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

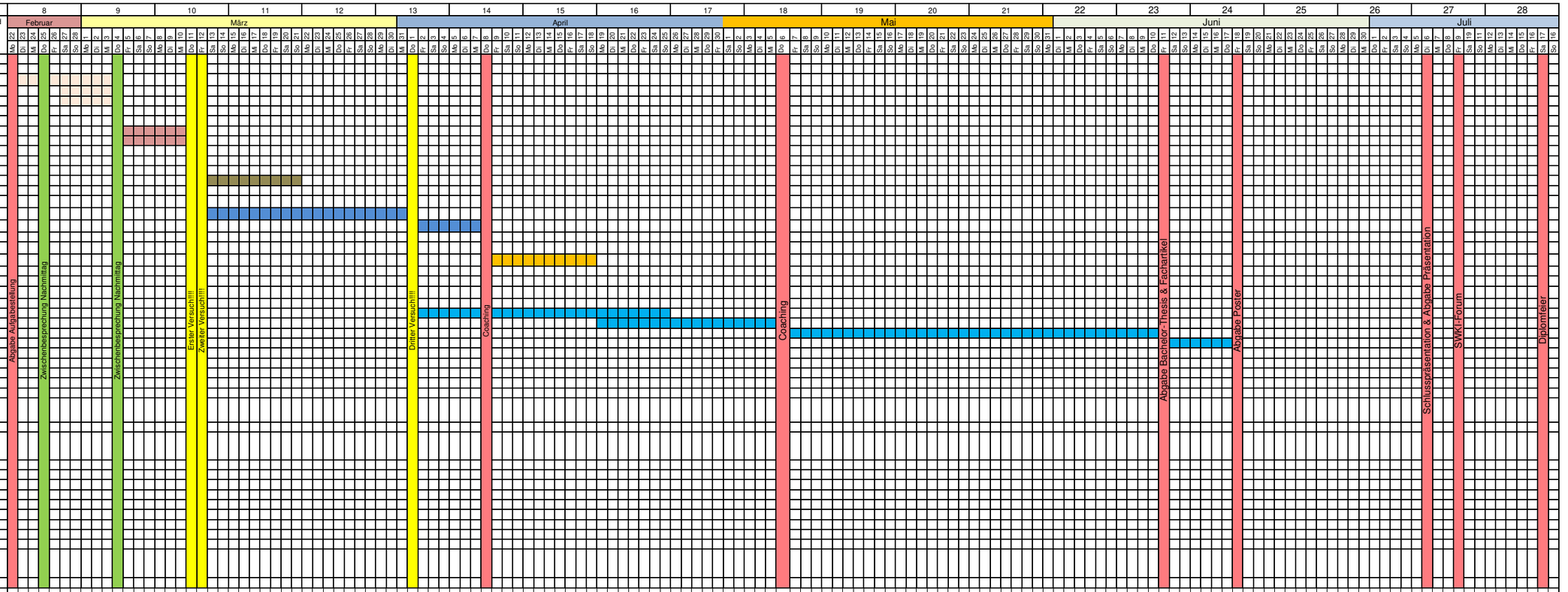
Anhang D Messung HSLU-Schulzimmer

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

Anhang E Arbeitsmittel – Ergänzungen Kapitel 5

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

Team 7		KW
Terminplan 2021 Bachelor-Thesis Was ist zu tun?	Zeitaufwand geschätzt pro Student	Zeitaufwand effektiv
Recherche und Einarbeitung		
Einlesen des Materials	20	5
Rechereche der Messmethode	10	
Vergleichsversuch	5	
Messtechnik		
Messmethode	10	
Laborbericht vorbereitung	5	
Testmessung unter Laborbedingungen		
Messung 1: inkl. Fazit	15	
Messungen in realen Räumen		
Messung 2: inkl. Fazit	20	
Messung 3: inkl. Fazit	30	
Auswertung und Bericht		
Gesamt Auswertung und Berichtverfassung	40	
Bachelorarbeit erstellen		
Arbeit erstellen	95	
Arbeit durchlesen	30	
Arbeit abschliessen	60	
Präsentation vorbereiten	20	
Total	360	5



Anhang

Anhang A Allgemein

- Terminprogramm

Anhang B Messung Klimakammer

- Test-Setup
- Laborbericht Klimakammer
- Handskizzen Klimakammer

Anhang C Messung Suissetec-Schulzimmer

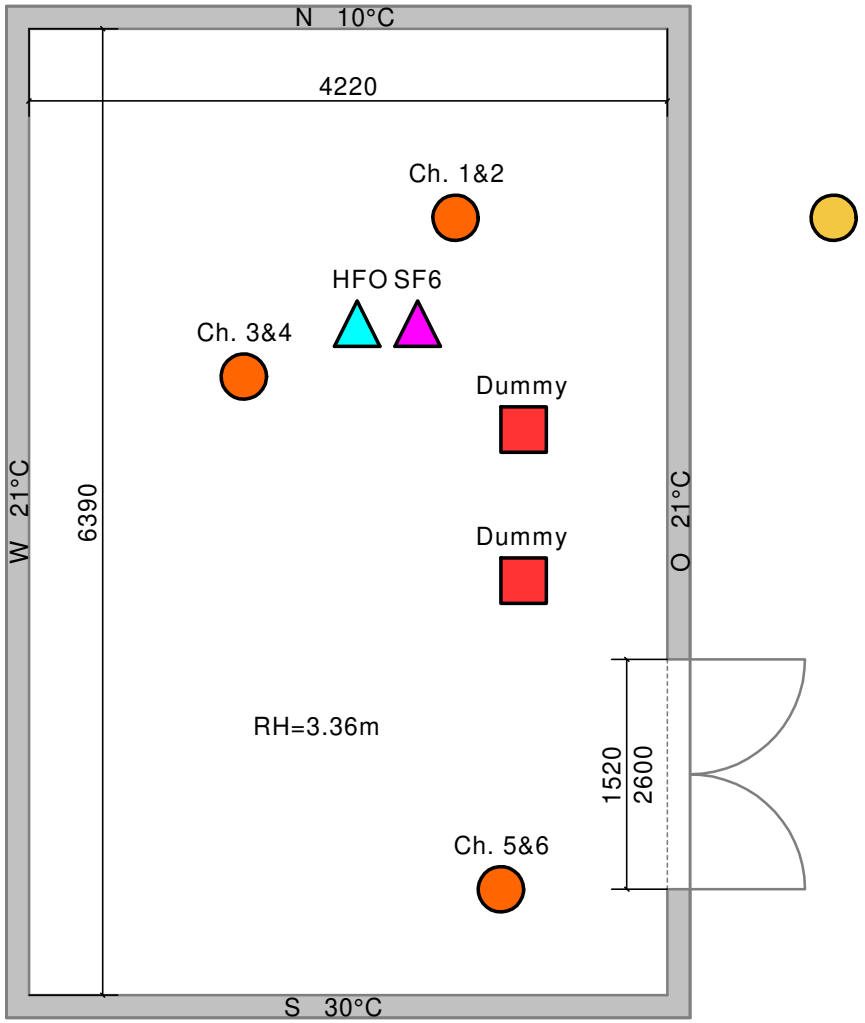
- Test-Setup
- Laborbericht Suissetec-Schulzimmer
- Handskizzen Suissetec-Schulzimmer

Anhang D Messung HSLU-Schulzimmer

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

Anhang E Arbeitsmittel – Ergänzungen Kapitel 5

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



Ablaufprotokoll

Datum Durchführung: 11.03.2021

10:05 Uhr Start Nullmessung
10:22 Start Eindosierung 60s (SF6 undicht)
10:23 Ende Eindosierung (SF6 undicht)
10:35 Beheben Undichtigkeit SF6-Ventil
10:35 Start Auslüften (Türe öffnen)
10:46 Türen geschlossen / Lüftung AUS
10:46 Start Eindosierung
11:26 Öffnung Eingangstüre komplett
11:51 Ende Eindosierung
13:24 Ende der Messung

Einstellwerte Eindosierventile

SF6: 5 mg/s (Kalibriert)
HFO: 4.5mg/s (Kalibriert (mit Umrechnungsfaktor))
(Kalibrierung HFO gleich wie SF6)

- Messstelle Aussen (Logger) [°C, %r.F., ppm CO2]
- Messstelle Innen (Gasera-MP & Logger) (+1.0m & +2.2m OKB) [ppm SF6, ppm HFO1234yf, ppm H2O, °C, %r.F., ppm CO2]
- Dummy (Wärmequelle - Mensch)
- Eindosierung [SF6]
- Eindosierung [HFO1234yf]

Versuchsaufbau & Messablauf Klimakammer

Klimakammer, HSLU T&A, 6048 Horw

Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021

Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A4
Massstab	1:50
Datum	21.03.2021
Typ	Grundriss
Plan Nr.	001

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion

Hochschule Luzern
HSLU

Technik & Architektur

Abteilung Gebäudetechnik

Laborbericht Nr: 001

Aufgabe:	**Tracergasmessungen in der Klimakammer**
Prüfobjekt:	**Klimakammer**
Auftraggeber:	**HSLU T&A Abteilung Gebäudetechnik**
Namen:	**Moritz Bienz** **Kevin Bucheli**
Datum:	**Horw, 2021-03-11**

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract ... 3
2. Auftraggeber ... 4
2.1. Hochschule: ... 4
2.2. Industriepartner: ... 4
3. Auftrag ... 4
3.1. Auftrag Klimakammer ... 4
4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung ... 5
5. Prüfverfahren ... 5
6. Tracergasmessung ... 6
6.1. Tracergasmessung in der Klimakammer ... 6
6.1.1. Rahmenbedingungen ... 6
6.1.2. Test-Setup ... 7
6.1.3. Resultate ... 8
7. Qualitative Untersuchungen und Beobachtungen ... 9
7.1. Rauchversuch in der Klimakammer ... 9
7.1.1. Rahmenbedingungen ... 9
7.1.2. Test-Setup ... 9
7.1.3. Beschreibung der Strömung ... 9
8. Diskussion und Empfehlung ... 11
8.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit in der Klimakammer ... 11
9. Fazit ... 12
10. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung ... 13
11. Anhang 2, Messdaten Tracergas ... 14
11.1. Klimakammer Gesamtverlauf mit dem Tracergas SF6 ... 14
11.2. Klimakammer Gesamtverlauf mit dem Tracergas HFO1234yf ... 14
11.3. Klimakammer Abklingverhalten mit dem Tracergas HFO1234yf ... 15
11.4. Klimakammer Abklingverhalten mit dem Tracergas SF6 ... 15
11.5. Klimakammer Abklingverhalten Vergleich Tracergas HFO1234yf und SF6 ... 16
11.6. Klimakammer Vergleich Inlet SF6 / HFO1234yf ... 18
12. Anhang 3, Fotos ... 21
12.1. Messung vom 11.03.2021 ... 21
12.1.1. Klimakammer Fotos ... 21
12.1.2. Klimakammer Wärmebildaufnahmen ... 24
13. Abbildungsverzeichnis ... 26
14. Tabellenverzeichnis ... 26

1. Abstract

Im Rahmen der eingangs erwähnten Bachelorarbeit, wurde in der Klimakammer des Prüflabors der Hochschule Luzern T&A die erste Messreihe durchgeführt, um die Handhabung der Geräte und Instrumente zu proben und für die weiteren Messungen zu optimieren. Durch die Messungen konnten weiter bereits einige Schlüsse in Bezug auf die Vergleichbarkeit der beiden untersuchten Tracergase SF6 und HFO1234yf gezogen werden. Und nicht zuletzt konnten auch hinsichtlich der im weiteren Verlauf der Bachelorarbeit wichtigen Puls-Methode wichtige Erkenntnisse gemacht werden.
Während des gesamten Messablaufes wurde ein einmalig aufgestelltes Mess-Setup betrieben und lediglich die Rahmenbedingungen darum verändert. Dazu wurde zunächst bei geschlossenen Türen und ausgeschalteter Lüftungsanlage konstant aufdosiert. Dies erfolgte mit beiden Tracergasen parallel. Anschliessend wurde bei weiterlaufender Eindosierung die Eingangstüre zur Klimakammer geöffnet, um eine Fensterlüftung zu simulieren. Und zuletzt wurde die konstante Eindosierung abgebrochen, um die Abklingkurve durch die Fensterlüftung zu ermitteln.
Während des gesamten Versuches wurden die beiden Tracergase parallel, simultan eindosiert. Daraus liess sich bei der Auswertung dann ablesen, dass sich beide Tracergase im Raum praktisch identisch verhalten und die Vergleichbarkeit somit gegeben ist.
Auf den Raum bezogen kann aufgrund der Messungen die Aussage getroffen werden, dass die Temperierung der Wandoberflächen der Klimakammer eine gute Möglichkeit darstellt, reale Situationen nachzustellen. So konnte im Versuch aufgrund der asymmetrischen Temperierung der Wände eine schöne Raumluftwalze erzeugt werden, welche aufgrund der Tracergasmessungen verifiziert werden konnte. Die simulierte Fensterlüftung über die Eingangstüre ist sehr effizient, jedoch stark von den Raumkonditionen in der Laborhalle abhängig. (Temperaturdifferenzen zwischen Laborhalle und Klimakammer)
Zuletzt kann bezogen auf die Messmethodik bereits jetzt erkannt werden, dass die Messintervalle des Gasera One mit seinem Multipoint-Sampling und den ca. 60s Zeitbedarf pro Messintervall bei der als nächstes intensiv thematisierten Puls-Methode nicht genügen. So besteht die Gefahr, dass bei kurzen Impulsen der eigentliche Peak eines Pulses vom Gasera One verpasst wird und die Interpretation den Messwerte somit stark verfälscht wird. Für die bis anhin etablierte Abkling-Methode, wie auch für die ebenfalls weiters analysierte Aufdosier-Methode kann gut mit den Gasera One gearbeitet werden. Hier zeigt sich auch der Vorteil des Multipoint-Samplings, mit dem mehrere Messpunkte im Raum analysiert werden können, um die lokalen Vorgänge besser beschreiben zu können.

2. Auftraggeber

2.1. Hochschule:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Erstbetreuer: Heinrich Huber heinrich.huber@hslu.ch
Zweitbetreuer: Stefan Walser stefan.walser@hslu.ch

2.2. Industriepartner:

FREI WÜEST EXPERT
Ingenieurbüro
Gutachten – Expertisen – Forschung – Normierung
Geissburghalde 11
6130 Willisau
Beat Frei, beat.frei@frei.expert

3. Auftrag

Mit der Bachelorarbeit soll das neue Tracergas HFO-1234yf (Tetrafluorpropen) mit sehr geringem Treibhauspotenzial zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität erprobt werden. Als Referenz-Tracergas wird Schwefelhexafluorid (SF6) verwendet. Von besonderem Interesse ist die Ausbreitung von SARS-CoV-2 Aerosolen in belegten Räumen. Dies kann mit einer punktförmigen HFO-1234yf-Tracergas-Quelle mit konstanten oder pulsförmigen Emissionen und einer lokal verteilten Detektion mit Mehrpunkt-Sampling untersucht werden. Eine erste Anwendung sind Schulzimmer und Büroräume. Wesentlich interessanter ist aber der Einsatz in grossen Räumen (Versammlungsräume, Einkaufszentren, Sporthallen, Restaurants, …). Neben der Tracergas-Messung sollen ergänzende Verfahren zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Raumluftströmungen eingesetzt werden (Rauch, Laser, ev. lokale Raumluftgeschwindigkeit)

3.1. Auftrag Klimakammer

Im Vordergrund der Messungen in der Klimakammer steht der Vergleich des neuen Tracergases HFO-1234yf (Tetrafluorpropen) mit dem bewährten SF6 (Schwefelhexafluorid). Es soll das Verhalten der beiden Tracergase verglichen werden, mit Hilfe einer konstanten Aufdosierung im Raum. Weiter soll damit auch die Verteilung der Tracergase ab der Eindosierstelle im Raum untersucht werden und inwiefern diese mit dem zur Verfügung stehenden Messgerät (Multiport-Sampling – Gasera) sinnvoll ermittelt und aufgezeichnet werden kann.

4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung

Das Prüfobjekt ist die Klimakammer der Hochschule Luzern. Dieser 6.39x4.22x3.36m grosse Raum kann durch eine Lüftungsanlage mit Zu- & Abluft versorgt werden und steht im Labortrakt der Hochschule Luzern (Raum-im-Raum). Zusätzlich können die Raumwandtemperaturen individuell einzeln reguliert und geregelt werden, um so das Szenario eines realitätsgetreuen Raumes zu simulieren.

Klimakammer
Labor HLKS (Trakt I)
Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw

Die Messungen wurden am 11.03.2021 vormittags durchgeführt.

5. Prüfverfahren

Zur Prüfung der Tracergase und der Erfassungsart wurde die Methode der konstanten Aufdosierung im Raum angewendet. Über eine simulierte Fensterlüftung (Türöffnung) wurde die Abklingmethode angewendet, da die Lüftungsanlage nicht in Betrieb war.
Gemessen wurde mit dem Messgerät «Gasera One» mit dem Multipoint-Sampler, der die Analyse von mehreren Messpunkten in nur einem einzigen Mess-Setup zulässt. Die grafische Auswertung erfolgte im MS Excel.

6. Tracergasmessung

6.1. Tracergasmessung in der Klimakammer

6.1.1. Rahmenbedingungen

Im Labortrakt (faktisch Aussenbedingungen) herrschte während der Messung eine Temperatur von 23.0°C (±0.2K) mit einer Luftfeuchtigkeit von 35.0% (±2.8%) und einer CO2-Konzentration von 570ppm (±38ppm).
Die Lüftung der Klimakammer war über die gesamte Messung abgeschaltet.
Für die Messungen wurden die Flächenheizungen der Wände eingesetzt, welche individuell eingestellt wurden gemäss den Test-Setup-Rahmenbedingungen. Ziel war es, über die so entstehende Luftzirkulation durch die Thermik eine schnellere Durchmischung der Raumluft zu erreichen.
Bei jedem Standort der Messgeräte für das Tracergas und ausserhalb der Klimakammer wurden Kleindatenlogger zur Registrierung der Raumtemperatur platziert. Die Positionen sind in der Abbildung 1 ersichtlich. Die Temperatur, relative Feuchte und die CO2-Konzentration sind in der untenstehenden Tabelle 1 ersichtlich. Dies sind Momentaufnahmen gegen Ende der Messung um 11:30 Uhr und zeigen die Konditionen bei soeben frisch geöffneten Türen. Da der Schwankungsbereich der Temperaturmessungen über die gesamte Messdauer bei nur gerade ±0.4K gelegen hat, können die Temperaturwerte als Mittelwerte betrachtet werden.

Tabelle 1: Datenlogger

Datenlogger	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]	CO2-Konzentration
Aussen (Laborhalle)	23.1	34.9	570
Ch. 1&2	20.1	43.1	827
Ch. 3&4	21.3	37.1	727
Ch. 5&6	22.3	35.0	704

Die Raumabmessungen der Klimakammer betragen 6.39x4.22x3.36m (LxBxH). Die Wandtemperaturen wurden gem. der untenstehenden Tabelle 2 Temperaturwerten zu Anfang der Messung eingestellt und nicht mehr verändert. Mit einer Wärmebildkamera wurden die eingestellten Temperaturwerte überprüft.

Tabelle 2: Temperierung Oberflächen 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	

6.1.2. Test-Setup

Im Raum wurde an einer Position mit den zwei unterschiedlichen Tracergase (SF6 und HFO-1234yf) aufdosiert. Die Messstellen der Tracergase wurde an 6 Stellen im Raum ausgeführt. Im Grundriss sind die drei verschiedenen Positionen ersichtlich, welche auf jeweils zwei unterschiedlichen Höhe einen Messpunkt vorweisen. Es wurde je ein Messpunkt auf 1.00m Höhe und ein Zweiter auf 2.20m Meter positioniert.
Bei der Messung befanden sich zwei Personen im Raum, welche eine lokale Erwärmung zur Folge haben. Diese sind als «Dummy» eingezeichnet.
Um 10:22 wurde begonnen, die beiden Tracergase zugeführt (Aufdosierung). Jedoch wurde durch die hohe Konzentration des Tracergases SF6 schnell bemerkt, dass ein Leck in der Schlauchverbindungen zwischen Gasflasche und Dosierventil vorhanden ist. Die Messung wurde daraufhin unterbrochen und die Undichtheit wurde um 10:35 behoben. Danach wurde ausgelüftet und um 10:46 erneut mit der Aufdosierung begonnen. Um 11:26 wurde die Eingangstüre geöffnet und eine natürliche Lüftung fand statt. (Simulation Fensterlüftung) Um 11:51 wurde die Dosierung gestoppt.
In der untenstehenden Abbildung 1 ist der Versuchsaufbau & Messablauf in der Klimakammer detailliert beschrieben.

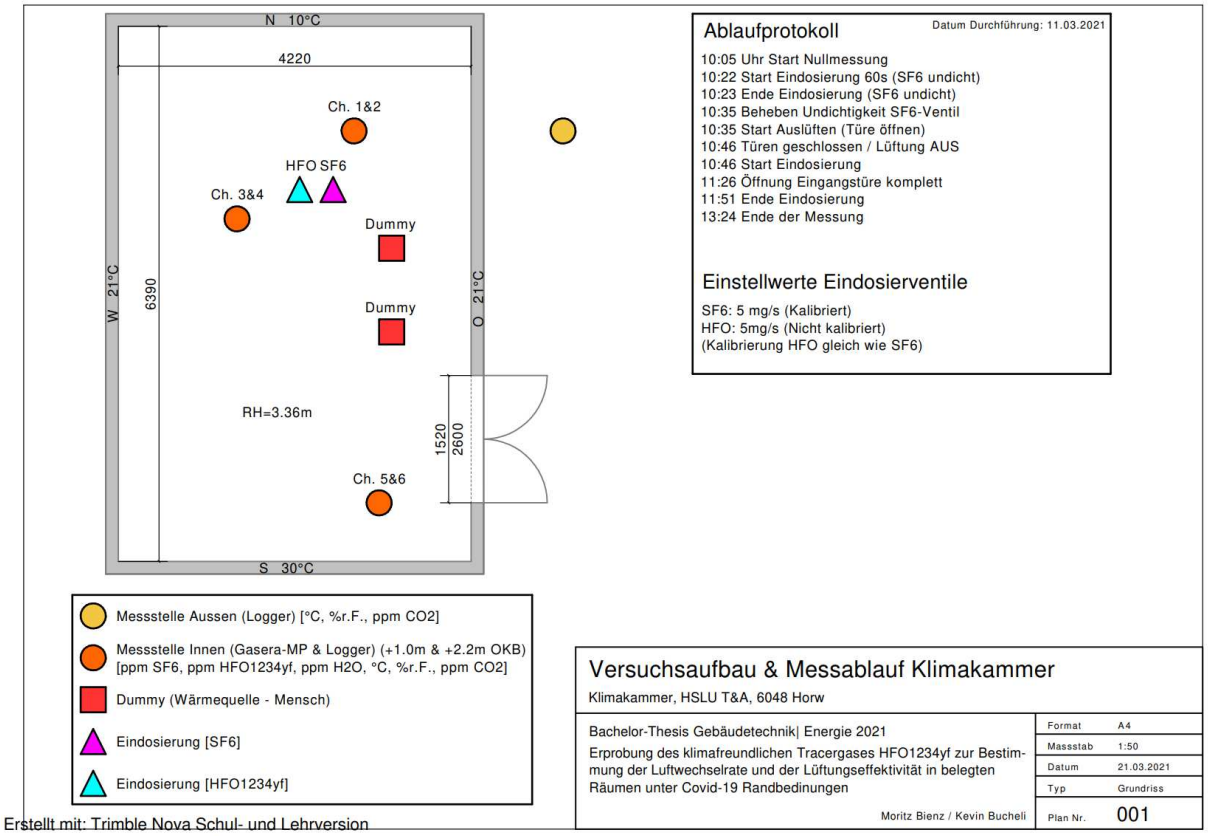


Abbildung 1: Versuchsaufbau

6.1.3. Resultate

Der zeitliche Verlauf ist im Anhang 2 dargestellt. Nebst den einzelnen Verläufen ist damit auch der Vergleich der beiden Tracergase möglich.

Anhand der Abklingkurve konnte ein Luftwechsel zwischen 2 und 3 h^-1 ermittelt werden (Durchschnitt über Betrachtungsperiode: 2.649 h^-1). Bei einem ungefähren Raumvolumen (anhand der Planungsunterlagen) von 91m^3 ergibt das jeweils einen Zu- & Abluft-Volumenstrom durch die Türöffnung von ca. 240 m^3/h.

Im Vergleich der beiden Tracergase gemäss Anhang 2 ist ersichtlich, dass sich beide Tracergase im Raum ähnlich und fast identisch verhalten. Dies ist durch den gemeinsamen Anstieg und der stark übereinstimmenden Abklingkurve ersichtlich.

Aufgrund der Tatsache, dass die Tracergas-Konzentrationen an sämtlichen Messstellen jeweils rasch 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 auch den sehr geringen räumlichen Abmessungen der Klimakammer geschuldet.

7. Qualitative Untersuchungen und Beobachtungen

7.1. Rauchversuch in der Klimakammer

7.1.1. Rahmenbedingungen

Die Lüftung wurde nicht betrieben, wie bei der Tracergasmessung. Die Rauchversuche fanden zeitlich parallel zu den Tracergasmessungen statt.
Die mittlere Raumlufttemperatur, gemessen in der Mitte des Raumes betrug rund 21°C. Aufgrund der unterschiedlichen Temperierung der Wandoberflächen stellte sich ein Temperaturverlauf von nordseitig 20°C bis südseitig 22°C ein.

7.1.2. Test-Setup

Die Rauchversuche wurden am 11.03.2021 zwischen 11:40 Uhr bis 11:50 Uhr durchgeführt.
Neben dem Eingang der Klimakammer, im Bereich der Messtellen 5&6, wurde die Rauchmaschine aufgebaut. Da der Rauch sehr gut zu sichten ist, wurde kein Laser für verbesserte Visualisierung eingesetzt: Die Versuche wurden mit Hilfe von Videoaufnahmen dokumentiert und Ausschnitte wurden für den Laborbericht festgehalten.

7.1.3. Beschreibung der Strömung

Die Strömung im 3.36 Meter hohen Raum ist durch die thermischen Randbedingungen gegeben. In der Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die Luft an die Decke steigt durch die im Raum stattfindende Erwärmung durch Apparate und Personen. In der Abbildung 3 ist ersichtlich, dass sich eine Walze im Raum bildet, welche die warme Luft an der Decke 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 der realen Situation einer Raumluftwalze mit einer kälteren Aussenwand im Winter nachempfunden. Die thermischen Verhältnisse sind zusätzlich im Anhang 3 anhand der Wärmebildaufnahmen ersichtlich.

Abbildung 2: Rauchversuch Thermik

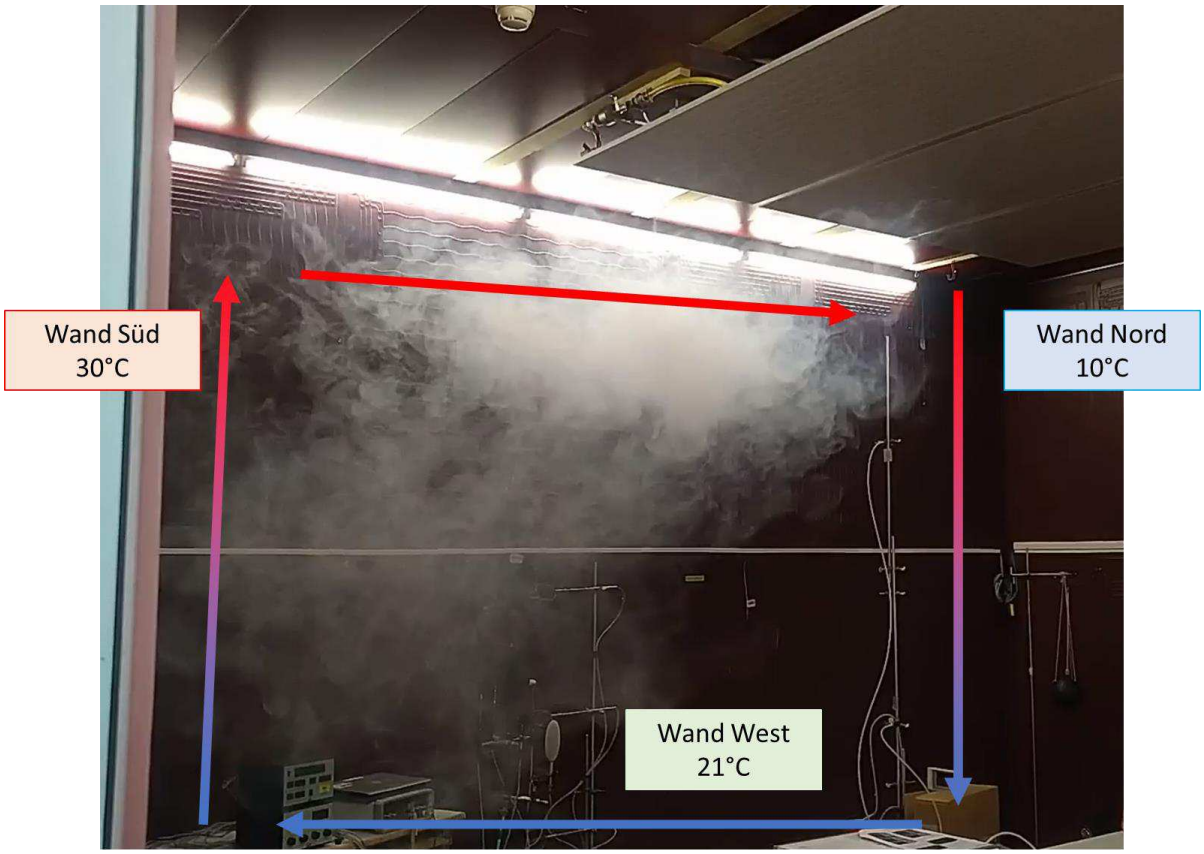


Abbildung 3: Rauchversuch Raumluftwalze

8. Diskussion und Empfehlung

8.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit in der Klimakammer

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 trotzdem, dass der Messpunkt 6 sowohl bei der Aufdosierung wie auch bei der Abklingkurve die Veränderung als erstes durchmacht, was dafür spricht, dass sich die mit Tracergas versetzte Luft anhand der Raumluftwalze fortbewegt. Die Durchmischung setzt anschliessend allerdings rasch ein. Weiter deuten die Messwerte an den Messpunkten 3 & 4 ebenfalls auf die Raumwalze zwischen Süd und Nord hin; sie liegen bezüglich Konzentration bei der Aufdosierung beide deutlich hinter den übrigen Messpunkten. Zu erklären ist dies, da die Eindosierstellen hinsichtlich der Raumluftwalze in einer Linie zu den Messpunkten 1 & 2, sowie 5 & 6 liegen, nicht aber auf der Linie der Messpunkte 3 & 4.

Es ist weiter ersichtlich, dass bei beiden Tracergasen nach dem Öffnen der Türe die Konzentration an den oben (+2.20m ab Boden) angebrachten Messpunkten schneller abnimmt als an den unten (+1.00m ab Boden) angebrachten. Dies kann damit begründet werden, da Aussen (in der Laborhalle) eine höhere Temperatur herrschte als in der Klimakammer. (ca. 2K) Somit strömte gerade beim Öffnen der Türe und kurz danach die Luft aus dem Labor oben in die 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 allerdings ab.

Die Lüftungswirksamkeit der simulierten Fensterlüftung mit einem ca. 2.6-fachen Luftwechsel stellt für diesen Raum mit dem 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.

9. Fazit

Das Ziel der Messung war vordergründig das Kennenlernen der Messeinrichtungen und deren korrekter Einsatz. Weiter sollten Erkenntnisse für die weiteren anstehenden Messungen gewonnen werden, um die Messmethoden hinsichtlich derer zu verfeinern und zu optimieren. Beides ist gelungen.
So wurden nebst der Handhabung des Multipoint-Samplers «Gasera» auch diverse weitere Hilfsmittel zur Bestimmung verschiedenster raumlufttechnischer Phänomene erfolgreich eingesetzt. Darunter die Visualisierung der Raumluftströmungen mittels Nebelmaschine oder der Einsatz von Datenloggern für die Ermittlung von Temperatur, Feuchte- und den CO2-Gehalt.
Die wichtigste Erkenntnis aus diesem Versuch ist die Erfahrung, welch grosser Nutzen durch die minutiöse Planung eines Messversuches generiert werden kann. So kann durch einen geeigneten Ablauf der Erkenntnisgewinn einer Messreihe massiv erhöht werden. In diesem Messversuch führte der fehlende Gleichgewichtszustand des natürlich belüfteten Raumes dazu, dass die Aussagekraft der Abklingmethode stark abnimmt.
Auch zeichnet sich bereits in diesem Versuch ab, dass hinsichtlich der als nächstes zu prüfenden Impulsmethode das Multipoint-Sampling Gasera an seine Grenzen gerät, da die Werte schlicht in einer zu geringen Frequenz registriert werden. Die Messdauer pro Messpunkt von rund einer Minute ist hierfür zu lang. Die Möglichkeit, mit weniger Messpunkten trotzdem noch verwertbare Resultate hinsichtlich der Impulsmethode zu erhalten, wird weiter geprüft.

10. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung

Die allgemeine Formel zur Bestimmung einer Stoffkonzentration in der Raumluft ist gemäss SIA 382/1:2014:

$$C_{IDA,t} = \left(C_{IDA,0} - C_{ZUL} - \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}}\right) \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + C_{ZUL} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \quad (1)$$

oder

$$C_{IDA,t} = C_{IDA,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) + C_{ZUL} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) \quad (2)$$

dabei ist

$C_{IDA,t}$	mittlere Stoffkonzentration im Raum (gemessen in der Abluft) zur Zeit t, in ppm
$C_{IDA,0}$	Stoffkonzentration im Raum zur Zeit t = 0, in ppm
C_{ZUL}	Stoffkonzentration in der Zuluft, in ppm
G	Stoffemission im Raum, in ppm
$q_{v,ZUL}$	Zuluftvolumenstrom, in m3/h
V_R	Raumvolumen, in m3
t	Zeit, in h

Bemerkung: In dieser Form gilt die Gleichung nur konstante Werte von $CZUL$, G und qv,ZUL. Zudem wird in dieser Schreibform eine Mischlüftung vorausgesetzt.

Abklingmethode

Bei der Abkling-Methode ist: G = 0 und C_{ZUL} = 0 (Wie dicht war der Bypass?). Somit ist

$$C_{RAL,t} = C_{RAL,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} \quad (3)$$

Konstante Dosierung

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

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

wobei

$C_{IDA,\infty}$	Stoffkonzentration in der Raumluft im Gleichgewichtszustand, in ppm
n	Exponent für rechnerischen Luftwechsel, in h-1

Bemerkung: Die Funktion von Gleichung 4 kann sinngemäss auch zur Beurteilung von lokalen Stoffkonzentrationen verwendet werden.

Lokale Lüftungswirksamkeit

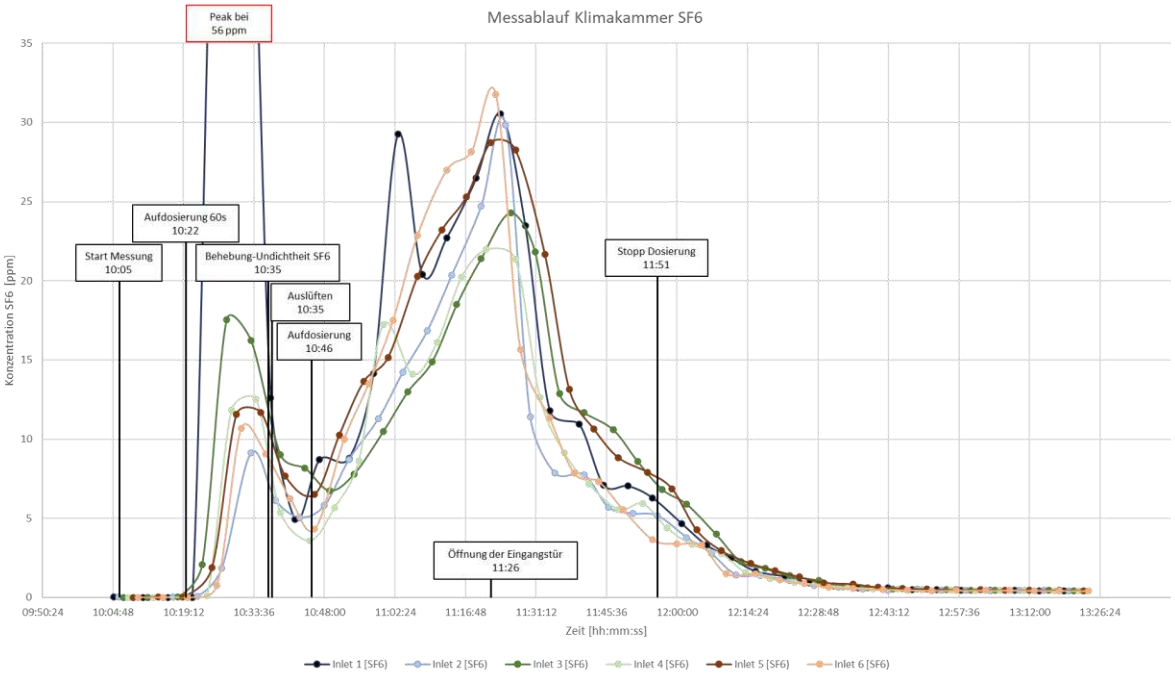
$$\varepsilon_{C,i} = \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{C_{IDA,i} - C_{SUP}}$$

wobei

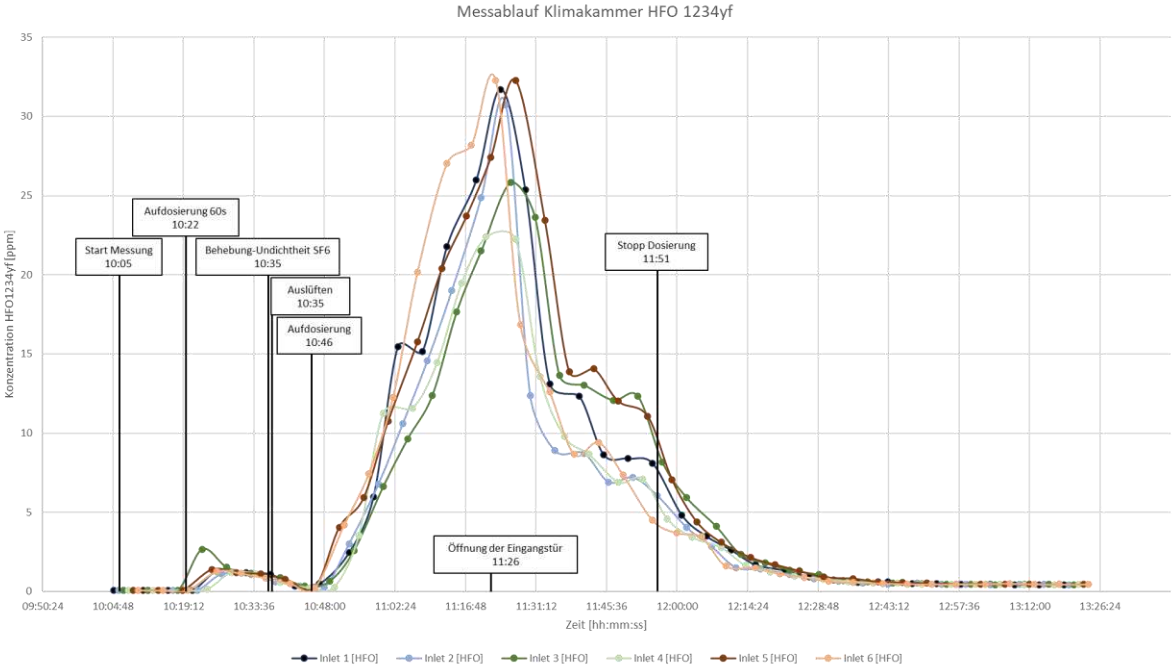
$\varepsilon_{C,i}$	Lüftungswirksamkeit an der Position i
C_{ETA}	Verunreinigungskonzentration der Abluft, in ppm
$C_{IDA,i}$	Verunreinigungskonzentration der Raumluft an der Position i, in ppm
C_{SUP}	Verunreinigungskonzentration der Zuluft, in oder ppm

11. Anhang 2, Messdaten Tracergas

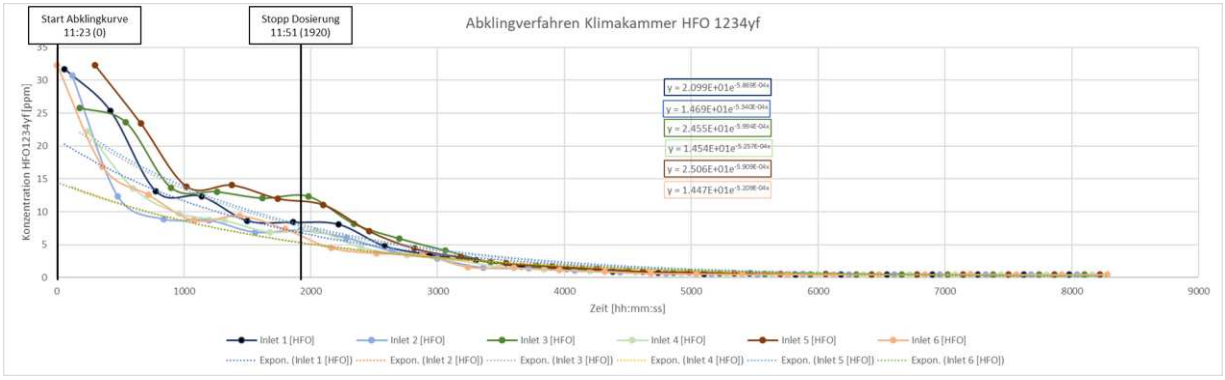
11.1. Klimakammer Gesamtverlauf mit dem Tracergas SF6

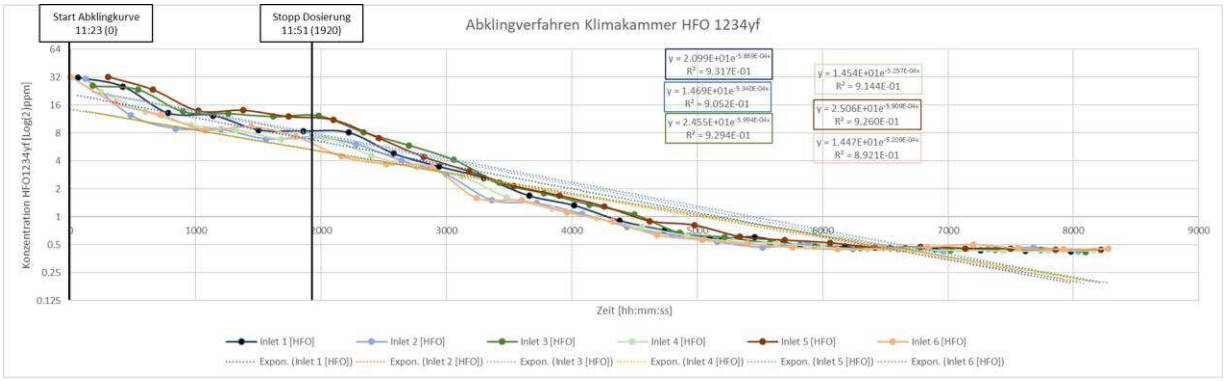


11.2. Klimakammer Gesamtverlauf mit dem Tracergas HFO1234yf

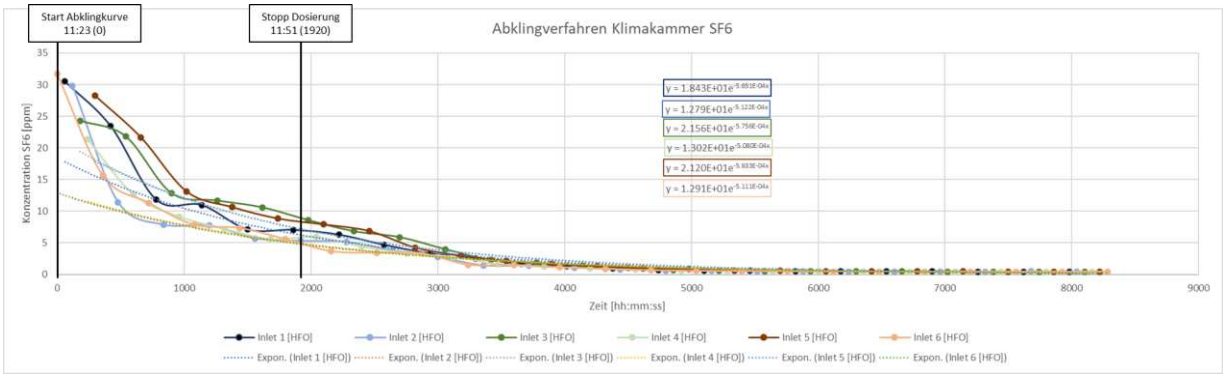


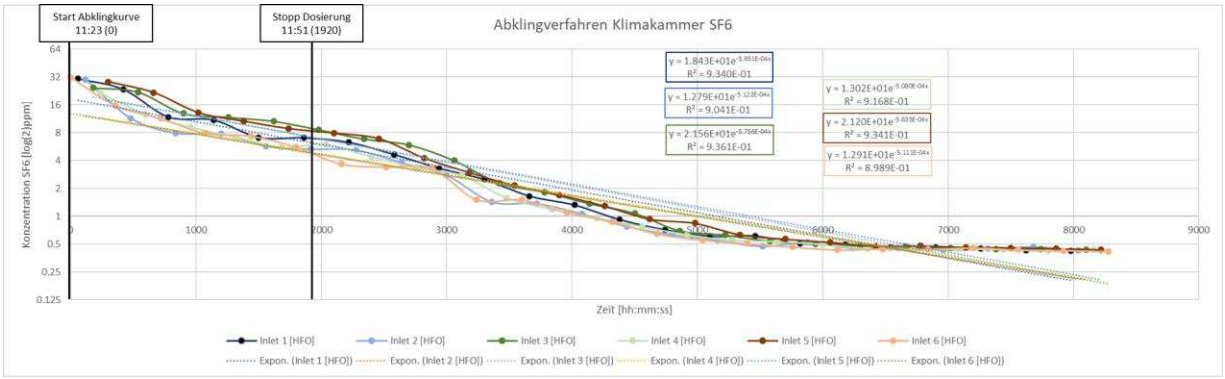
11.3. Klimakammer Abklingverhalten mit dem Tracergas HFO1234yf





11.4. Klimakammer Abklingverhalten mit dem Tracergas SF6





11.5. Klimakammer Abklingverhalten Vergleich Tracergas HFO1234yf und SF6

Es ist wichtig zu sagen, dass das Abklingverfahren durch den «Stopp Dosierung» verfälscht wird. Da jedoch beide Eindosierungen zeitgleich gestoppt wurden, wird angenommen, dass die Verfälschung in beiden Messungen gleich ist. So sind die Abklingformeln nicht vollkommen aussagekräftig und nur für den Vergleicht von Bedeutung. Dies ist auch in den Diagrammen anhand der Standartabweichung von bis zu 0.89 ersichtlich.

Tabelle 3: Formel Abkling-Methode gesamter Zeitraum

Inlet	Formel HFO	Basis	Exponent	Formel SF6	Basis	Exponent
Inlet 1	$20.99*e^{-5.869E-04x}$	20.99	-0.0005869	$18.43*e^{-5.651E-04x}$	18.43	-0.0005651
Inlet 2	$14.69*e^{-5.340E-04x}$	14.69	-0.000534	$12.79*e^{-5.122E-04x}$	12.79	-0.0005122
Inlet 3	$24.55*e^{-5.994E-04x}$	24.55	-0.0005994	$21.56*e^{-5.756E-04x}$	21.56	-0.0005756
Inlet 4	$14.54*e^{-5.257E-04x}$	14.54	-0.0005257	$13.02*e^{-5.080E-04x}$	13.02	-0.000508
Inlet 5	$25.06*e^{-5.909E-04x}$	25.06	-0.0005909	$21.20*e^{-5.633E-04x}$	21.20	-0.0005633
Inlet 6	$14.47*e^{-5.209E-04x}$	14.47	-0.0005209	$12.91*e^{-5.111E-04x}$	12.91	-0.0005111
Mittelwert		19.05	-0.00055963		16.65166	-0.000539217

In der untenstehenden Tabelle ist der Volumenstrom mit Hilfe berechnet über das Abklingverfahren.

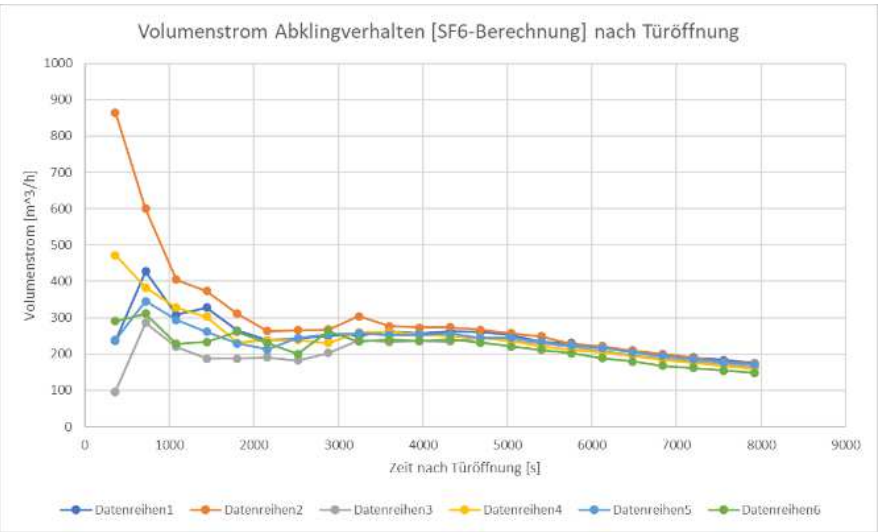


Abbildung 4: Volumenstrom Abklingverfahren SF6 ab Türöffnung

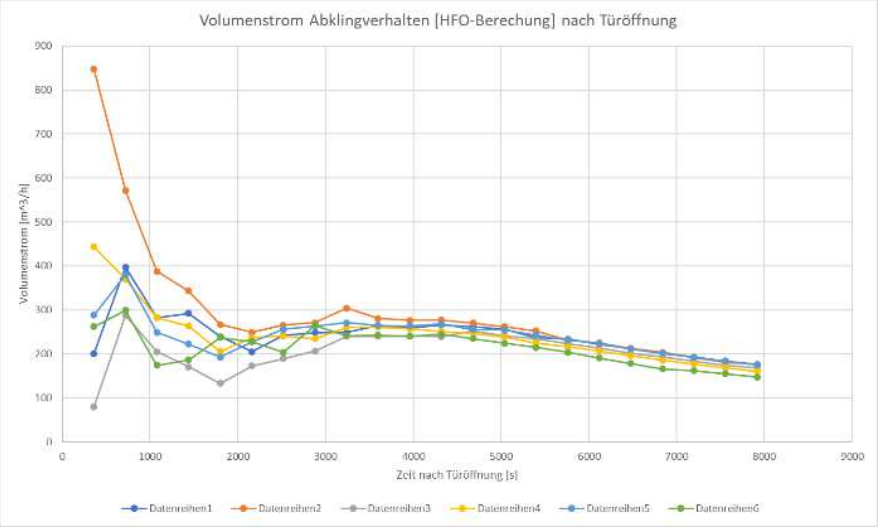


Abbildung 5 Volumenstrom Abklingverfahren HFO ab Türöffnung

Für eine verbesserte Analyse des Abklingverhaltens wird der «Nullpunkt» - Start Abklingkurve auf den Zeitpunkt des Stopps der Eindosierung gelegt. Allerdings führt der fehlende wirkliche Gleichgewichtszustand im belüfteten (Fensterlüftung) Raum auch hier zu einer Verfälschung der Resultate, welche somit nur bedingt zur Weiterverwendung und Analyse geeignet sind.

Tabelle 4: Formel Abkling-Methode ab Stopp Eindosierung

Inlet	Formel HFO	Basis	Exponent	Formel SF6	Basis	Exponent
Inlet 1	$7.806*e^{-8.652E-04x}$	7.806	-8.65E-04	$6.82717*e^{-8.11E-04x}$	6.82717	-8.11E-04
Inlet 2	$6.142*e^{-7.351E-04x}$	6.142	-7.35E-04	$5.214*e^{-6.79E-04x}$	5.214	-6.79E-04
Inlet 3	$1.054*e^{-8.550E-04x}$	10.54	-8.55E-04	$8.848*e^{-7.87E-04x}$	8.848	-7.87E-04
Inlet 4	$5.895*e^{-6.995E-04x}$	5.895	-7.00E-04	$5.391*e^{-6.66E-04x}$	5.391	-6.66E-04
Inlet 5	$9.159*e^{-7.744E-04x}$	9.159	-7.74E-04	$8.016*e^{-7.26E-04x}$	8.016	-7.26E-04
Inlet 6	$4.707*e^{-6.335E-04x}$	4.707	-6.34E-04	$4.229*e^{-6.05E-04x}$	4.229	-6.05E-04
Mittelwert		7.37483	-0.0007604		6.4208616	-0.00071203

In der untenstehenden Tabelle ist der Volumenstrom mit Hilfe berechnet über das Abklingverfahren.

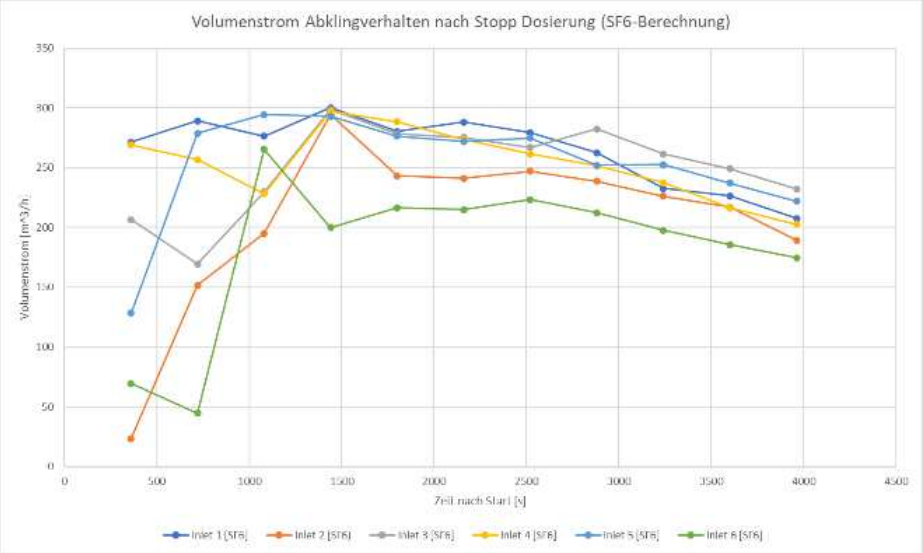


Abbildung 6: Volumenstrom Abklingverfahren SF6 ab Stopp Dosierung

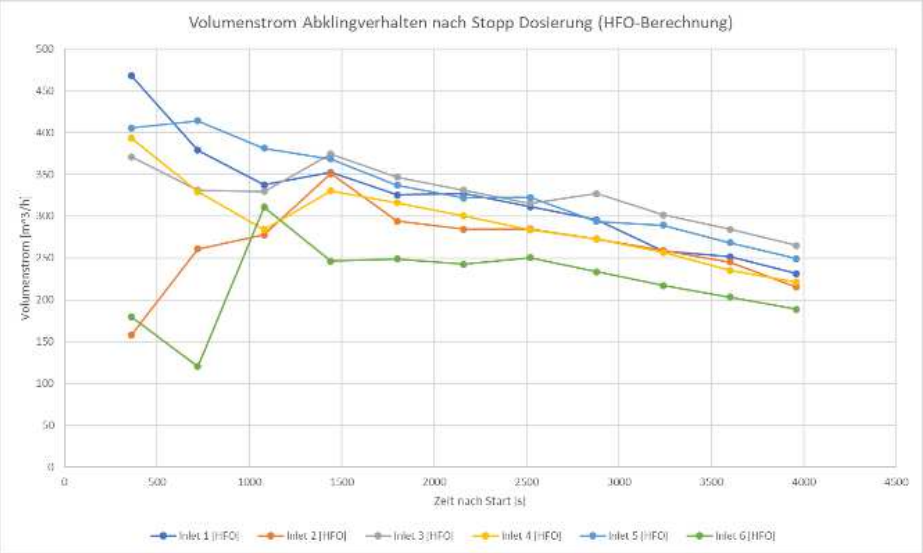
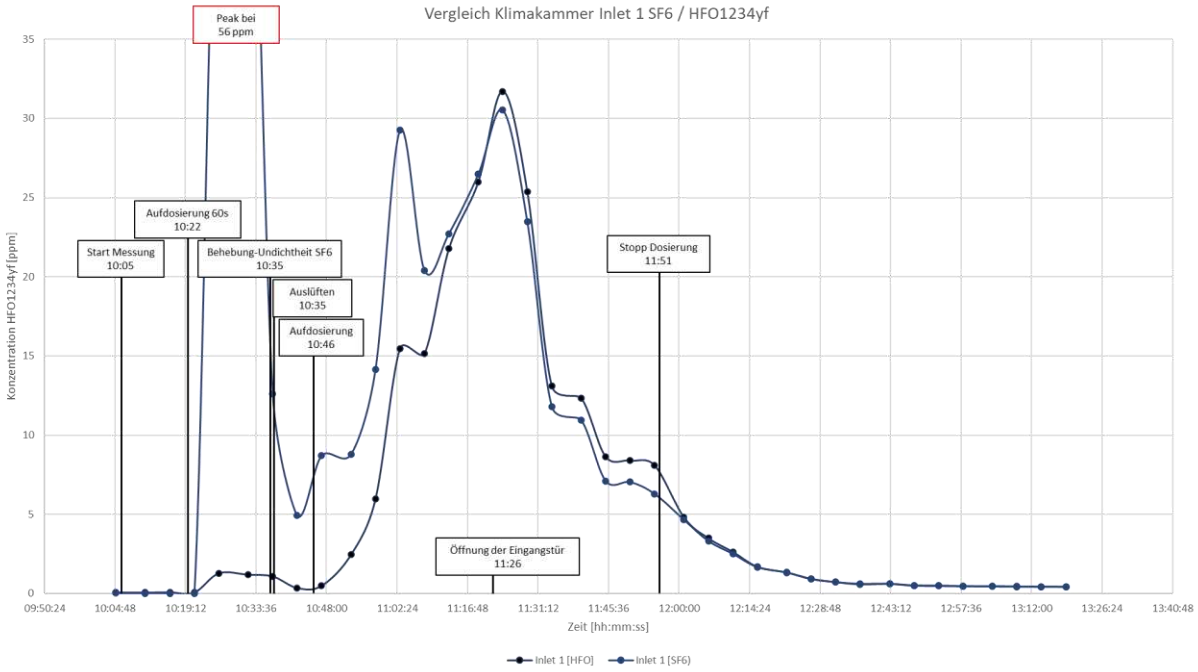
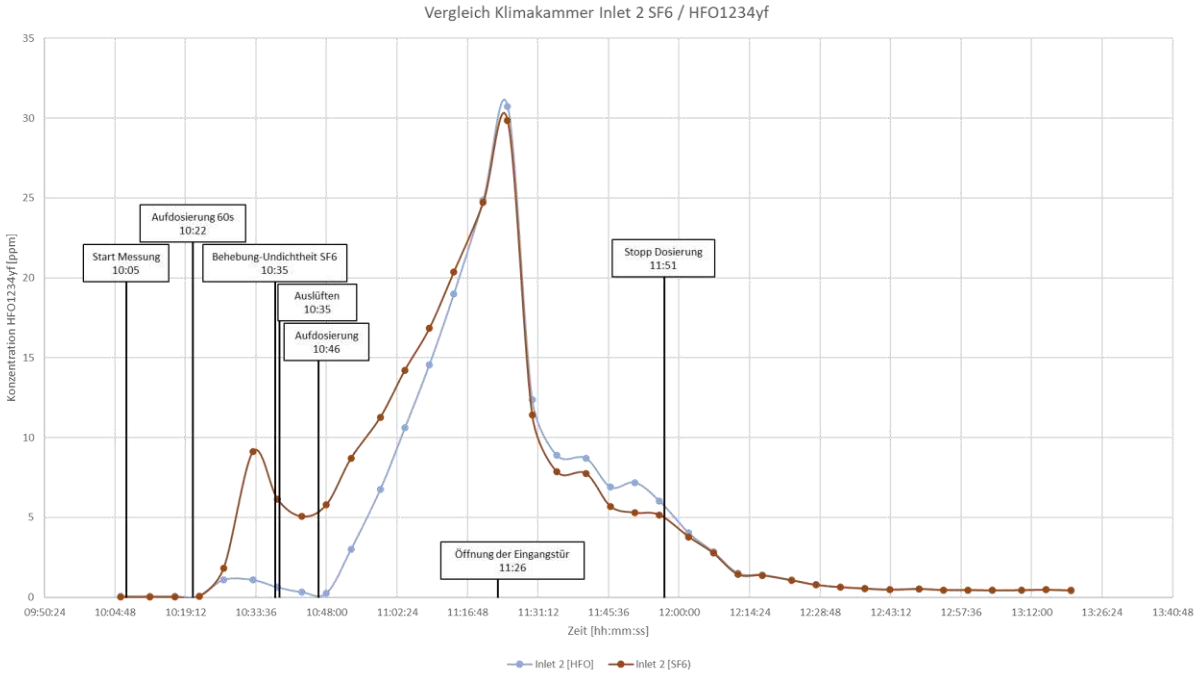
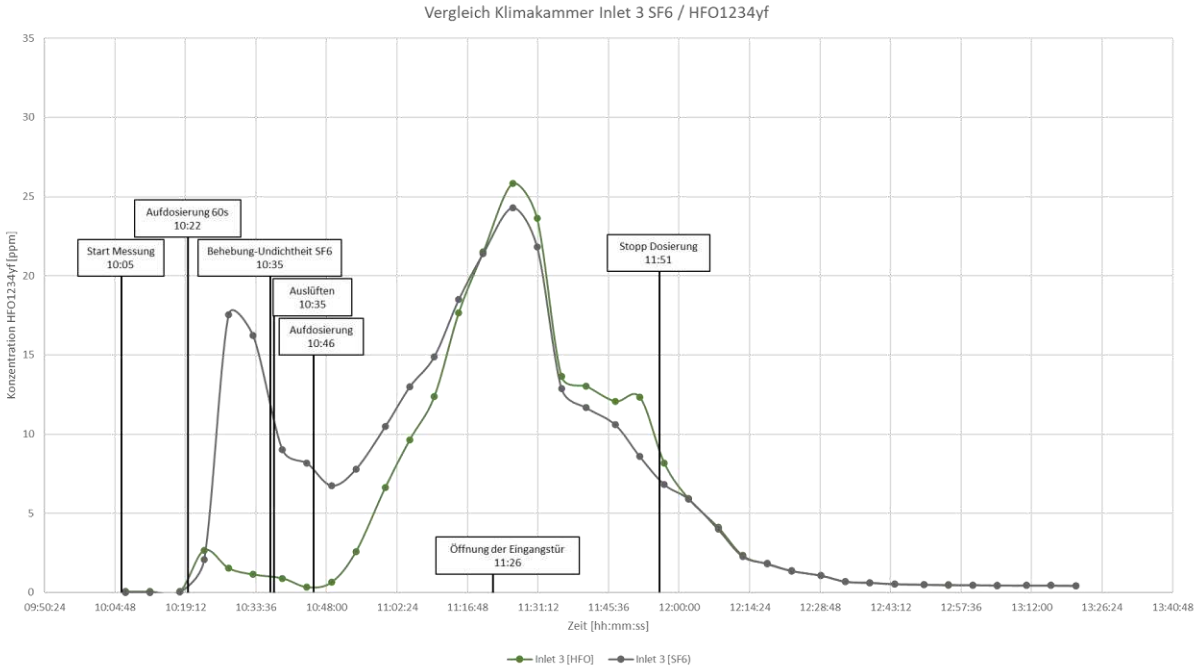


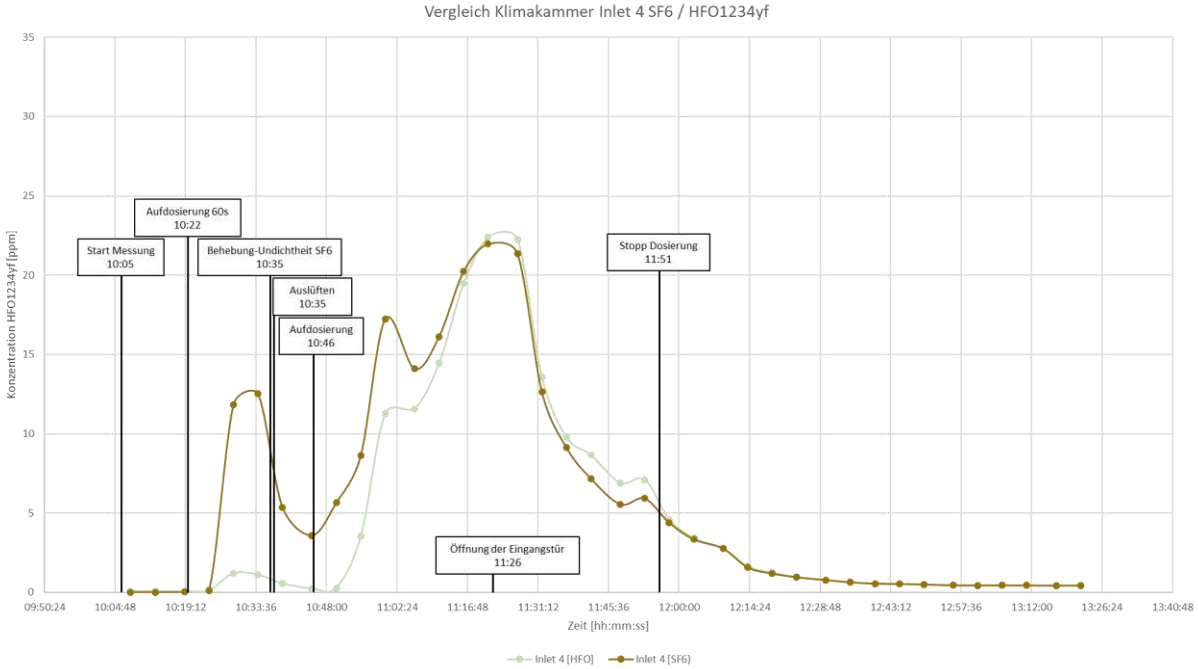
Abbildung 7: Volumenstrom Abklingverfahren HFO ab Stopp Dosierung

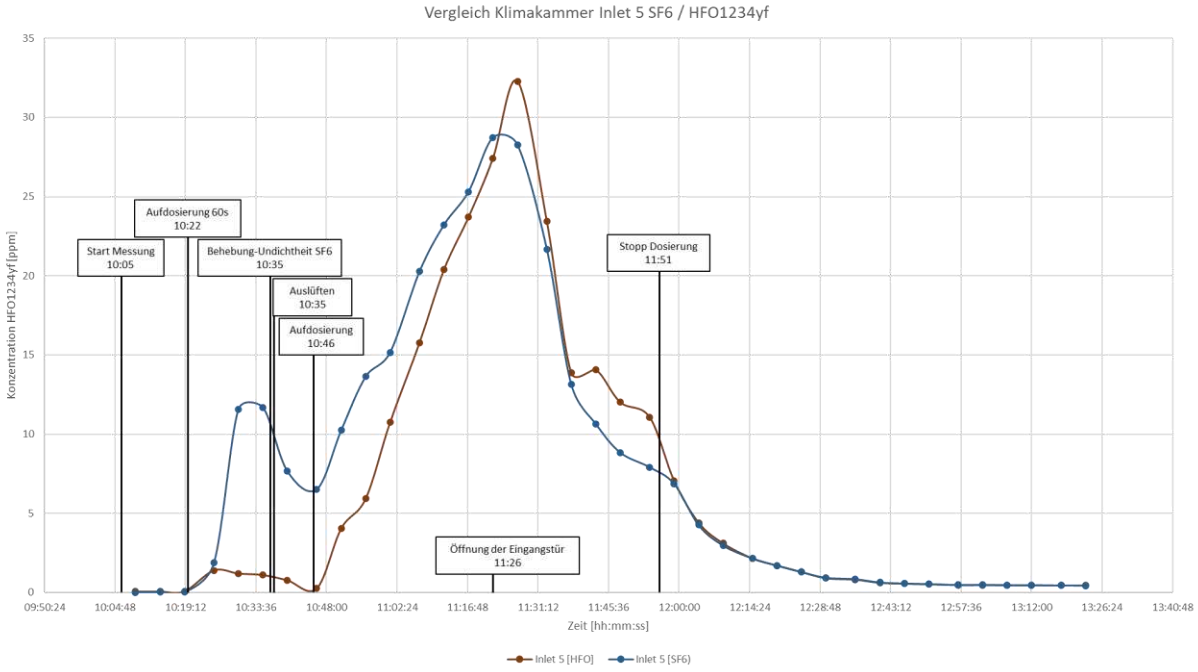
11.6. Klimakammer Vergleich Inlet SF6 / HFO1234yf

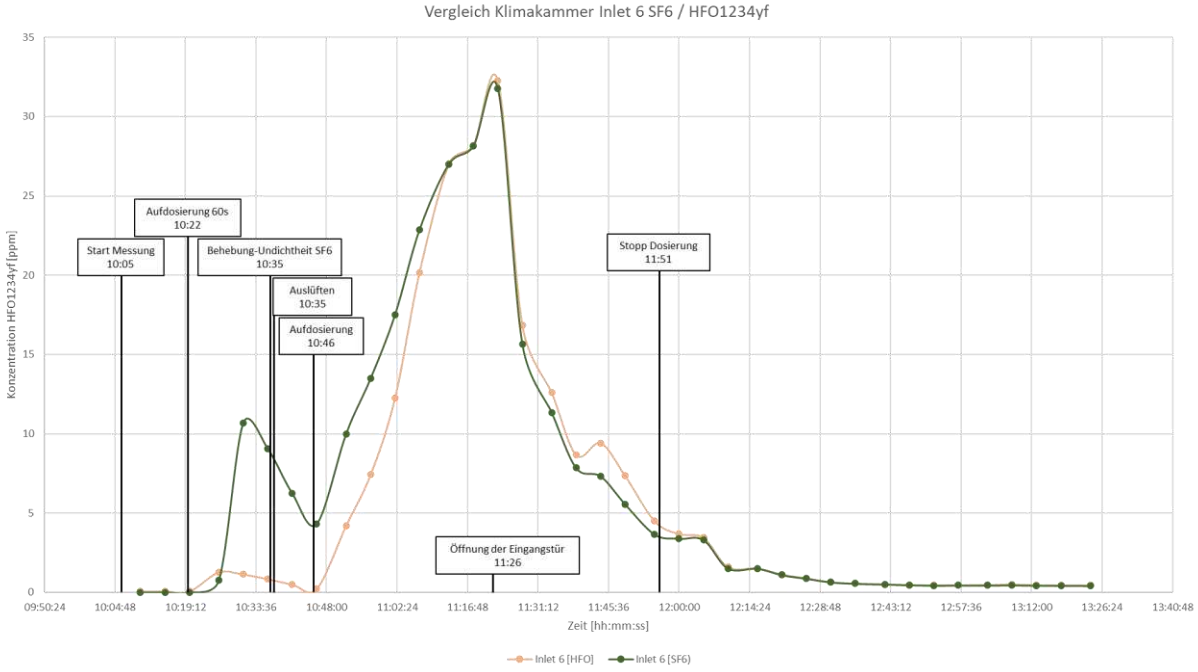





Vergleich Klimakammer Inlet 3 SF6 / HFO1234yf
Konzentration HFO1234yf [ppm]
Aufdosierung 60s
10:22
Start Messung
10:05
Behebung-Undichtheit SF6
10:35
Auslüften
10:35
Aufdosierung
10:46
Stopp Dosierung
11:51
Öffnung der Eingangstür
11:26
Zeit [hh:mm:ss]
Inlet 3 [HFO]
Inlet 3 (SF6)


Vergleich Klimakammer Inlet 4 SF6 / HFO1234yf
Konzentration HFO1234yf [ppm]
Aufdosierung 60s
10:22
Start Messung
10:05
Behebung-Undichtheit SF6
10:35
Auslüften
10:35
Aufdosierung
10:46
Stopp Dosierung
11:51
Öffnung der Eingangstür
11:26
Zeit [hh:mm:ss]
Inlet 4 [HFO]
Inlet 4 (SF6)

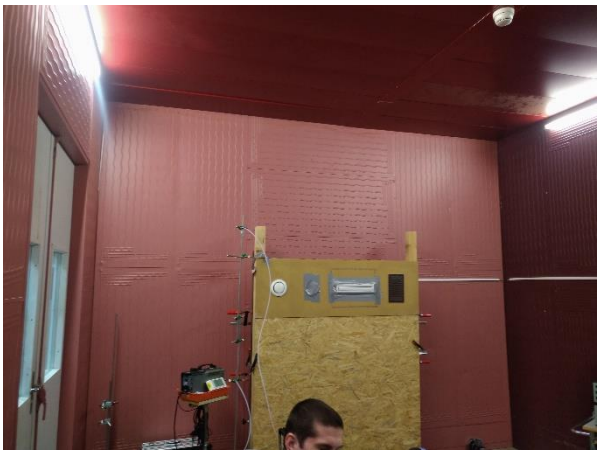

Vergleich Klimakammer Inlet 5 SF6 / HFO1234yf
Konzentration HFO1234yf [ppm]
Zeit [hh:mm:ss]
Aufdosierung 60s 10:22
Start Messung 10:05
Behebung-Undichtheit SF6 10:35
Auslüften 10:35
Aufdosierung 10:46
Stopp Dosierung 11:51
Öffnung der Eingangstür 11:26
Inlet 5 [HFO]
Inlet 5 (SF6)

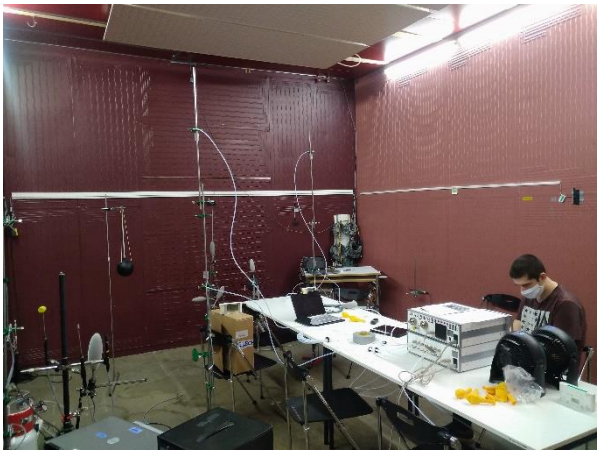
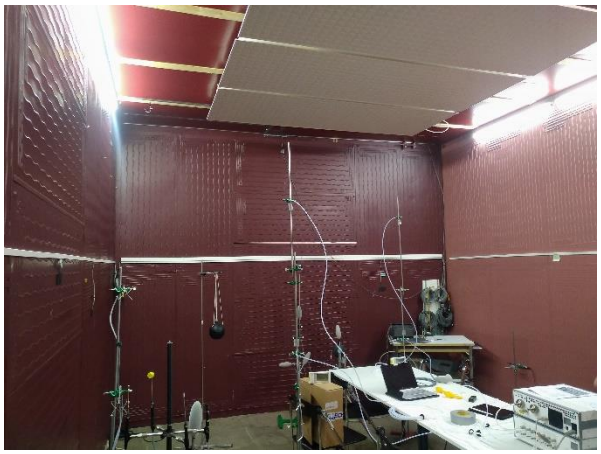

Vergleich Klimakammer Inlet 6 SF6 / HFO1234yf
Konzentration HFO1234yf [ppm]
Zeit [hh:mm:ss]
Aufdosierung 60s 10:22
Start Messung 10:05
Behebung-Undichtheit SF6 10:35
Auslüften 10:35
Aufdosierung 10:46
Stopp Dosierung 11:51
Öffnung der Eingangstür 11:26
Inlet 6 [HFO]
Inlet 6 (SF6)

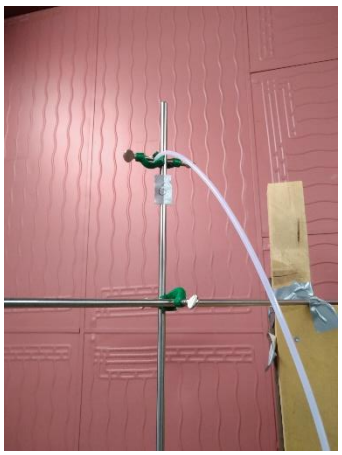
12. Anhang 3, Fotos

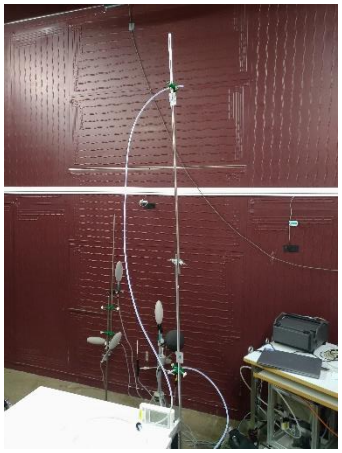
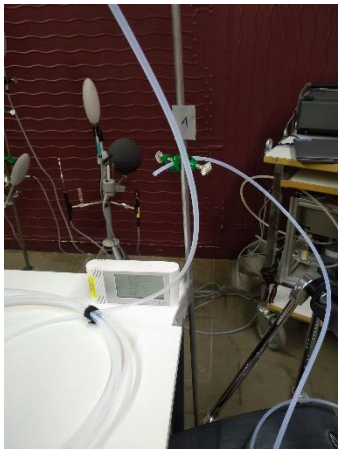
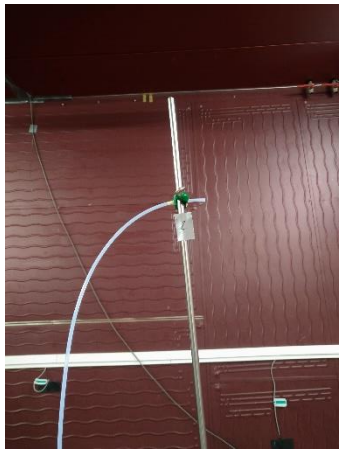
12.1. Messung vom 11.03.2021

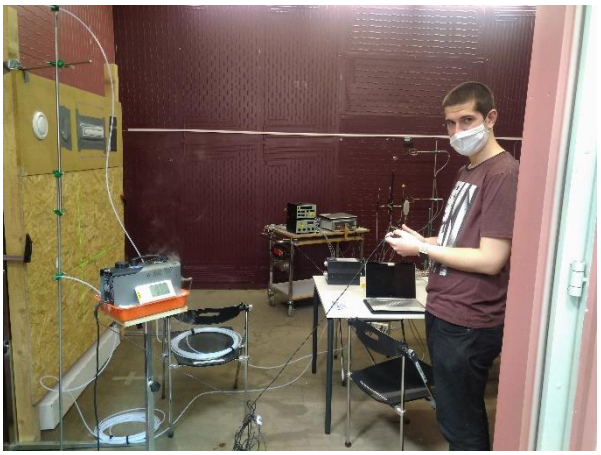
12.1.1. Klimakammer Fotos



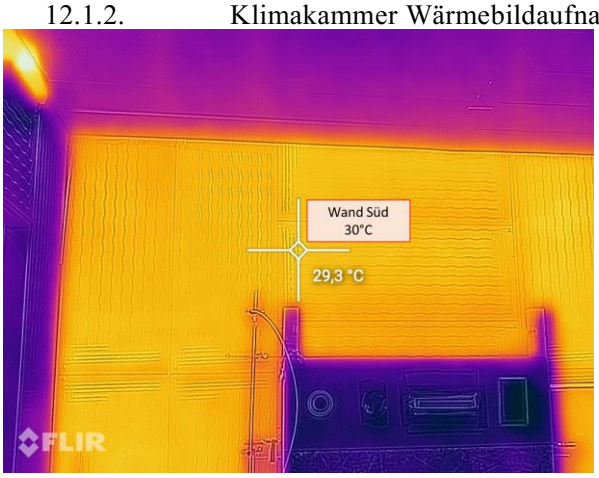



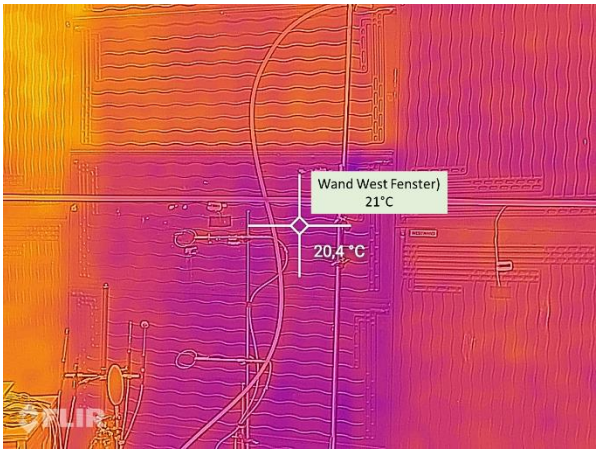


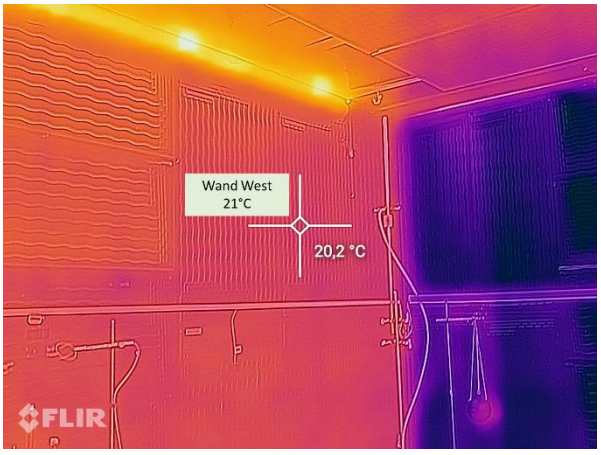




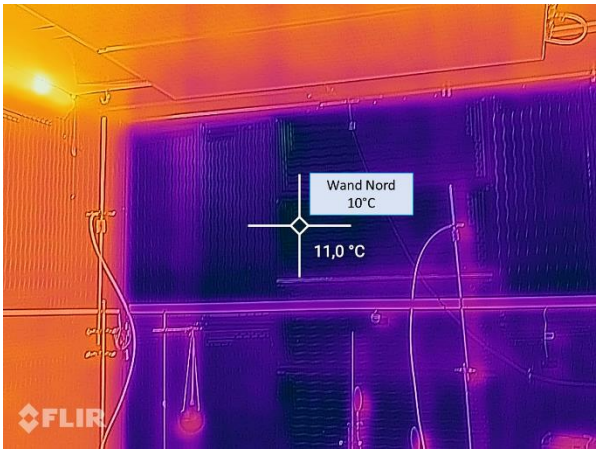


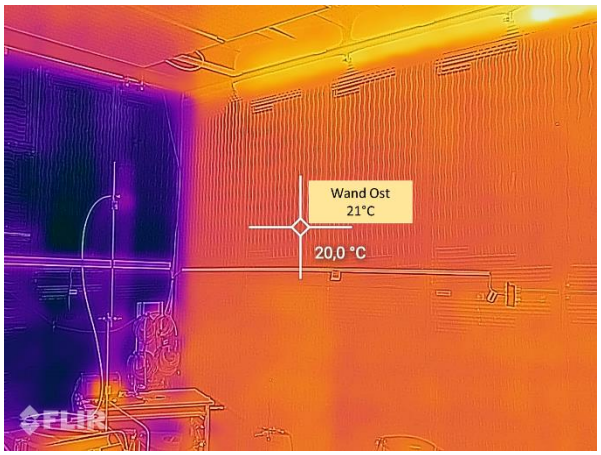
12.1.2. Klimakammer Wärmebildaufnahmen

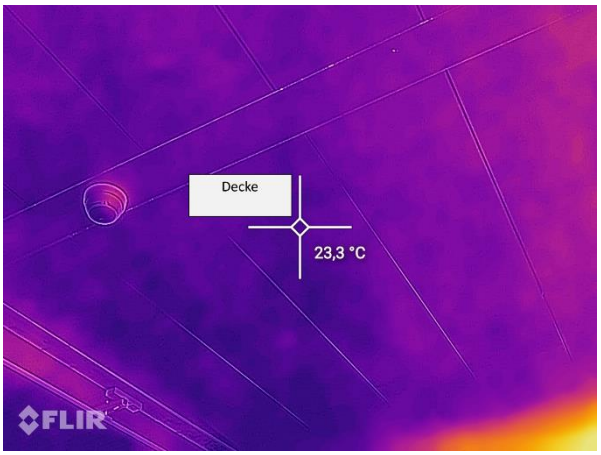


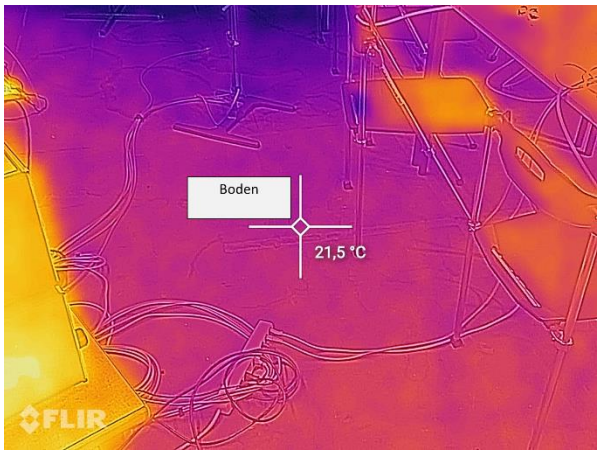







Wand Ost
21°C
20,0 °C
FLIR


Decke
23,3 °C
FLIR

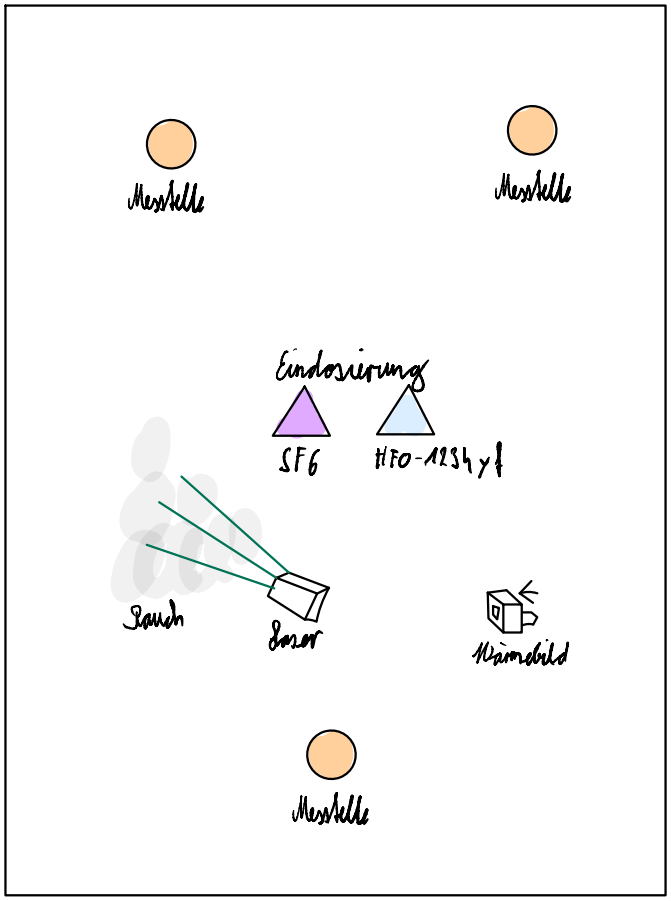

Boden
21,5 °C
FLIR

13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau 7
Abbildung 2: Rauchversuch Thermik 9
Abbildung 3: Rauchversuch Raumluftwalze 10
Abbildung 4: Volumenstrom Abklingverfahren SF6 ab Türöffnung 16
Abbildung 5 Volumenstrom Abklingverfahren HFO ab Türöffnung 16
Abbildung 6: Volumenstrom Abklingverfahren SF6 ab Stopp Dosierung 17
Abbildung 7: Volumenstrom Abklingverfahren HFO ab Stopp Dosierung 17

14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenlogger 6
Tabelle 2: Temperierung Oberflächen Klimakammer 6
Tabelle 3: Formel Abkling-Methode gesamter Zeitraum 16
Tabelle 4: Formel Abkling-Methode ab Stopp Eindosierung 17



Messmethoden

- ✓ Impuls-Dosierung
- ✓ Konstant-Dosierung (bis Gleichgewichtszustand)
- ✓ Rauchversuch (& Laser)
  ↳ sichtbar machen von Strömung
- ✓ Luftströmungsgeschwindigkeiten
- ✓ Temperaturen, Feuchte
- ✓ Aussenbedingungen (Temp., (Feuchte), Windgeschw., Wetterlage)
- ✓ Oberflächentemperaturen

Messaufbau Klimakammer

11.3.21 / M. Bienz & K. Bucheli

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 Kapitel 5

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

Ablaufprotokoll

Datum Durchführung: 12.03.2021

14:00 Uhr Aufstellen - Eindosierstellen 1
14:05 Uhr Start Nullmessung / Fenster geschlossen; Alle Anlagen aus
14:16 Uhr Impuls SF6 (50mg/s - 13s)
14:19 Uhr Impuls HFO (50mg/s - 13s)
14:55 Uhr Öffnung Fenster - Auslüften
15:00 Uhr ULK's & Virusprotect ein (Grösste Stufe)
15:05 Uhr Fenster schliessen
15:08 Uhr Impuls SF6 (50mg/s - 13s)
15:09 Uhr Impuls HFO (50mg/s - 13s)
15:44 Uhr Alle Fenster auf - Auslüften
15:45 Uhr ULK's & Virusprotect aus
15:55 Uhr Fenster schliessen / Lüftung ein konstant
16:13 Uhr Impuls SF6 (70mg/s - 13s)
16:15 Uhr Impuls HFO (70mg/s - 13s)
16:59 Uhr Stopp Messung & Öffnung Fenster - Auslüften
17:02 Uhr Start Messung mit zus. Channel
17:10 Uhr Fenster schliessen
17:16 Uhr Impuls SF6 (70mg/s - 13s)
17:17 Uhr Impuls HFO (70mg/s - 13s)
18:00 Uhr Lüftung Aus (Automatikeinstellung)
18:25 Uhr Lüftung Ein (Handbetrieb - Konstante Luftmenge)
18:30 Uhr Stopp Messung & Öffnung Fenster - Auslüften
18:33 Uhr Start Messung mit zus. Channel
18:38 Uhr Fenster schliessen
18:39 Uhr Impuls SF6 & HFO (je 70mg/s 120s) in Zuluft-Rohr
19:52 Uhr Ende der Messung

Während den Messungen waren 4 Personen anwesend.

