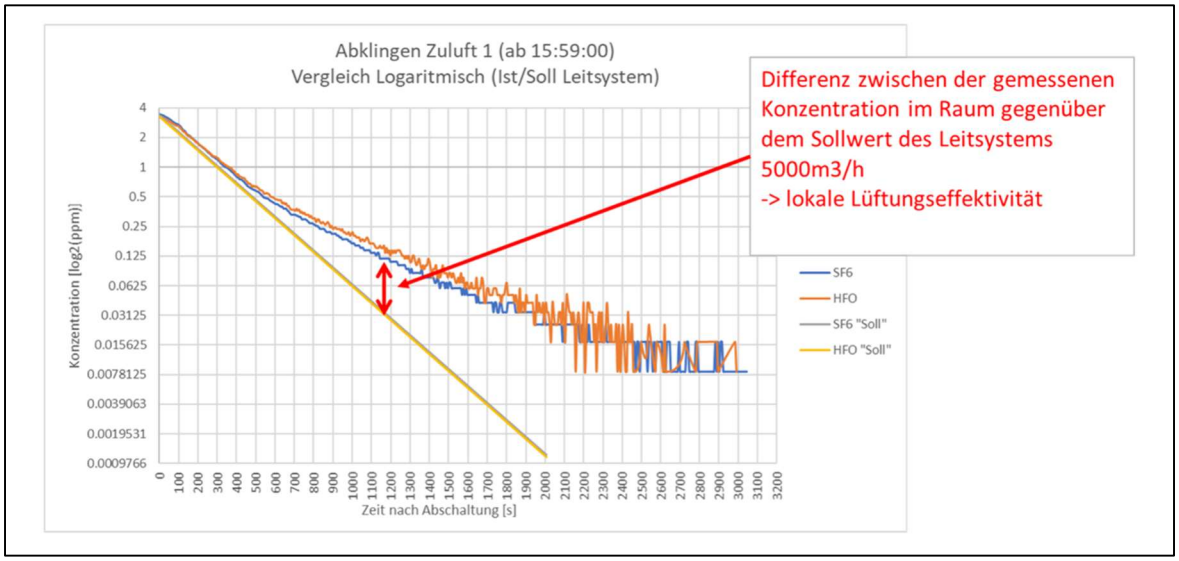


Abbildung 38: Konstantdosierung Abklingen Zuluft 1

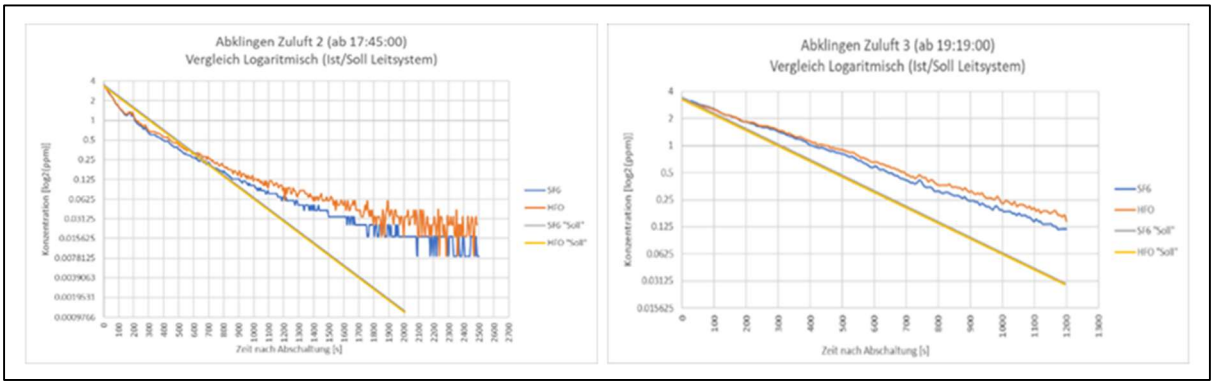


Abbildung 40: Konstantdosierung Abklingen Zuluft 2 & 3

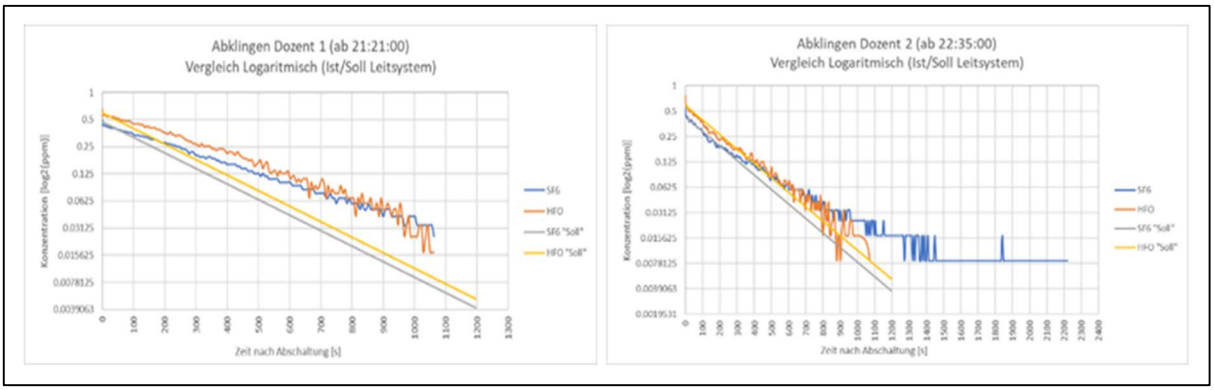


Abbildung 39: Konstantdosierung Abklingen Dozent 1 & 2

Zusammenfassung Konstantdosierung - Aufdosieren und Abklingen

Aus den Messungen der Aufdosierung und des Abklingens wurden Aufenthaltszeiten der Luft berechnet. Danach konnte der Mittelwert zwischen dem Median und dem Mittelwert der Daten berechnet werden. Für jeden Standort wurden die «lokalen» Lüftungseffektivitäten ausgewertet. Da sich der Wert meist zwischen 0.5 und 1 befindet, handelt es sich um eine Verdrängungslüftung, welche je nach Standort mehr oder weniger gut funktioniert und somit auch Bereiche beinhaltet, welche eher einer Mischlüftung zuzuordnen sind. Ein Wert von 0.5 beschreibt eine optimale Mischlüftung; ein Wert unterhalb von 0.5 beschreibt eine Kurzschlussströmung. Durch die Berechnung ergibt sich eine mittlere Luftwechselrate im Raum von $12h^{-1}$. Gemäss eingestellten Volumenströmen an den VAV-Reglern über das Leitsystem sollte dieser $14.4h^{-1}$ betragen. Unabhängig von dieser Abweichung stellt dies einen, für diese Nutzung, sehr hohen Luftwechsel dar. In der Tabelle 14 sind alle Dosierungen und die berechneten Luftwechselraten zusammengefasst.