Einstellwerte Eindosierventile

SF6: 50/70 mg/s (Kalibriert)
HFO: 45.4/63.6 mg/s (Kalibriert (mit Umrechnungsfaktor))
(Kalibrierung HFO gleich wie SF6)

Ch. 1
Log. 248
Dummy
SF6
1. Dosierstelle
Abluftkanal oberhalb Doppeldecke
Gitter stirnseitig eingebaut
Ch. 4
Log. 202
KVR / Leitung zu Monobloc
850m3/h
Durrer Virus-protect
ULK
4-Wege
EINBAUKÜCHE
UNTERZUG
LED
BAFFLE WAVE
UV
307 GÜTSCH
SUISSETEC
BF: 121.22 m²
B: PARKETT
W: GKP ABGEGLÄTTET
D: AKUSTIKPLATTEN
306 ENTREE | KORR.
ABZ
BF: 187.96 m²
B: PARKETT
W: GKP ABGEGLÄTTET
D: GESTRICHEN | AKUSTIK
Log. 243
Log. 244
Ch. 2
Log. 200
HFO
1. Dosierstelle
Lineardeckengitter
Ch. 5
Log. 198
RH=2.98m (roh)
(2.63m bis abg. Decke)
SF6
2. Dosierstelle
KVR / Leitung zu Monobloc
800m3/h
HFO
2. Dosierstelle
Ch. 3
Log. 204
309 REUSS
SUISSETEC
BF: 44.56 m²
B: VINYL
W: GIPS, ABGEGLÄTTET
D: AKUSTIKPLATTEN
RAF

- Messstelle Aussen (Logger) [°C, %r.F., ppm CO2]
- Messstelle Innen (Gasera-MP & Logger) (+1.2m & +1.6m OKB) [ppm SF6, ppm HFO1234yf, ppm H2O, °C, %r.F., ppm CO2]
- Dummy (Wärmequelle - Mensch)
- Eindosierung [SF6]
- Eindosierung [HFO1234yf]

Versuchsaufbau & Messablauf Suissetec-Schulzimmer

Suissetec-Schulzimmer, Baselstrasse 61, 6003 Luzern

Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021
Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A2
Massstab	1:50
Datum	28.03.2021
Typ	Grundriss
Plan Nr.	002

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion

Hochschule Luzern
HSLU

Technik & Architektur

Abteilung Gebäudetechnik

Laborbericht Nr: 002

Aufgabe:	**Tracergasmessungen im Suissetec-Schulzimmer**
Prüfobjekt:	**Suissetec-Schulzimmer**
Auftraggeber:	**HSLU T&A Abteilung Gebäudetechnik**
Namen:	**Moritz Bienz** **Kevin Bucheli**
Datum:	**Horw, 2021-03-12**

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract ... 3
2. Auftraggeber ... 4
2.1. Hochschule: ... 4
2.2. Industriepartner: ... 4
3. Auftrag ... 4
3.1. Auftrag Suissetec Schulzimmer ... 4
4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung ... 5
5. Prüfverfahren ... 5
6. Tracergasmessung ... 6
6.1. Versuchsaufbau und Ablauf ... 6
6.2. Tracergasmessung mit 3 Inlets (Messpunkten) ... 7
6.2.1. Test-Setup ... 7
6.2.2. Rahmenbedingungen ... 7
6.2.3. Resultate ... 8
6.3. Tracergasmessung mit 4 Inlets (Messpunkten) ... 10
6.3.1. Test-Setup ... 10
6.3.2. Rahmenbedingungen ... 10
6.3.3. Resultate ... 11
6.4. Tracergasmessung mit 5 Inlets (Messpunkten) ... 13
6.4.1. Test-Setup ... 13
6.4.2. Rahmenbedingungen ... 13
6.4.3. Resultate ... 14
7. Qualitative Untersuchungen und Beobachtungen ... 17
7.1. Rauchversuch analog Tracergas-Puls 1 ... 17
7.1.1. Rahmenbedingungen ... 17
7.1.2. Test-Setup ... 17
7.1.3. Beschreibung der Strömung ... 17
7.2. Abbruch der Rauchversuche ... 18
8. Diskussion und Empfehlung ... 19
8.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit im Suissetec-Schulzimmer ... 19
9. Fazit ... 19
9.1. Hinsichtlich Raum & Covid-19 ... 19
9.2. Hinsichtlich Messverfahren ... 19
10. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung ... 20
11. Anhang 2, Messdaten Tracergase ... 21
11.1. Suissetec-Schulzimmer Puls 1-3 SF6 ... 21
11.2. Suissetec-Schulzimmer Puls 1-3 Tracergas HFO1234yf ... 21
11.3. Suissetec-Schulzimmer Puls 4 SF6 ... 22
11.4. Suissetec-Schulzimmer Puls 4 HFO1234yf ... 22
11.5. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 SF6 ... 23
11.6. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 HFO1234yf ... 23
11.7. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 Abklingverhalten Tracergas SF6 ... 24
11.8. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 Abklingverhalten HFO1234yf ... 25
12. Anhang 3, Messdaten Kleindatenlogger ... 26
13. Anhang 4, Fotos & Wärmebildaufnahmen ... 28
13.1. Messung vom 12.03.2021 ... 28
13.1.1. Suissetec-Schulzimmer Fotos ... 28
13.1.2. Suissetec-Schulzimmer Wärmebildkamera ... 30
14. Abbildungsverzeichnis ... 32
15. Tabellenverzeichnis ... 32

1. Abstract

Im Rahmen der eingangs erwähnten Bachelorarbeit, wurde im Suissetec-Schulungsraum an der Baselstrasse in Luzern die zweite Messreihe durchgeführt, um die Handhabung der Geräte und Instrumente weiter zu erproben und für anschliessende Messungen zu optimieren. Durch die Messungen konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Raumluftdynamik und zur Effizienz der Lüftungsanlage gemacht werden. Und nicht zuletzt konnten auch hinsichtlich der im weiteren Verlauf der Bachelorarbeit wichtigen Puls-Methode weitere wichtige Erkenntnisse gemacht werden.
Während des ersten Teil des Messablaufes wurde ein einmalig aufgestelltes Mess-Setup betrieben und lediglich die Rahmenbedingungen darum verändert. Weiter wurden im Verlauf der Messungen nebst den anfänglichen Messpunkten im Raum auch je ein Messpunkt in der Abluft, sowie in der Zuluft aufgeschaltet. Zuletzt erfolgte ein Wechsel der Eindosierstelle vom Raum in die Zuluftleitung. Die verschiedenen Rahmenbedingungen betreffen die Einschaltung verschiedener gebäudetechnischer Installationen. Es sind dies die Lüftungsanlage mit Plattenwärmetauscher und ohne Umluftanteil, Umluftklimageräte, sowie Umluftreinigungsgeräte. Genauer ersichtlich ist dies auf der Abbildung 1 des Versuchsaufbaus.
Während des gesamten Versuches wurden die beiden Tracergase miteinander, an unterschiedlichen Stellen eindosiert (Ausnahme Zuluftdosierung identisch). Daraus lässt sich der Informationsgehalt pro Messdurchlauf signifikant erhöhen.
Auf den Raum bezogen kann aufgrund der Messungen die Aussage getroffen werden, dass die Lufteinführung suboptimal gewählt ist. Ein grosser Teil der Zuluft, welche über Lineardeckendiffusoren in den Raum gelangt, klebt sich aufgrund des Coanda-Effektes an der Decke fest und wir wieder abgesaugt, bevor sie überhaupt in den Raum gelangt. (Kurzschlussströmung) Dies sorgt für eine Lüftungseffektivität von nur 0.5. Für eine Verbesserung der Situation wäre eine Anpassung der Lufteinführung ins Auge zu fassen.
Zuletzt kann bezogen auf die Messmethodik gesagt werden, dass die Pulsmethode nur mit schnelleren Messintervallen verlässliche und ganzheitlich verwertbare Daten liefert. Nichtsdestotrotz kann aber bereits mit diesem Setup bereits einiges zur Raumluftströmung ausgesagt werden, wenn auch vordergründig qualitativer und nicht quantitativer Natur. Weiter bedarf es für die quantitative Auswertung der Pulsmethode auch noch weiterer Abklärungen und Überprüfungen hinsichtlich der Eindosierventile, welche hierfür ebenfalls genauste Daten liefern müssen.

2. Auftraggeber

2.1. Hochschule:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Erstbetreuer: Heinrich Huber heinrich.huber@hslu.ch
Zweitbetreuer: Stefan Walser stefan.walser@hslu.ch

2.2. Industriepartner:

FREI WÜEST EXPERT
Ingenieurbüro
Gutachten – Expertisen – Forschung – Normierung
Geissburghalde 11
CH-6130 Willisau
Beat Frei, beat.frei@frei.expert

3. Auftrag

Mit der Bachelorarbeit soll das neue Tracergas HFO-1234yf (Tetrafluorpropen) mit sehr geringem Treibhauspotenzial zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität erprobt werden. Als Referenz-Tracergas wird Schwefelhexafluorid (SF6) verwendet. Von besonderem Interesse ist die Ausbreitung von SARS-CoV-2 Aerosolen in belegten Räumen. Dies kann mit einer punktförmigen HFO-1234yf-Tracergas-Quelle mit konstanten oder pulsförmigen Emissionen und einer lokal verteilten Detektion mit Mehrpunkt-Sampling untersucht werden. Eine erste Anwendung sind Schulzimmer und Büroräume. Wesentlich interessanter ist aber der Einsatz in grossen Räumen (Versammlungsräume, Einkaufszentren, Sporthallen, Restaurants, …). Neben der Tracergas-Messung sollen ergänzende Verfahren zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Raumluftströmungen eingesetzt werden (Rauch, Laser, ev. lokale Raumluftgeschwindigkeit)

3.1. Auftrag Suissetec Schulzimmer

Ziel dieser Messungen ist das Erproben der Pulsmethode mit den zur Verfügung stehenden Materialien. Hierbei soll im Speziellen die Raumluftdynamik qualitativ ermittelt und dargestellt werden. Auch sollen die Messresultate Aufschluss geben zur Lüftungseffektivität und Lüftungseffizienz. Weiter wird der Einfluss von Umluftgeräten (4-Wege-Deckenumluftkühlgeräte & Durrer-Krantz Virusprotect) auf die Verhältnisse untersucht. Dazu wird einerseits mit Pulsen im Raum, wie auch mit Pulsen in der Zuluft gearbeitet.

4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung

Das Prüfobjekt ist ein Schulungszimmer der Suissetec Zentralschweiz. Dieser rund 124m2 grosse und ca. 2.60m hohe Raum befindet sich im 3. Obergeschoss des Suissetec-Bildungszentrums Zentralschweiz und wird durch eine Zu- & Abluftanlage maschinell be- und entlüftet. Die Lufteinführung erfolgt über Linear-Deckendiffusoren, welche jeweils im hinteren Teil des Raumes angeordnet sind. Die Abluft wird oberhalb des Präsentationsbildschirmes, oberhalb der Zwischendecke mit Diffusionsgitter auf ganzer Breite gefasst. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen. Für die Kühlung im Sommer sind zwei 4-Wege-Deckenumluftkühlgeräte installiert. Die abgehängten Zwischendecke, welche rund 40cm Hohlraum aufweist, ist an den Raumumrissen jeweils nicht bis nach Aussen gezogen und weist jeweils rund einen halben Meter Abstand auf.
Weiter waren während der Messreihe zwei Umluftgeräte «Virusprotect» im Raum aufgestellt. Diese «Luftreiniger» im Umluftprinzip können durch ihre sehr hohe Filterklasse sogar Viren aus der Luft filtern und kommen im Ausland bereits vermehrt in Schulzimmern zum Einsatz. Für die Tracergasmessungen haben diese Geräte jedoch nur den Charakter eines Umluftgerätes, da das Tracergas ungehindert durch die Filterstufen hindurchdringen kann.

Klassenzimmer
3. Obergeschoss
Bildungszentrum
Suissetec Zentralschweiz
Baselstrasse 61, 6003 Luzern
Tel. 041 249 98 40 | Fax 041 249 98 41
info@suissetec-zentralschweiz.ch

Die Messungen wurden am 12.03.2021 nachmittags durchgeführt.

Die Wetterlage war sonnig bis leicht bewölkt ohne Niederschlag. Die Aussentemperaturen sind im Anhang anhand der Werte des Datenloggers HP 198 ersichtlich und im Verlauf der Messreihe von 13.0°C auf 8.5°C gesunken.

5. Prüfverfahren

Bei den Messungen im Suissetec-Klassenzimmer wurde die Pulsmethode zur Eindosierung der Tracergase eingesetzt und untersucht. Bei den ersten vier Messungen wurden die Tracergase im Raum als pulsartige Quelle aufgegeben. Dies jeweils an zwei unterschiedlichen Standorten, da aufgrund vorangegangener Messungen davon ausgegangen werden kann, dass sich die Tracergase im Raum nahezu identisch verhalten, was letztlich den Informationsgehalt pro Messung steigert. Für die letzte Messung wurde die Eindosierstelle beider Tracergase in die Zuluftleitung verlegt und wiederum als Puls aufgegeben. Die Betriebszustände der gebäudetechnischen Einrichtung variierte bei jeder Messung und wird im Folgenden jeweils erläutert.
Gemessen wurde mit dem Messgerät «Gasera One» und dem Multipoint-Sampler, der die Analyse von mehreren Messpunkten in nur einem einzigen Mess-Setup zulässt. Die grafische Auswertung erfolgte in MS Excel.

6. Tracergasmessung

6.1. Versuchsaufbau und Ablauf

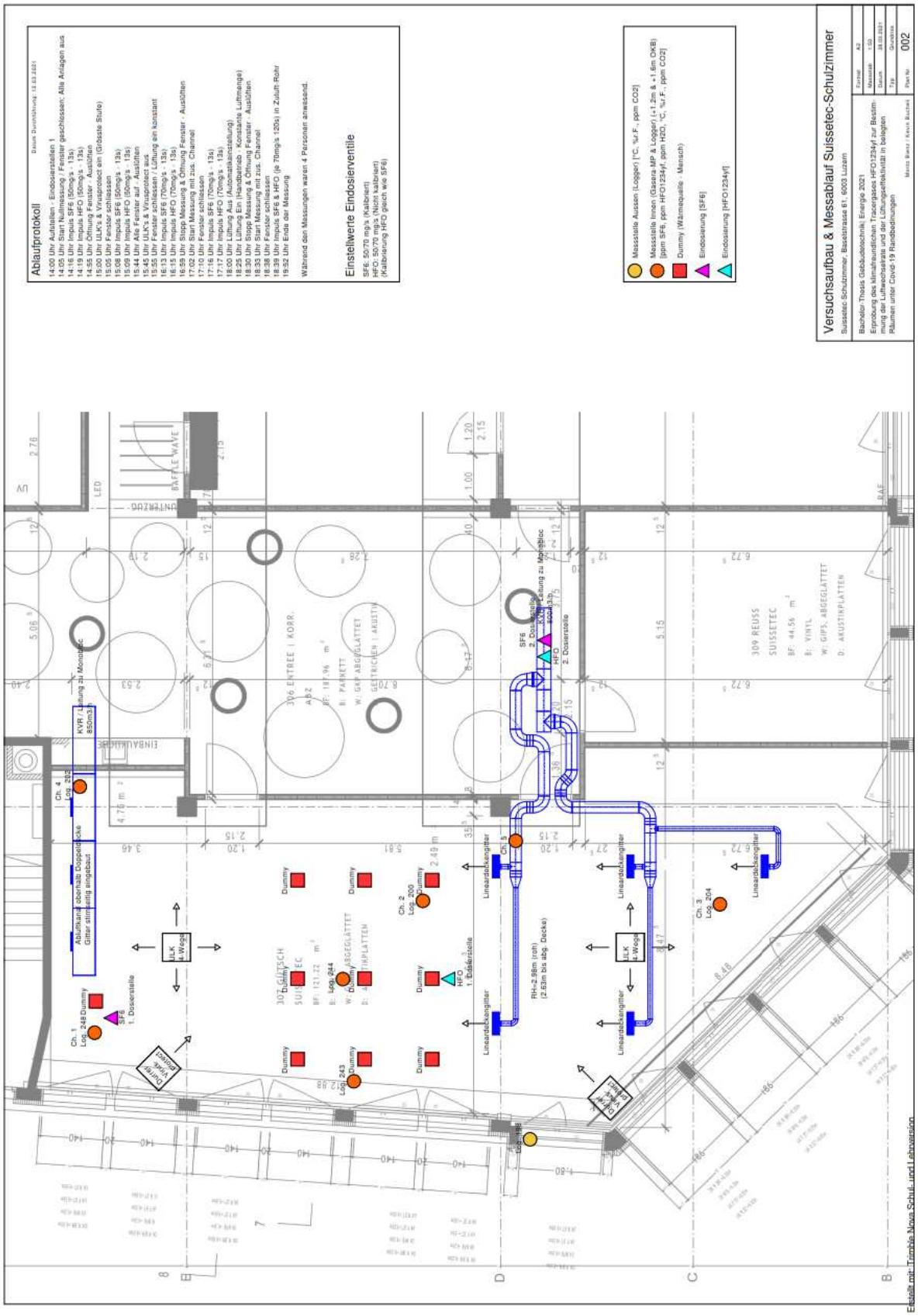


Abbildung 1: Versuchsaufbau & Ablaufdokumentation

6.2. **Tracergasmessung mit 3 Inlets (Messpunkten)**

6.2.1. Test-Setup

In diesem Mess-Setup wurden drei Messpunkte (Inlets) am Multipoint-Sampler betrieben. Channel 1 direkt beim «Dozent», respektive der Eindosierstelle des SF6; Channel 2 in der Raummitte, inmitten der «Schüler» und in der Nähe der Eindosierstelle des HFO1234yf; Channel 3 im hinteren Teil des Raumes. Jede Messstelle im Raum befindet sich jeweils auf +1.2m ab OK Boden und jene des Dozenten auf +1.6m ab OK Boden. Dies soll sitzende Schüler und einen stehenden Dozenten simulieren. Mit diesem Setup mit drei Messstellen entsteht ein Messintervall von ca. drei Minuten. Eindosiert wurde das SF6 beim «Dozent» und das HFO1234yf bei einem «Schüler» in der hinteren Sitzreihe. Auch hier wurde die Höhe analog zu den Messstellen berücksichtigt. So wurde das SF6 auf +1.6m ab OK Boden eindosiert und das HFO1234yf auf +1.2m ab OK Boden. Die eindosierte Menge an Tracergas beläuft sich für die ersten beiden Pulse auf jeweils 50g/s pro Tracergas während 13 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtmenge von 0.65g pro Tracergas. Für den dritten Puls wurde die eindosierte Menge auf 70g/s und somit total 0.91g pro Tracergas erhöht. Die Eindosierung erfolgte via des Handbediengerätes an den Dosierventilen und ist daher mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, was die exakte Menge eindosiertem Tracergas anbelangt.
Während der Messung befanden sich insgesamt 5 Personen und 10 Dummies im Raum, welche eine lokale Erwärmung und daraus folgend einen thermischen Auftrieb bewirken. Die Personen haben sich zur meisten Zeit im mittleren Bereich des Raumes aufgehalten und wenig bewegt.
In der folgenden Tabelle 1 sind die drei Pulsaufgaben der ersten drei Messungen genauer beschrieben.

Tabelle 1: Beschreibung Pulse 1-3

Dosierung	**Beschreibung**
Puls 1	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF6 / 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	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF6 / 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	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF6 / 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

6.2.2. Rahmenbedingungen

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während diesen drei Impulsen sind in der Tabelle 2 ersichtlich. Zuoberst sind die durchschnittlichen Aussenbedingungen und nachfolgend die durchschnittlichen Innenbedingungen während der Messdauer aufgeführt. Die Verteilung der Datenlogger ist in der Abbildung 1 ersichtlich. Die Daten der Kleindatenlogger zur Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration wurden über die gesamte Messdauer gemeinsam dokumentiert und sind im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 2: Durchschnittswerte Datenlogger Pulse 1-3

Datenlogger	**Temperatur [°C]**			**Rel. Feuchte [%]**			**CO2-Konzentration**		
Messung	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
HP 198 (Aussen)	12,7	12.5	11.2	34.3	33.1	38.6	370	370	371
HP 200	24.0	22.5	22.7	29.0	20.0	23.4	1002	586	636
HP 202	23.6	22.3	22.9	28.8	20.1	22.7	954	540	564
HP 204	23.3	20.4	21.9	29.7	22.5	24.8	912	510	564
HP 243	24.4	22.9	23.2	27.4	19.2	22.3	1028	624	658
HP 244	24.3	22.4	22.8	27.8	19.7	22.9	1012	617	656
HP 248	24.0	21.8	22.5	28.9	20.8	23.6	970	578	626

6.2.3. Resultate

Die Messungen mit SF6 und HFO1234yf haben jeweils ergeben, dass sich der Puls an der Messstelle am nächsten zum Einlass jeweils zuerst bemerkbar macht durch einen grossen Peak. Aufgrund der Messzeit von 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 Anstieg-, respektive Abkling-Kurven von Bedeutung. Mit diesen können essenzielle Aussagen hinsichtlich der Raumluftdynamik gemacht werden und wie sich ein Schadstoff ab einem gewissen Punkt im Raum ausbreitet.

Bei den ersten beiden Impulsen 1 & 2 ist der Einfluss der Umluftkühlgeräte und Virusprotect deutlich ersichtlich. 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. Im Vergleich zur zweiten Pulsaufgabe ist dieser bereits nach 15-20min erreicht; eine zeitliche Halbierung. Im Vergleich zwischen den beiden Eindosierstellen kann festgestellt werden, dass die Aufgabe in der Raummitte zu einer schnelleren Durchmischung führt als die Aufgabe beim Dozent 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 SF6 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 SF6 wurde beim Dozent 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 HFO1234yf 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 kontinuierlich 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 ebenfalls unmöglich, den realen Peak zu ermitteln. Klar gezeigt wird dies bei der dritten Pulsaufgabe mit dem HFO1234yf. 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 spätere Messungen.)

Nicht zuletzt kann beobachtet werden, dass sich das HFO1234yf, eindosiert in der Mitte des Raumes, wie auch das SF6, eindosiert beim Dozenten, unabhängig vom Betrieb der Lüftungsanlage auch in den hinteren Teil des Raumes ausbreitet. Die 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.

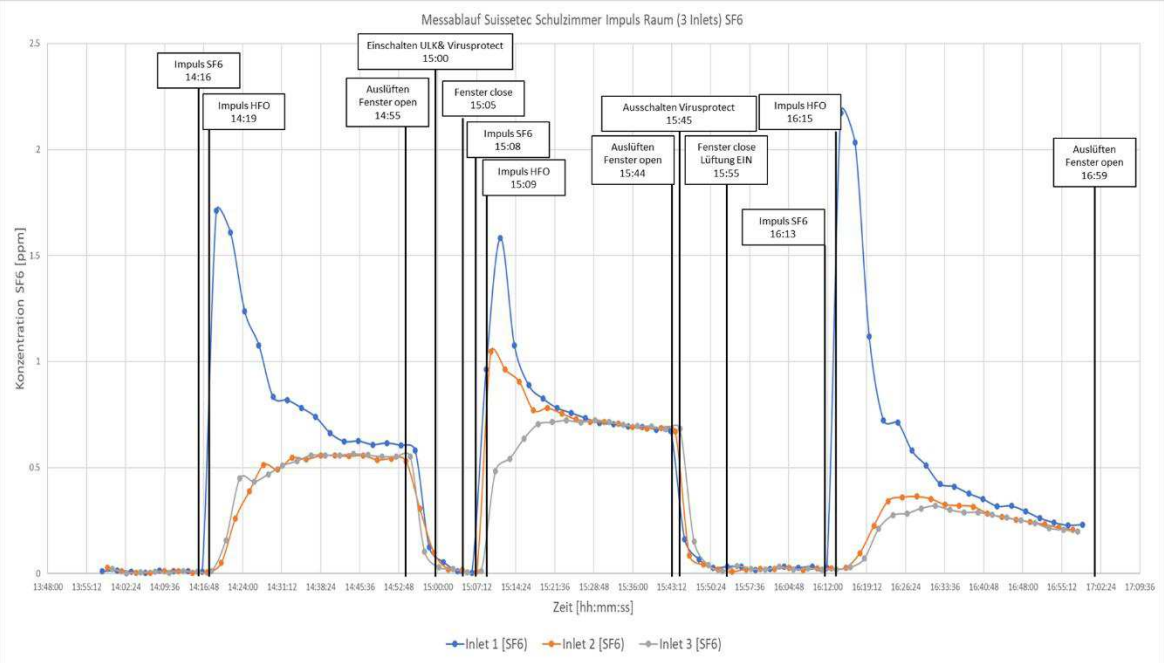


Abbildung 2: Messresultate Puls 1-3 SF6

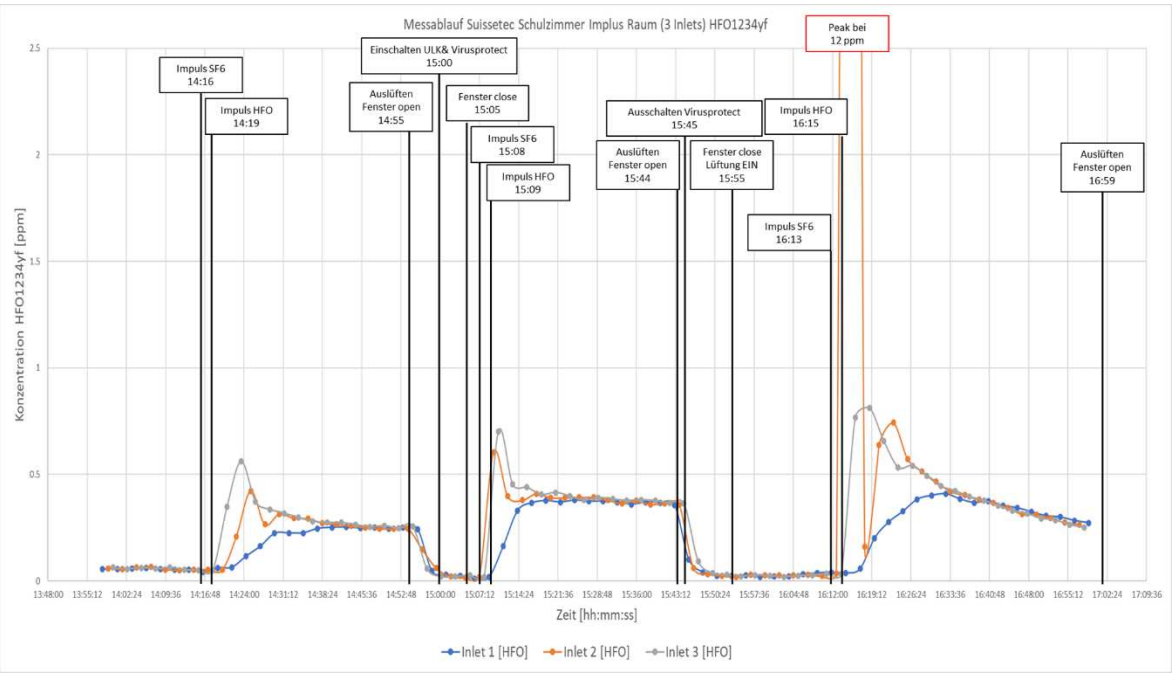


Abbildung 3: Messresultate Puls 1-3 HFO1234yf

6.3. Tracergasmessung mit 4 Inlets (Messpunkten)

6.3.1. Test-Setup

Gegenüber dem vorherigen Mess-Setup mit 3 aktiven Inlets wurde der Umfang für diese Messung um einen weiteren Messpunkt im Abluftkanal erweitert. Das restliche Setup wurde nicht verändert. Das Messintervall mit dem Gasera One verlängert sich dadurch um eine weitere Minute auf total rund vier Minuten pro Messdurchgang.
Die Eindosierstelle ist mit jener der ersten drei Messungen identisch. Die eindosierte Menge an Tracergas beläuft sich für diesen Puls auf jeweils 70g/s pro Tracergas während 13 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtmenge von 0.91g pro Tracergas. Wieder wurde über das Handbediengerät eindosiert, was die eindosierte Menge Tracergas mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet.
Bei dieser Messung befanden sich nur noch 4 Personen und noch immer 10 Dummies im Raum.
In der folgenden Tabelle 3 ist die Pulsaufgabe der vierten Messung genauer beschrieben.

Tabelle 3: Beschreibung Puls 4

Dosierung	Beschreibung
Puls 4	Pulsdosierung Tracergas nacheinander SF6 / 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.

6.3.2. Rahmenbedingungen

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während dieses vierten Impulses sind in der Tabelle 4 ersichtlich. Zuoberst sind die durchschnittlichen Aussenbedingungen und nachfolgend die durchschnittlichen Innenbedingungen während der Messdauer aufgeführt. Die Verteilung der Datenlogger ist in der Abbildung 1 ersichtlich. Die Daten der Kleindatenlogger zur Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration wurden über die gesamte Messdauer gemeinsam dokumentiert und sind im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 4: Durchschnittswerte Datenlogger Puls 4

Datenlogger	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]	CO2-Konzentration
Messung	[1]	[1]	[1]
HP 198 (Aussen)	10.5	40.9	367
HP 200	23.3	22.0	622
HP 202	23.1	21.7	564
HP 204	22.0	23.7	550
HP 243	23.3	21.3	647
HP 244	23.3	21.4	641
HP 248	22.9	22.2	600.5

6.3.3. Resultate

Die Resultate sind vergleichbar mit jenen aus dem Puls 3. Zusätzlich wurde hier im Abluftkanal gemessen und es wird ersichtlich, dass die Konzentration im Abluftkanal jeweils an jene der Messstelle beim Dozenten anlehnt. So ist am Anfang der Messung mit dem beim Dozenten eindosierten SF6 ein klarer Peak zu erkennen, wohingegen bei der Messung mit HFO1234yf 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 SF6 einen einmalig gemessenen Wert von knapp 10ppm, gegenüber 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 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 sichtbar am Moment des automatischen Ausschaltens der Anlage um 18:00 Uhr. Dies war im Versuch eigentlich nicht geplant und wurde festgestellt, als sich die Tracergase in der Raumluft nicht mehr weiter abtrugen. 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.

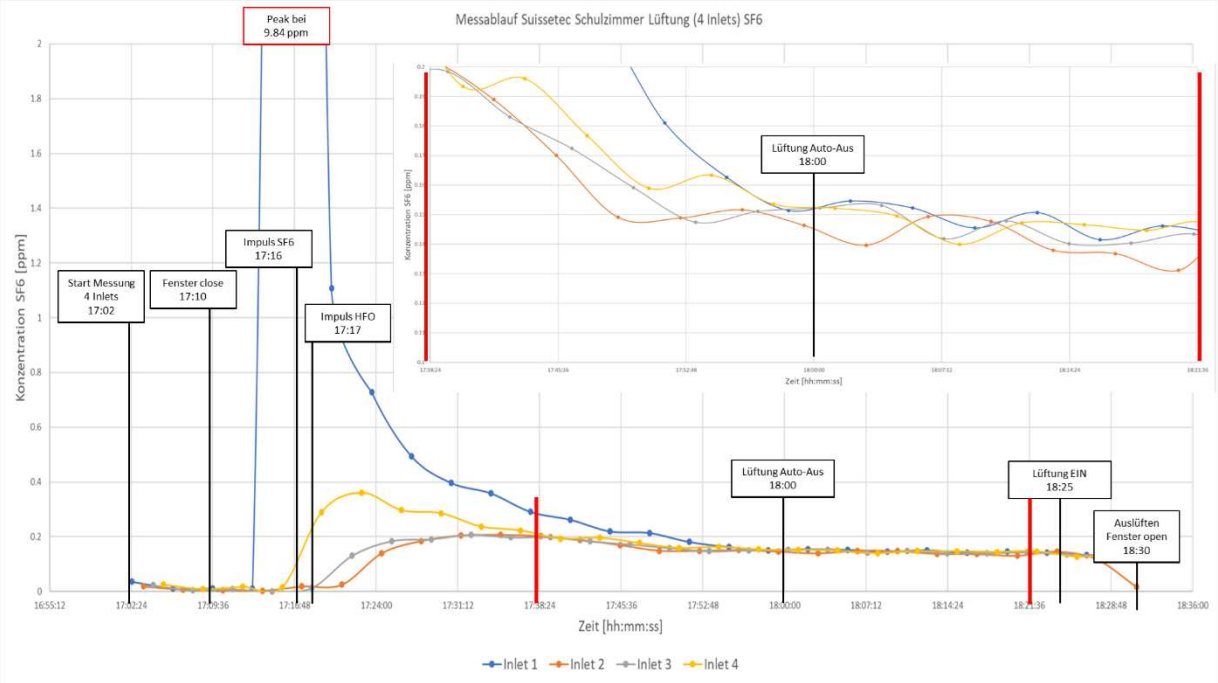


Abbildung 4: Messresultate Puls 4 SF6

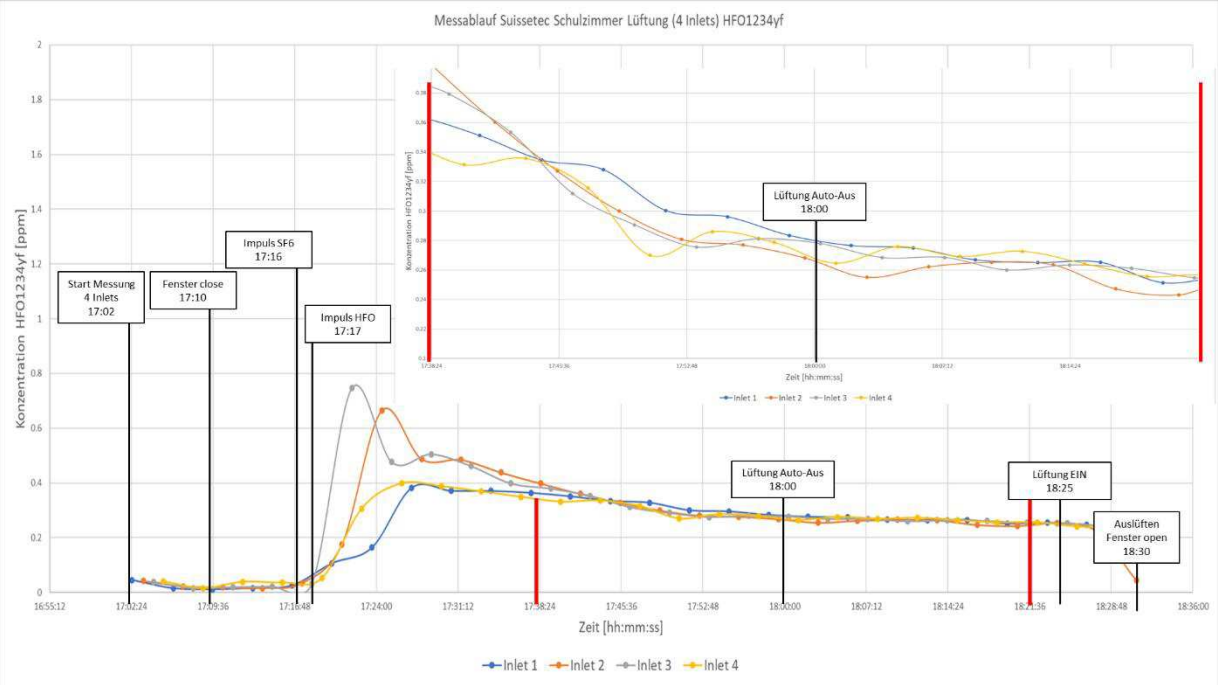


Abbildung 5: Messresultate Puls 4 HFO1234yf

6.4. **Tracergasmessung mit 5 Inlets (Messpunkten)**

6.4.1. Test-Setup

Gegenüber dem vorherigen Mess-Setup mit 4 aktiven Inlets wurde der Umfang für diese Messung um einen weiteren Messpunkt in einem der Zuluftauslässe erweitert. Das restliche Setup wurde nicht verändert. Das Messintervall mit dem Gasera One verlängert sich dadurch um eine weitere Minute auf total rund fünf Minuten pro Messdurchgang.
Die Eindosierstelle wurde für diese Messung in die Zuluftleitung versetzt. Hier wurden beide Tracergase gleichzeitig eindosiert. Die eindosierte Menge an Tracergas beläuft sich für diesen Puls auf jeweils 70g/s pro Tracergas während 120 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtmenge von 8.40g pro Tracergas. Die im Raum ankommende Menge ist allerdings nicht identisch mit der aufgegebenen Menge, da die Zuluftleitung nach der Eindosierstelle im Hauptstrang weiter verzeigt und diverse Räume versorgt sind. Die genaue Aufteilung der Luftvolumenströme in die einzelnen Räume konnte nicht ermittelt werden. Auch bei dieser Messung wurde wieder mit dem Handbediengerät an den Dosierventilen eindosiert. Die Ungenauigkeit ist bei diesem Versuch aufgrund der längeren Eindosierzeit jedoch weniger stark ausgeprägt.
Bei dieser Messung befanden sich weiterhin 4 Personen und noch immer 10 Dummies im Raum.
In der folgenden Tabelle 5 ist die Pulsaufgabe der fünften Messung genauer beschrieben.

Tabelle 5: Beschreibung Puls 5

Dosierung	**Beschreibung**
Puls 5	Pulsdosierung Tracergas gleichzeitig SF6 / 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

6.4.2. Rahmenbedingungen

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während dieses fünften Impulses sind in der Tabelle 6 ersichtlich. Zuoberst sind die durchschnittlichen Aussenbedingungen und nachfolgend die durchschnittlichen Innenbedingungen während der Messdauer aufgeführt. Die Verteilung der Datenlogger ist in der Abbildung 1 ersichtlich. Die Daten der Kleindatenlogger zur Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration wurden über die gesamte Messdauer gemeinsam dokumentiert und sind im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 6: Durchschnittswerte Datenlogger Puls 5

Datenlogger	**Temperatur [°C]**	**Rel. Feuchte [%]**	**CO2-Konzentration**
Messung	[1]	[1]	[1]
HP 198 (Aussen)	8.9	43.4	357
HP 200	23.5	21.5	583
HP 202	23.5	20.7	518
HP 204	21.9	23.8	510
HP 243	23.0	21.7	612
HP 244	23.5	21.1	600
HP 248	23.0	22.1	583

6.4.3. Resultate

Die Messungen mit SF6 und HFO1234yf, jeweils in der Zuluft haben gezeigt, dass ein im Zuluftnetz aufgegebener Puls im Raum auch 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 ist der Puls als reine Glockenkurve ersichtlich, was sich beispielsweise bei Messungen in Strassentunnels gezeigt hat.)

Zu erkennen ist, dass der grösste Peak im Raum bei der Messstelle 2 in der Raummitte festgestellt wurde. Die 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 einzelnen Ausreisser aufgrund des Messverfahrens.
Zu erklären ist 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 konnte. Die Lüftungseffektivität sinkt dadurch. Diese wurde berechnet und liegt im vorliegenden Fall nur bei 0.5. In der Tabelle 7 ist dies nochmals verdeutlicht.
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 erweist 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 3.5min 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 benötigt wird, von der Zuluft bis zur Spitze des Inlet 2 in der Raummitte beträgt beim SF6 ca. acht Minuten und beim HFO1234yf rund fünf Minuten.

Tabelle 7: Volumenstromberechnung Puls 5

Tracergas	Inlet 1	Inlet 2	Inlet 3	Inlet 4	Durchschnitt	KVR-Einstellung
SF6	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**

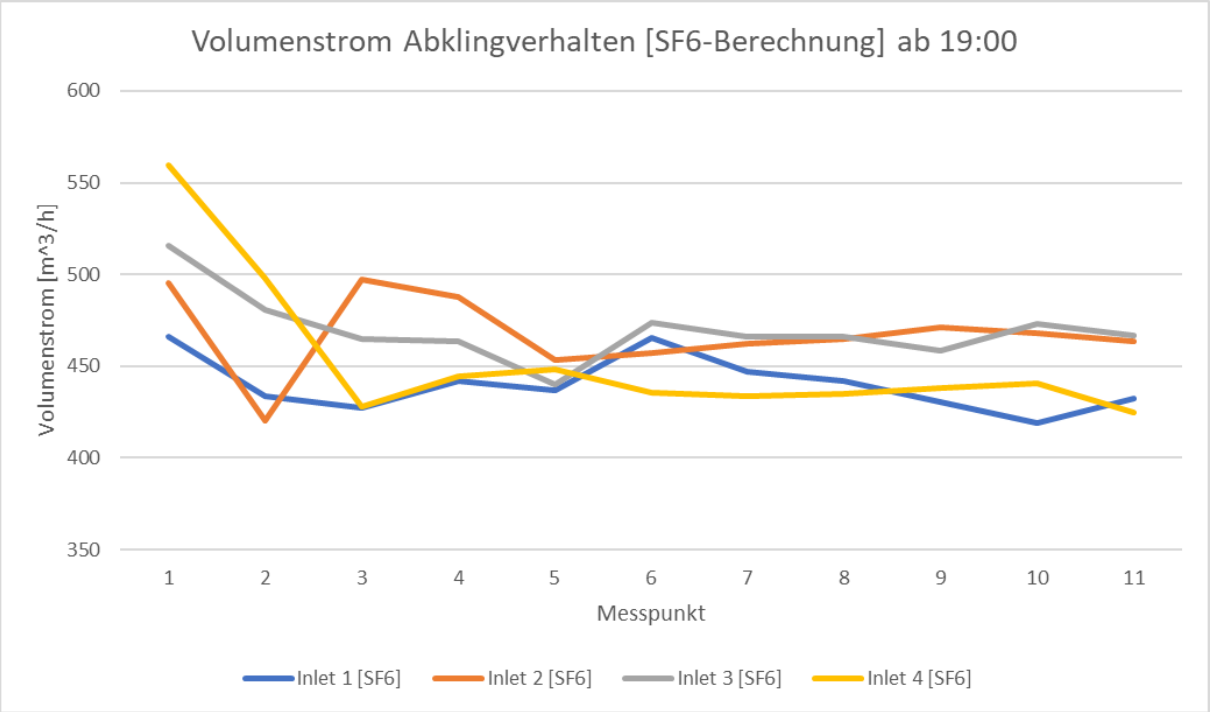


Abbildung 6: Volumenströme pro Messpunkt SF6

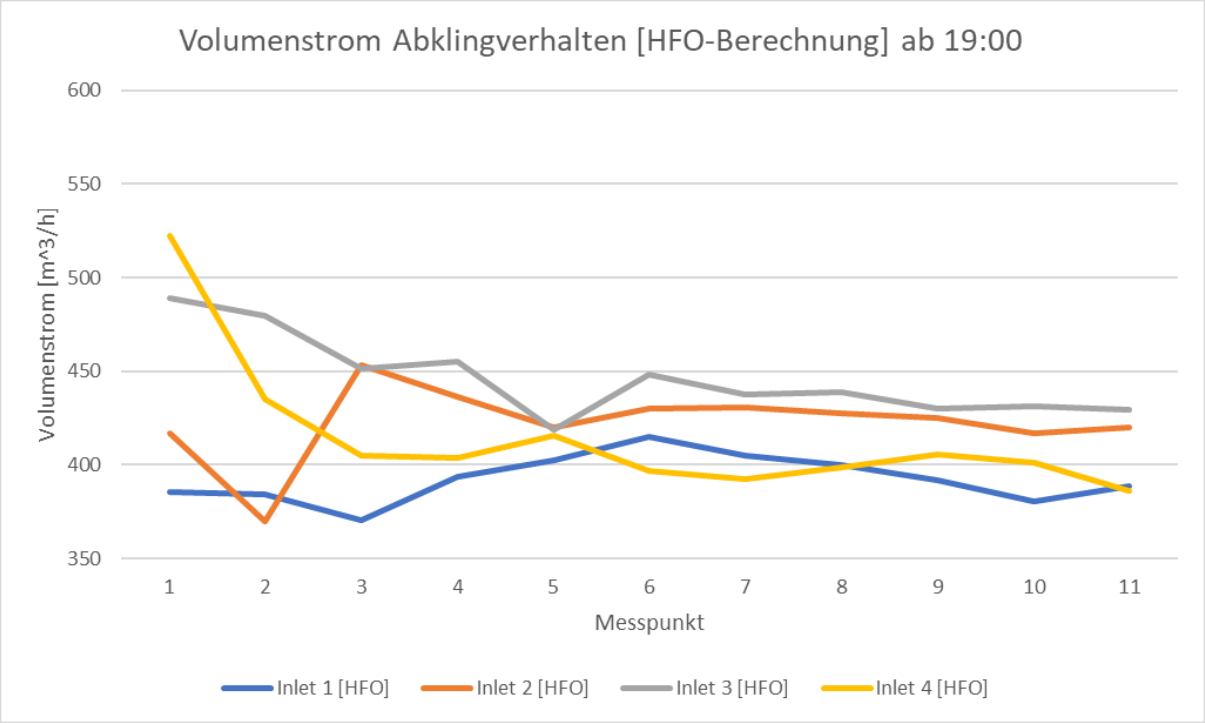


Abbildung 7: Volumenströme pro Messpunkt HFO1234yf

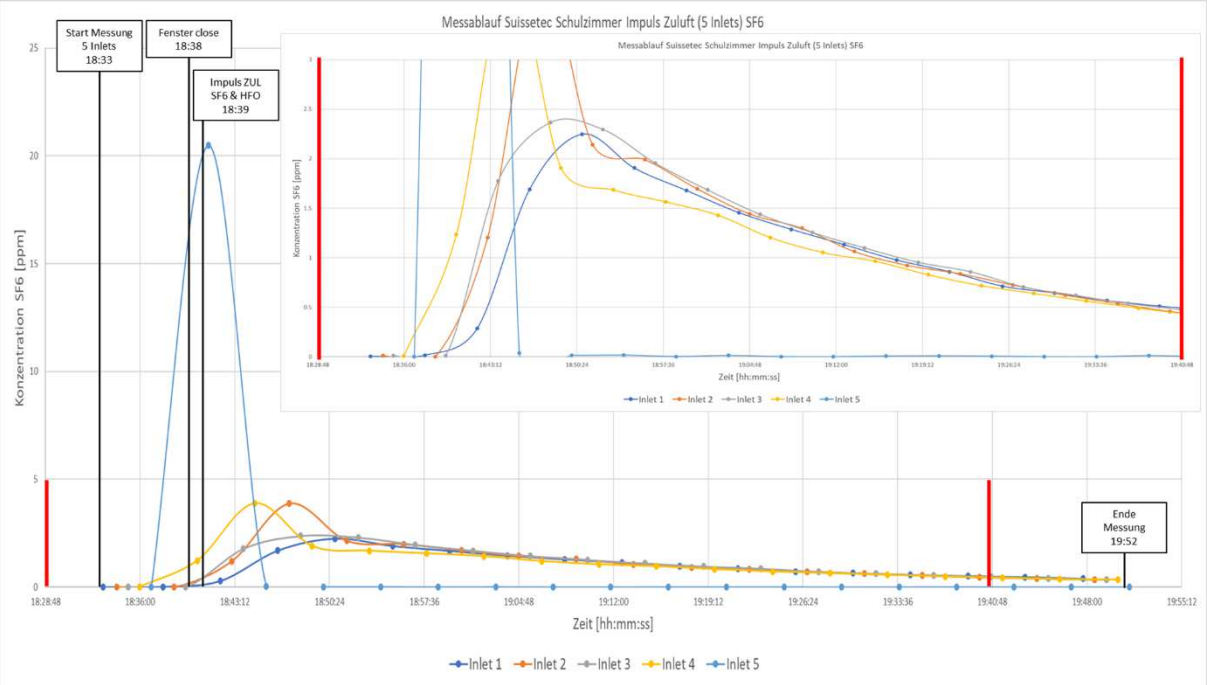


Abbildung 8: Messresultate Puls 5 SF6

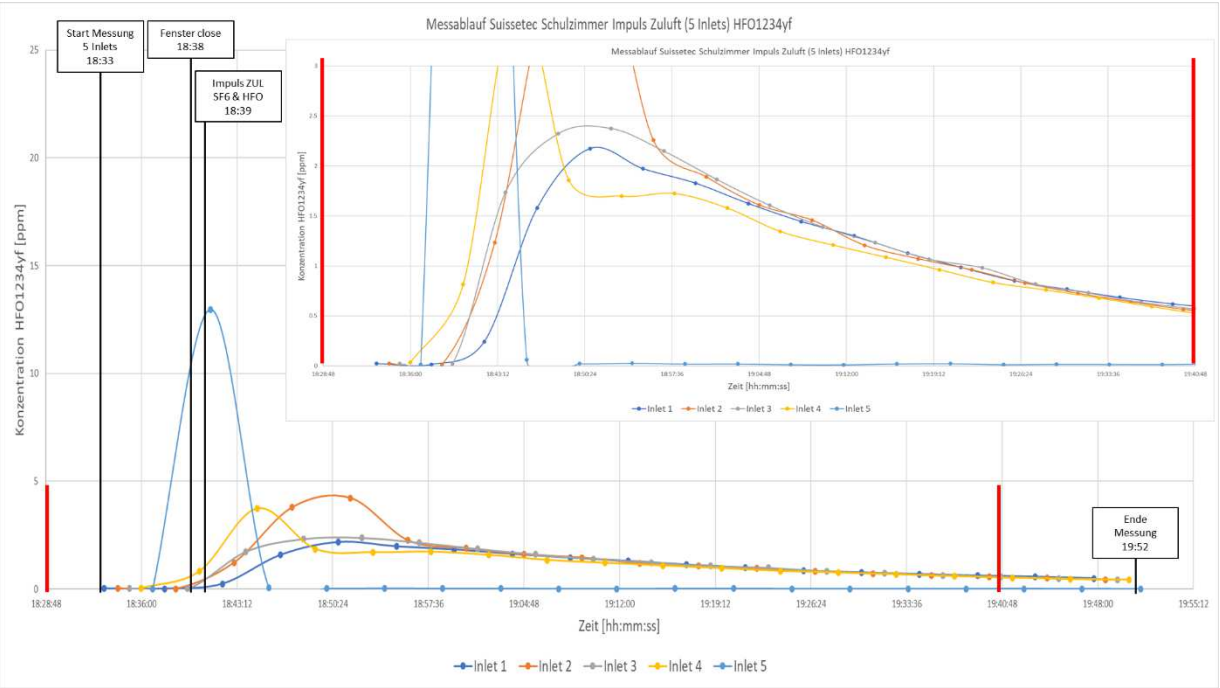


Abbildung 9: Messresultate Puls 5 HFO1234yf

7. Qualitative Untersuchungen und Beobachtungen

7.1. Rauchversuch analog Tracergas-Puls 1

7.1.1. Rahmenbedingungen

Die Lüftung wurde nicht betrieben, analog zu den Tracergasmessungen, respektive; die Rauchversuche wurden parallel zu den Tracergasmessungen durchgeführt.
Die mittlere Raumlufttemperatur aller im Rauch aufgestellten Datenlogger betrug rund 23°C. Der grüne Dummy inmitten des Raumes weist eine erhöhte Oberflächentemperatur von rund 40°C auf und die umliegenden Dummies jeweils eine von rund 30°C.

7.1.2. Test-Setup

Am 12.03.2021 wurden zwischen 14:20 und 14:50, sowie zwischen 16:40 und 16:50 die Rauchversuche durchgeführt.
Mit einer Hand-Nebelmaschine wurden verschiedene Positionen im Raum mit Rauch untersucht; aufgrund technischer Schwierigkeiten konnten jedoch lediglich die Verhältnisse über dem Dummy mit erhöhter Oberflächentemperatur visualisiert werden. Um die Bewegungen des Rauches besser ersichtlich zu machen, wurde ein Lasergerät eingesetzt. Die Versuche wurden mit Hilfe von Videos dokumentiert und Ausschnitte wurden für den Laborbericht festgehalten.

7.1.3. Beschreibung der Strömung

Die Strömung im Raum ist durch die thermischen Einträge der Personen und Dummies bestimmt. In der Abbildung 8 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 Fenster abgekühlt und gelangt so wieder in Bodennähe.
Die Strömung der Luft ist bei eingeschalteter Lüftung durch die Zu- und Abluftöffnungen bestimmt. Diese befördern die Luft im hinteren Teil des Raumes in das Schulzimmer und am vorderen Ende wird die Raumluft oberhalb der Zwischendecke wieder abgesogen. So entsteht eine Längsströmung durch den Raum, welche sich jedoch zu einem nicht vernachlässigbaren Teil an der Decke «festsaugt» (Coanda-Effekt). Genaueres dazu wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

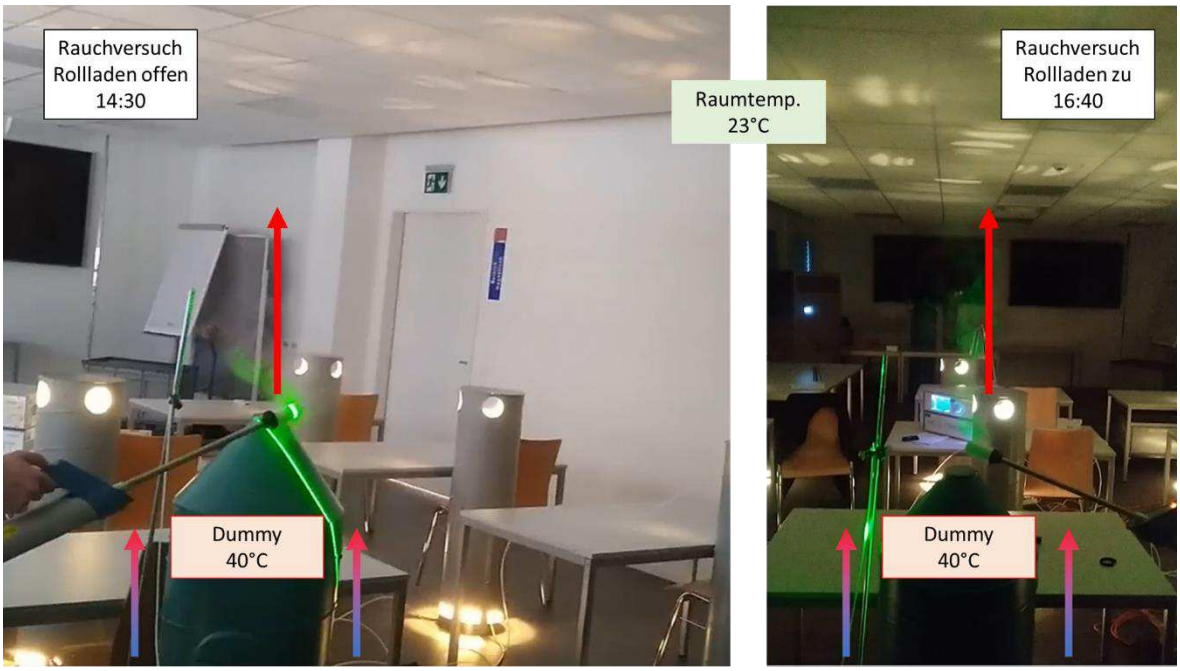


Abbildung 10: Rauchversuche

7.2. Abbruch der Rauchversuche

Aufgrund eines Defektes an der Nebelmaschine mussten die Rauchversuche vorzeitig abgebrochen werden und konnten nicht für die weiteren Betriebszustände fortgesetzt werden.

8. Diskussion und Empfehlung

8.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit im Suissetec-Schulzimmer

Die Anordnung und Art der Lufteinführung ist für sich betrachtet nicht optimal gewählt. Die Lineardeckendiffusoren sorgen für eine zu laminare Strömung, die sich aufgrund des Coanda-Effektes an der Decke festsaugt und an der gegenüberliegenden Abluftansaugung wieder abgesaugt wird, bevor ein grosser Teil dieser frischen Zuluft überhaupt in den Raum gelangt.
Diese Situation wird mit Betrieb der Umluftklimageräte, wie auch der zum Zeitpunkt der Messungen zusätzlich im Raum befindlichen Umluftreinigungsgeräte deutlich verbessert. Diese sorgen für die nötige Durchmischung der Zuluft mit der Raumluft, um eine optimale Mischlüftung mit homogener Luftmasse im Raum zu erreichen.

9. Fazit

9.1. Hinsichtlich Raum & Covid-19

Eine Anpassung der Lufteinführung könnte einen signifikanten Einfluss auf die Lüftungseffektivität haben und somit auch das Verbreitungsrisiko von Schadstoffen im Raum reduzieren. Zu Prüfen wäre beispielsweise eine Rotation der Zuluftauslässe um 180° und die Anordnung im vorderen Teil des Schulzimmers. Eine so entstehende Raumluftwalze würde einen grösseren Teil an Sekundärluft mitreissen und den gesamten Raum durchströmen, was die Bildung einer homogeneren Luftmasse und somit verbesserten Mischlüftung begünstigen würde.
Bis anhin kann aber zudem ausgesagt werden, dass das Schulzimmer grundsätzlich gleichmässig gelüftet ist. So gibt es zwar im Bereich des Dozenten-Pultes einen Bereich, der einen leicht geringeren Tracergas-Abtrag aufweist, was sich aufgrund der geringen Unterschiede aber als vernachlässigbar bezeichnen lässt. Das Ansteckungsrisiko mit Erregern ist grundsätzlich unabhängig vom Standort vergleichbar. Die Position der Aufgabe solcher Erreger wiederum ist dahingehend relevant, als dass eine Aufgabe beim Dozenten gesamthaft einen kleineren Einfluss auf die anschliessend entstehende homogene Luftmasse im Raum hat. Das Ansteckungsrisiko ausgehend vom Dozenten wäre somit, unabhängig jeglicher weitere Einflussfaktoren, geringer als jenes ausgehend von einem Schüler, da die durchschnittliche Schadstofflast kleiner ausfällt.

9.2. Hinsichtlich Messverfahren

Für eine effiziente Analyse der Pulsmethode ist es zwingend notwendig in kürzeren Intervallen messen zu können, als dies mit dem Gasera One und dem Multipoint-Sampler möglich ist. Zwei alternative Geräte hierfür werden in folgenden Messungen diesbezüglich wieder in Betrieb genommen und geprüft.
Weiter ist es für eine sinnvolle Analyse vorteilhaft, die genaue Menge an eindosiertem Tracergas zu kennen. Hierzu wird folgend in Zusammenarbeit mit dem Dosierventil-Hersteller die Möglichkeit zur computergestützten Ansteuerung und Dokumentierung der Ventile geprüft. Somit kann im Grunde ein Messpunkt in der Zuluft eliminiert werden, da die Konzentration des aufgegebenen Tracergases bekannt ist.
Und nicht zuletzt wird geprüft, wie sich die Dosierventile im Detail mit dem nicht kalibrierten Gas HFO1234yf verhalten. Dies ist vor allem hinsichtlich des oben erwähnten Punktes bezüglich Weglassen der Messstelle Zuluft relevant, um die genaue Konzentration zu kennen. Auch dies wird in Zusammenarbeit mit dem Dosierventil-Hersteller geprüft.

10. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung

Die allgemeine Formel zur Bestimmung einer Stoffkonzentration in der Raumluft ist gemäss SIA 382/1:2014:

$$C_{IDA,t} = \left(C_{IDA,0} - C_{ZUL} - \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}}\right) \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + C_{ZUL} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \quad (1)$$

oder

$$C_{IDA,t} = C_{IDA,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) + C_{ZUL} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) \quad (2)$$

dabei ist

$C_{IDA,t}$	mittlere Stoffkonzentration im Raum (gemessen in der Abluft) zur Zeit t, in ppm
$C_{IDA,0}$	Stoffkonzentration im Raum zur Zeit t = 0, in ppm
C_{ZUL}	Stoffkonzentration in der Zuluft, in ppm
G	Stoffemission im Raum, in ppm
$q_{v,ZUL}$	Zuluftvolumenstrom, in m3/h
V_R	Raumvolumen, in m3
t	Zeit, in h

Bemerkung: In dieser Form gilt die Gleichung nur konstante Werte von $CZUL$, G und qv,ZUL. Zudem wird in dieser Schreibform eine Mischlüftung vorausgesetzt.

Abklingmethode
Bei der Abkling-Methode ist: $G = 0$ und $C_{ZUL} = 0$ (Wie dicht war der Bypass?). Somit ist

$$C_{RAL,t} = C_{RAL,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} \quad (3)$$

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

$$C_{IDA,t} = \frac{10^{-6} * G}{q_{v,ZUL}} * \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} * t}\right) = C_{IDA,\infty} * (1 - e^{-n*t}) \quad (4)$$

wobei

$C_{IDA,\infty}$	Stoffkonzentration in der Raumluft im Gleichgewichtszustand, in ppm
n	Exponent für rechnerischen Luftwechsel, in h-1

Bemerkung: Die Funktion von Gleichung 4 kann sinngemäss auch zur Beurteilung von lokalen Stoffkonzentrationen verwendet werden.

Lokale Lüftungswirksamkeit

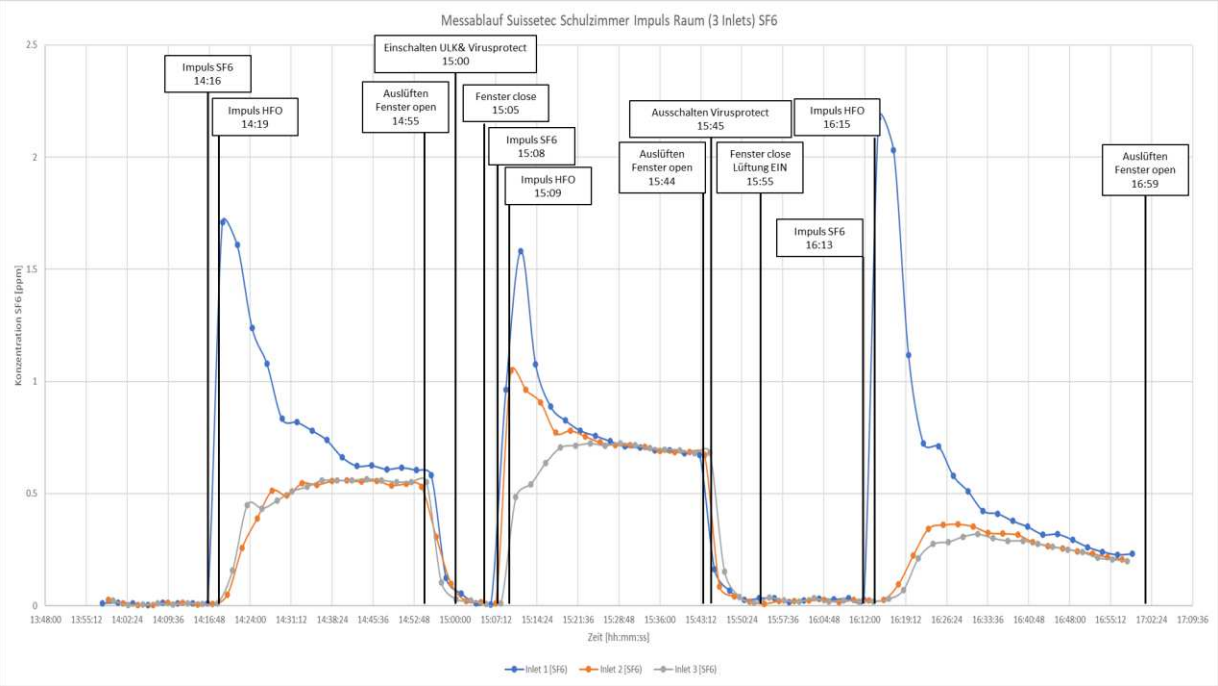
$$\varepsilon_{C,i} = \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{C_{IDA,i} - C_{SUP}}$$

wobei

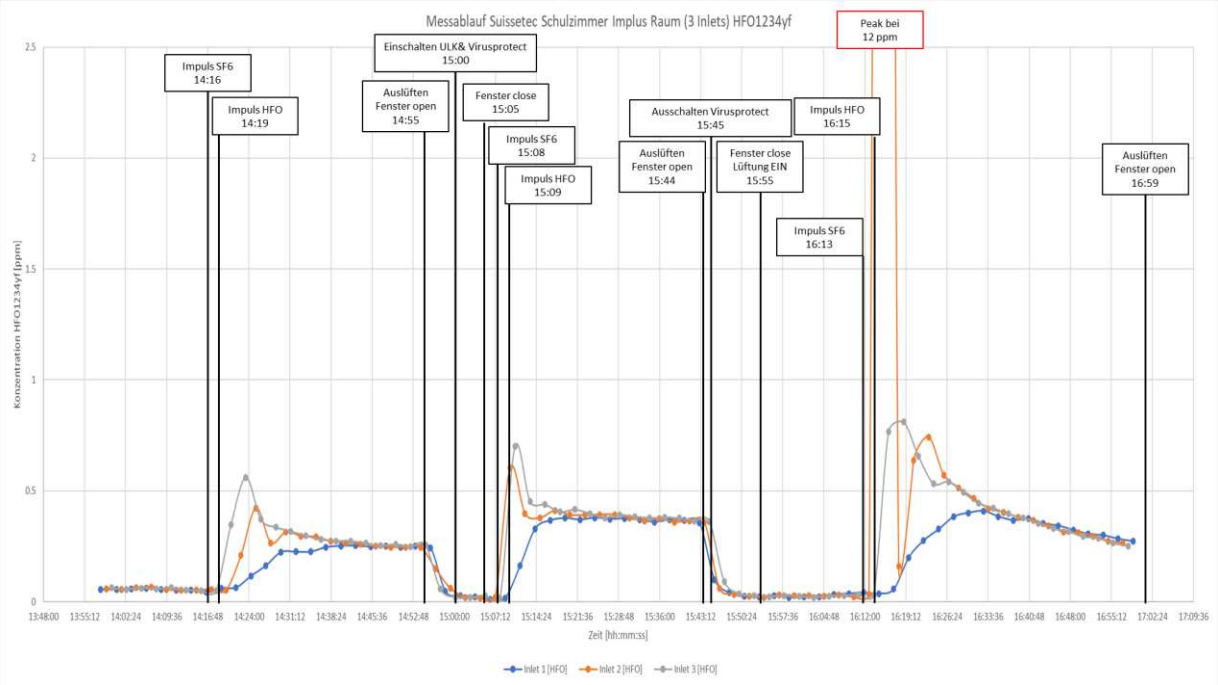
$\varepsilon_{C,i}$	Lüftungswirksamkeit an der Position i
C_{ETA}	Verunreinigungskonzentration der Abluft, in ppm
$C_{IDA,i}$	Verunreinigungskonzentration der Raumluft an der Position i, in ppm
C_{SUP}	Verunreinigungskonzentration der Zuluft, in oder ppm

11. Anhang 2, Messdaten Tracergase

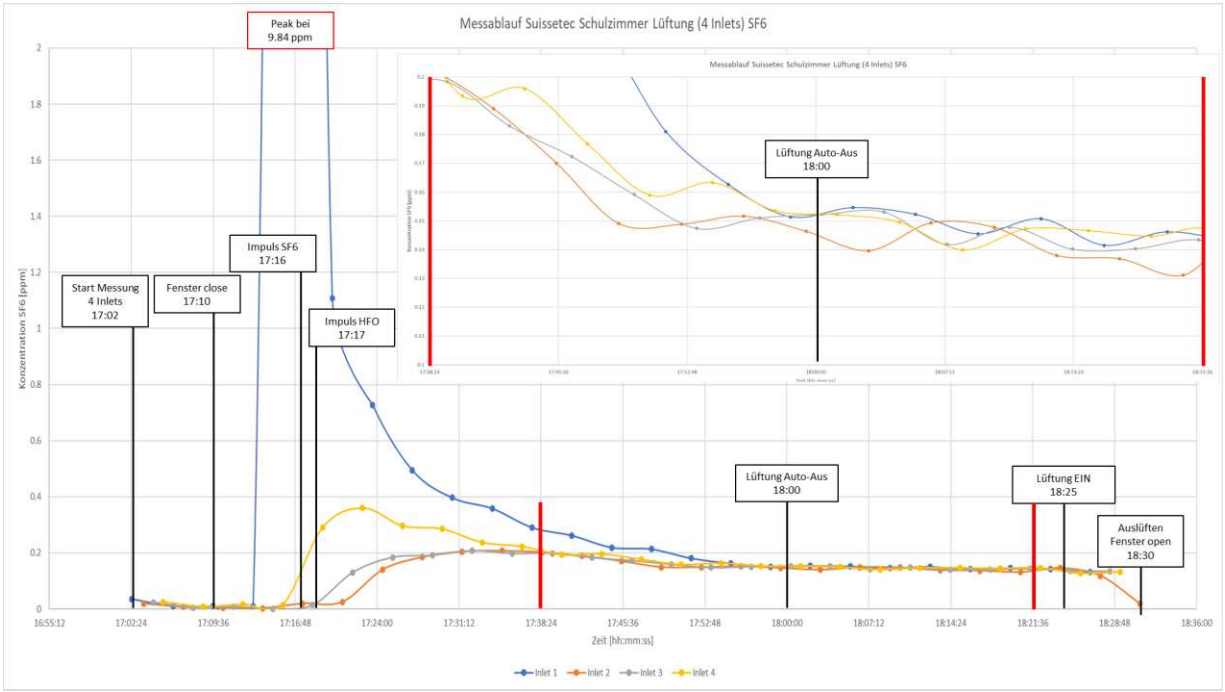
11.1. Suissetec-Schulzimmer Puls 1-3 SF6



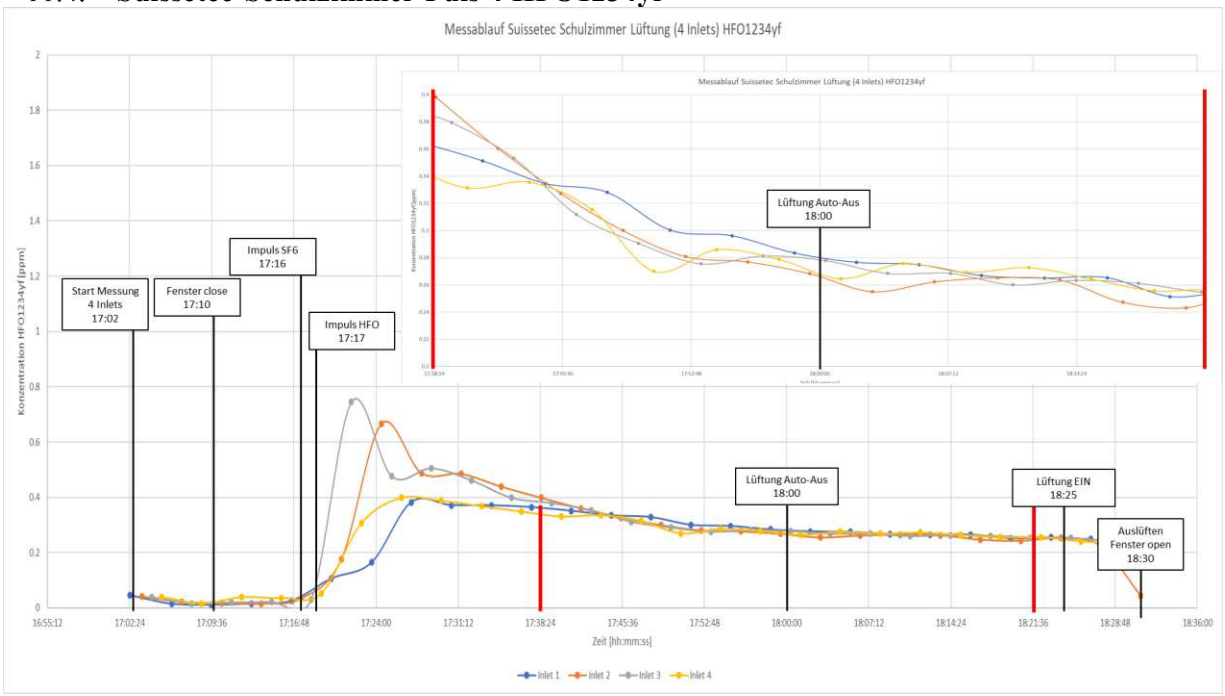
11.2. Suissetec-Schulzimmer Puls 1-3 Tracergas HFO1234yf



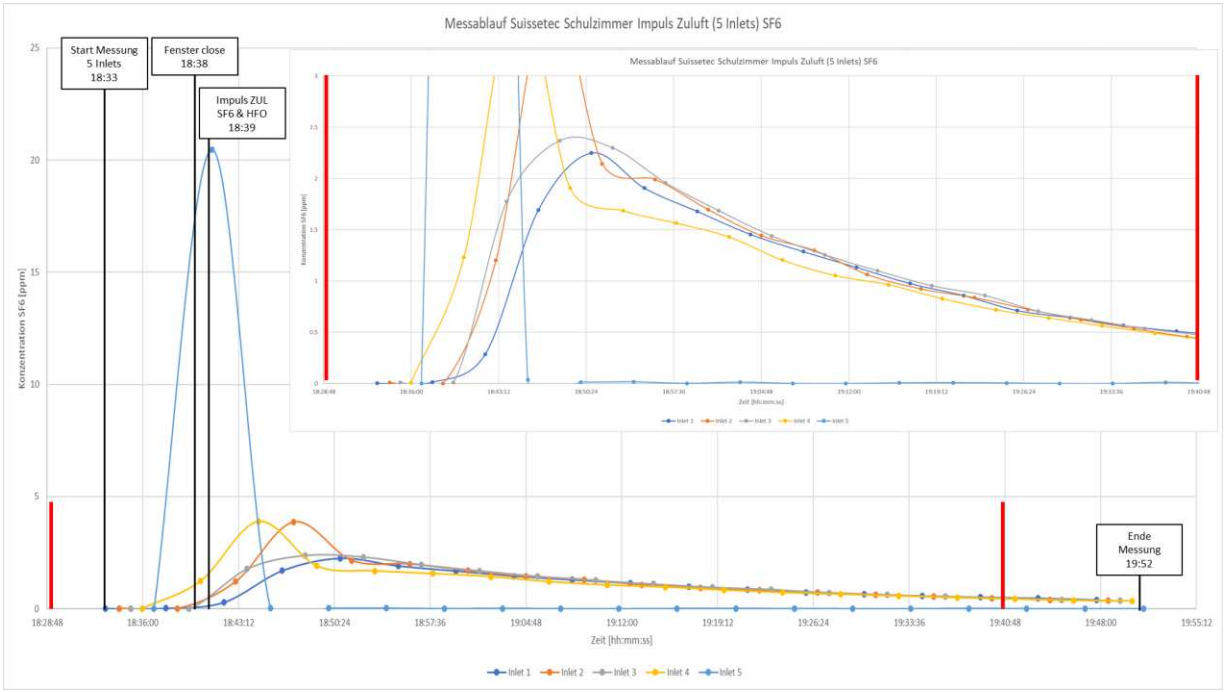
11.3. Suissetec-Schulzimmer Puls 4 SF6



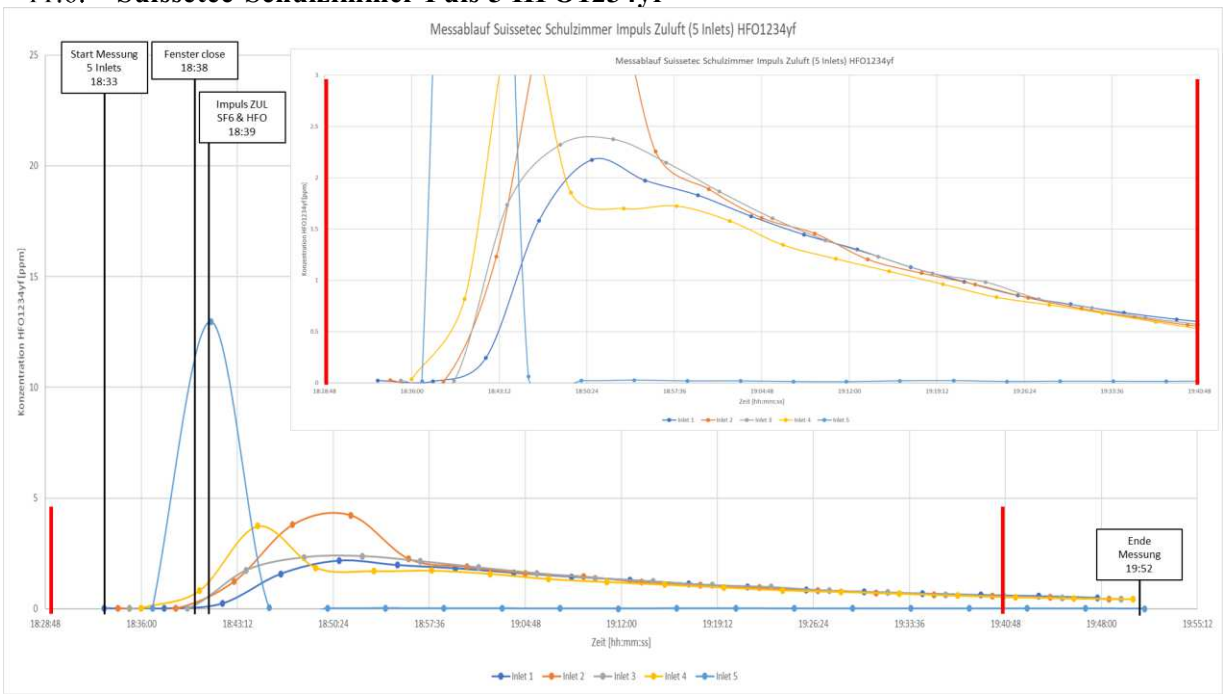
11.4. Suissetec-Schulzimmer Puls 4 HFO1234yf



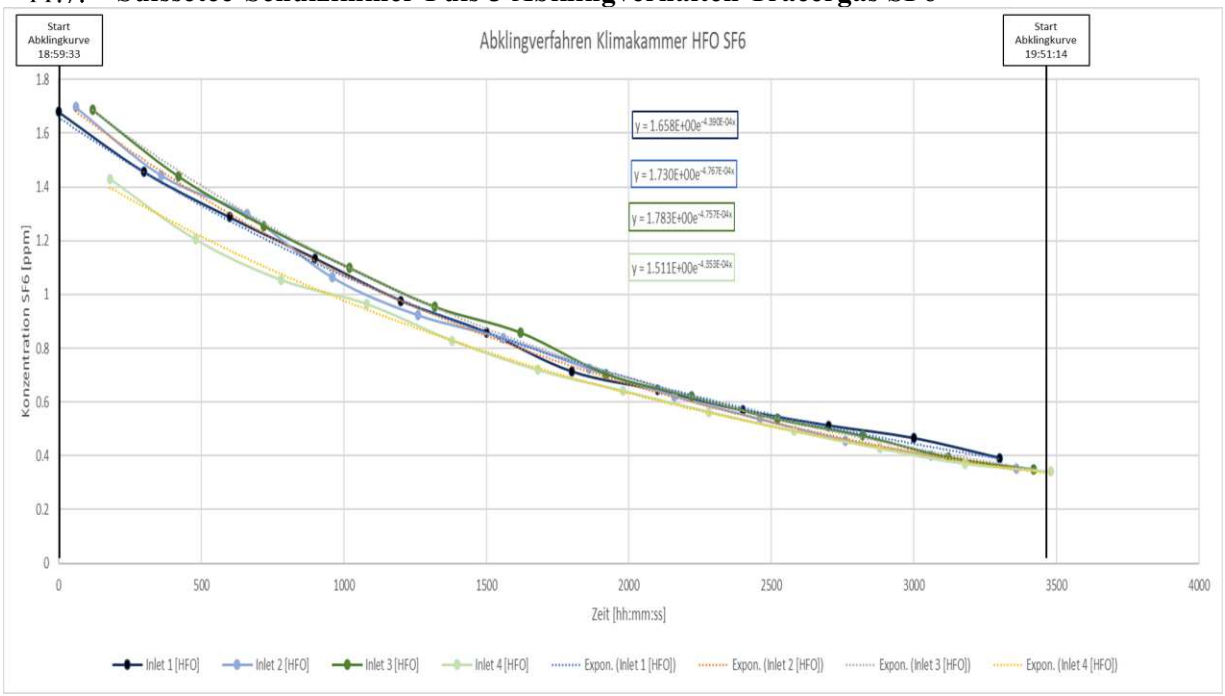
11.5. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 SF6

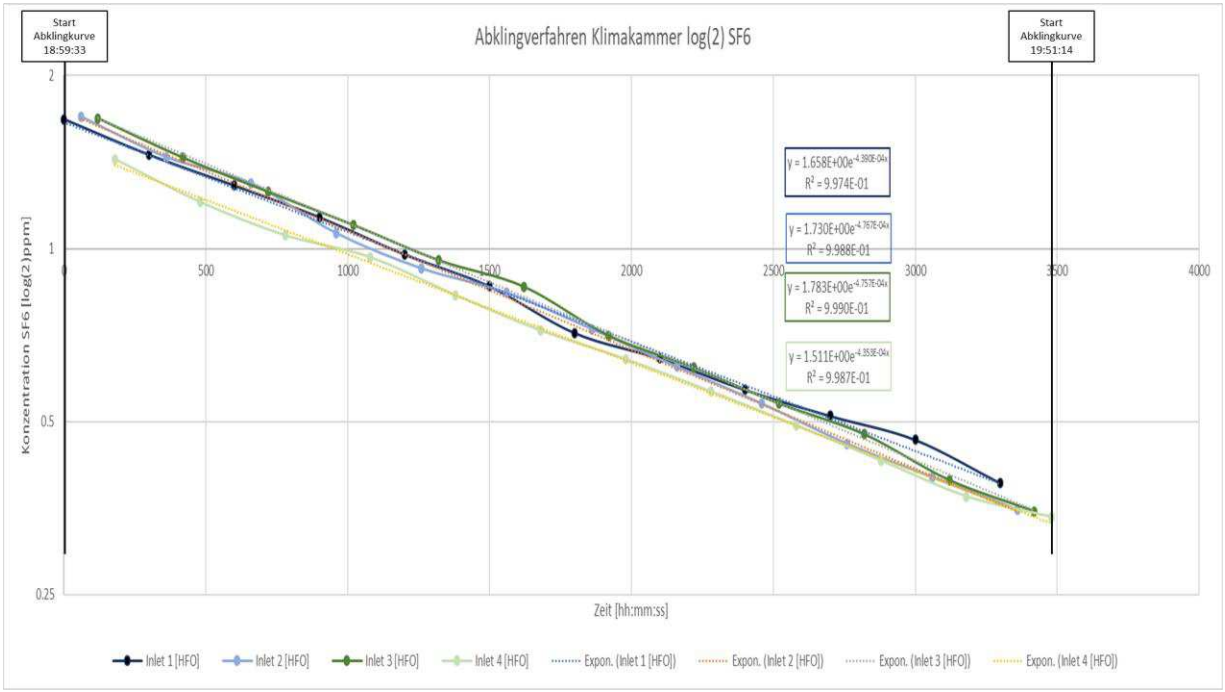


11.6. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 HFO1234yf

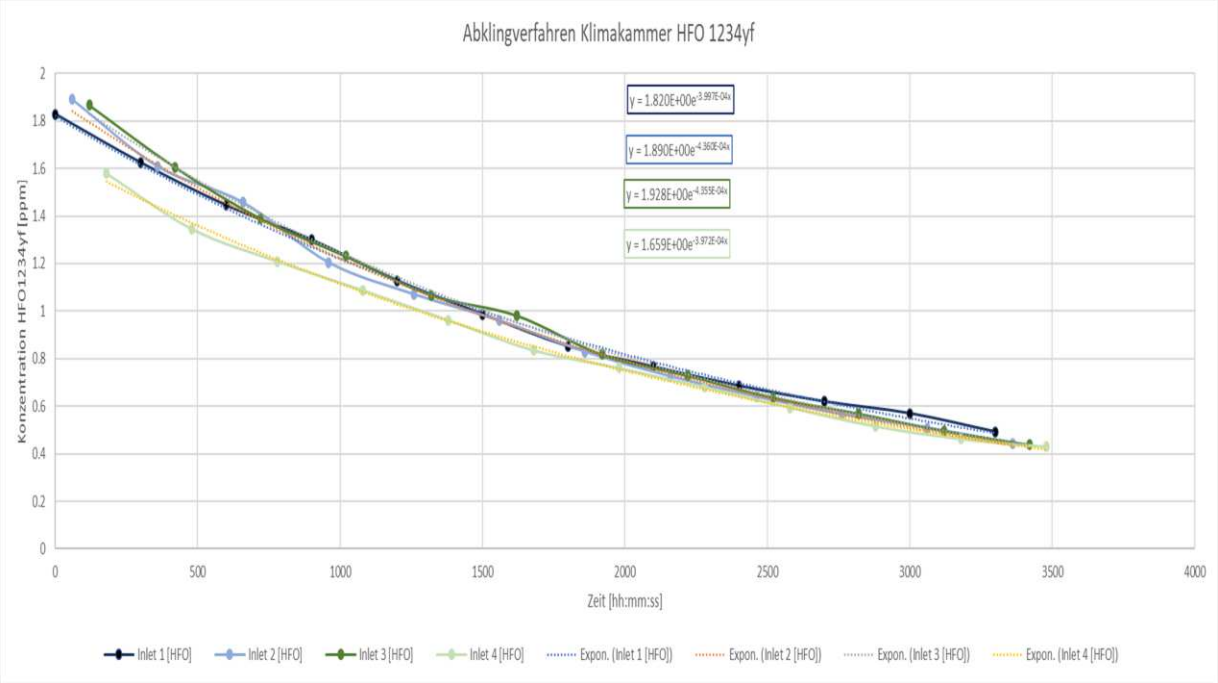


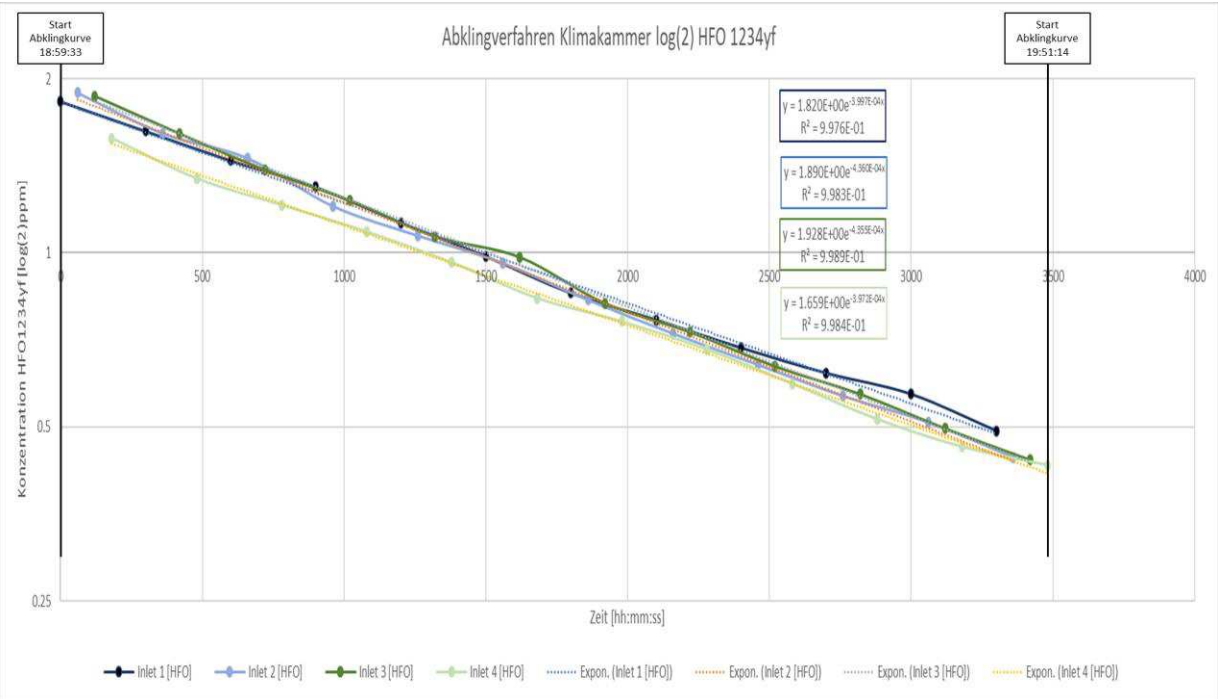
11.7. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 Abklingverhalten Tracergas SF6



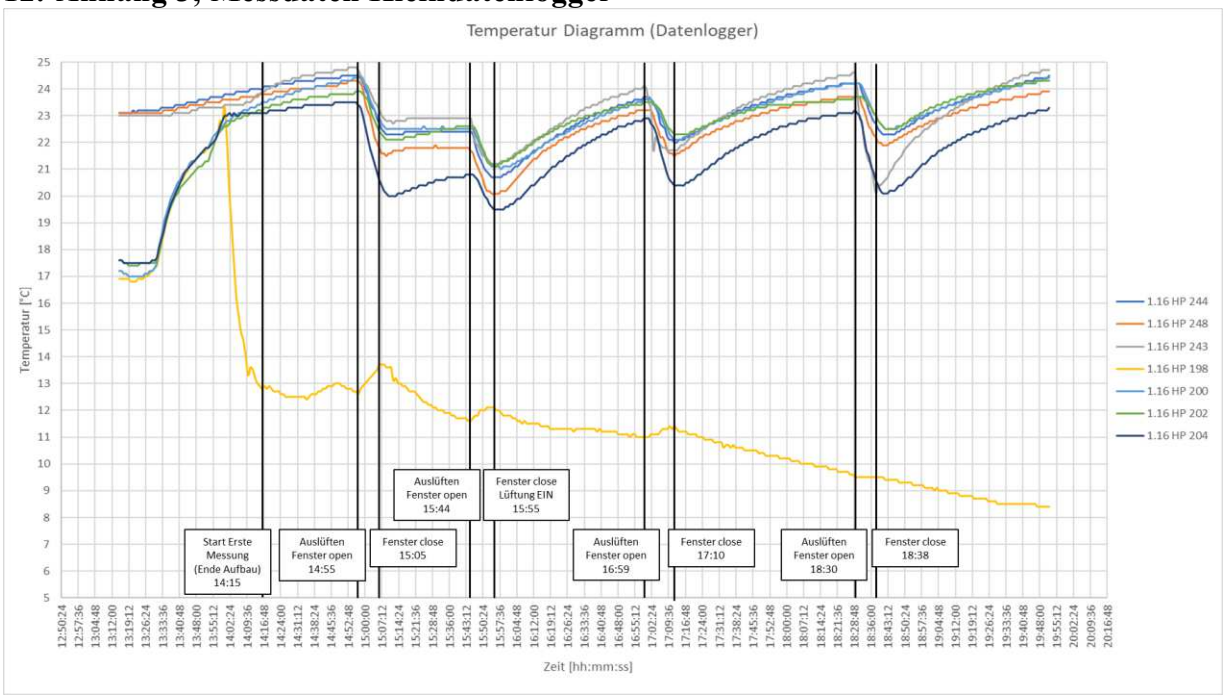


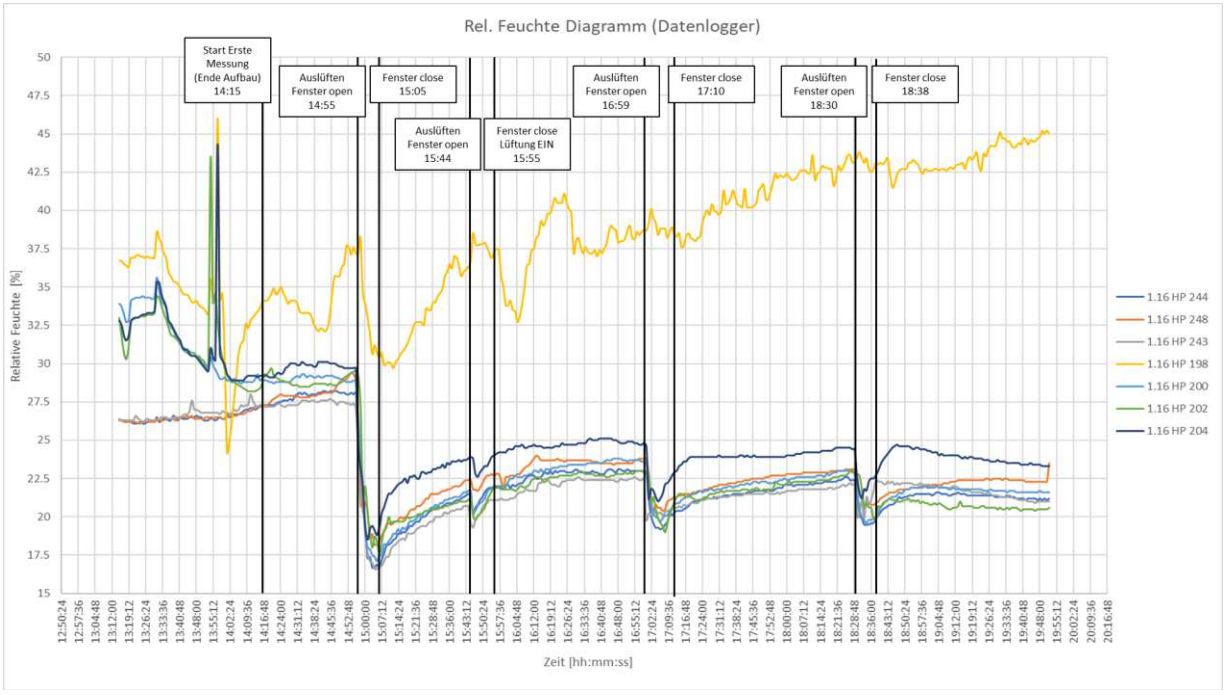
11.8. Suissetec-Schulzimmer Puls 5 Abklingverhalten HFO1234yf

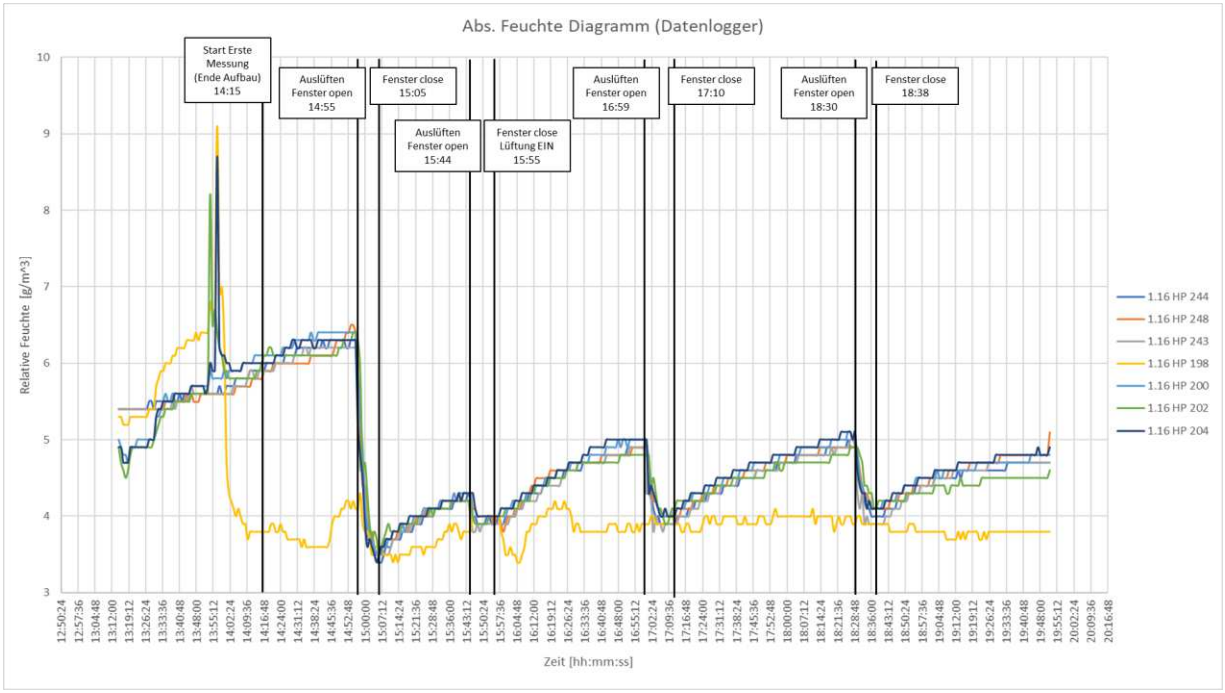


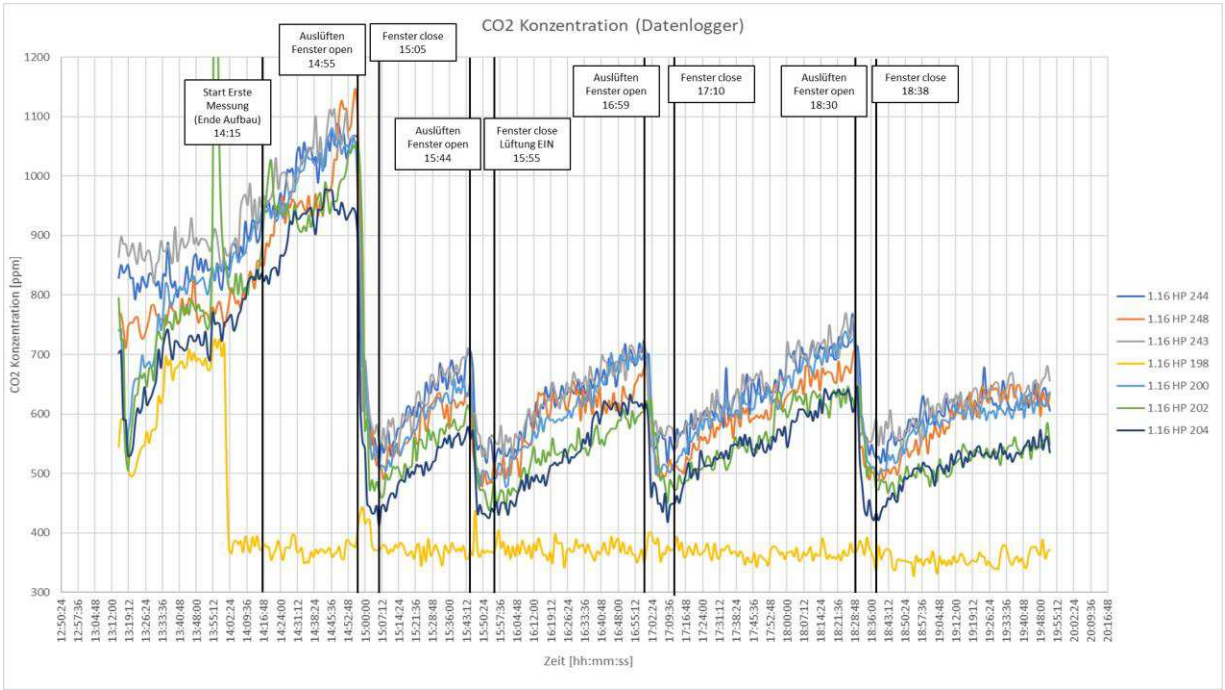


12. Anhang 3, Messdaten Kleindatenlogger





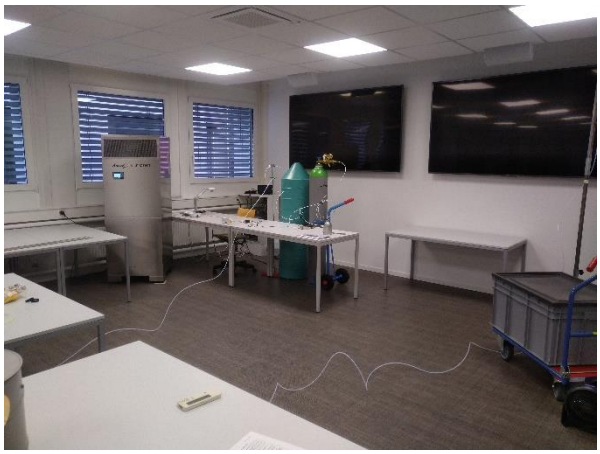

Abs. Feuchte Diagramm (Datenlogger)
Start Erste Messung (Ende Aufbau) 14:15
Auslüften Fenster open 14:55
Fenster close 15:05
Auslüften Fenster open 15:44
Fenster close Lüftung EIN 15:55
Auslüften Fenster open 16:59
Fenster close 17:10
Auslüften Fenster open 18:30
Fenster close 18:38
Relative Feuchte [g/m^3]
Zeit [hh:mm:ss]
1.16 HP 244
1.16 HP 248
1.16 HP 243
1.16 HP 198
1.16 HP 200
1.16 HP 202
1.16 HP 204

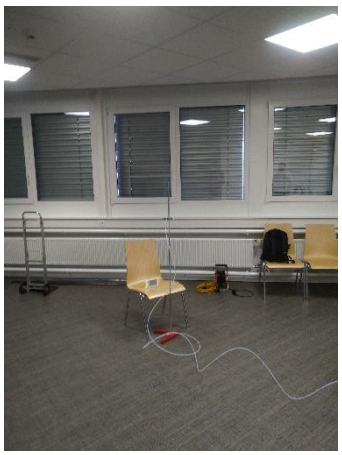

CO2 Konzentration (Datenlogger)
Start Erste Messung (Ende Aufbau) 14:15
Auslüften Fenster open 14:55
Fenster close 15:05
Auslüften Fenster open 15:44
Fenster close Lüftung EIN 15:55
Auslüften Fenster open 16:59
Fenster close 17:10
Auslüften Fenster open 18:30
Fenster close 18:38
CO2 Konzentration [ppm]
Zeit [hh:mm:ss]
1.16 HP 244
1.16 HP 248
1.16 HP 243
1.16 HP 198
1.16 HP 200
1.16 HP 202
1.16 HP 204

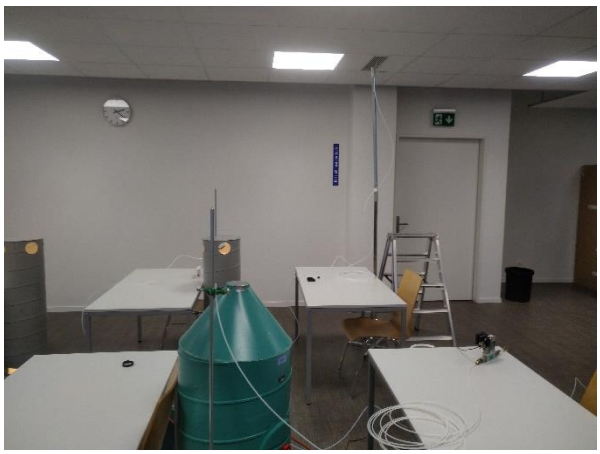
13. Anhang 4, Fotos & Wärmebildaufnahmen

13.1. Messung vom 12.03.2021

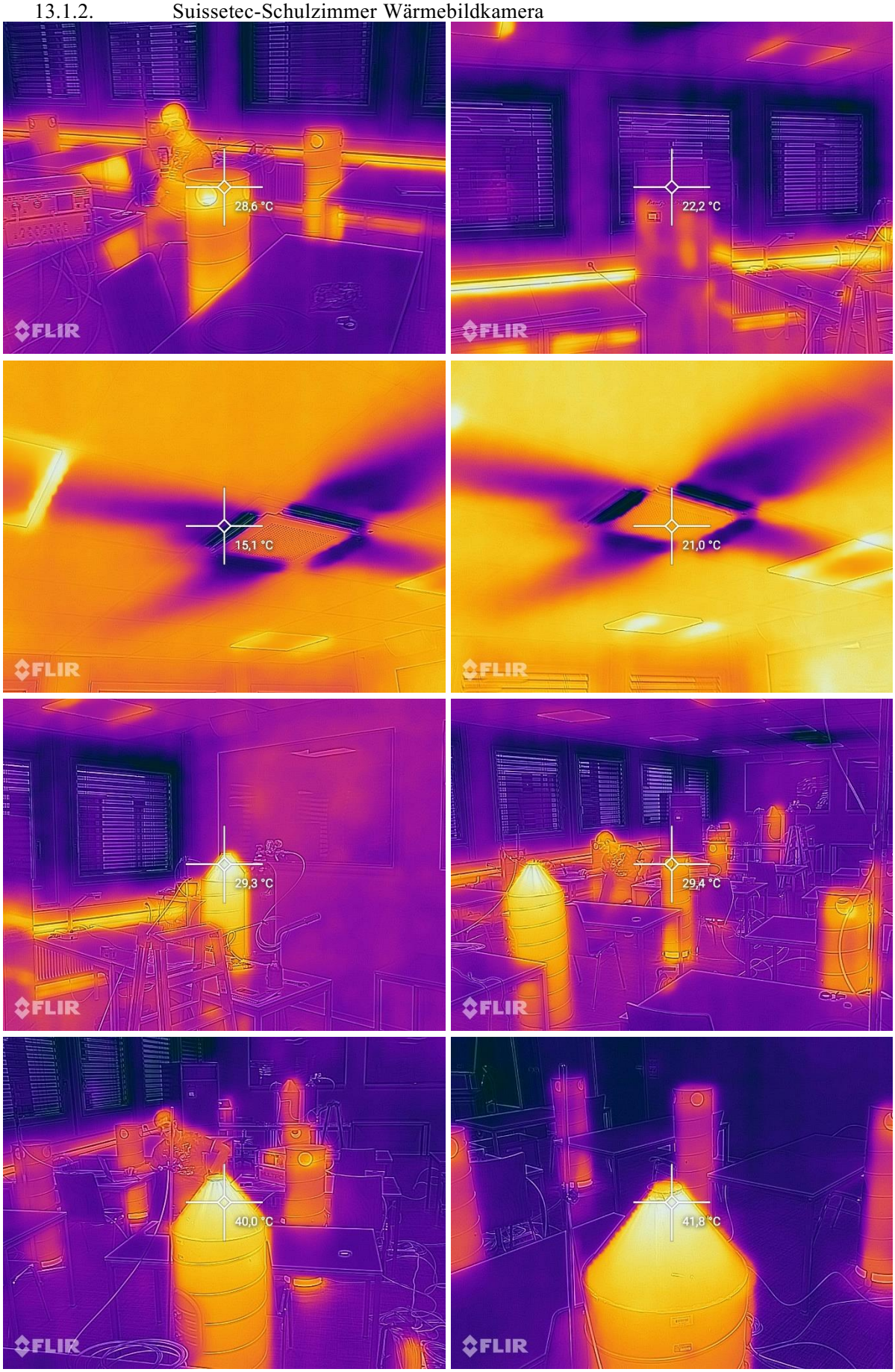
13.1.1. Suissetec-Schulzimmer Fotos

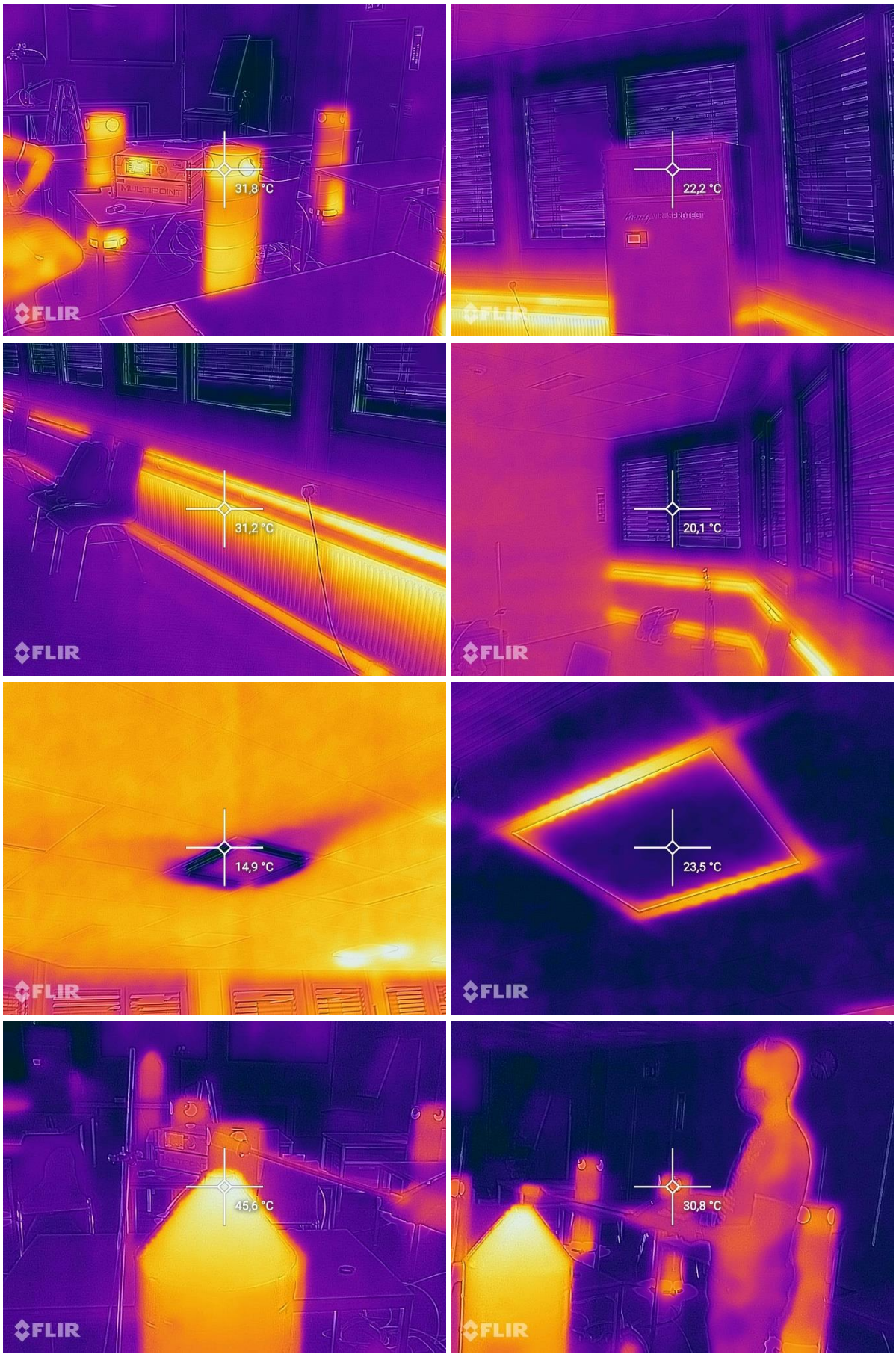






13.1.2. Suissetec-Schulzimmer Wärmebildkamera



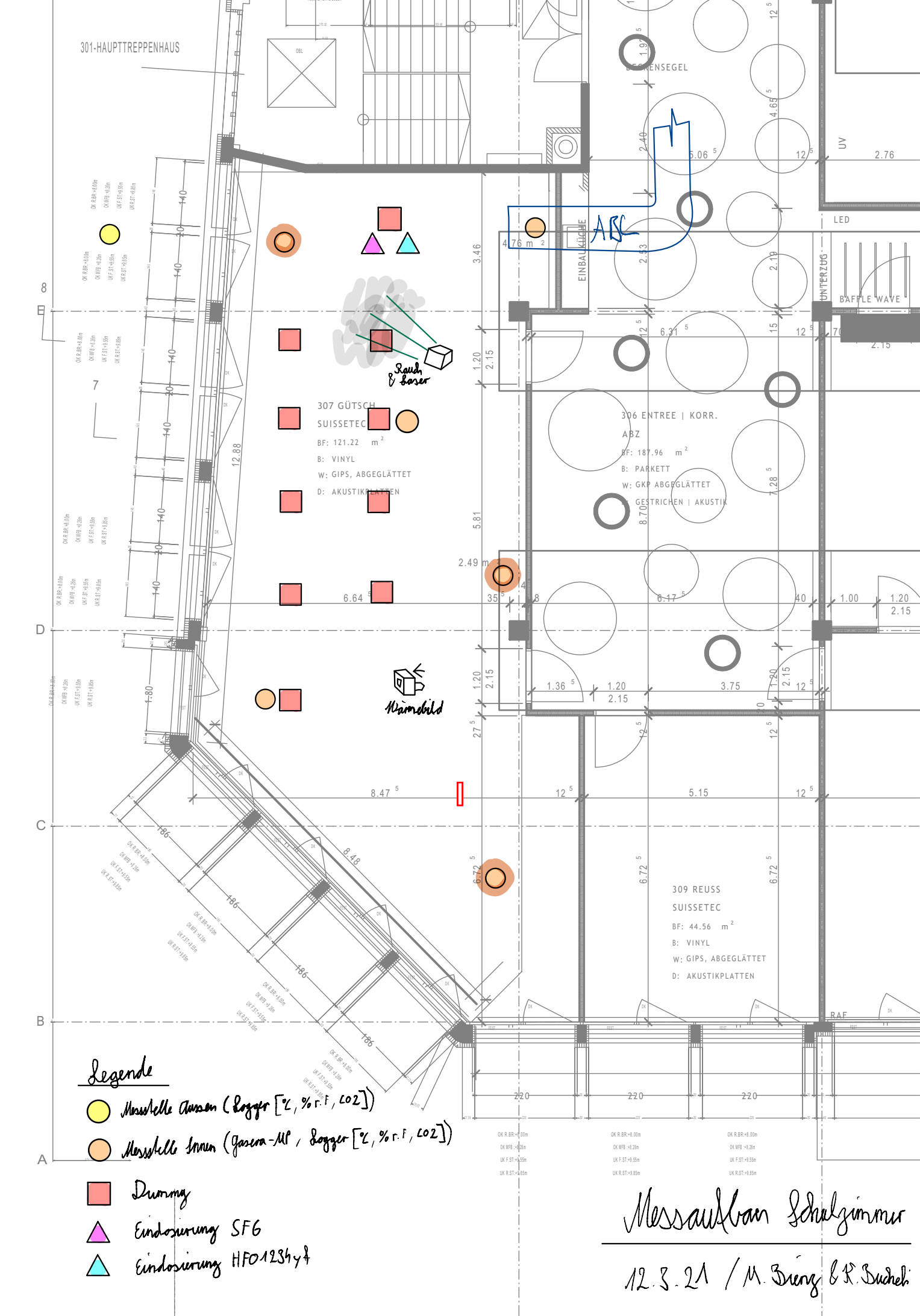

31,8 °C
22,2 °C
31,2 °C
20,1 °C
14,9 °C
23,5 °C
45,6 °C
30,8 °C
FLIR

14. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau & Ablaufdokumentation 6
Abbildung 2: Messresultate Puls 1-3 SF6 9
Abbildung 3: Messresultate Puls 1-3 HFO1234yf 9
Abbildung 4: Messresultate Puls 4 SF6 11
Abbildung 5: Messresultate Puls 4 HFO1234yf 12
Abbildung 6: Volumenströme pro Messpunkt SF6 15
Abbildung 7: Volumenströme pro Messpunkt HFO1234yf 15
Abbildung 8: Messresultate Puls 5 SF6 16
Abbildung 9: Messresultate Puls 5 HFO1234yf 16
Abbildung 10: Rauchversuche 17

15. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung Pulse 1-3 7
Tabelle 2: Durchschnittswerte Datenlogger Pulse 1-3 7
Tabelle 3: Beschreibung Puls 4 10
Tabelle 4: Durchschnittswerte Datenlogger Puls 4 10
Tabelle 5: Beschreibung Puls 5 13
Tabelle 6: Durchschnittswerte Datenlogger Puls 5 13
Tabelle 7: Volumenstromberechnung Puls 5 14


301-HAUPTTREPPENHAUS
307 GÜTSCH
SUISSETEC
BF: 121.22 m²
B: VINYL
W: GIPS, ABGEGLÄTTET
D: AKUSTIKPLATTEN
Rauch & Laser
Wärmebild
306 ENTREE | KORR.
ABZ
BF: 187.96 m²
B: PARKETT
W: GKP ABGEGLÄTTET
GESTRICHEN | AKUSTIK
309 REUSS
SUISSETEC
BF: 44.56 m²
B: VINYL
W: GIPS, ABGEGLÄTTET
D: AKUSTIKPLATTEN
EINBAUKÜCHE
ABZ
UNTERZUG
BAFFLE WAVE
LED
UV
RAF
Legende
Messstelle Aussen (Logger [°C, % r.F, CO2])
Messstelle Innen (Gasera-MP, Logger [°C, % r.F, CO2])
Duschung
Eindosierung SF6
Eindosierung HFO1234yf
Messaufbau Schalzimmer
12.3.21 / M. Brieg & R. Bucheli

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 Kapitel 5

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

Ablaufprotokoll Tag 1

Datum Durchführung: 02.04.2021

10:00 Uhr Aufbau / Kalibrierung / Einstellungen Lüftung / Diverse techn. Schwierigkeiten mit MLT4 & Undichtigkeit HFO1234yf-Eindosierung
14:00 Uhr 1. Puls SF6 & HFO zur groben Ermittlung der Raumluftdynamik
15:30 Uhr Start Reparatur MLT4 & LabView-Software
17:30 Uhr Weitere Puls zur Ermittlung der Raumluftdynamik ohne Auswertung
20:00 Uhr Beendigung 1. Messtag & Anpassung Setup für die folgenden Messtage aufgrund defintivem Ausfall MLT4 und LabView

Während den Messungen waren 2 Personen anwesend.

Einstellwerte Eindosierventile

SF6: 70 mg/s (Kalibriert)
HFO: 63.6 mg/s (Kalibriert (mit Umrechnungsfaktor))
(Kalibrierung HFO gleich wie SF6)

Ablaufprotokoll Tag 2

Datum Durchführung: 03.04.2021

09:30 Uhr Start Geräte / Kalibrierung
10:00 Uhr Besprechung Betreuer & Industriepartner
11:00 Uhr Rauchversuche
11:45 Uhr Platzierung Eindosierstelle "Dozent" FTIR "Vorne-Fenster" (Standort 1)
12:02 Uhr Puls HFO - techn. Schwierigkeiten
12:24 Uhr Puls HFO - techn. Schwierigkeiten
12:55 Uhr Puls HFO 15s
13:01 Uhr Puls SF6 15s
13:47 Uhr Puls SF6 30s
13:51 Uhr Puls HFO 30s
14:15 Uhr Puls HFO 60s
14:20 Uhr Puls SF6 60s
14:25 Uhr Kontrolle Anlagezustand Lüftung / Wärmebildaufnahmen
14:50 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Mitte-Fenster" (Standort 2)
15:00 Uhr Puls SF6 15s
15:03 Uhr Puls HFO 15s
15:10 Uhr Fotos für Dokumentation
15:34 Uhr Puls HFO 30s
15:37 Uhr Puls SF6 30s
15:58 Uhr Puls SF6 60s
16:02 Uhr Puls HFO 60s
16:25 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinten-Fenster" (Standort 3)
16:30 Uhr Puls HFO 15s
16:33 Uhr Puls SF6 15s
16:56 Uhr Puls SF6 30s
16:59 Uhr Puls HFO 30s
17:30 Uhr Puls HFO 60s
17:33 Uhr Puls SF6 60s
17:57 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinten-Wand" (Standort 4)
17:59 Uhr Puls SF6 15s
18:02 Uhr Puls HFO 15s
18:27 Uhr Puls HFO 30s
18:30 Uhr Puls SF6 30s
18:55 Uhr Puls SF6 60s
18:58 Uhr Puls HFO 60s

Einstellwerte Eindosierventile

SF6: 70 mg/s (Kalibriert)
HFO: 63.6 mg/s (Kalibriert (mit Umrechnungsfaktor))
(Kalibrierung HFO gleich wie SF6)

Ablaufprotokoll Tag 2

Datum Durchführung: 03.04.2021

19:05 Uhr Umbau Eindosierstelle zu Dummy "Mitte-Mitte" FTIR weiterhin Dummy "Hinten-Wand" (Standort 4)
19:24 Uhr Puls HFO 15s
19:26 Uhr Puls SF6 15s
19:49 Uhr Puls SF6 30s
19:51 Uhr Puls HFO 30s
20:16 Uhr Puls HFO 60s
20:19 Uhr Puls SF6 60s
20:51 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinte-Fenster" (Standort 3)
20:54 Uhr Puls SF6 15s
20:56 Uhr Puls HFO 15s
21:18 Uhr Puls HFO 30s
21:21 Uhr Puls SF6 30s
21:40 Uhr Korrektur Messpunkt Ch.6 Gasera vom ABL-Einlass weiter direkt in den Abluftkanal geschoben zur besseren Messung der durchschnittlichen Abluftkonzentraltion
21:45 Uhr Puls SF6 60s
21:47 Uhr Puls HFO 60s
22:15 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Mitte-Fenster" (Standort 2) und Wechsel 0-Gas von leerer Argon-Flasche zu voller Stickstoffflasche (N2 (5.6))
22:37 Uhr Puls HFO 15s
22:39 Uhr Puls SF6 15s
23:02 Uhr Puls SF6 30s
23:05 Uhr Puls HFO 30s
23:26 Uhr Puls HFO 60s
23:29 Uhr Puls SF6 60s
23:55 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Vorne-Fenster" (Standort 1)
00:03 Uhr Puls SF6 15s
00:05 Uhr Puls HFO 15s
00:26 Uhr Puls HFO 30s
00:28 Uhr Puls SF6 30s
00:47 Uhr Puls SF6 60s
00:50 Uhr Puls HFO 60s
01:15 Uhr Ende der Messung

Ablaufprotokoll Tag 3

Datum Durchführung: 04.04.2021

10:15 Uhr Start Geräte / Kalibrierung
10:50 Uhr Umbau Eindosierung in Zuluftstrang in Zentrale Ca. 30m Leitungslänge bis Eintritt Tribüne bei ca. 5m/s - 6s Zeitverzögerung FTIR weiterhin Dummy "Vorne-Fenster" (Standort 1)
11:01 Uhr Puls HFO 15s
11:03 Uhr Puls SF6 15s
11:30 Uhr Puls SF6 30s
11:32 Uhr Puls HFO 30s
11:55 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinten-Fenster" (Standort 3)
12:01 Uhr Puls HFO 15s
12:03 Uhr Puls SF6 15s
12:27 Uhr Puls SF6 30s
12:29 Uhr Puls HFO 30s
12:52 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinten-Wand" (Standort 4)
12:55 Uhr Puls HFO 15s
12:57 Uhr Puls SF6 15s
13:19 Uhr Puls SF6 30s
13:21 Uhr Puls HFO 30s
13:40 Uhr Zügeln FTIR in Abluftkanal (Standort 5)
13:49 Uhr Puls HFO 15s
13:50 Uhr Puls SF6 15s
14:26 Uhr Puls SF6 30s
14:28 Uhr Puls HFO 30s
14:55 Uhr Ende Puls-Methoden-Versuche
14:57 Uhr Start Konstantdosierung Zuluft (30mg/s)
15:57 Uhr Ende Konstantdosierung
16:51 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Vorne-Fenster" (Standort 1)
16:55 Uhr Start Konstantdosierung Zuluft (30mg/s)
17:45 Uhr Ende Konstantdosierung
18:28 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Hinten-Fenster" (Standort 3)
18:35 Uhr Start Konstantdosierung Zuluft (30mg/s)
19:19 Uhr Ende Konstantdosierung
19:40 Uhr Umbau Eindosierung zu "Dozent" FTIR weiterhin Dummy "Hinten-Fenster" (Standort 3)
20:00 Uhr Start Konstantdosierung Dozent (30mg/s)
21:18 Uhr Ende Konstantdosierung
21:38 Uhr Zügeln FTIR zu Dummy "Vorne-Fenster" (Standort 1)
21:44 Uhr Start Konstantdosierung Dizent (30mg/s)
22:35 Uhr Ende Konstantdosierung
23:15 Uhr Ende der Messung

Einstellwerte Eindosierventile

SF6: 30/70 mg/s (Kalibriert)
HFO: 27.3/63.6 mg/s (Kalibriert (mit Umrechnungsfaktor))
(Kalibrierung HFO gleich wie SF6)

Messablauf HSLU-Schulzimmer C210

Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

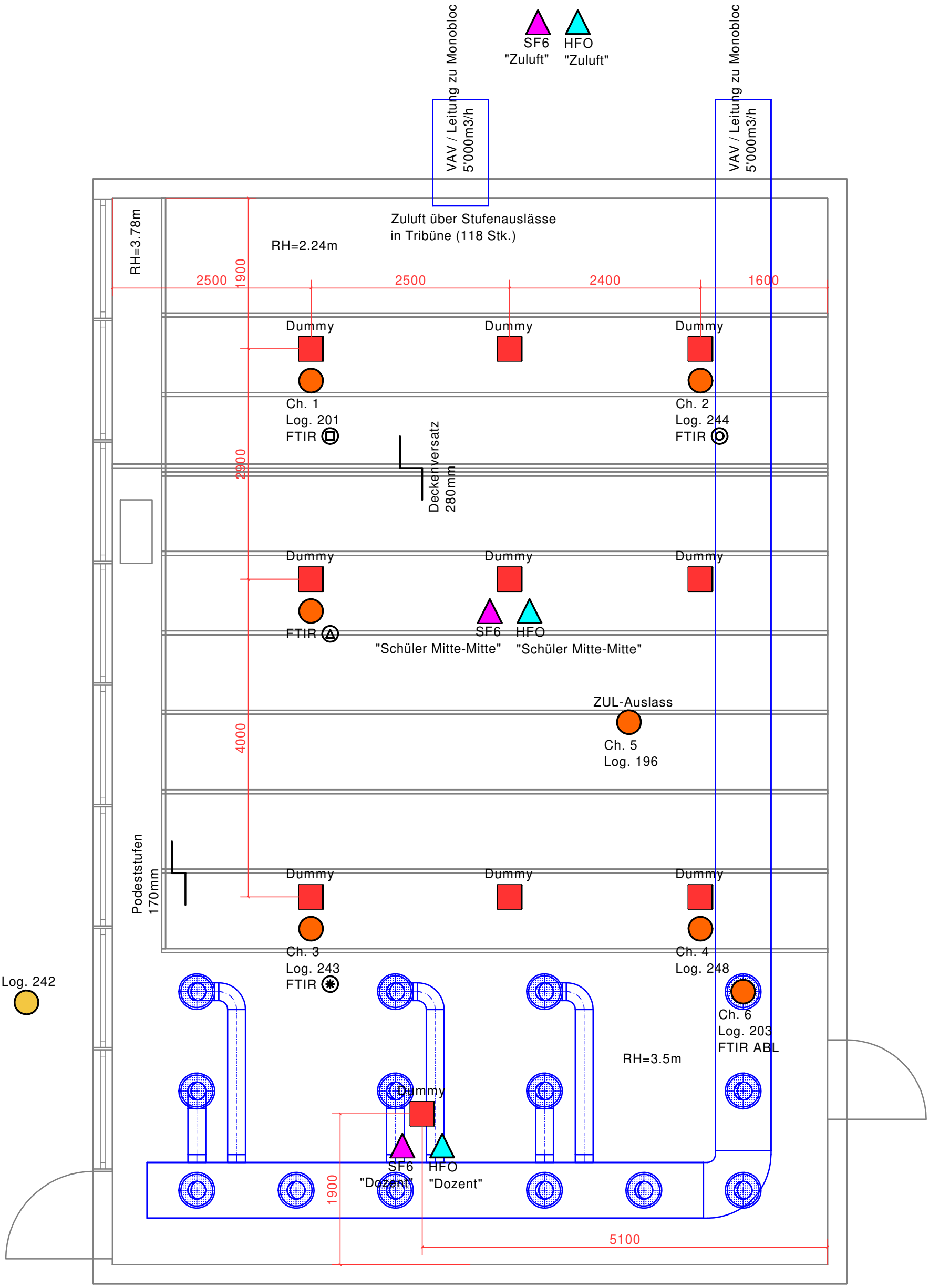
Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021

Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A3
Massstab	.:.
Datum	18.04.2021
Typ	Dokumentation
Plan Nr.	004

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion



- Messstelle Aussen (Logger) [°C, %r.F., ppm CO2]
- Messstelle Innen (Gasera-MP & Logger & tlw. FTIR) (+1.15m OKfB) [ppm SF6, ppm HFO1234yf, ppm H2O, °C, %r.F., ppm CO2]
- Dummy (Wärmequelle - Mensch)
- Eindosierung [SF6]
- Eindosierung [HFO1234yf]

Versuchsaufbau HSLU-Schulzimmer C210

Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

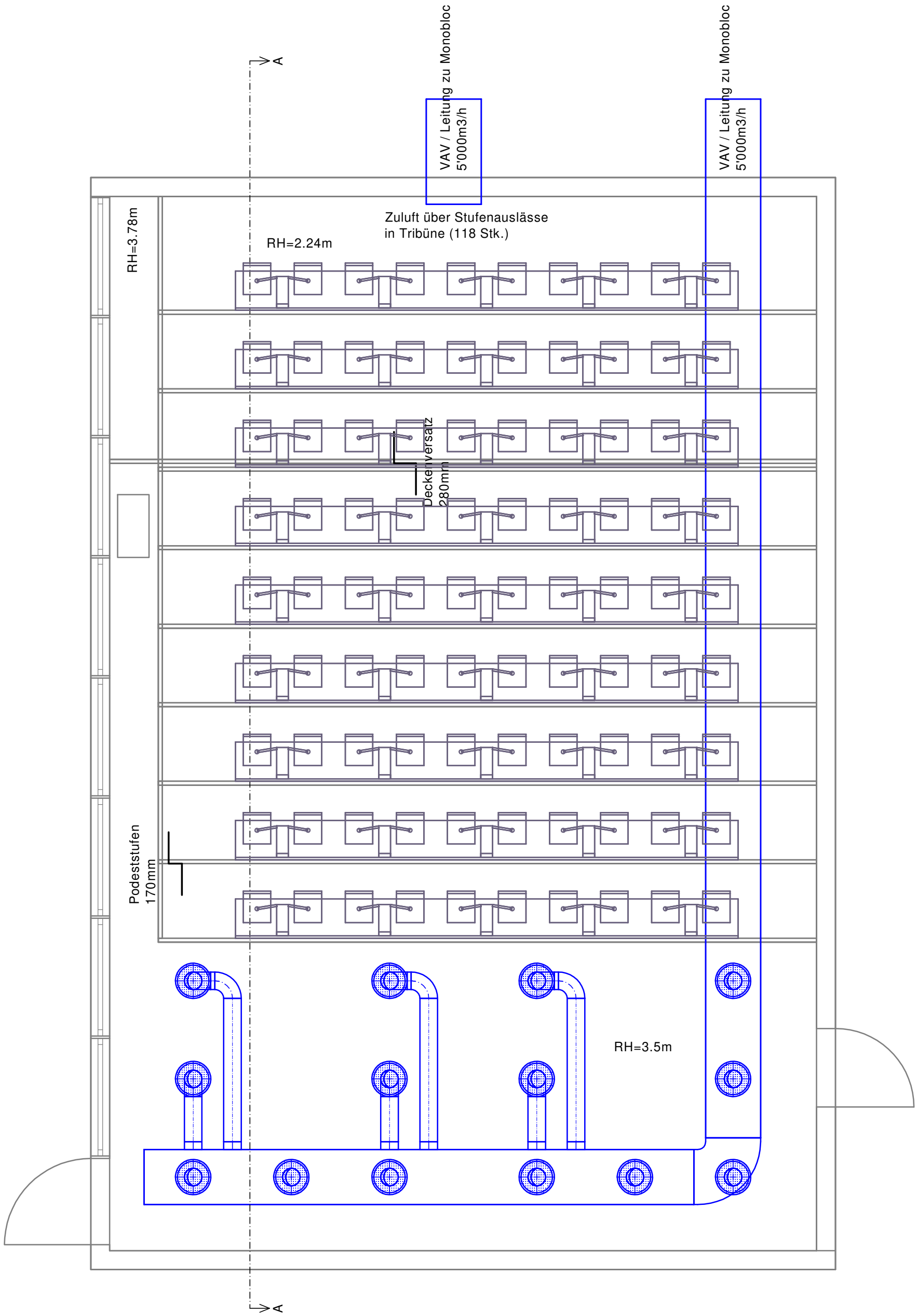
Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021

Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A3
Massstab	1:50
Datum	18.04.2021
Typ	Grundriss
Plan Nr.	003

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion



Grundriss HSLU-Schulzimmer C210

Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

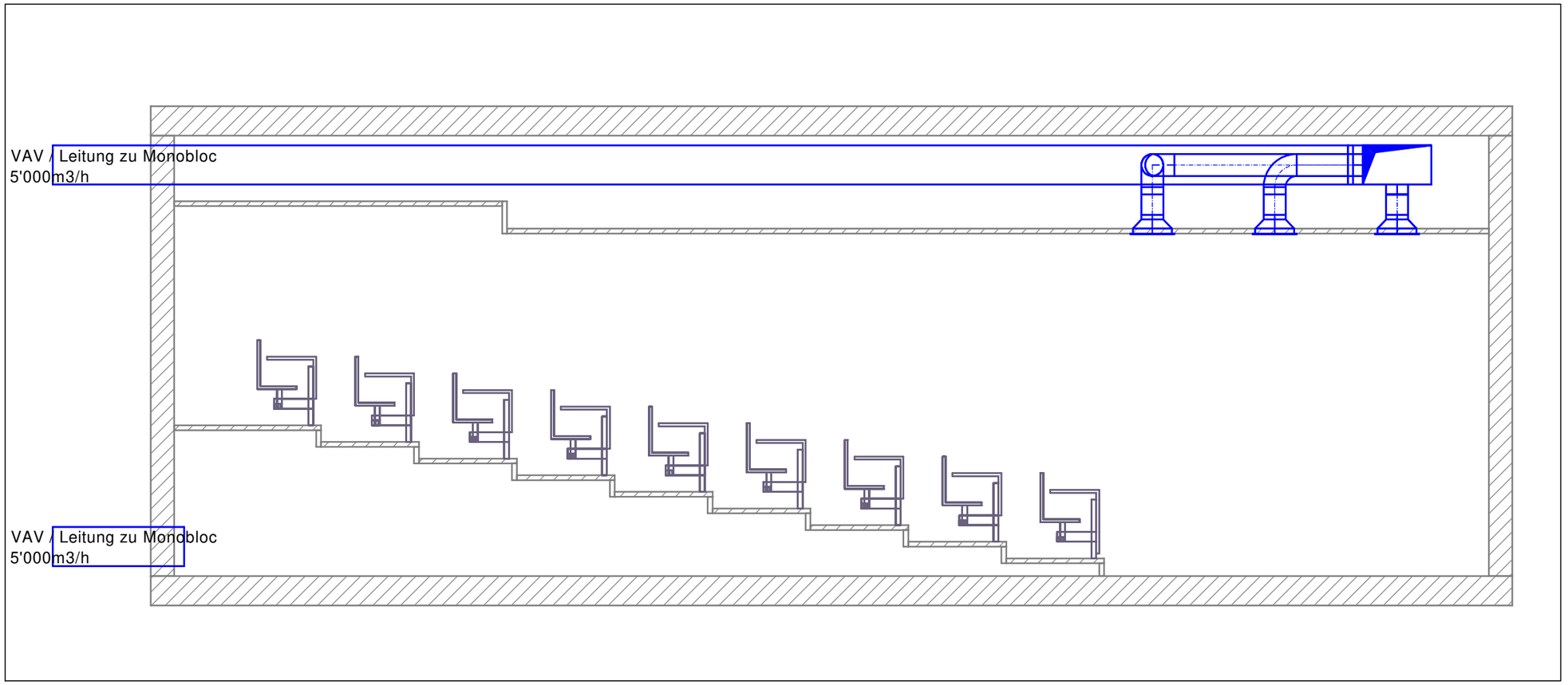
Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021

Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A3
Massstab	1:50
Datum	18.04.2021
Typ	Grundriss
Plan Nr.	005

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion



Querschnitt A-A HSLU-Schulzimmer C210

Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

Bachelor-Thesis Gebäudetechnik| Energie 2021

Erprobung des klimafreundlichen Tracergases HFO1234yf zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität in belegten Räumen unter Covid-19 Randbedinungen

Moritz Bienz / Kevin Bucheli

Format	A3
Massstab	1:50
Datum	18.04.2021
Typ	Schnitt
Plan Nr.	006

Erstellt mit: Trimble Nova Schul- und Lehrversion

Hochschule Luzern
HSLU

Technik & Architektur

Abteilung Gebäudetechnik

Laborbericht Nr: 003

Aufgabe:	**Tracergasmessungen im Schulzimmer HSLU C210**
Prüfobjekt:	**Schulzimmer HSLU C210**
Auftraggeber:	**HSLU T&A Abteilung Gebäudetechnik**
Namen:	**Moritz Bienz** **Kevin Bucheli**
Datum:	**Horw, 2021-04-01 – 2021-04-04 (Donnerstag-Sonntag)**

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract ... 4
2. Auftraggeber ... 5
2.1. Hochschule: ... 5
2.2. Industriepartner: ... 5
3. Auftrag ... 5
3.1. Auftrag HSLU Schulzimmer ... 5
4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung ... 6
5. Prüfverfahren ... 6
6. Tracergasmessung ... 7
6.1. Versuchsaufbau und Ablauf ... 7
7. Aufbau und Probemessungen ... 10
7.1. Test-Setup ... 10
7.2. Messablauf Aufbau und Probemessungen ... 10
7.3. Resultate ... 11
7.3.1. Umlaufklappe falsch angeschlossen ... 11
7.3.2. Messgerät MLT4 ... 12
8. Puls-Dosierung ... 13
8.1. Test-Setup ... 13
8.2. Messablauf Puls-Dosierung ... 13
8.3. Resultate Puls-Dosierung ... 14
8.3.1. Vergleich Gasera mit FTIR ... 14
8.3.2. Verhalten der Luft im Raum ... 17
9. Konstant-Dosierungen ... 20
9.1. Test-Setup Konstant-Dosierung ... 20
9.2. Messablauf Konstant-Dosierung ... 20
9.3. Resultate Konstant-Dosierung ... 21
9.3.1. Aufdosierung ... 21
9.3.2. Abklingen ... 22
9.3.3. Zusammenfassung Aufdosieren und Abklingen ... 24
9.3.4. Leckage über Plattentauscher & undichte Umluftklappe ... 24
10. Rauchversuche ... 25
10.1. Erkenntnisse Rauchversuche ... 25
10.1.1. Verhalten Luft Dozent ... 25
10.1.2. Verhalten Luft Mitte-Mitte ... 26
10.1.3. Verhalten Luft Hinterste Reihe ... 27
11. Diskussion und Empfehlung ... 28
11.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit im Schulzimmer C210 ... 28
11.2. Leckage über das Luftaufbereitungsgerät ... 28
11.3. Technische Problemstellung an der Lüftungsanlage im Trakt 2 Stockwerk C ... 28
11.4. Luftmengen in den Schulzimmern der Lüftungsanlage im Trakt 2 Stockwerk C ... 28
12. Fazit ... 28
12.1. Hinsichtlich Raum & Covid-19 ... 28
12.2. Hinsichtlich Messverfahren ... 29
13. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung ... 30
14. Anhang 2, Messdaten Tracergase ... 32
14.1. Messdaten Puls Messungen ... 32
14.2. Messdaten Konstant-Aufdosierung & Abklingen ... 32
15. Anhang 3, Messdaten Kleindatenlogger ... 32
16. Anhang 4, Fotos & Wärmebildaufnahmen ... 33
16.1. Messung vom 01.04.2021 – 04.04.2021 ... 33
16.1.1. HSLU-Schulzimmer Fotos ... 33
16.1.2. HSLU-Schulzimmer Wärmebildkamera ... 41

17. Abbildungsverzeichnis 43
18. Tabellenverzeichnis 43

1. Abstract

Im Rahmen der eingangs erwähnten Bachelorarbeit, wurde im HSLU-Schulzimmer C210 an der Technikumstrasse in Horw die dritte Messreihe durchgeführt, um die Handhabung der Geräte und Instrumente weiter zu erproben und für anschliessende Messungen zu optimieren. In dieser Messungen wurden gegenüber den vorangegangenen Messungen zwei weitere Messgeräte nach dem NDIR-, respektive dem FTIR-Messprinzip untersucht und angewendet. Des Weiteren wurde auch die Eindosierung der Tracergase, vor allem hinsichtlich der Pulsmethode, verbessert durch eine computergestützte Ansteuerung und simultane Aufzeichnung des dosierten Tracergases und der Ventilstellungen. Durch die Messungen konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Raumluftdynamik und zur Effizienz der Lüftungsanlage gemacht werden. Und nicht zuletzt konnten auch hinsichtlich der für diese Bachelorarbeit wichtigen Puls-Methode weitere wichtige Erkenntnisse gesammelt werden.

Im ersten Teil der Messungen wurden zunächst einige Probemessungen zur Einstellung der Messgeräte und zur Erkennung der ersten wichtigen raumlufttechnischen Strömungsphänomene durchgeführt. Diese haben bereits gezeigt, dass der Raum über eine gut funktionierende Verdrängungsströmung verfügt. Ebenfalls wurde dabei erkannt, dass die Lüftungsanlage eine Fehlfunktion bei der Ansteuerung der Umluftklappe, sowie eine erhebliche Leckage über den Rotationswärmetauscher aufweist, was zeitnah zu beheben ist, da sich die Effizienz der Anlage so merklich verbessern liesse.

Während der anschliessend durchgeführten Puls-Dosierungen und Messungen im gesamten Raum konnte die Raumluftströmung genaustens rekonstruiert und analysiert werden. Die Verdrängungsströmung aus den Luftauslässen der Tribüne hin zu den Abluftdurchlässen oberhalb des Dozentenpultes sorgt für einen effizienten Abtransport von Schadstoffen in der Luft. Auch hat sich dabei aber gezeigt, dass die letzten drei Sitzreihen nicht von dieser Verdrängungslüftung profitieren und die Luft in diesem Bereich geradezu stagniert, was die Lüftungseffizienz in diesem Bereich verschlechtert.

Die zuletzt durchgeführten Konstant-Dosiermethoden (Aufdosierung & Abklingen) haben die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Pulsdosierungen bestätigt und zusätzliche Berechnungen zu Luftwechselraten und lokalen Lüftungseffizienz ermöglicht.

Die Lüftungseffektivität lag bei jedem untersuchten Punkt im Raum über 0.5 und somit im Bereich einer Verdrängungslüftung. Die vordersten Sitzreihen weisen dabei die höchste Effizienz auf. Dieser Umstand soll bei einer künftigen Belegung des Raumes berücksichtigt werden. Allerdings kann aufgrund der Daten auch gesagt werden, dass der Raum gerade im Teilbelegungsfall überlüftet ist und die Luftmenge für einen energieeffizienteren Betrieb reduziert werden sollte.

Zuletzt kann bezogen auf die Messmethodik gesagt werden, dass die Pulsmethode nur mit schnelleren Messintervallen verlässliche und ganzheitlich verwertbare Daten liefert. Die Ergänzung des Mess-Setups mit einem Multipointsampler kann aber helfen, Messreihen schneller und ganzheitlicher durchzuführen. Ein Kombination der beiden Messgeräte/Verfahren stellt somit die optimale Ausgangslage für künftige Messungen dar.

2. Auftraggeber

2.1. Hochschule:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Erstbetreuer: Heinrich Huber heinrich.huber@hslu.ch
Zweitbetreuer: Stefan Walser stefan.walser@hslu.ch

2.2. Industriepartner:

FREI WÜEST EXPERT
Ingenieurbüro
Gutachten – Expertisen – Forschung – Normierung
Geissburghalde 11
CH-6130 Willisau
Beat Frei, beat.frei@frei.expert

3. Auftrag

Mit der Bachelorarbeit soll das neue Tracergas HFO-1234yf (Tetrafluorpropen) mit sehr geringem Treibhauspotenzial zur Bestimmung der Luftwechselrate und der Lüftungseffektivität erprobt werden. Als Referenz-Tracergas wird Schwefelhexafluorid (SF6) verwendet. Von besonderem Interesse ist die Ausbreitung von SARS-CoV-2 Aerosolen in belegten Räumen. Dies kann mit einer punktförmigen HFO-1234yf-Tracergas-Quelle mit konstanten oder pulsförmigen Emissionen und einer lokal verteilten Detektion mit Mehrpunkt-Sampling untersucht werden. Eine erste Anwendung sind Schulzimmer und Büroräume. Wesentlich interessanter ist aber der Einsatz in grossen Räumen (Versammlungsräume, Einkaufszentren, Sporthallen, Restaurants, …). Neben der Tracergas-Messung sollen ergänzende Verfahren zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Raumluftströmungen eingesetzt werden (Rauch, Laser, ev. lokale Raumluftgeschwindigkeit)

3.1. Auftrag HSLU Schulzimmer

Ziel dieser Messungen ist der Vergleich der beiden Messgeräte Gasera One mit dem FTIR-Spektrometer, respektive deren unterschiedlicher Messverfahren hinsichtlich der Pulsdosierung. Hierzu wird eine breite Versuchsreihe angelegt, mit welcher im Speziellen die Raumluftdynamik qualitativ ermittelt und dargestellt werden soll. Auch sollen die Messresultate Aufschluss geben zur Lüftungseffektivität und Lüftungseffizienz. Weiter wird die Pulsdosierung mit den Verfahren der konstanten Dosierung ergänzt, um die Vorgänge in der Raumluft noch besser analysieren zu können. Bei den dazu anzuwendenden Aufdosier- & Abkling-Methode geht es vordergründig zudem auch um quantitative Aussagen. Der Vergleich der beiden Tracergase (SF6 und HFO-1234yf) ist in dieser Messreihe ebenfalls nochmals zentraler Bestandteil. Mit Unterstützung von Rauchversuchen wird die Raumströmung optisch analysiert und veranschaulicht. Messungen der Raumlufttemperaturen und Wärmebildaufnahmen sollen das Verständnis für die Vorgänge im Raum zusätzlich stützen.

4. Prüfobjekt, Eingangsdatum, Datum der Prüfung

Das Prüfobjekt ist ein Schulzimmer der Hochschule Luzern Technik & Architektur in Horw. Dieser rund 120m2 grosse Raum befindet sich im 1. Untergeschoss des Trakt II und wird durch eine Zu- & Abluftanlage maschinell be- und entlüftet. Aufgrund der Anordnung der Zuschauerreihen auf einer Tribüne ändert sich die Raumhöhe. Sie variiert zwischen 3.5m im Bereich des Dozenten und 2.24m im Bereich der letzten Sitzreihe. Eine abgehängte Decke versteckt die technischen Installationen. Die Lufteinführung erfolgt über Stufen-Auslässe, die im Podest der Zuschauerreihen im Fussbereich angeordnet sind. Der gesamte Hohlraum unter der Tribüne dient hierbei als Zuluft-Druck-Kammer und die Frischluft tritt gleichmässig über alle Auslässe verteilt in den Raum ein. Die Abluft wird oberhalb des Dozentenpultes und der Projektionsfläche des Beamers, bündig mit der Zwischendecke über Lochblechdurchlässe gefasst. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen. Für die Kühlung im Sommer wird die Zuluft entsprechend konditioniert. Die Raumheizung erfolgt über Heizkörper, welche entlang der Fensterfront platziert sind.

Schulzimmer C210
Trakt II
Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Die Messungen wurden zwischen dem Donnerstag, 01.04.2021 und Sonntag, 04.04.2021 durchgeführt.

Die Aussentemperaturen sind im Anhang auf dem Datenlogger HP242 ersichtlich. Nach Aufstellung am Donnerstag sank die Aussenlufttemperatur auf ca. 12°C. Zu Beginn des ersten vollwertigen Messtages (Freitag) betrug die Aussentemperatur 9°C und stieg am Mittag auf 18.5°C an. Gegen den Morgen des zweiten Messtages (Samstag) sank die Temperatur auf kühle 5.5°C. Der zweite Tag war deutlich kälter mit einer Maximaltemperatur von 9.5°C. Die Temperatur sank danach wieder ab bis zum Morgen des dritten Messtages (Sonntag) auf 3°C. Am Nachmittag stieg die Temperatur auf 12.5°C an und senkte sich gegen den Abend wieder auf 6.5°C. Kurz vor Mitternacht des letzten Messtages (Sonntag) wurde der Datenlogger wieder in das Zimmer gestellt. Die Wetterlage war mit Ausnahme des Samstages, an welchem es bewölkt war, mit zeitweisem Niederschlag, jeweils freundlich und sonnig.

5. Prüfverfahren

Bei den Messungen im HSLU-Schulzimmer wurden die Puls-, sowie die Step-Up- und Decay-, Methoden eingesetzt. Der Fokus lag dabei jedoch klar auf der Pulsmethode. Die ersten Messungen waren demnach kurze Dosierungen mit der Pulsmethode, welche in der Raumluft oder der Zuluft aufgegeben wurden. Die Versuche wurden mit mehreren Pulslängen wiederholt, um so eine Überprüf- & Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dies wurde hinsichtlich der Ermittlung der optimale Pulslänge so gehandhabt. Diesbezüglich sind die längeren jeweils Pulse besser sichtbar für das «langsamere» Messgerät Gasera One, wo ebenfalls die Aussage gemacht werden soll, in welchem Rahmen dieses Gerät überhaupt für die Messung der Pulsmethode geeignet ist. Mit dem zweiten mobilen Messgerät FTIR-Spektrometer wurden im Raum verschiedene interessante Standorte gemessen Dazu wurde das Gerät jeweils an den entsprechenden Standort gezügelt. Somit fand automatisch auch ein Vergleich der beiden Messgeräte statt, welcher einen besseren Einblick in die Problematik der Pulsmethode mit «langsameren» Messgeräten aufzeigt.
Der zweite Teil der Messungen fand mit Step-up- & Decay-Methode statt. Die Tracergase wurden auch hier sowohl im Raum als auch in der Zuluft aufgegeben. Auch hier wurde das FTIR-Spektrometer für die Messung an unterschiedlichen interessierenden Standorten eingesetzt und entsprechend gezügelt. Gegenüber dem FTIR-Spektrometer wurde das «Gasera One» mit dem Multipoint-Sampler nicht umplatziert. Die zu Beginn definierten Messpunkte wurden über den gesamten Messzeitraum unverändert belassen.
Eindosiert wurde jeweils mit Gas-Dosierventilen, welche computergestützt angesteuert wurden und die eindosierte Menge Tracergas simultan zur Ventilstellung aufzeichnen und in einer txt-Datei festhalten können.

6. Tracergasmessung

6.1. Versuchsaufbau und Ablauf

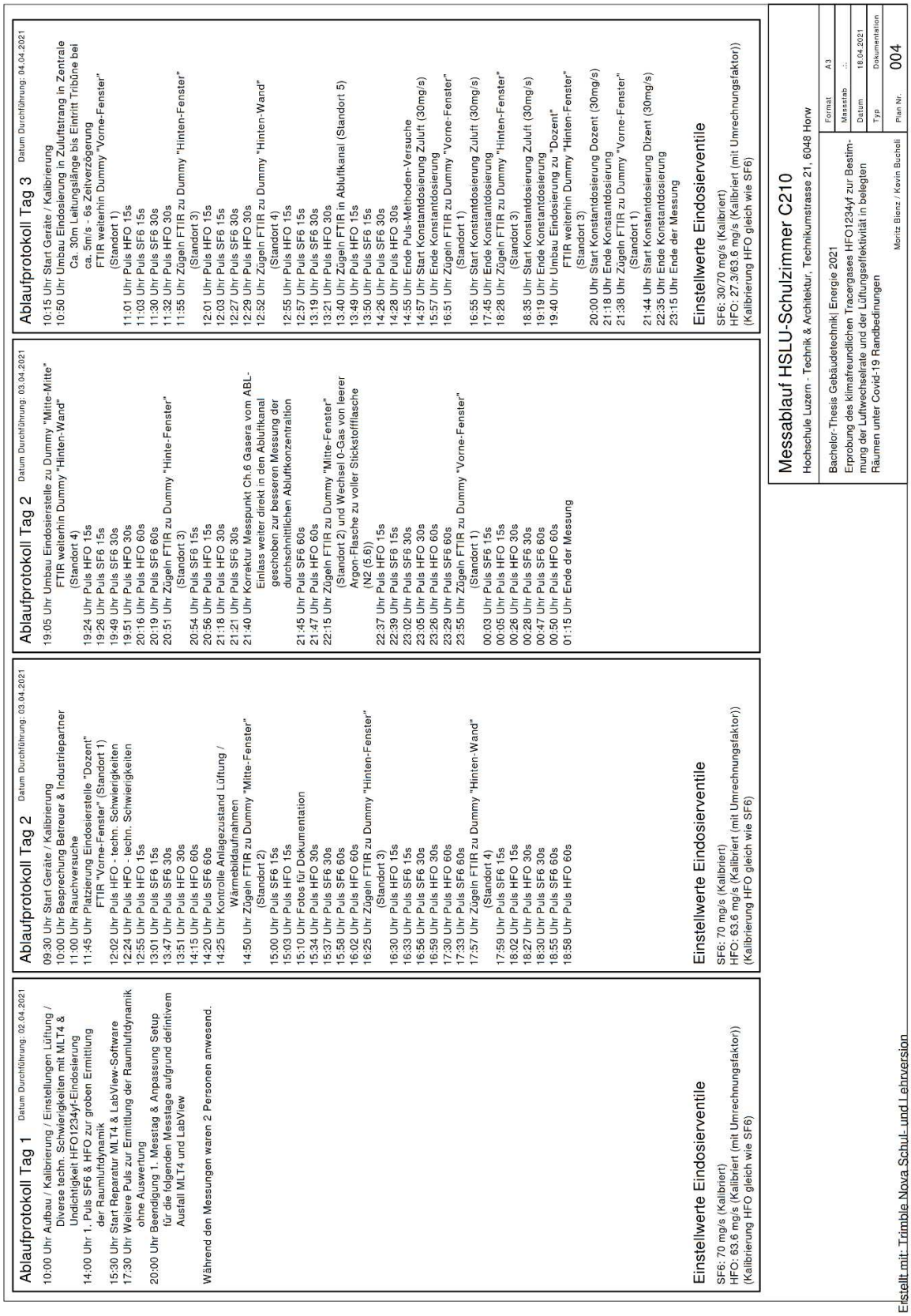


Abbildung 1: Versuchsdokumentation

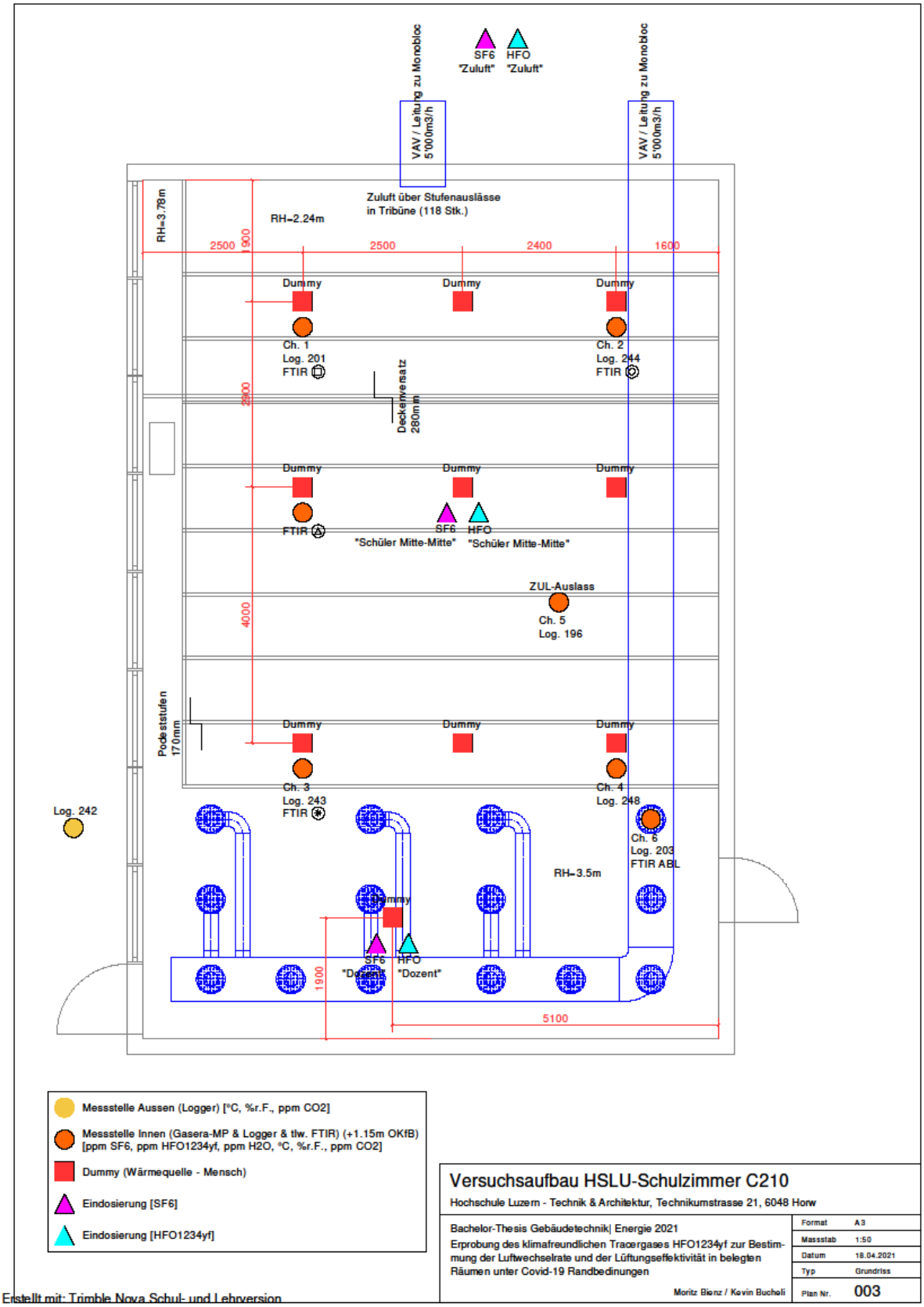


Abbildung 2: Versuchsaufbau

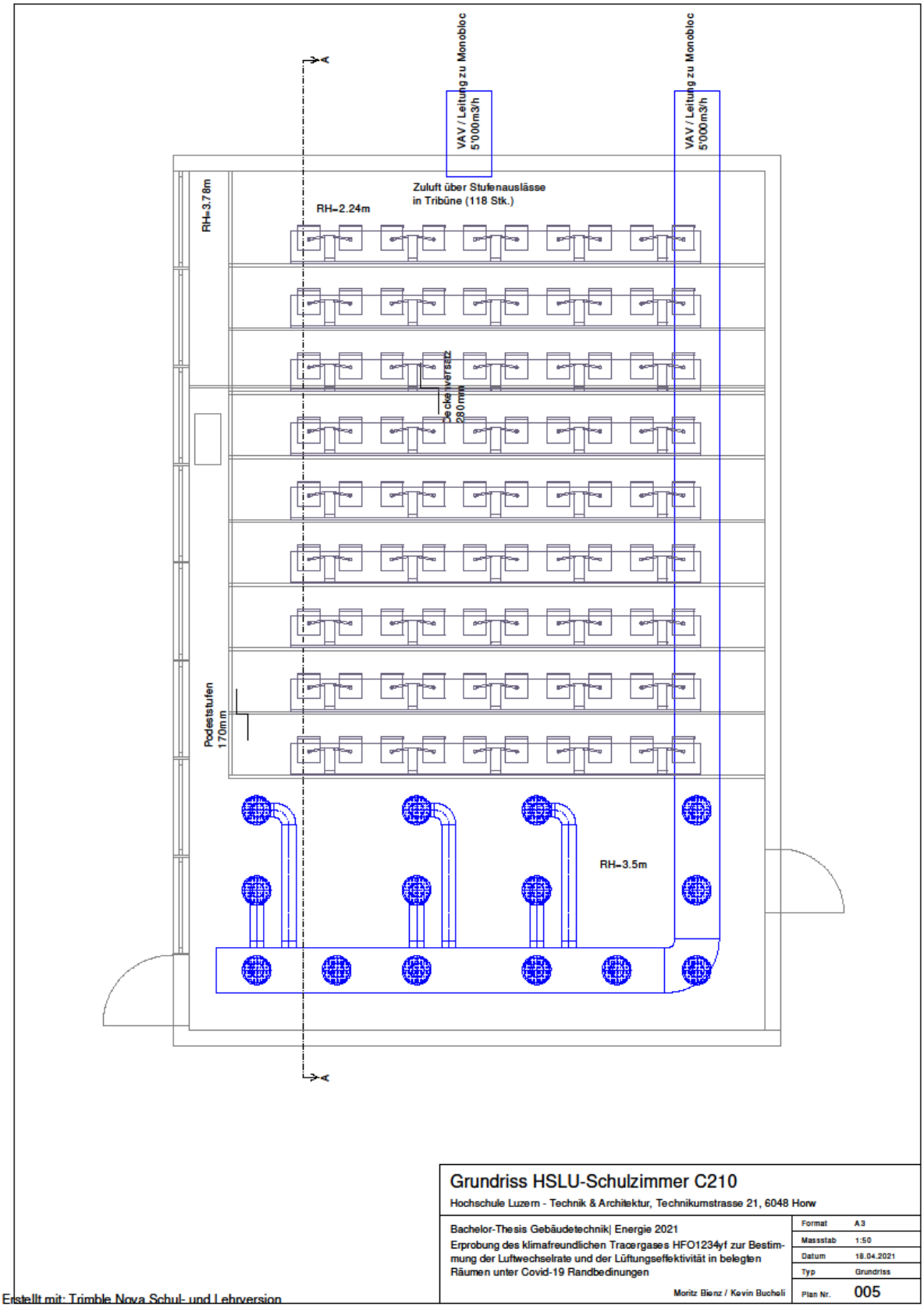


Abbildung 3: Übersichtsplan Schulzimmer C210

7. Aufbau und Probemessungen

7.1. Test-Setup

In diesem Mess-Setup wurden nebst den betriebenen Messpunkten des Multipoint-Samplers (Gasera One) zudem die Geräte FTIR-Spektrometer und das MLT4 aufgestellt und eingesetzt. Die Messpunkte des Gasera One wurden in der Zuluft, der Abluft und an verschiedenen Punkten im Raum angeordnet. Der Inlet 1 befindet sich hinten zur Fensterfront zugewandt, der Inlet 2 ebenfalls hinten, jedoch wandseitig. Der Inlet 3 ist analog dazu vorne zur Fensterfront hin stationiert und der Inlet 4 entsprechend wandseitig. Alle Messstellen im Raum wurden jeweils auf +1.2m ab OK Boden platziert und sind so einem sitzenden Studenten nachempfunden. Der Inlet 5 befindet sich in der Zuluft und der Inlet 6 im Abluftkanal. In der folgenden Tabelle 1 sind die Positionen zusammengefasst aufgelistet. Jeder Messpunkt wurde zudem mit einem Datenlogger zur Erfassung der Temperatur, der Feuchte und des CO2-Gehaltes ausgestattet.
Es wurden keine effektiven Messdaten dieses ersten Messtages (Freitag) weitergehend verwertet, da sich an diesem Tag verschiedenste Probleme mit den Messgeräten, aber auch mit der Lüftungsanlage bemerkbar machten. Dies führte schliesslich dazu, dass das MLT4 für die weiteren Messungen aufgrund von Software-Problemen nicht eingesetzt werden konnte. Hinsichtlich der Lüftungsanlage wurde festgestellt, dass die Umluftklappe des Gerätes verkehrt angesteuert wird und die Klappe somit bei theoretisch geschlossenem Zustand einen 100%igen Umluftbetrieb fährt.

Tabelle 1: Standorte der Messpunkte

Standort	Gasera One	Datenlogger	FTIR / MLT4
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	

7.2. Messablauf Aufbau und Probemessungen

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während des Aufbaus und den Probemessungen sind in den folgenden Tabellen 2 & 3 ersichtlich. Die erste Zeile widerspiegelt jeweils die durchschnittlichen Aussenbedingungen und die anschliessenden Zeilen die durchschnittlichen Innenbedingungen während des Aufbaus und während des Probemesstages. Die Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration erfolgte über die gesamte Messdauer gemeinsam und ist im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 2: Durchschnittswerte Datenlogger 01.04.2021

Datenlogger	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]	CO2-Konzentration
Messung	Donnerstag	Donnerstag	Donnerstag
HP 242 (Aussen)	19.4	46.9	531.8
HP 248 (Vorne Wand)	24.2	34.5	572
HP 244 (Hinten Wand)	24.3	34.7	619
HP 243 (Vorne Fenster)	23.8	34.8	638
HP 203 (Abluft)	23.9	34.5	630
HP 201 (Hinten Fenster)	23.9	33.7	554
HP 196 (Zuluft)	24.0	33.9	613

Tabelle 3: Durchschnittswerte Datenlogger 02.04.2021

Datenlogger	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]	CO2-Konzentration
Messung	Freitag	Freitag	Freitag
HP 242 (Aussen)	13.1	58.7	467
HP 248 (Vorne Wand)	22.5	32.9	506
HP 244 (Hinten Wand)	22.6	33.0	556
HP 243 (Vorne Fenster)	22.2	33.4	565
HP 203 (Abluft)	22.1	33.6	546
HP 201 (Hinten Fenster)	22.4	33.1	497
HP 196 (Zuluft)	21.9	33.5	532

7.3. **Resultate**

7.3.1. Umlaufklappe falsch angeschlossen

Während des ersten Versuches 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 4 ersichtlich, die Konzentration der Zuluft Phasenverschoben ebenfalls, ähnlich stark wie an sämtlichen Messstellen im Raum und der Abluft anstieg.

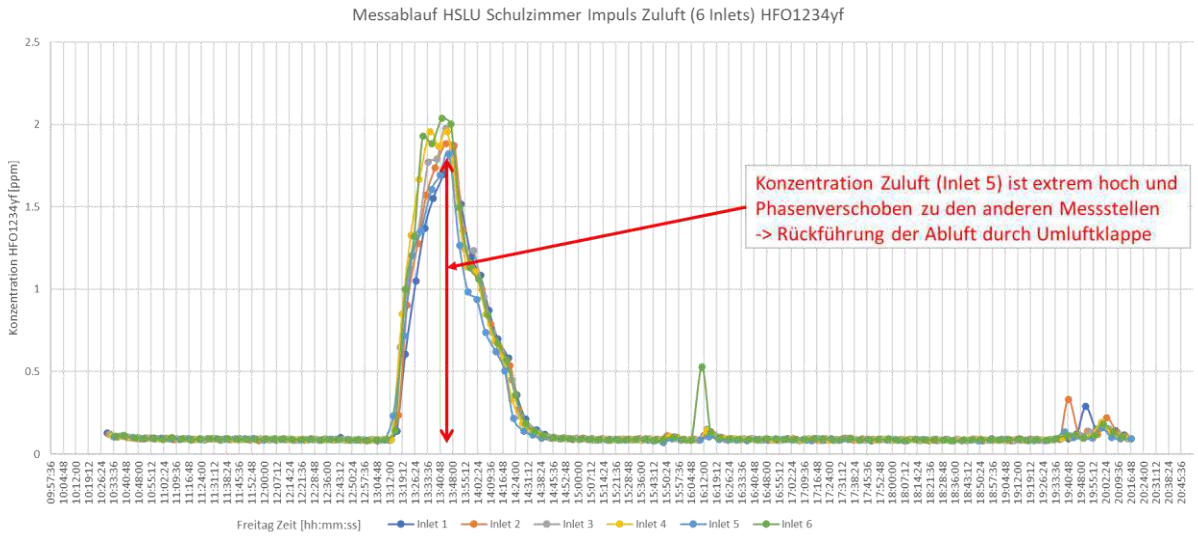


Abbildung 4: Auswertung Gasera One hinsichtlich Ansteuerung Umluftklappe

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 war ersichtlich, dass sie sich nun schliesst. Die Klappe wird somit aufgrund einer nicht näher untersuchten Fehlfunktion der MSRL-Technik falsch angesteuert. In der folgenden Abbildung 5 ist dazu ein Screenshot das Leitsystems vor der Änderung und der mit dieser Ansteuerung offenen Umluftklappe ersichtlich.
Für die weiteren Messungen wurde die Klappe anschliessend geschlossen und deren Verbleib in diesem Zustand mehrfach geprüft.

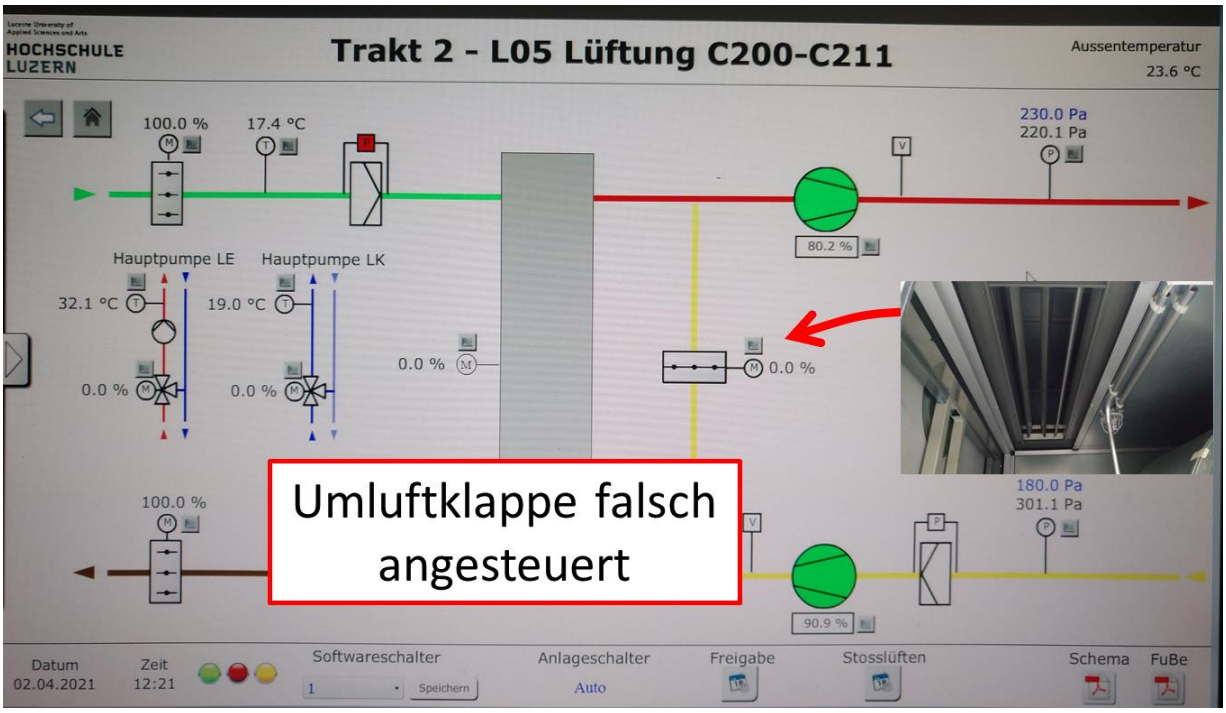


Abbildung 5: Screen-Shot Leitsystem und Foto realer Zustand Klappe

7.3.2. 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 erschien nach bereits früheren Problemen mit der Eliminierung von Teilen des Messwerte nun einwandfrei zu laufen. Am Probemesstag traten allerdings erneut Probleme auf, da aufgrund von Lizenzproblemen das Schreiben auf ein Excel-Datei unterbunden wurde. Das LabVIEW konnte somit die zwar übermittelten Daten empfangen, diese aber nicht dokumentieren und speichern. Dieser Umstand konnte leider auch durch den extraordinären Einsatz durch die HSLU nicht gelöst werden.
Weiter wurde noch der 0-Gas-Kalibrierung laufend eine Abweichung der Messwerte von ca. 2-3 ppm beim HFO-1234yf festgestellt. Die Ursache dafür wird in der externen Gastrocknung vermutet. 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. Puls-Dosierung

8.1. Test-Setup

In diesem Mess-Setup wurde zusätzlich zu den konstant betriebenen Messpunkten des Multipoint-Samplers (Gasera One) auch mit dem mobilen FTIR-Spektrometer gearbeitet. An fünf verschiedenen Standorten wurde nacheinander gemessen; die Pulsaufgabe, sowie die Rahmenbedingungen waren jeweils identisch. Der Standort 1 befindet sich vorne, fensterseitig und ist identisch mit dem Inlet 3 des Gasera One. Der Standort 2 befindet sich in der Mitte der Treppe fensterseitig, unabhängig von einer Messstelle des Gasera One. Der Standort 3 befindet sich hinten fensterseitig und ist wiederum identisch mit dem Inlet 1 des Gasera One. Der Standort 4 befand sich hinten wandseitig, identisch mit dem Inlet 2 des Gasera One. Bei der Zuluft-Dosierung wurde zudem zusätzlich der Standort 5 in der Abluft angebracht, welcher wiederum identisch ist mit dem Inlet 6 des Gasera.
Eindosiert wurde jeweils an den Standorten «Dozent» und «Mitte-Mitte» jeweils mit drei Pulsen à 15s, 30s und 60s mit 70g/s SF6 und 63.6g/s HFO-1234yf. Bei der Dosierung in der «Zuluft» wurde aus zeitlichen Gründen, und weil sich bereits abgezeichnet hat, dass kürzere Pulse aussagekräftiger sind, auf die 60s Puls-Dosierung verzichtet.
Während der Messungen befanden sich insgesamt 2 Personen und 10 Dummies im Raum, welche in den Sitzreihen verteilt wurden und eine lokale Erwärmung und daraus folgend einen thermischen Auftrieb bewirkt haben. Die Personen haben sich zur meisten Zeit in Nähe des Dozenten aufgehalten und nur wenig bewegt. Die Situation soll einer typischen Unterrichtsstunde nachempfunden sein.
Die genaue Beschreibung ist in der folgenden Tabelle 4 ersichtlich, welche die Pulse, Standorte und Zeiten zusammenfasst.

Tabelle 4: Übersicht Pulsdosierung

Dozent							**Samstag**	
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO	FTIR	
	15	30	60	15	30	60		
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
Mitte-Mitte							**Samstag**	
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO		
	15	30	60	15	30	60		
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
Zuluft							**Sonntag**	
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO		
	15	30	60	15	30	60		
Standort 1	11:03:30	11:30:14	-	11:01:58	11:32:29	-	Vorne Fenster	Inlet 3
	-	-	-	-	-	-	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

8.2. Messablauf Puls-Dosierung

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während den Puls-Versuchen sind in der folgenden Tabelle 5 ersichtlich. Die erste Zeile widerspiegelt jeweils die durchschnittlichen Aussenbedingungen und die anschliessenden Zeilen die durchschnittlichen Innenbedingungen während den Puls-Versuchen. Die Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration erfolgte über die gesamte Messdauer gemeinsam und ist im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 5: Durchschnittswerte Datenlogger 03.04.2021 & 04.04.2021

Datenlogger	Temperatur [°C]		Rel. Feuchte [%]		CO2-Konzentration	
Messung	Samstag	Sonntag	Samstag	Sonntag	Samstag	Sonntag
HP 242 (Aussen)	8.1	7.7	52.0	48.9	446	452
HP 248 (Vorne Wand)	21.9	21.9	23.8	20.5	488	496
HP 244 (Hinten Wand)	21.9	22.1	23.7	19.9	533	534
HP 243 (Vorne Fenster)	21.2	21.3	24.7	21.1	535	533
HP 203 (Abluft)	21.7	21.8	23.9	20.4	523	530
HP 201 (Hinten Fenster)	21.4	21.7	24.5	20.6	470	474
HP 196 (Zuluft)	21.2	21.5	23.3	19.3	505	507

8.3. **Resultate Puls-Dosierung**

8.3.1. Vergleich Gasera mit FTIR

Die Pulse wurden gemäss Plan durchgeführt und von den Geräten Gasera One und FTIR-Spektrometer aufgezeichnet. In diesem Unterkapitel soll kurz aufgezeigt werden, dass die Messungen des Gasera One nicht das gesamte Bild aufzuzeigen vermögen, wohingegen das schnellere FTIR-Spektrometer klar seine Vorteile zeigen kann.
In den folgenden Abbildungen 6 – 10 ist ersichtlich, dass die Messung mit dem Gasera One in beinahe allen Fällen nicht in der Lage ist, den Puls einwandfrei zu detektieren. Die erste Abbildung 6 zeigt den idealen Fall, wo 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 FTIR-Spektrometer der Fall ist. Wie aber in den darauffolgenden Abbildungen 7 – 10 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 8, an einem fast idealen Punkt hinsichtlich der maximalen lokalen Konzentration erfolgt, so ist der vorherige und nachfolgende Verlauf wiederum unbekannt.

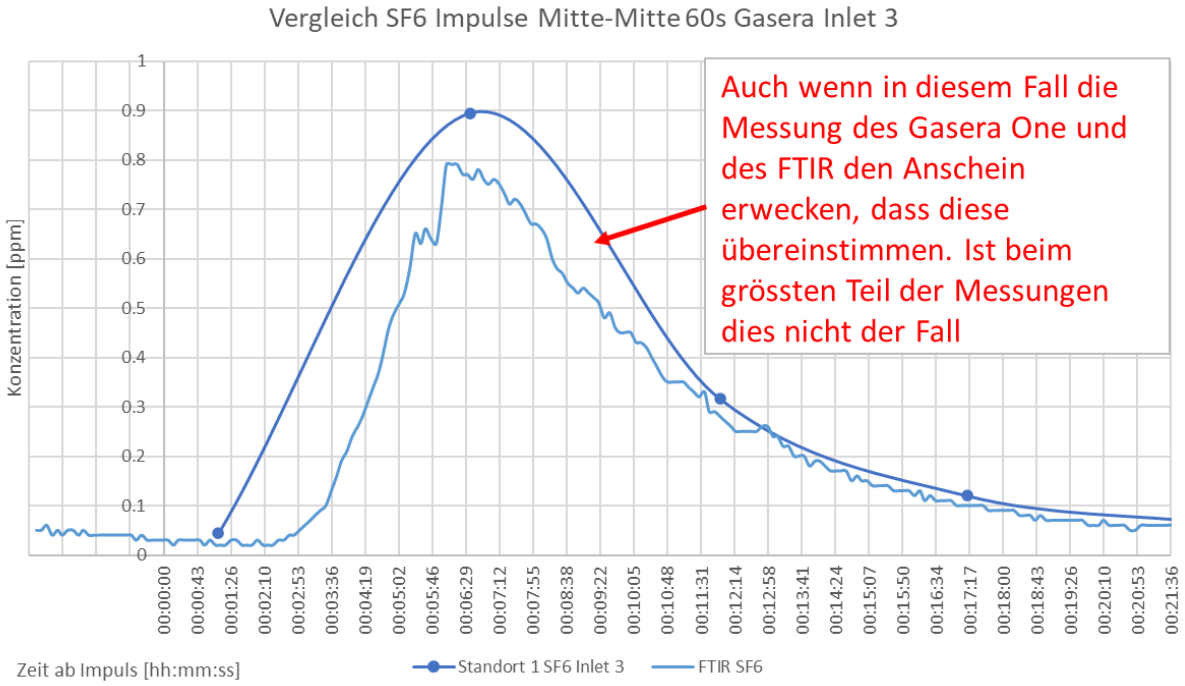


Abbildung 6: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 1

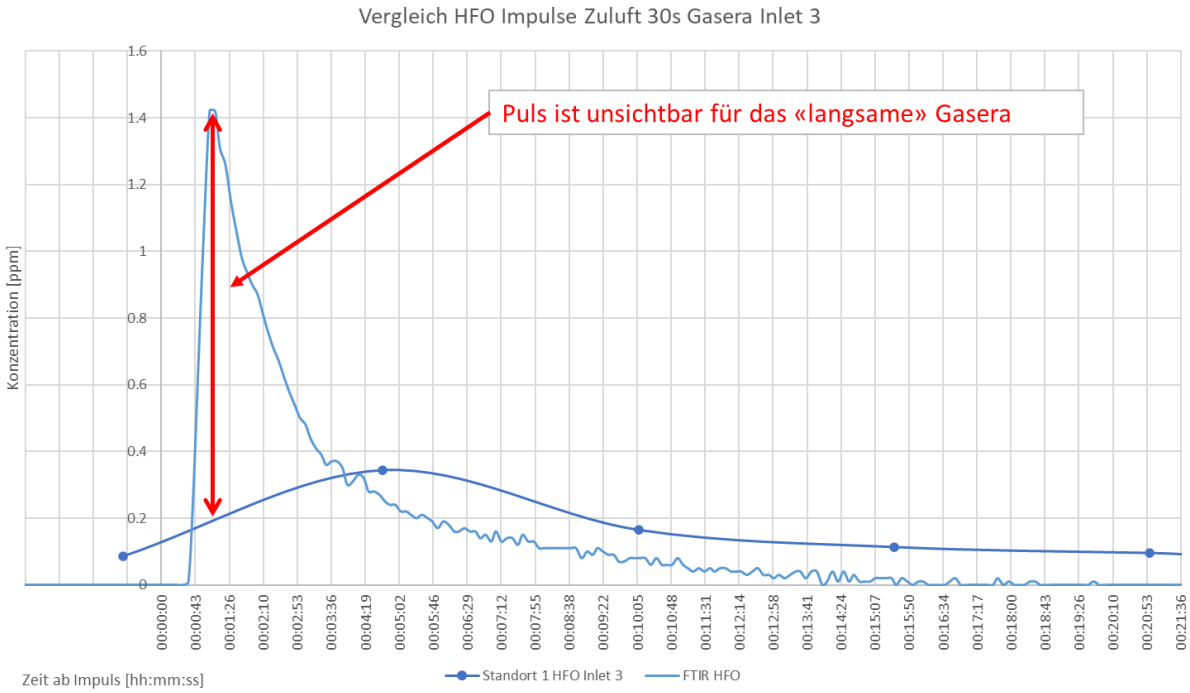


Abbildung 7: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 2

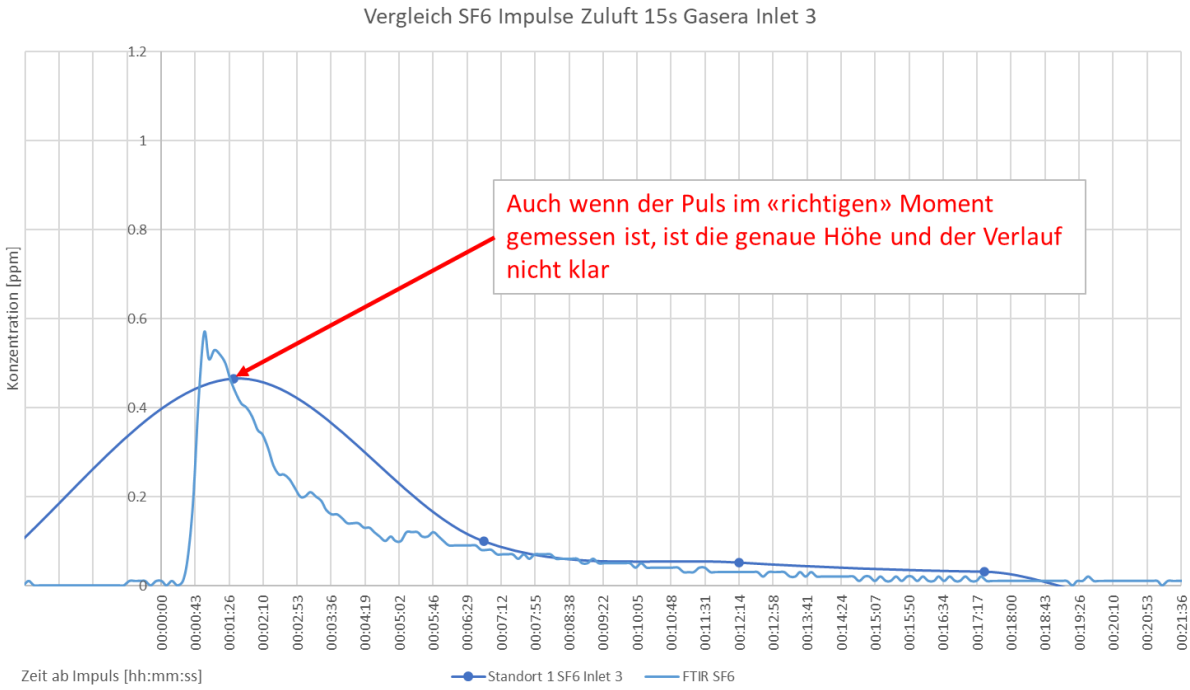


Abbildung 8: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 3

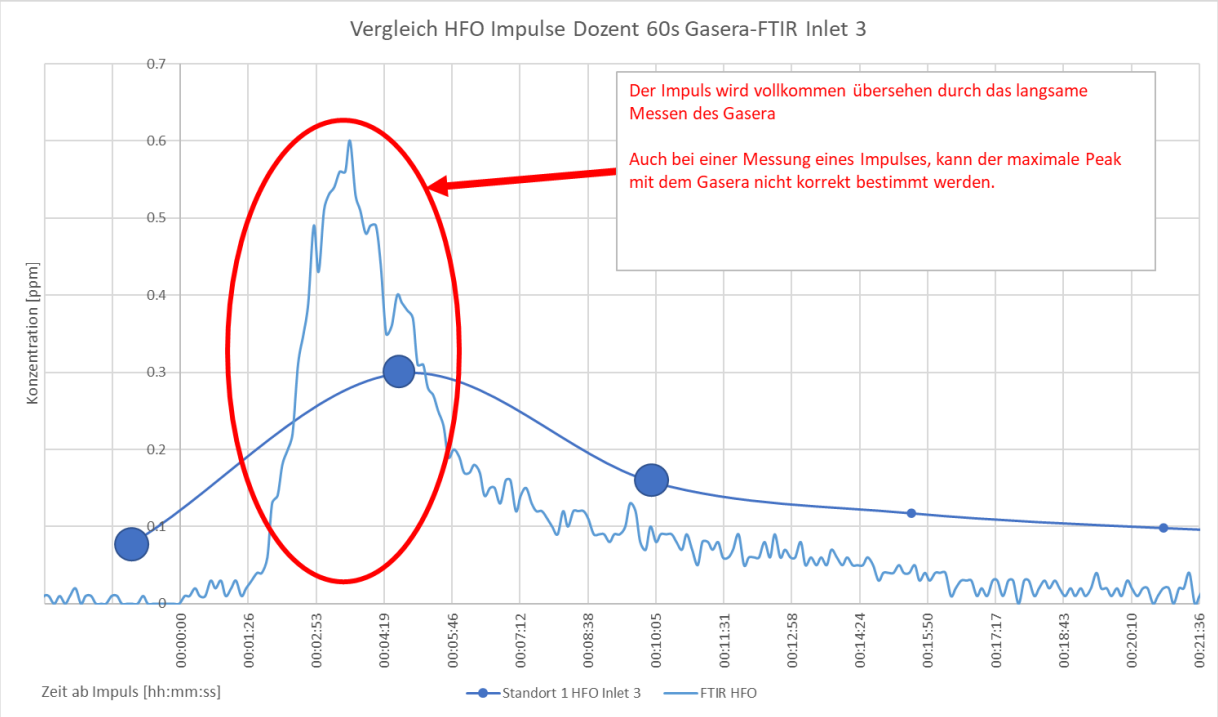


Abbildung 9: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 4

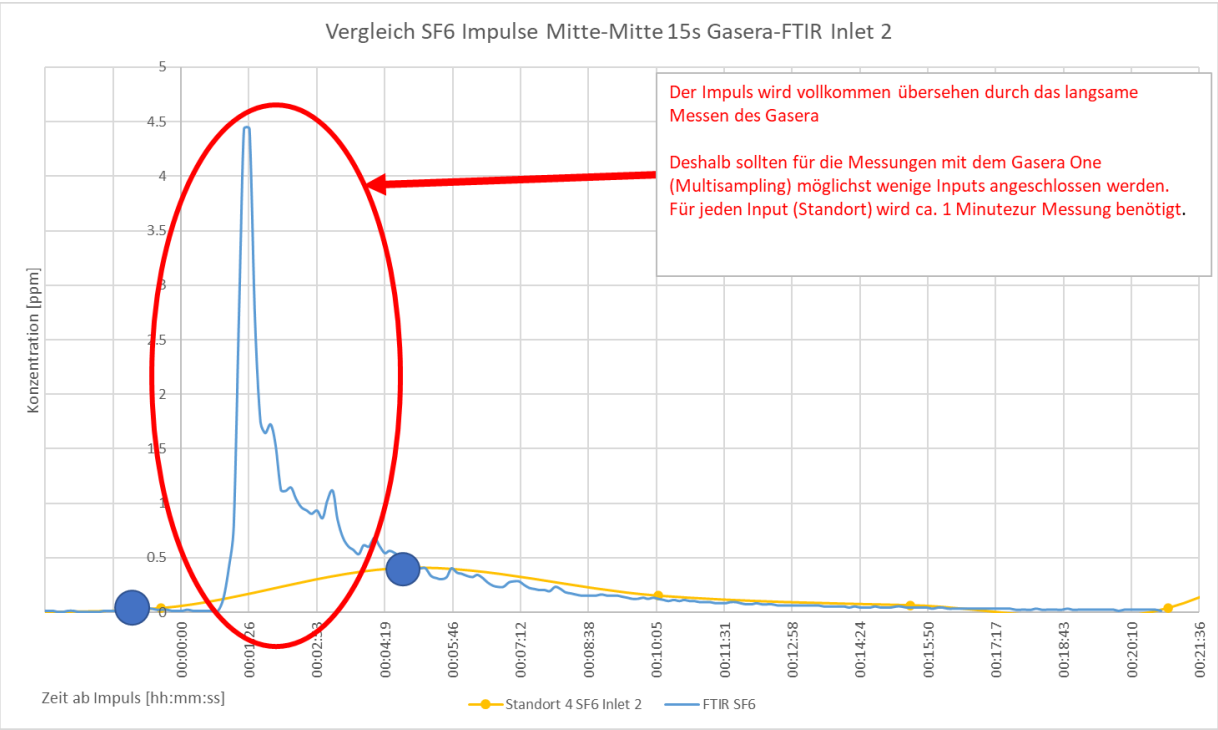


Abbildung 10: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 5

8.3.2. Verhalten der Luft im Raum

Mit Hilfe der Pulsdosierung an den verschiedenen Standorten und mit den ebenfalls verteilt angeordneten Messstellen, respektive der Wiederholung der Messszenarien mit unterschiedlichem Standort des FTIR-Spektrometers 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 mit einer Dosierung in der Raummitte gering aus. Jedoch ist dabei auch 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 Ventilatoren darin. Diese Situation begünstigt trotz der Ausserbetriebnahme des Rotationsrades einen grossen Leckageanteil, der im Bereich von 20% festgemacht werden konnte. Hinsichtlich des Schadstoffabtransportes, wie auch der Ausbreitung von Viren muss darauf aber differenziert eingegangen werden. So durchläuft die «Leckage-Umluft» doch einen F7-Filter, welcher nebst den üblichen Luftschadstoffen und Partikel auch einen nicht zu vernachlässigenden Anteil von bis zu 80% hinsichtlich der Virenlast abzuscheiden vermag.
In der folgenden Abbildung 11 sind die Erkenntnisse aus der Dosierung am Standort «Dozent» ersichtlich.