Tabelle 14: Örtliche Lüftungseffektivität und Luftwechselrate HSLU-Schulzimmer

Zusammenfassung			Aufenthalszeit Mittelwert	Aufenthaltszeit Soll	Lüftungs-effektivität	Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Messung
Input	Messstandort	Tracergas	[h]	[h]	Leitsystem/Messung	[-]	[1/h]
Zuluft	Abluft	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.78	Verdrängungslüftung	11.14
Zuluft	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.07	0.07	1.02	ideale Kolbenströmung (zu optimal)	14.55
Zuluft	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.79	Verdrängungslüftung	11.31
Dozent	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.74	Verdrängungslüftung	10.57
Dozent	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.08	0.07	0.89	Verdrängungslüftung	12.64

Leckage über Rotationswärmetauscher und undichte Umluftklappe

Mithilfe der Konstantdosierungen wurde die mittlere Leckage über den Rotationswärmetauscher und die Umluftklappe anhand des Verhältnisses der Abluft- zur Zuluftkonzentration berechnet. Ermittelt wurde eine durchschnittliche Leckage von 18.6%. In der folgenden Tabelle 15 sind die diesbezüglich herangezogenen Daten ersichtlich.

Tabelle 15: Leckage-Ermittlung Luftaufbereitungsgerät HSLU-Schulzimmer

Undichtheit WRG-Rotationstauscher

			Abluft SF6	Zuluft SF6	Leckage	Abluft HFO	Zuluft HFO	Leckage	Leckage	Totale
		Startzeit	Mittelwert	Mittelwert	SF6	Mittelwert	Mittelwert	HFO	Mittelwert	mittlere Leckage
Input	Messstandort	[hh:mm:ss]	[ppm]	[ppm]	[-]	[ppm]	[ppm]	[-]	[-]	[-]
Dozent	Abluft	20:07-21:18	2.20	0.40	0.184	2.24	0.47	0.208	0.196	0.186
Dozent	Vorne Fenster	21:55-22:33	2.56	0.42	0.164	2.50	0.47	0.188	0.176	

Diese Leckage lässt sich zum grössten Teil über die Undichtigkeit des Rotationswärmetauschers erklären. Einen kleineren Einfluss spielt zudem die Umluftklappe, welche ebenfalls nicht gänzlich dicht schliesst. Wie in der Abbildung 41 ersichtlich, sind die Ventilatoren in Bezug auf den Leckageanteil unglücklich angeordnet. So entsteht ein Unterdruck auf der Zuluftseite und ein Überdruck auf der Abluftseite des Rotationsrades (und der Umluftklappe). Die Leckage konnte sowohl beim Betrieb als auch beim Stillstand des Rotors gleichermassen beobachtet werden.

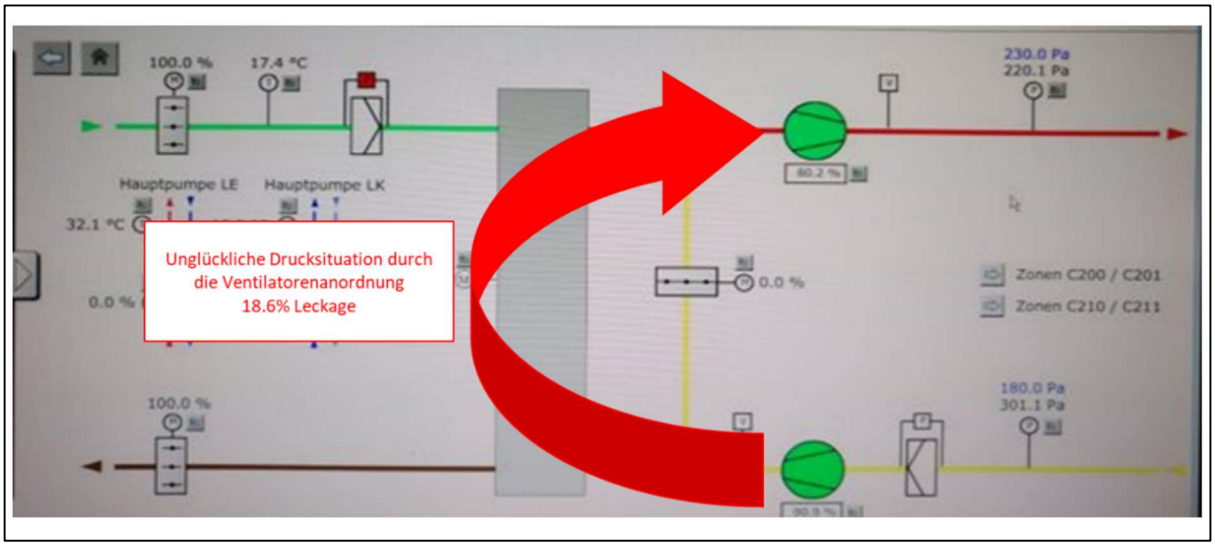


Abbildung 41: Prinzipschema Luftaufbereitung (Weg der Leckage)

8.2.4 Resultate Rauchversuche

In diesem Kapitel wurden die Erkenntnisse der Rauchversuche an verschiedenen Standorten im Raum ausgewertet. Die ausgewerteten Standorte sind deckungsgleich mit den Messpunkten der Tracergasmessung. So wurde das Raumluftverhalten beim Dozenten, in der Raummitte sowie in der hintersten Sitzreihe untersucht. Die mit diesen Rauchversuchen sichtbar gemachten Strömungen decken sich in ihrem Verhalten jeweils mit den Tracergasmessungen und werden daher nur kurz umrissen.