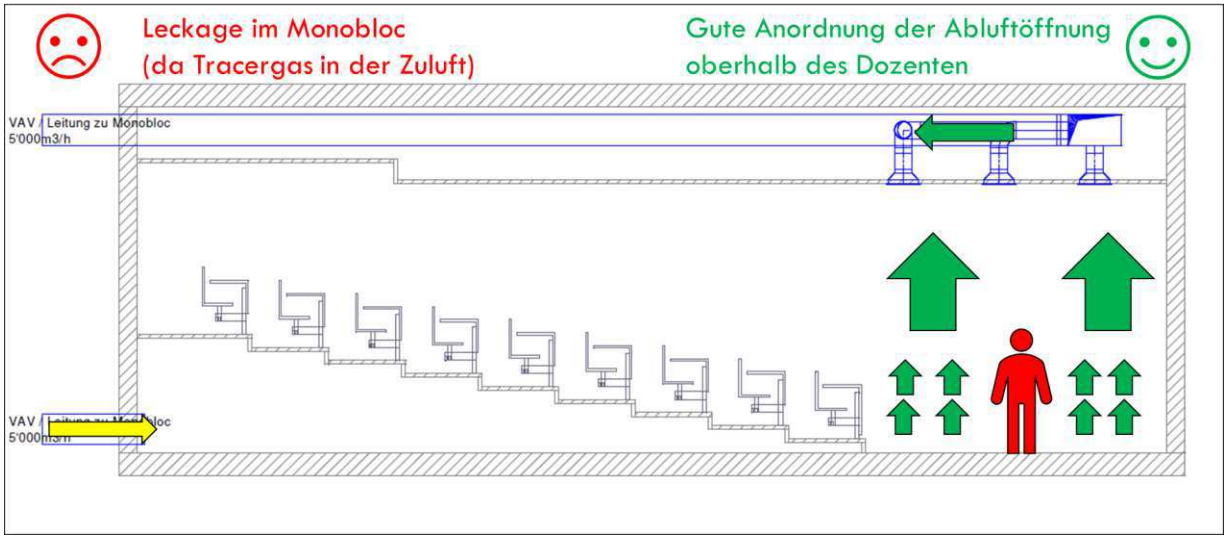


Abbildung 11: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Dozent

Bei der Dosierung am Standort «Mitte-Mitte» hat sich gezeigt, dass die Luft einerseits nach vorne getrieben 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 sich im Bereich der hintersten Sitzreihe daraufhin die Tracergaskonzentration über längere Zeit zu halten vermag. Erklärbar ist dies wiederum mit dem Anteil des Abtrages der entgegen der Kolbenströmung, eher im oberen Teil des Raumes, nahe der Doppeldecke erfolgt. Andererseits wird dieser Bereich aufgrund der Anordnung der Zuluftauslässe in den Stufen der Tribüne 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 12 sind die aus der Dosierung «Mitte-Mitte» neu gewonnenen Erkenntnisse ersichtlich.

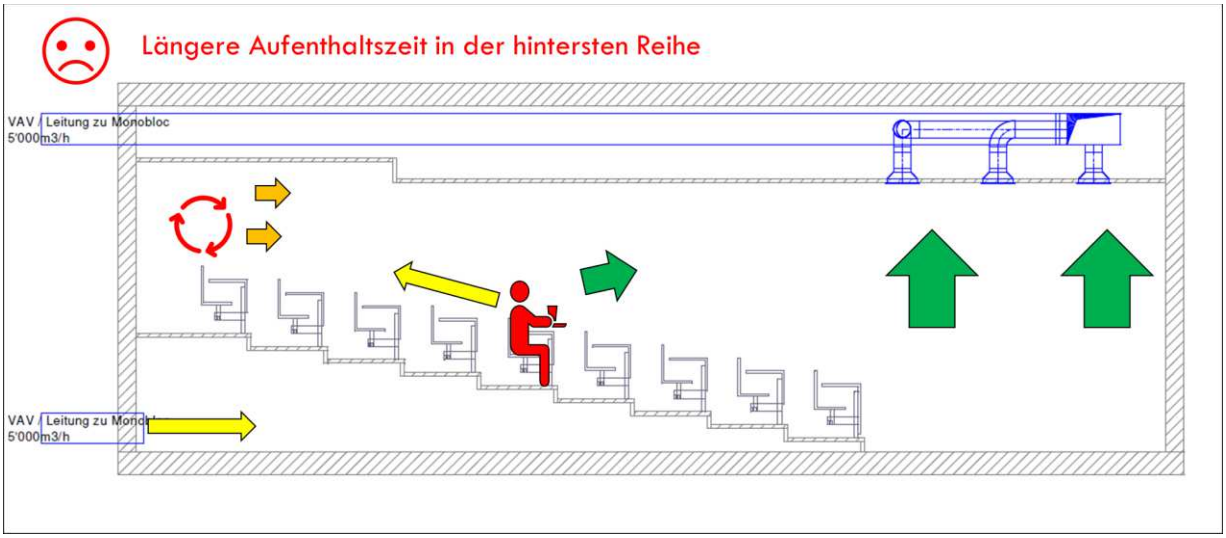


Abbildung 12: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Mitte-Mitte

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 schlechtbelüfteten Reihen gelangt. Dies dank der Mischlüftungszone, welche oberhalb des gerichteten Stahles auftritt und die Frischluft so 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.
In der folgenden Abbildung 13 sind die aus der Dosierung «Zuluft» neu gewonnenen Erkenntnisse ersichtlich.

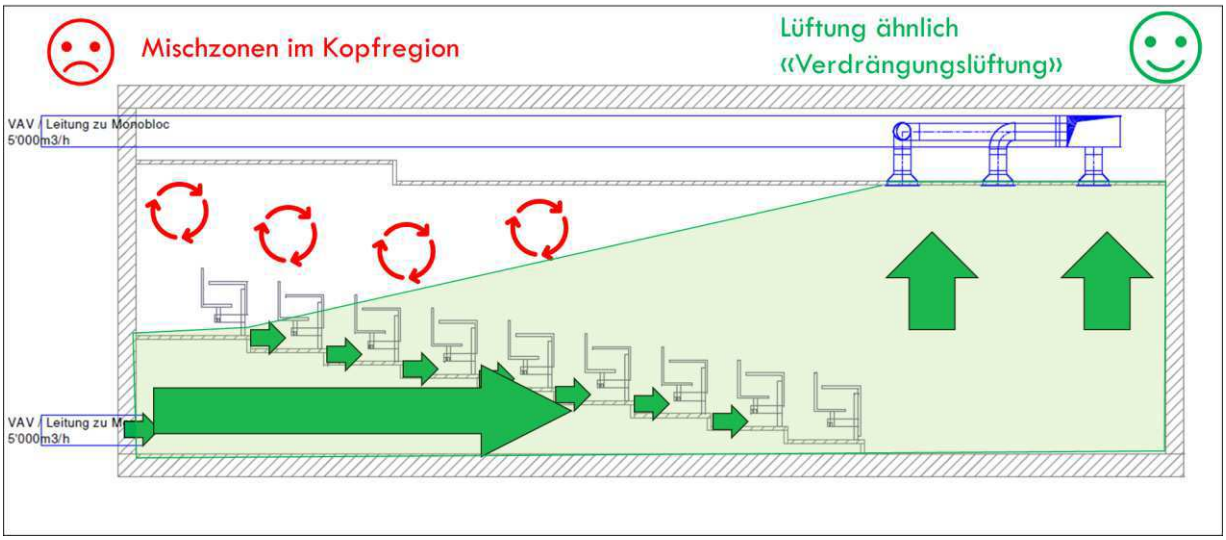


Abbildung 13: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Zuluft

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 induziert Luftwalze. Der kleine Zwischengang auf der Fensterseite sorgt zudem für eine Luftbewegung nach vorne in Richtung Dozentenpult und schliesslich zu den Abluftöffnung in der Zwischendecke.
In der folgenden Abbildung 14 wird dies grafisch erläutert. Die Fensterfront ist auf dem Plan unten angeordnet, wo auch der Zwischengang direkt bei der Fensterfront sichtbar ist.

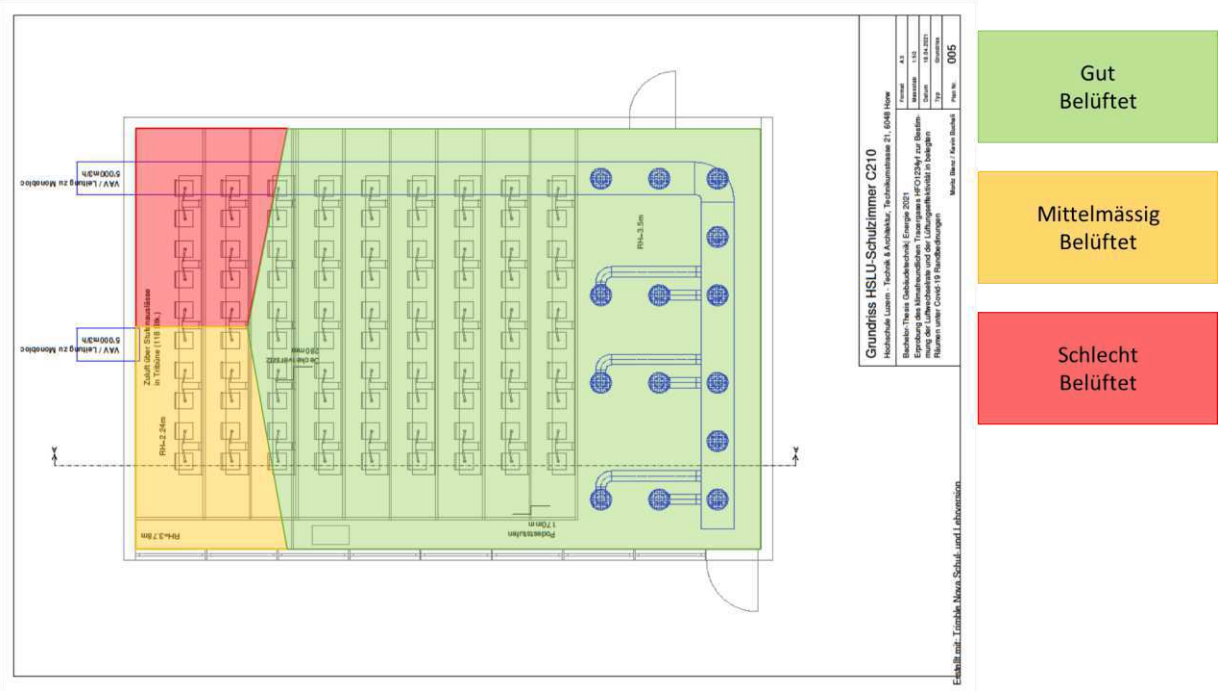


Abbildung 14: Zoneneinteilung Lüftungseffizienz

9. Konstant-Dosierungen

9.1. Test-Setup Konstant-Dosierung

Auch in diesem Mess-Setup wurde zusätzlich zu den konstant betriebenen Messpunkten des Multipoint-Samplers (Gasera One) wieder mit dem mobilen FTIR-Spektrometer gearbeitet. Das Gasera One wurde vordergründig dazu eingesetzt, um zu bestimmen, dass im Raum eine konstante und gleichmässig gleichverteilte Konzentration an Tracergas vorhanden ist. Da der Luftvolumenstrom der Luftaufbereitungsanlage für diesen Raum sehr hoch ist und sich die Konzentration im Raum somit schnell ändern wird, kann mit dem Gasera One keine genaue Analysierung des Volumenstromes stattfinden. Mit dem FTIR-Spektrometer wurde dazu an drei verschiedenen Standorten gemessen. In der Abluft, am Messpunkt vorne fensterseitig und am Messpunkt hinten fensterseitig. Die konstanten Dosierungen fanden in der Zuluft und beim Dozenten mit einem Tracergas-Massenstrom von 30mg/s SF6, resp. 27.3mg/s HFO-1234yf statt.
Während der Messungen befanden sich insgesamt 2 Personen und 10 Dummies im Raum, welche in den Sitzreihen verteilt wurden und eine lokale Erwärmung und daraus folgend einen thermischen Auftrieb bewirkt haben. Die Personen haben sich zur meisten Zeit in Nähe des Dozenten aufgehalten und nur wenig bewegt. Die Situation soll einer typischen Unterrichtsstunde nachempfunden sein.
Die Zusammenfassung der Messungen mit den Zeiträumen der Aufdosierung und des Abklingens ist in der folgenden Tabelle 6 dargestellt. Darauf sind auch die Standorte der jeweiligen Dosierungen und die Messstellen des FTIR-Spektrometers ersichtlich.

Tabelle 6: Übersicht Konstant-Dosierungen

	Aufdosierung		Abklingen		FTIR	Bezeichnung
ZUL	14:57	15:57	15:57	16:51	Abluft	Zuluft 1
	16:55	17:45	17:45	18:28	Vorne Fenster	Zuluft 2
	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
	21:44	22:35	22:35	23:15	Vorne Fenster	Dozent 2

9.2. Messablauf Konstant-Dosierung

Die Luftkonditionen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und CO2-Gehalt während den Konstant-Dosier-Versuchen sind in der folgenden Tabelle 7 ersichtlich. Die erste Zeile widerspiegelt jeweils die durchschnittlichen Aussenbedingungen und die anschliessenden Zeilen die durchschnittlichen Innenbedingungen während den Konstant-Dosier-Versuchen. Die Registrierung der Temperatur, rel. Feuchte und der CO2-Konzentration erfolgte über die gesamte Messdauer gemeinsam und ist im Anhang 3 zu finden.

Tabelle 7: Durchschnittswerte Datenlogger 04.04.2021

Datenlogger	**Temperatur [°C]**	**Rel. Feuchte [%]**	**CO2-Konzentration**
Messung	Sonntag	Sonntag	Sonntag
HP 242 (Aussen)	7.7	48.9	452
HP 248 (Vorne Wand)	21.9	20.5	496
HP 244 (Hinten Wand)	22.1	19.9	534
HP 243 (Vorne Fenster)	21.3	21.1	533
HP 203 (Abluft)	21.8	20.4	530
HP 201 (Hinten Fenster)	21.7	20.6	474
HP 196 (Zuluft)	21.5	19.3	507

9.3. Resultate Konstant-Dosierung

9.3.1. Aufdosierung

Die Ergebnisse aus den Messungen nach den Konstant-Dosier-Methoden mit SF6 und HFO1234yf haben die Resultate aus den Puls-Messungen erhärtet und plausibilisiert.
In der folgenden Tabelle 8 sind die Aufdosier-Versuche mit den jeweiligen Start- und End-Zeiten aufgelistet. Daraus sind auch die Aufenthaltszeiten ersichtlich. Es wurden die Mittel- und Median-Werte ausgewertet. Über die Auswertung mit dem Median können die Ausschläge reduziert werden und so gestärkt die Aufenthaltszeiten berechnet werden. Zur Plausibilisierung wurde der Mittelwert beider Aufenthaltszeiten ermittelt und weiterverwendet.

Tabelle 8: Übersicht Aufdosierungen

Aufdosierung

				SF6				HFO			
Input	Messstandort	Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit
		[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 15 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.

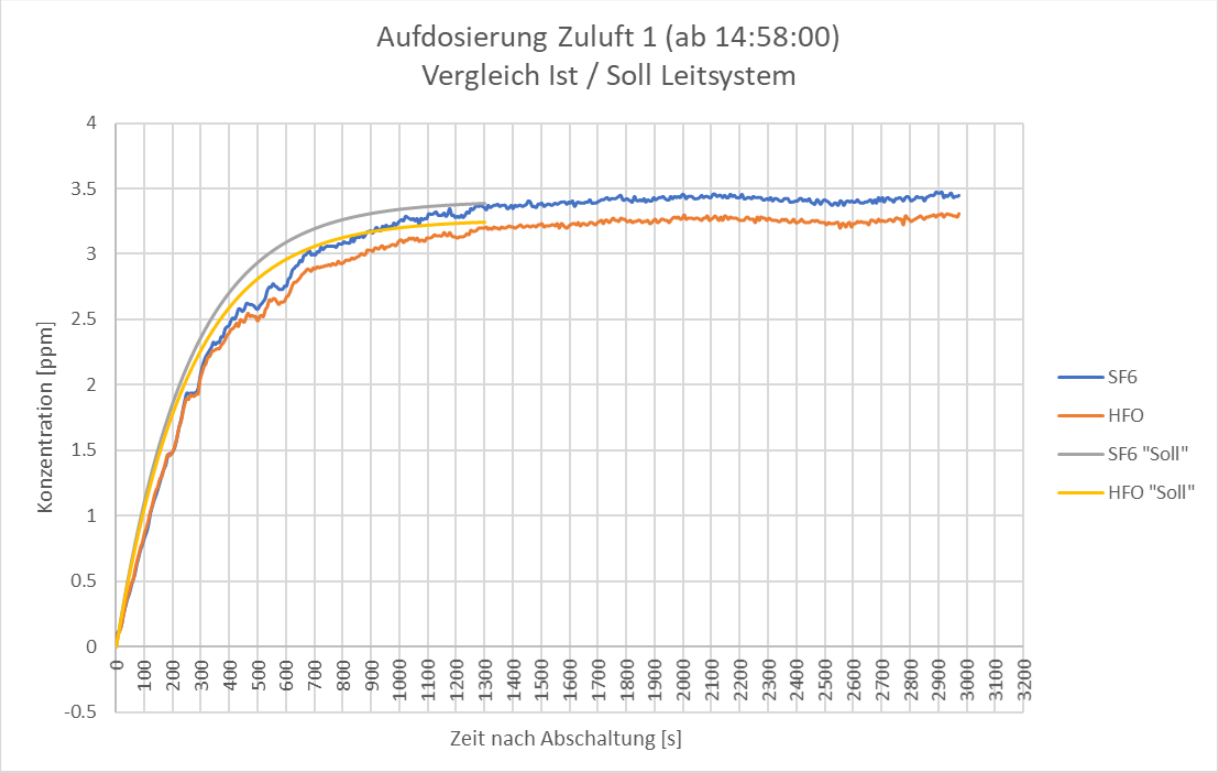


Abbildung 15: Konstant-Aufdosierung Zuluft 1

Der Verdacht des langsameren Mitreissens der nicht mit Tracergas angereicherten Luft aus den letzten Sitzreihen wird erhärtet durch die Messung Zuluft 2, wo der Messpunkt vorne fensterseitig lag und die Messung Zuluft 3, wo der Messpunkt hinten fensterseitig platziert war. 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 geradezu einen Mittelwert aus diesen beiden Messungen im Raum dar. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen die zwei Konstant-Dosierungen vorne und hinten, jeweils fensterseitig.

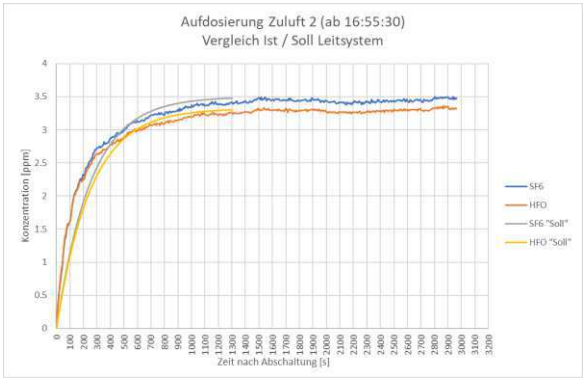


Abbildung 16: Konstant-Aufdosierung Zuluft 2

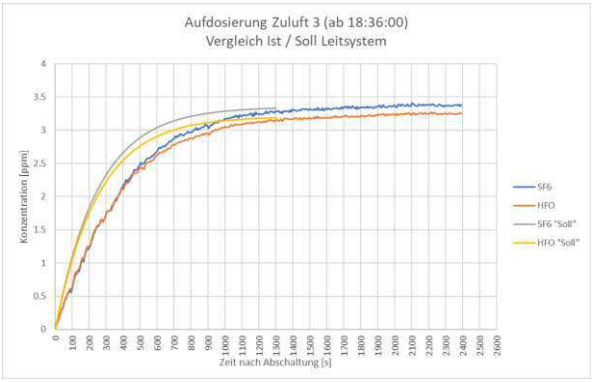


Abbildung 17: Konstant-Aufdosierung Zuluft 3

9.3.2. Abklingen

Die Abkling-Messungen mit SF6 und HFO1234yf haben die Erkenntnisse aus den Aufdosier-Kurven nochmals bestätigt. Sie zeigen dieselben Phänomene auf.
In der folgenden Tabelle 9 sind die Abkling-Versuche mit den jeweiligen Start- und End-Zeiten aufgelistet. Daraus sind auch wieder die Aufenthaltszeiten ersichtlich. Es wurden wiederum die Mittel- und Median-Werte ausgewertet. Zur Plausibilisierung wurde der Mittelwert beider Aufenthaltszeiten ermittelt und weiterverwendet.

Tabelle 9: Übersicht Abklingversuche

Abklingkurve

				SF6				HFO			
Input	Messstandort	Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit
		[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 18 sind die Konzentrationen der ersten Aufdosierung, respektive 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 erreicht ist. Nachdem die Luft, welche sich in direkter Umgebung 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 berücksichtigte konstante Leckageanteil wird somit als Mittelwert berücksichtgt. Da die Konzentration 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 auch in der Zuluft von Nöten wäre.

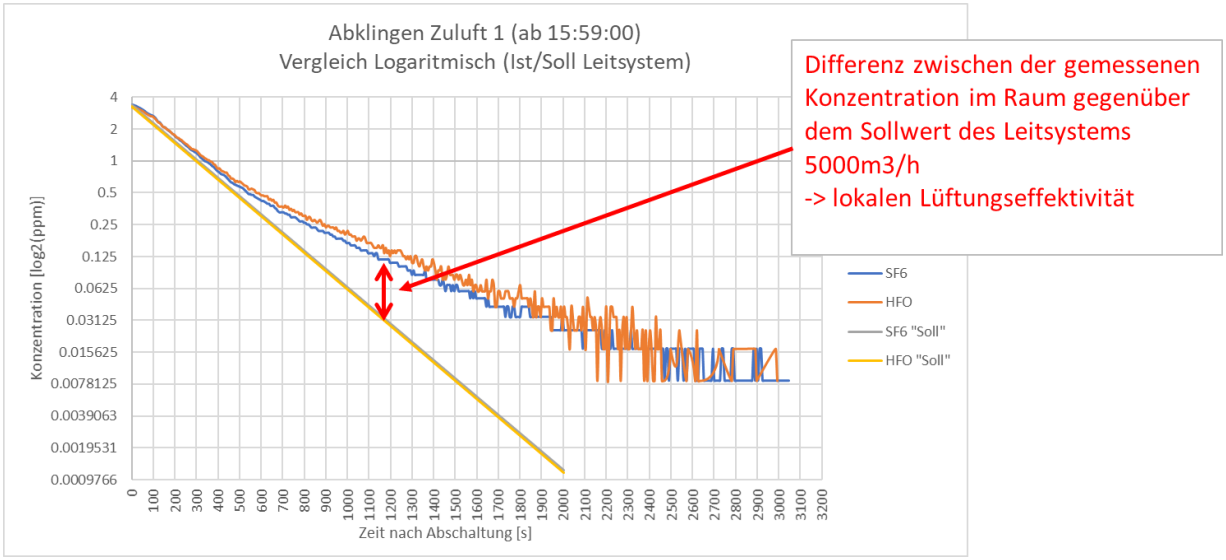


Abbildung 18: Konstant-Abklingen Zuluft 1

Zur Ergänzung und Verdeutlichung sind die Abbildungen 19 – 22 der restlichen Messungen hier noch ergänzt.

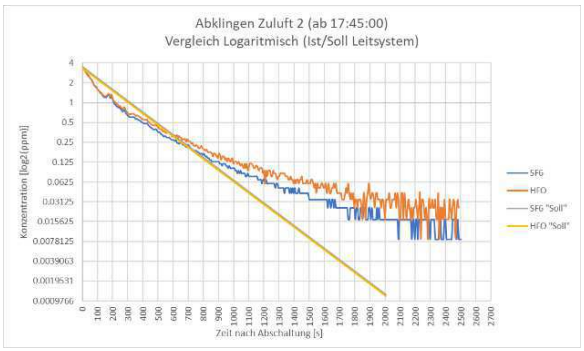


Abbildung 19: Konstant-Abklingen Zuluft 2

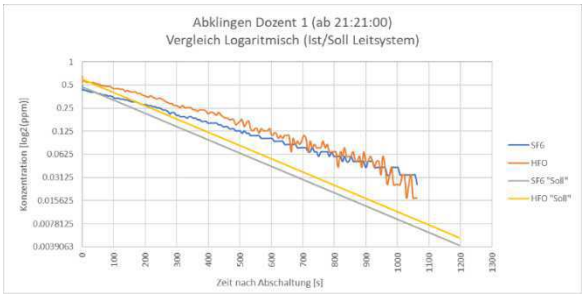


Abbildung 20: Konstant-Abklingen Dozent 1

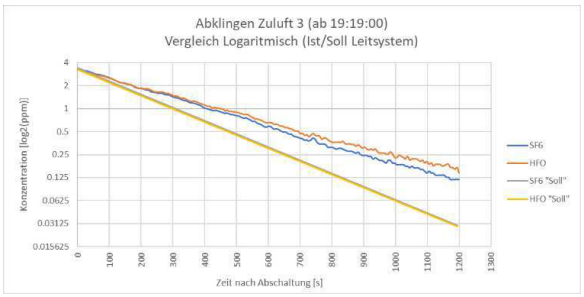


Abbildung 21: Konstant-Abklingen Zuluft 3

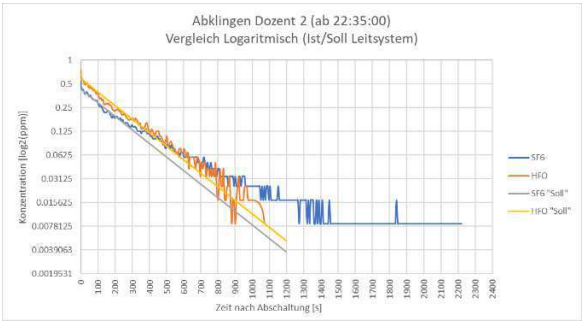


Abbildung 22: Konstant-Abklingen Dozent 2

9.3.3. Zusammenfassung Aufdosieren und Abklingen

Aus den Messungen der Aufdosierung und des Abklingens wurden Aufenthaltszeiten der Luft berechnet. Danach konnte hier 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 wären. 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 12 h^{-1}. Gemäss eingestellten Volumenströmen an den VAV-Reglern über das Leitsystem sollte dieser 14.4 h^{-1} betragen. Unabhängig von dieser Abweichung stellt dies einen, für diese Nutzung, sehr hohen Luftwechsel dar.

Tabelle 10: Örtliche Lüftungseffektivität und Luftwechselzahlen

Input	Messstandort	Tracergas	Mittelwert Aufenhaltszeit	Soll Aufenthalszeit	Lüftungseffektivität	Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Messung
			[h]	[h]	Leitsystem/Messung	[-]	[1/h]
Zuluft	Abluft	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.78	Verdrängungslüftung	11.1
Zuluft	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.07	0.07	1.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.5
Zuluft	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.79	Verdrängungslüftung	11.3
Dozent	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.74	Verdrängungslüftung	10.6
Dozent	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.08	0.07	0.89	Verdrängungslüftung	12.6

9.3.4. Leckage über Rotationswärmetauscher & undichte Umluftklappe

Mit Hilfe der Konstant-Dosierungen wurde die mittlere Leckage über den Rotationswärmetauscher und die Umluftklappe anhand des Verhältnisses der Abluft- zur Zuluftkonzentration berechnet. Ermittelt werden konnte eine durchschnittliche Leckage von 18.6%. In der folgenden Tabelle 10 sind die diesbezüglichen Daten ersichtlich.

Tabelle 11: Leckageermittlung Luftaufbereitungsgerät

Undichtheit WRG-Rotationstauscher

Input	Messstandort	Startzeit	Mittelwert Abluft SF6	Mittelwert Zuluft SF6	Leckage SF6	Mittelwert Abluft HFO	Mittelwert Zuluft HFO	Leckage HFO	Mittelwert Leckage	Totale mittlere Leckage
		[hh:mm:ss]	[ppm]	[ppm]	[-]	[ppm]	[ppm]	[-]	[-]	[-]
Dozent	Abluft	20:07-21:18	2.20	0.40	0.18	2.240	0.467	0.208	0.196	0.186
Dozent	Vorne Fenster	21:55-22:33	2.56	0.42	0.16	2.499	0.469	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 23 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 beobachtet werden, auch wenn der Rotor ausgeschalten ist.

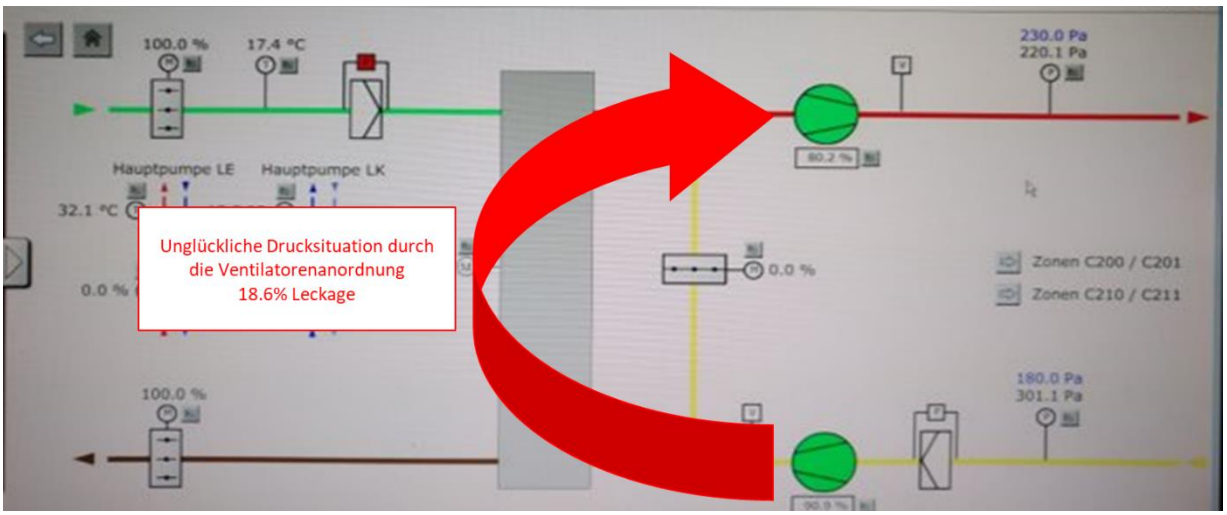


Abbildung 23: Prinzipschema Luftaufbereitung (Weg der Leckage)

10. Rauchversuche

10.1. Erkenntnisse Rauchversuche

In diesem Kapitel wurden die Erkenntnisse der Rauchversuche an verschiedenen Standorten 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 noch kurz umrissen.

10.1.1. Verhalten Luft Dozent

Wie in der Abbildung 24 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.

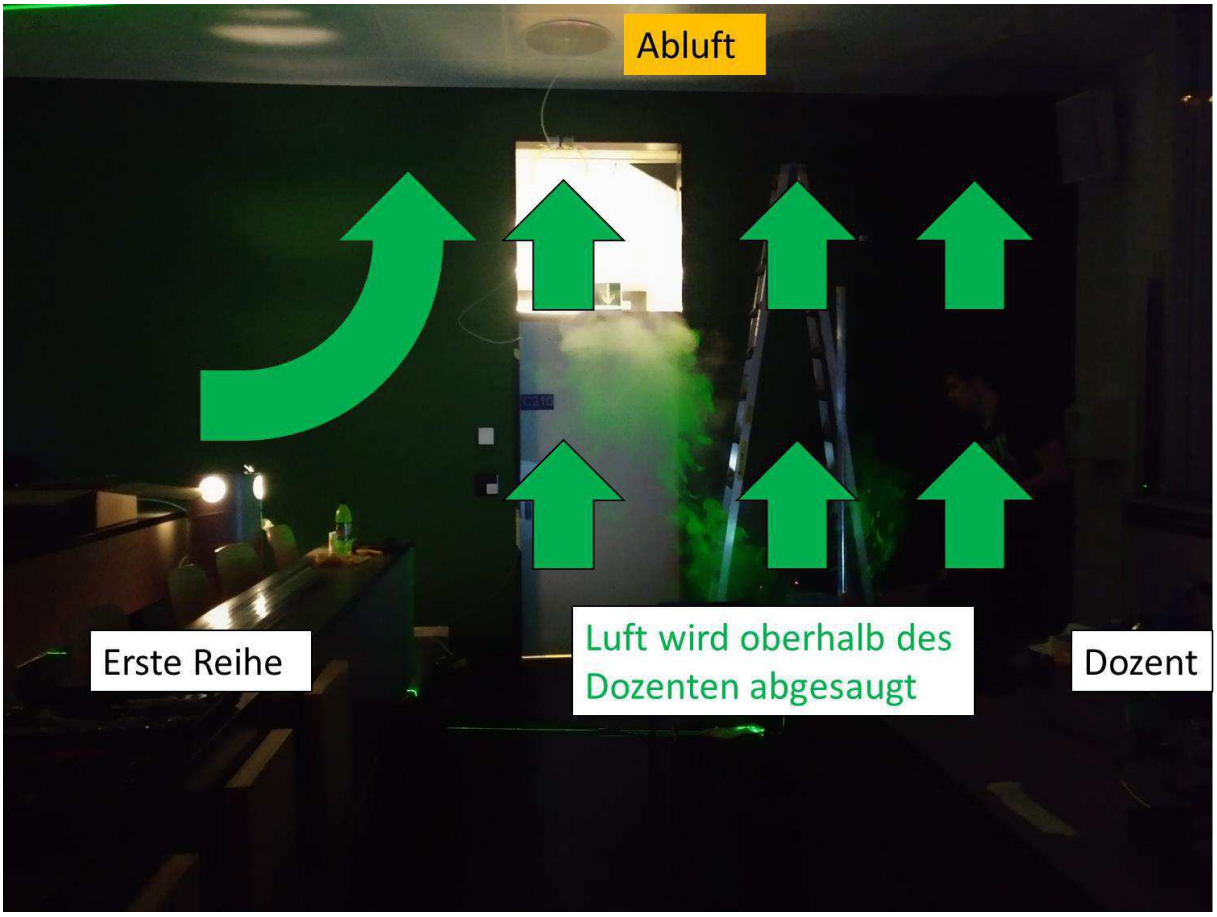


Abbildung 24: Rauchversuch Dozent

10.1.2. Verhalten Luft Mitte-Mitte

Die Rauchversuche in der Raummitte (5-6 Reihe) zeigen das Verhalten der Zuluftauslässe sehr gut auf. Wie in der Abbildung 25 erkenntlich, treibt die Luft nach vorne hin 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.

Abbildung 25: Rauchversuch Raummitte

10.1.3. Verhalten Luft Hinterste Reihe

In der Abbildung 26 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 nicht mehr gleich verhält wie in den anderen Reihen. Der aufgegebene Rauch wird hier nach hinten hin zur Wand gezogen und verweilt dort länger. In der Abbildung 27 ist erkennbar, dass sich dort beinahe eine Totzone ergibt, wo sich der Rauch nur allmählich verdünnt und abgetragen wird.

Abbildung 26: Rauchversuch hinterer Teil des Raumes

Abbildung 27: Rauchversuch hinterster Teil des Raumes (Stagnation)

11. Diskussion und Empfehlung

11.1. Raumluftströmung und Lüftungswirksamkeit im Schulzimmer C210

Aufgrund der Lufteinführung in der Tribüne und der Absaugung der Abluft am gegenüberliegenden Teil des Raumes an der Zwischendecke stellt sich für den Grossteil des Raumes eine gut funktionierende Verdrängungslüftung ein. Diese wird bei Belegung durch die Wärmequellen in den Sitzreihen begünstigt, da Schadstoffe und «verbrauchte» Luft so schnell nach oben und ausserhalb des Aufenthaltsbereiches abgetragen wird. Die letzten Sitzreihen profitieren nicht von dieser Verdrängungslüftung. Im Gegenteil verharren die Raumluft und darin befindliche Schadstoffe hier längere Zeit aus. Zu erklären ist dies, da sich im hintersten Teil des Raumes ein volumetrisches Dreieck bildet, welches aufgrund der Anordnung der Zuluftdurchlässe im Fussbereich der Tribüne nicht direkt mit Zuluft durchströmt wird. Die eingeführte Zuluft gelangt so nur durch geringe diffuse Raumströmungen in den hintersten Teil des Raumes, was den langsamen Austausch der Luft erklärt. Diesem Umstand soll bei der Belegung des Raumes Rechnung getragen werden, in dem dieser von vorne her gefüllt wird.

11.2. Leckage über das Luftaufbereitungsgerät

Das Luftaufbereitungsgerät weist eine grosse Leckage von berechneten 18.6% auf. Dies zum grössten Teil über den Rotationswärmetaucher und zu einem kleineren Teil über die undichte Umluftklappe, welche auch im geschlossenen Zustand Fehlströmung zulässt. Die Situation wird begünstigt durch die in dieser Hinsicht suboptimale Platzierung der Ventilatoren im Lüftungsgerät. Zuluftseitig des Rotationswärmetauschers und der Umluftklappe stellt sich ein Unterdruck ein; Abluftseitig ein Überdruck. Es ist zu prüfen, ob diesem Umstand mit technischen Massnahmen zumindest teilweise Einhalt geboten werden kann. Ins Auge gefasst werden kann die Prüfung und der eventuelle Ersatz von Dichtungen an den erwähnten Bauteilen. Weiter ist zu prüfen, ob die Spülzone des Rotationswärmetauschers optimiert werden kann.

11.3. Technische Problemstellung an der Lüftungsanlage im Trakt 2 Stockwerk C

Es konnte festgestellt werden, dass die Umluftklappe im Luftaufbereitungsgerät falsch herum angesteuert wird. Ist diese im Leitsystem als geschlossen dargestellt, so öffnet sie und andersherum. Dieser Umstand führt dazu, dass bei steigender CO2-Konzentration über die Einzelraumregelung mehr Umluft zugemischt wird, anstelle mehr Aussenluft. Dies führt dann wiederum weiter zu einer erhöhten CO2-Konzentration, bis die Klappe schliesslich gänzlich geöffnet ist, was für den belegten Raum schlussendlich die ungünstigste Situation darstellt. Die Ansteuerung dieser Klappe soll dringlichst überprüft und korrigiert werden.

11.4. Luftmengen in den Schulzimmern der Lüftungsanlage im Trakt 2 Stockwerk C

Während den Untersuchungen konnte auch unabhängig von den Tracergasmessungen festgestellt werden, dass die Schulzimmer bei kleiner Belegungsdichte überlüftet sind. Die Tracergasmessungen haben dies letztlich nur bestätigt. Die CO2-Messungen in den Räumen sind vorhanden, welche eine Bedarfsgeführte Luftmenge ermöglichen würden. Die Einstellung der CO2-Schwellwerte, sowie die in den verschiedenen Betriebszuständen eingestellten Luftmengen soll dringlichst überprüft und korrigiert werden.

12. Fazit

12.1. Hinsichtlich Raum & Covid-19

Die Lüftungsanlage lässt sich zweifelsfrei als äusserst effektiv bezeichnen. Der Schadstoffabtransport ist in den meisten Zonen sehr gut gewährleistet. Die hintersten drei Sitzreihen fallen dahingehen negativ auf, da diese nicht vom sich einstellenden «Verdrängungskolben» profitieren und weniger effizient belüftet sind. Dieser Umstand kann mit organisatorischen Massnahmen berücksichtigt werden. Die Leckage über das Luftaufbereitungsgeräte ist vordergründig hinsichtlich des CO2-Abtransportes suboptimal. Sie führt so dazu, dass mehr Luft bewegt werden muss, als mit einem «dichten» Gerät

nötig wäre. Hinsichtlich eines Corona-Infektionsrisikos kann diese Leckage allerdings weitestgehend vernachlässigt werden. Voraussetzung hierfür ist die bedarfsgerechte Wartung des abluftseitigen Filters im Luftaufbereitungsgerät. Gemäss neusten Untersuchungen ist ein Filter der Klasse ePM1 70% bereits in der Lage knapp 80% der Corona-Virenbelasten zu filtrieren. Mit einer Erhöhung der Filterklasse auf ePM1 90% liesse sich gar ein Abscheidegrad von 90% erreichen. Dies führt schliesslich auch dazu, dass ein teilweiser Umluftbetrieb der Anlage praktisch bedenkenlos und ohne massgeblich erhöhtes Infektionsrisiko möglich ist. Hinsichtlich der direkten Übertragung im Raum ist es förderlich, wenn eine höhere Personenbelegung und somit höhere Wärmelasten angepeilt werden. Dies führt aufgrund der sich einstellenden Konvektionsströmung zu einer Unterstützung der Strömung nach oben hin und somit ausserhalb des Aufenthaltsbereiches.

12.2. **Hinsichtlich Messverfahren**

Für eine effiziente Analyse der Pulsmethode ist es zwingend notwendig in kürzeren Intervallen messen zu können, als dies mit dem Gasera One und dem Multipoint-Sampler möglich ist. Die beiden Geräte der Hochschule Luzern, welche nach dem NDIR-, respektive dem FITR-Prinzip arbeiten, sind hierfür bestens geeignet.
Weiter ist es für eine sinnvolle Analyse (vor allem hinsichtlich der Pulsmethode) vorteilhaft, die genaue Menge an eindosiertem Tracergas zu kennen. Die computergestützte Ansteuerung und Aufzeichnung der Dosierventile ist somit zentral. Die Dosierventile der Hochschule Luzern lassen sich mit Herstellersoftware von Bronkhorst optimal ansteuern. Dies soll für künftige Messungen unbedingt beibehalten werden.
Der Umrechnungsfaktor, welcher auf die Eindosierventile angewendet werden kann, stellt eine einfache Methode dar, die auf das Gas SF6 kalibrierten Ventile auch für das HFO1234yf anzuwenden. Die Anwendbarkeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Dosierventilhersteller Bronkhorst geprüft.

13. Anhang 1, Formeln zur Tracergasmessung

Die allgemeine Formel zur Bestimmung einer Stoffkonzentration in der Raumluft ist gemäss SIA 382/1:2014:

$$C_{IDA,t} = \left(C_{IDA,0} - C_{ZUL} - \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}}\right) \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + C_{ZUL} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \quad (1)$$

oder

$$C_{IDA,t} = C_{IDA,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} + \frac{10^{-6} \cdot G}{q_{v,ZUL}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) + C_{ZUL} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t}\right) \quad (2)$$

dabei ist

$C_{IDA,t}$	mittlere Stoffkonzentration im Raum (gemessen in der Abluft) zur Zeit t, in ppm
$C_{IDA,0}$	Stoffkonzentration im Raum zur Zeit t = 0, in ppm
C_{ZUL}	Stoffkonzentration in der Zuluft, in ppm
G	Stoffemission im Raum, in ppm
$q_{v,ZUL}$	Zuluftvolumenstrom, in m3/h
V_R	Raumvolumen, in m3
t	Zeit, in h

Bemerkung: In dieser Form gilt die Gleichung nur konstante Werte von $CZUL$, G und qv,ZUL. Zudem wird in dieser Schreibform eine Mischlüftung vorausgesetzt.

Abklingmethode
Bei der Abkling-Methode ist: $G = 0$ und $C_{ZUL} = 0$ (Wie dicht war der Bypass?). Somit ist

$$C_{RAL,t} = C_{RAL,0} \cdot e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} t} \quad (3)$$

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

$$C_{IDA,t} = \frac{10^{-6} * G}{q_{v,ZUL}} * \left(1 - e^{-\frac{q_{v,ZUL}}{V_R} * t}\right) = C_{IDA,\infty} * (1 - e^{-n*t}) \quad (4)$$

wobei

$C_{IDA,\infty}$	Stoffkonzentration in der Raumluft im Gleichgewichtszustand, in ppm
n	Exponent für rechnerischen Luftwechsel, in h-1

Bemerkung: Die Funktion von Gleichung 4 kann sinngemäss auch zur Beurteilung von lokalen Stoffkonzentrationen verwendet werden.

Lokale Lüftungswirksamkeit

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

wobei

$\varepsilon_{C,i}$	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

Puls Dosierung
Impulsverfahren gemäss EN ISO 12569.2017(D)

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

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

Aufenthaltszeit
$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} = \frac{1}{n}$
$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_{r,v}}$
$\dot{V}_L$ 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 untenstehend, eine Abschätzung der Strömung gemacht werden.
$\eta_a = 1$ unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$ Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$ vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$ Kurzschlussströmung

14. Anhang 2, Messdaten Tracergase

14.1. Messdaten Puls Messungen

Die Messdaten der Puls-Messungen sind im angefügten Dokument «Anhang 2a1» ersichtlich.

14.2. Messdaten Konstant-Aufdosierung & Abklingen

Die Messdaten der Puls-Messungen sind im angefügten Dokument «Anhang 2b1» und «Anhang 2b2» ersichtlich.

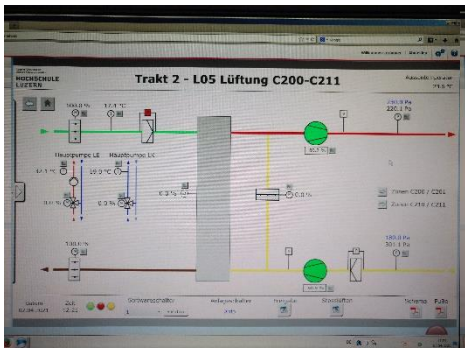
15. Anhang 3, Messdaten Kleindatenlogger

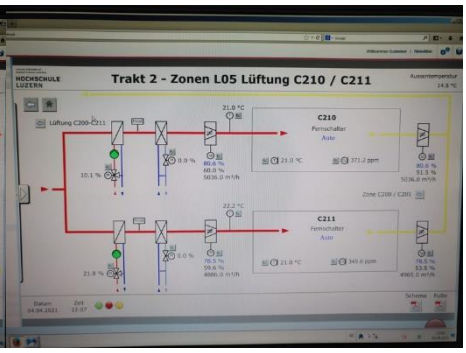
Die Messdaten der Puls-Messungen sind im angefügten Dokument «Anhang 3a1» ersichtlich.

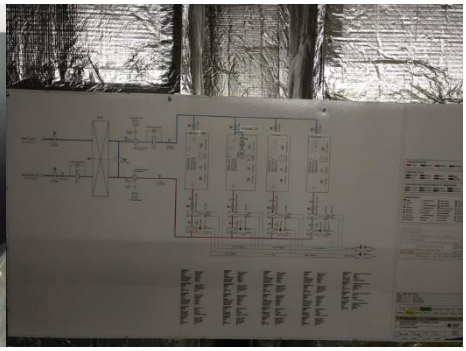
16. Anhang 4, Fotos & Wärmebildaufnahmen

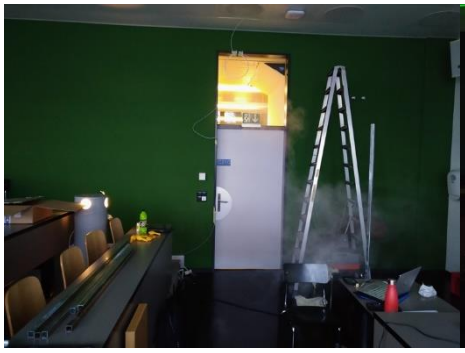
16.1. Messung vom 01.04.2021 – 04.04.2021

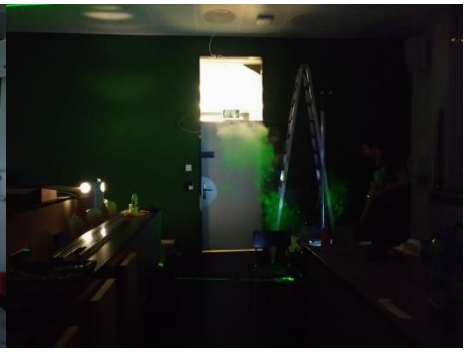
16.1.1. HSLU-Schulzimmer Fotos

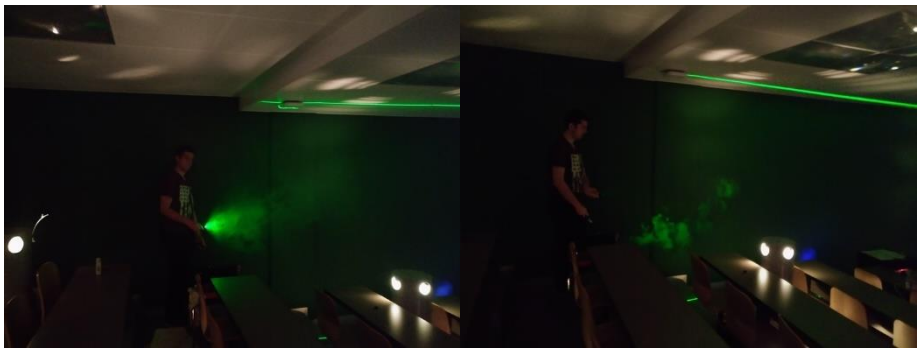


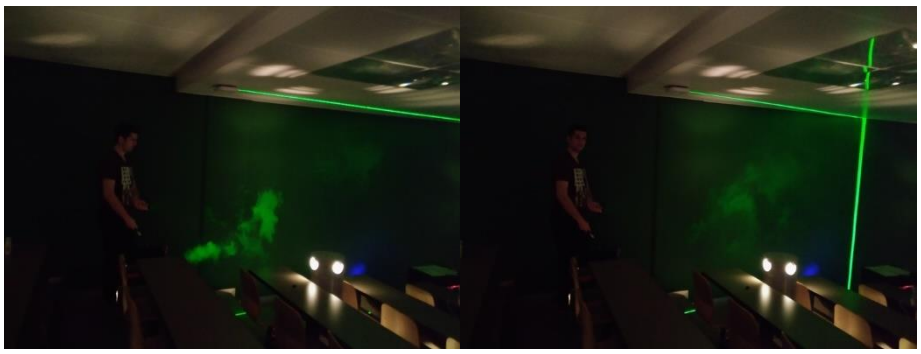


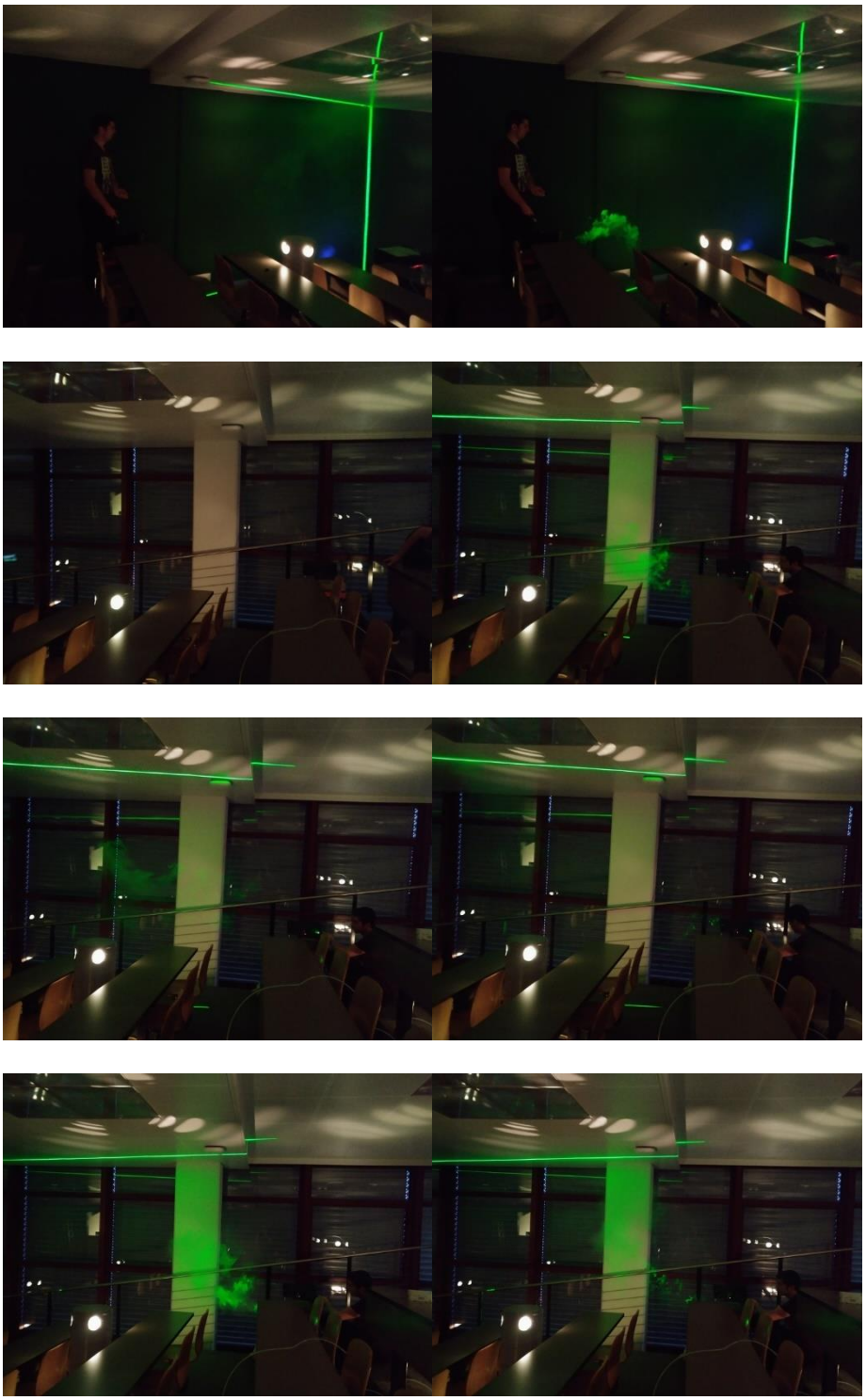


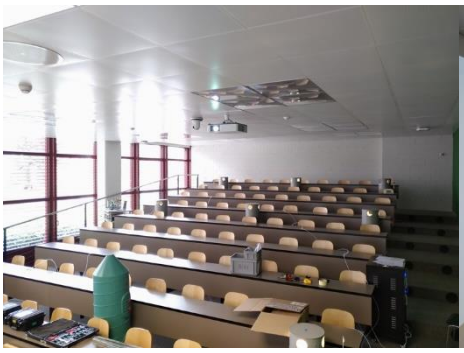
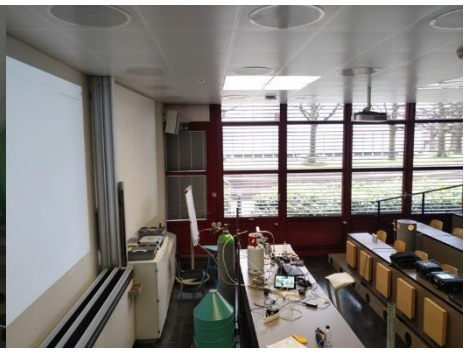


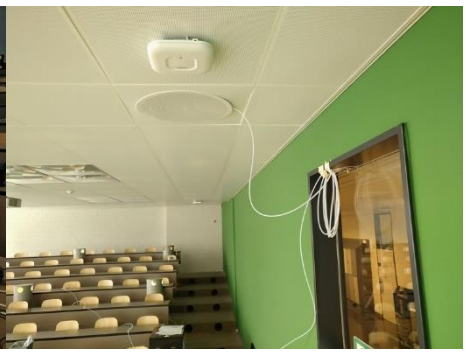


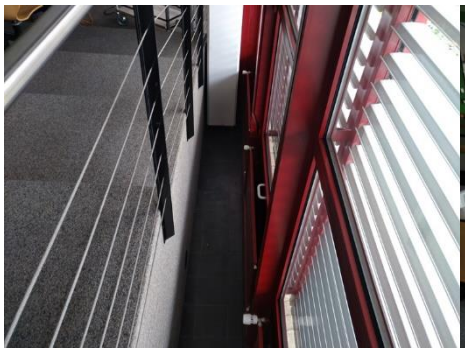


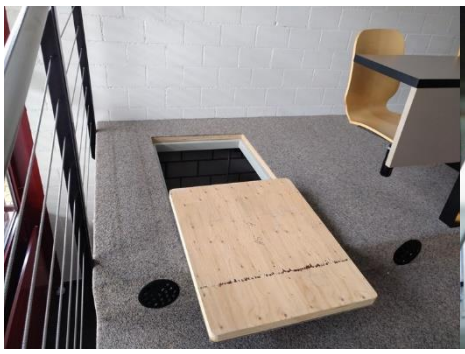




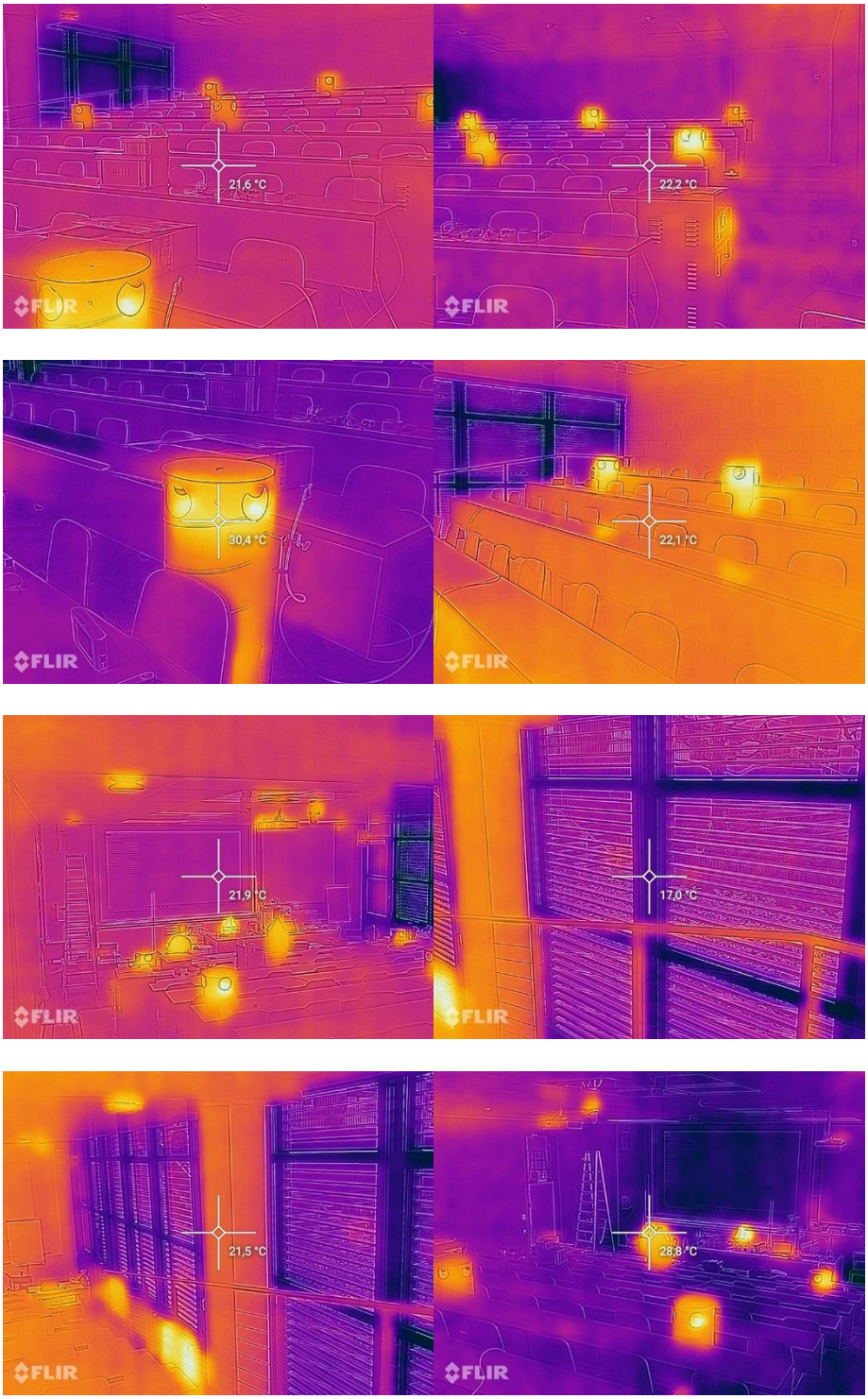



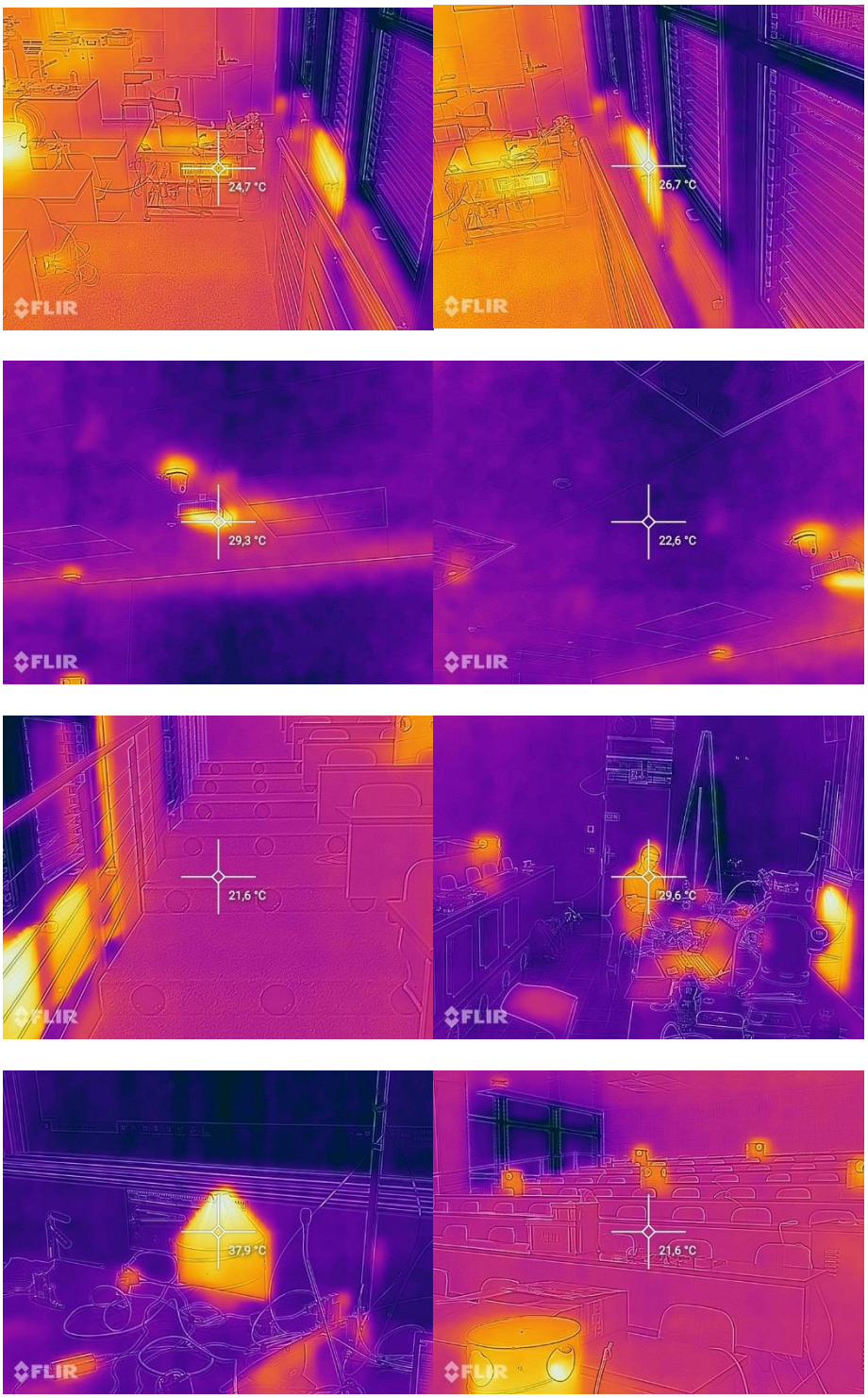






16.1.2. HSLU-Schulzimmer Wärmebildkamera




24,7 °C
26,7 °C
29,3 °C
22,6 °C
21,6 °C
29,6 °C
37,9 °C
21,6 °C
FLIR

17. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsdokumentation 7
Abbildung 2: Versuchsaufbau 8
Abbildung 3: Übersichtsplan Schulzimmer C210 9
Abbildung 4: Auswertung Gasera One hinsichtlich Ansteuerung Umluftklappe 11
Abbildung 5: Screen-Shot Leitsystem und Foto realer Zustand Klappe 12
Abbildung 6: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 1 14
Abbildung 7: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 2 15
Abbildung 8: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 3 15
Abbildung 9: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 4 16
Abbildung 10: Vergleichsdiagramm Gasera - FTIR 5 16
Abbildung 11: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Dozent 17
Abbildung 12: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Mitte-Mitte 18
Abbildung 13: Visualisierung Tracergas-Abtransport Dosierung Zuluft 19
Abbildung 14: Zoneneinteilung Lüftungseffizienz 19
Abbildung 15: Konstant-Aufdosierung Zuluft 1 21
Abbildung 16: Konstant-Aufdosierung Zuluft 2 22
Abbildung 17: Konstant-Aufdosierung Zuluft 3 22
Abbildung 18: Konstant-Abklingen Zuluft 1 23
Abbildung 19: Konstant-Abklingen Zuluft 2 23
Abbildung 20: Konstant-Abklingen Dozent 1 23
Abbildung 21: Konstant-Abklingen Zuluft 3 23
Abbildung 22: Konstant-Abklingen Dozent 2 23
Abbildung 23: Prinzipschema Luftaufbereitung (Weg der Leckage) 24
Abbildung 24: Rauchversuch Dozent 25
Abbildung 25: Rauchversuch Raummitte 26
Abbildung 26: Rauchversuch hinterer Teil des Raumes 27
Abbildung 27: Rauchversuch hinterster Teil des Raumes (Stagnation) 27

18. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standorte der Messpunkte 10
Tabelle 2: Durchschnittswerte Datenlogger 01.04.2021 10
Tabelle 3: Durchschnittswerte Datenlogger 02.04.2021 11
Tabelle 4: Übersicht Pulsdosierung 13
Tabelle 5: Durchschnittswerte Datenlogger 03.04.2021 & 04.04.2021 14
Tabelle 6: Übersicht Konstant-Dosierungen 20
Tabelle 7: Durchschnittswerte Datenlogger 04.04.2021 20
Tabelle 8: Übersicht Aufdosierungen 21
Tabelle 9: Übersicht Abklingversuche 22
Tabelle 10: Örtliche Lüftungseffektivität und Luftwechselzahlen 24
Tabelle 11: Leckageermittlung Luftaufbereitungsgerät 24

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 1; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 1	15	13:01:07	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 1	15	12:55:16	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.00	0.000165	165.48	0.186
HFO	0.80	0.000169	169.05	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.17	27.44
0.16	33.36

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	6.03	6.03	1.39	4.64	4.64	4.34	4.34
HFO	5.08	5.07	1.39	3.69	3.68	3.66	3.65
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	21716.3	21709.8	5000	16716.29	16709.81	4.34	4.34
HFO	18278.7	18242.6	5000	13278.75	13242.57	3.66	3.65

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	21713.1	350	0.02	0.07	4.34	ideale Kolbenströmung zu optimal	62.0	14.3
HFO	18260.7	350	0.02	0.07	3.65	ideale Kolbenströmung zu optimal	52.2	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

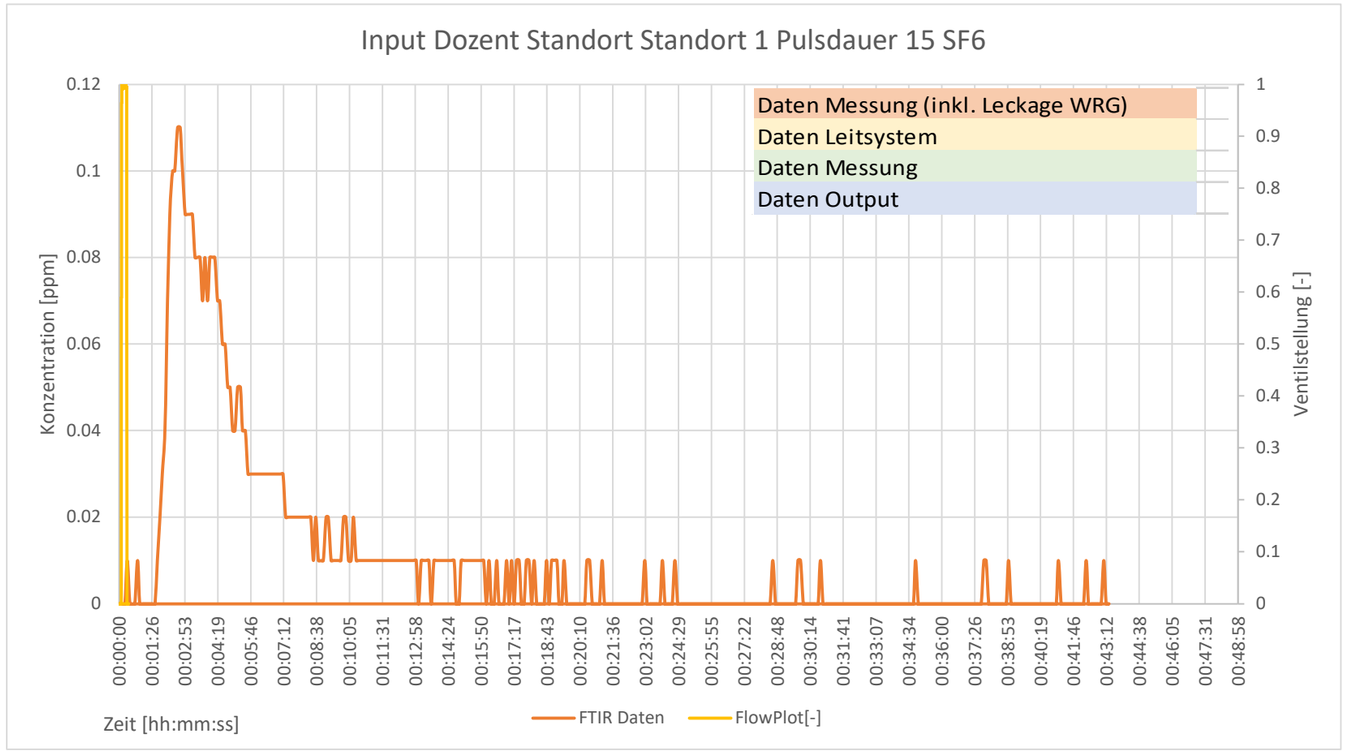
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	25751.7	350	0.01	0.07	5.15	ideale Kolbenströmung zu optimal	73.6	14.3
HFO	21657.1	350	0.02	0.07	4.33	ideale Kolbenströmung zu optimal	61.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

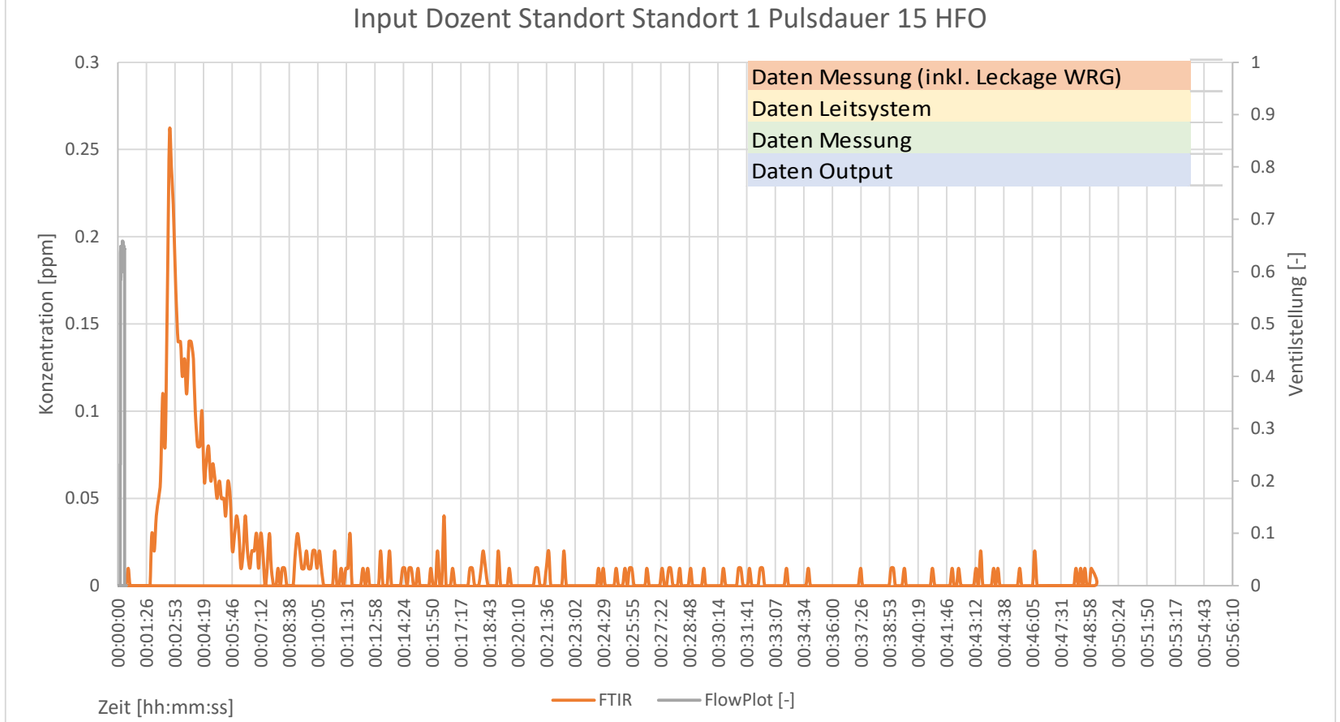
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.05	00:02:33	153	113	0.025	0.0270
HFO	3.05	00:02:36	156	103	0.025	0.0296

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	13:01:07	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	0.17	[g]
Volumenstrom Messung	21713	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	25752	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	4.34	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	5.15	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	62.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	73.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	153	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	113	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0270	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	12:55:16	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.80	[g]
Antwort	0.16	[g]
Volumenstrom Messung	18261	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	21657	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	3.65	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	4.33	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	52.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	61.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	156	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	103	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0296	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 1; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 30 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 1	30	13:47:09	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 30 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 1	30	13:51:25	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.06	0.000339	338.81	0.186
HFO	1.77	0.000373	373.23	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.25	41.08
0.30	63.60

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	8.25	8.25	1.39	6.86	6.86	5.94	5.94
HFO	5.88	5.87	1.39	4.49	4.48	4.23	4.23
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	29699.7	29690.9	5000	24699.72	24690.86	5.94	5.94
HFO	21168.3	21126.4	5000	16168.33	16126.44	4.23	4.23

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	29695.3	350	0.01	0.07	5.94	ideale Kolbenströmung zu optimal	84.8	14.3
HFO	21147.4	350	0.02	0.07	4.23	ideale Kolbenströmung zu optimal	60.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

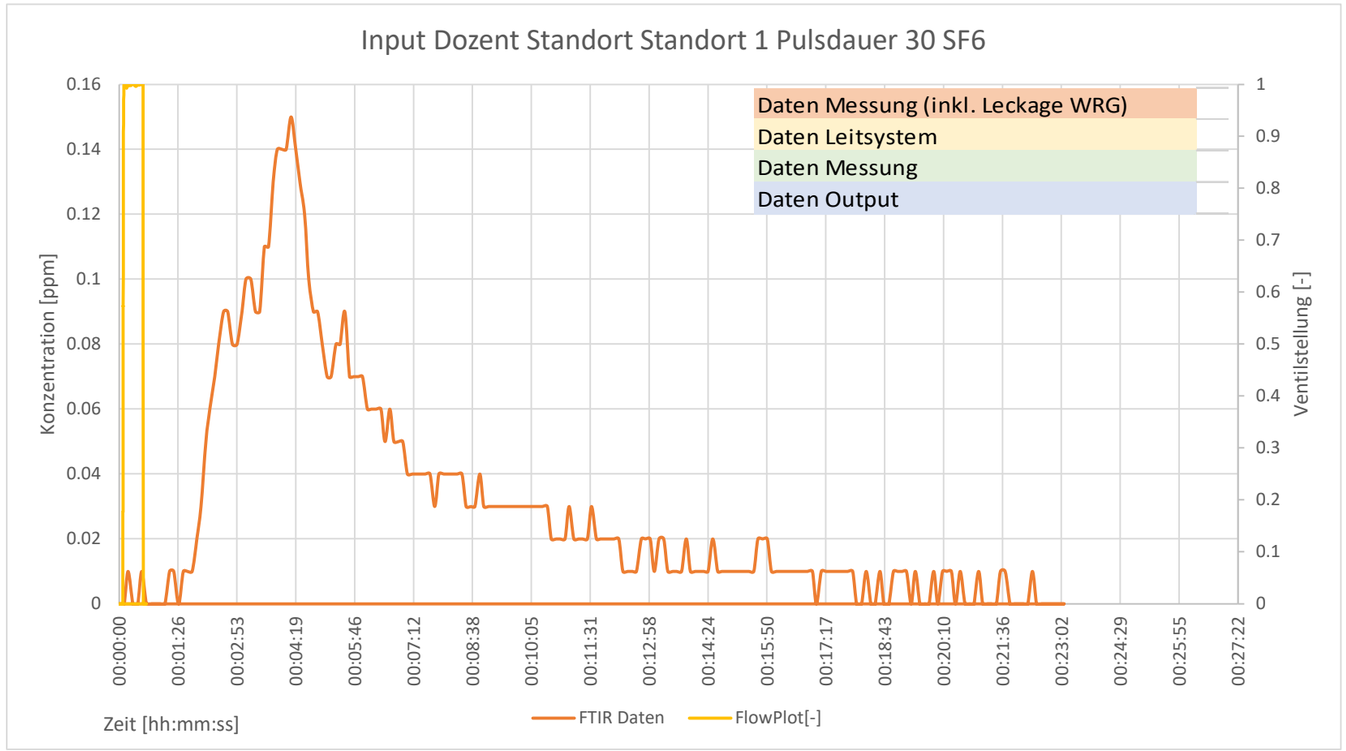
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	35218.6	350	0.01	0.07	7.04	ideale Kolbenströmung zu optimal	100.6	14.3
HFO	25080.8	350	0.01	0.07	5.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	71.7	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

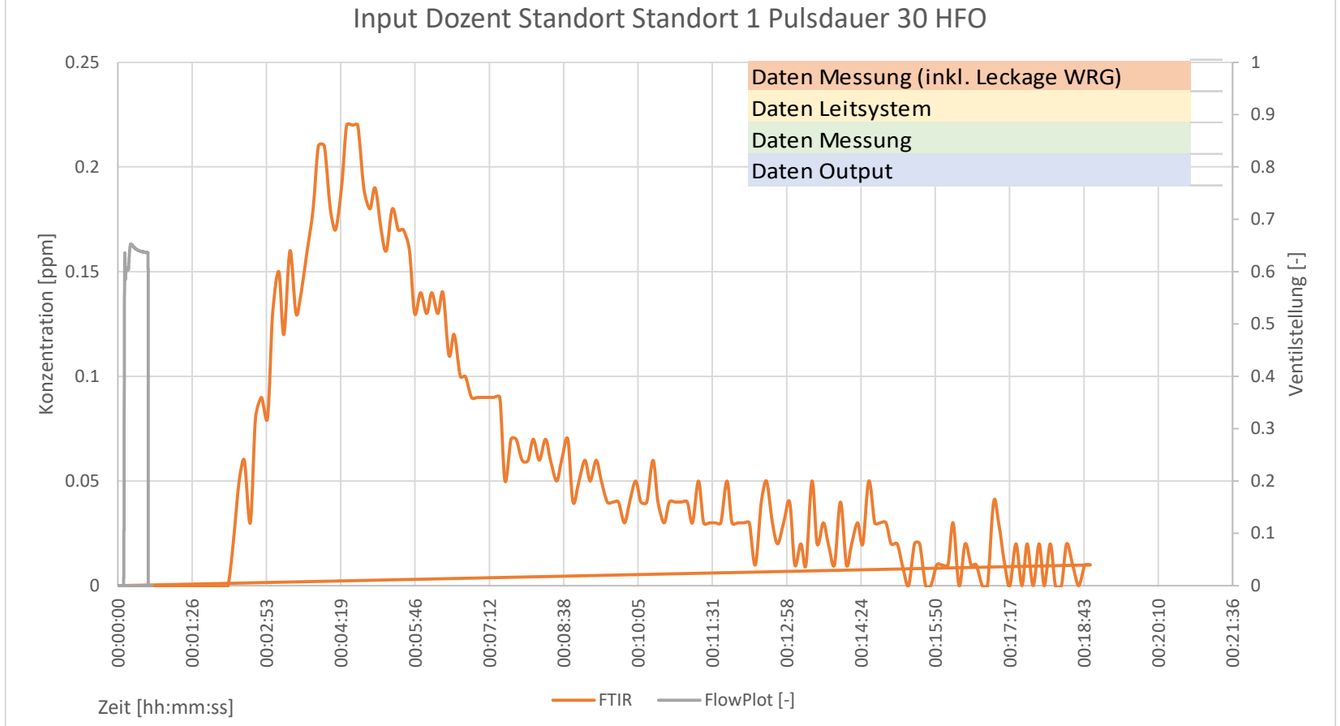
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.05	00:04:12	252	133	0.05	0.0229
HFO	3.05	00:04:26	266	147	0.05	0.0207

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	13:47:09	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.06	[g]
Antwort	0.25	[g]
Volumenstrom Messung	29695	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	35219	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	5.94	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	7.04	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	84.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	100.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	252	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	133	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0229	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	13:51:25	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	0.30	[g]
Volumenstrom Messung	21147	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	25081	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	4.23	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	5.02	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	60.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	71.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	266	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	147	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0207	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 1; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 60 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 1	60	14:20:01	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 1 Pulsdauer 60 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 1	60	14:15:47	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.15	0.000684	683.90	0.186
HFO	3.67	0.000775	774.53	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.52	85.47
0.73	154.61

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	8.00	8.00	1.39	6.62	6.61	5.76	5.76
HFO	5.02	5.01	1.39	3.63	3.62	3.61	3.61
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	28814.3	28805.7	5000	23814.32	23805.72	5.76	5.76
HFO	18070.1	18034.4	5000	13070.14	13034.38	3.61	3.61

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	28810.0	350	0.01	0.07	5.76	ideale Kolbenströmung zu optimal	82.3	14.3
HFO	18052.3	350	0.02	0.07	3.61	ideale Kolbenströmung zu optimal	51.6	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

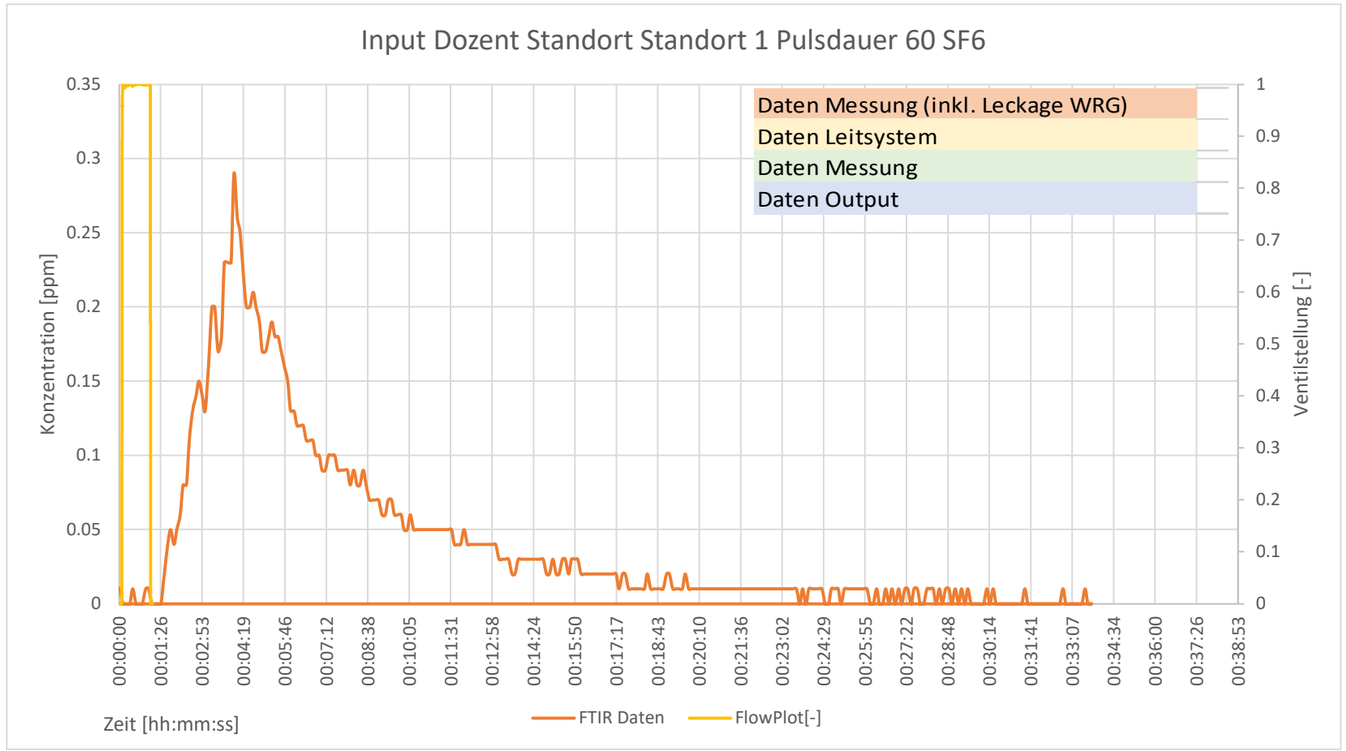
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	34168.7	350	0.01	0.07	6.83	ideale Kolbenströmung zu optimal	97.6	14.3
HFO	21410.0	350	0.02	0.07	4.28	ideale Kolbenströmung zu optimal	61.2	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

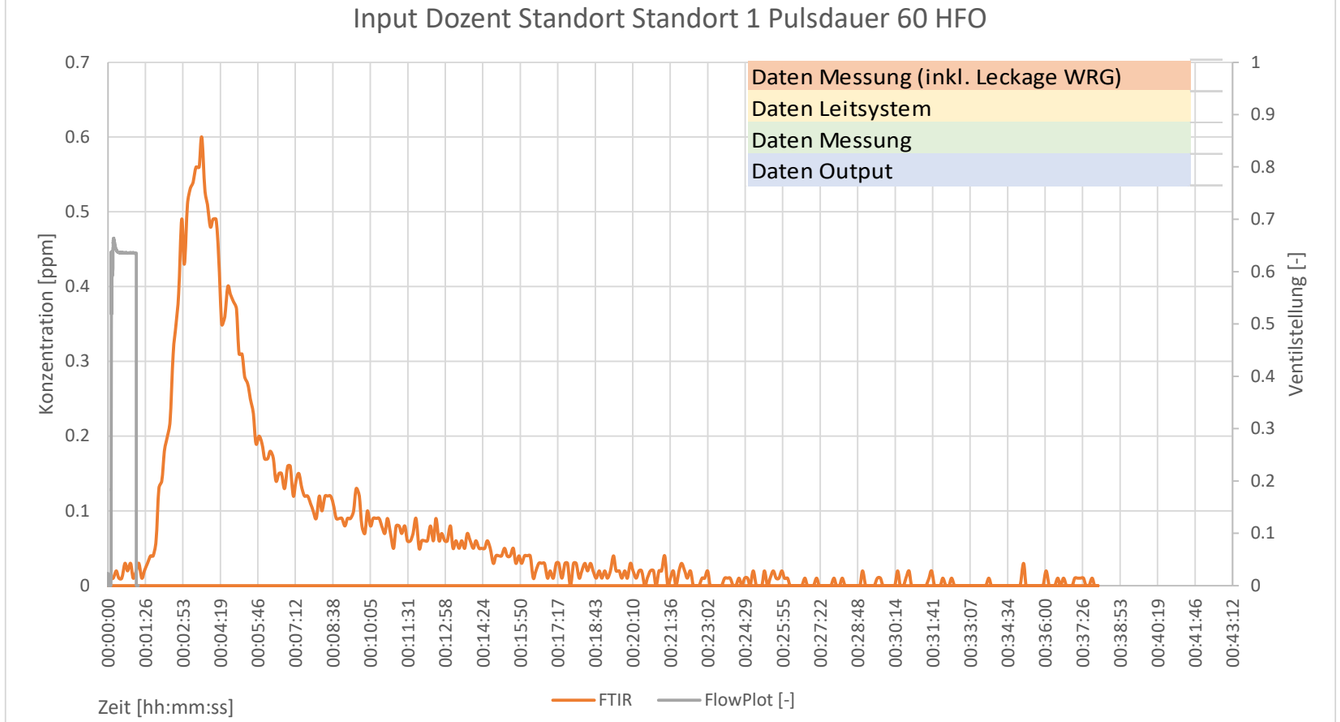
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.05	00:03:59	239	146	0.1	0.0209
HFO	3.05	00:03:36	216	117	0.1	0.0261

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	14:20:01	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	0.52	[g]
Volumenstrom Messung	28810	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	34169	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	5.76	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	6.83	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	82.3	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	97.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	239	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	146	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0209	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	14:15:47	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.67	[g]
Antwort	0.73	[g]
Volumenstrom Messung	18052	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	21410	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	3.61	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	4.28	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	51.6	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	61.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.05	[m]
Zeit bis zum Peak	216	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	117	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0261	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 2; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 2	15	14:59:59	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 2	15	15:03:54	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.00	0.000165	165.22	0.186
HFO	0.79	0.000166	166.48	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.09	14.30
0.12	25.36

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	11.56	11.55	1.39	10.17	10.16	8.32	8.32
HFO	6.58	6.56	1.39	5.19	5.18	4.74	4.73
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	41606.2	41593.8	5000	36606.21	36593.80	8.32	8.32
HFO	23679.8	23632.9	5000	18679.80	18632.94	4.74	4.73

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	41600.0	350	0.01	0.07	8.32	ideale Kolbenströmung zu optimal	118.9	14.3
HFO	23656.4	350	0.01	0.07	4.73	ideale Kolbenströmung zu optimal	67.6	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

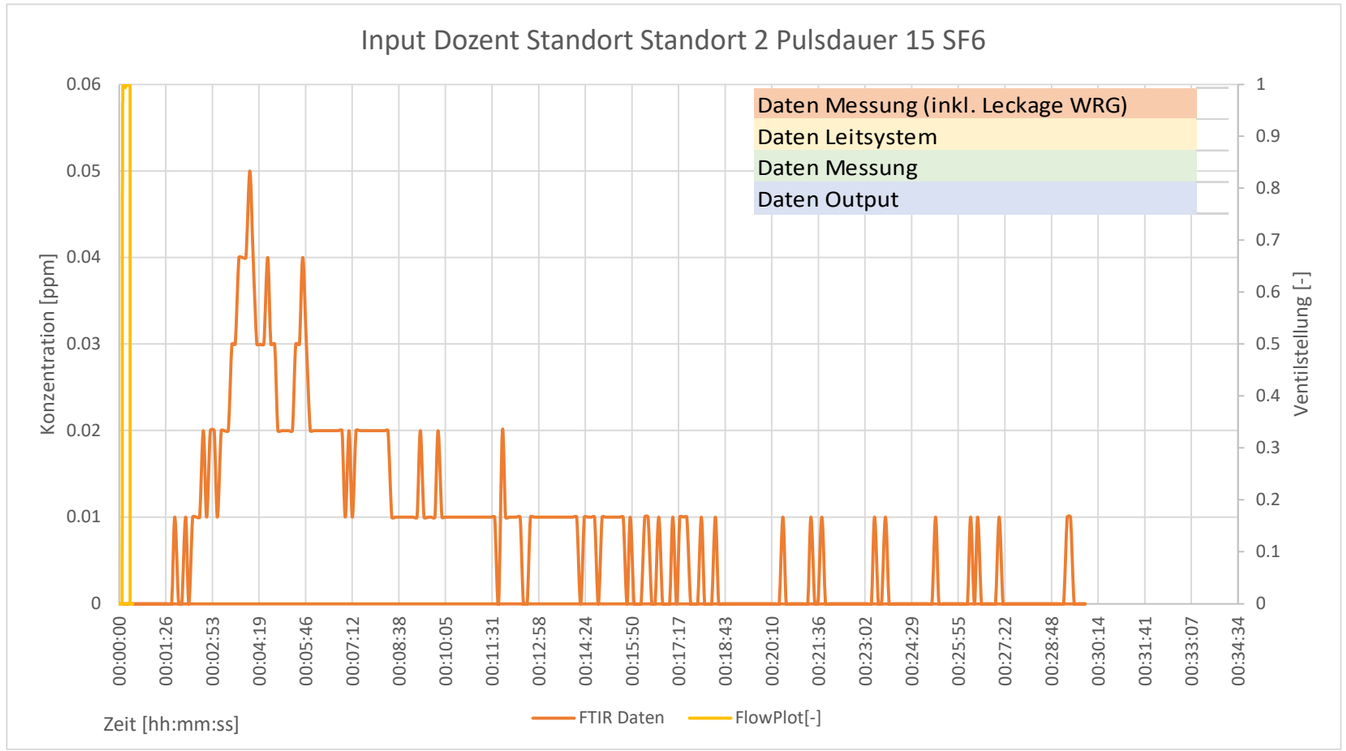
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	49337.6	350	0.01	0.07	9.87	ideale Kolbenströmung zu optimal	141.0	14.3
HFO	28056.5	350	0.01	0.07	5.61	ideale Kolbenströmung zu optimal	80.2	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

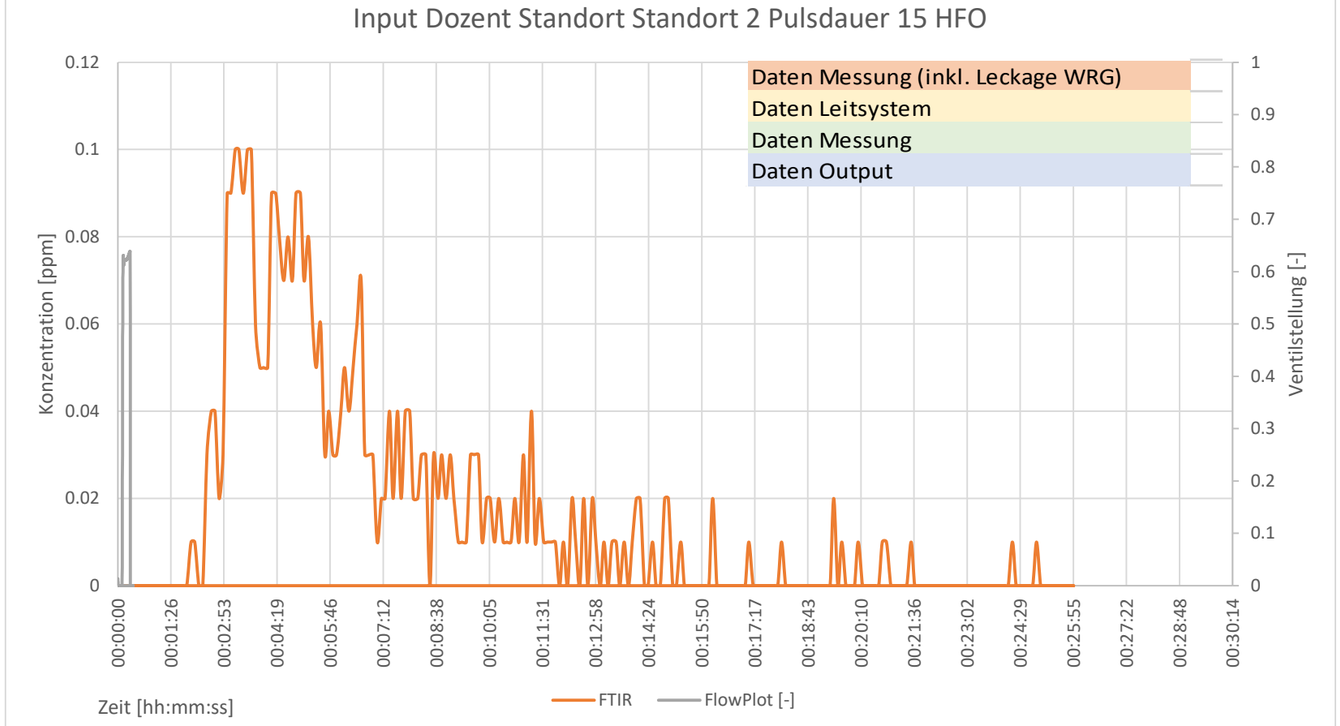
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	6.85	00:04:02	242	209	0.025	0.0328
HFO	6.85	00:03:11	191	145	0.025	0.0472

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	14:59:59	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	0.09	[g]
Volumenstrom Messung	41600	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	49338	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	8.32	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	9.87	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	118.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	141.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	242	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	209	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0328	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	15:03:54	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.79	[g]
Antwort	0.12	[g]
Volumenstrom Messung	23656	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	28056	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	4.73	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	5.61	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	67.6	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	80.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	191	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	145	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0472	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 2; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 30 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 2	30	15:37:26	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 30 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 2	30	15:34:29	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.31	0.186
HFO	1.75	0.000370	369.99	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.16	26.79
0.43	90.42

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	12.63	12.63	1.39	11.24	11.24	9.10	9.09
HFO	4.10	4.09	1.39	2.71	2.70	2.95	2.95
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	45475.7	45462.1	5000	40475.65	40462.09	9.10	9.09
HFO	14760.1	14730.9	5000	9760.13	9730.92	2.95	2.95

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	45468.9	350	0.01	0.07	9.09	ideale Kolbenströmung zu optimal	129.9	14.3
HFO	14745.5	350	0.02	0.07	2.95	ideale Kolbenströmung zu optimal	42.1	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

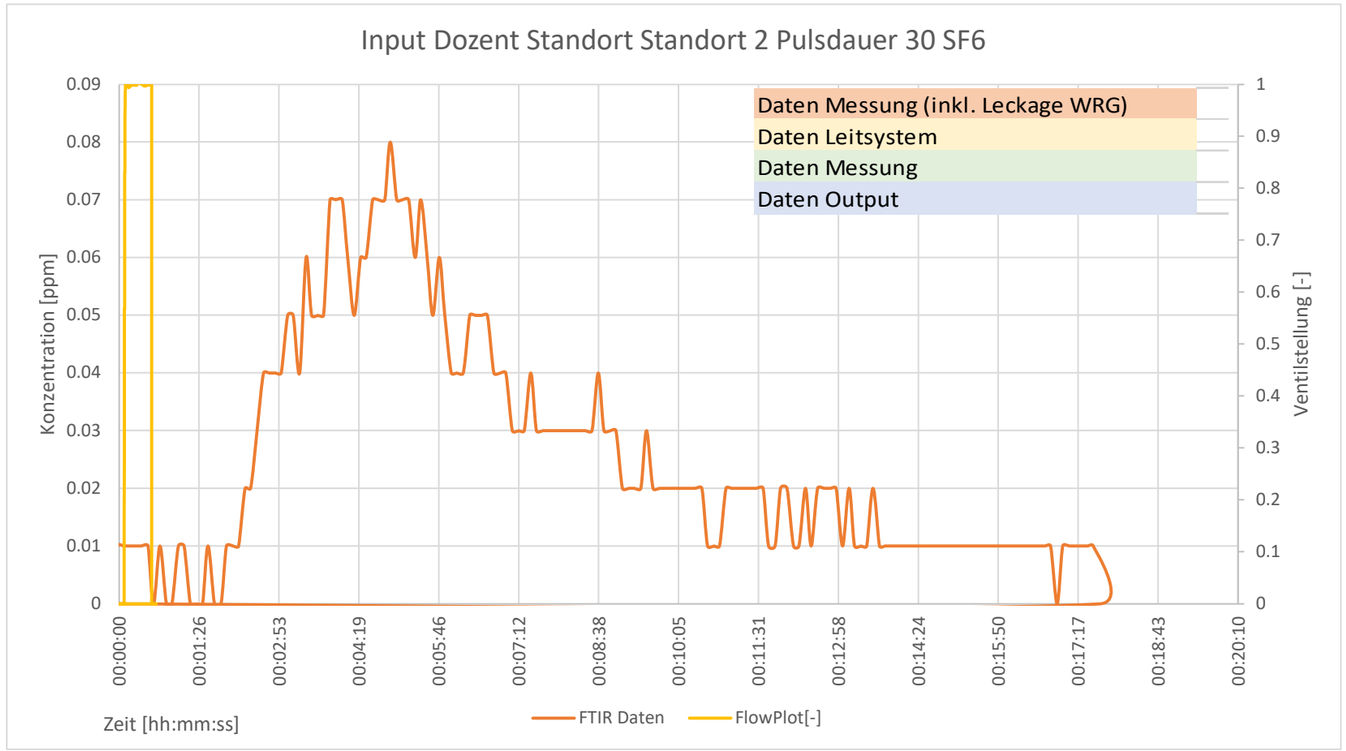
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	53926.1	350	0.01	0.07	10.79	ideale Kolbenströmung zu optimal	154.1	14.3
HFO	17488.2	350	0.02	0.07	3.50	ideale Kolbenströmung zu optimal	50.0	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

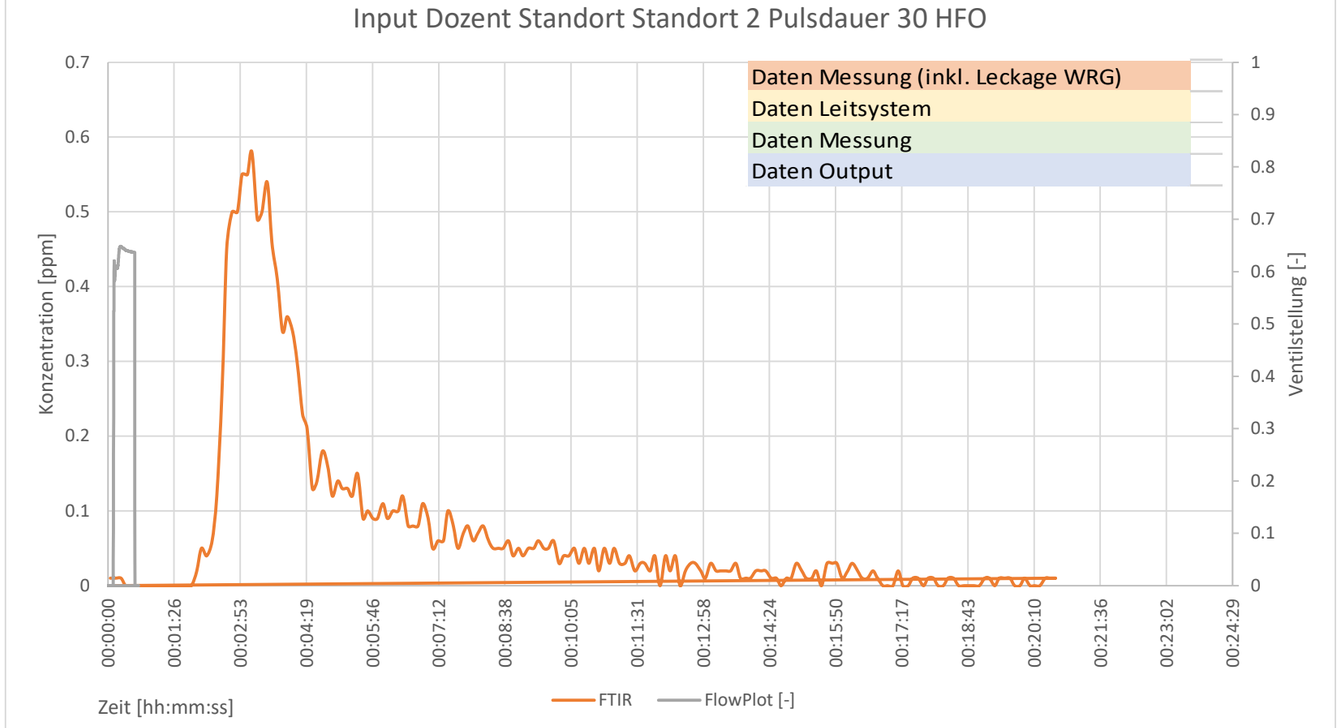
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	6.85	00:04:53	293	202	0.05	0.0339
HFO	6.85	00:03:08	188	136	0.05	0.0504

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	15:37:26	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	0.16	[g]
Volumenstrom Messung	45469	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	53926	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	9.09	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	10.79	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	129.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	154.1	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	293	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	202	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0339	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	15:34:29	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.75	[g]
Antwort	0.43	[g]
Volumenstrom Messung	14746	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	17488	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	2.95	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	3.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	42.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	50.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	188	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	136	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0504	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 2; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 2	60	15:58:20	0	auto	0	auto

	Input Dozent Standort Standort 2 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 2	60	16:02:20	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.15	0.000684	684.16	0.186
HFO	3.66	0.000772	771.57	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.42	69.71
1.00	210.73

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	9.82	9.81	1.39	8.43	8.43	7.07	7.07
HFO	3.67	3.66	1.39	2.28	2.27	2.64	2.64
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	35342.5	35331.9	5000	30342.49	30331.95	7.07	7.07
HFO	13207.3	13181.2	5000	8207.29	8181.15	2.64	2.64

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	35337.2	350	0.01	0.07	7.07	ideale Kolbenströmung zu optimal	101.0	14.3
HFO	13194.2	350	0.03	0.07	2.64	ideale Kolbenströmung zu optimal	37.7	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

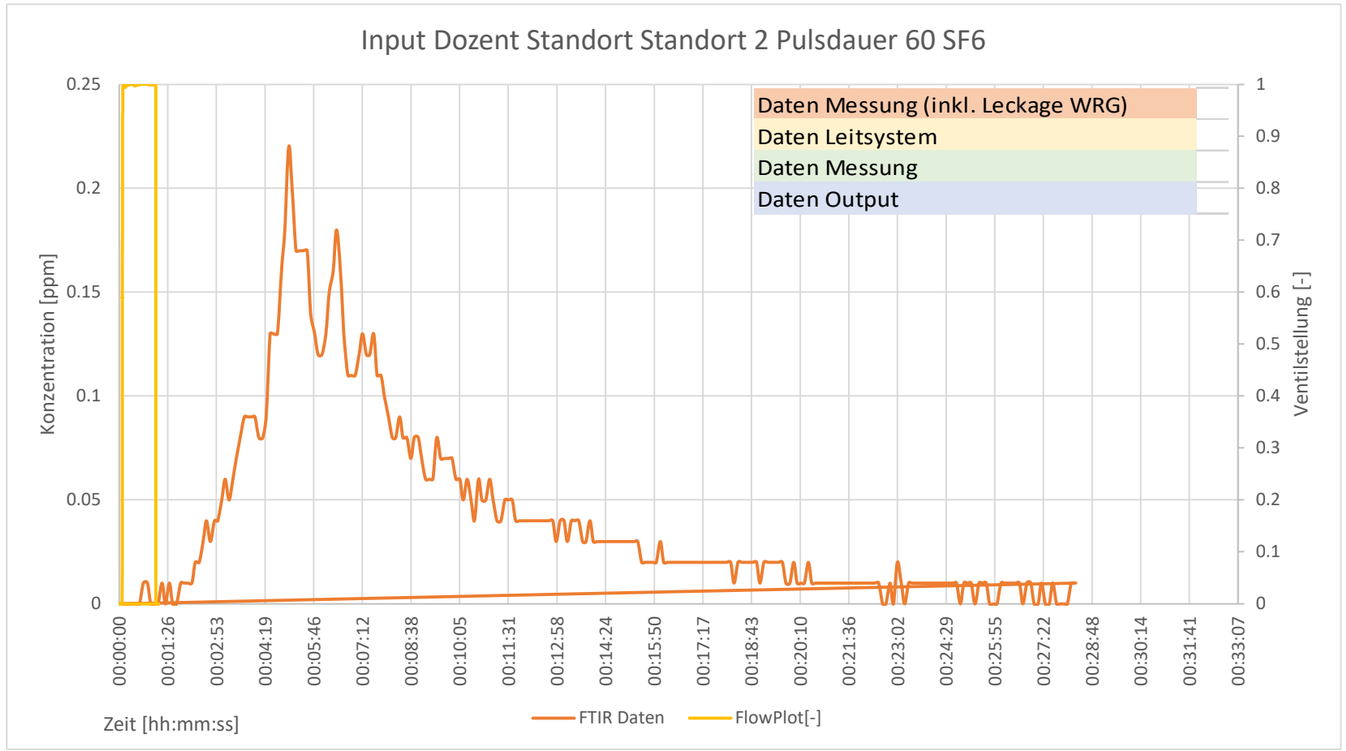
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	41909.9	350	0.01	0.07	8.38	ideale Kolbenströmung zu optimal	119.7	14.3
HFO	15648.3	350	0.02	0.07	3.13	ideale Kolbenströmung zu optimal	44.7	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

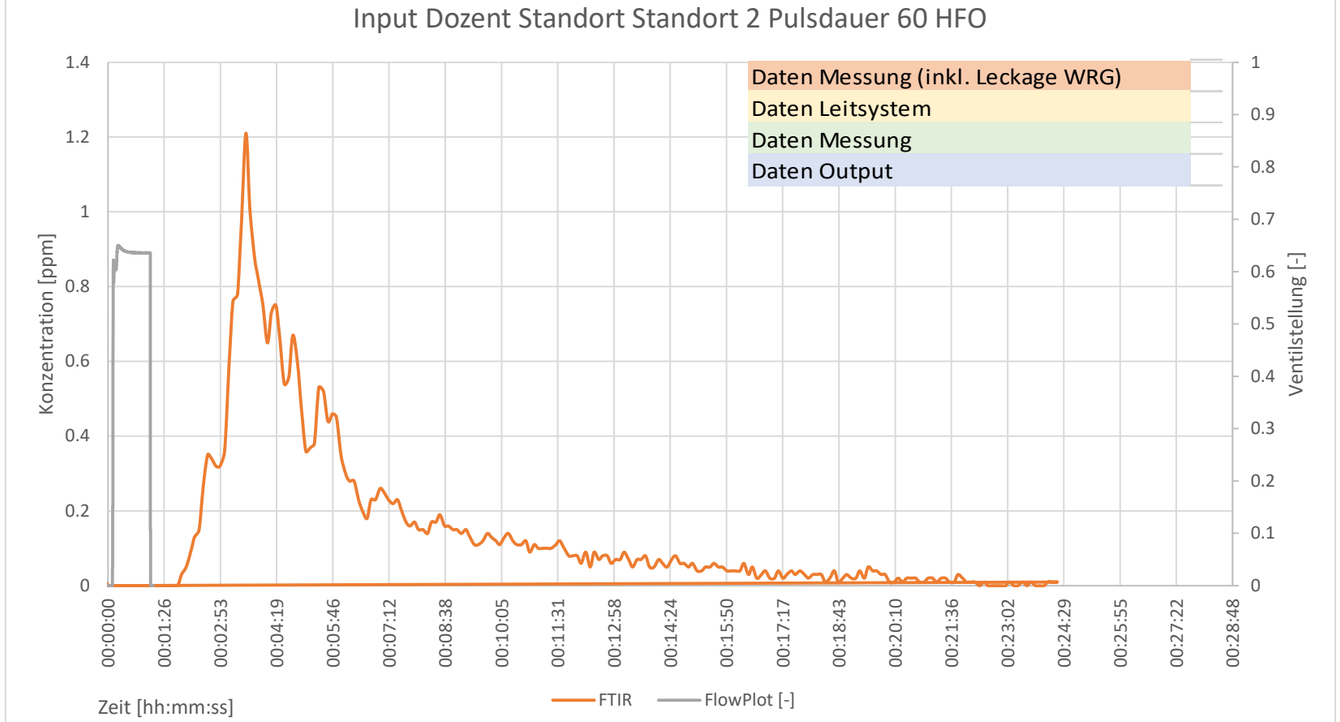
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	6.85	00:05:01	301	268	0.1	0.0256
HFO	6.85	00:03:32	212	133	0.1	0.0515

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	15:58:20	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	0.42	[g]
Volumenstrom Messung	35337	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	41910	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	7.07	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	8.38	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	101.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	119.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	301	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	268	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0256	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	16:02:20	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.66	[g]
Antwort	1.00	[g]
Volumenstrom Messung	13194	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	15648	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.03	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	2.64	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	3.13	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	37.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	44.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	6.85	[m]
Zeit bis zum Peak	212	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	133	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0515	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 3; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 3	15	16:33:08	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 3	15	16:30:06	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.00	0.000165	165.47	0.186
HFO	0.79	0.000167	166.55	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.09	14.29
0.08	17.41

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	11.58	11.58	1.39	10.19	10.19	8.34	8.34
HFO	9.59	9.57	1.39	8.20	8.18	6.90	6.89
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	41699.1	41686.7	5000	36699.10	36686.66	8.34	8.34
HFO	34507.0	34438.7	5000	29507.02	29438.73	6.90	6.89

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	41692.9	350	0.01	0.07	8.34	ideale Kolbenströmung zu optimal	119.1	14.3
HFO	34472.9	350	0.01	0.07	6.89	ideale Kolbenströmung zu optimal	98.5	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

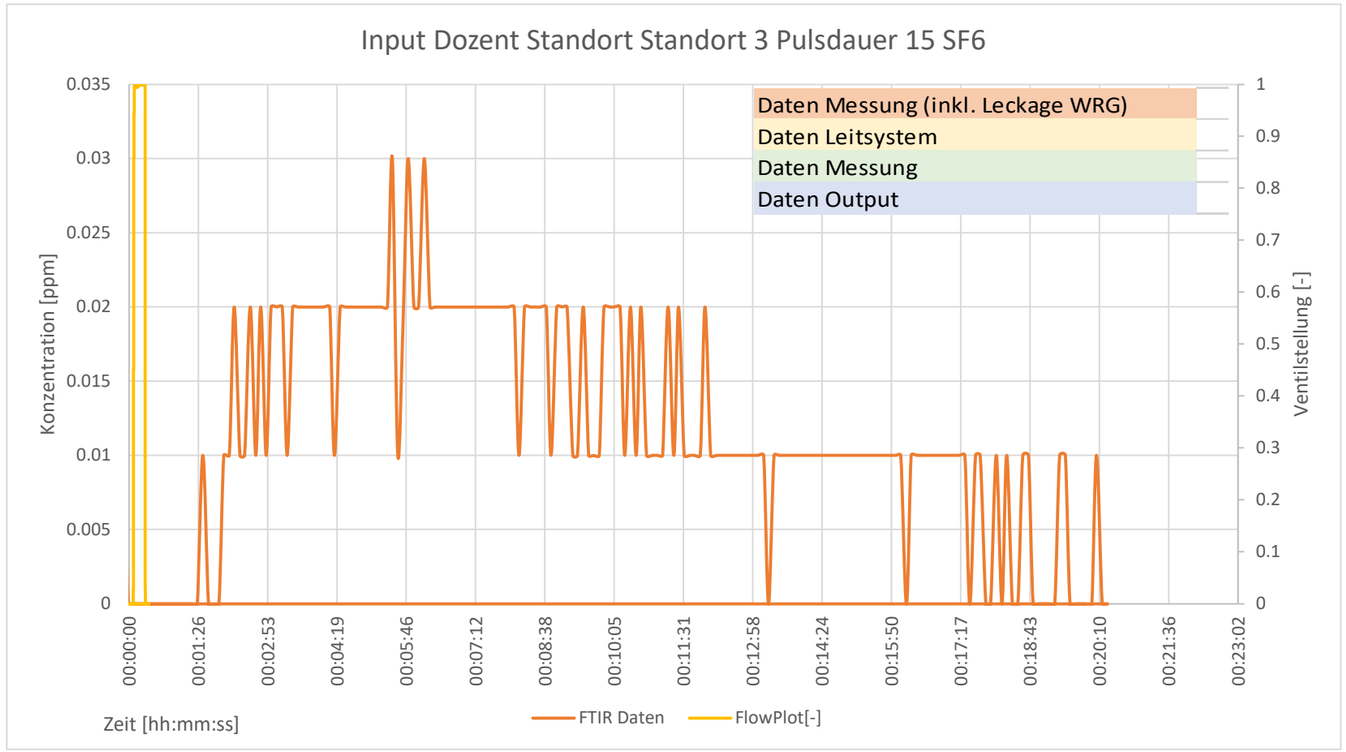
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	49447.8	350	0.01	0.07	9.89	ideale Kolbenströmung zu optimal	141.3	14.3
HFO	40884.8	350	0.01	0.07	8.18	ideale Kolbenströmung zu optimal	116.8	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

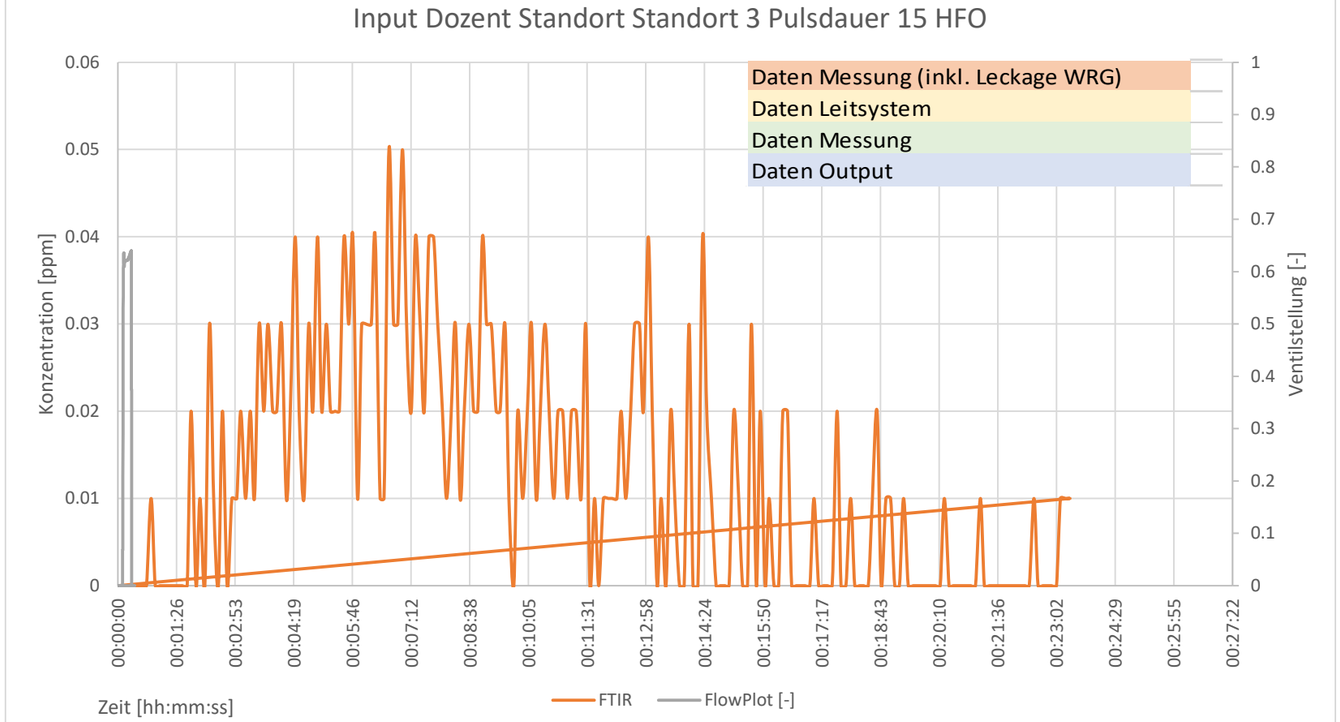
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	9.81	00:05:28	328	328	0.025	0.0299
HFO	9.81	00:06:39	399	135	0.025	0.0727

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	16:33:08	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	0.09	[g]
Volumenstrom Messung	41693	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	49448	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	8.34	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	9.89	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	119.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	141.3	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	328	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	328	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0299	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	16:30:06	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.79	[g]
Antwort	0.08	[g]
Volumenstrom Messung	34473	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	40885	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	6.89	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	8.18	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	98.5	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	116.8	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	399	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	135	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0727	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 3; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 30 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 3	30	16:56:21	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 30 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 3	30	16:59:00	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.06	0.000339	338.68	0.186
HFO	1.75	0.000369	368.88	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.24	38.72
0.23	49.46

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	8.75	8.75	1.39	7.36	7.36	6.30	6.30
HFO	7.47	7.46	1.39	6.08	6.07	5.38	5.37
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	31497.8	31488.4	5000	26497.82	26488.43	6.30	6.30
HFO	26902.2	26849.0	5000	21902.23	21848.98	5.38	5.37

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	31493.1	350	0.01	0.07	6.30	ideale Kolbenströmung zu optimal	90.0	14.3
HFO	26875.6	350	0.01	0.07	5.38	ideale Kolbenströmung zu optimal	76.8	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

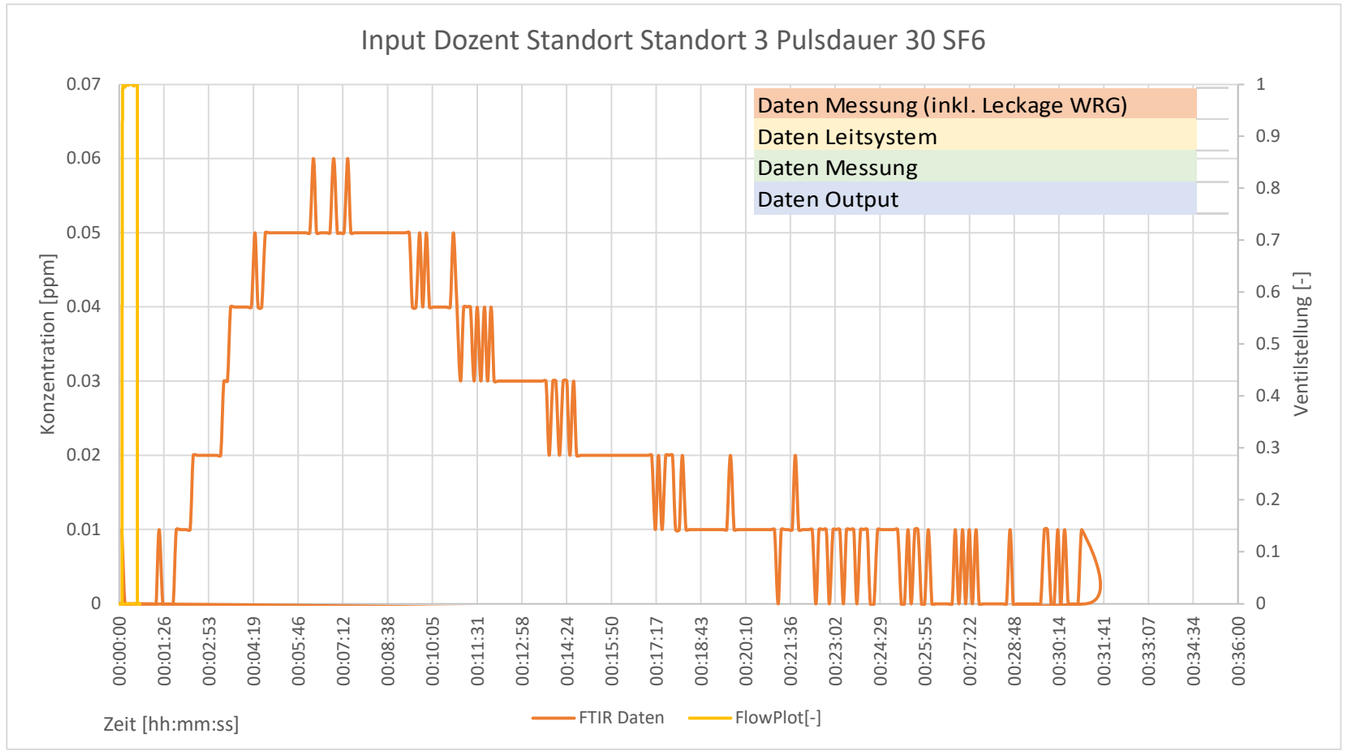
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	37350.8	350	0.01	0.07	7.47	ideale Kolbenströmung zu optimal	106.7	14.3
HFO	31874.5	350	0.01	0.07	6.37	ideale Kolbenströmung zu optimal	91.1	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

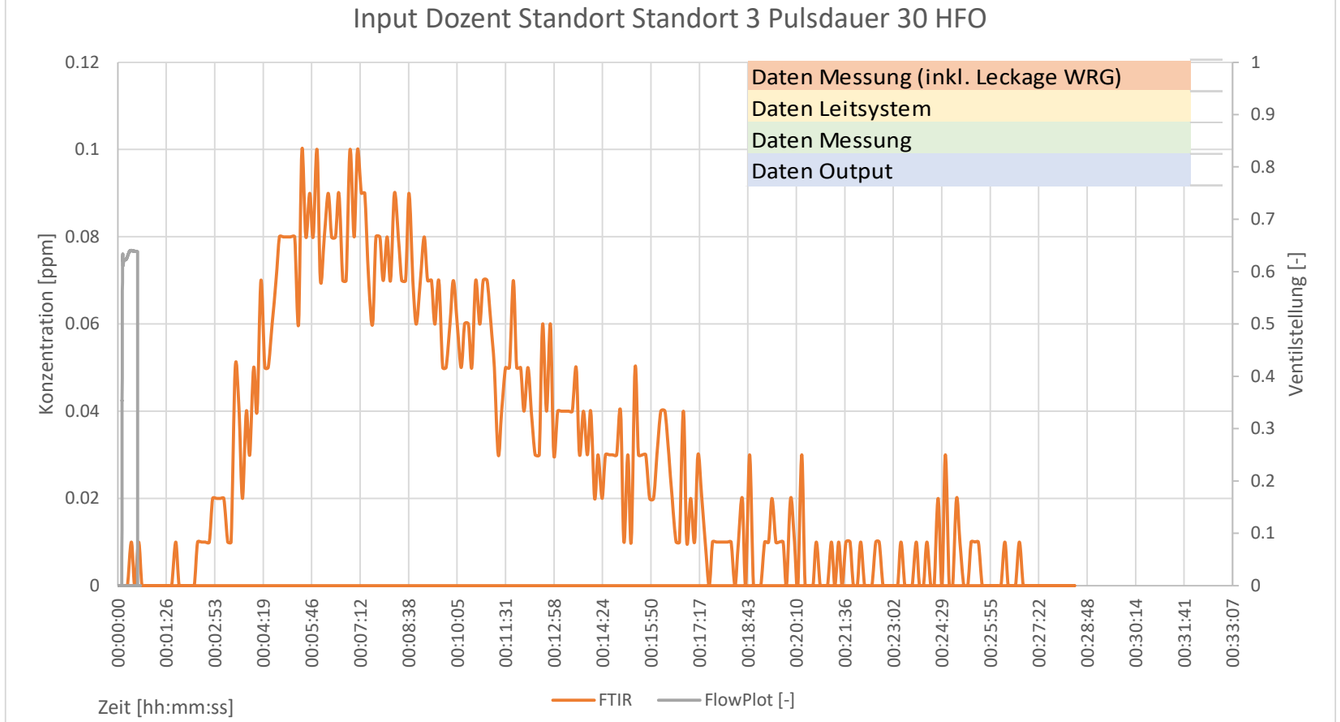
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	9.81	00:06:15	375	375	0.05	0.0262
HFO	9.81	00:05:28	328	255	0.05	0.0385

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	16:56:21	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.06	[g]
Antwort	0.24	[g]
Volumenstrom Messung	31493	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	37351	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	6.30	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	7.47	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	90.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	106.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	375	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	375	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0262	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	16:59:00	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.75	[g]
Antwort	0.23	[g]
Volumenstrom Messung	26876	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	31874	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	5.38	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	6.37	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	76.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	91.1	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	328	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	255	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0385	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 3; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 3	60	17:33:01	0	auto	0	auto

	Input Dozent Standort Standort 3 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 3	60	17:30:05	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.15	0.000684	684.14	0.186
HFO	3.66	0.000772	771.97	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.33	54.91
0.44	92.19

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	12.46	12.46	1.39	11.07	11.07	8.97	8.97
HFO	8.39	8.37	1.39	7.00	6.98	6.04	6.03
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	44866.7	44853.3	5000	39866.66	39853.27	8.97	8.97
HFO	30205.1	30145.4	5000	25205.14	25145.36	6.04	6.03

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	44860.0	350	0.01	0.07	8.97	ideale Kolbenströmung zu optimal	128.2	14.3
HFO	30175.2	350	0.01	0.07	6.04	ideale Kolbenströmung zu optimal	86.2	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

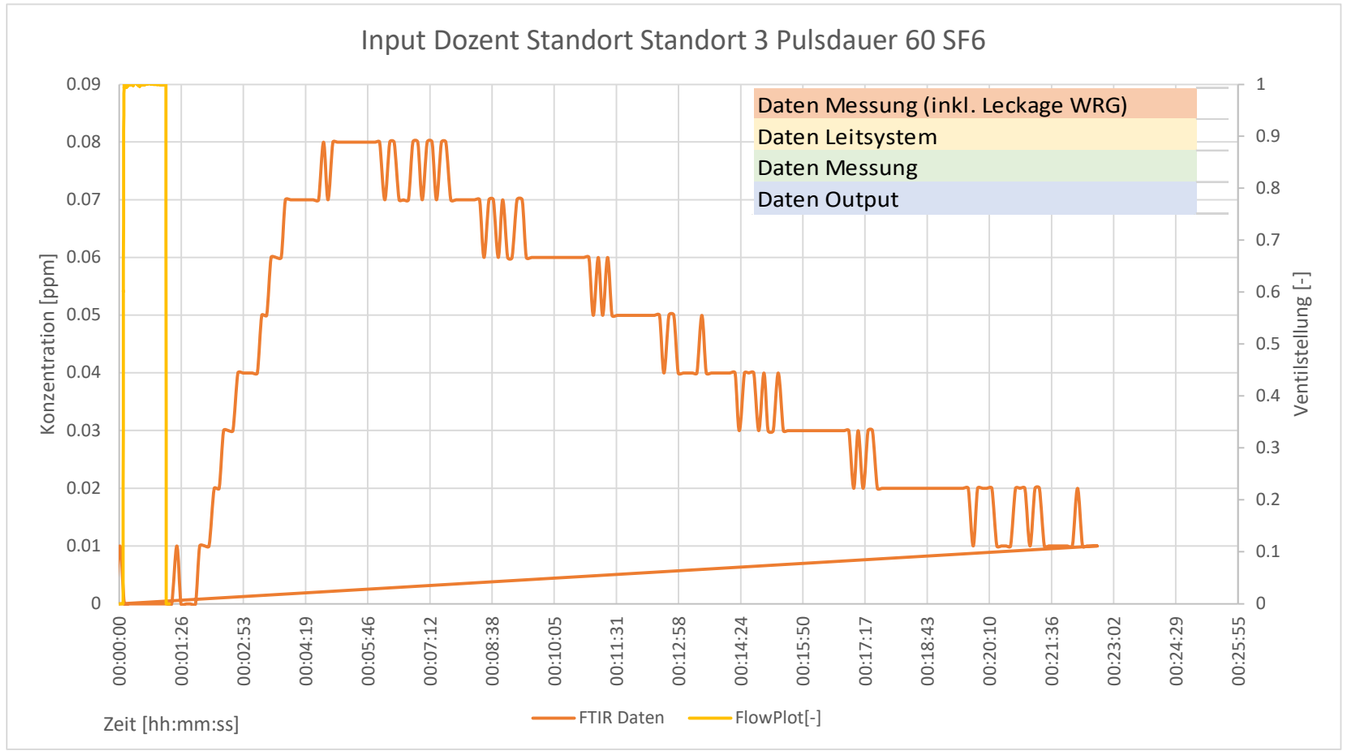
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	53203.9	350	0.01	0.07	10.64	ideale Kolbenströmung zu optimal	152.0	14.3
HFO	35787.8	350	0.01	0.07	7.16	ideale Kolbenströmung zu optimal	102.3	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

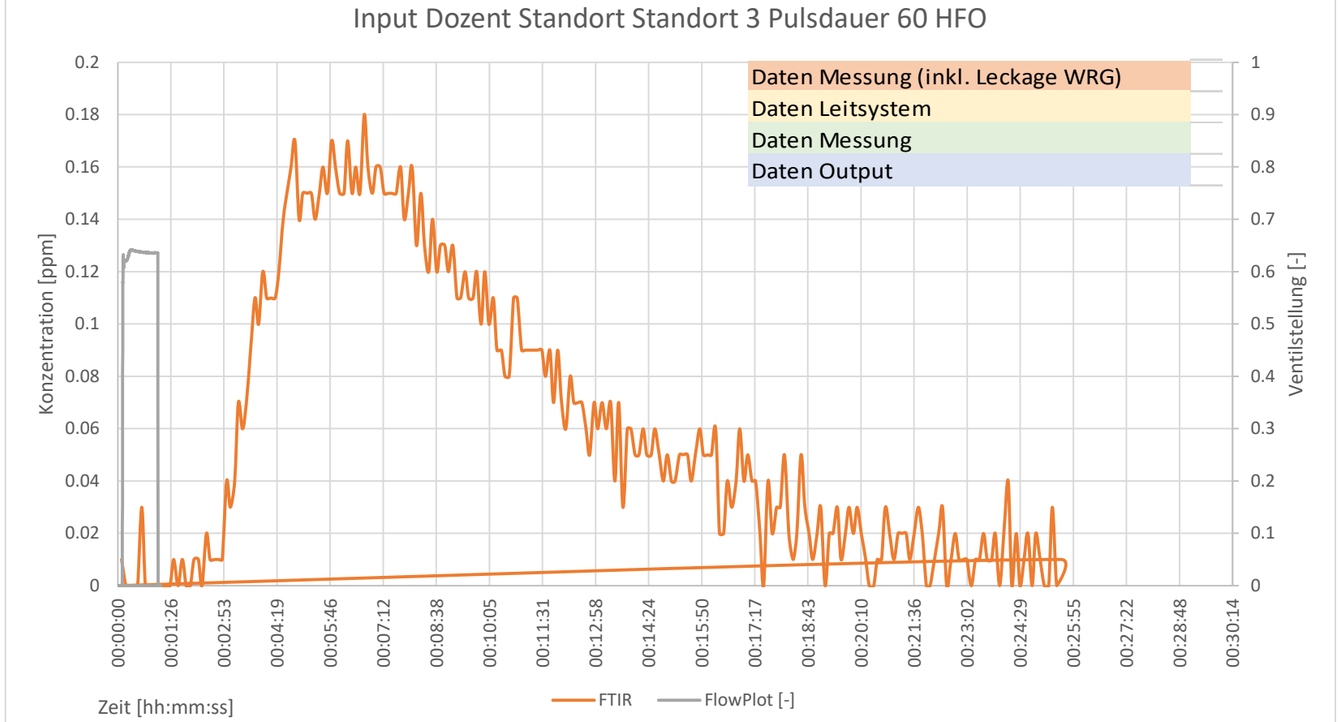
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	9.81	00:04:44	284	0	0.1	-
HFO	9.81	00:06:41	401	223	0.1	0.0440

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	17:33:01	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	0.33	[g]
Volumenstrom Messung	44860	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	53204	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	8.97	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	10.64	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	128.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	152.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	284	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	0	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	17:30:05	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.66	[g]
Antwort	0.44	[g]
Volumenstrom Messung	30175	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	35788	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	6.04	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	7.16	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	86.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	102.3	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	9.81	[m]
Zeit bis zum Peak	401	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	223	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0440	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 4; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 4	15	17:59:49	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 4	15	18:02:12	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.01	0.000166	165.68	0.186
HFO	0.79	0.000166	166.39	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.12	19.88
0.06	11.82

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	8.34	8.33	1.39	6.95	6.95	6.00	6.00
HFO	14.10	14.08	1.39	12.72	12.69	10.16	10.14
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	30011.8	30002.8	5000	25011.79	25002.84	6.00	6.00
HFO	50776.3	50675.8	5000	45776.32	45675.83	10.16	10.14

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	30007.3	350	0.01	0.07	6.00	ideale Kolbenströmung zu optimal	85.7	14.3
HFO	50726.1	350	0.01	0.07	10.15	ideale Kolbenströmung zu optimal	144.9	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

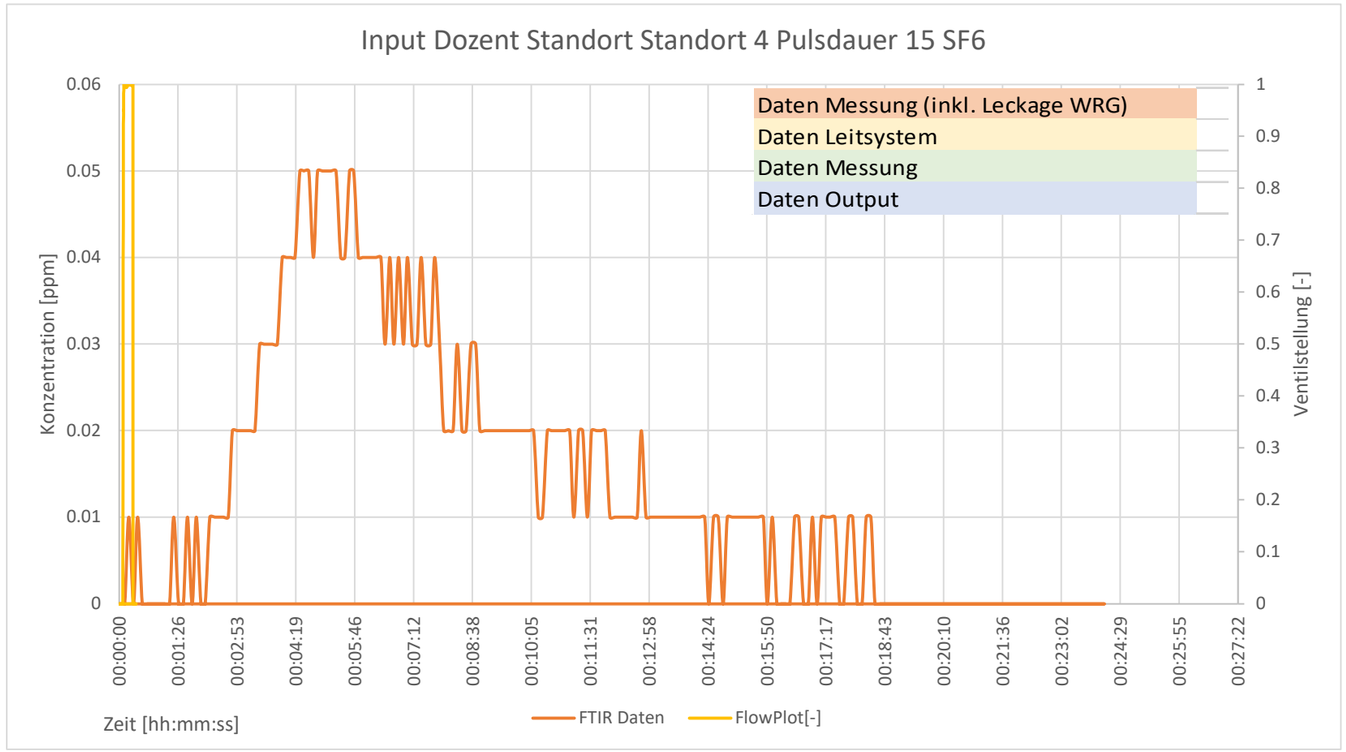
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	35588.7	350	0.01	0.07	7.12	ideale Kolbenströmung zu optimal	101.7	14.3
HFO	60161.1	350	0.01	0.07	12.03	ideale Kolbenströmung zu optimal	171.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

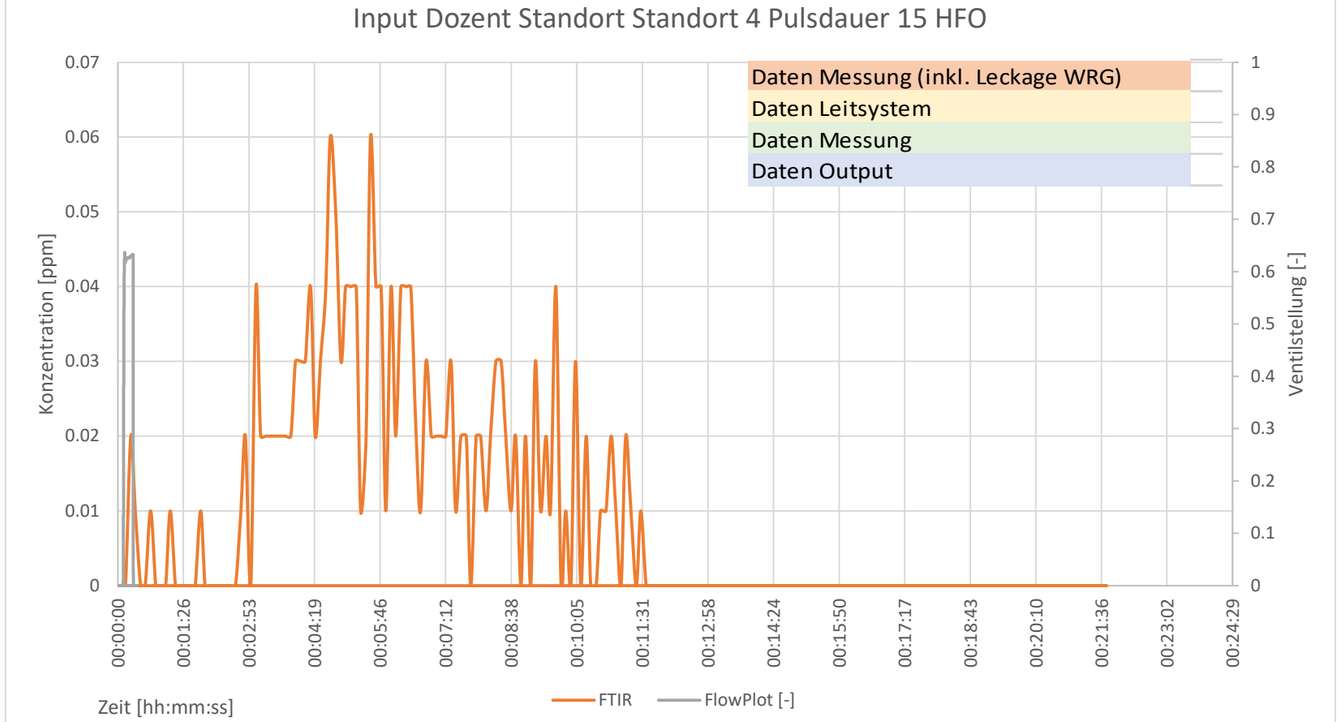
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	10.3	00:04:25	265	206	0.025	0.0500
HFO	10.3	00:04:40	280	182	0.025	0.0566

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	17:59:49	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.01	[g]
Antwort	0.12	[g]
Volumenstrom Messung	30007	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	35589	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	6.00	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	7.12	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	85.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	101.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	265	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	206	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0500	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	18:02:12	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.79	[g]
Antwort	0.06	[g]
Volumenstrom Messung	50726	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	60161	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	10.15	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	12.03	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	144.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	171.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	280	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	182	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0566	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 4; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 4	30	18:30:43	0	auto	0	auto

	Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 4	30	18:27:50	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.19	0.186
HFO	1.75	0.000369	368.65	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.20	32.45
0.23	47.81

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	10.43	10.42	1.39	9.04	9.03	7.51	7.50
HFO	7.73	7.71	1.39	6.34	6.32	5.56	5.55
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	37530.2	37519.0	5000	32530.19	32518.99	7.51	7.50
HFO	27813.5	27758.4	5000	22813.46	22758.41	5.56	5.55

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	37524.6	350	0.01	0.07	7.50	ideale Kolbenströmung zu optimal	107.2	14.3
HFO	27785.9	350	0.01	0.07	5.56	ideale Kolbenströmung zu optimal	79.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

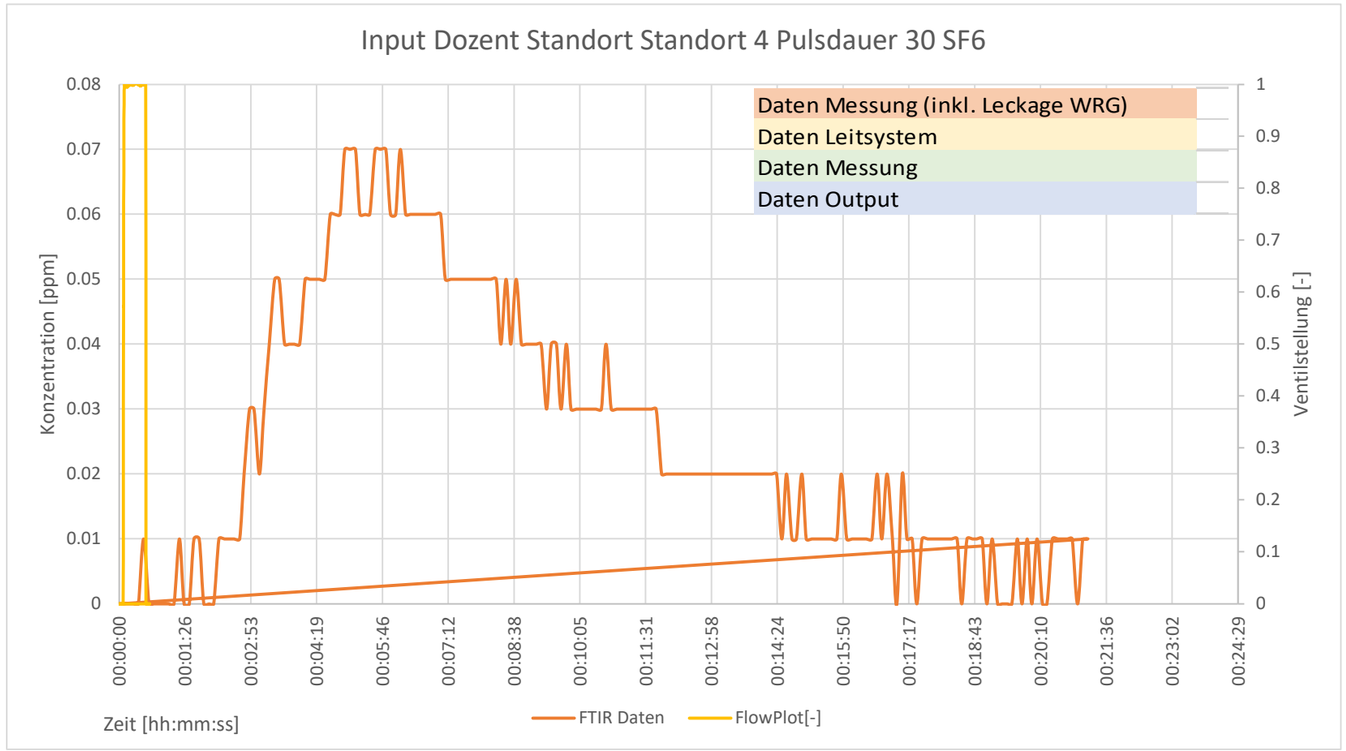
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	44504.2	350	0.01	0.07	8.90	ideale Kolbenströmung zu optimal	127.2	14.3
HFO	32954.1	350	0.01	0.07	6.59	ideale Kolbenströmung zu optimal	94.2	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

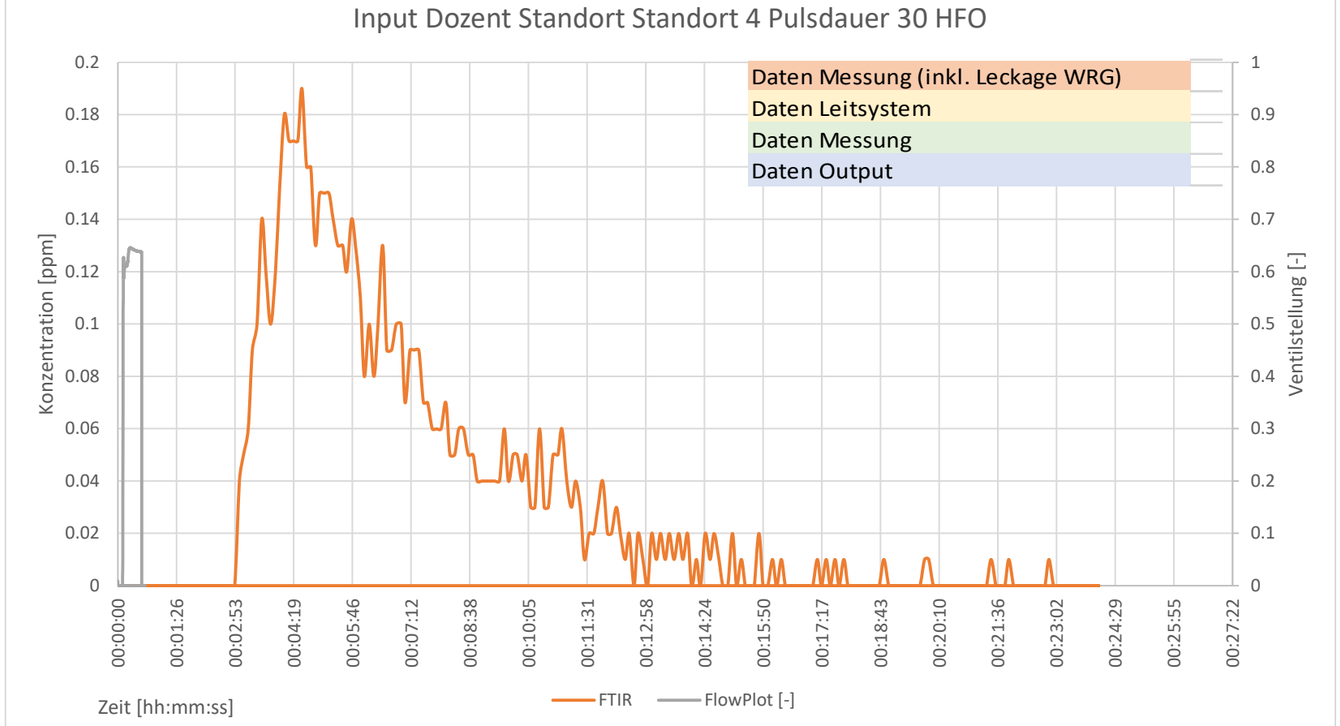
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	10.3	00:04:56	296	277	0.05	0.0372
HFO	10.3	00:04:31	271	192	0.05	0.0536

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	18:30:43	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	0.20	[g]
Volumenstrom Messung	37525	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	44504	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	7.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	8.90	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	107.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	127.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	296	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	277	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0372	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	18:27:50	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.75	[g]
Antwort	0.23	[g]
Volumenstrom Messung	27786	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	32954	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	5.56	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	6.59	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	79.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	94.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	271	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	192	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0536	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Dozent; Standort 4; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 60 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Dozent	Standort 4	60	18:54:59	0	auto	0	auto

Input Dozent Standort Standort 4 Pulsdauer 60 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Dozent	Standort 4	60	18:57:59	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.15	0.000684	684.09	0.186
HFO	3.66	0.000772	772.34	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.59	97.68
0.62	130.29

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	7.01	7.00	1.39	5.62	5.61	5.04	5.04
HFO	5.94	5.93	1.39	4.55	4.54	4.28	4.27
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	25219.9	25212.3	5000	20219.86	20212.34	5.04	5.04
HFO	21382.5	21340.2	5000	16382.52	16340.20	4.28	4.27

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	25216.1	350	0.01	0.07	5.04	ideale Kolbenströmung zu optimal	72.0	14.3
HFO	21361.4	350	0.02	0.07	4.27	ideale Kolbenströmung zu optimal	61.0	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

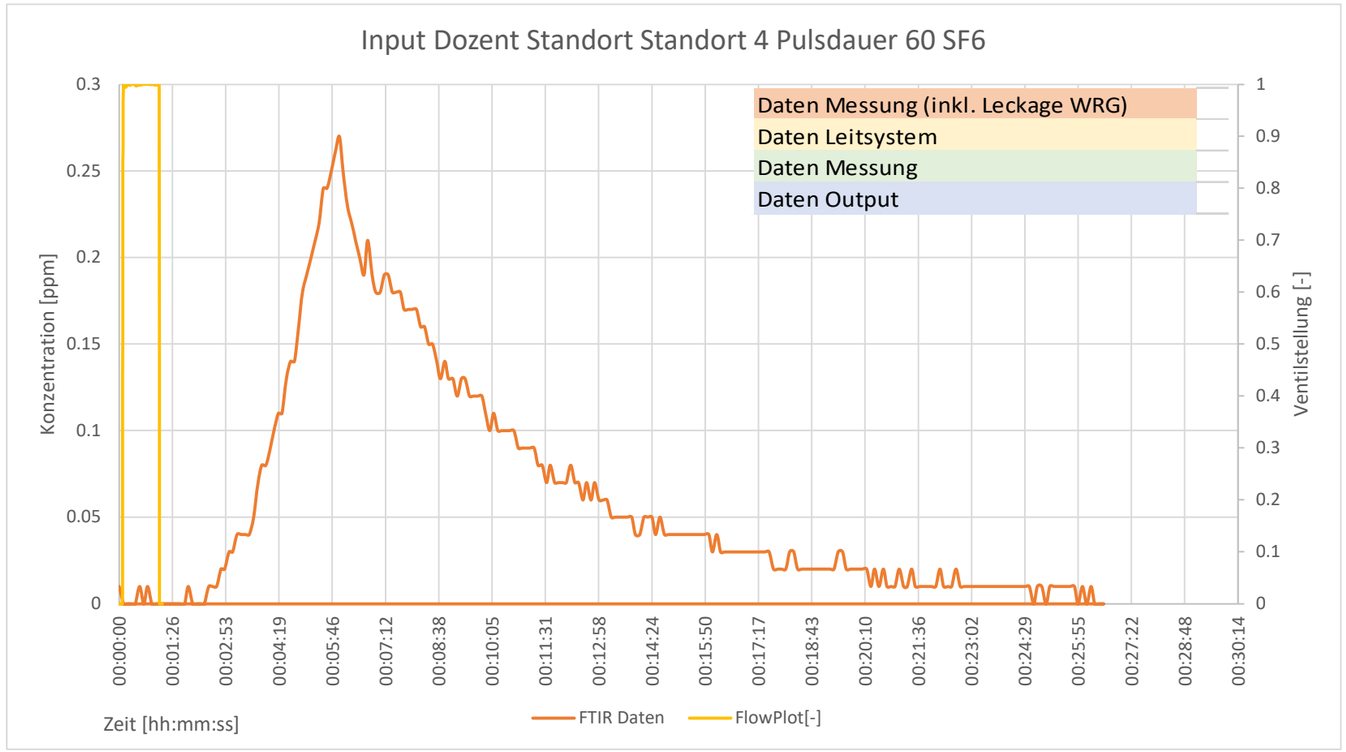
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	29906.3	350	0.01	0.07	5.98	ideale Kolbenströmung zu optimal	85.4	14.3
HFO	25334.6	350	0.01	0.07	5.07	ideale Kolbenströmung zu optimal	72.4	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

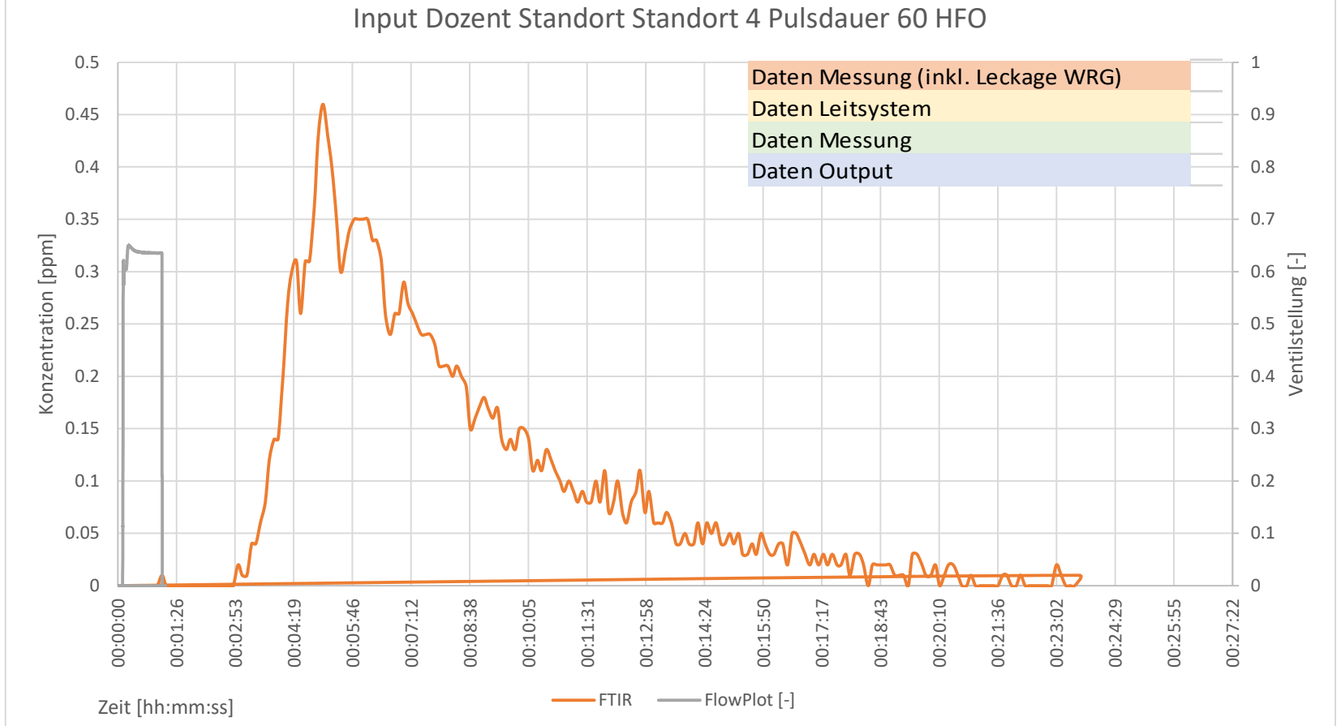
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	10.3	00:05:57	357	258	0.1	0.0399
HFO	10.3	00:05:02	302	223	0.1	0.0462

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	18:54:59	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	0.59	[g]
Volumenstrom Messung	25216	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	29906	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	5.04	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	5.98	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	72.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	85.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	357	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	258	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0399	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Dozent	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	18:57:59	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.66	[g]
Antwort	0.62	[g]
Volumenstrom Messung	21361	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	25335	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.01	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	4.27	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	5.07	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	61.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	72.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	10.3	[m]
Zeit bis zum Peak	302	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	223	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0462	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 1; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 1	15	00:03:26	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 1	15	00:05:42	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	1.01	0.000166	165.92	0.186	0.53	87.47
HFO	0.81	0.000170	170.06	0.186	0.24	50.20

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.90	1.90	1.39	0.51	0.51	1.37	1.37
HFO	3.39	3.39	1.39	2.01	2.00	2.44	2.44
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	6830.8	6828.8	5000	1830.82	1828.78	1.37	1.37
HFO	12219.9	12195.7	5000	7219.88	7195.69	2.44	2.44

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6829.8	350	0.05	0.07	1.37	ideale Kolbenströmung zu optimal	19.5	14.3
HFO	12207.8	350	0.03	0.07	2.44	ideale Kolbenströmung zu optimal	34.9	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

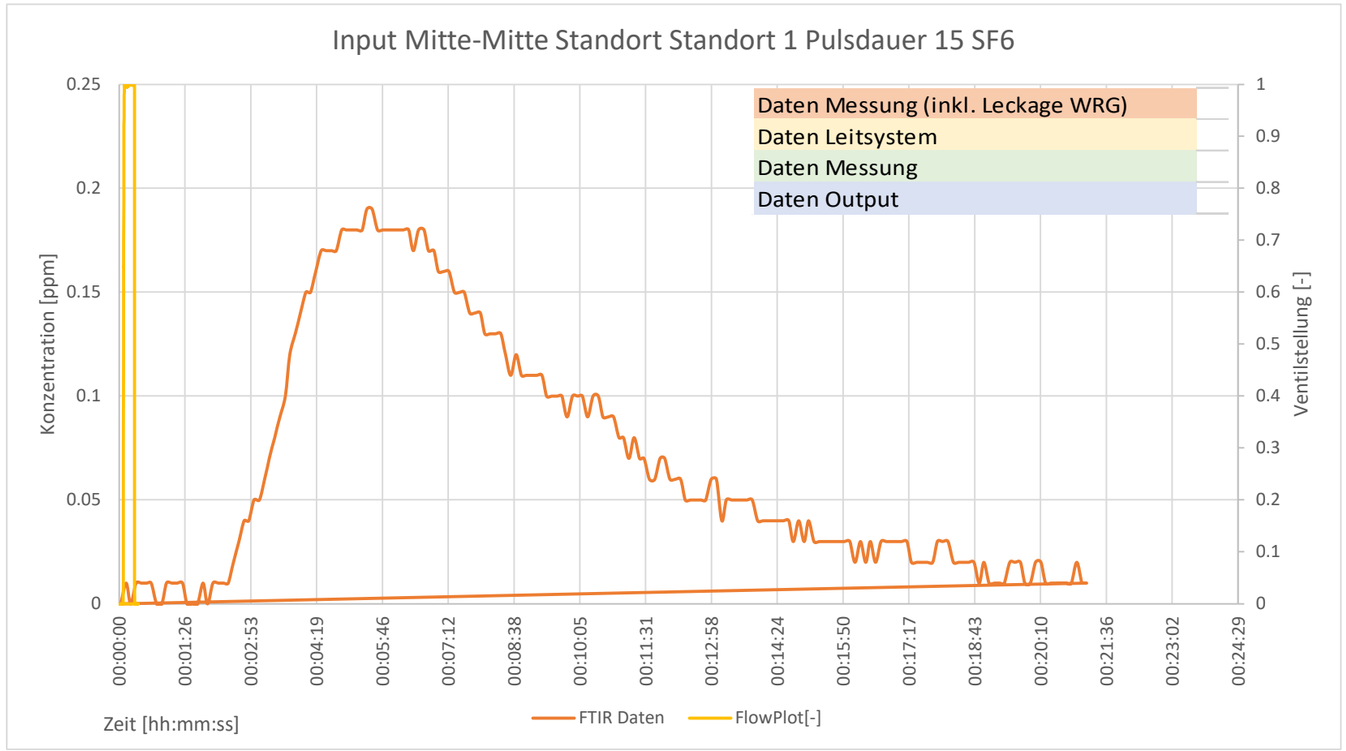
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	8100.1	350	0.04	0.07	1.62	ideale Kolbenströmung zu optimal	23.1	14.3
HFO	14478.4	350	0.02	0.07	2.90	ideale Kolbenströmung zu optimal	41.4	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

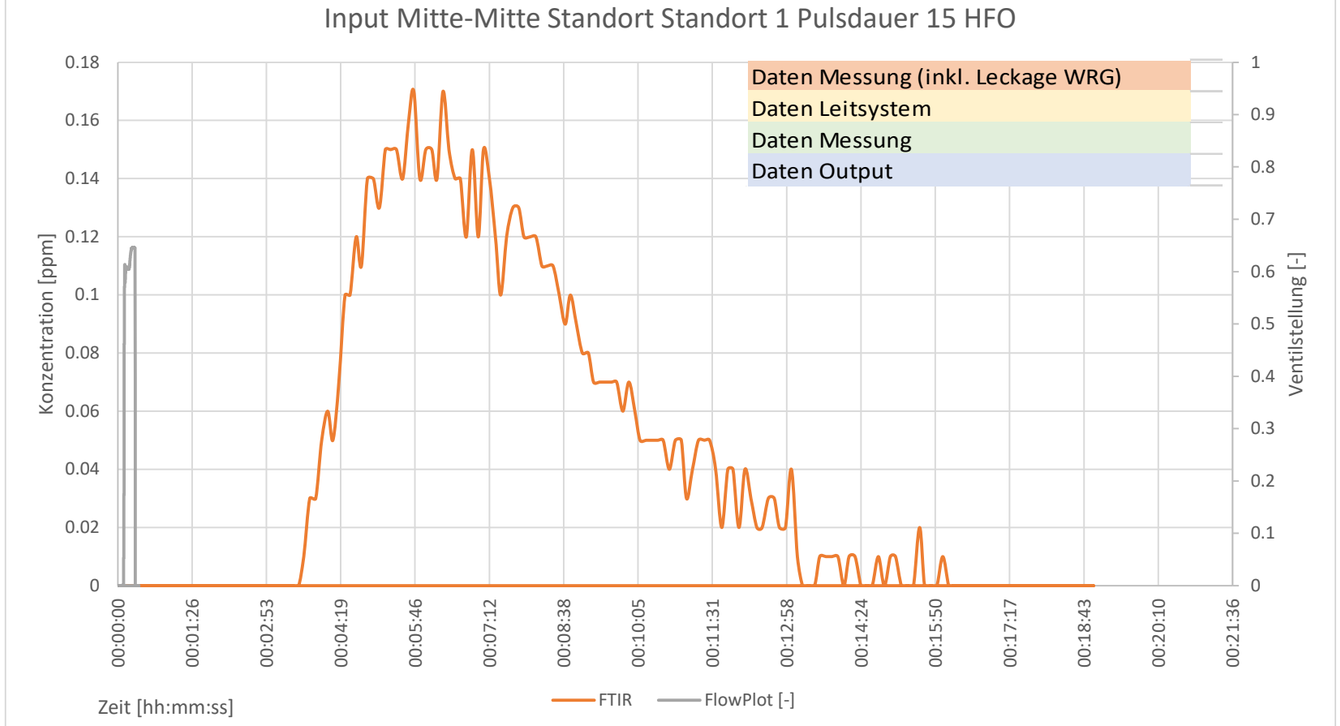
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	4.75	00:05:25	325	157	0.025	0.0303
HFO	4.75	00:05:44	344	223	0.025	0.0213

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	00:03:26	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.01	[g]
Antwort	0.53	[g]
Volumenstrom Messung	6830	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	8100	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.37	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.62	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	19.5	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	23.1	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	325	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	157	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0303	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	00:05:42	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.81	[g]
Antwort	0.24	[g]
Volumenstrom Messung	12208	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	14478	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.03	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.02	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	2.44	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	2.90	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	34.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	41.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	344	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	223	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0213	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 1; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 1	30	00:28:46	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 1	30	00:26:33	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.06	0.000339	338.51	0.186
HFO	1.77	0.000373	372.58	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.85	139.96
0.67	142.53

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	2.42	2.42	1.39	1.03	1.03	1.74	1.74
HFO	2.62	2.61	1.39	1.23	1.23	1.89	1.88
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	8709.6	8707.0	5000	3709.55	3706.96	1.74	1.74
HFO	9429.2	9410.5	5000	4429.18	4410.52	1.89	1.88

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	8708.3	350	0.04	0.07	1.74	ideale Kolbenströmung zu optimal	24.9	14.3
HFO	9419.9	350	0.04	0.07	1.88	ideale Kolbenströmung zu optimal	26.9	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

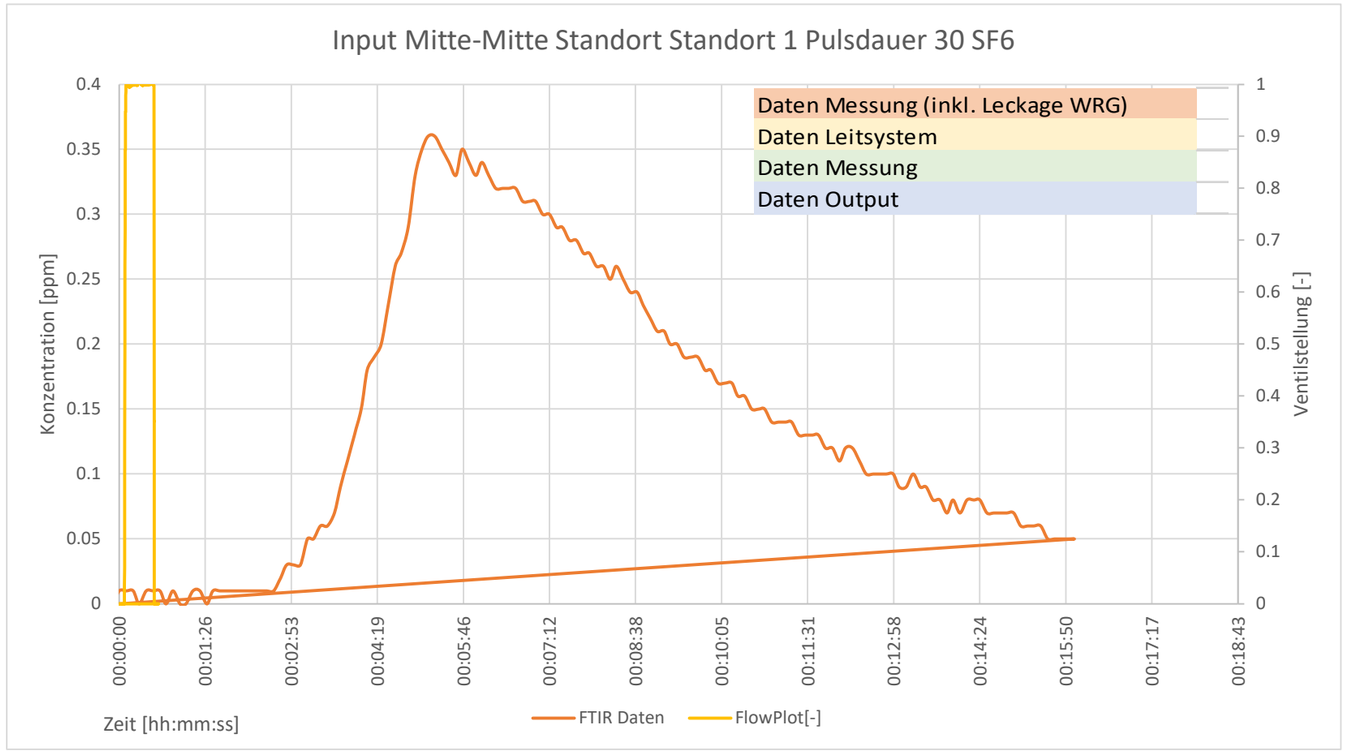
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	10328.0	350	0.03	0.07	2.07	ideale Kolbenströmung zu optimal	29.5	14.3
HFO	11171.9	350	0.03	0.07	2.23	ideale Kolbenströmung zu optimal	31.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

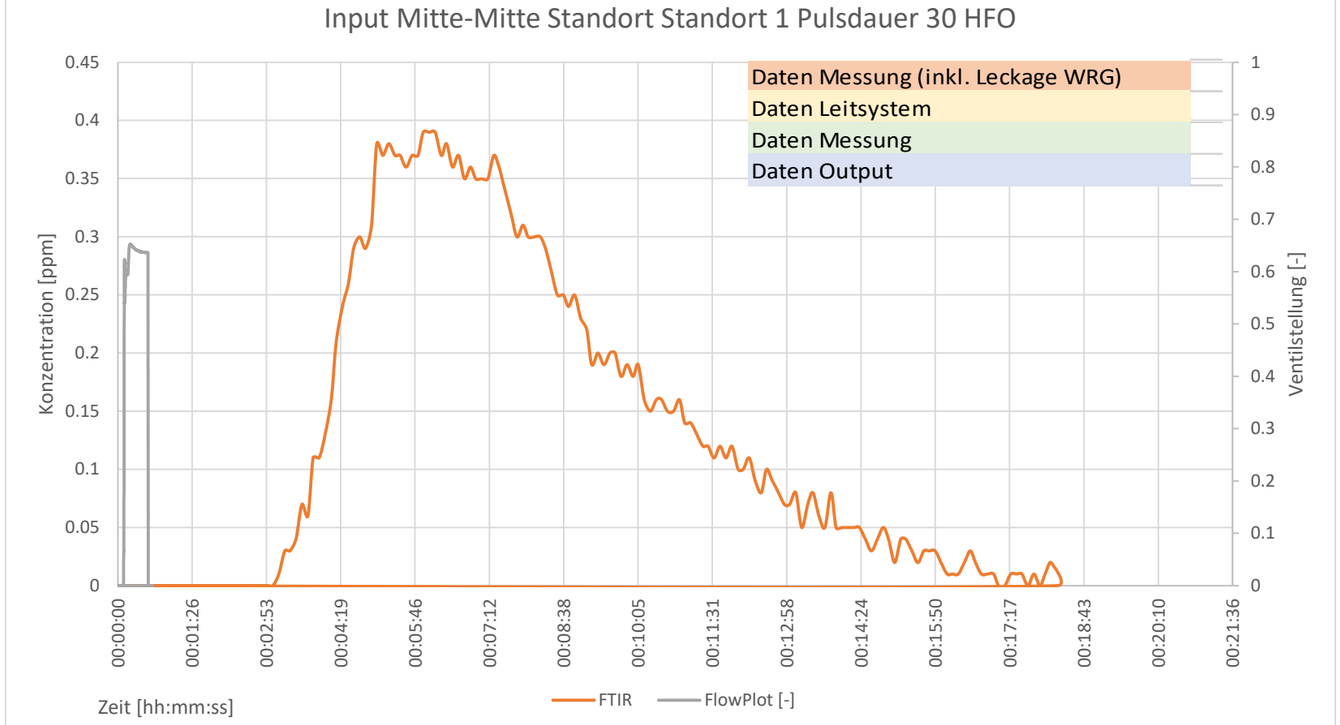
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	4.75	00:05:10	310	202	0.05	0.0235
HFO	4.75	00:05:55	355	214	0.05	0.0222

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	00:28:46	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.06	[g]
Antwort	0.85	[g]
Volumenstrom Messung	8708	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	10328	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.03	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.74	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	2.07	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	24.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	29.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	310	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	202	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0235	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	00:26:33	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	0.67	[g]
Volumenstrom Messung	9420	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	11172	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.03	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.88	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	2.23	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	26.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	31.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	355	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	214	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0222	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 1; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 1	60	00:47:35	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 1 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 1	60	00:50:02	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.15	0.000684	684.13	0.186
HFO	3.67	0.000775	774.96	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
2.13	351.13
1.55	327.40

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.95	1.95	1.39	0.56	0.56	1.40	1.40
HFO	2.37	2.37	1.39	0.98	0.98	1.71	1.70
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	7016.2	7014.1	5000	2016.18	2014.09	1.40	1.40
HFO	8538.1	8521.2	5000	3538.13	3521.23	1.71	1.70

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	7015.1	350	0.05	0.07	1.40	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.0	14.3
HFO	8529.7	350	0.04	0.07	1.71	ideale Kolbenströmung zu optimal	24.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

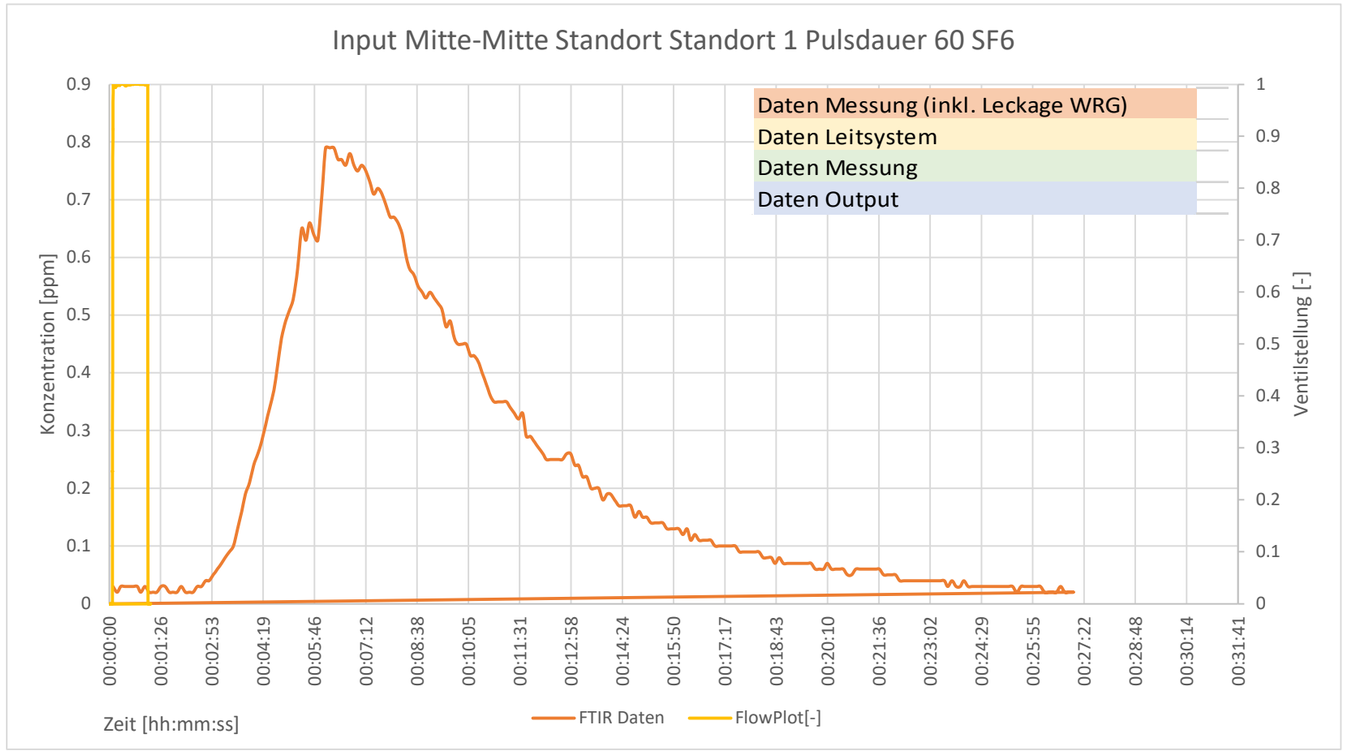
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	8320.0	350	0.04	0.07	1.66	ideale Kolbenströmung zu optimal	23.8	14.3
HFO	10116.2	350	0.03	0.07	2.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	28.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