Verhalten der Luft beim Dozenten

Wie in der Abbildung 42 ersichtlich, steigt die Luft rasch nach oben und wird anschliessend umgehend von den Abluftdurchlässen erfasst. Dieses Verhalten erklärt sich mit der Verdrängungsströmung von den Zuluftauslässen in der Tribüne her entstammend hin zu den Abluftöffnungen in der Decke oberhalb des Dozentenpultes und konnte bereits mit den Tracergasmessungen bestimmt werden.

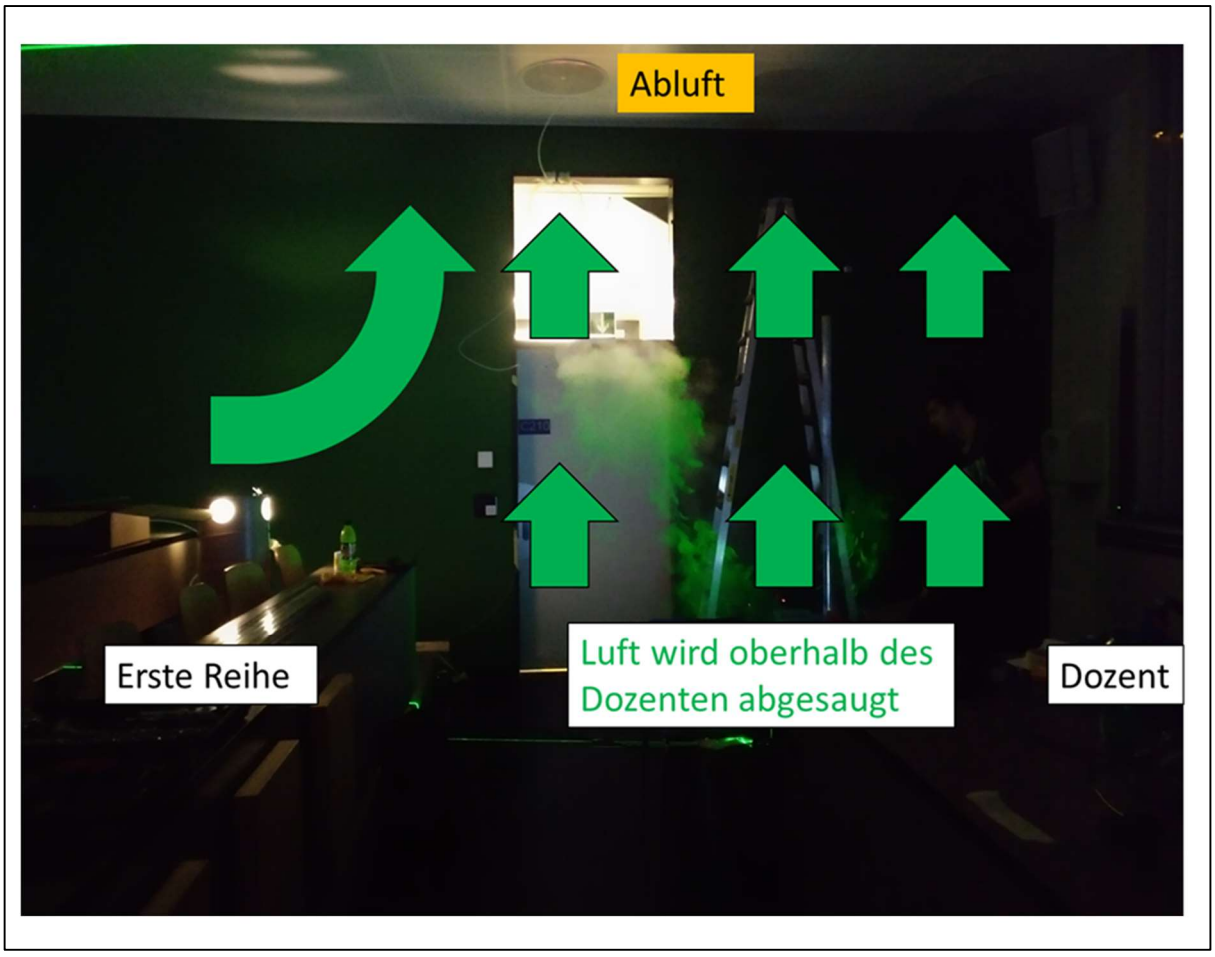


Abbildung 42: Rauchversuch Dozent

Verhalten der Luft in Mitte-Mitte

Die Rauchversuche in der Raummitte (5-6 Reihe) zeigen das Verhalten der Zuluftauslässe sehr gut auf. Wie in der Abbildung 43 erkenntlich, treibt die Luft nach vorne zum Dozenten. Ebenfalls wird sichtbar, dass die Luft dabei an die Decke steigt, was sich nebst dem Verdrängungseffekt der weiteren Zuluftdurchlässe im vorderen Teil der Tribüne auch mit den Wärmequellen (Dummies) im Raum erklären lässt. Die Kombination dieser Einflussfaktoren ergibt eine optimale Lüftung für die Sitzplätze vom Dozenten bis hin zur sechsten Reihe. Auch hier bestätigen die Rauchversuche was mit den Tracergasmessungen bereits in Erfahrung gebracht werden konnte.

Abbildung 43: Rauchversuch Raummitte

Verhalten der Luft in der hintersten Reihe

In der Abbildung 44 ist ersichtlich, dass der Einlass des Rauches am Boden in der achten Reihe ein ähnliches Verhalten zeigt wie jenes in der Raummitte. Wird der Rauch allerdings ca. einen Meter ab Boden aufgegeben, so zeigt sich, dass sich die Luft hier anders verhält als in den vorderen Reihen. Der aufgegebene Rauch wird hier nach hinten hin zur Wand gezogen und verweilt dort länger. In der Abbildung 45 ist erkennbar, dass sich dort beinahe eine Totzone ergibt, wo sich der Rauch nur allmählich verdünnt und abgetragen wird.