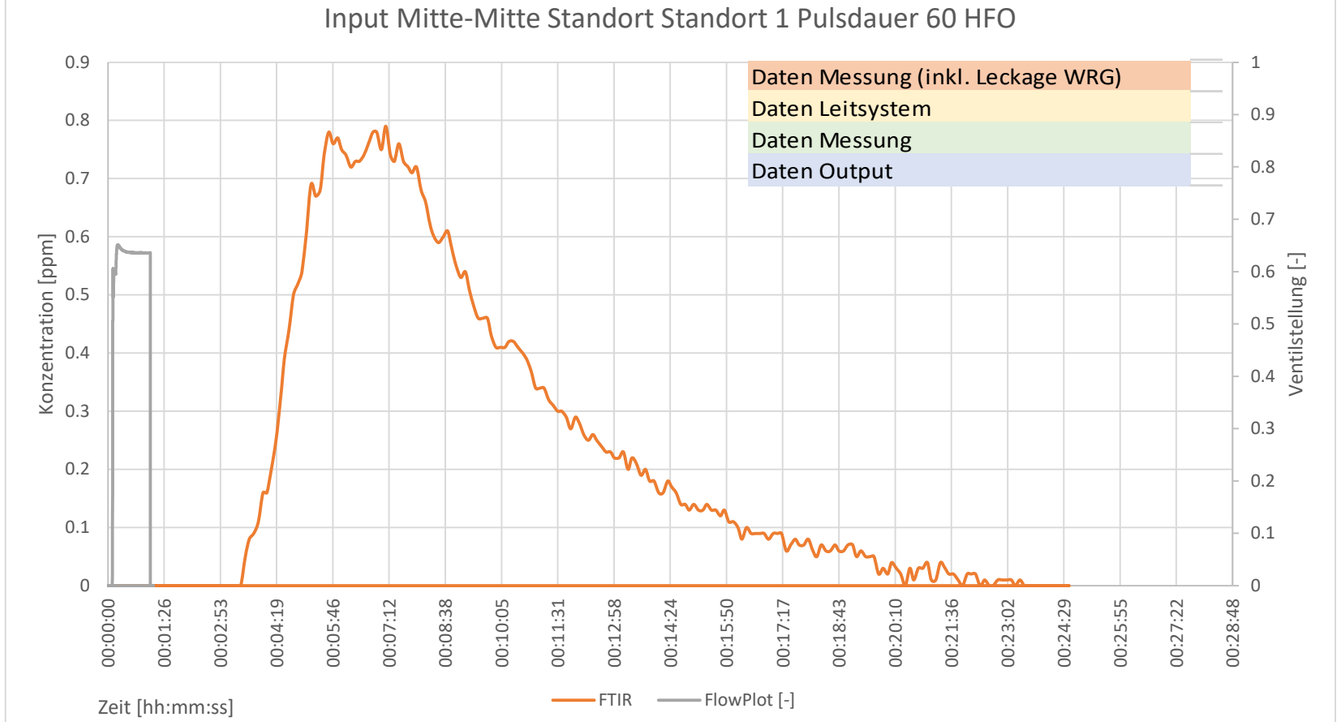
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	4.75	00:06:04	364	216	0.1	0.0220
HFO	4.75	00:07:07	427	231	0.1	0.0206

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	00:47:35	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	2.13	[g]
Volumenstrom Messung	7015	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	8320	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.40	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.66	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	20.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	23.8	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	364	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	216	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0220	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	00:50:02	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.67	[g]
Antwort	1.55	[g]
Volumenstrom Messung	8530	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	10116	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.03	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.71	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	2.02	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	24.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	28.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	4.75	[m]
Zeit bis zum Peak	427	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	231	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0206	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 2; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 2	15	22:39:41	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 2	15	22:37:57	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.01	0.000166	165.95	0.186
HFO	0.80	0.000169	168.72	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
1.10	181.00
1.15	243.32

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.92	0.92	1.39	-0.47	-0.47	0.66	0.66
HFO	0.69	0.69	1.39	-0.69	-0.70	0.50	0.50
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	3301.7	3300.7	5000	-1698.32	-1699.31	0.66	0.66
HFO	2501.2	2496.3	5000	-2498.76	-2503.71	0.50	0.50

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3301.2	350	0.11	0.07	0.66	Verdrängungslüftung	9.4	14.3
HFO	2498.8	350	0.14	0.07	0.50	Kurzschlussströmung	7.1	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

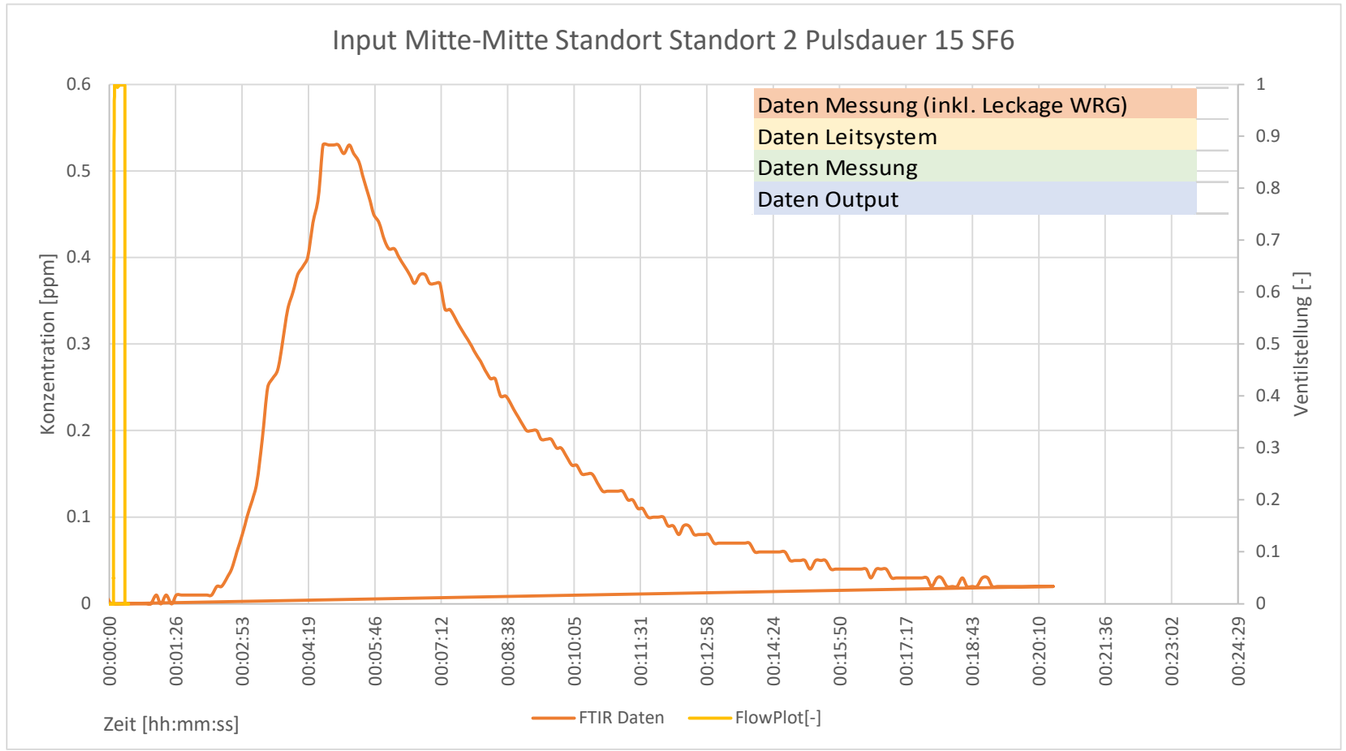
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3915.2	350	0.09	0.07	0.78	Verdrängungslüftung	11.2	14.3
HFO	2963.5	350	0.12	0.07	0.59	Verdrängungslüftung	8.5	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

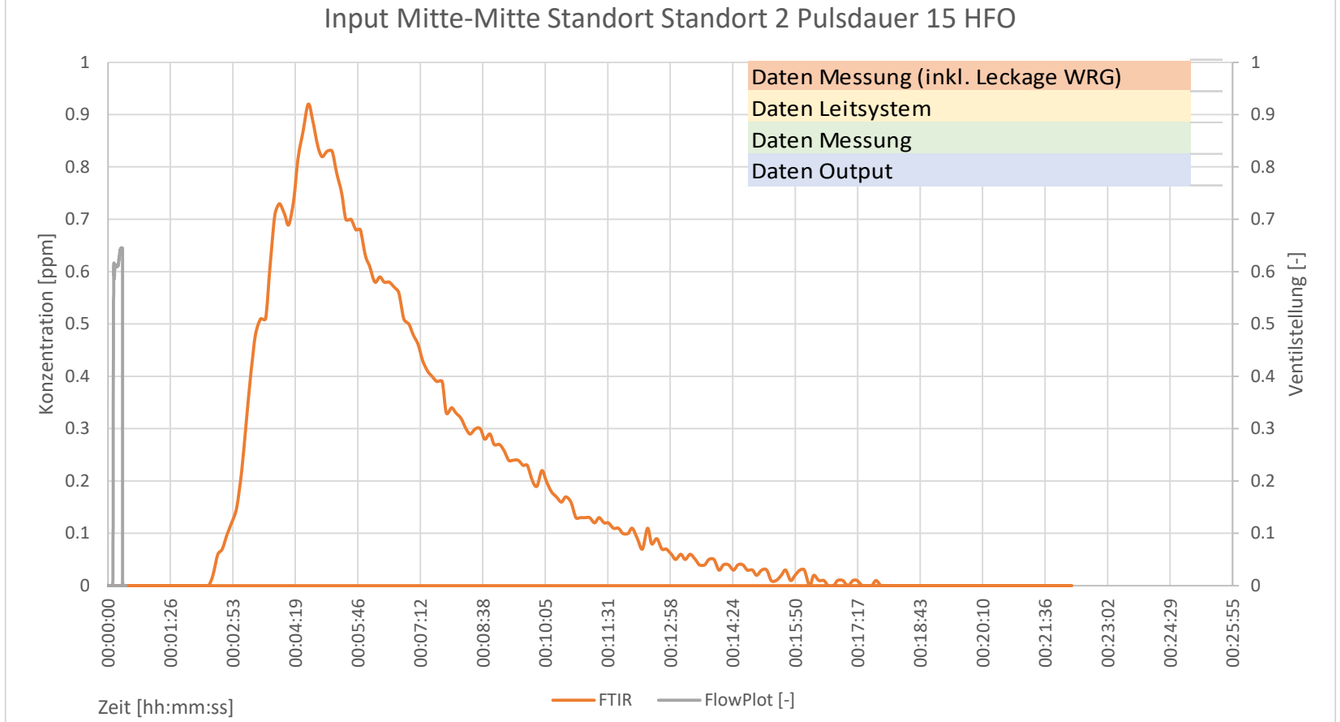
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	2.5	00:04:38	278	153	0.025	0.0163
HFO	2.5	00:04:37	277	152	0.025	0.0164

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	22:39:41	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.01	[g]
Antwort	1.10	[g]
Volumenstrom Messung	3301	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	3915	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.11	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.09	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.66	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.78	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	9.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	11.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	278	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	153	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0163	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	22:37:57	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.80	[g]
Antwort	1.15	[g]
Volumenstrom Messung	2499	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2964	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.14	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.59	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	7.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	277	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	152	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0164	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 2; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 2	30	23:02:00	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 2	30	23:04:37	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	2.05	0.000338	338.38	0.186	2.94	484.30
HFO	1.77	0.000373	373.09	0.186	1.98	418.02

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.70	0.70	1.39	-0.69	-0.69	0.50	0.50
HFO	0.89	0.89	1.39	-0.49	-0.50	0.64	0.64
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	2516.1	2515.3	5000	-2483.95	-2484.70	0.50	0.50
HFO	3219.4	3213.0	5000	-1780.60	-1786.97	0.64	0.64

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2515.7	350	0.14	0.07	0.50	Verdrängungslüftung	7.2	14.3
HFO	3216.2	350	0.11	0.07	0.64	Verdrängungslüftung	9.2	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

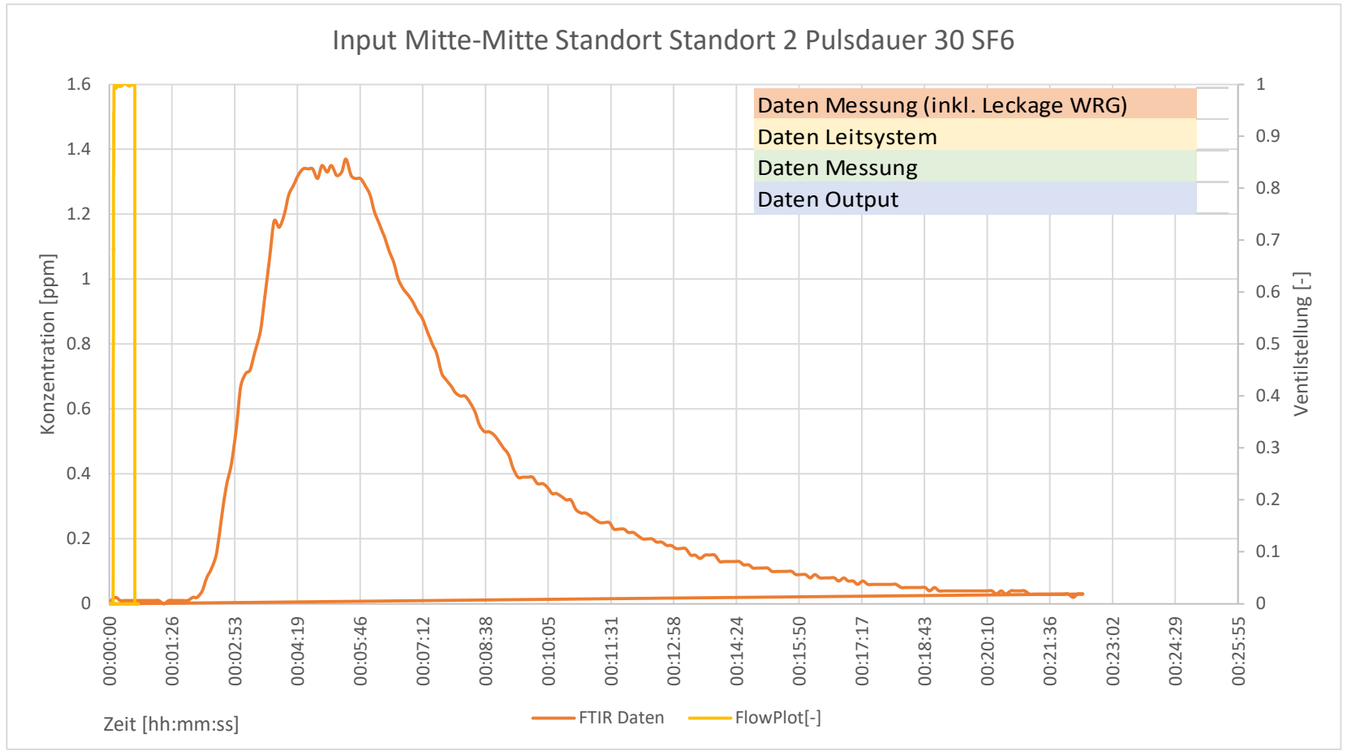
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2983.6	350	0.12	0.07	0.60	Verdrängungslüftung	8.5	14.3
HFO	3814.4	350	0.09	0.07	0.76	Verdrängungslüftung	10.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

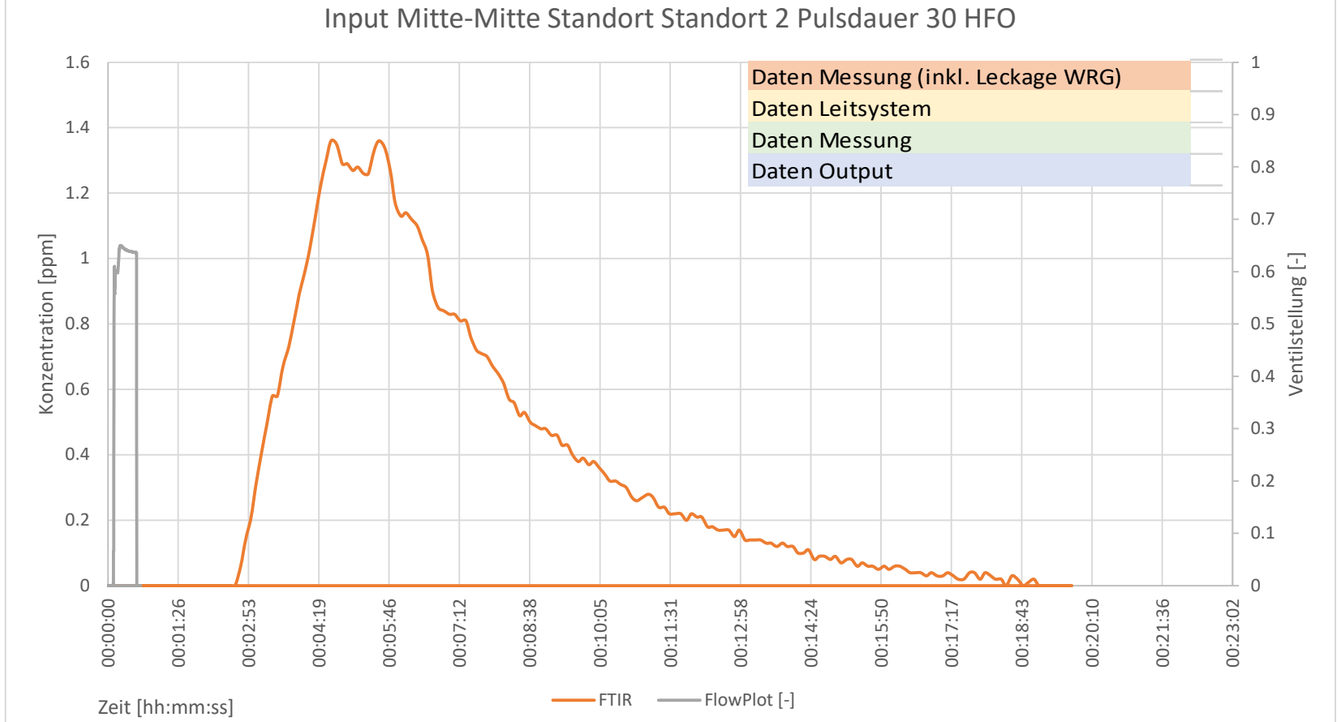
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	2.5	00:05:26	326	134	0.05	0.0187
HFO	2.5	00:04:34	274	163	0.05	0.0153

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	23:02:00	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	2.94	[g]
Volumenstrom Messung	2516	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2984	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.14	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.60	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	7.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	326	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	134	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0187	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	23:04:37	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	1.98	[g]
Volumenstrom Messung	3216	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	3814	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.11	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.09	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.64	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.76	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	9.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	10.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	274	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	163	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0153	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 2; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 2	60	23:29:22	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 2 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 2	60	23:26:55	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	4.15	0.000684	684.14	0.186	4.87	802.15
HFO	3.67	0.000775	775.29	0.186	4.06	857.76

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.85	0.85	1.39	-0.54	-0.54	0.61	0.61
HFO	0.91	0.90	1.39	-0.48	-0.49	0.65	0.65
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	3071.3	3070.4	5000	-1928.69	-1929.61	0.61	0.61
HFO	3260.3	3253.9	5000	-1739.66	-1746.11	0.65	0.65

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3070.8	350	0.11	0.07	0.61	Verdrängungslüftung	8.8	14.3
HFO	3257.1	350	0.11	0.07	0.65	Verdrängungslüftung	9.3	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

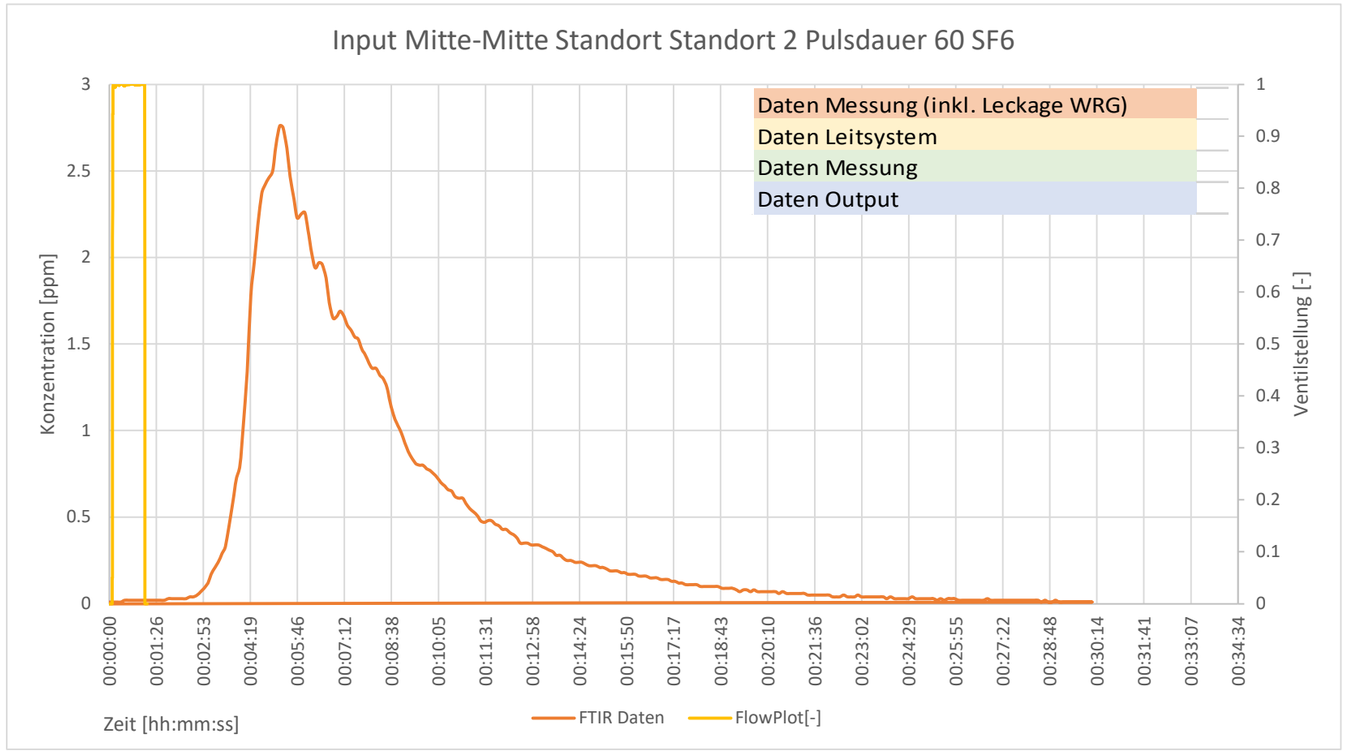
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3642.0	350	0.10	0.07	0.73	Verdrängungslüftung	10.4	14.3
HFO	3862.9	350	0.09	0.07	0.77	Verdrängungslüftung	11.0	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

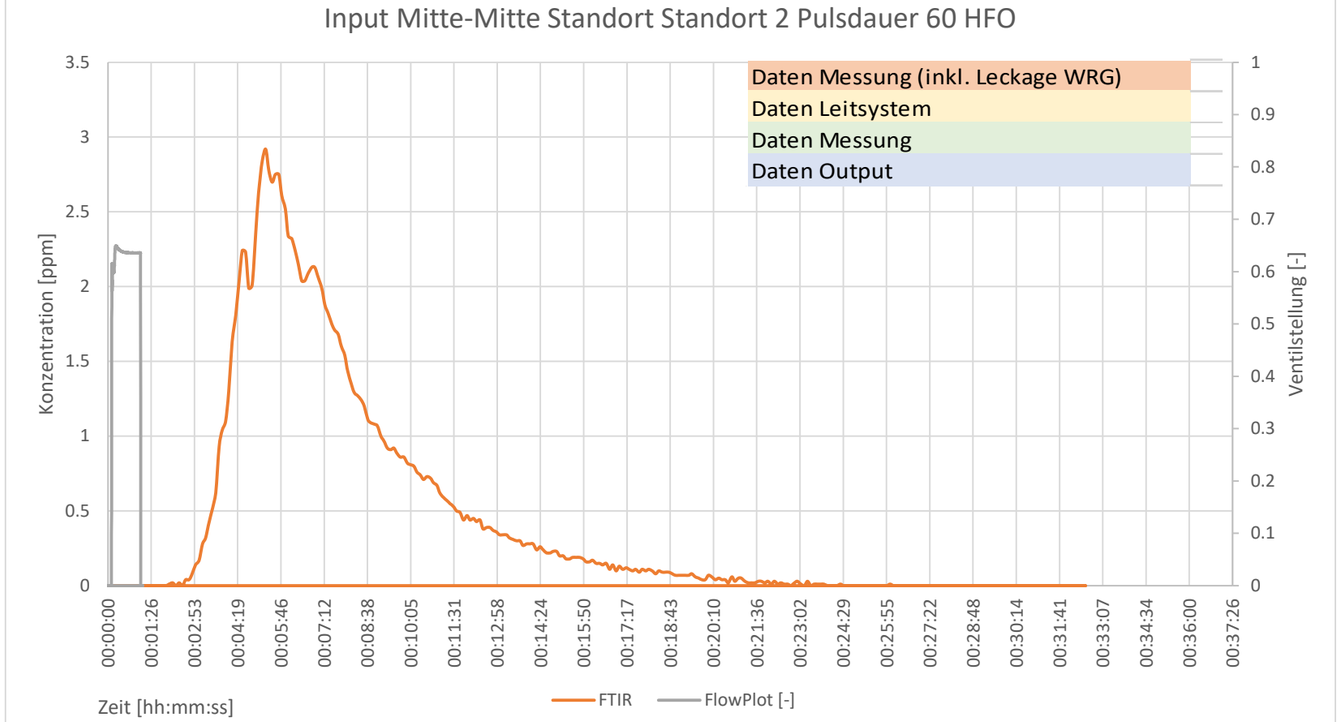
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	2.5	00:05:13	313	181	0.1	0.0138
HFO	2.5	00:05:15	315	175	0.1	0.0143

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	23:29:22	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	4.87	[g]
Volumenstrom Messung	3071	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	3642	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.11	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.10	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.61	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.73	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	8.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	10.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	313	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	181	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0138	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 2	Mitte fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	23:26:55	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.67	[g]
Antwort	4.06	[g]
Volumenstrom Messung	3257	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	3863	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.11	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.09	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.65	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.77	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	9.3	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	11.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	2.5	[m]
Zeit bis zum Peak	315	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	175	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0143	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 3; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 3	15	20:54:21	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 3	15	20:56:02	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	1.00	0.000165	165.49	0.186	1.11	183.02
HFO	0.81	0.000170	170.49	0.186	1.16	246.03

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.90	0.90	1.39	-0.48	-0.48	0.65	0.65
HFO	0.69	0.69	1.39	-0.69	-0.70	0.50	0.50
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	3256.3	3255.3	5000	-1743.75	-1744.72	0.65	0.65
HFO	2499.6	2494.6	5000	-2500.43	-2505.38	0.50	0.50

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3255.8	350	0.11	0.07	0.65	Verdrängungslüftung	9.3	14.3
HFO	2497.1	350	0.14	0.07	0.50	Kurzschlussströmung	7.1	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

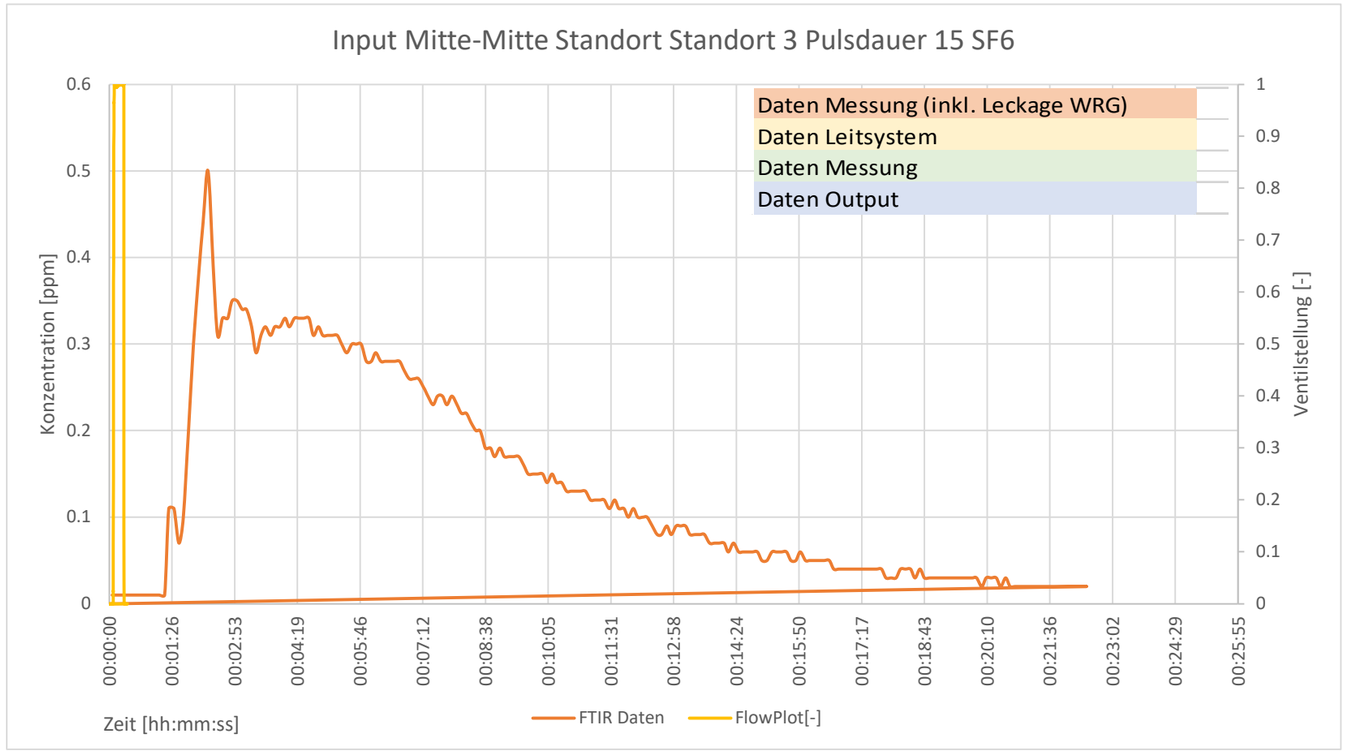
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	3861.3	350	0.09	0.07	0.77	Verdrängungslüftung	11.0	14.3
HFO	2961.6	350	0.12	0.07	0.59	Verdrängungslüftung	8.5	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

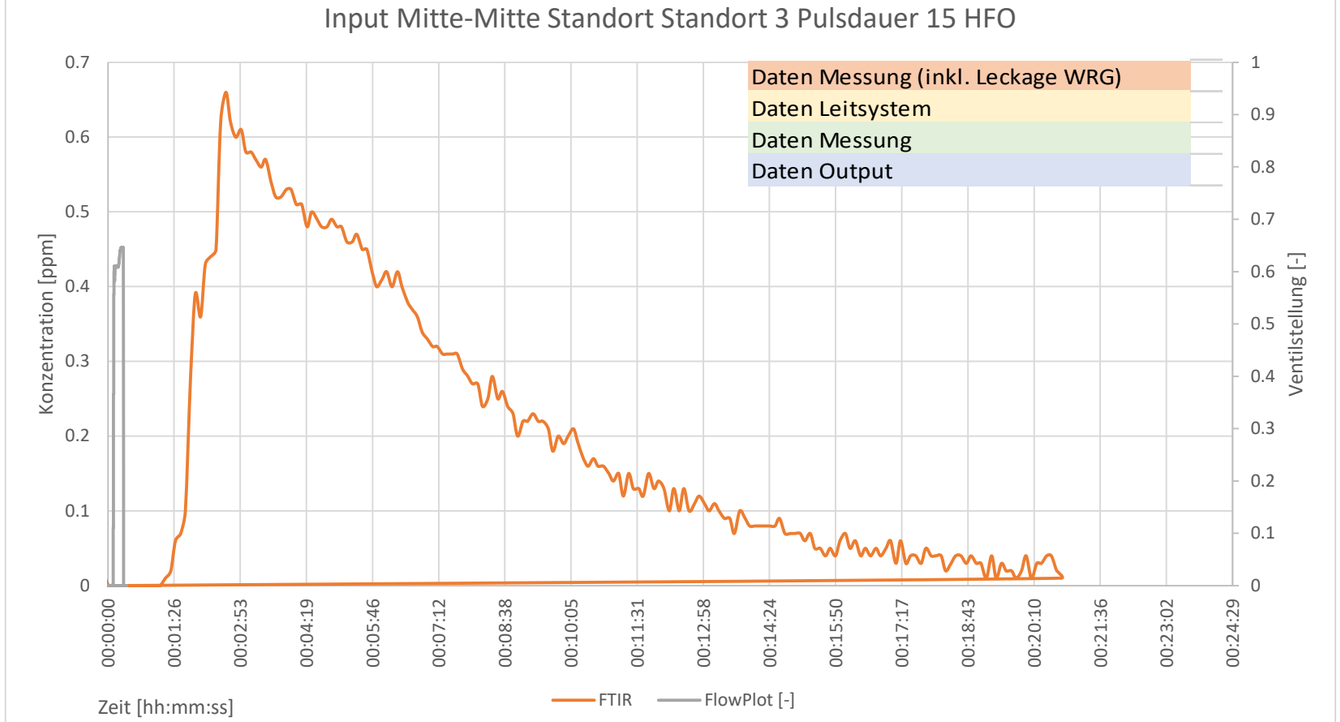
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.9	00:02:16	136	82	0.025	0.0476
HFO	3.9	00:02:34	154	88	0.025	0.0443

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	20:54:21	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	1.11	[g]
Volumenstrom Messung	3256	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	3861	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.11	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.09	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.65	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.77	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	9.3	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	11.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	136	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	82	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0476	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	20:56:02	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.81	[g]
Antwort	1.16	[g]
Volumenstrom Messung	2497	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2962	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.14	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.59	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	7.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	154	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	88	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0443	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 3; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 3	30	21:21:03	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 3	30	21:18:53	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	2.06	0.000339	338.65	0.186	2.96	487.76
HFO	1.77	0.000373	372.94	0.186	2.69	568.25

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.69	0.69	1.39	-0.69	-0.69	0.50	0.50
HFO	0.66	0.66	1.39	-0.73	-0.73	0.47	0.47
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	2500.2	2499.5	5000	-2499.80	-2500.55	0.50	0.50
HFO	2367.3	2362.6	5000	-2632.67	-2637.35	0.47	0.47

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2499.8	350	0.14	0.07	0.50	Kurzschlussströmung	7.1	14.3
HFO	2365.0	350	0.15	0.07	0.47	Kurzschlussströmung	6.8	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

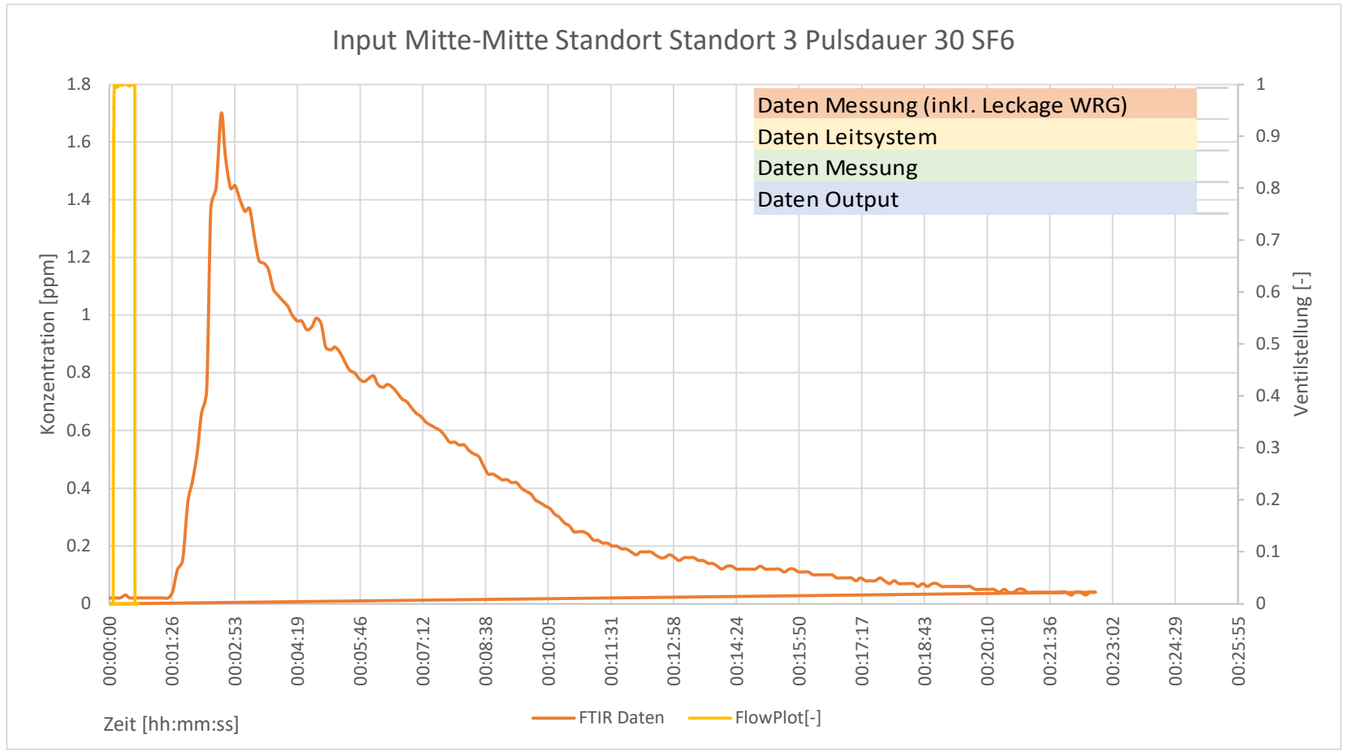
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2964.8	350	0.12	0.07	0.59	Verdrängungslüftung	8.5	14.3
HFO	2804.9	350	0.12	0.07	0.56	Verdrängungslüftung	8.0	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

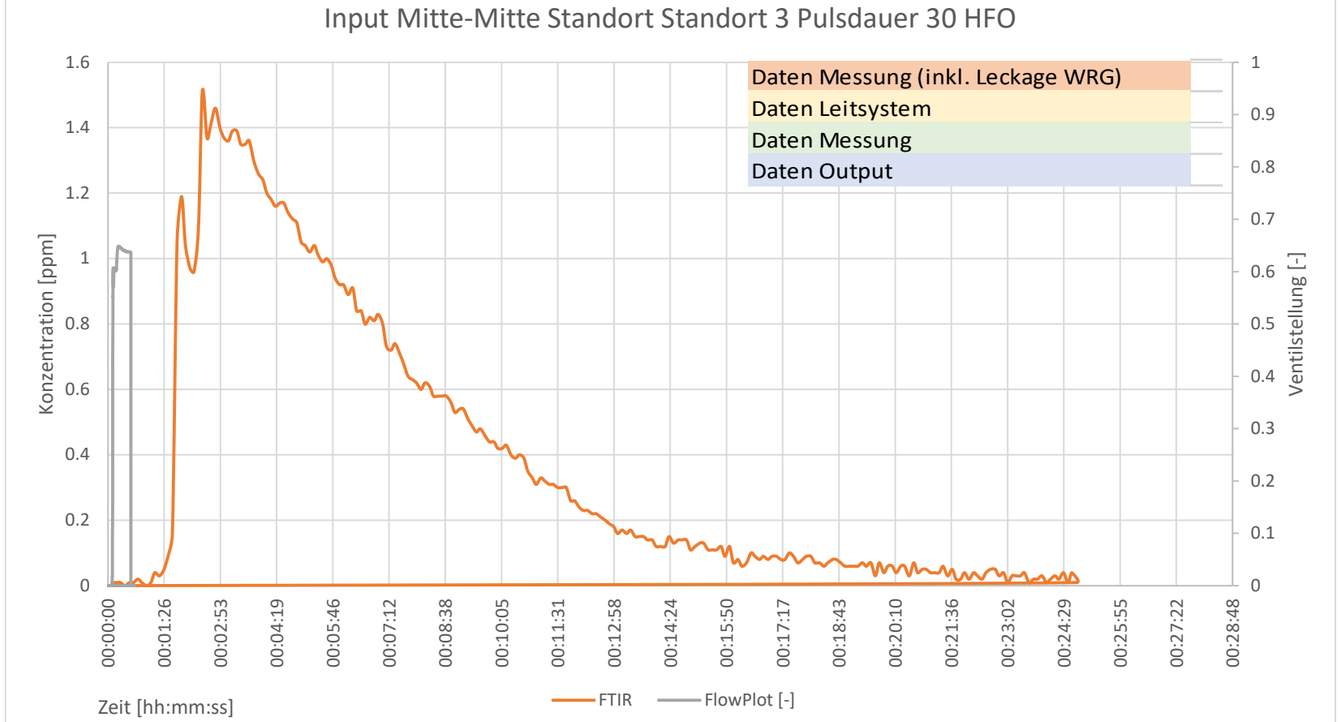
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.9	00:02:34	154	94	0.05	0.0415
HFO	3.9	00:02:25	145	92	0.05	0.0424

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	21:21:03	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.06	[g]
Antwort	2.96	[g]
Volumenstrom Messung	2500	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2965	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.14	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.50	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.59	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	7.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	154	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	94	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0415	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	21:18:53	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	2.69	[g]
Volumenstrom Messung	2365	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2805	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.15	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.47	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.56	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	6.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	145	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	92	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0424	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 3; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 3	60	21:45:06	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 3 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 3	60	21:47:18	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	4.15	0.000684	684.21	0.186	7.43	1223.59
HFO	3.67	0.000774	774.18	0.186	5.58	1178.72

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.56	0.56	1.39	-0.83	-0.83	0.40	0.40
HFO	0.66	0.66	1.39	-0.73	-0.73	0.47	0.47
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	2013.6	2013.0	5000	-2986.36	-2986.96	0.40	0.40
HFO	2369.2	2364.5	5000	-2630.85	-2635.54	0.47	0.47

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2013.3	350	0.17	0.07	0.40	Kurzschlussströmung	5.8	14.3
HFO	2366.8	350	0.15	0.07	0.47	Kurzschlussströmung	6.8	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

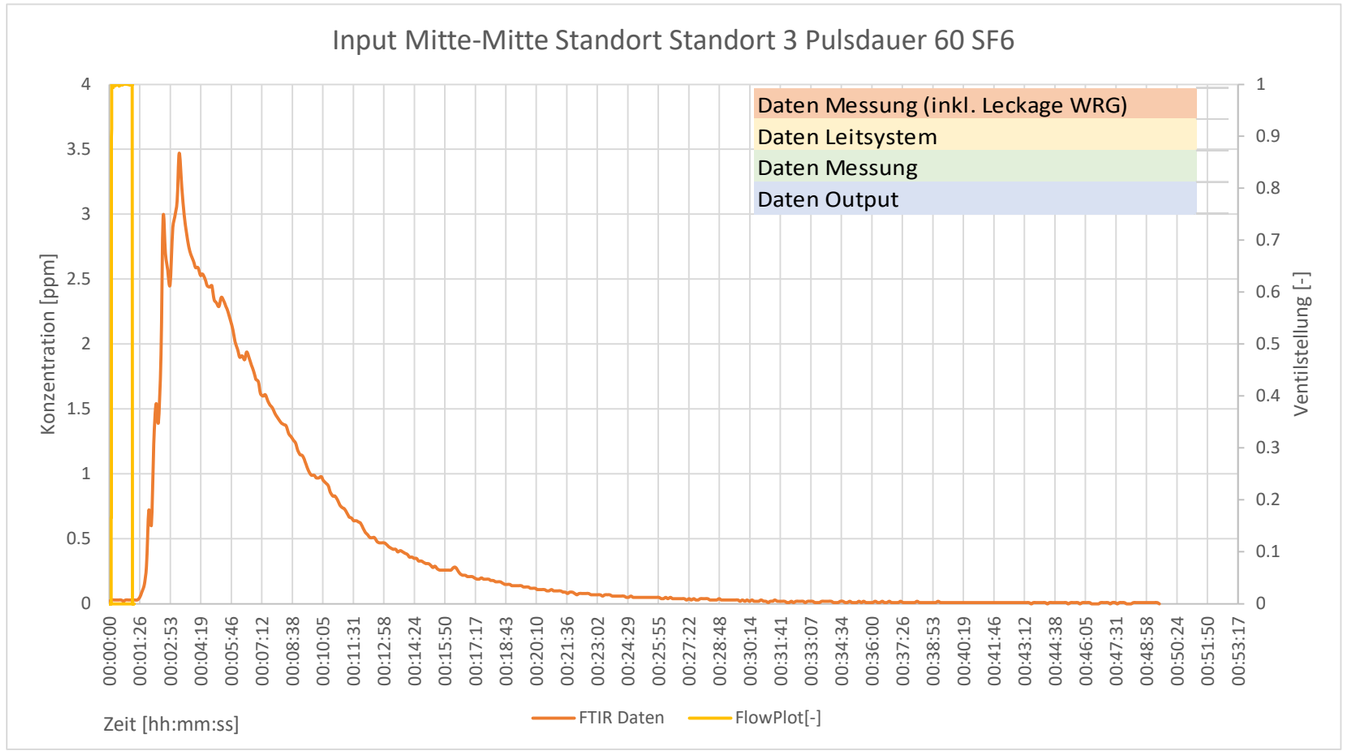
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	2387.8	350	0.15	0.07	0.48	Kurzschlussströmung	6.8	14.3
HFO	2807.0	350	0.12	0.07	0.56	Verdrängungslüftung	8.0	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

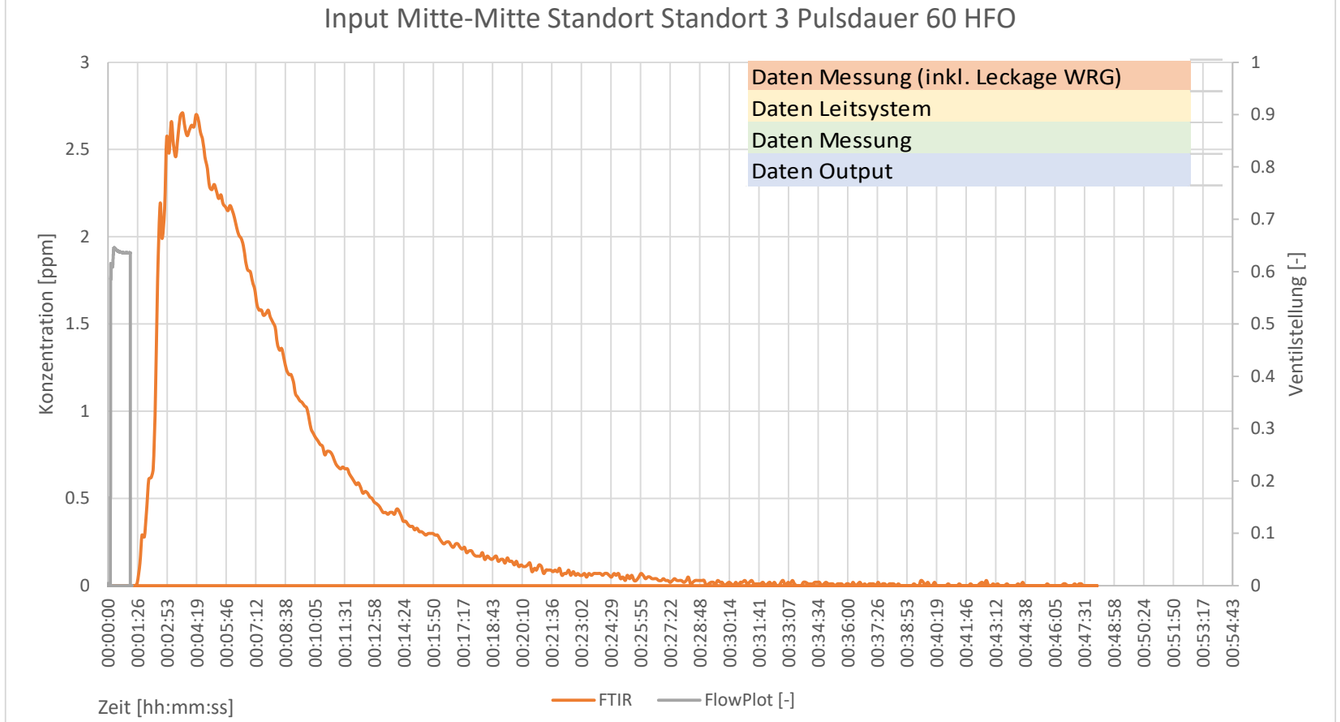
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.9	00:03:18	198	99	0.1	0.0394
HFO	3.9	00:03:38	218	93	0.1	0.0419

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	21:45:06	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.15	[g]
Antwort	7.43	[g]
Volumenstrom Messung	2013	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2388	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.17	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.15	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.40	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.48	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	5.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	6.8	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	198	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	99	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0394	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	21:47:18	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.67	[g]
Antwort	5.58	[g]
Volumenstrom Messung	2367	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	2807	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.15	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.12	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.47	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.56	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Verdrängungslüftung	
Luftwechselrate Messung	6.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	8.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.9	[m]
Zeit bis zum Peak	218	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	93	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0419	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 4; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 4	15	19:26:56	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 4	15	19:24:19	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.01	0.000166	165.90	0.186
HFO	0.81	0.000171	171.08	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
2.32	382.24
1.78	376.35

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.43	0.43	1.39	-0.95	-0.95	0.31	0.31
HFO	0.46	0.45	1.39	-0.93	-0.93	0.33	0.33
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	1563.0	1562.5	5000	-3437.03	-3437.49	0.31	0.31
HFO	1639.7	1636.4	5000	-3360.32	-3363.56	0.33	0.33

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1562.7	350	0.22	0.07	0.31	Kurzschlussströmung	4.5	14.3
HFO	1638.1	350	0.21	0.07	0.33	Kurzschlussströmung	4.7	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

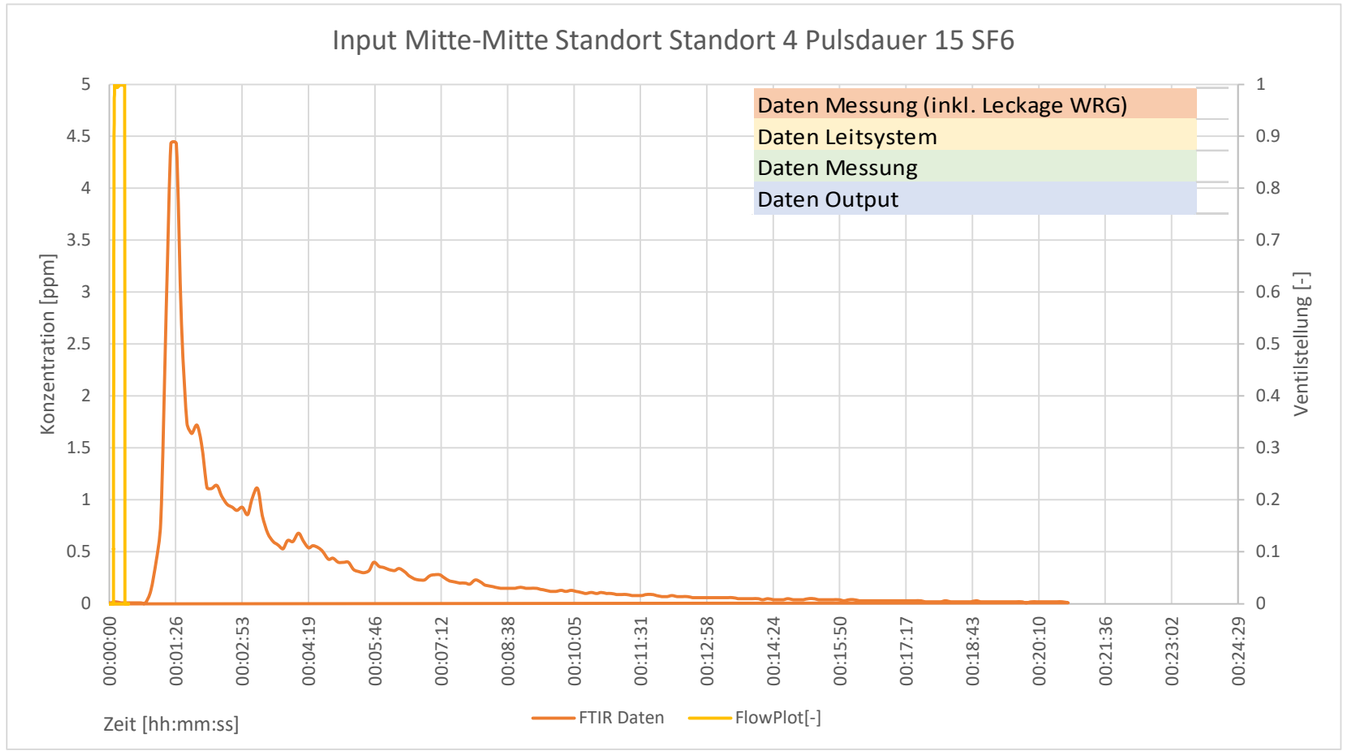
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1853.4	350	0.19	0.07	0.37	Kurzschlussströmung	5.3	14.3
HFO	1942.7	350	0.18	0.07	0.39	Kurzschlussströmung	5.6	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

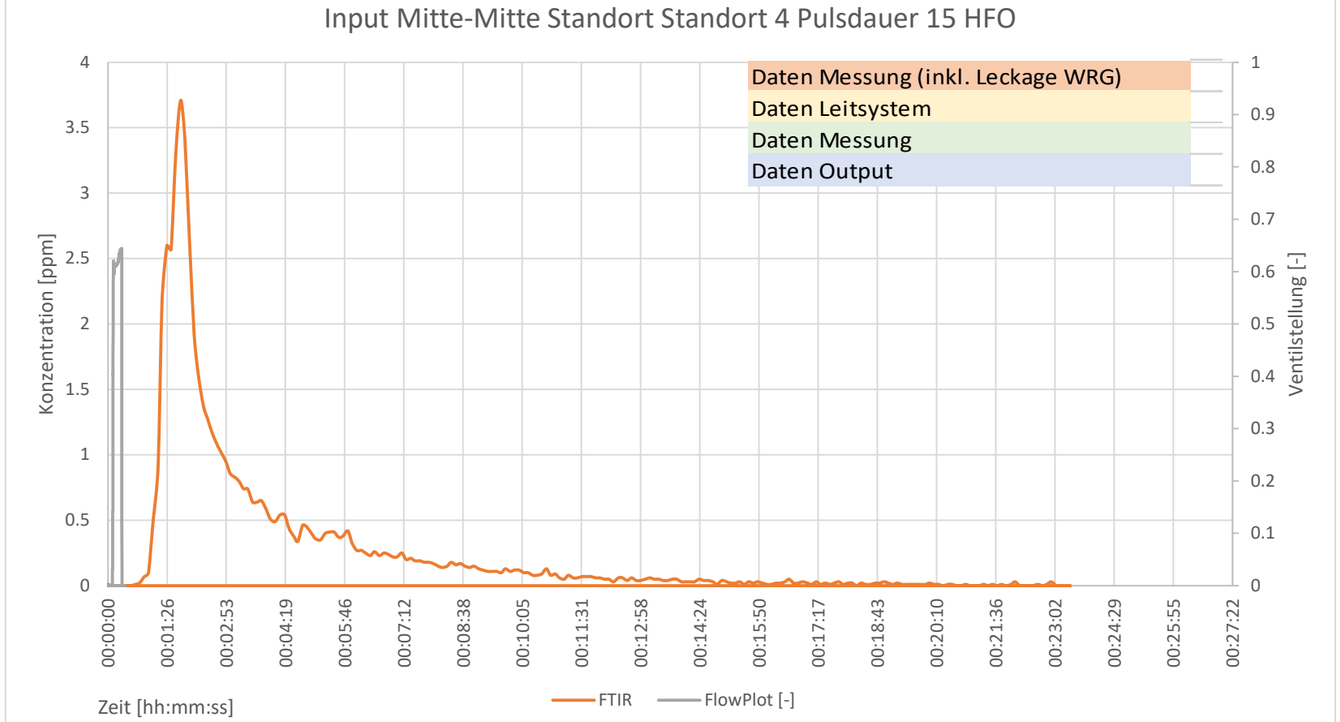
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.8	00:01:20	80	54	0.025	0.0704
HFO	3.8	00:01:46	106	53	0.025	0.0717

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	19:26:56	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.01	[g]
Antwort	2.32	[g]
Volumenstrom Messung	1563	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1853	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.22	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.19	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.31	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.37	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	4.5	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	5.3	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	80	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	54	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0704	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	19:24:19	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.81	[g]
Antwort	1.78	[g]
Volumenstrom Messung	1638	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1943	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.21	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.18	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.33	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.39	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	4.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	5.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	106	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	53	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0717	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 4; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 30 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 4	30	19:49:54	0	auto	0	auto

Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 30 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 4	30	19:51:51	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG	Antwort berechnet mit g	mit ppm
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]	[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
SF6	2.06	0.000339	338.89	0.186	7.39	1218.03
HFO	1.77	0.000374	373.69	0.186	4.79	1013.68

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.28	0.28	1.39	-1.11	-1.11	0.20	0.20
HFO	0.37	0.37	1.39	-1.02	-1.02	0.27	0.27
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	1001.9	1001.6	5000	-3998.08	-3998.37	0.20	0.20
HFO	1329.8	1327.1	5000	-3670.25	-3672.88	0.27	0.27

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1001.8	350	0.35	0.07	0.20	Kurzschlussströmung	2.9	14.3
HFO	1328.4	350	0.26	0.07	0.27	Kurzschlussströmung	3.8	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

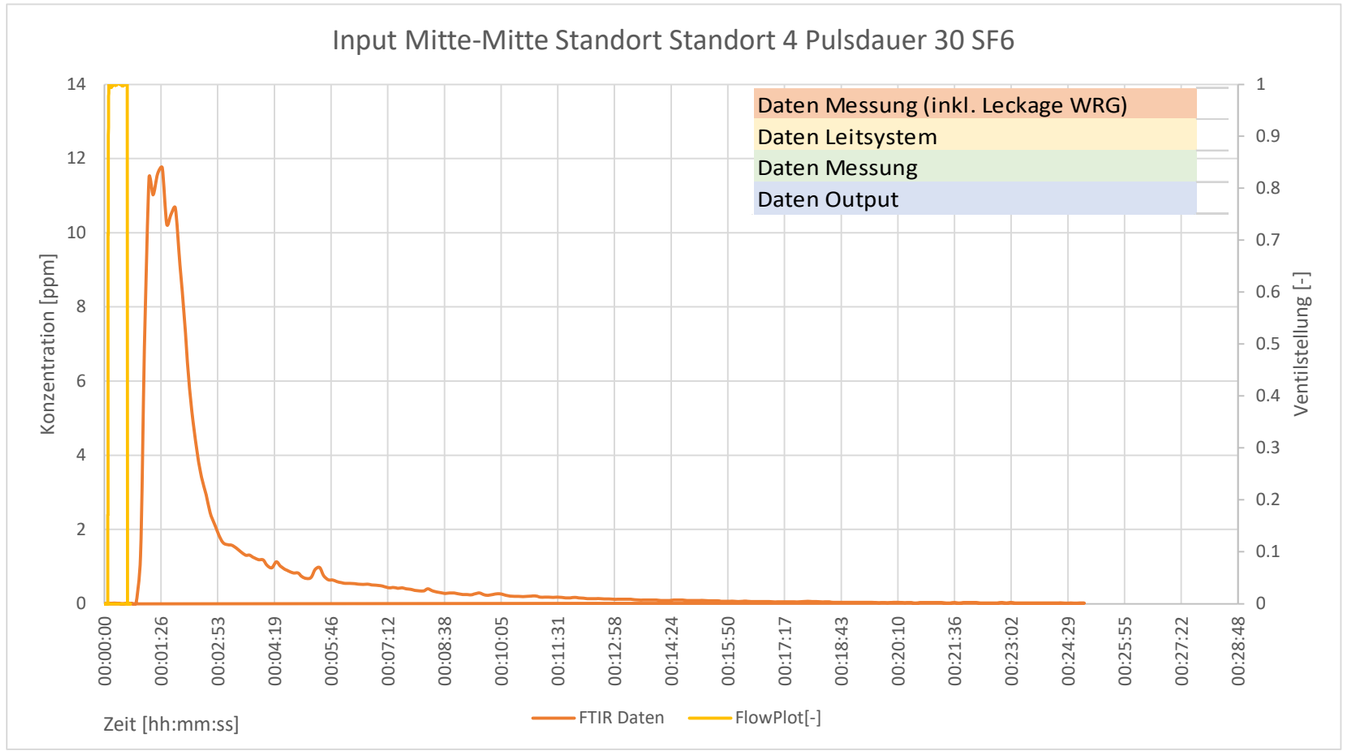
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1188.1	350	0.29	0.07	0.24	Kurzschlussströmung	3.4	14.3
HFO	1575.5	350	0.22	0.07	0.32	Kurzschlussströmung	4.5	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

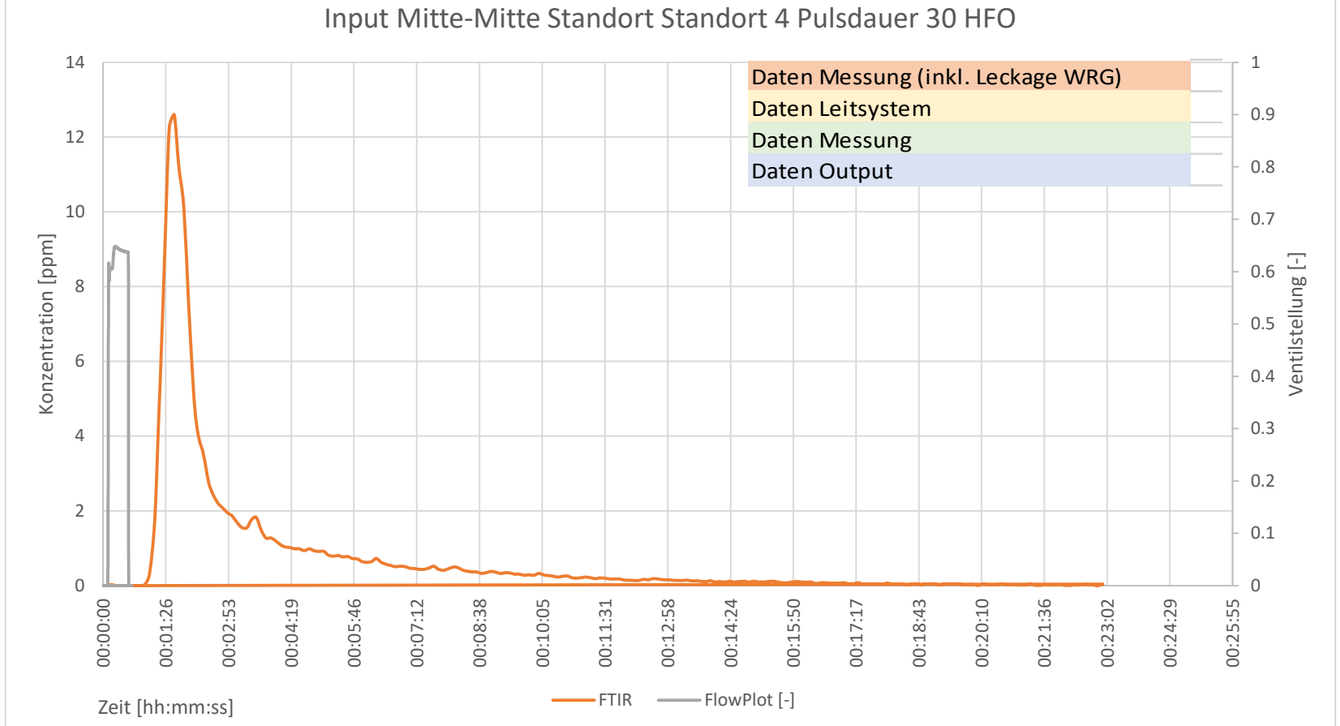
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.8	00:01:28	88	55	0.05	0.0691
HFO	3.8	00:01:38	98	64	0.05	0.0594

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	19:49:54	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.06	[g]
Antwort	7.39	[g]
Volumenstrom Messung	1002	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1188	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.35	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.29	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.20	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.24	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	2.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	3.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	88	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	55	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0691	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	19:51:51	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	4.79	[g]
Volumenstrom Messung	1328	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1576	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.26	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.22	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.27	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.32	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	3.8	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	4.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	98	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	64	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0594	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Mitte-Mitte; Standort 4; 60s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 60 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Mitte-Mitte	Standort 4	60	20:19:11	0	auto	0	auto

	Input Mitte-Mitte Standort Standort 4 Pulsdauer 60 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Mitte-Mitte	Standort 4	60	20:16:27	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	4.16	0.000685	684.63	0.186
HFO	3.68	0.000777	776.66	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
12.22	2012.67
10.15	2145.82

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	0.34	0.34	1.39	-1.05	-1.05	0.24	0.24
HFO	0.36	0.36	1.39	-1.03	-1.03	0.26	0.26
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	1224.9	1224.6	5000	-3775.05	-3775.42	0.24	0.24
HFO	1305.6	1303.0	5000	-3694.43	-3697.02	0.26	0.26

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1224.8	350	0.29	0.07	0.24	Kurzschlussströmung	3.5	14.3
HFO	1304.3	350	0.27	0.07	0.26	Kurzschlussströmung	3.7	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

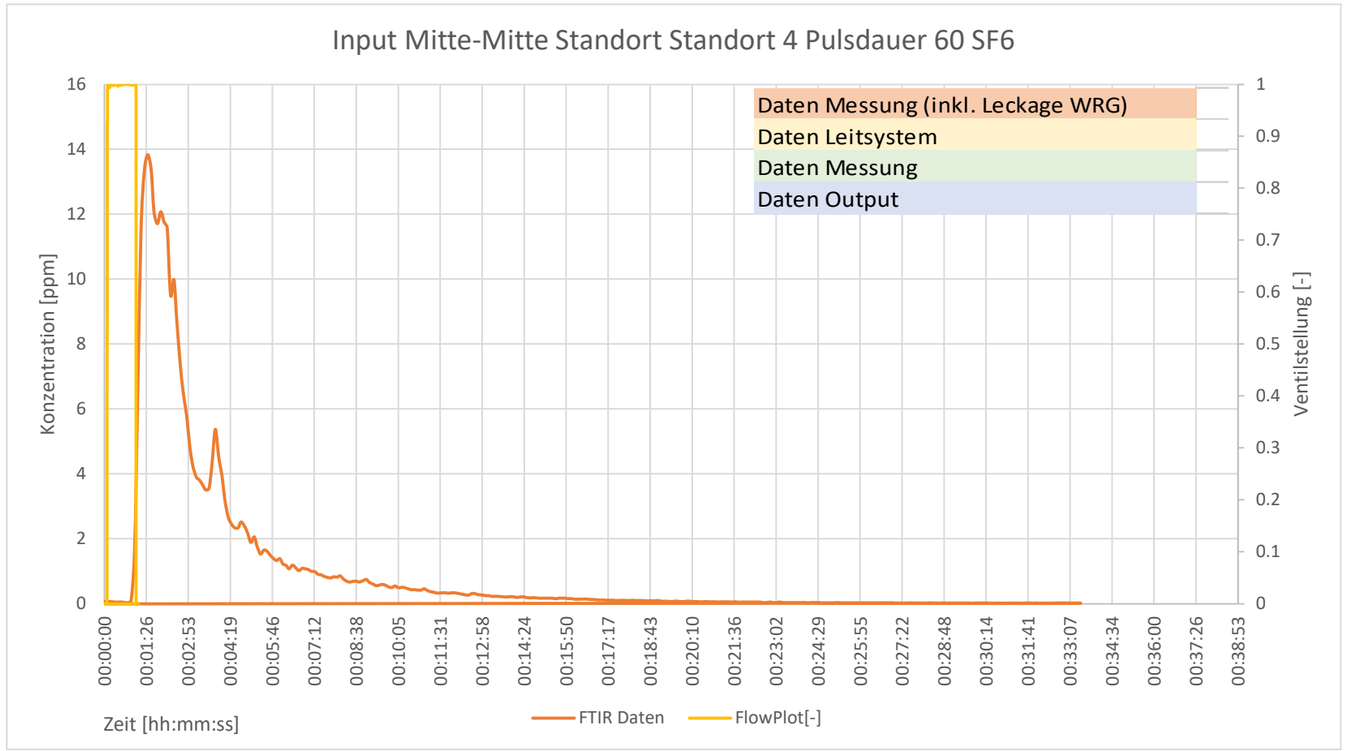
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	1452.6	350	0.24	0.07	0.29	Kurzschlussströmung	4.2	14.3
HFO	1546.9	350	0.23	0.07	0.31	Kurzschlussströmung	4.4	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

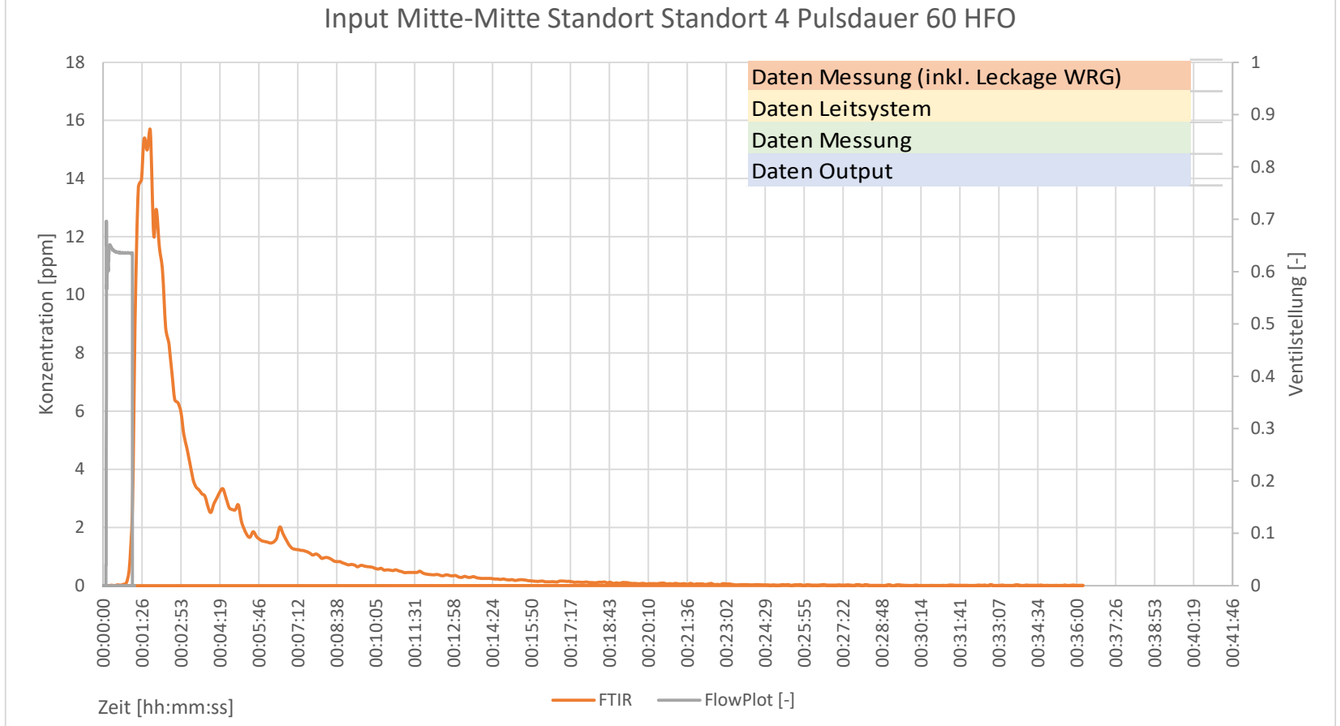
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	3.8	00:01:29	89	62	0.1	0.0613
HFO	3.8	00:01:45	105	52	0.1	0.0731

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	20:19:11	[hh:mm:ss]
Input Puls	4.16	[g]
Antwort	12.22	[g]
Volumenstrom Messung	1225	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1453	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.29	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.24	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.24	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.29	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	3.5	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	4.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	89	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	62	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0613	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Mitte-Mitte	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	60	[s]
Startzeit Puls	20:16:27	[hh:mm:ss]
Input Puls	3.68	[g]
Antwort	10.15	[g]
Volumenstrom Messung	1304	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	1547	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.27	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.23	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.26	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Kurzschlussströmung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	0.31	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	Kurzschlussströmung	
Luftwechselrate Messung	3.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	4.4	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	3.8	[m]
Zeit bis zum Peak	105	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	52	[s]
Geschwindigkeit m/s	0.0731	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 1; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Zuluft Standort Standort 1 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 1	15	11:03:30	0	auto	0	auto

Input Zuluft Standort Standort 1 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 1	15	11:01:58	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.02	0.000167	167.37	0.186
HFO	0.83	0.000176	175.96	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.66	108.45
0.38	79.89

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.54	1.54	1.39	0.15	0.15	1.11	1.11
HFO	2.21	2.20	1.39	0.82	0.81	1.59	1.59
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5557.5	5555.9	5000	557.51	555.85	1.11	1.11
HFO	7944.8	7929.1	5000	2944.83	2929.10	1.59	1.59

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5556.7	350	0.06	0.07	1.11	ideale Kolbenströmung zu optimal	15.9	14.3
HFO	7937.0	350	0.04	0.07	1.59	ideale Kolbenströmung zu optimal	22.7	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

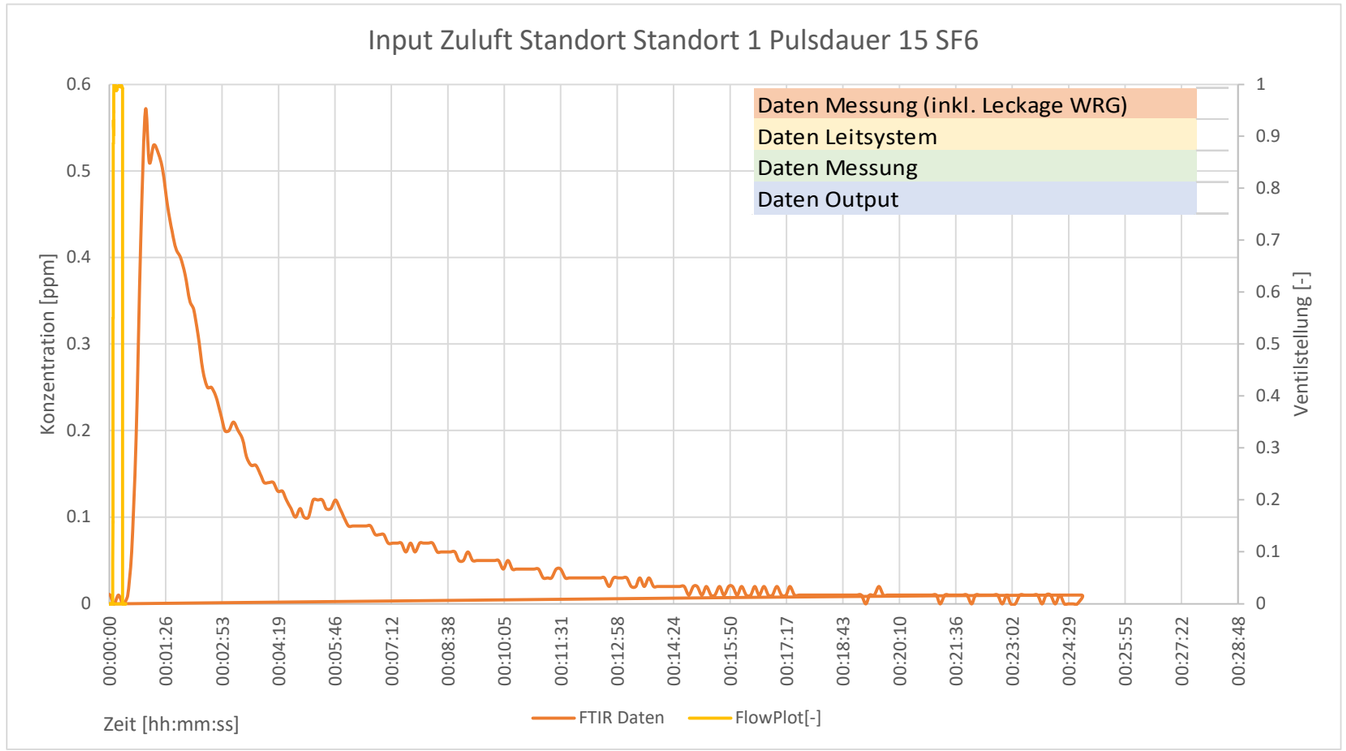
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6590.2	350	0.05	0.07	1.32	ideale Kolbenströmung zu optimal	18.8	14.3
HFO	9413.2	350	0.04	0.07	1.88	ideale Kolbenströmung zu optimal	26.9	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

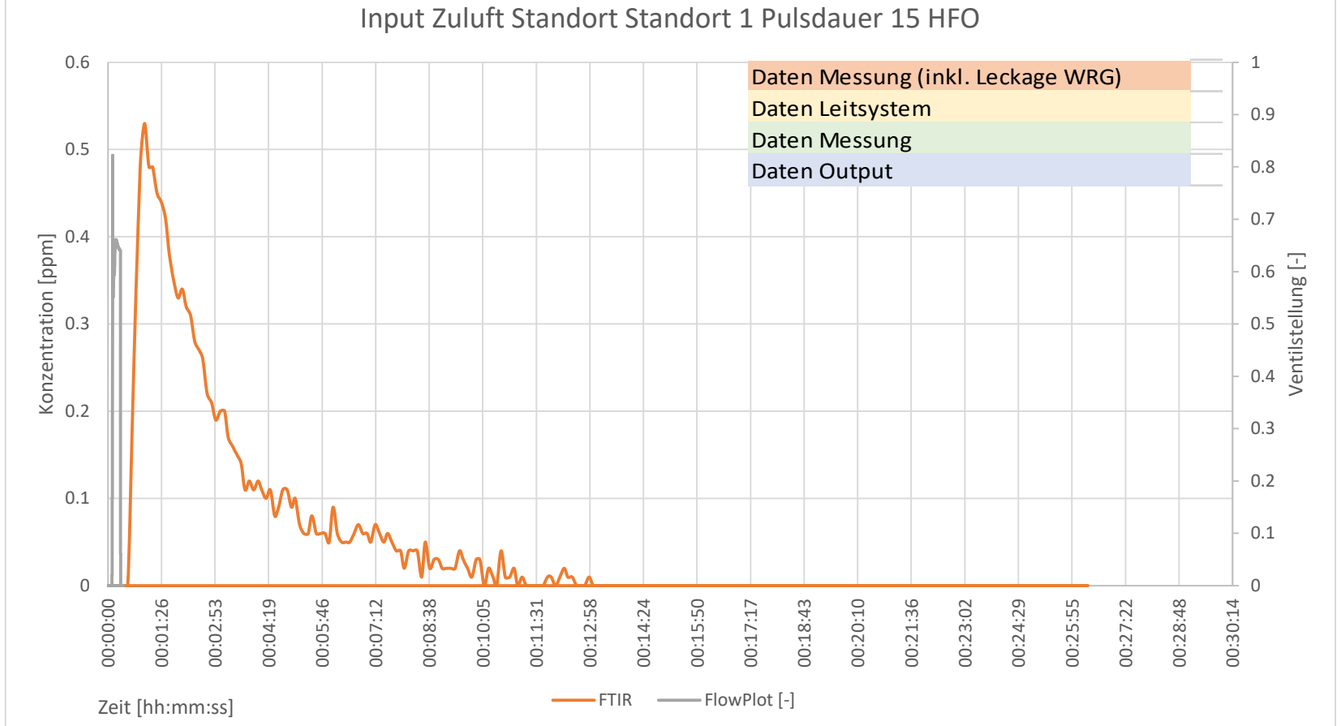
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:00:55	55	34	0.025	-
HFO	-	00:00:59	59	39	0.025	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	11:03:30	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.02	[g]
Antwort	0.66	[g]
Volumenstrom Messung	5557	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6590	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.11	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.32	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	15.9	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	18.8	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	55	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	34	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	11:01:58	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.83	[g]
Antwort	0.38	[g]
Volumenstrom Messung	7937	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	9413	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.59	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.88	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	22.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	26.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	59	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	39	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 1; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Zuluft Standort Standort 1 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 1	30	11:30:14	0	auto	0	auto

	Input Zuluft Standort Standort 1 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 1	30	11:32:29	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.09	0.186
HFO	1.77	0.000374	374.44	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
1.43	236.05
1.05	221.23

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.43	1.43	1.39	0.04	0.04	1.03	1.03
HFO	1.70	1.69	1.39	0.31	0.30	1.22	1.22
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5157.7	5156.2	5000	157.73	156.19	1.03	1.03
HFO	6105.3	6093.2	5000	1105.28	1093.19	1.22	1.22

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5157.0	350	0.07	0.07	1.03	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.7	14.3
HFO	6099.2	350	0.06	0.07	1.22	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

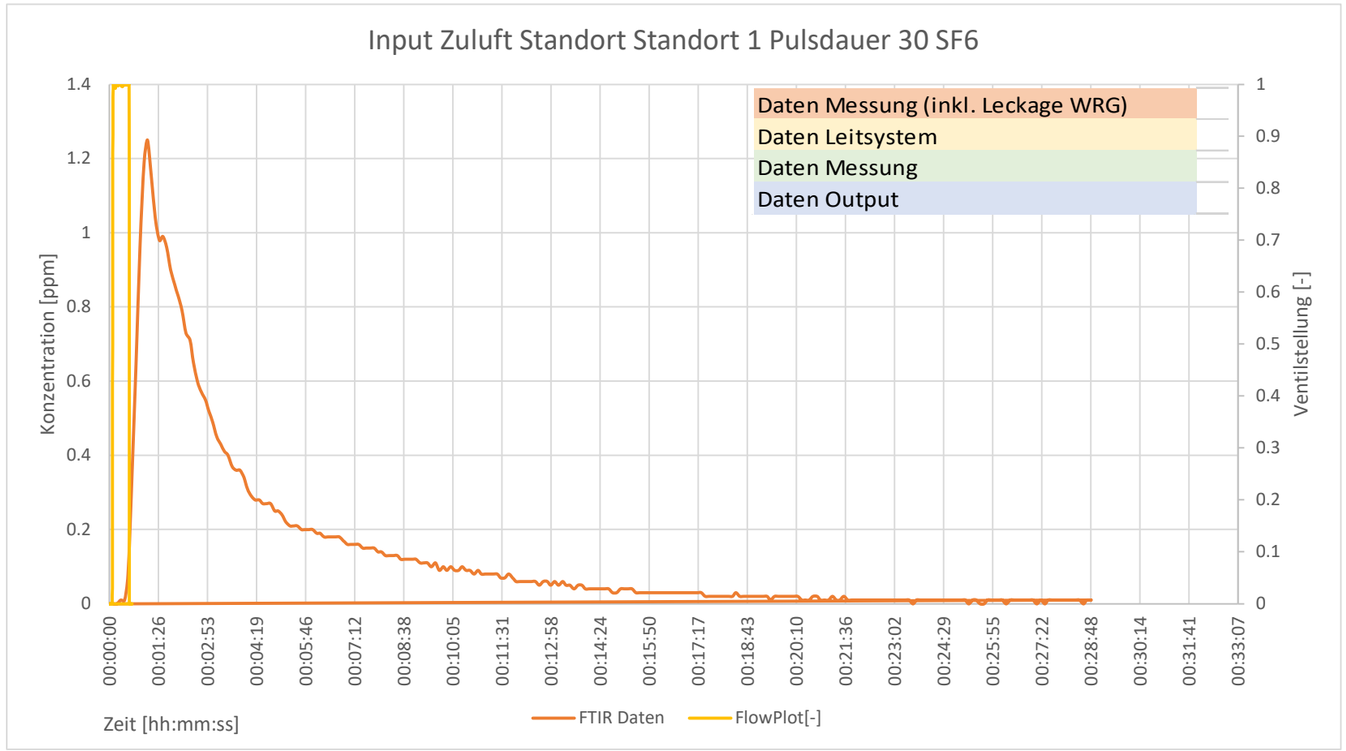
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6116.2	350	0.06	0.07	1.22	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.5	14.3
HFO	7233.7	350	0.05	0.07	1.45	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.7	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

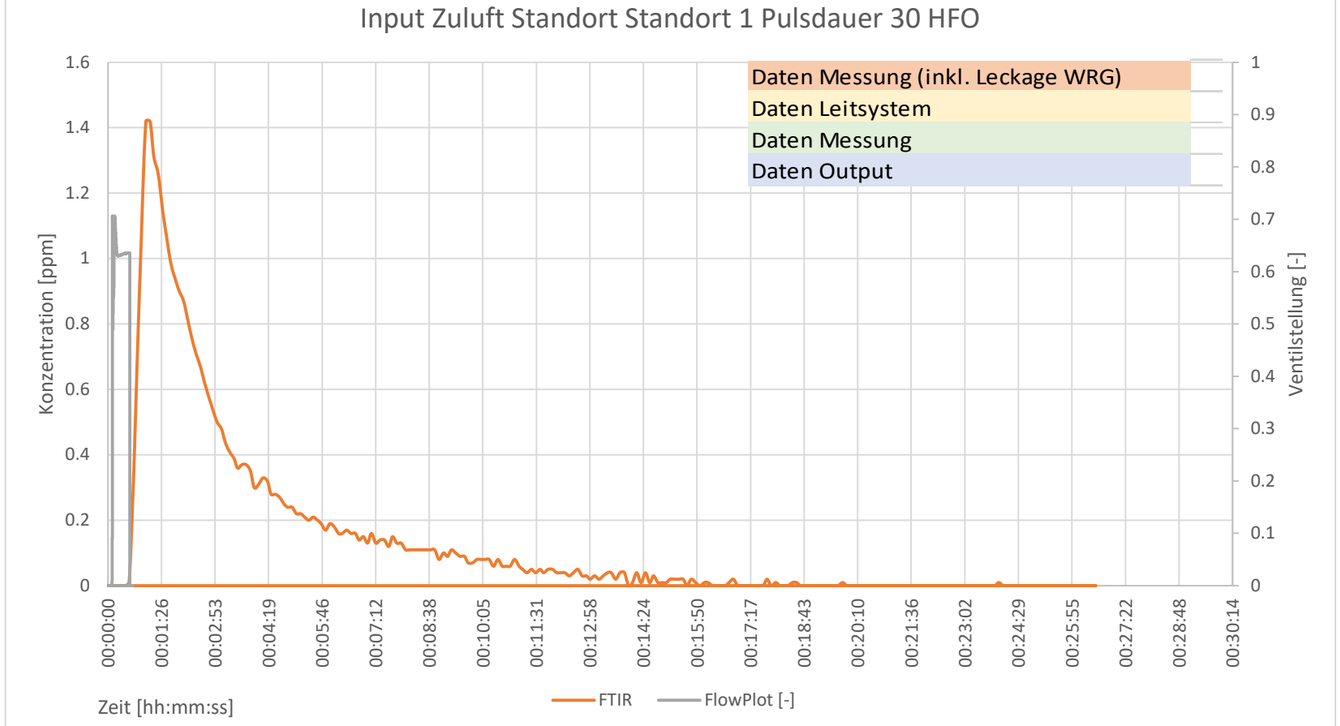
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:01:07	67	33	0.05	-
HFO	-	00:01:01	61	40	0.05	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	11:30:14	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	1.43	[g]
Volumenstrom Messung	5157	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6116	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.03	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.22	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	17.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	67	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	33	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 1	vorne Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	11:32:29	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.77	[g]
Antwort	1.05	[g]
Volumenstrom Messung	6099	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	7234	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.22	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.45	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	17.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	20.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	61	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	40	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 3; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Zuluft Standort Standort 3 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 3	15	12:03:06	0	auto	0	auto

	Input Zuluft Standort Standort 3 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 3	15	12:01:40	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.00	0.000165	165.21	0.186
HFO	0.81	0.000171	171.49	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.68	112.50
0.41	86.72

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.47	1.47	1.39	0.08	0.08	1.06	1.06
HFO	1.98	1.98	1.39	0.59	0.59	1.43	1.42
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5288.2	5286.6	5000	288.18	286.60	1.06	1.06
HFO	7133.1	7119.0	5000	2133.10	2118.98	1.43	1.42

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5287.4	350	0.07	0.07	1.06	ideale Kolbenströmung zu optimal	15.1	14.3
HFO	7126.0	350	0.05	0.07	1.43	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

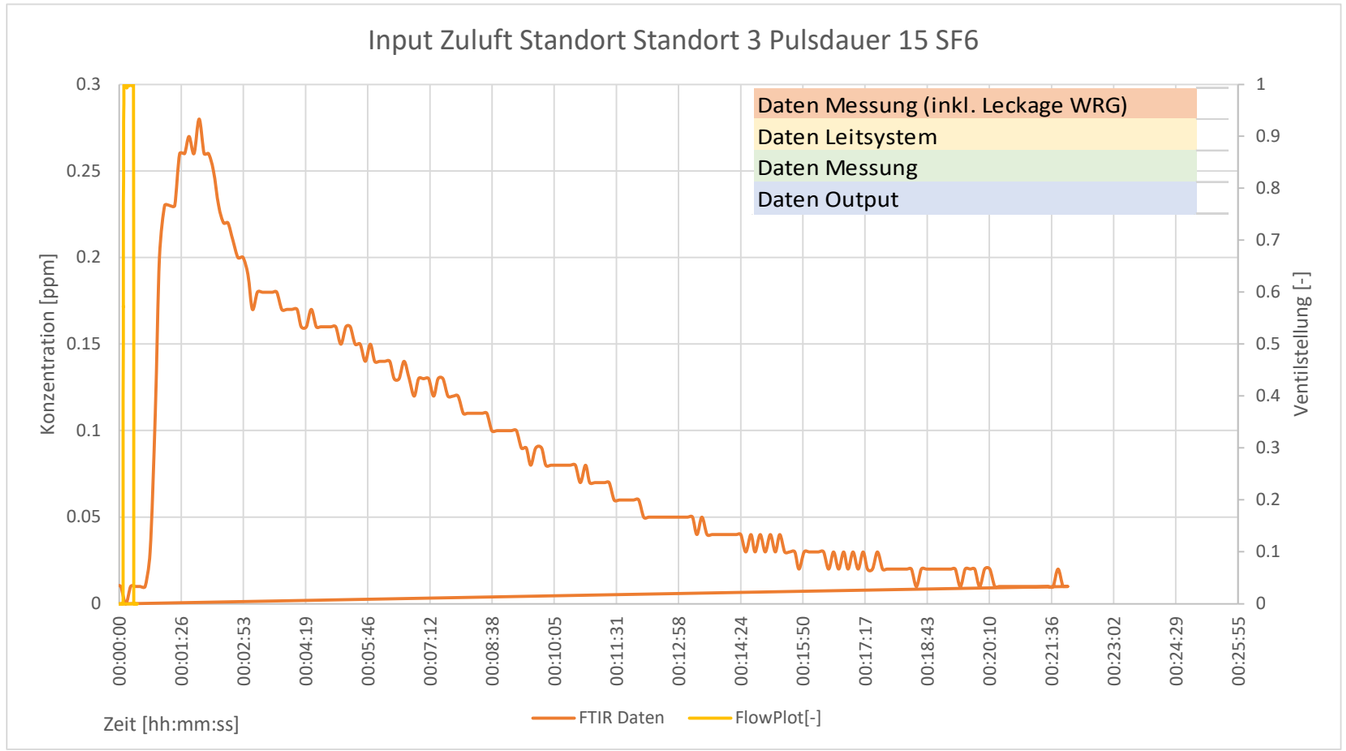
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6270.8	350	0.06	0.07	1.25	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.9	14.3
HFO	8451.5	350	0.04	0.07	1.69	ideale Kolbenströmung zu optimal	24.1	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