Abbildung 44: Rauchversuch hinterer Teil des Raumes

Abbildung 45: Rauchversuch hinterster Teil des Raumes (Stagnation)

9 Schlussfolgerungen

Dieses Kapitel widmet sich der Beantwortung der Fragestellung. Zuerst wird auf die Vergleichbarkeit der Tracergase HFO-1234yf und SF_6 eingegangen. Daraufhin werden die Messverfahren und ihre Einsatzmöglichkeiten diskutiert und zuletzt die Übertragbarkeit der Resultate hinsichtlich der Coronaviruspandemie geprüft.

9.1 Vergleich HFO-1234yf und SF_6

Die Messungen in den drei unterschiedlichen Umgebungen mit den zwei Tracergasen HFO-1234yf und SF_6 zeigen deren Vergleichbarkeit deutlich auf. Die Messungen mit beiden eingesetzten Messgeräten haben ergeben, dass sich die Tracergaskonzentration im Raum identisch verhalten. Dies deckt sich mit den theoretischen Untersuchungen der beiden Gase. Durch die Messungen mit dem nur zu Probemessungen eingesetzten Emerson Rosemount MLT4, welches zur Aufbereitung des Messgases einen Gaskühler vorgeschalten hat, konnte jedoch das Problem der Absorption von HFO-1234yf festgestellt werden. Die dort festgestellt Absorption von HFO-1234yf durch das Blaugel im Trocknungsverfahren deckt sich mit derselben Beobachtung der Hochschule Luzern Technik & Architektur beim Prüfverfahren von Wärmerückgewinnungssystemen. So konnte dort eine Absorption von HFO-1234yf durch beschichtete Rotationswärmetauscher festgestellt werden. Weiter konnte im vorliegenden Versuch nach der Absorption eine konstante Hintergrundkonzentration festgestellt werden. Für einen Einsatz der Gastrocknung sowie bei Messversuchen mit beschichteten Rotationswärmetauschern ist diese Absorption weiter zu prüfen. Bis dahin soll aufgrund der Abweichungen bei diesem Rahmenbedingungen auf einen Einsatz von HFO-1234yf verzichtet werden. Die Eindosierung des Tracergases HFO-1234yf mit den vorhandenen Bronkhorst-Dosierventilen stellt kein Problem dar. Die Ventile lassen sich auf das Gas kalibrieren. Als Alternative besteht die Möglichkeit die dosierte Tracergasmenge mittels Umrechnungsfaktor zu bestimmen, auch wenn das Ventil auf ein anderes Gas kalibriert ist. Es wird empfohlen, jene Ventile, welche künftig meist mit HFO-1234yf betrieben werden, entsprechend neu zu kalibrieren. Der Gefahr der Selbstentzündung kann mit organisatorischen Massnahmen entgegengewirkt werden. So ist sicherzustellen, dass sich auch bei etwaiger Fehlfunktion der Dosierung keine explosionsfähige Atmosphäre bilden kann und sich keine Zündquellen im Raum befinden.

Dem Einsatz von HFO-1234yf als Ergänzung und teilweise Ablösung von SF_6 steht somit nichts im Wege. Für einen vollständigen Ersatz bedarf es aber weiterer Untersuchungen hinsichtlich dem Absorptionsverhalten.

9.2 Messverfahren

Die angewendeten Messverfahren orientieren sich an der Norm EN ISO 12569. Die Konstantdosiermethoden der Aufdosierung bis zum Gleichgewichtszustand und das Abklingen ab diesem stellen daraus einfache Methoden zur Bestimmung der Luftwechselrate und des spezifischen Luftvolumenstroms dar. Diese Verfahren wurden bei den Messversuchen angewandt, um zusätzlich die lokale Lüftungseffektivität zu bestimmen. Erfolgt ist dies durch das Aufstellen mehrerer Messpunkte im Raum. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Aufteilung des untersuchten Raumes (oder mehrerer Räume) in besser und schlechter gelüftete Zonen.

Die Pulsmethode eignet sich, nebst der Bestimmung der Luftwechselrate, um die Ausbreitung eines Schadstoffes in einem Raum zu analysieren. So wurde in den Messversuchen mit der Pulsmethode die Ausbreitung von in der Luft mitgetragenen Virenpartikel simuliert. Für eine Analyse der Ausbreitung muss die eindosierten Menge an Tracergas bekannt sein. Dies erfolgte in der letzten Messreihe schliesslich computergestützt, was die einzige Methode darstellt, welche genügend Genauigkeit verspricht. Weiter muss die Messung der Tracergaskonzentration am untersuchten Ort schnell genug sein, um den aufgegebenen Puls abbilden zu können. Ein Messintervall von einer Sekunde zeigt sich als geeignet. Hierzu ist der Einsatz von entsprechendem Equipment notwendig, da festgestellt wurde, dass nicht alle Gasanalysegeräte dieser Anforderung gerecht werden.

9.3 Aussagen hinsichtlich Covid-19

Für die Analyse der Verbreitung von Schadstoffen und darin inbegriffen auch in der Luft mitgetragenen Virenpartikel lässt sich die Pulsmethode heranziehen. Sie kann durch gezielte Eindosierung im Raum die weitere Ausbreitung der Konzentration, deren Verweilen und schliesslich den Abtransport über die Abluft aufzeigen. Eine ursprüngliche Dosierung kann über Gasanalysegeräte nachverfolgt werden und ist skalierbar, um einer effektiven Schadstoff- oder Virenlast gerecht zu werden.

An den drei untersuchten Prüfobjekten konnte anhand der Messungen bestätigt werden, dass eine mechanisch induzierte Verdrängungslüftung die effizienteste Art der Stoffabfuhr darstellt und somit hinsichtlich einer Ansteckung das geringste Gefahrenpotential aufweist. Die erste Untersuchung in der Klimakammer zeigt, dass ohne mechanisch verursachte Luftbewegung, nur aufgrund der Thermik infolge unterschiedlich temperierter Oberflächen, eine rasche Homogenisierung der Raumluft stattfindet. Eine Fensterlüftung mit hohen Fenstern stell für einen kleinen Raum aber bereits eine sehr effiziente Art der Lüftung dar, sofern diese eingesetzt wird. Die Messungen im Suissetec-Schulzimmer zeigen, dass eine gut funktionierende Mischlüftung in der Lage ist, Schadstoffe effizient zu verdünnen und abzuführen. Die Konzentration sinkt dabei stetig, bis auf einen unbedenklichen Wert. Die Lufteinführung ist für diese Lüftungsart jedoch der zentrale Faktor dar, welcher über ein Funktionieren oder Fehlschlagen entscheidet. Im vorliegenden Fall wurde aufgrund der Anordnung der Auslässe eine Kurzschlussströmung begünstigt, welche in Bezug auf den effektiv wirksamen Luftvolumenstrom eine

Halbierung bedeutet hat. Diesem Umstand könnte mit einer verbesserten Anordnung der Auslässe entgegengewirkt werden. Die Messreihe im HSLU-Schulzimmer C210 zeigte, dass dieser Raum über die effizienteste Lüftung unter den drei untersuchten Räumen verfügt. Die Lufteinführung über Stufendurchlässe in der Tribüne der Sitzreihen und die Absaugung der Raumluft über Durchlässe in der Decke erwirkt in den meisten Zonen des Raumes eine Verdrängungslüftung. Nur bei den letzten Sitzreihen bildet sich eine Zone, welche dem Prinzip einer Mischlüftung folgt und dabei schlechter mit Frischluft versorgt wird. Die Lufteinführung in Bodennähe und die durch die Thermik unterstützte Strömung nach oben hin zur Decke sorgen für eine effiziente Schadstoffabfuhr. Die Aussetzung von Schadstoffen aus einem fremden Sitzplatz zum eigenen hin ist damit sehr gering und zeitlich stark begrenzt.

Die Arbeit zeigt damit, dass sich relevante Erkenntnisse hinsichtlich der Verbreitung von Virenpartikel, welche mit der Luft mitgetragen werden, aus Tracergasmessungen ableiten lassen. Es zeigt sich aber auch, dass die Erkenntnisse weit darüber hinaus gehen und Tracergasmessungen daher auch ausserhalb der Coronaviruspandemie relevant sind.

10 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

Dieses Kapitel widmet sich weiterführenden Überlegungen hinsichtlich Tracergasmessungen. Es soll Anstoss für Folgeuntersuchungen sein und damit die Relevanz von Tracergasmessungen in raumlufttechnischen Rahmenbedingungen stärken.

10.1 Verbesserung Pulsmethode zur Leckage-Bestimmung WRG

Die Pulsmethode kann nicht nur für Messungen in Räumen eingesetzt werden, sondern auch für die Leckagebestimmung von Wärmerückgewinnungen. In der Abbildung 46 ist ein möglicher Aufbau dargestellt. Das Tracergas wird in der Aussenluft als Puls aufgegeben und durch die Turbulenzen über den Ventilator homogen im Luftstrom verteilt. Über die Wärmerückgewinnung (WRG) gelangt der Puls in die Zuluft, wo dieser detektiert und die Menge an Tracergas über das Flächenintegral bestimmt wird. Die Pulsaufgabe und die erste Messung der Zuluft sollen dabei dieselbe Menge an Tracergas beinhalten. Eine Abweichung würde eine Undichtigkeit von der Aussenluft hin zur Fortluft bedeuten. Der Luftstrom soll anschliessend über einen Verbindungskanal als Abluft wieder der WRG zugeführt werden. Eine Undichtigkeit von der Abluft hin zur Zuluft würde sich dabei als zweiten Puls an der Zuluftmessstelle bemerkbar machen. Wiederum lässt sich über das Flächenintegral die Menge an Tracergas bestimmen und aus der Differenz der beiden Messungen schliesslich die Leckage. Gegenüber der jetzigen Messmethode über eine konstante Dosierung wäre dabei nur noch ein Bruchteil der ursprünglichen Tracergasmenge nötig. Das Messsetup bedingt aber auch, dass das Gasanalysegerät in der Lage ist, maximal in Sekundenschritten zu messen. Eine weitere Bedingung stellt ein genügend langes Kanalnetz zur klaren Trennung der beiden Puls-Antworten dar, welches selbst über keine Undichtigkeit verfügen darf.