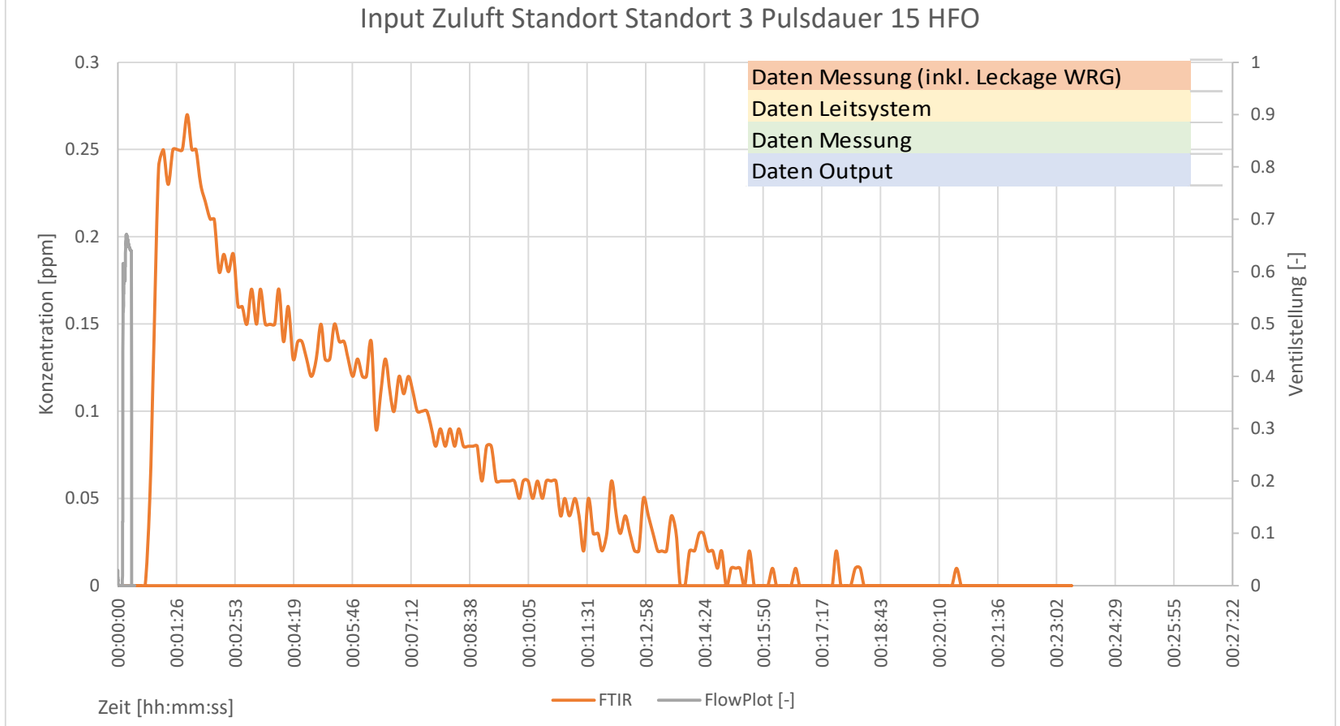
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:01:51	111	43	0.025	-
HFO	-	00:01:42	102	47	0.025	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	12:03:06	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	0.68	[g]
Volumenstrom Messung	5287	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6271	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.06	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.25	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	15.1	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	17.9	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	111	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	43	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	12:01:40	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.81	[g]
Antwort	0.41	[g]
Volumenstrom Messung	7126	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	8451	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.43	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.69	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	20.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	24.1	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	102	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	47	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 3; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Zuluft Standort Standort 3 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 3	30	12:27:37	0	auto	0	auto

	Input Zuluft Standort Standort 3 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 3	30	12:29:24	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.26	0.186
HFO	1.75	0.000370	370.00	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
1.45	238.94
1.03	218.53

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.42	1.42	1.39	0.03	0.03	1.02	1.02
HFO	1.70	1.69	1.39	0.31	0.30	1.22	1.22
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5098.0	5096.5	5000	98.00	96.48	1.02	1.02
HFO	6107.4	6095.3	5000	1107.42	1095.33	1.22	1.22

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5097.2	350	0.07	0.07	1.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.6	14.3
HFO	6101.4	350	0.06	0.07	1.22	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

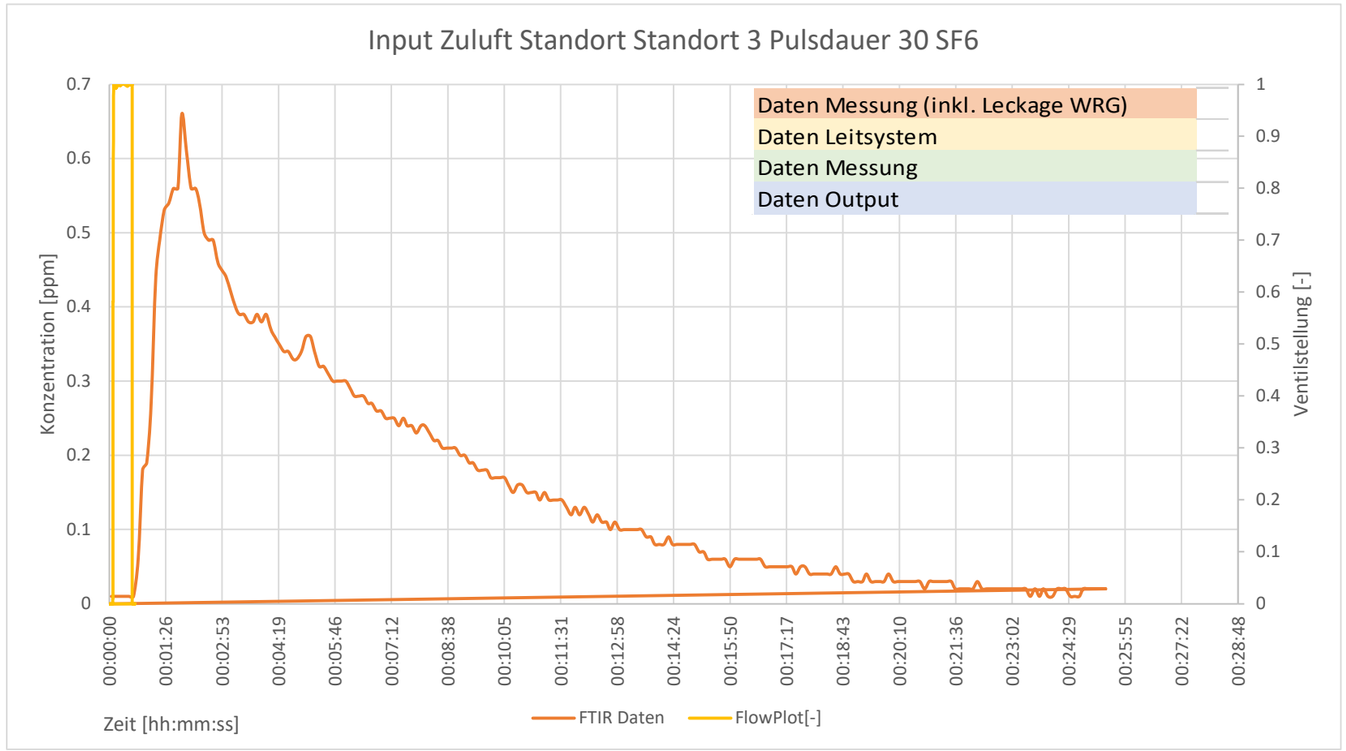
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6045.3	350	0.06	0.07	1.21	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.3	14.3
HFO	7236.2	350	0.05	0.07	1.45	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.7	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

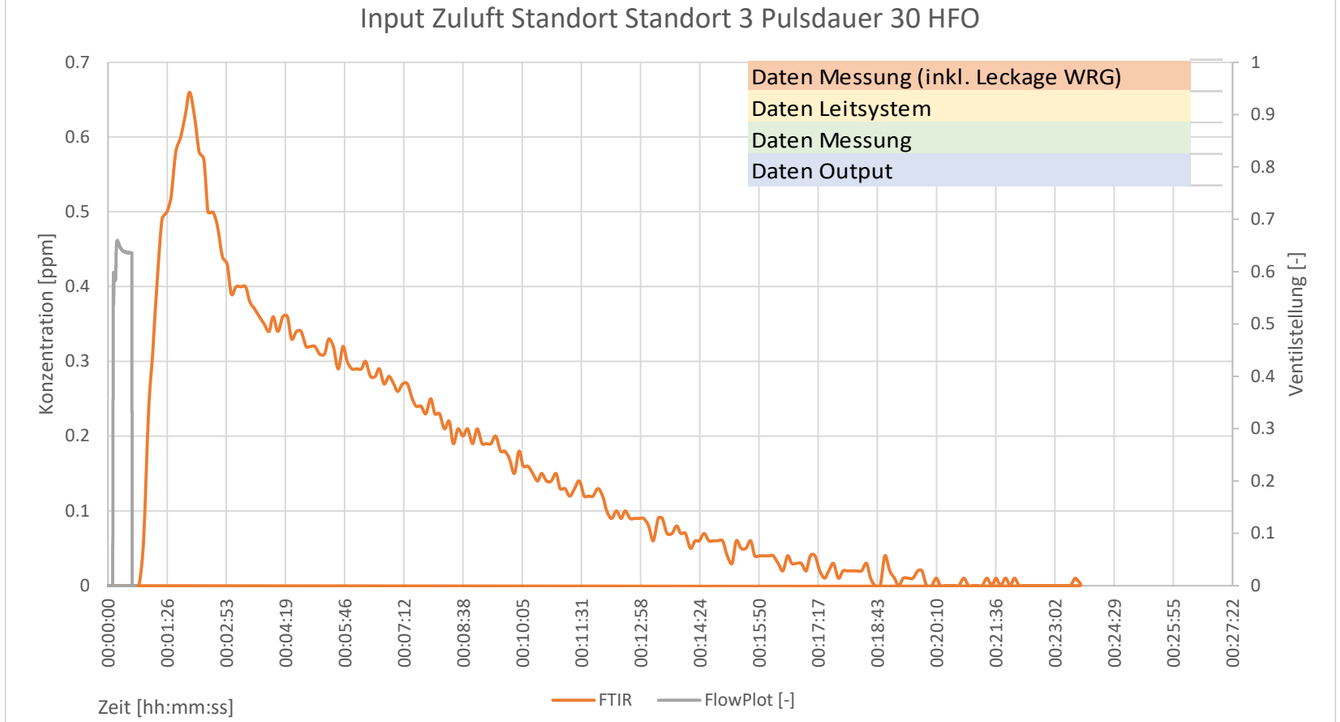
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:01:51	111	44	0.05	-
HFO	-	00:01:59	119	52	0.05	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	12:27:37	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	1.45	[g]
Volumenstrom Messung	5097	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6045	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.02	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.21	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.6	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	17.3	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	111	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	44	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 3	Hinten Fenster
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	12:29:24	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.75	[g]
Antwort	1.03	[g]
Volumenstrom Messung	6101	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	7236	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.22	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.45	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	17.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	20.7	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	119	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	52	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 4; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Zuluft Standort Standort 4 Pulsdauer 15 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 4	15	12:57:02	0	auto	0	auto

	Input Zuluft Standort Standort 4 Pulsdauer 15 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 4	15	12:55:43	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.01	0.000166	165.64	0.186
HFO	0.80	0.000169	168.78	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.74	121.67
0.42	89.77

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.36	1.36	1.39	-0.03	-0.03	0.98	0.98
HFO	1.88	1.88	1.39	0.49	0.49	1.36	1.35
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	4902.4	4900.9	5000	-97.62	-99.08	0.98	0.98
HFO	6781.7	6768.3	5000	1781.74	1768.31	1.36	1.35

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	4901.6	350	0.07	0.07	0.98	Verdrängungslüftung	14.0	14.3
HFO	6775.0	350	0.05	0.07	1.36	ideale Kolbenströmung zu optimal	19.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

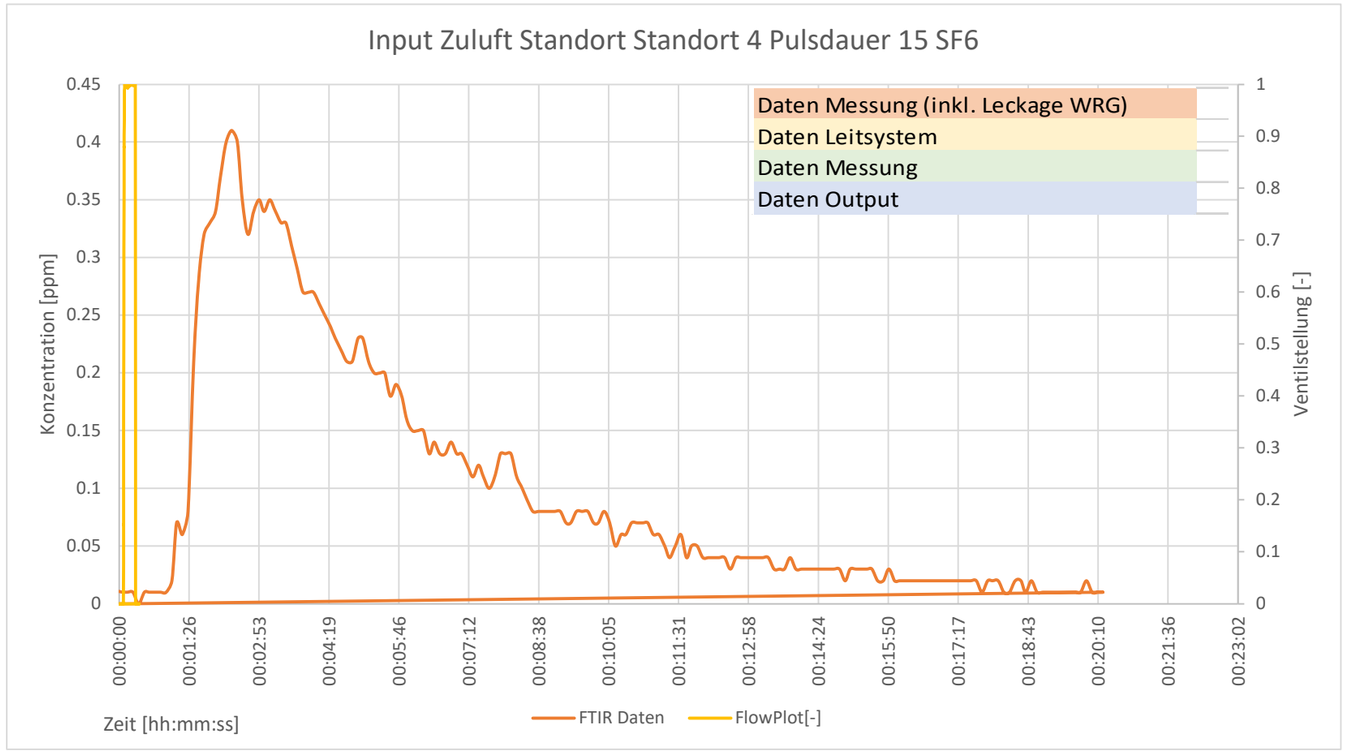
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5813.4	350	0.06	0.07	1.16	ideale Kolbenströmung zu optimal	16.6	14.3
HFO	8035.2	350	0.04	0.07	1.61	ideale Kolbenströmung zu optimal	23.0	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

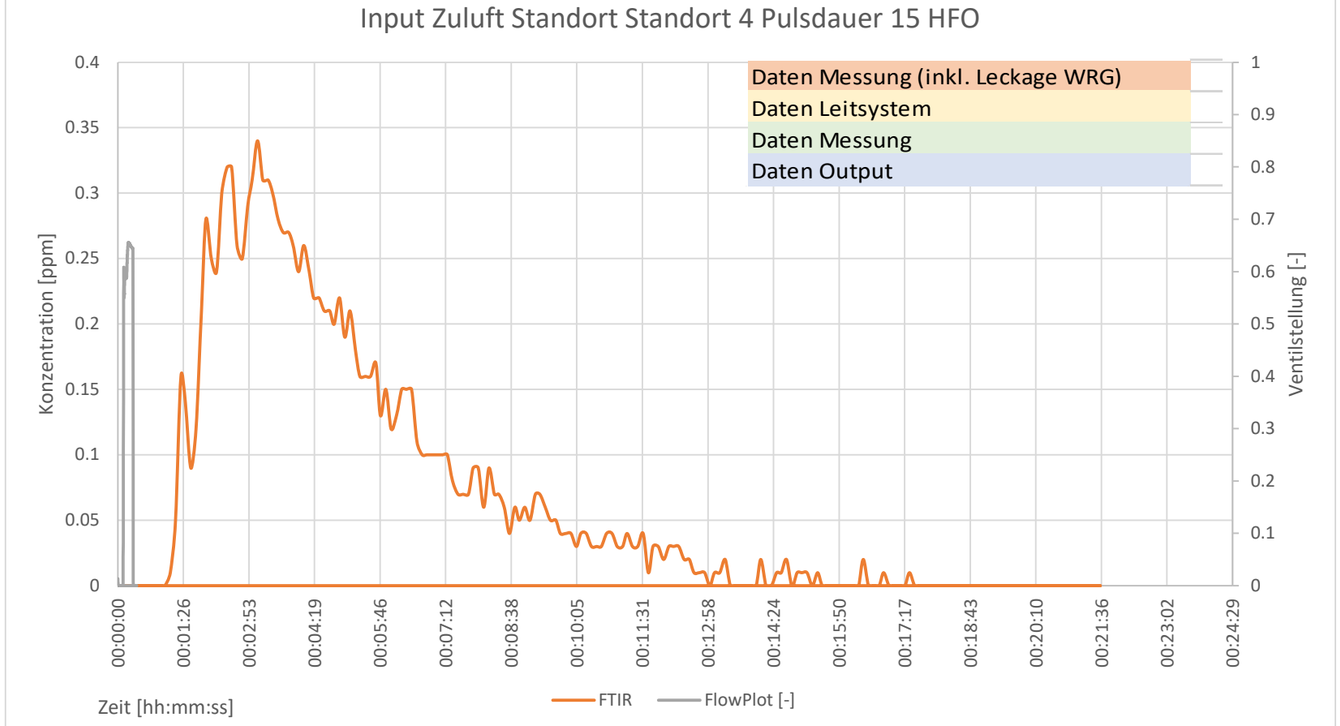
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:02:19	139	71	0.025	-
HFO	-	00:03:04	184	76	0.025	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	12:57:02	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.01	[g]
Antwort	0.74	[g]
Volumenstrom Messung	4902	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	5813	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.98	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.16	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	16.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	139	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	71	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	12:55:43	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.80	[g]
Antwort	0.42	[g]
Volumenstrom Messung	6775	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	8035	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.36	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.61	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	19.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	23.0	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	184	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	76	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 4; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Zuluft Standort Standort 4 Pulsdauer 30 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 4	30	13:19:33	0	auto	0	auto

Input Zuluft Standort Standort 4 Pulsdauer 30 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 4	30	13:21:08	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.32	0.186
HFO	1.75	0.000369	368.95	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
1.51	249.20
1.04	219.78

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.36	1.36	1.39	-0.03	-0.03	0.98	0.98
HFO	1.68	1.68	1.39	0.29	0.29	1.21	1.21
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	4888.9	4887.4	5000	-111.10	-112.55	0.98	0.98
HFO	6055.4	6043.4	5000	1055.42	1043.44	1.21	1.21

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	4888.2	350	0.07	0.07	0.98	Verdrängungslüftung	14.0	14.3
HFO	6049.4	350	0.06	0.07	1.21	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.3	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

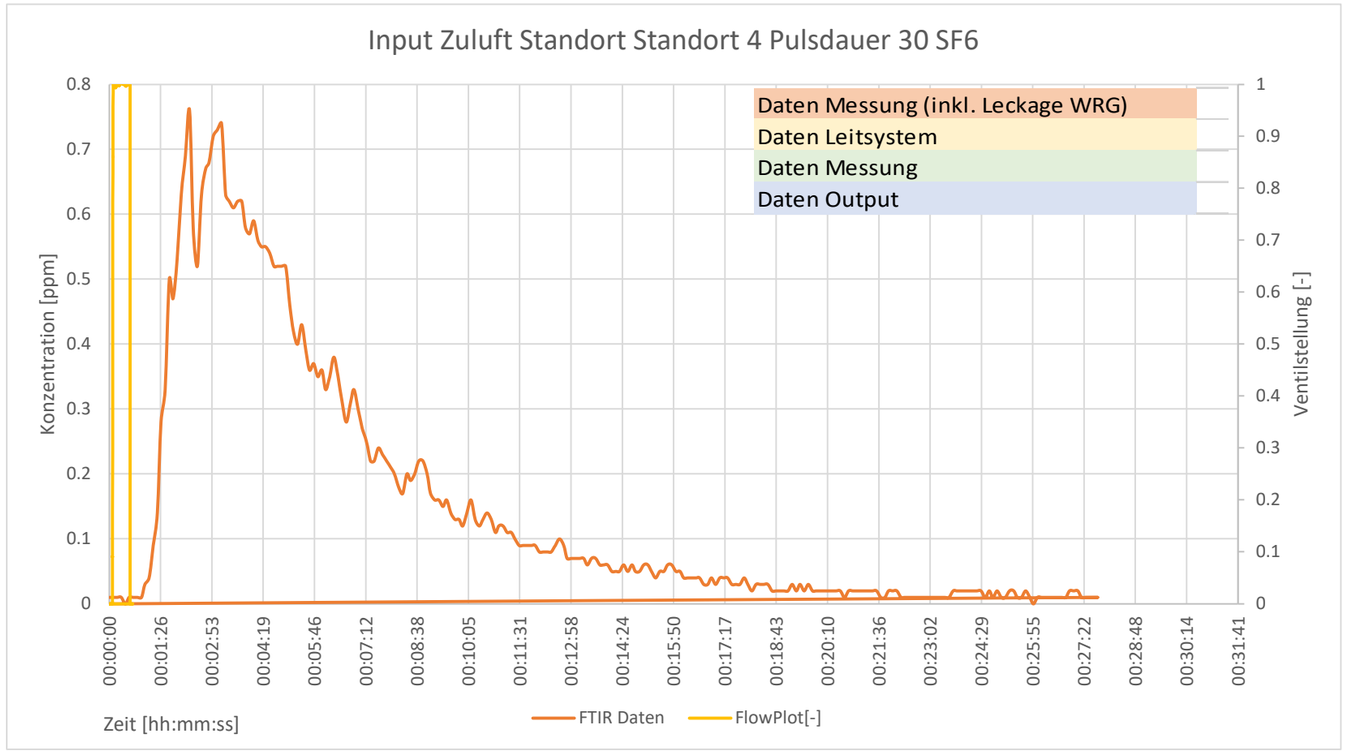
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5797.4	350	0.06	0.07	1.16	ideale Kolbenströmung zu optimal	16.6	14.3
HFO	7174.6	350	0.05	0.07	1.43	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.5	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

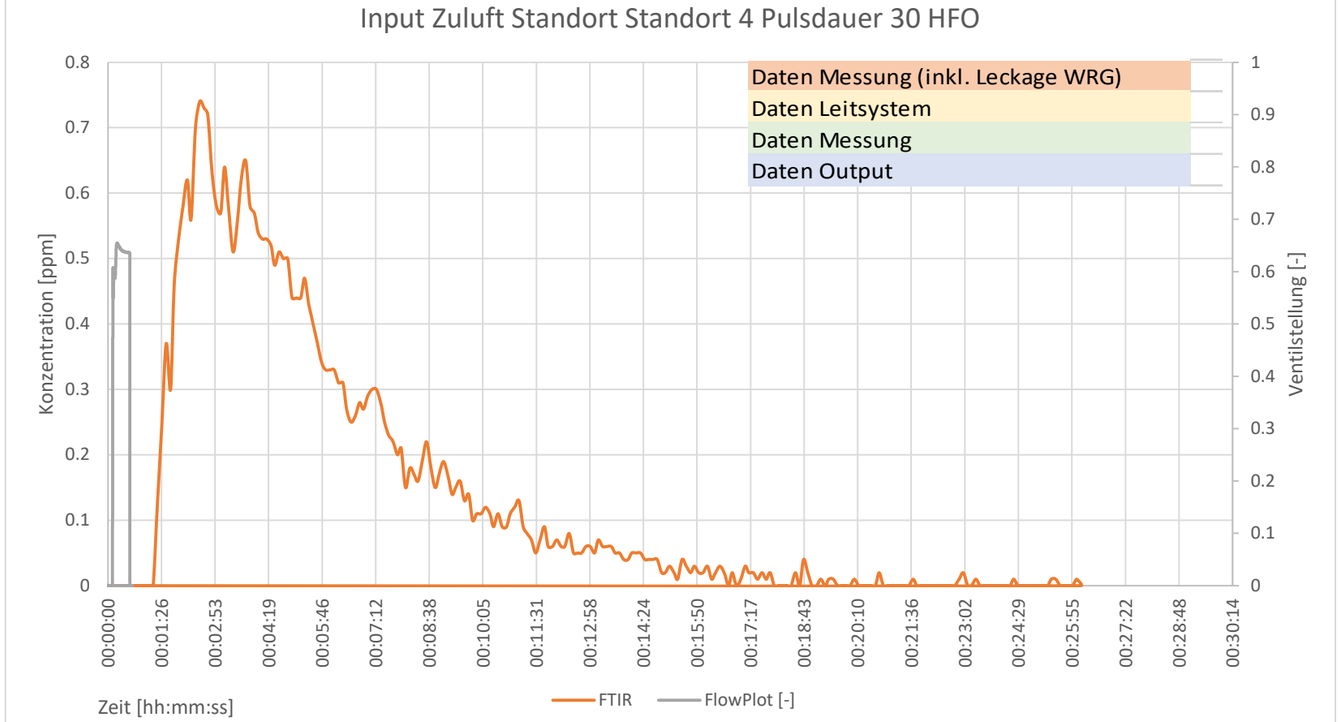
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:02:15	135	74	0.05	-
HFO	-	00:02:28	148	80	0.05	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	13:19:33	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	1.51	[g]
Volumenstrom Messung	4888	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	5797	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	0.98	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	Verdrängungslüftung	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.16	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.0	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	16.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	135	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	74	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 4	Hinten Wand
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	13:21:08	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.75	[g]
Antwort	1.04	[g]
Volumenstrom Messung	6049	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	7175	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.21	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.43	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	17.3	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	20.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	148	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	80	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 5; 15s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

Input Zuluft Standort Standort 5 Pulsdauer 15 SF6

					Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 5	15	13:50:52	0	auto	0	auto

Input Zuluft Standort Standort 5 Pulsdauer 15 HFO

					Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 5	15	13:49:26	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	1.00	0.000165	165.17	0.186
HFO	0.79	0.000167	167.06	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
0.71	116.69
0.40	84.23

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.42	1.42	1.39	0.03	0.03	1.02	1.02
HFO	1.99	1.98	1.39	0.60	0.59	1.43	1.43
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5097.1	5095.5	5000	97.05	95.53	1.02	1.02
HFO	7154.3	7140.2	5000	2154.33	2140.17	1.43	1.43

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5096.3	350	0.07	0.07	1.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.6	14.3
HFO	7147.3	350	0.05	0.07	1.43	ideale Kolbenströmung zu optimal	20.4	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

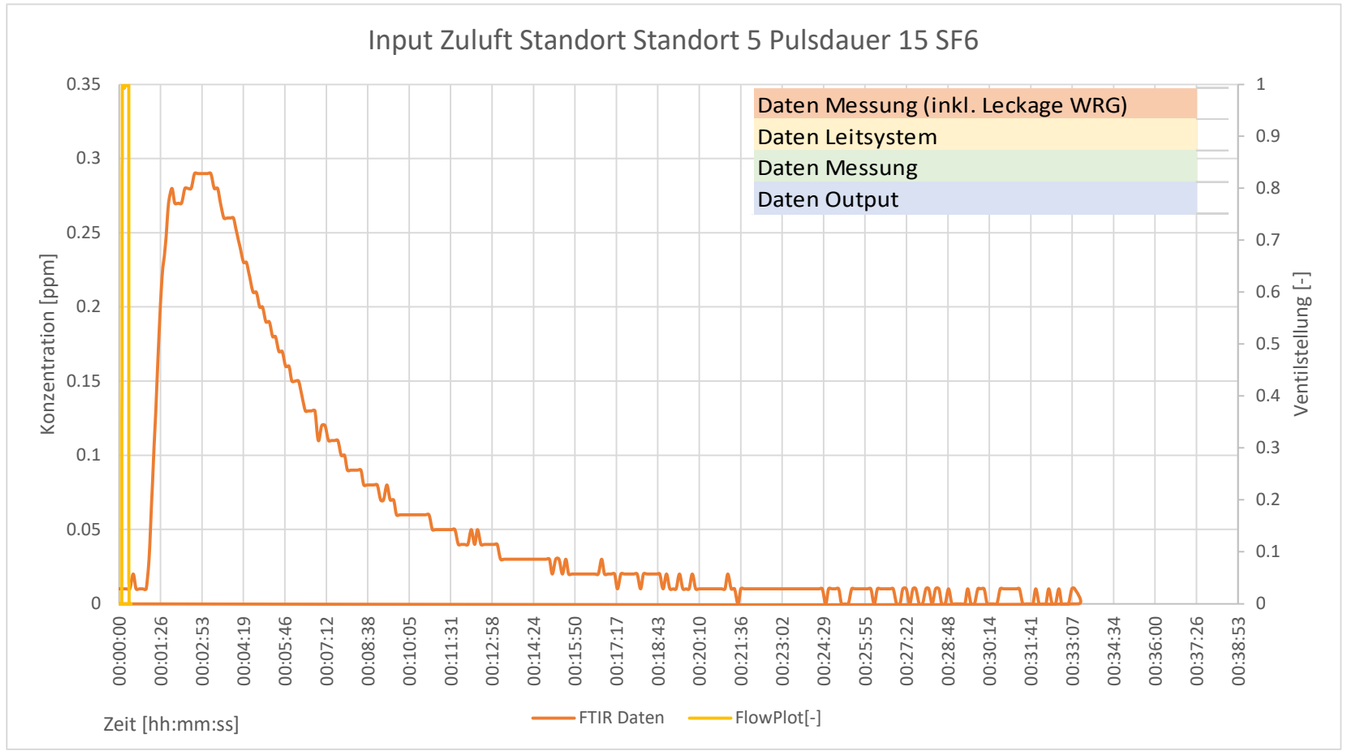
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6044.2	350	0.06	0.07	1.21	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.3	14.3
HFO	8476.6	350	0.04	0.07	1.70	ideale Kolbenströmung zu optimal	24.2	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

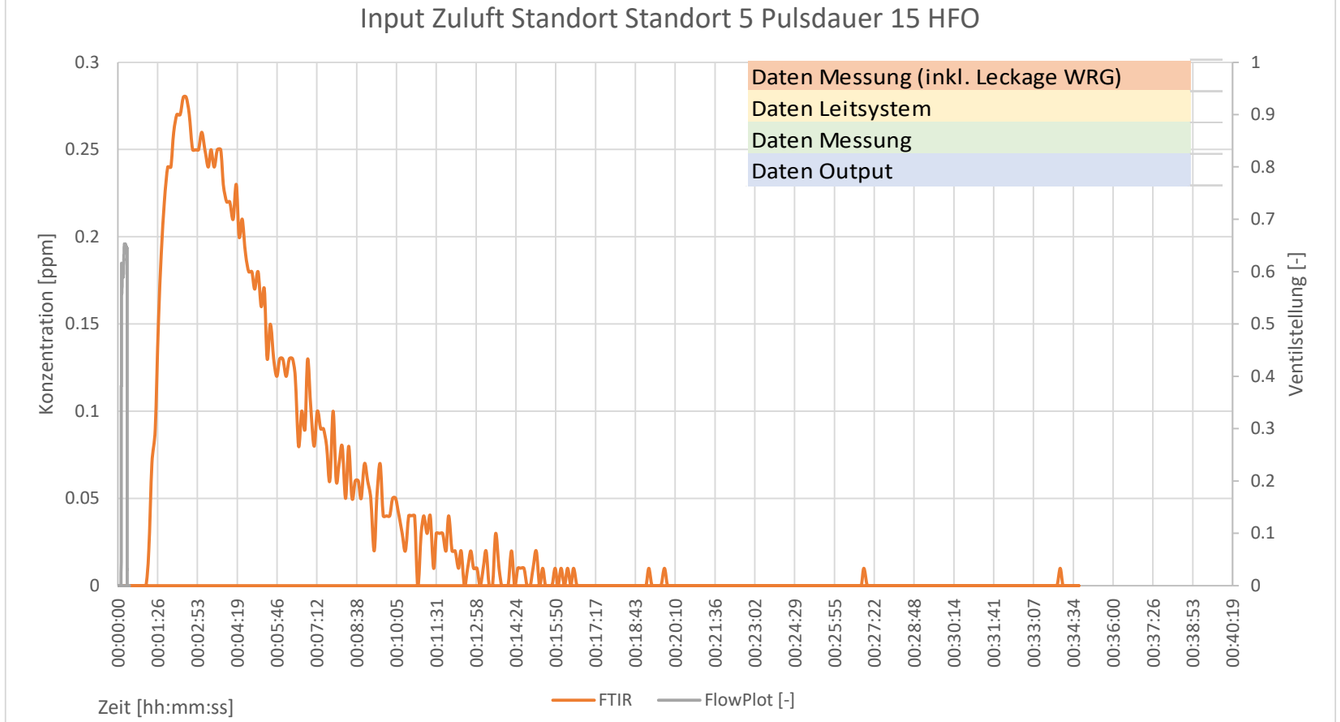
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:02:37	157	62	0.025	-
HFO	-	00:02:22	142	74	0.025	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 5	Abluft
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	13:50:52	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.00	[g]
Antwort	0.71	[g]
Volumenstrom Messung	5096	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6044	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.02	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.21	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.6	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	17.3	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	157	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	62	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 5	Abluft
Pulsdauer	15	[s]
Startzeit Puls	13:49:26	[hh:mm:ss]
Input Puls	0.79	[g]
Antwort	0.40	[g]
Volumenstrom Messung	7147	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	8477	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.04	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.43	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.70	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	20.4	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	24.2	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	142	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	74	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Tracergasmessungen im Schulzimmer C210 HSLU / Messung: Zuluft; Standort 5; 30s

Eingaben
Berechnet mit g
Berechnet mitt ppm
Fixwerte (Vorgaben Umgebung)
Leckage WRG

Eingaben:

	Input Zuluft Standort Standort 5 Pulsdauer 30 SF6				Diagramm Seite 2			
SF6	Input	Standort	Pulsdauer	SF6	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
SF6	Zuluft	Standort 5	30	14:26:24	0	auto	0	auto

	Input Zuluft Standort Standort 5 Pulsdauer 30 HFO				Diagramm Seite 2			
HFO	Input	Standort	Pulsdauer	HFO	Untere Grenze x	Obere Grenze x	Untere Grenze y	Obere Grenze y
HFO	Zuluft	Standort 5	30	14:28:29	0	auto	0	auto

Auswertung:

Messdaten

	Input (Puls)	Input (Puls)		Leckage WRG
	[g]	[m^3]	[ml]	[-]
SF6	2.05	0.000338	338.15	0.186
HFO	1.76	0.000370	370.37	0.186

Antwort berechnet mit g	mit ppm
[g*s/m^3]	[ml*s/m^3]
1.43	236.04
0.99	209.76

Standort 1	vorne Fenster
Standort 2	Mitte fenster
Standort 3	Hinten Fenster
Standort 4	Hinten Wand
Standort 5	Abluft

Berechnung

	Volumenstrom berechnet mit g	mit ppm	Volumenstrom Leitsystem	Differenz mit g	Differenz mit ppm	Prozent vom Volumenstrom Leitsystem	
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[berechnet/eff] mit g	[berechnet/eff] mit ppm
SF6	1.43	1.43	1.39	0.04	0.04	1.03	1.03
HFO	1.77	1.77	1.39	0.38	0.38	1.27	1.27
	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]	[m^3/h]		
SF6	5158.9	5157.3	5000	158.87	157.33	1.03	1.03
HFO	6369.1	6356.5	5000	1369.07	1356.46	1.27	1.27

Lüftungseffektivität

	Volumenstrom Messung	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	5158.1	350	0.07	0.07	1.03	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.7	14.3
HFO	6362.8	350	0.06	0.07	1.27	ideale Kolbenströmung zu optimal	18.2	14.3

mit Vorbehalt, da Input Standort abhängig

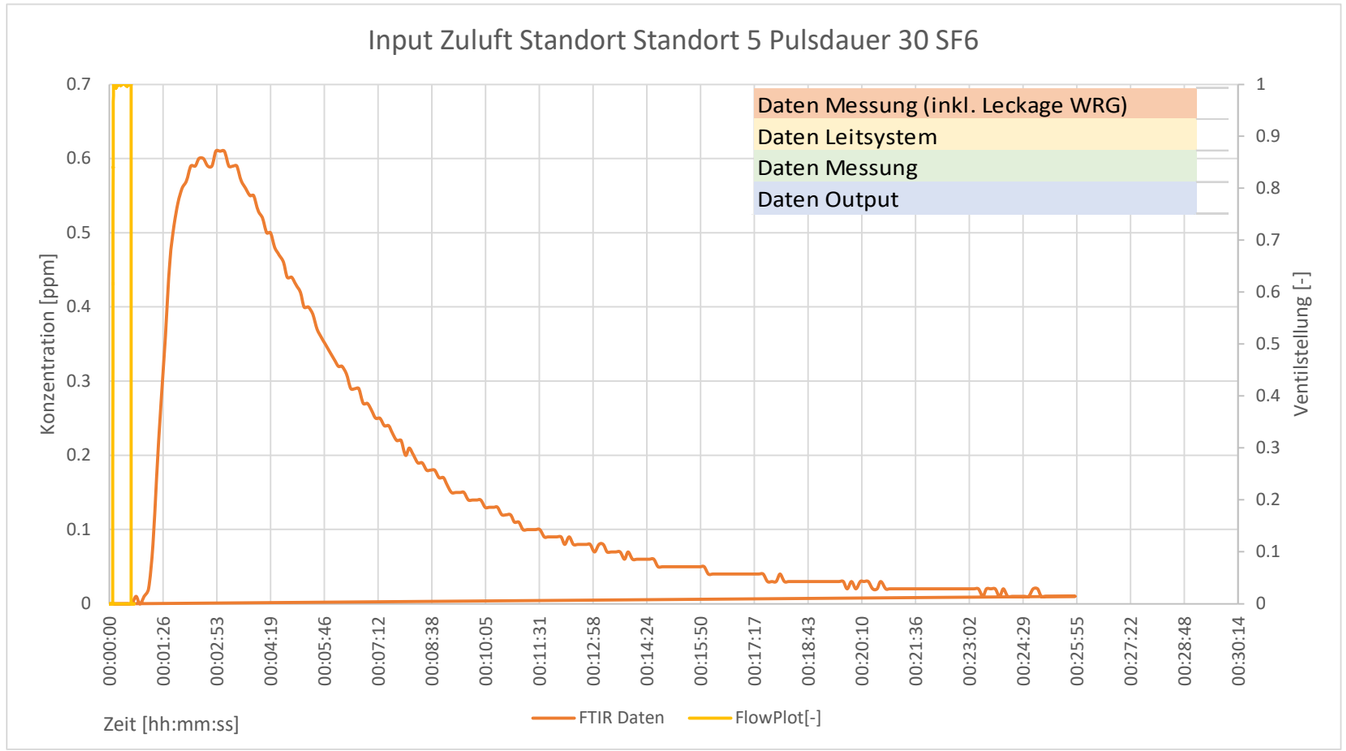
Lüftungseffektivität mit Einfluss Undichtheit WRG

	Volumenstrom inkl Undichtheit	Raumvolumen	Aufenthaltszeit Messung	Aufenthaltszeit Leitsystem	Lüftungseffektivität Messung η_a		Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Leitsystem
	[m^3/h]	[m^3]	[h]	[h]	Ist/Soll		[1/h]	[1/h]
SF6	6117.5	350	0.06	0.07	1.22	ideale Kolbenströmung zu optimal	17.5	14.3
HFO	7546.2	350	0.05	0.07	1.51	ideale Kolbenströmung zu optimal	21.6	14.3

Geschwindigkeit "Injektion - Messstelle"

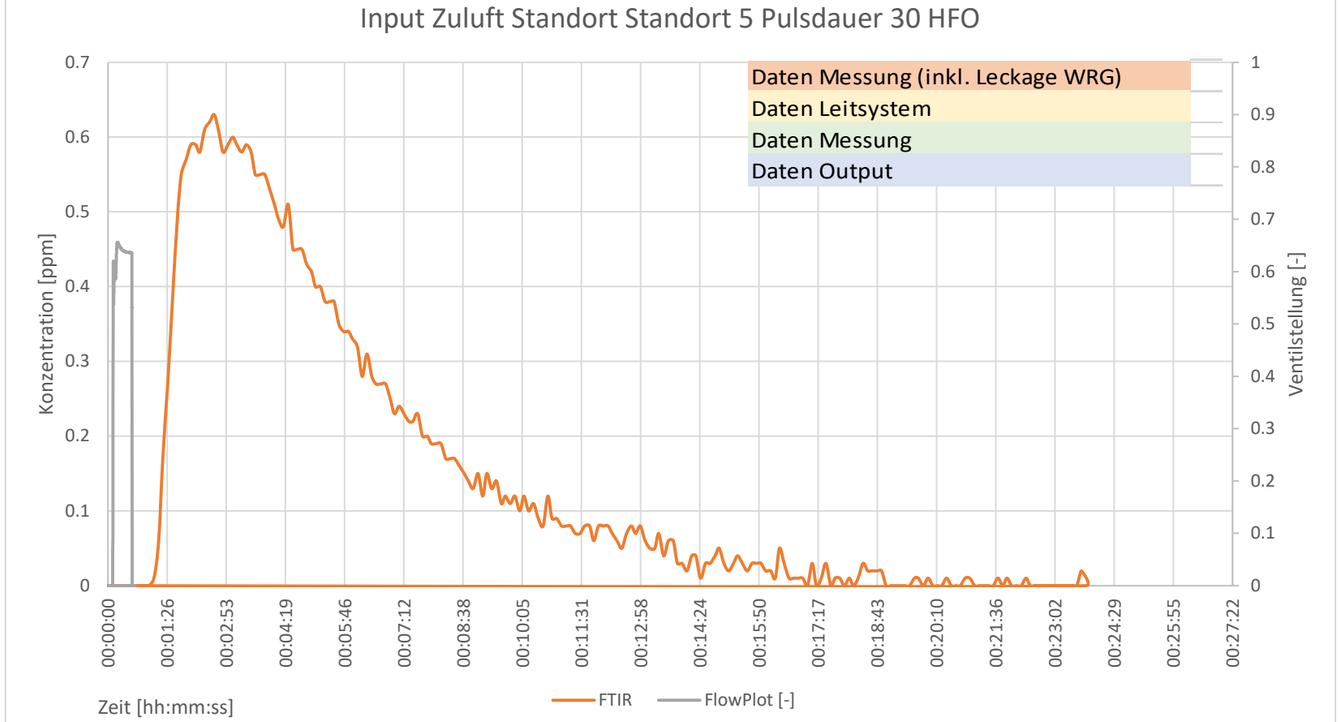
	Distanz Input-Messstelle	Zeit bis zum Maximalwert		Zeit bis erster Konz.	ab Konz. Von	Geschwindigkeit
	[m]	[hh:mm:ss]	[s]	[s]	[ppm]	[m/s]
SF6	-	00:02:51	171	70	0.05	-
HFO	-	00:02:35	155	74	0.05	-

$\eta_a = 1$	unidirektionale Strömung, ideal Kolbenströmung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Verdrängungslüftung
$\eta_a = 0{,}5$	vollständige Durchmischung
$0{,}5 < \eta_a \leq 1$	Kurzschlussströmung



Wichtigste Daten im Überblick SF6

Input	Zuluft	
Standort	Standort 5	Abluft
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	14:26:24	[hh:mm:ss]
Input Puls	2.05	[g]
Antwort	1.43	[g]
Volumenstrom Messung	5158	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	6118	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.07	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.03	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.22	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	14.7	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	17.5	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	171	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	70	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]



Wichtigste Daten im Überblick HFO 1234yf

Input	Zuluft	
Standort	Standort 5	Abluft
Pulsdauer	30	[s]
Startzeit Puls	14:28:29	[hh:mm:ss]
Input Puls	1.76	[g]
Antwort	0.99	[g]
Volumenstrom Messung	6363	[m^3]
Volumenstrom Messung inkl. WRG	7546	[m^3]
Volumenstrom Leitsystem	5000	[m^3]
Aufenthaltszeit Messung	0.06	[h]
Aufenthaltszeit Messung inkl. WRG	0.05	[h]
Aufenthaltszeit Leitsystem	0.07	[h]
Lüftungseffektivität	1.27	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Lüftungseffektivität inkl. WRG	1.51	[-]
Bedeutung Lüftungseffektivität inkl. WRG	ideale Kolbenströmung zu optimal	
Luftwechselrate Messung	18.2	[1/h]
Luftwechselrate Messung inkl. WRG	21.6	[1/h]
Luftwechselrate Leitsystem	14.3	[1/h]
Distanz Inpus-Messstelle	-	[m]
Zeit bis zum Peak	155	[s]
Zeit bis zur ersten Konzentration	74	[s]
Geschwindigkeit m/s	-	[m/s]

Mittlere Leckage über den Rotationswärmetauscher mit Hilfe der konstant Dosierung

Standort & Dosierungen

	Aufdosierung		Abklingen		FTIR	Bezeichnung
ZUL	14:57	15:57	15:57	16:51	Abluft	Zuluft 1
	16:55	17:45	17:45	18:28	Vorne Fenster	Zuluft 2
	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
	21:44	22:35	22:35	23:15	Vorne Fenster	Dozent 2

Raumvolumen	Aufenhaltszeit Soll	Luftwechselrate Soll
[m^3]	[h]	[1/h]
350	0.07	14.3

Aufdosierung

				SF6				HFO			
Input	Messstandort	Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit
		[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

Abklingkurve

				SF6				HFO			
Input	Messstandort	Startzeit	Volumenstrom Leitsystem	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Mittelwert)	Aufenthaltszeit	Volumenstrom (Median)	Aufenthaltszeit
		[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

Input	Messstandort	Tracergas	Mittelwert Aufenhaltszeit	Soll Aufenthalszeit	Lüftungseffektivität	Luftwechselrate Messung	Luftwechselrate Messung
			[h]	[h]	Leitsystem/Messung	[-]	[1/h]
Zuluft	Abluft	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.78	Verdrängungslüftung	11.1
Zuluft	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.07	0.07	1.02	ideale Kolbenströmung zu optimal	14.5
Zuluft	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.79	Verdrängungslüftung	11.3
Dozent	Hinten Fenster	SF6 & HFO	0.09	0.07	0.74	Verdrängungslüftung	10.6
Dozent	Vorne Fenster	SF6 & HFO	0.08	0.07	0.89	Verdrängungslüftung	12.6

Undichtheit WRG-Rotationstauscher

Input	Messstandort	Startzeit	Mittelwert Abluft SF6	Mittelwert Zuluft SF6	Leckage SF6	Mittelwert Abluft HFO	Mittelwert Zuluft HFO	Leckage HFO	Mittelwert Leckage	Totale mittlere Leckage
		[hh:mm:ss]	[ppm]	[ppm]	[-]	[ppm]	[ppm]	[-]	[-]	[-]
Dozent	Abluft	20:07-21:18	2.20	0.40	0.18	2.240	0.467	0.208	0.196	0.186
Dozent	Vorne Fenster	21:55-22:33	2.56	0.42	0.16	2.499	0.469	0.188	0.176	

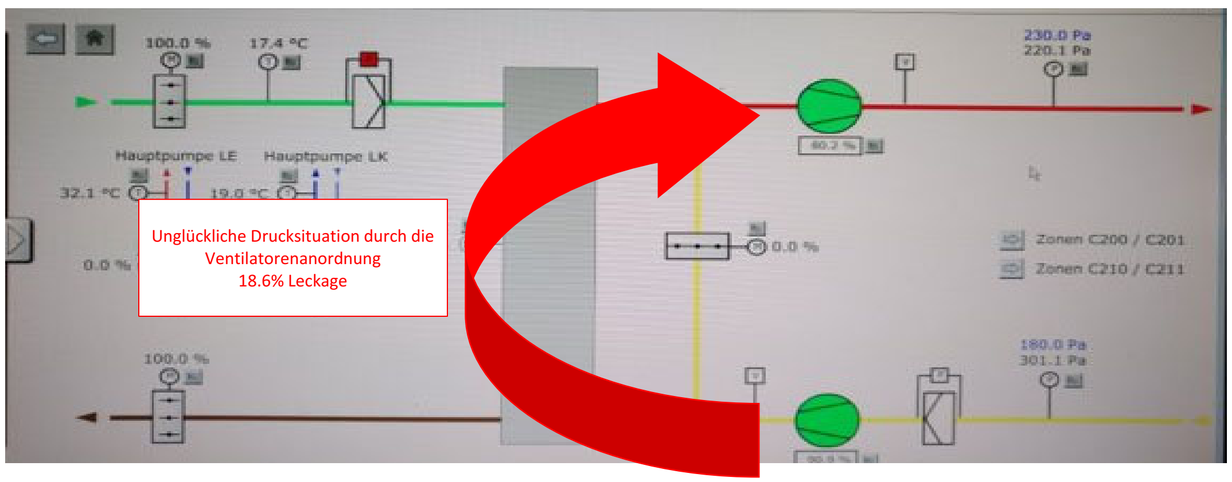
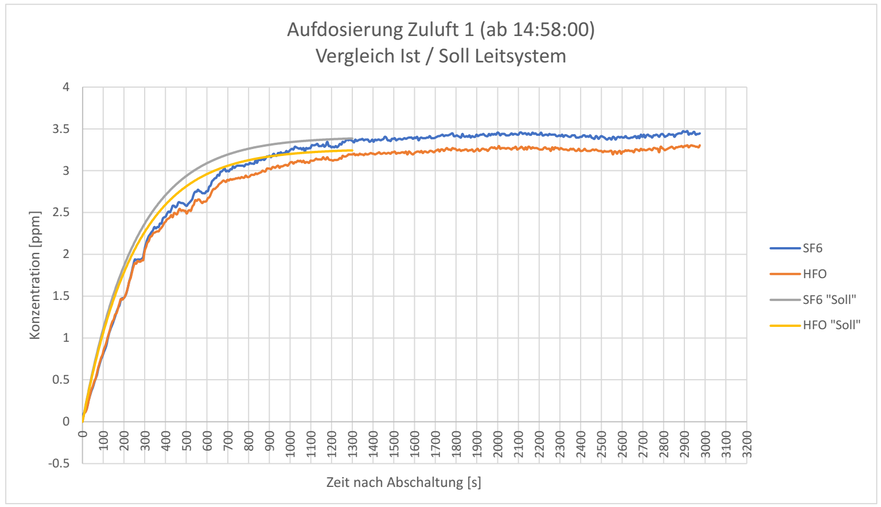
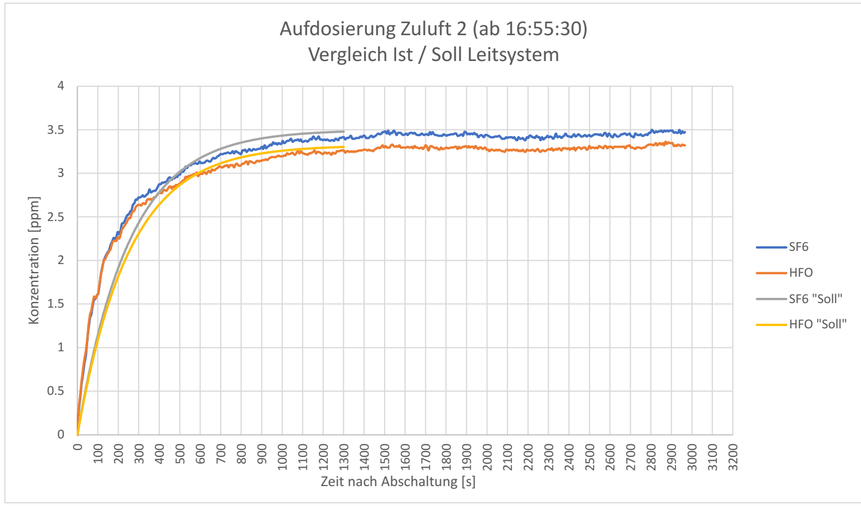
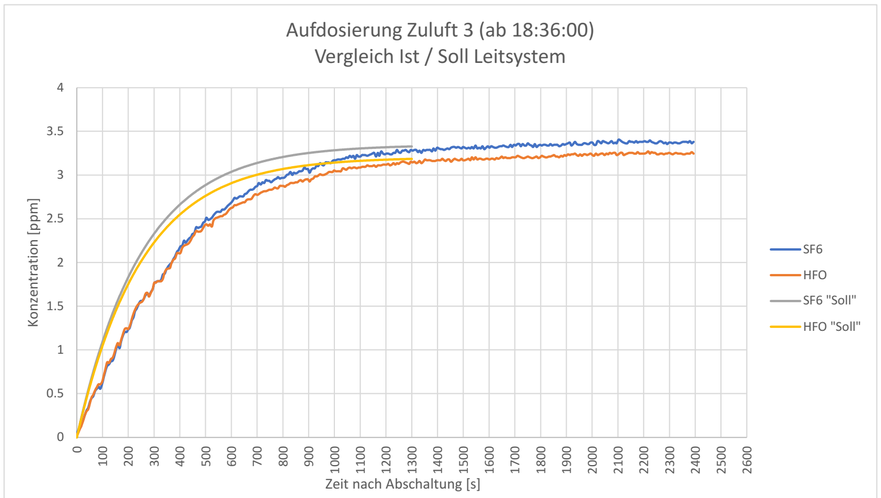
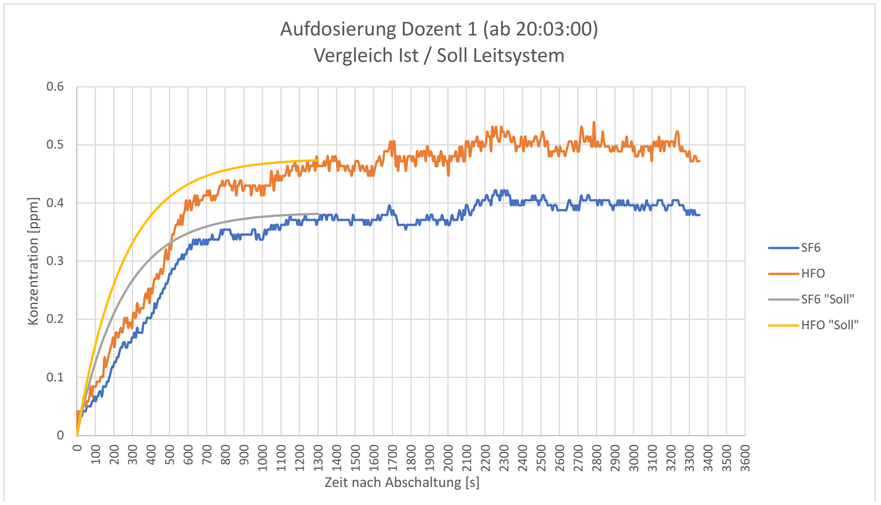


Diagramme Aufdosierung









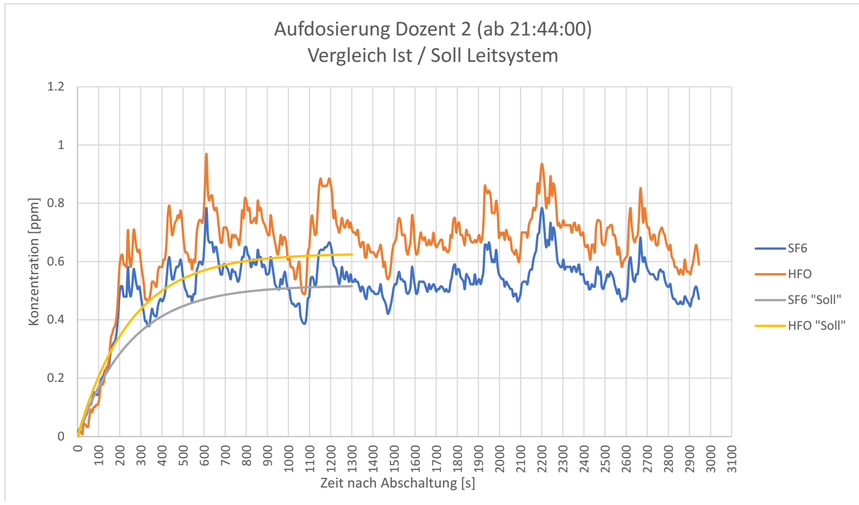
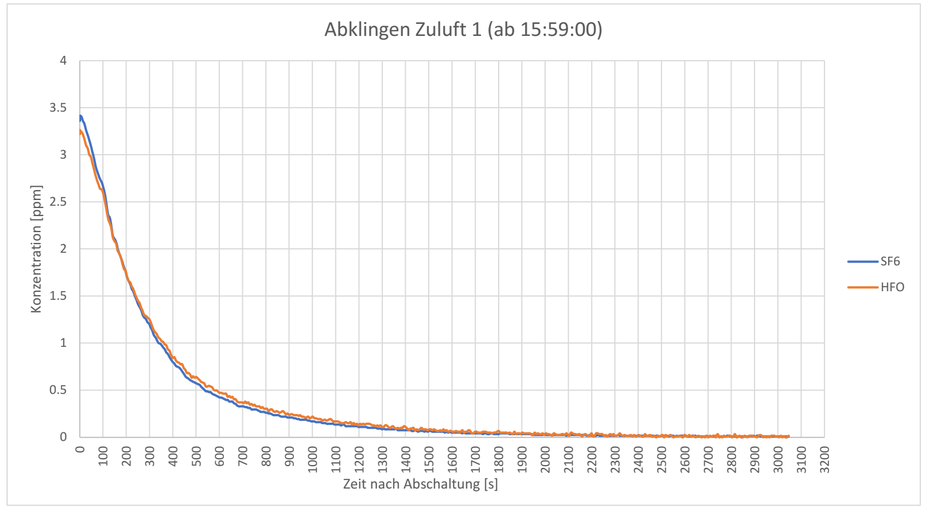
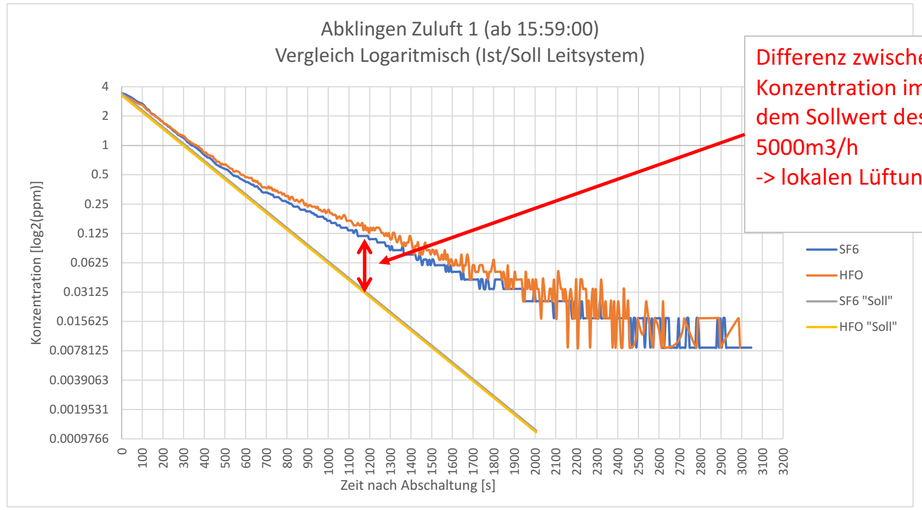
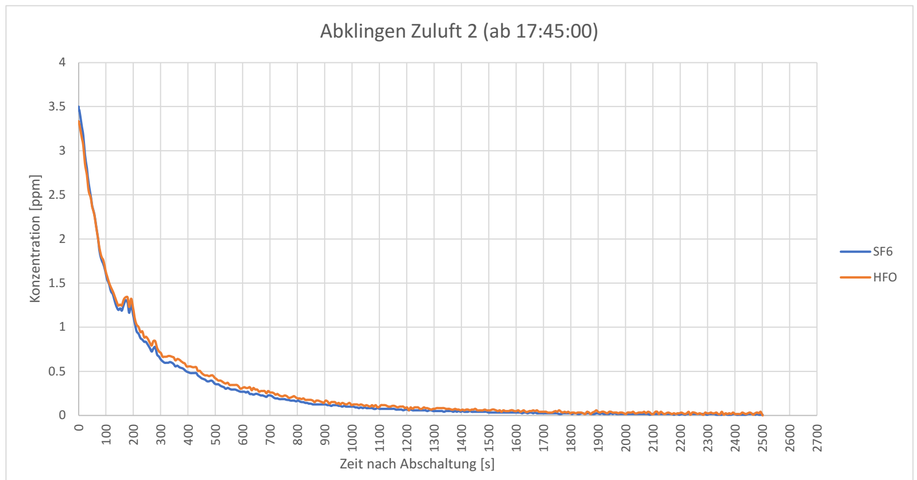


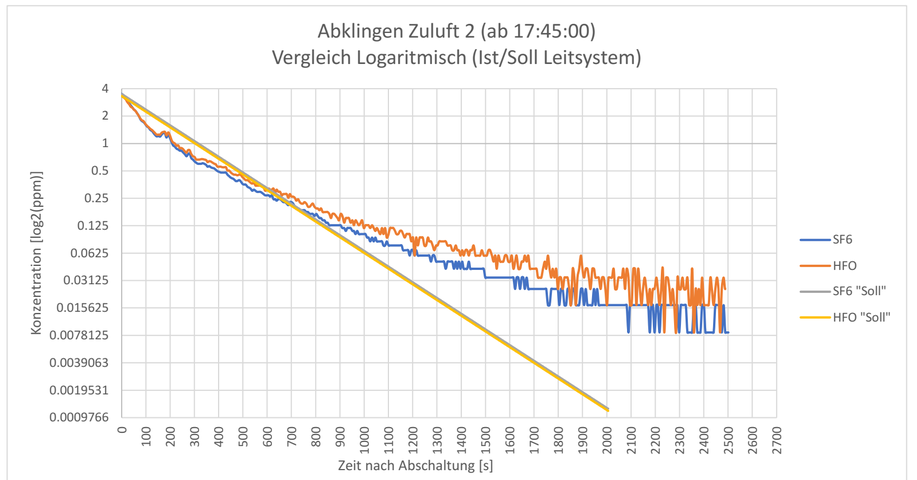
Diagramme Abklingverhalten

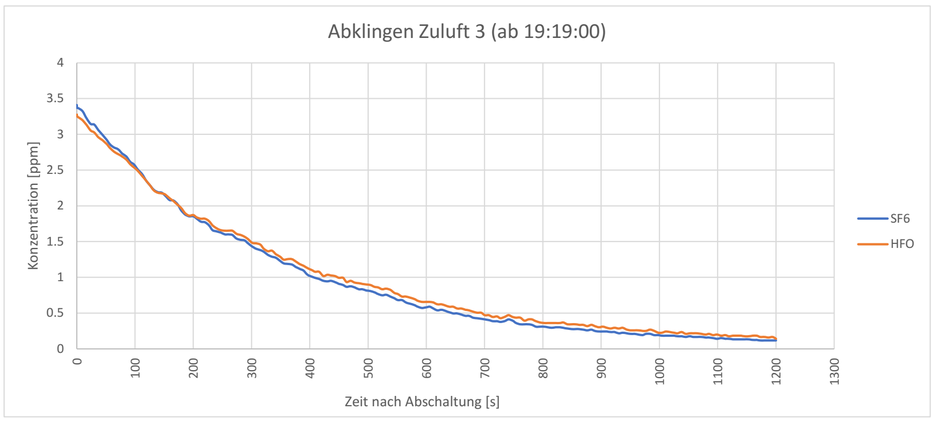


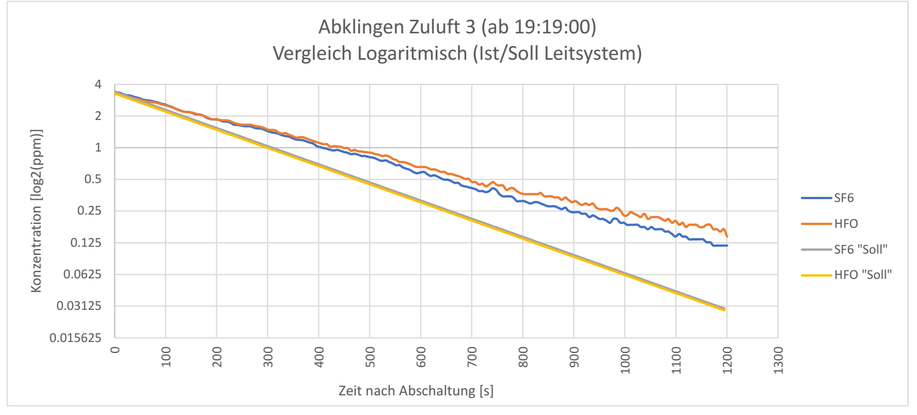


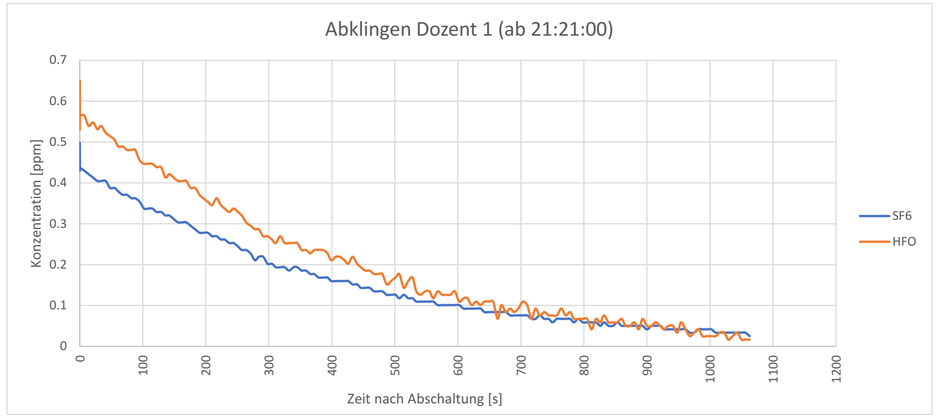
Differenz zwischen der gemessenen Konzentration im Raum gegenüber dem Sollwert des Leitsystems 5000m3/h
-> lokalen Lüftungseffektivität

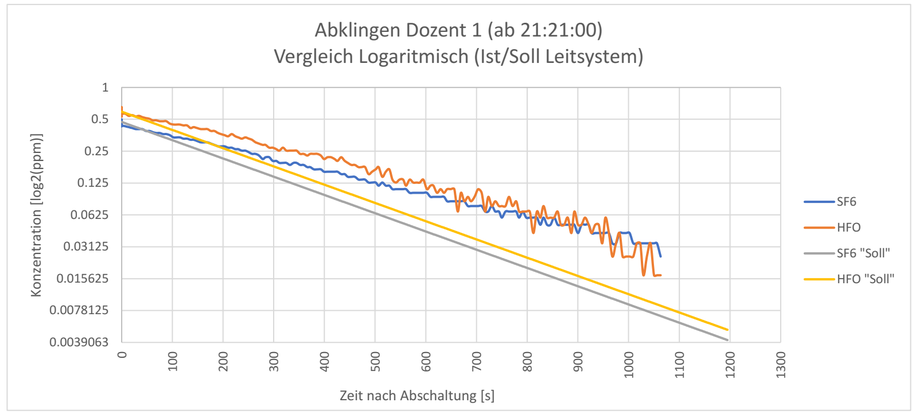


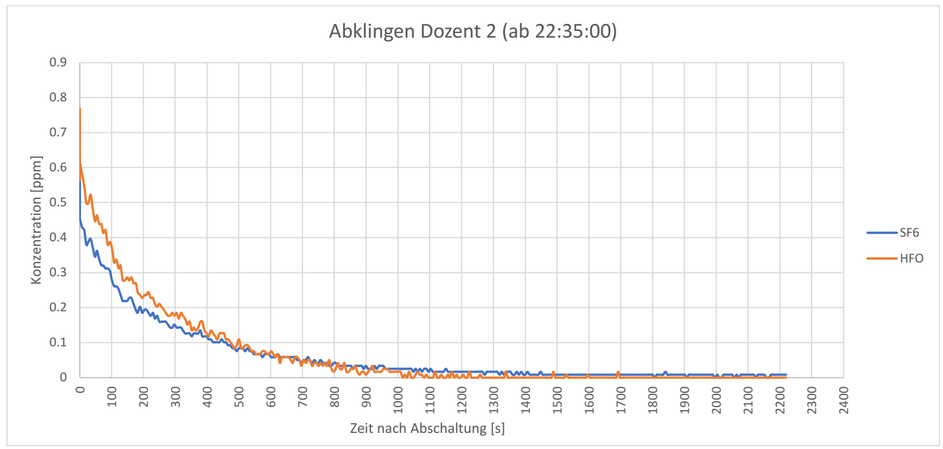


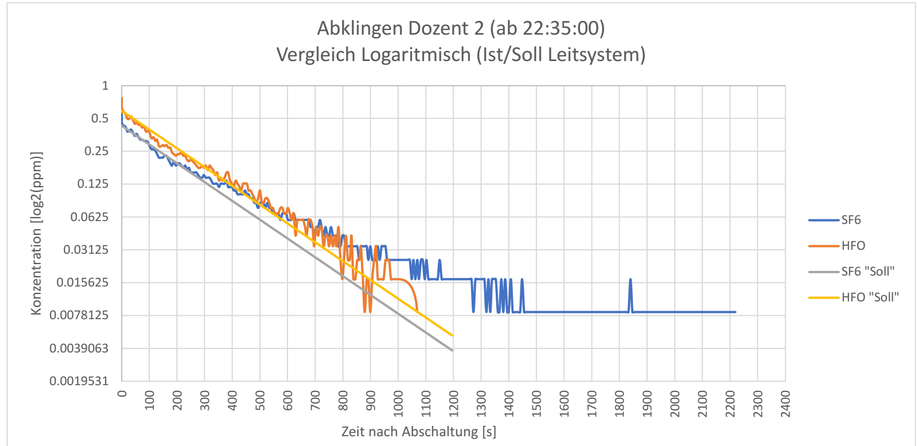





Abklingen Dozent 1 (ab 21:21:00)
Konzentration [ppm]
Zeit nach Abschaltung [s]
SF6
HFO


Abklingen Dozent 1 (ab 21:21:00)
Vergleich Logaritmisch (Ist/Soll Leitsystem)
Konzentration [log2(ppm)]
Zeit nach Abschaltung [s]
SF6
HFO
SF6 "Soll"
HFO "Soll"


Abklingen Dozent 2 (ab 22:35:00)
Konzentration [ppm]
Zeit nach Abschaltung [s]
SF6
HFO


Abklingen Dozent 2 (ab 22:35:00)
Vergleich Logaritmisch (Ist/Soll Leitsystem)
Konzentration [log2(ppm)]
Zeit nach Abschaltung [s]
SF6
HFO
SF6 "Soll"
HFO "Soll"

Puls-Dosierungen Gasera und Vergleich mit FTIR

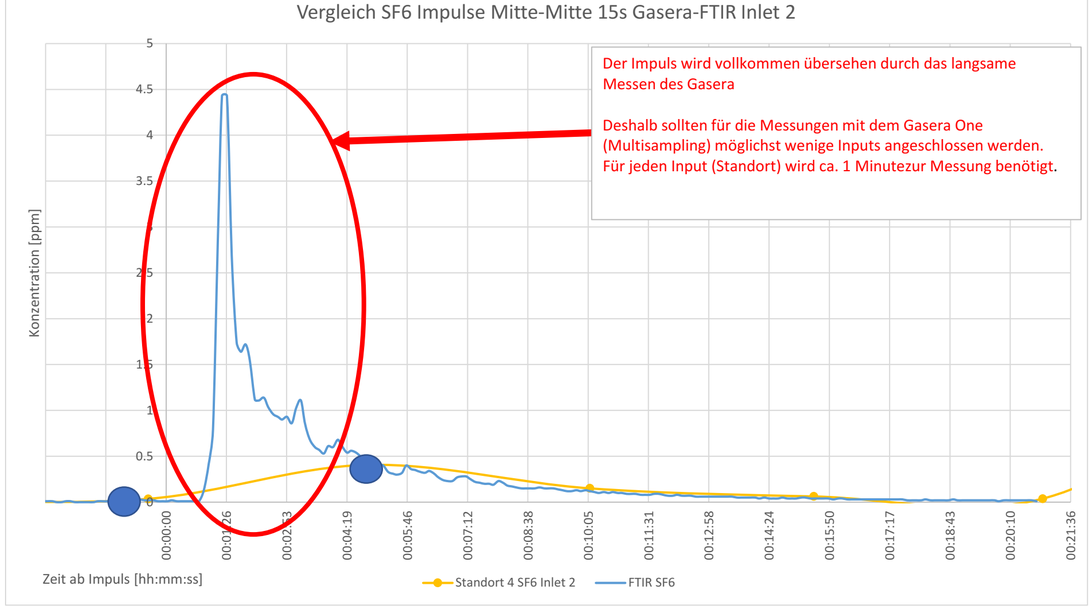
Messablauf inkl. Positionen

Vergleich Gasera Impuls 1,2,3 Input Dozent							Sa
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO	FTIR
	15	30	60	15	30	60	
Standort 1	13:01:07	13:47:09	14:20:01	12:55:16	13:51:25	14:15:47	vorne Fenster
Standort 2	14:59:59	15:37:26	15:58:20	15:03:54	15:34:29	16:02:20	Mitte fenster
Standort 3	16:33:08	16:56:21	17:33:01	16:30:06	16:59:00	17:30:05	Hinten Fenster
Standort 4	17:59:49	18:30:43	18:54:59	18:02:12	18:27:50	18:57:59	Hinten Wand

Vergleich Gasera Impuls 1,2,3 Input Mitte-Mitte							Sa
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO	
	15	30	60	15	30	60	
Standort 1	00:03:26	00:28:46	00:47:35	00:05:42	00:26:33	00:50:02	Vorne Fenster
Standort 2	22:39:41	23:02:00	23:29:22	22:37:57	23:04:37	23:26:55	Mitte fenster
Standort 3	20:54:21	21:21:03	21:45:06	20:56:02	21:18:53	21:47:18	Hinten Fenster
Standort 4	19:26:56	19:49:54	20:19:11	19:24:19	19:51:51	20:16:27	Hinten Wand

Vergleich Gasera Impuls 1,2,3 Input Zuluft							So
	sf6	sf6	sf6	HFO	HFO	HFO	
	15	30	60	15	30	60	
Standort 1	11:03:30	11:30:14	-	11:01:58	11:32:29	-	Vorne Fenster
	-	-	-	-	-	-	Mitte fenster
Standort 3	12:03:06	12:27:37	-	12:01:40	12:29:24	-	Hinten Fenster
Standort 4	12:57:02	13:19:33	-	12:55:43	13:21:08	-	Hinten Wand
Standort 5	13:50:52	14:26:24	-	13:49:26	14:28:29	-	Abluft

Wichtigste Erkenntnisse in Kürze



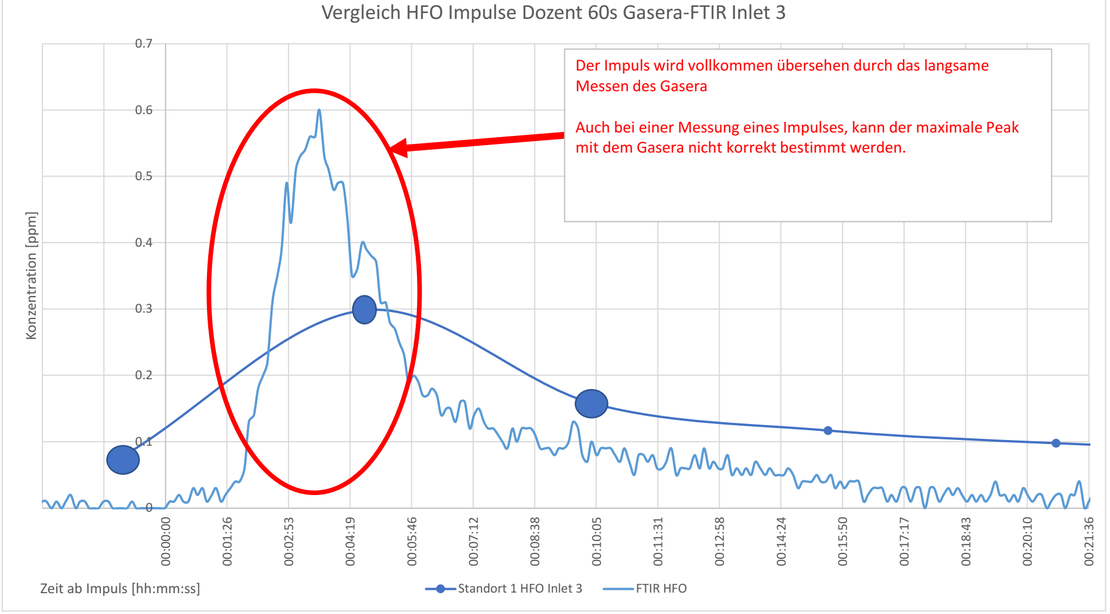
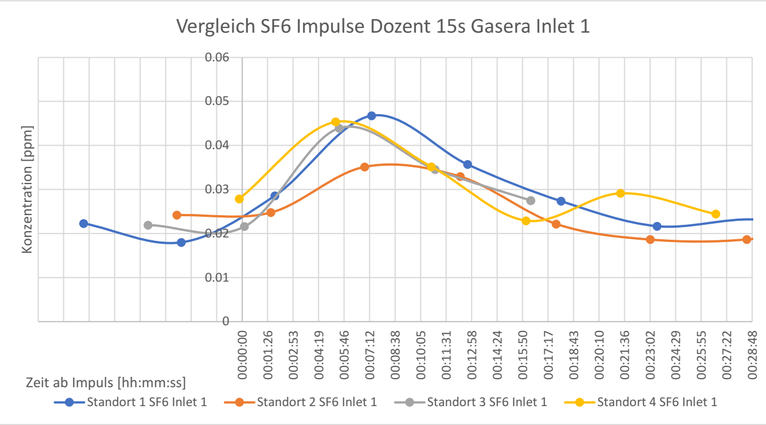
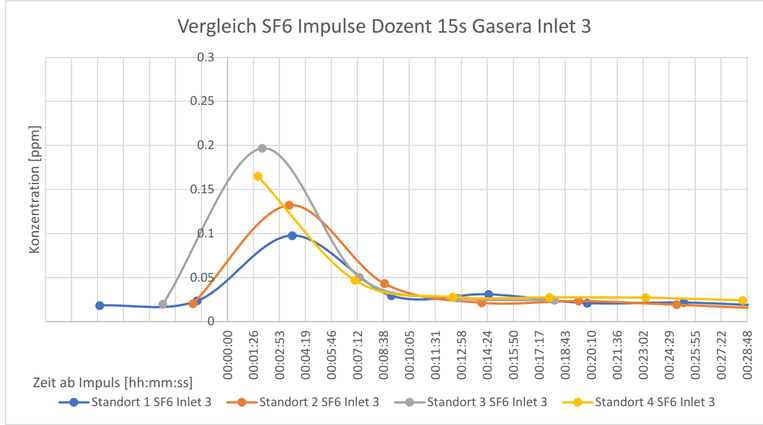
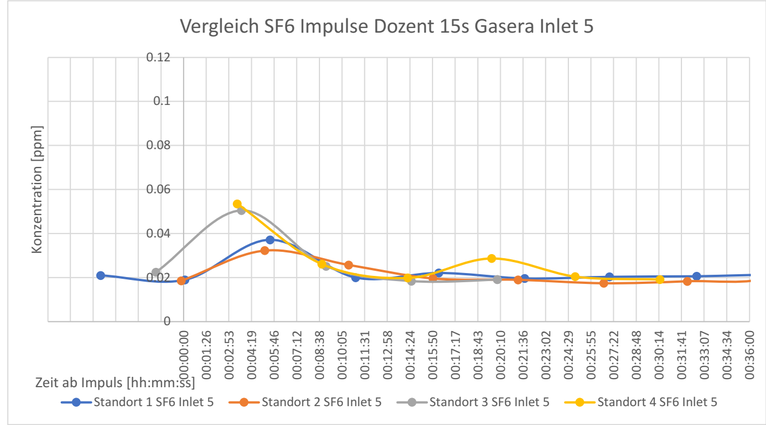


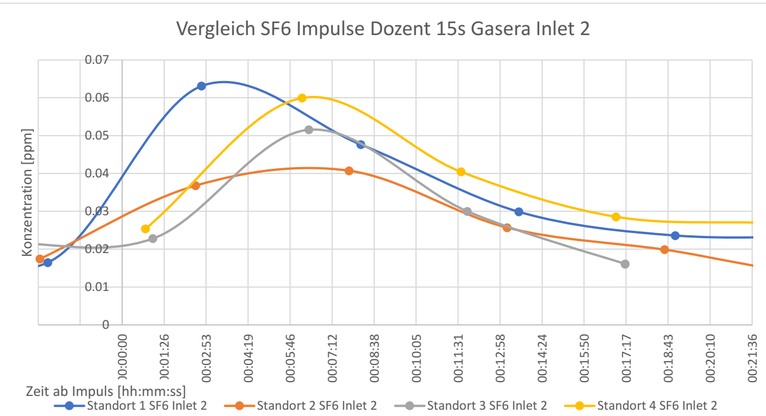
Diagramm SF6 Puls Dozent 15s

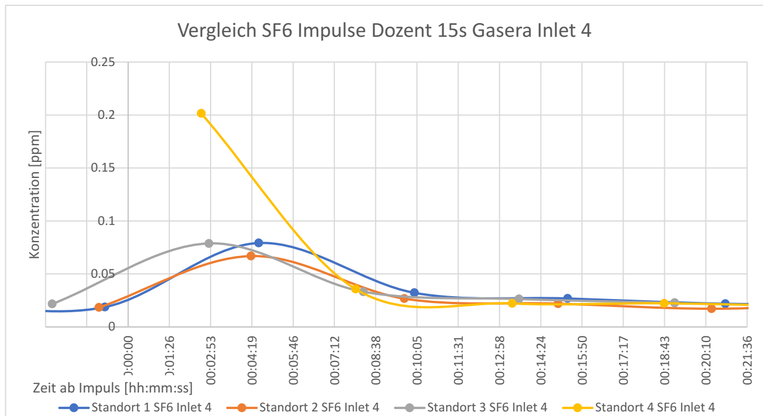
Gasera

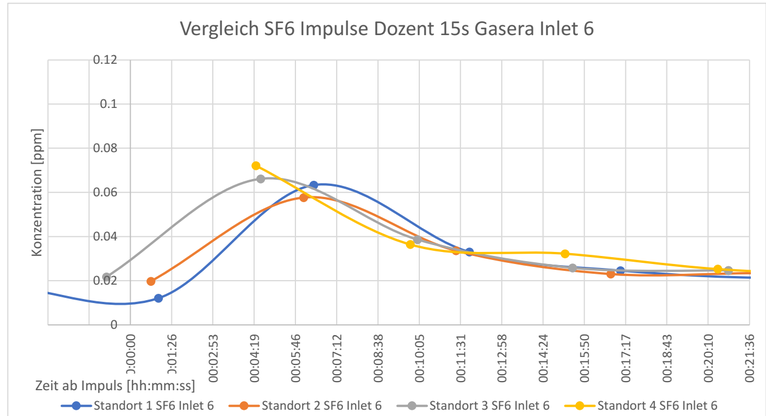




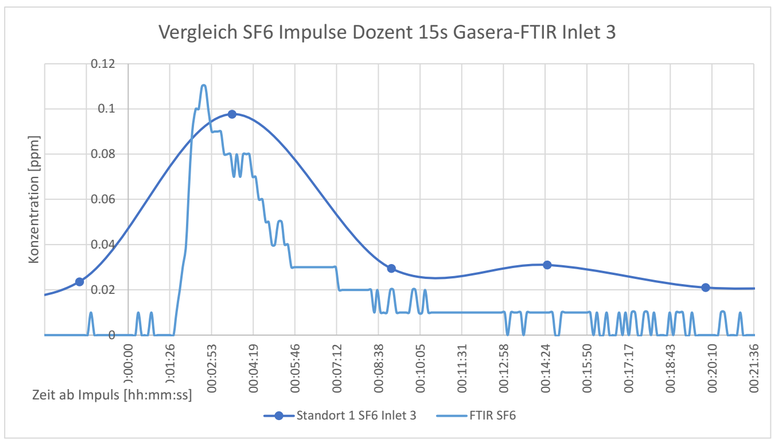


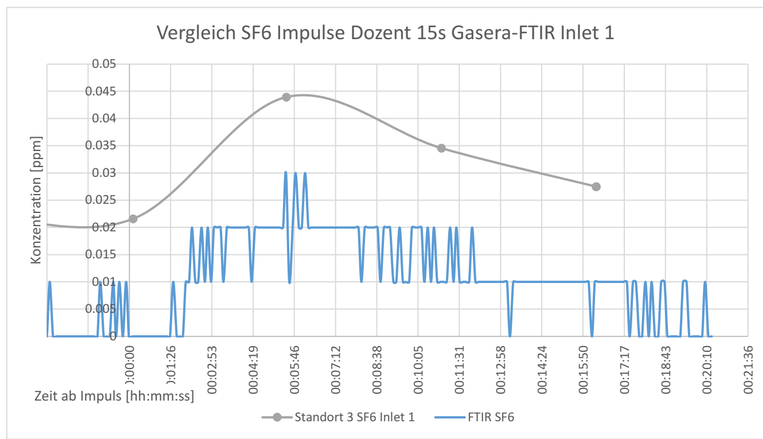






Vergleich Gasera mit FTIR





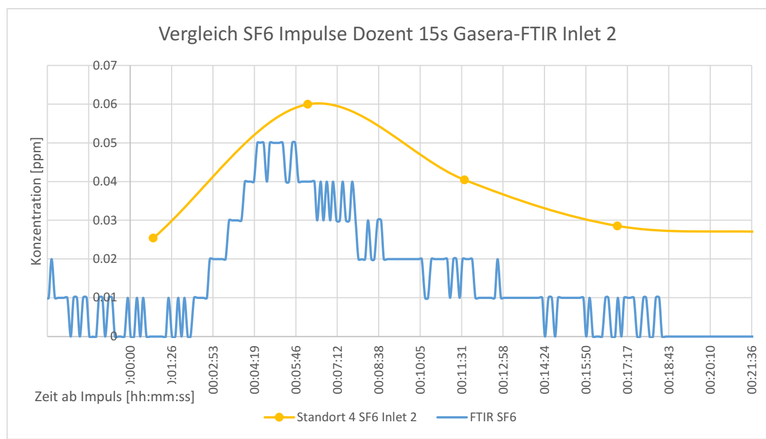
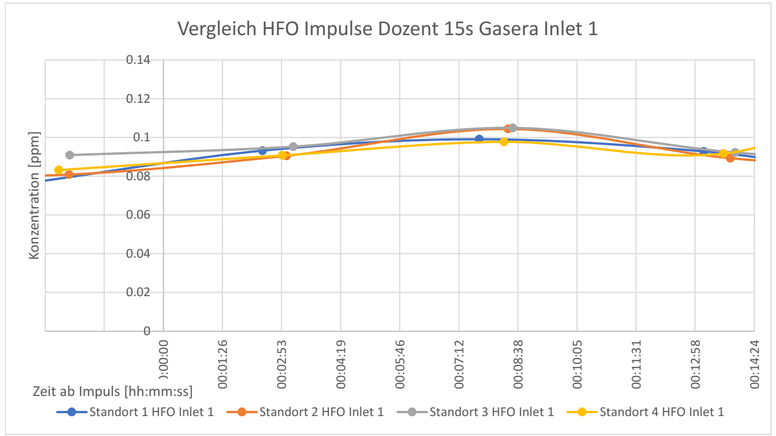
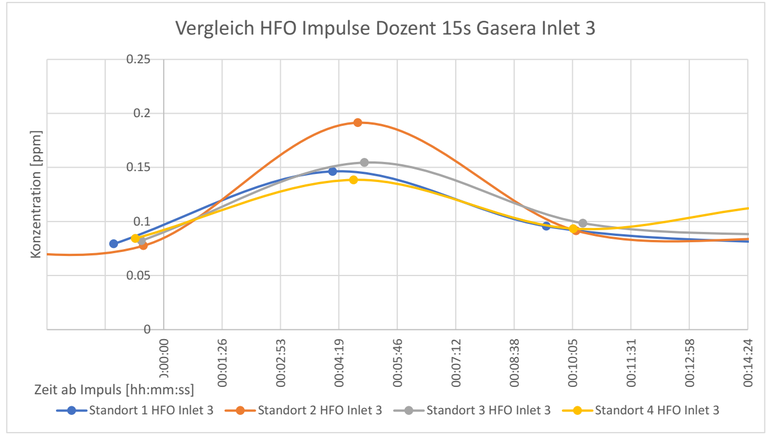
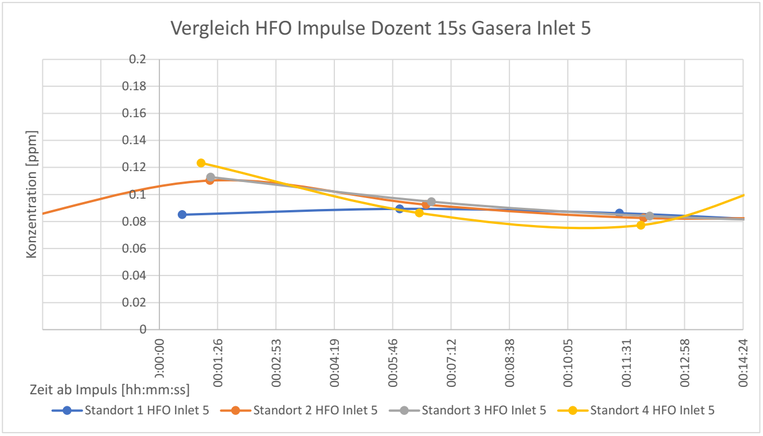