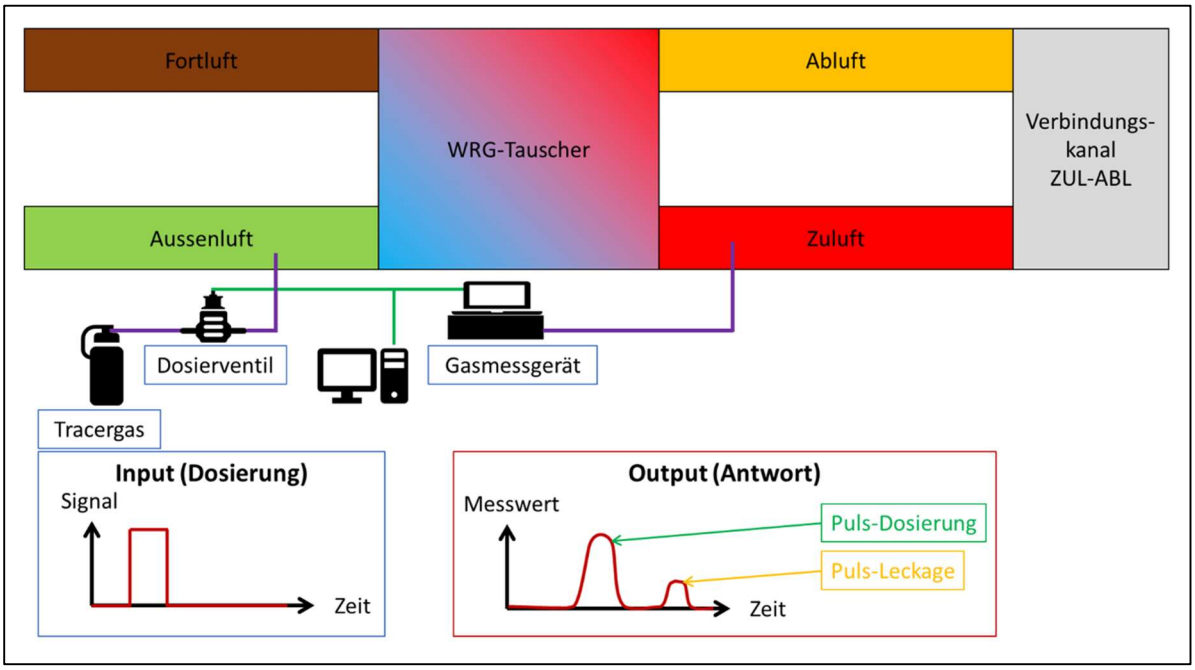


Abbildung 46: Aufbau Leckagebestimmung WRG

10.2 Absorptionsverhalten von HFO-1234yf

Wie in den Untersuchungen festgestellt wurde, kann eine Absorption von HFO-1234yf an mehreren Materialien erfolgen. Namentlich wurde dieses Verhalten in Verbindung mit Blaugel bei der Gastrocknung für die folgende Gasanalyse sowie bei zur Feuchteübertragung beschichteten Rotationswärmetauschern festgestellt. Bei der Gastrocknung wurde, nachdem aufgrund der Absorption zunächst eine zu tiefe Konzentration gemessen wurde, anschliessend eine konstante Hintergrundkonzentration gemessen. Dies führt dazu, dass der Einsatz von HFO-1234yf nur mit diesen Einschränkungen möglich ist. Dieses Verhalten von HFO-1234yf soll in Folgeuntersuchungen ergründet werden. Die Kenntnis über die genauen Vorgänge könnte den Einsatzbereich von HFO-1234yf erweitern und somit eine gänzliche Ablösung vom SF_6 ermöglichen.

10.3 Vergleichbarkeit Tracergase und Aerosole

In Bezug auf die Coronaviruspandemie ist das Verhalten von Aerosolen ein zentraler Faktor. So wird vermutet, dass die Übertragungswege zu beinahe 100% im Inneren stattfinden, wo nebst der direkten Tröpfcheninfektion die Übertragung durch Aerosole die wichtigste Rolle spielt. Das Verhalten von Aerosolen ist allerdings nicht vollständig deckungsgleich mit dem Verhalten von Gasen in der Luft. Die Vergleichbarkeit ist dabei am grössten, wo sich die Aerosole am ehesten an den Bewegungen der Luft orientieren. Starke Raumluftströmungen beispielsweise begünstigen dies; stagnierende Raumluft führt zu einem schnelleren Absinken von Aerosolen. Weitere Faktoren kommen jedoch auch zum Tragen. So ändert sich beispielsweise die Grösse von Aerosolen durch Kondensation und Verdunstung oder durch Koagulation und Abscheidung ständig. Tracergase unterstehen nicht diesen Änderungen. In weiteren Untersuchungen soll daher analysiert werden, inwiefern Tracergasmessungen die Verbreitung von Viren mit grosser Genauigkeit nachbilden können und wo die Grenzen liegen.

Danksagung

Die Autoren dieser Bachelorarbeit bedanken sich herzlich beim Erstbetreuer Heinrich Huber und dem Industriepartner Beat Frei für die stets tatkräftige und zielführende Unterstützung über den gesamten Verlauf der Arbeit und die Möglichkeit, im Rahmen dieser Bachelorthesis ein derart interessantes Thema bearbeiten zu können. Ebenfalls möchte Dank an den Zweitbetreuer Stefan Walser und den Experten Andreas Glauser gerichtet werden, welche durch interessante Fragen während den Zwischenpräsentationen den Diskurs angeregt haben. Die Hilfestellung durch das Prüflabor Gebäudetechnik der Hochschule Luzern Technik & Architektur sei auch verdankt. So standen uns Marie-Theres Moser, Martin Hämmerle und André Lustenberger stets unterstützend zur Seite. Für die Auffrischung der Recherchetechniken möchten wir Hanspeter Quenzer herzlich danken. Und nicht zuletzt möchten wir Anic Sophie Davatz und Jessica Stoller für die investierte Zeit für das Lektorat danken. Vielen Dank möchten wir auch jenen aussprechen, welche hier nicht namentlich erwähnt wurden, uns aber auf unserem Weg des Bachelorstudiums treu begleitet und geschult haben.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitrile Butadiene Rubber)
BaF_2	Bariumfluorid
C_2F_6	Hexafluorethan (Perfluorkohlenstoff PFC-16)
C_2H_4	Ethylen
CF_4	Tetrafluormethan (Perfluorkohlenstoff PFC-14)
CO_2	Kohlenstoffdioxid
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien (Monomer)-Kautschuk
F_2	Fluorgas
FTIR	Fourier-Transform-Infrarot
GC	Gaschromatographie
GC-ECD	Gaschromatographie Elektroneneinfangdetektor
GC-TCD	Gaschromatographie Wärmeleitfähigkeitsdetektor
GHS	global harmonisierte System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
H_2O	Wasser
He	Helium
HFO-1234yf	2,3,3,3-Tetrafluorpropen ($C_3H_2F_4$)
MAK-Wert	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
N_2O	Distickstoffmonoxid
NDIR	nichtdispersiv Infrarot
PTFE	Polytetrafluorethylen
S_2F_{10}	Dischwefeldecafluorid
SF_4	Schwefeltetrafluorid
SF_6	Schwefelhexafluorid
SiO_2	Siliciumdioxid
ULK	Umluftklimagerät
WRG	Wärmerückgewinnung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anforderungen an das perfekte Tracergas 9
Abbildung 2: Verweilzeit im Raum eines Partikels 20
Abbildung 3: Messaufbau Abklingmethode 22
Abbildung 4: Messaufbau Step-Up-Methode 23
Abbildung 5: Messaufbau Pulsdosierungsmethode 25
Abbildung 6: Photoakustische Erkennungstechnik 26
Abbildung 7: Messgerät GASERA ONE inkl. Multipoint-Sampler 27
Abbildung 8: Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer 28
Abbildung 9: Messgerät Gasmet DX4015 29
Abbildung 10: Nichtdispersives Infrarot-Spektrometer 30
Abbildung 11: Messgerät Emerson Rosemount MLT4 31
Abbildung 12: Dosierventil EL-FLOW Select Bronkhorst 32
Abbildung 13: Messprinzip Dosierventil Bronkhorst 33
Abbildung 14: Klimakammer 35
Abbildung 15: Messablauf Klimakammer HFO-1234yf 36
Abbildung 16: Messablauf Klimakammer SF_6 36
Abbildung 17: Rauchversuch Auftriebsströmung 37
Abbildung 18: Rauchversuch Raumluftwalze 38
Abbildung 19: Suissetec-Schulzimmer 40
Abbildung 20: Messablauf Suissetec 3 Inlets SF_6 43
Abbildung 21: Messablauf Suissetec 3 Inlets HFO-1234yf 44
Abbildung 22: Messablauf Suissetec 4 Inlets SF_6 46
Abbildung 23: Messablauf Suissetec 4 Inlets HFO-1234yf 46
Abbildung 24: Messablauf Suissetec 5 Inlets SF_6 48
Abbildung 25: Messablauf Suissetec 5 Inlets HFO-1234yf 48
Abbildung 26: Rauchversuche Suissetec 49
Abbildung 27: Auswertung GASERA ONE hinsichtlich Ansteuerung Umluftklappe 53
Abbildung 28: Screen-Shot Leitsystem und Foto realer Zustand Klappe 54
Abbildung 29: Vergleichsdiagramm 1 GASERA ONE – Gasmet DX4015 55
Abbildung 30: Vergleichsdiagramm 2 GASERA ONE – Gasmet DX4015 56
Abbildung 31: Vergleichsdiagramm 3 GASERA ONE – Gasmet DX4015 56
Abbildung 32: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Dozent 57
Abbildung 33: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Mitte-Mitte 58
Abbildung 34: Visualisierung Tracergas-Abtransport Pulsdosierung Zuluft 59
Abbildung 35: Zoneneinteilung Lüftungseffizienz 60

Abbildung 36: Konstantdosierung Zuluft 1 62
Abbildung 37: Konstantdosierungen Zuluft 2 & 3 62
Abbildung 38: Konstantdosierung Abklingen Zuluft 1 64
Abbildung 39: Konstantdosierung Abklingen Zuluft 2 & 3 64
Abbildung 40: Konstantdosierung Abklingen Dozent 1 & 2 64
Abbildung 41: Prinzipschema Luftaufbereitung (Weg der Leckage) 66
Abbildung 42: Rauchversuch Dozent 67
Abbildung 43: Rauchversuch Raummitte 68
Abbildung 44: Rauchversuch hinterer Teil des Raumes 69
Abbildung 45: Rauchversuch hinterster Teil des Raumes (Stagnation) 69
Abbildung 46: Aufbau Leckagebestimmung WRG 73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tracergase gemäss EN ISO 12569:2017 10
Tabelle 2: Stoffdaten CO_2 11
Tabelle 3: Vergleich HFO-1234yf und SF_6 16
Tabelle 4: SIA 180.213 - EN ISO 12569:2017 - Verfahren, Anwendung und Messgrössen 18
Tabelle 5: Technische Daten Dosierventile Bronkhorst 32
Tabelle 6: Einstellungen Temperatur der Klimakammer 34
Tabelle 7: Pulsdosierungen Suissetec-Schulzimmer 41
Tabelle 8: Spezifischer Luftvolumenstrom GASERA ONE - Standorte Suissetec-Schulzimmer 47
Tabelle 9: Standorte der Messpunkte im HSLU-Schulzimmer 50
Tabelle 10: Übersicht Pulsdosierungen HSLU-Schulzimmer 51
Tabelle 11: Übersicht Konstantdosierungen HSLU-Schulzimmer 52
Tabelle 12: Übersicht Aufdosierung HSLU-Schulzimmer 61
Tabelle 13: Übersicht Abklingen Konstantdosierungen HSLU-Schulzimmer 63
Tabelle 14: Örtliche Lüftungseffektivität und Luftwechselrate HSLU-Schulzimmer 65
Tabelle 15: Leckage-Ermittlung Luftaufbereitungsgerät HSLU-Schulzimmer 66

Literaturverzeichnis

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH (2021): LOW GWP“ HFO UND HFO/HFKW-GEMISCHE. Aspekte zur Entwicklung von HFO- und HFO/HFKW-Kältemitteln. Sindelfingen. Online verfügbar unter https://www.xn--bitzerkltemittelreport-64b.com/kaeltemittel/low-gwp-hfo-und-hfohfkw-gemische/, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Bronkhorst High-Tech B.V. (2021): EL-FLOW Select. Digitale thermische Massendurchflussmesser und -regler für Gase. Niederland: Bronkhorst High-Tech B.V.

Bruker Corporation (2021): FT-IR Spektroskopie Grundlagen. Online verfügbar unter https://www.bruker.com/content/bruker/int/de/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html, zuletzt geprüft am 03.06.2021.

Bundesamt für Gesundheit BAG (2013): Kältemittel HFO-1234yf. Bern, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Bundesamt für Umwelt BAFU (2020): Übersicht über die wichtigsten Kältemittel. Bern, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Christoph Ruhkamp (2011): Gut fürs Klima - aber auch extrem ätzend. Die Autoindustrie bekommt ein neues Kältemittel für Klimaanlagen. Reden will niemand darüber. Hg. v. Frankfurter Allgemeine. Frankfurt. Online verfügbar unter https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/kaeltemittel-r1234yf-gut-fuers-klima-aber-auch-extrem-aetzend-1619905.html, zuletzt aktualisiert am 07.04.2011, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

cold.world GmbH (2021): R1234yf Kältemittel. Berlin. Online verfügbar unter https://cold.world/de/know-how/r1234yf-kaltemittel, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Deutsche Umwelthilfe DUH (2011): Das Kältemittel 1234yf ein Faktenblatt. Unter Mitarbeit von Patrick Huth. Berlin. Online verfügbar unter https://www.autoklimaanlage.info/fileadmin/user_upload/pdfs/Faktenblatt_1234yf_270812.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Dr. Ralf Arnold: Prinzip der FTIR-Spektroskopie. Online verfügbar unter http://www.ir-spektroskopie.de/spec/ftir-prinzip/index.html, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Edouard, Nadège; Mosquera, Julio; van Dooren, Hendrik J.C.; Mendes, Luciano B.; Ogink, Nico W.M. (2016): Comparison of CO2- and SF6- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn. In: *Biosystems Engineering* 149 (10), S. 11–23. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001.

Emerson Electric Co (2021): Rosemount™ MLT4 Kontinuierliche Gasanalysatoren. Online verfügbar unter https://www.emerson.com/de-ch/catalog/rosemount-mlt4-continuous-gas-analyzers-de-de, zuletzt geprüft am 03.06.2021.

Fachverband Gebäude-Klima e. V. (Hg.) (2021): Anforderungen an Lüftung und Luftreinigung zur Reduktion des Infektionsrisikos über den Luftweg. FGK-Status-Report 52 und Covid 19. Nr. 372. Bietigheim-Bissigen: Fachverband Gebäude-Klima e. V., zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Gasera Headquarters (2019): Gasera One User Manual. Finland: Publisher Gasera Ltd.

Gasmet Technologies GmbH (2019): Tragbarer Multikomponenten FTIR-Gasanalysator Gasmet DX4015. Karlsruhe: Gasmet Technologies GmbH. Online verfügbar unter https://www.gasmet.com/de/produkte/category/gas-analysatoren/ftir-gasanalysator-dx4015/, zuletzt geprüft am 03.06.2021.

Grieve, P. W. (1990): Lüftungsmessungen mit Spurengasen. Dänemark: Bruel and Kjaer, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Honeywell (2008): 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene, HFO-123yf. Safety data sheet. 1.11. Aufl.: Honeywell, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

IFA Gestis-Stoffdatenbank (2021): Kohlendioxid. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Online verfügbar unter https://gestis.dguv.de/data?name=001120, zuletzt aktualisiert am 03.06.2021.

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG (2021): Das Kältemittel R 1234yf und seine Eigenschaften. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www.infraserv.com/de/leistungen/facility-management/expertenwissen/f-gase/kaeltemittel/spezifische-kaeltemittel/, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

J. Schnitzer; M. Schuh (2016): Tracergasgestützte Evaluierung einer Brandentrauchung. Pinkafeld. Online verfügbar unter https://people.fh-burgenland.at/bitstream/20.500.11790/1457/4/9783701103720_117.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Kiehl, J. T.; Trenberth, Kevin E. (1997): Earth's Annual Global Mean Energy Budget. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78 (2), S. 197–208. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2.

Kriegel, Martin; Hartmann, Anne (2021): Vorhersage des Infektionsrisikos durch Aerosolpartikel. In: *HLH* 72 (01-02), S. 18–21. DOI: 10.37544/1436-5103-2021-01-02-18.

SIA 382/1, 2017: Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen.

LUMITOS AG (2007): Kohlensäure. Online verfügbar unter https://www.chemie.de/lexikon/Kohlens%C3%A4ure.html, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Mats Sandberg (1992): VENTILATION EFFECTIVENESS AND PURGING FLOW RATE -A REVIEW. Tokyo: University of Tokyo. Online verfügbar unter https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_6012.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Messer Schweiz AG (2019): Schwefelhexafluorid UHP. SF6. Lenzburg: Messer Schweiz AG.

Mikola, Alo; Kõiv, Teet-Andrus; Rehand, Juhan; Voll, Hendrik: The Usage of CO2 Tracer Gas Methods for Ventilation Performance Evaluation in Apartment Buildings. In: The Usage of CO2 Tracer Gas Methods for Ventilation Performance Evaluation in Apartment Buildings, S. 37.

Multigas (2018a): Sicherheitsdatenblatt. HFO-1234yf: Multigas.

Multigas (2018b): Sicherheitsdatenblatt. SF6: Multigas.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Supplementary Material. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment: Cambridge University Press, Cambridge, United.

Persily, A. K.; Axley, J. (1990): Measuring Airflow Rates with Pulse Tracer Techniques. In: M. H. Sherman (Hg.): Air Change Rate and Airtightness in Buildings. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 31-31-22.

Stephan Schmidt (2003): Entwicklung von Zweikomponentenverfahren für die nichtdispersive IR-Spektroskopie (NDIR) mit Hilfe von chemometrischen Methoden. Duisburg: Universität Duisburg-Essen.

The Usage of CO2 Tracer Gas Methods for Ventilation Performance Evaluation in Apartment Buildings.

VDI-Wärmeatlas. Stoffdaten CO2 (2013a). 11. bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

VDI-Wärmeatlas. Stoffdaten HFO1234yf (2013b). 11. bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Walter C. Schumb; McGraw-Hill (2009): Inorganic Syntheses. 3 Bände: John Wiley & Sons, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

EN ISO 12569:2017, 01.04.2018: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstrom in Gebäuden - Indikatorgasverfahren.

Werner Frei; Unifil AG Filtertechnik (2020): Wirkungsvolle Luftfilter. Hg. v. Unifil AG Filtertechnik. Online verfügbar unter https://www.unifil.ch/media/downloads/PR/Phase5-Wirkungsvolle_Luftfilter.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2021.

Willigert Raatschen (1988a): Was ist Lüftungseffektivität. 1. Teil: Ki Klima - Kälte - Heizung.

Willigert Raatschen (1988b): Was ist Lüftungseffektivität. 2. Teil: Ki Klima - Kälte - Heizung.

Willigert Raatschen (1988c): Was ist Lüftungseffektivität. 3. Teil: Ki Klima - Kälte - Heizung.

Yukihiro Hashimoto (2007): Study on the pulse method for a displacement ventilation system. Japan: Polytechnic University.

Anhang

Anhang A Allgemein

- Terminprogramm

Anhang B Messung Klimakammer

- Test-Setup
- Laborbericht Klimakammer
- Handskizzen Klimakammer

Anhang C Messung Suissetec-Schulzimmer

- Test-Setup
- Laborbericht Suissetec-Schulzimmer
- Handskizzen Suissetec-Schulzimmer

Anhang D Messung HSLU-Schulzimmer

- Test-Setup
- Laborbericht HSLU-Schulzimmer
- Handskizzen HSLU-Schulzimmer

Anhang E Arbeitsmittel – Ergänzungen zu Kapitel 5

- Technische Daten Gasanalysegeräte
- Umrechnungsfaktor Bronkhorst-Ventil
- Daten Dummies
- Bilder sonstige Arbeitsmittel