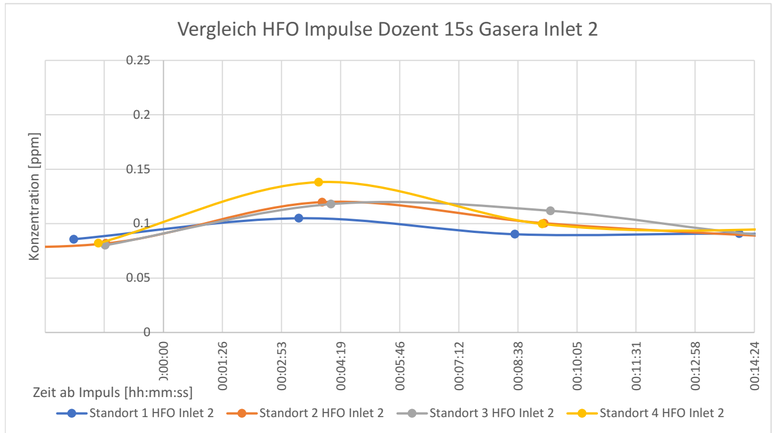
Diagramm HFO Puls Dozent 15s

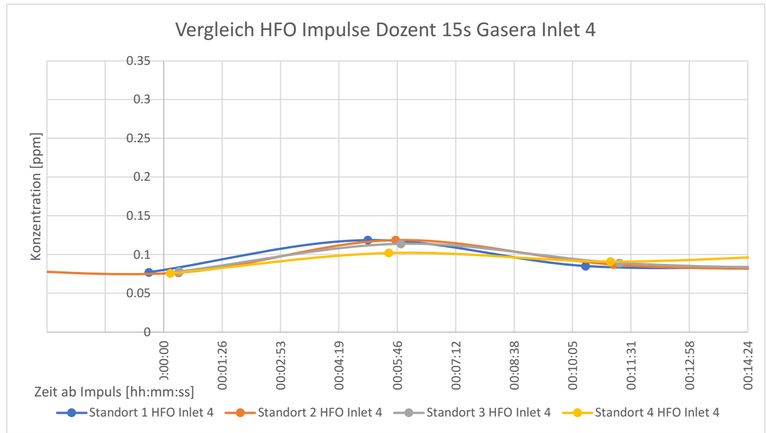
Gasera

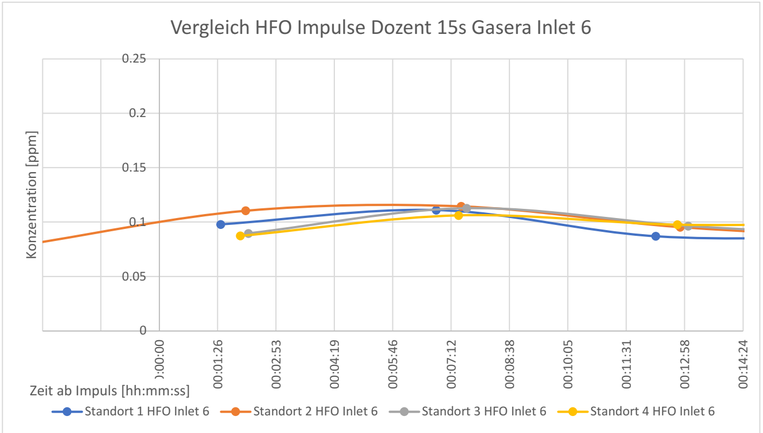




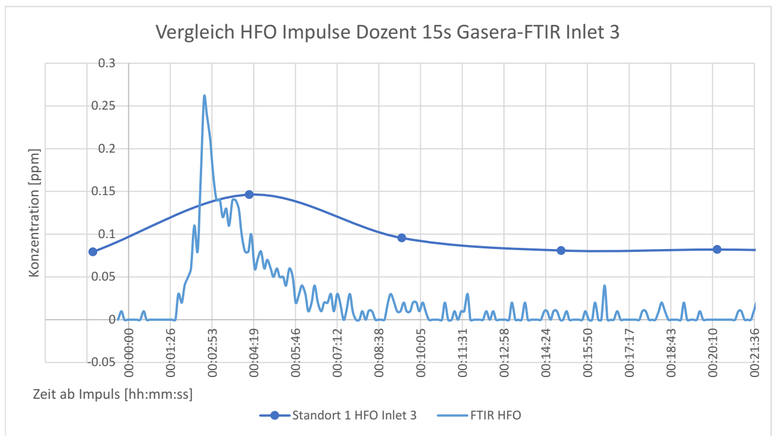


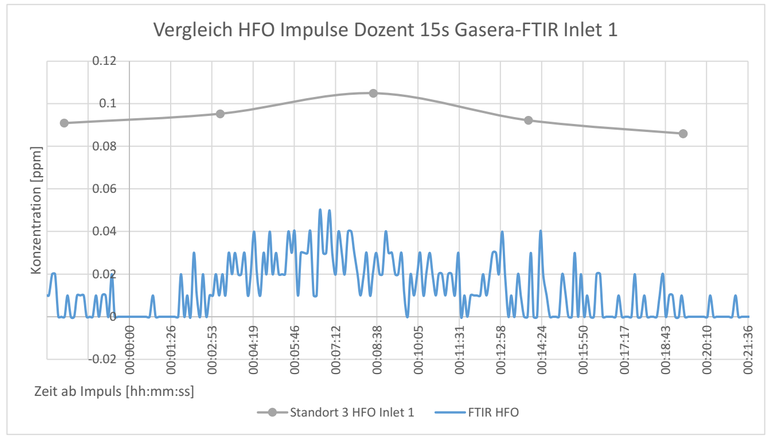






Vergleich Gasera mit FTIR





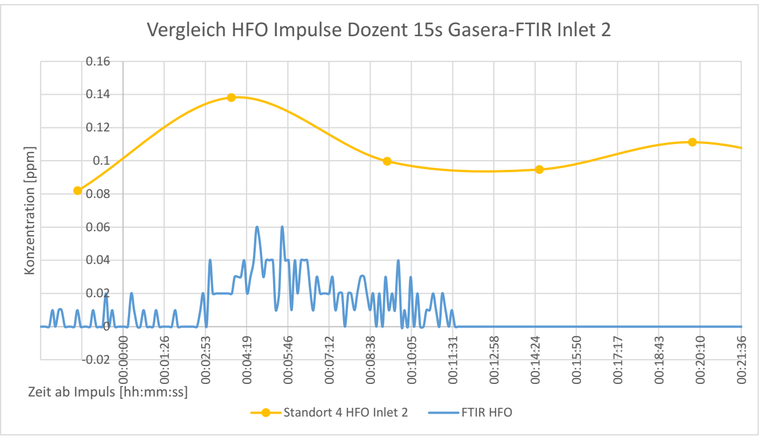
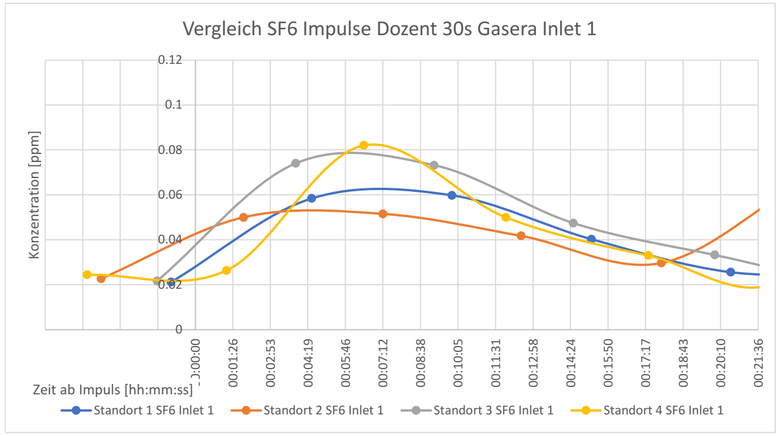
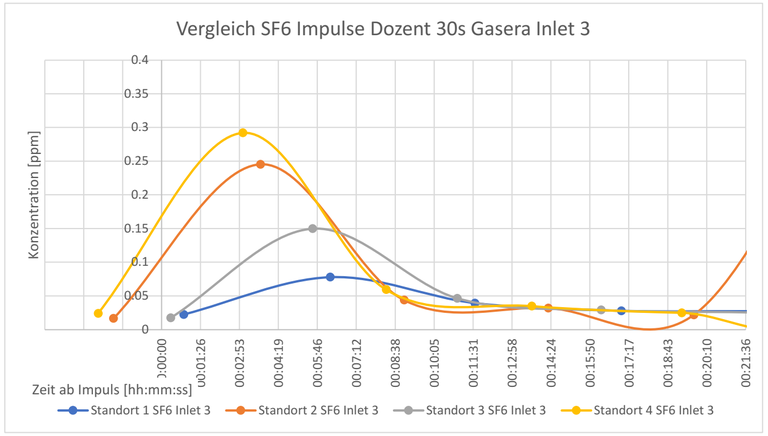
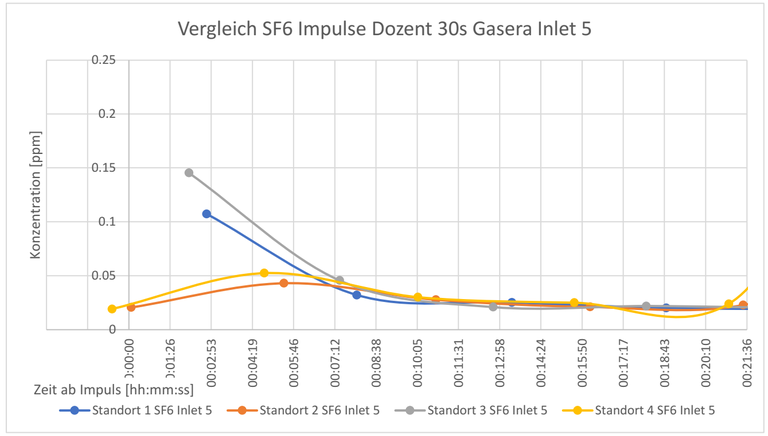


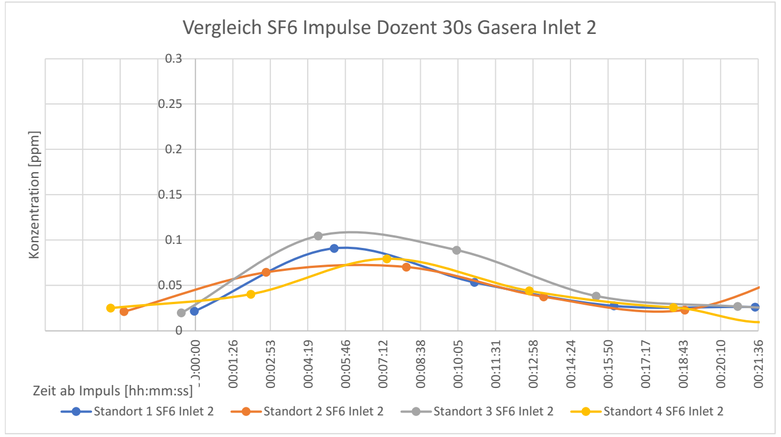
Diagramm SF6 Puls Dozent 30s

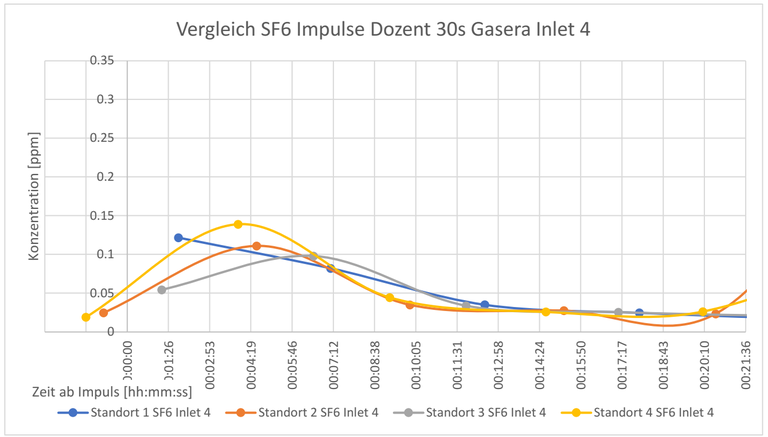
Gasera

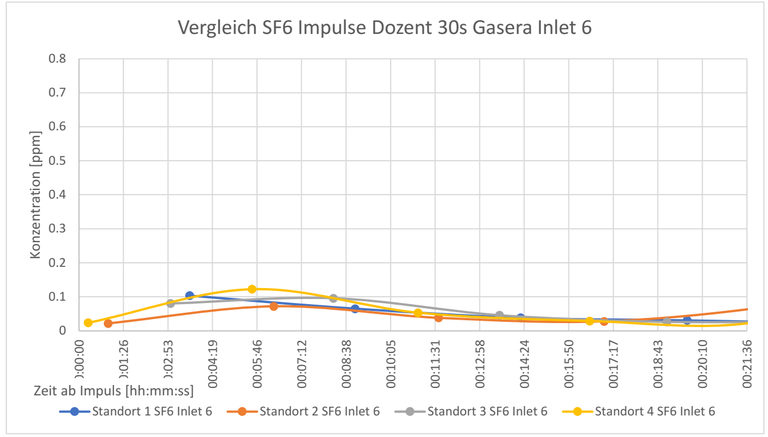




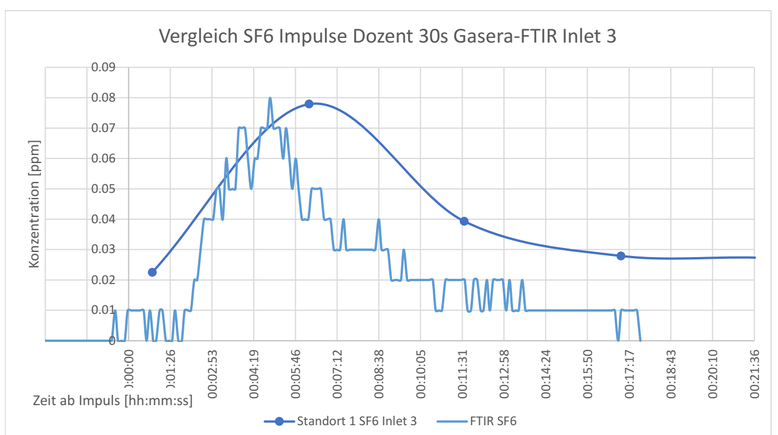


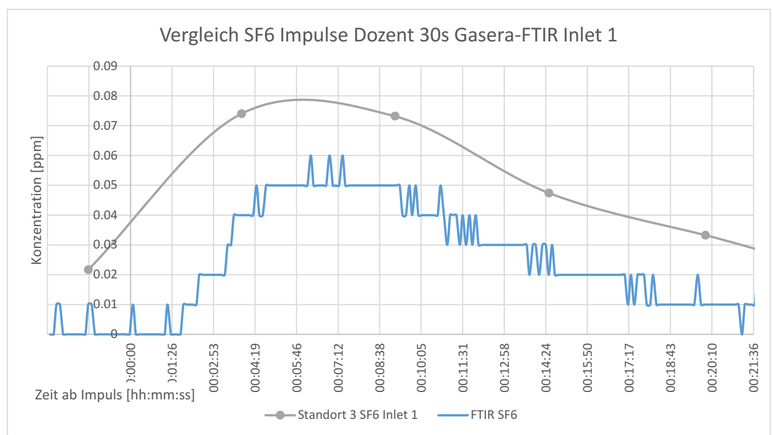






Vergleich Gasera mit FTIR





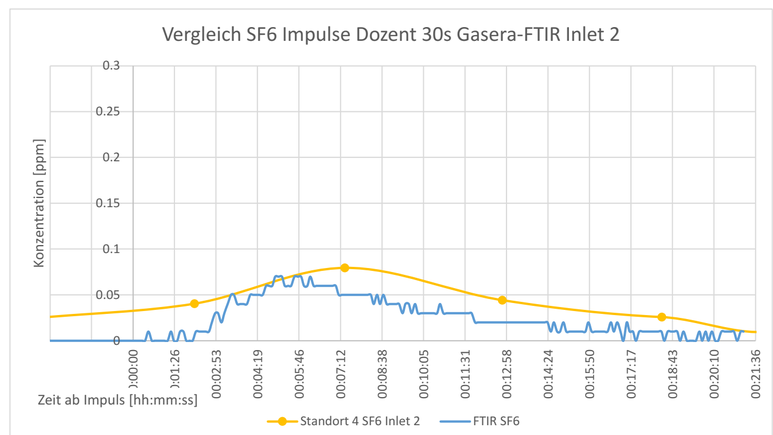
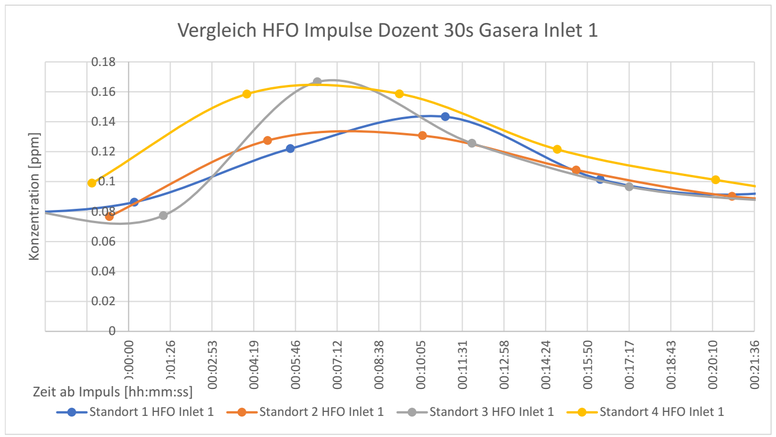
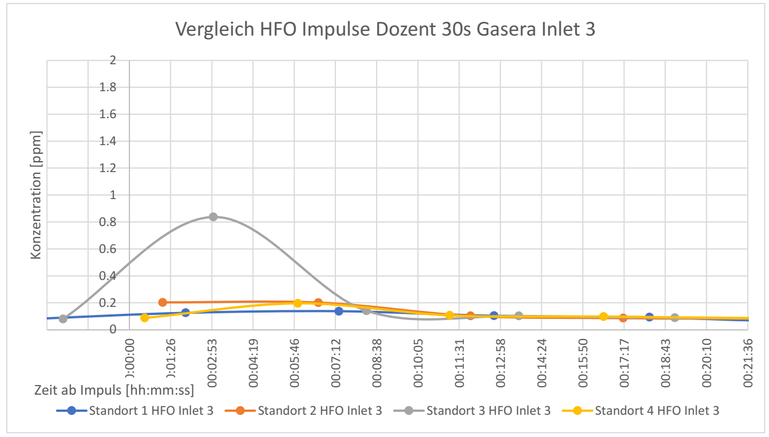
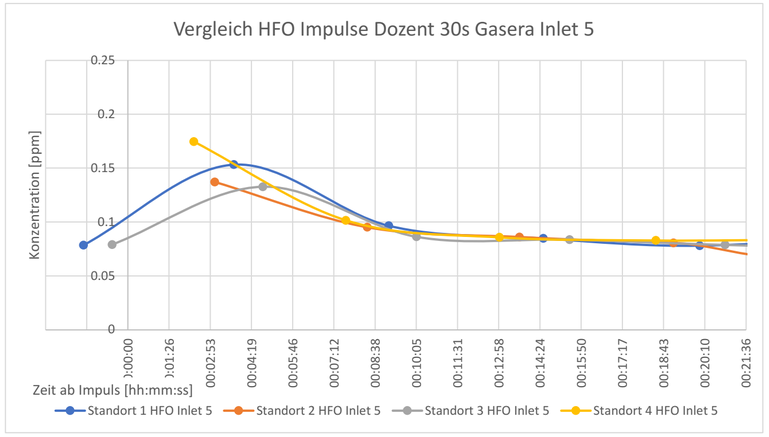


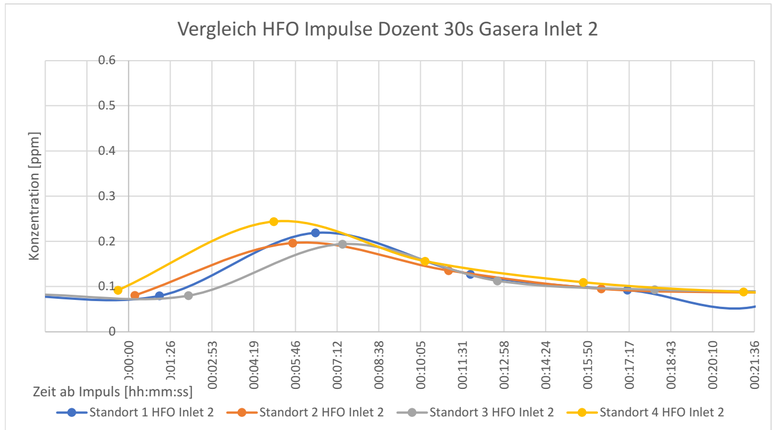
Diagramm HFO Puls Dozent30s

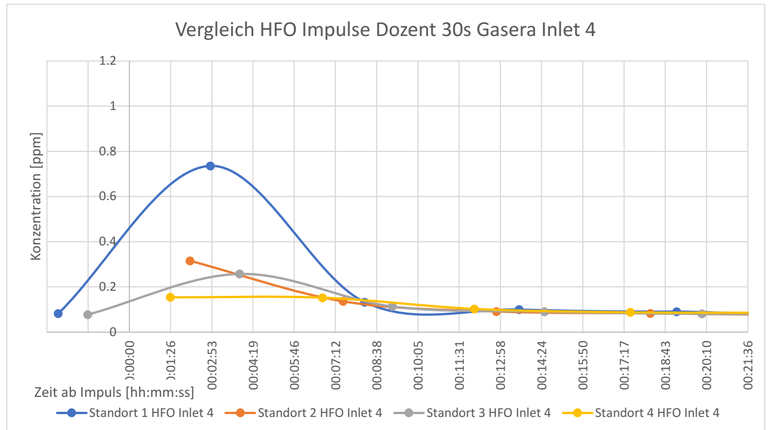
Gasera

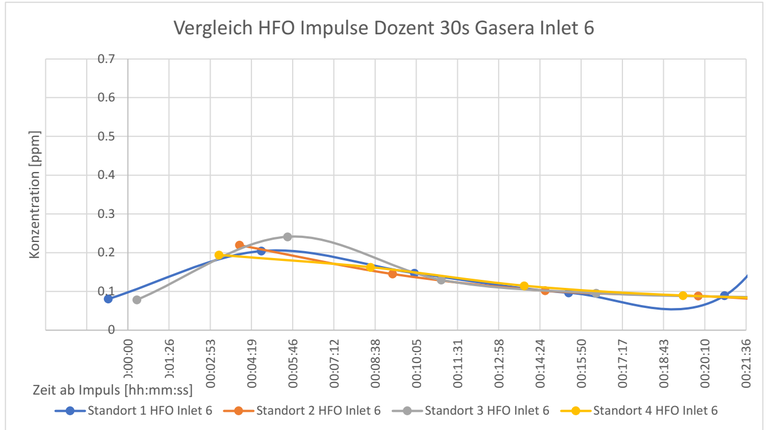




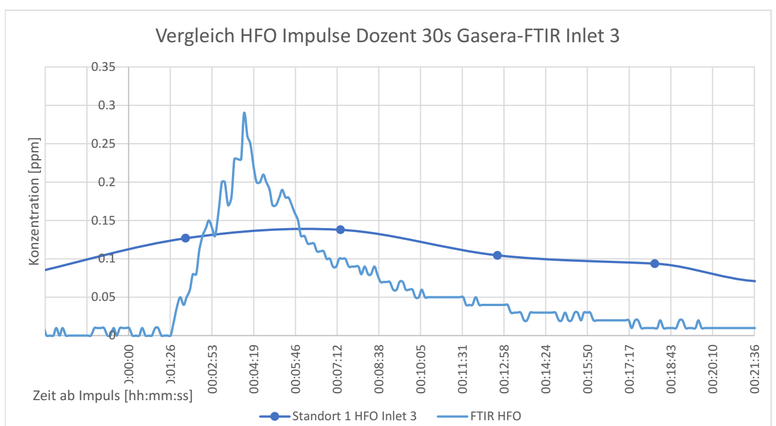


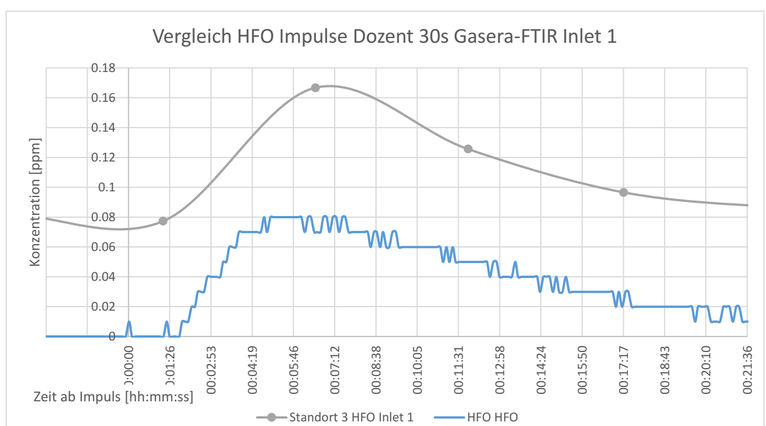






Vergleich Gasera mit FTIR





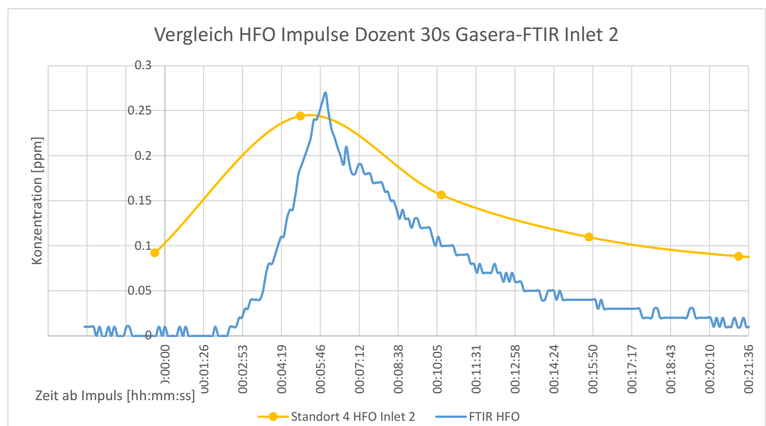
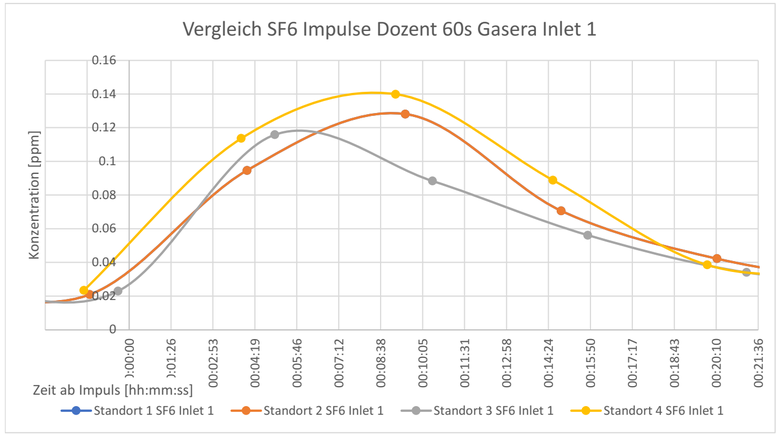
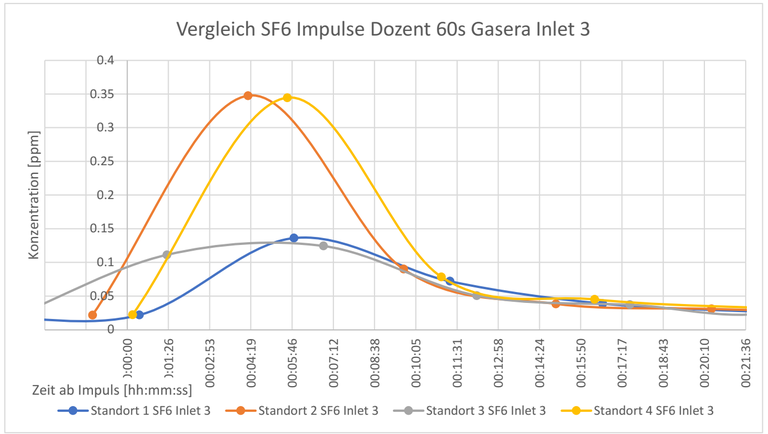
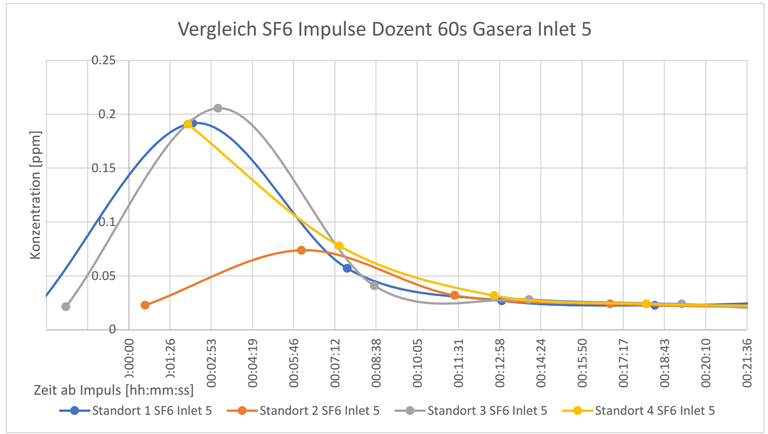


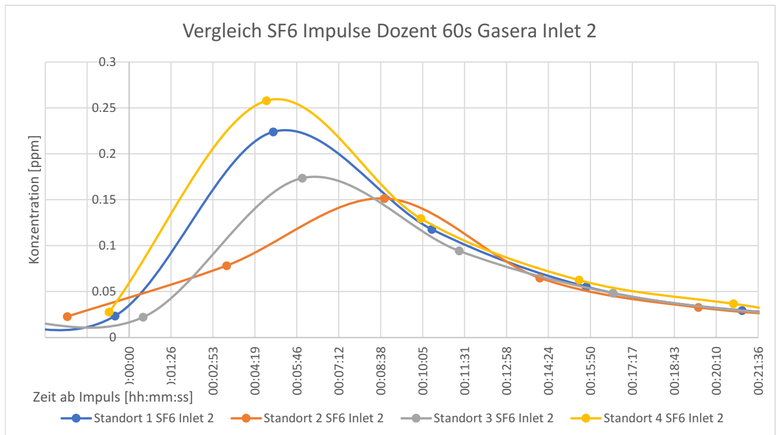
Diagramm SF6 Puls Dozent 60s

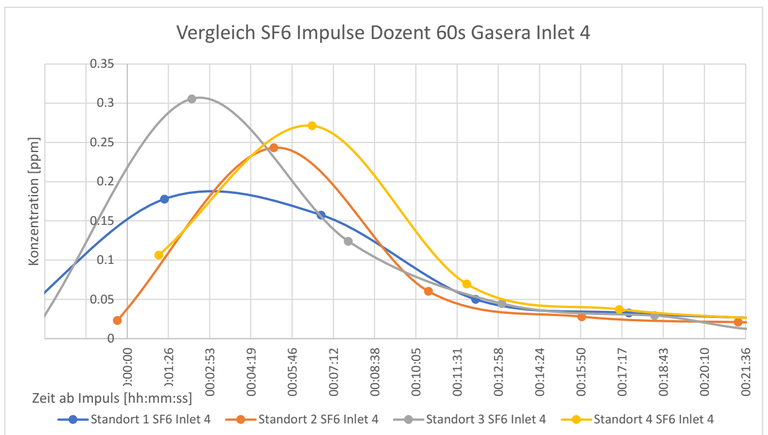
Gasera

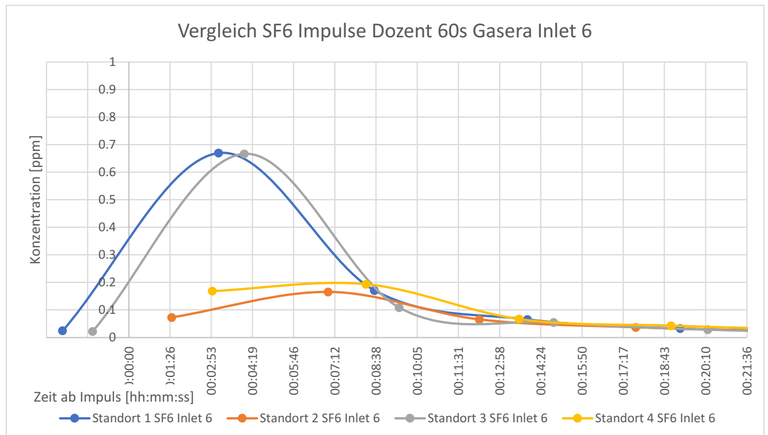




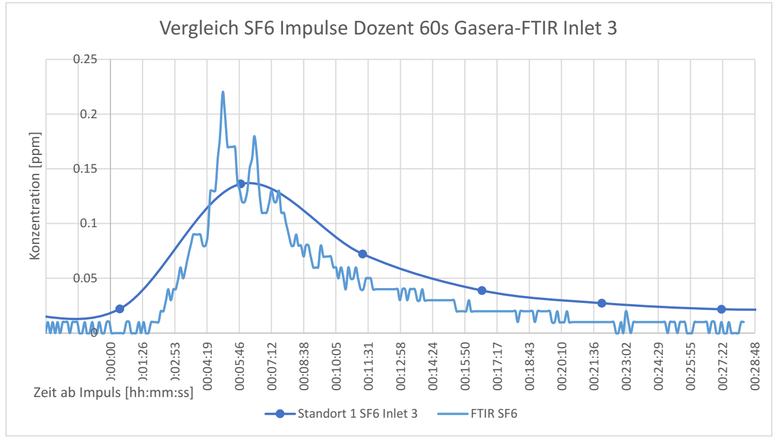


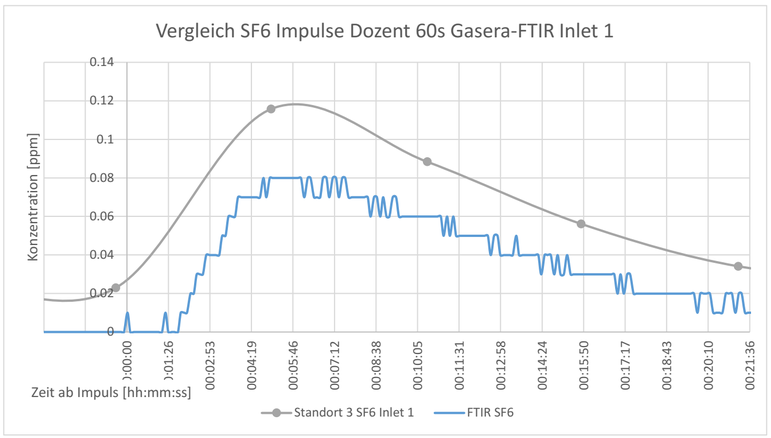






Vergleich Gasera mit FTIR





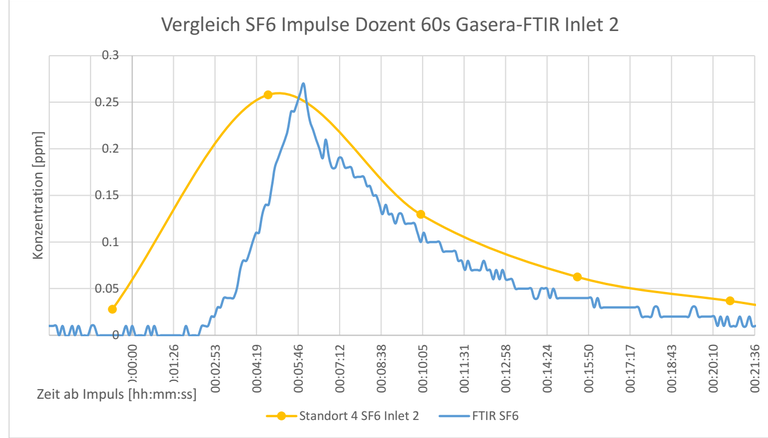
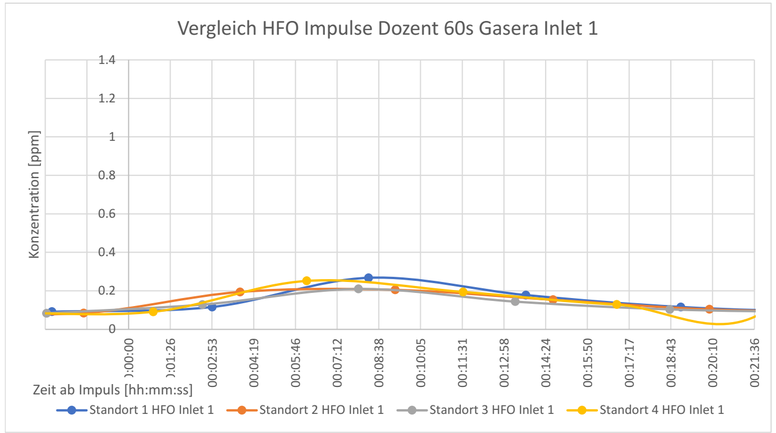
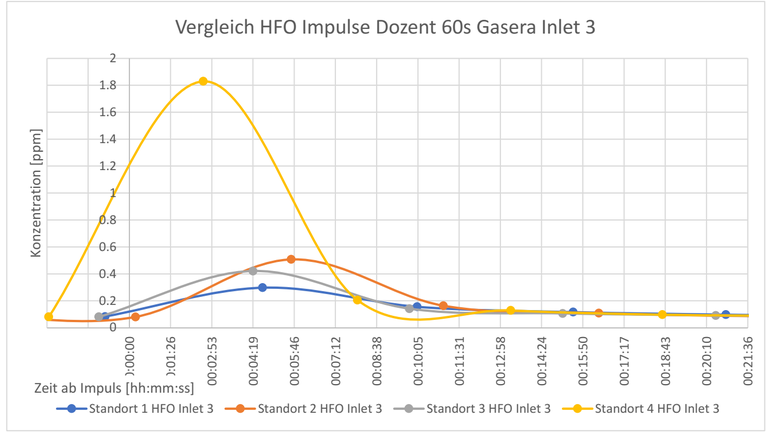
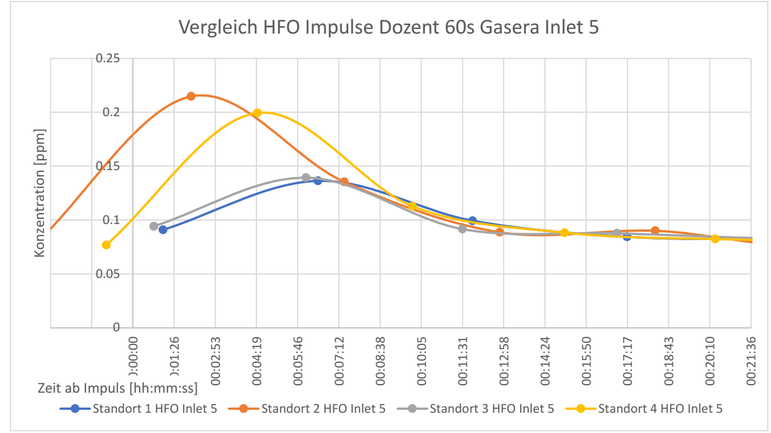


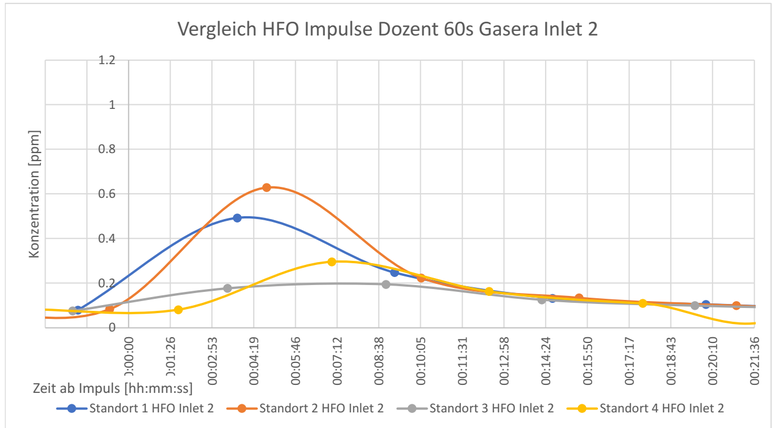
Diagramm HFO Puls Dozent 60s

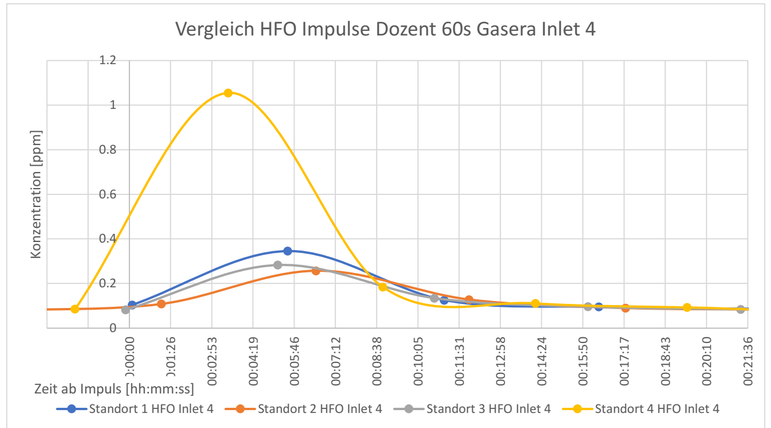
Gasera

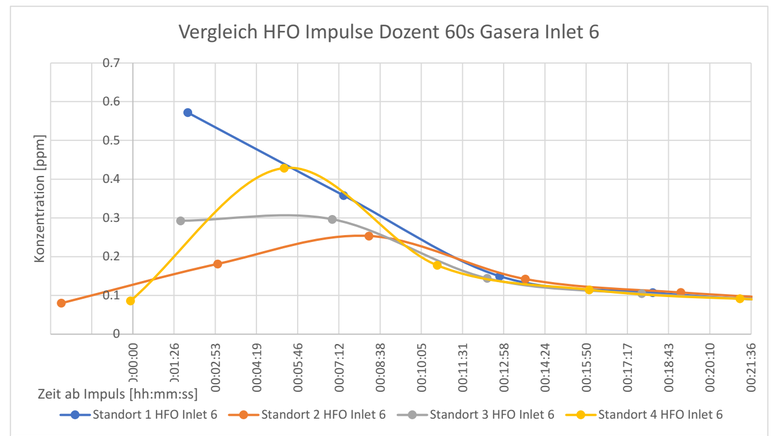




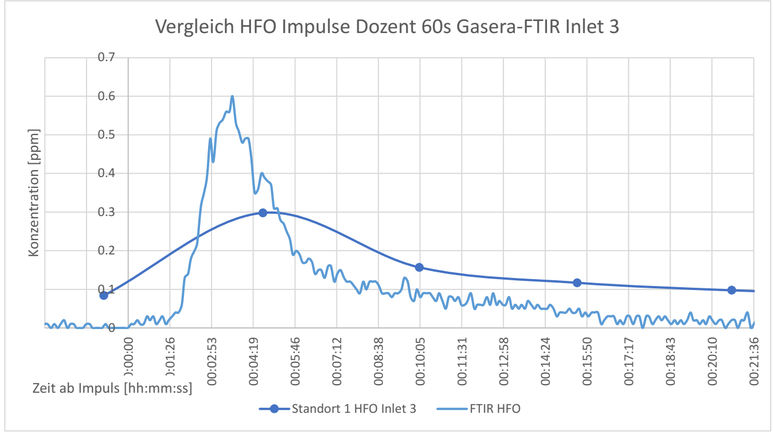


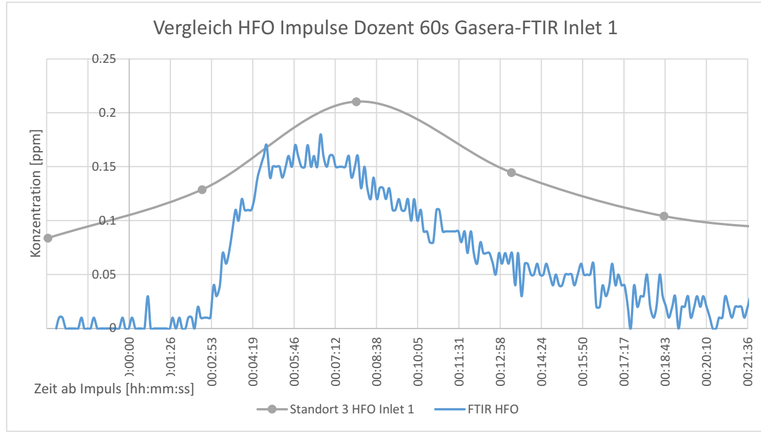






Vergleich Gasera mit FTIR





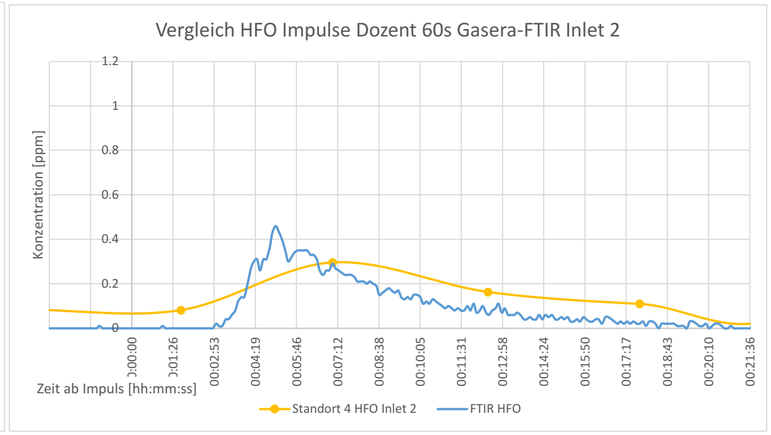
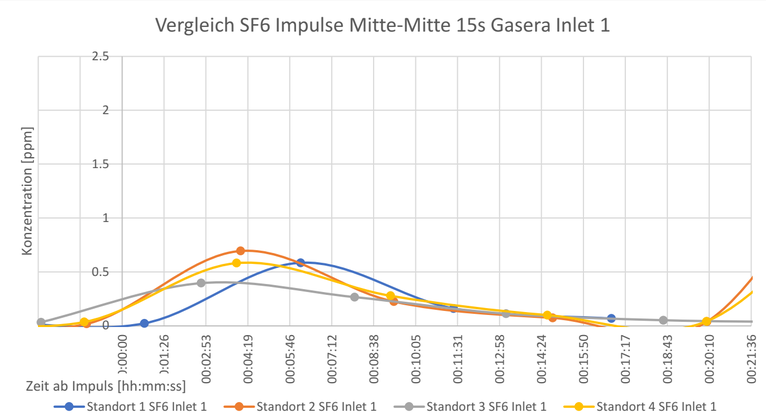
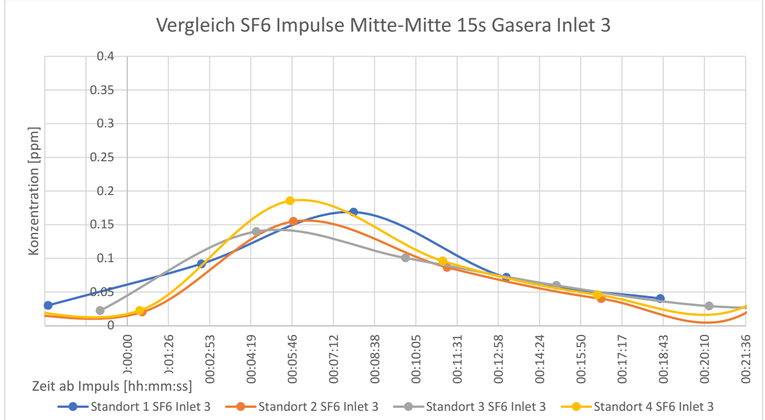
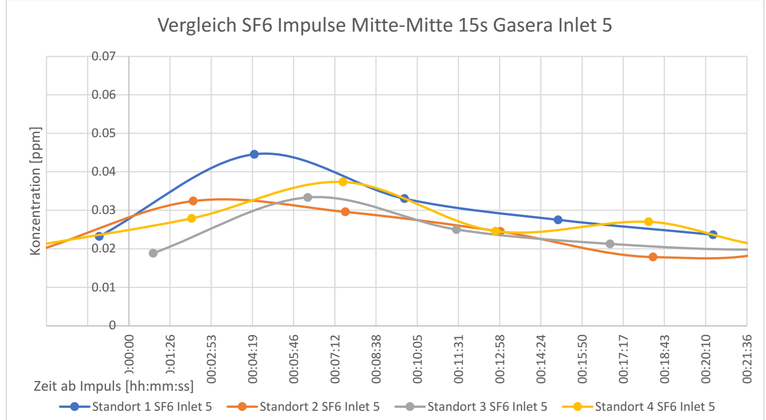


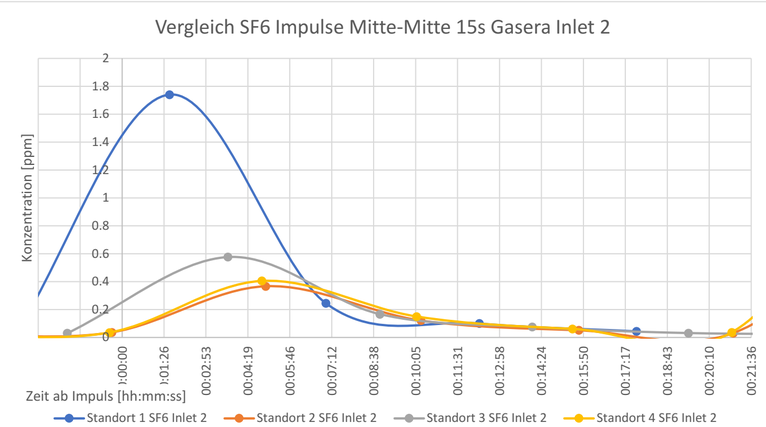
Diagramm SF6 Puls Mitte-Mitte 15s

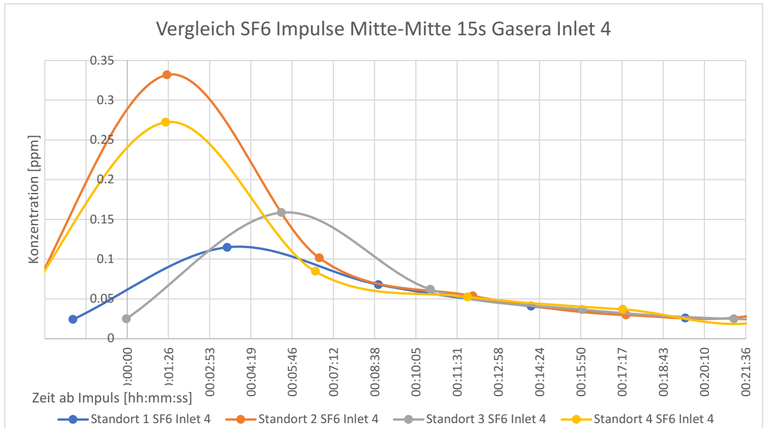
Gasera

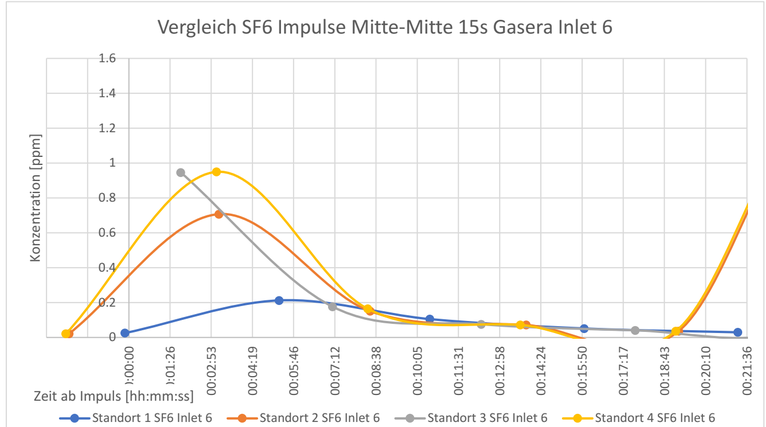




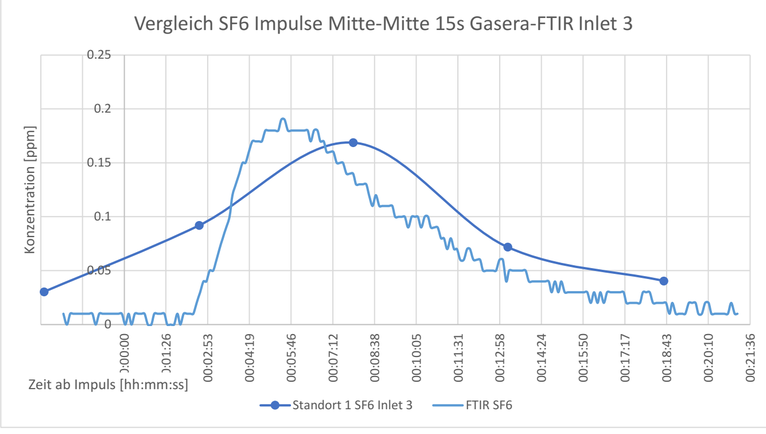


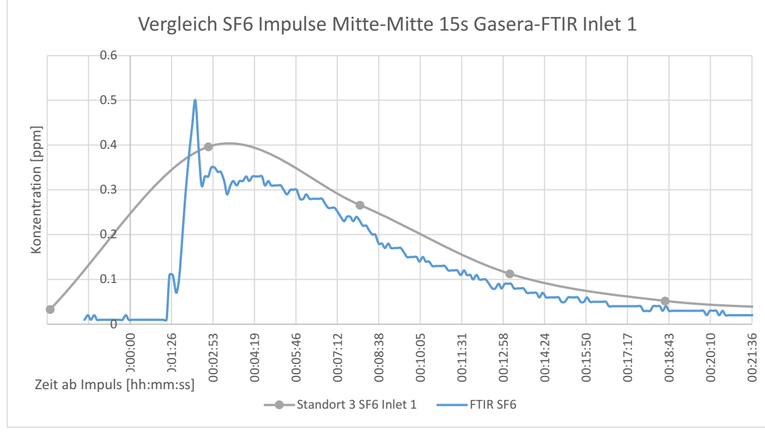






Vergleich Gasera mit FTIR





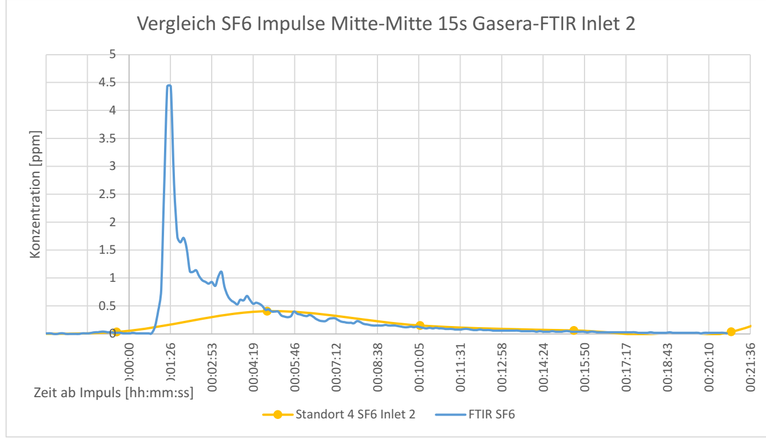
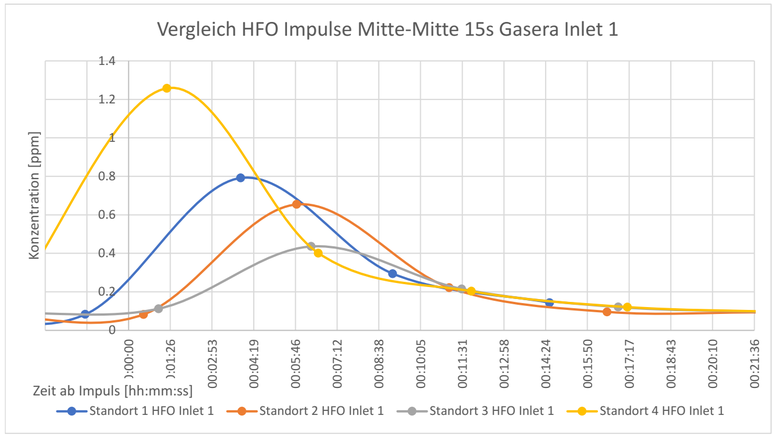
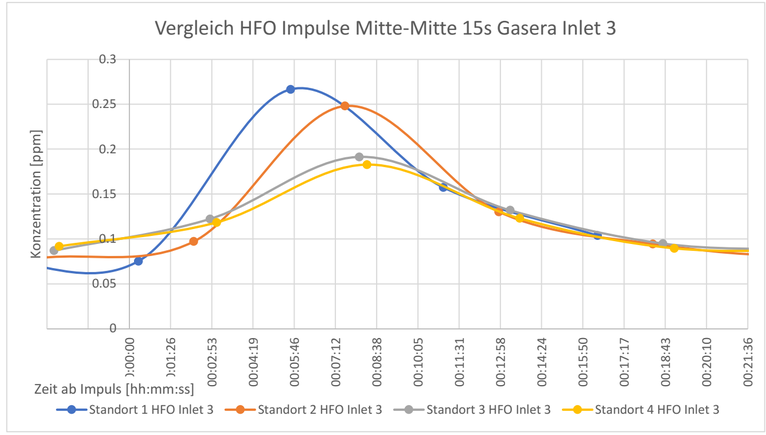
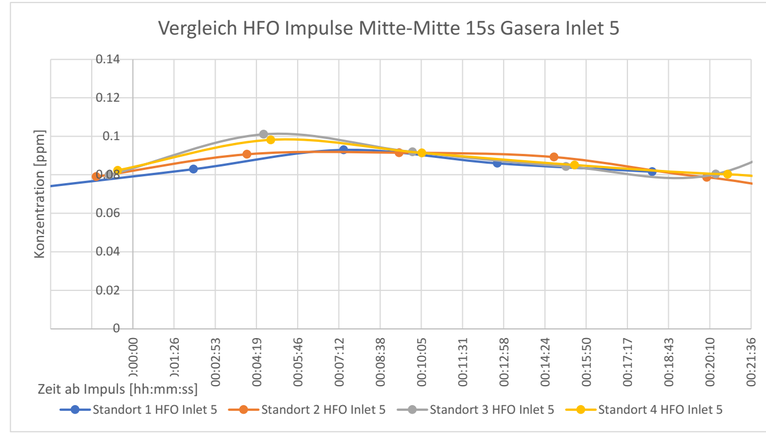


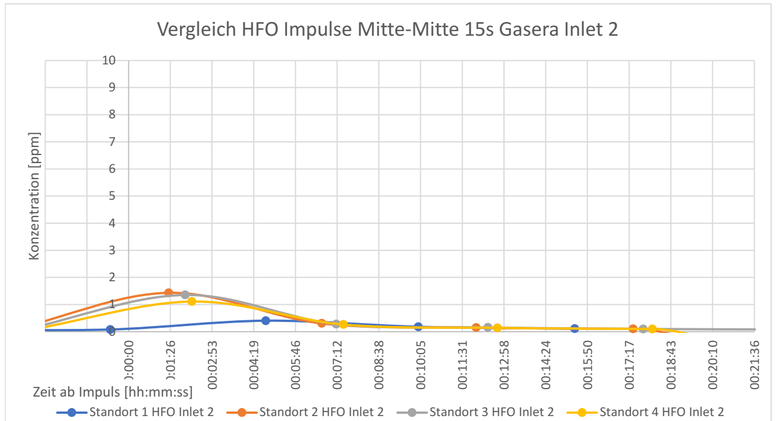
Diagramm HFO Puls Mitte-Mitte 15s

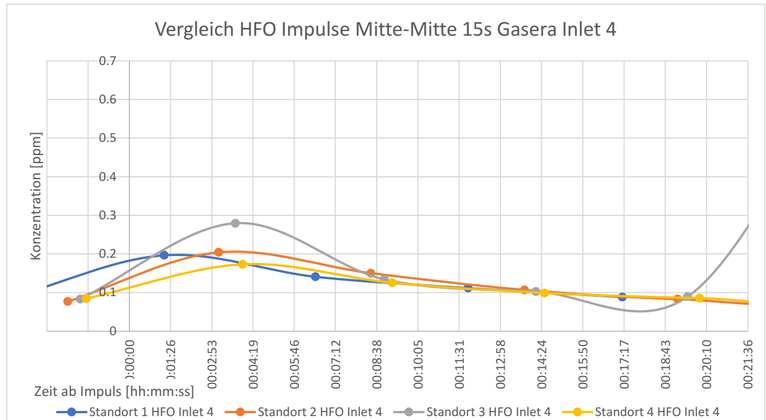
Gasera

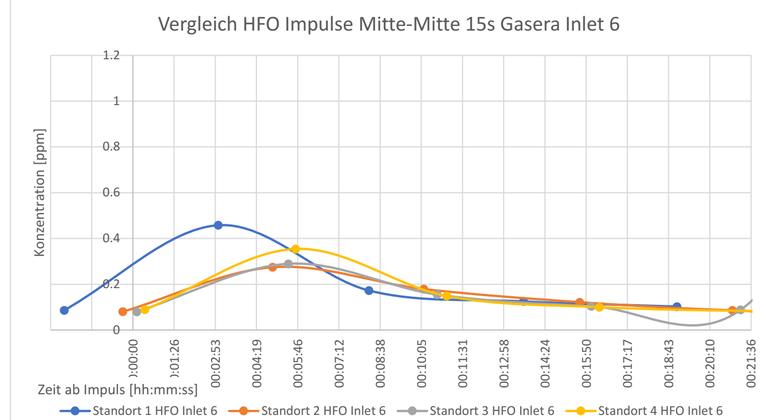




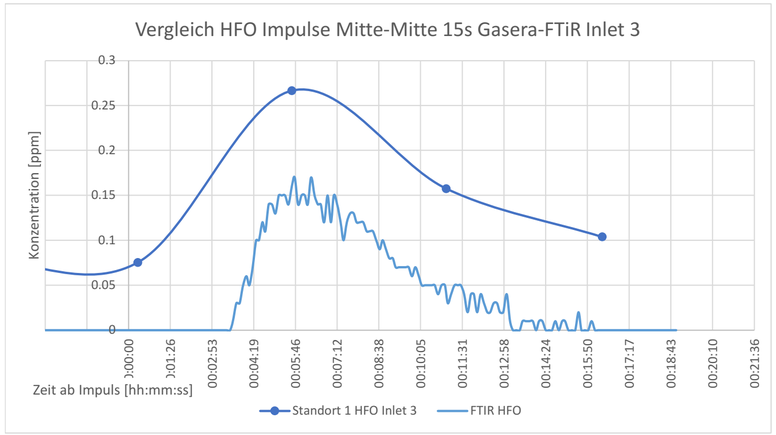


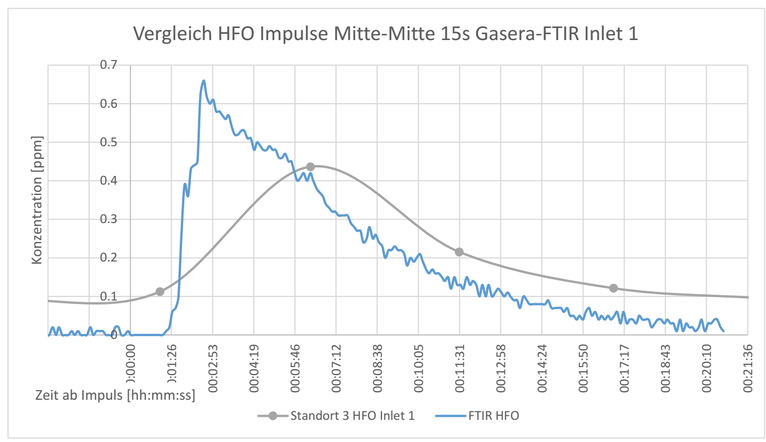






Vergleich Gasera mit FTIR





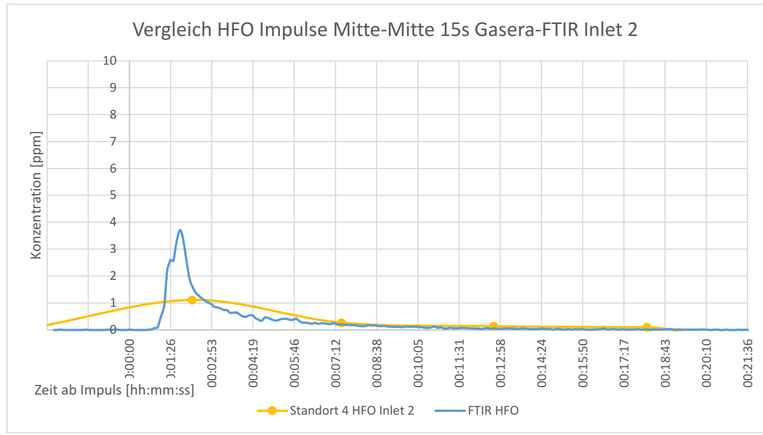
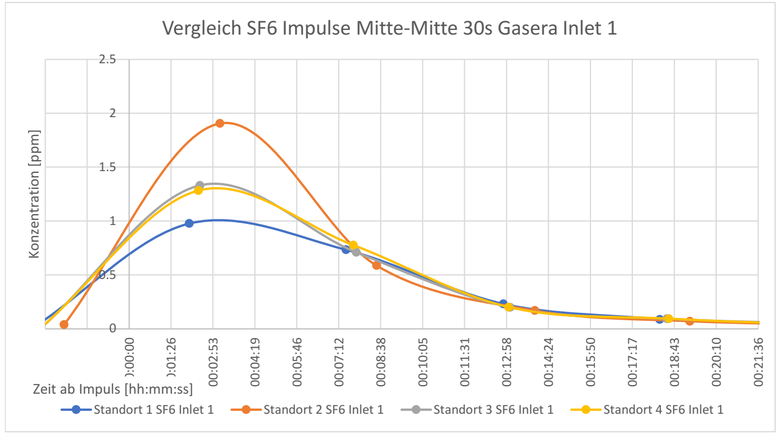
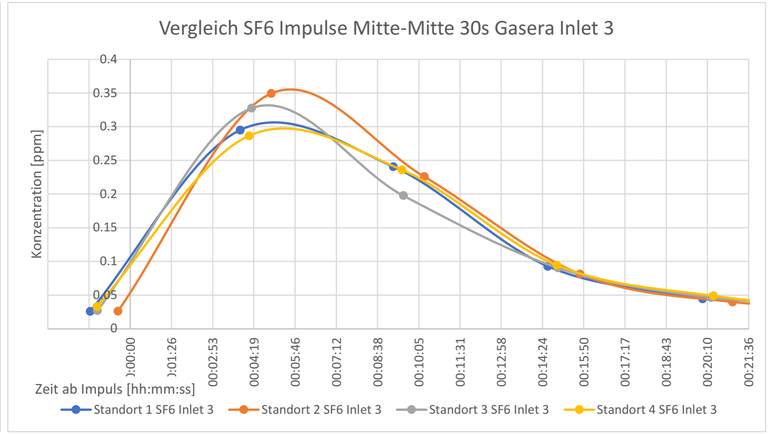
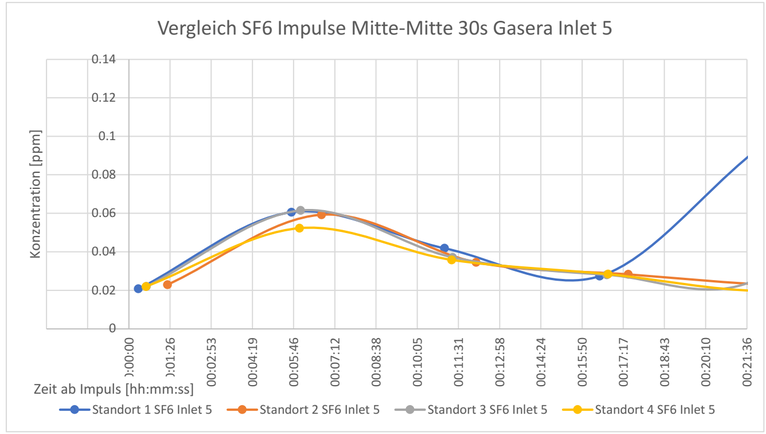


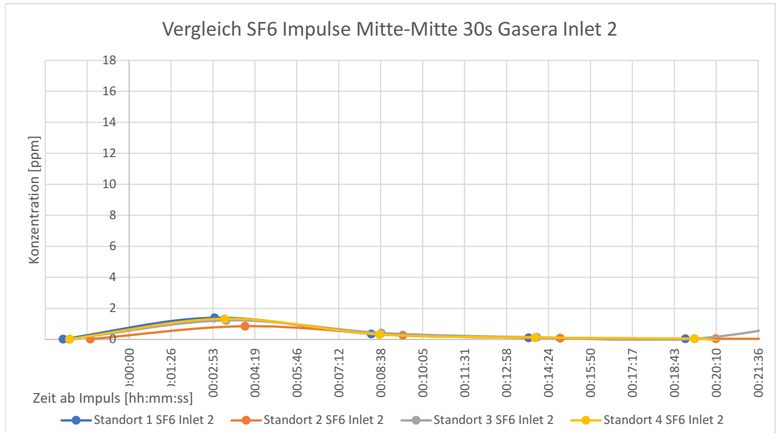
Diagramm SF6 Puls Mitte-Mitte 30s

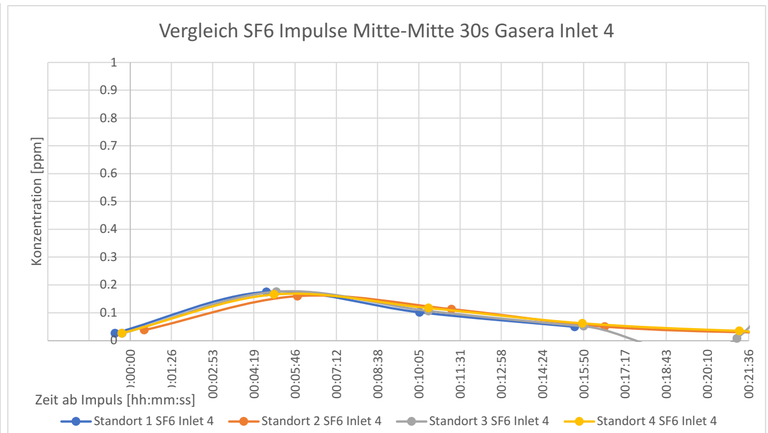
Gasera

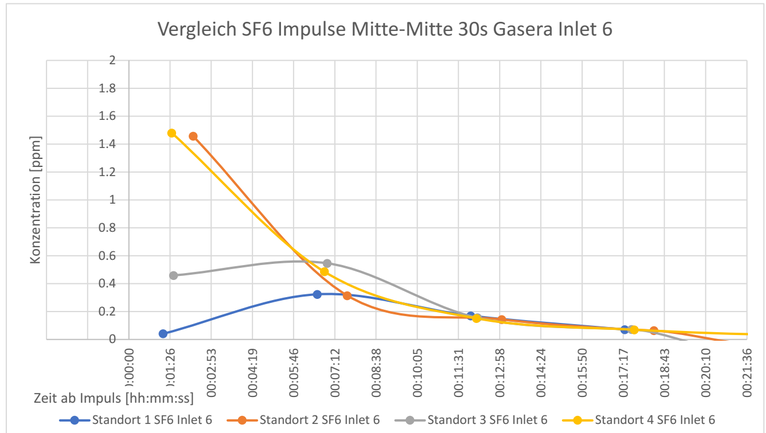




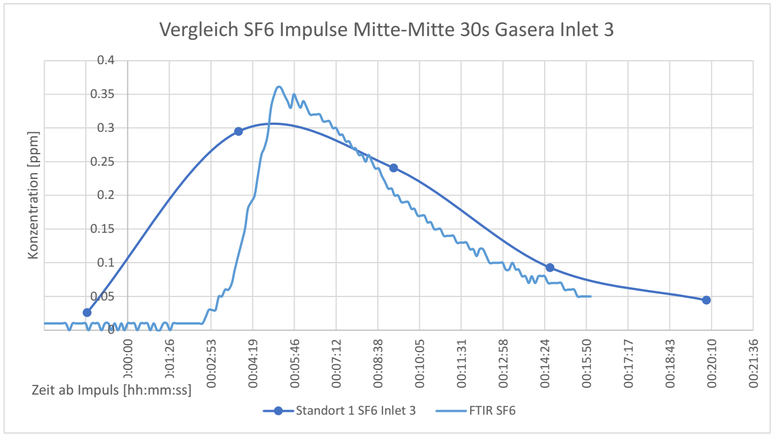


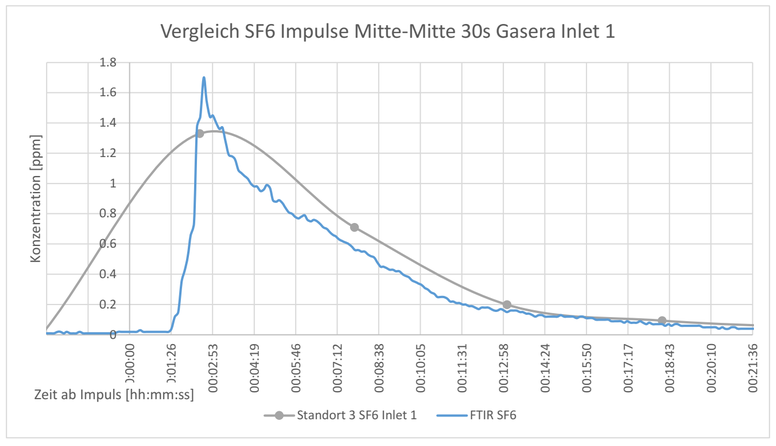






Vergleich Gasera mit FTIR





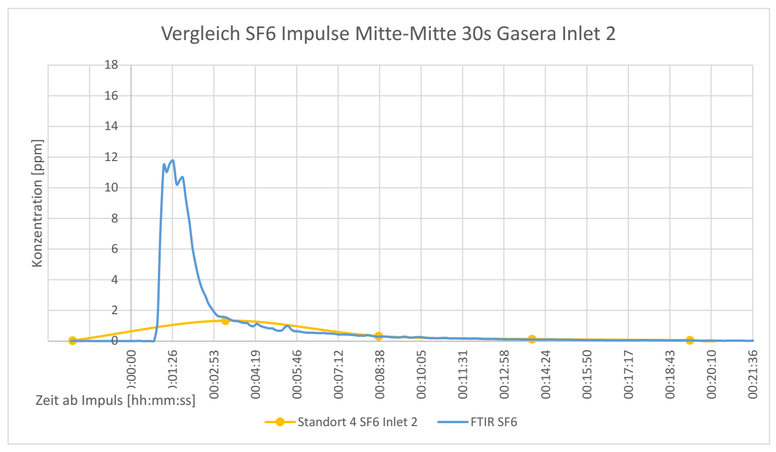
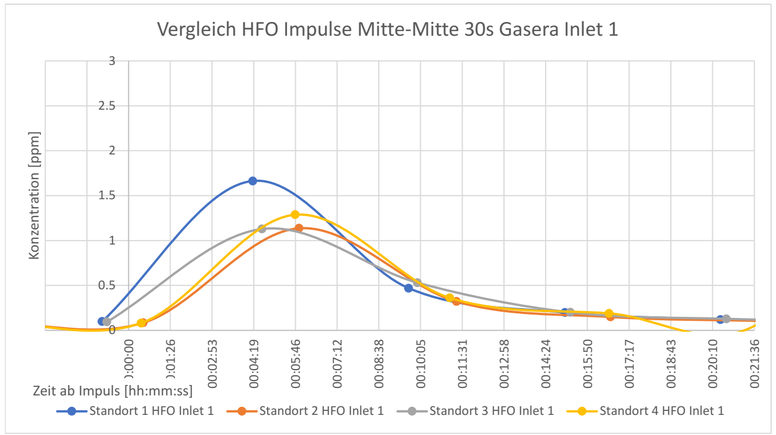
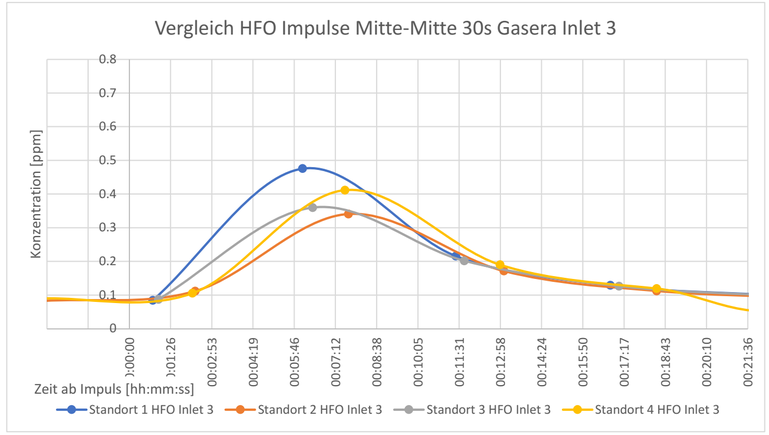
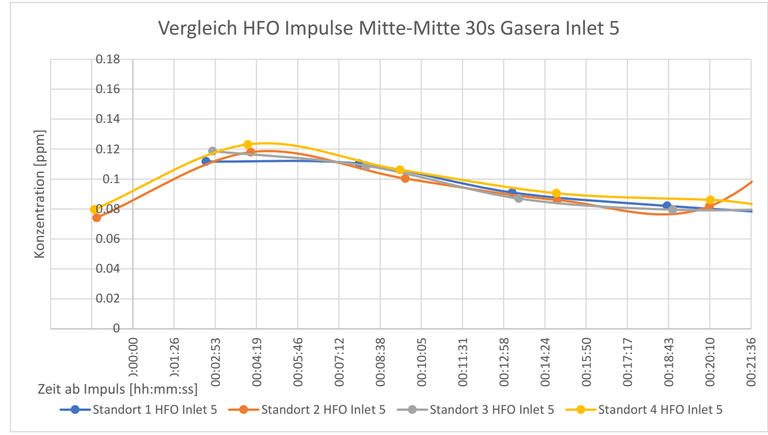


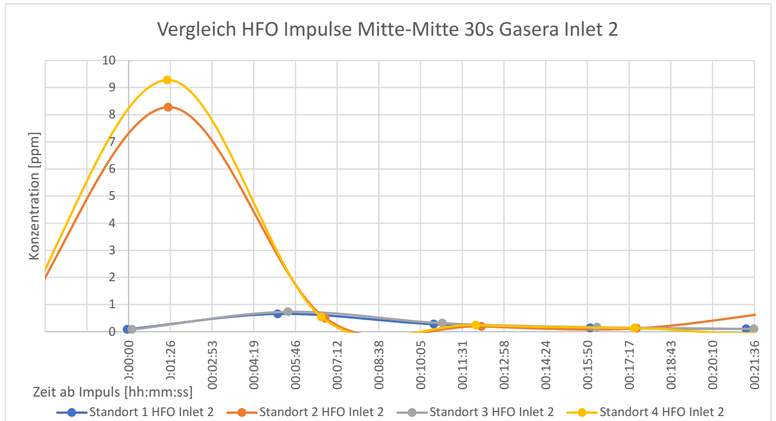
Diagramm HFO Puls Mitte-Mitte 30s

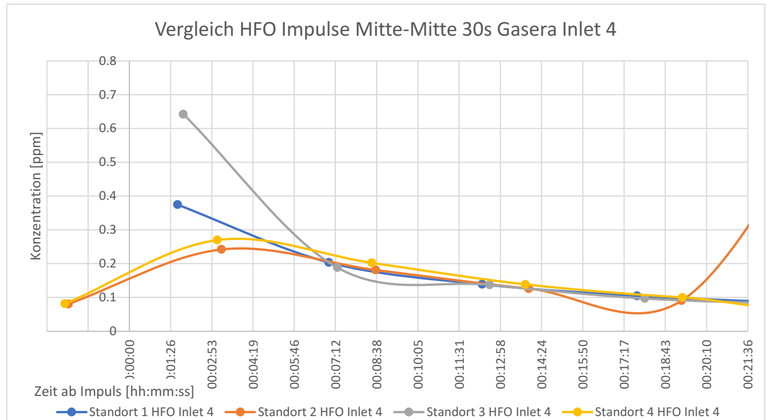
Gasera

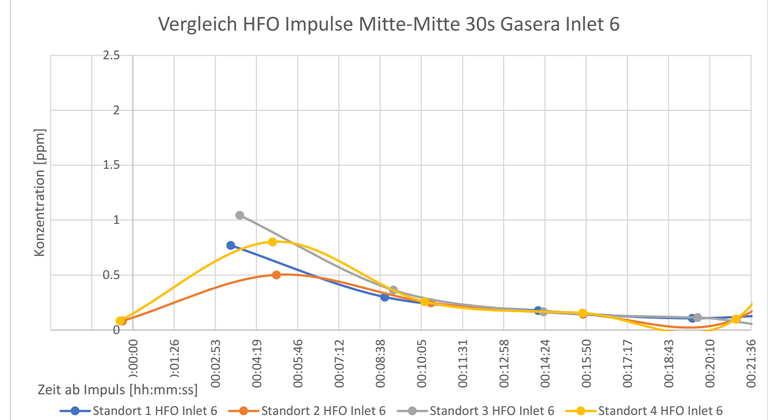




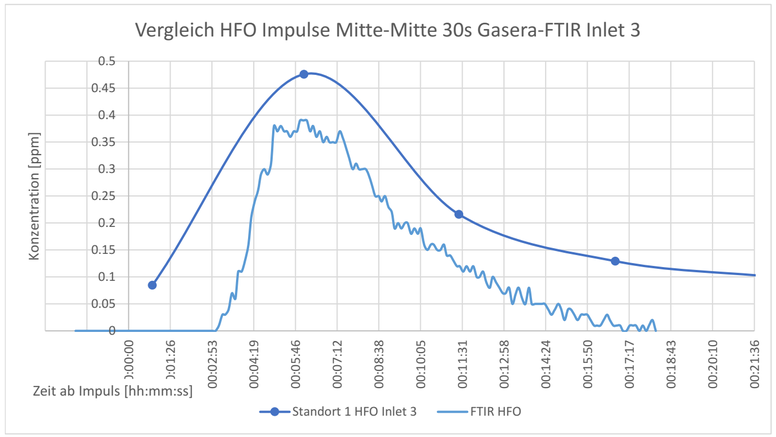


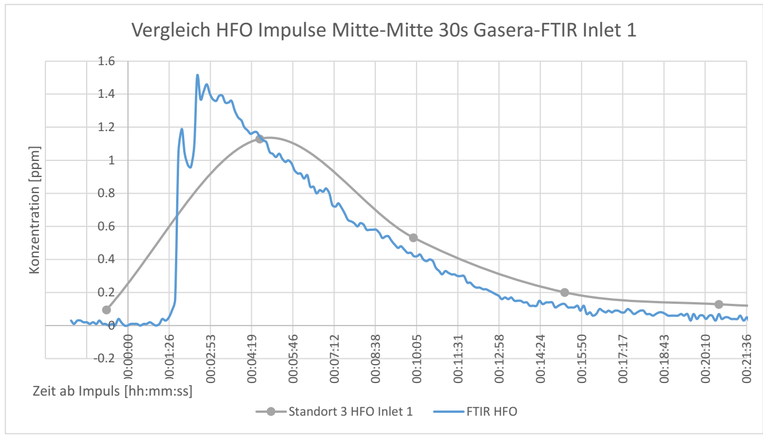






Vergleich Gasera mit FTIR





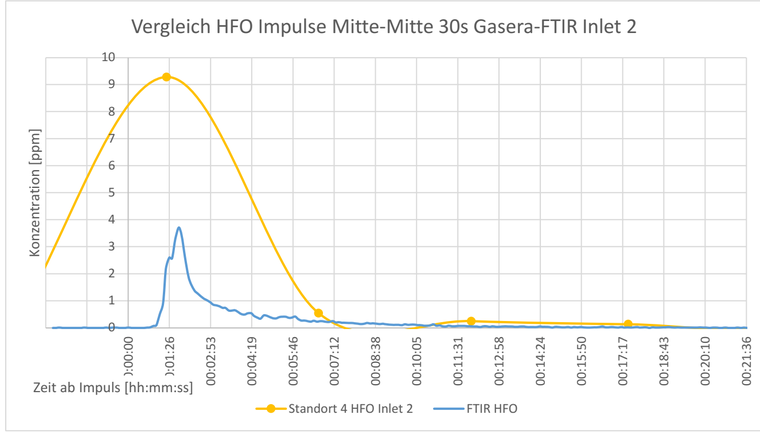
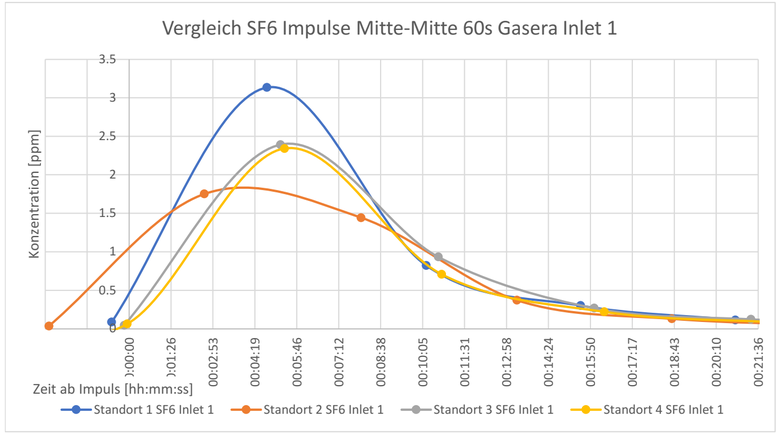
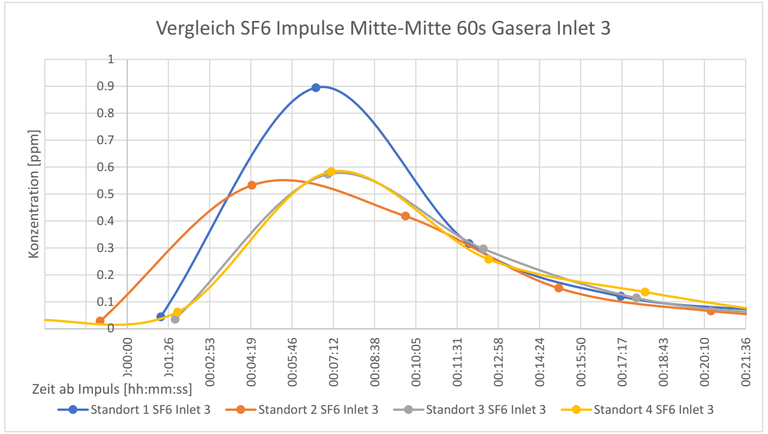
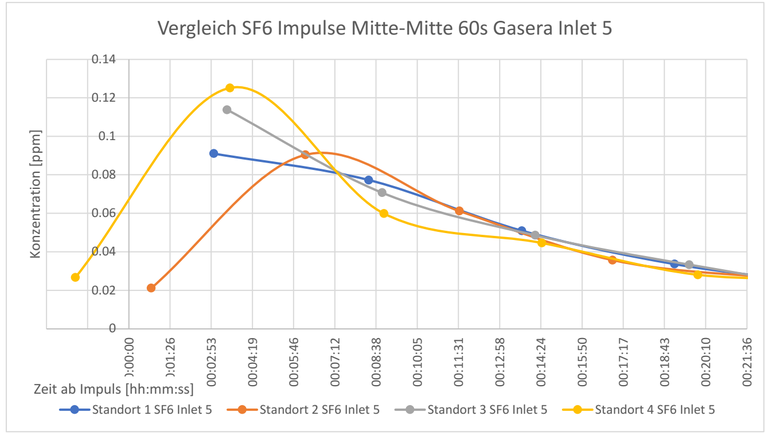


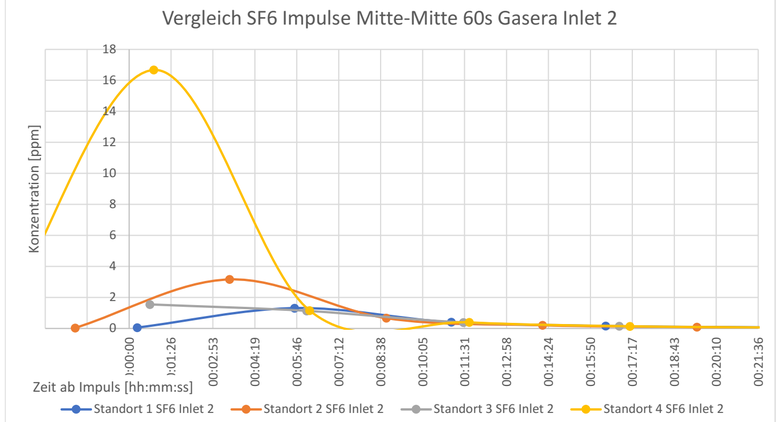
Diagramm SF6 Puls Mitte-Mitte 60s

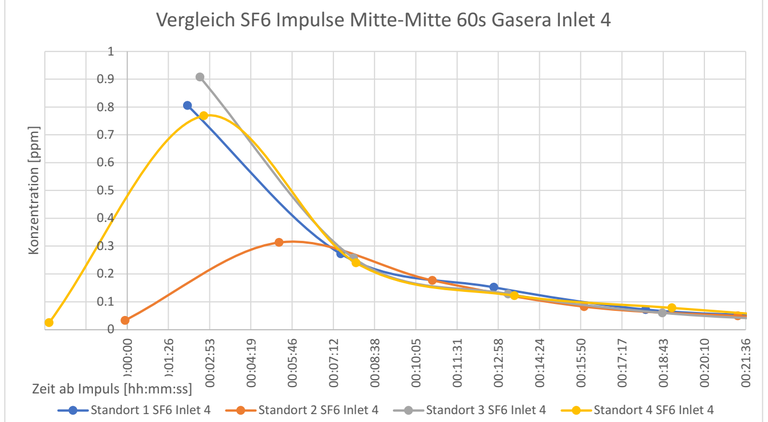
Gasera

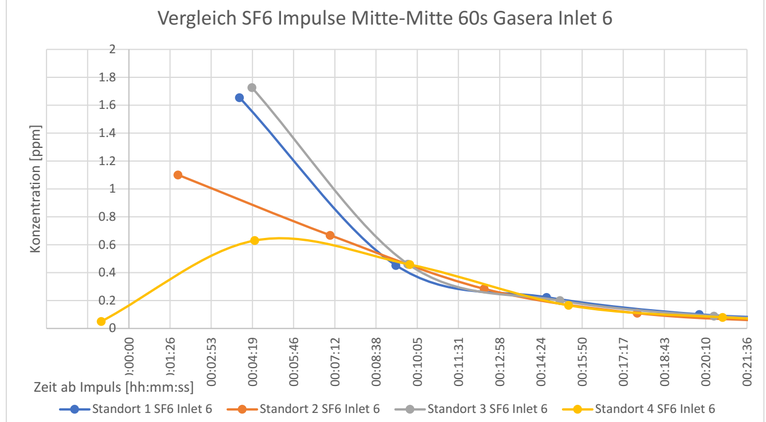




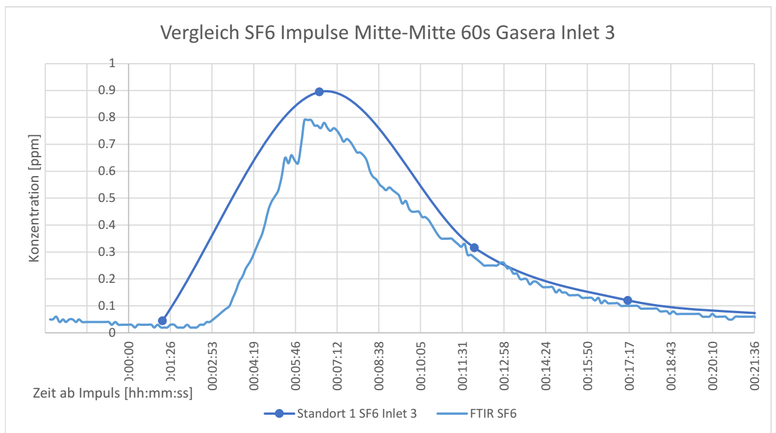


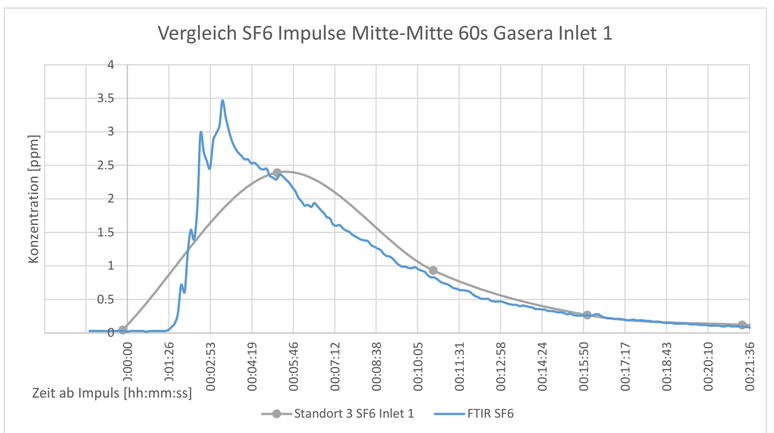






Vergleich Gasera mit FTIR





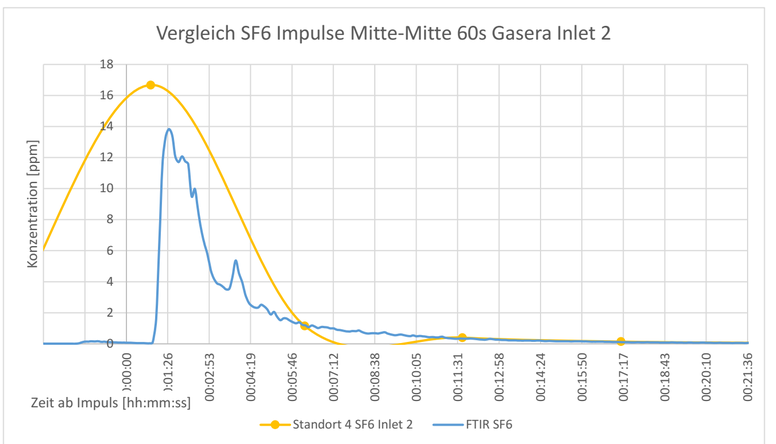
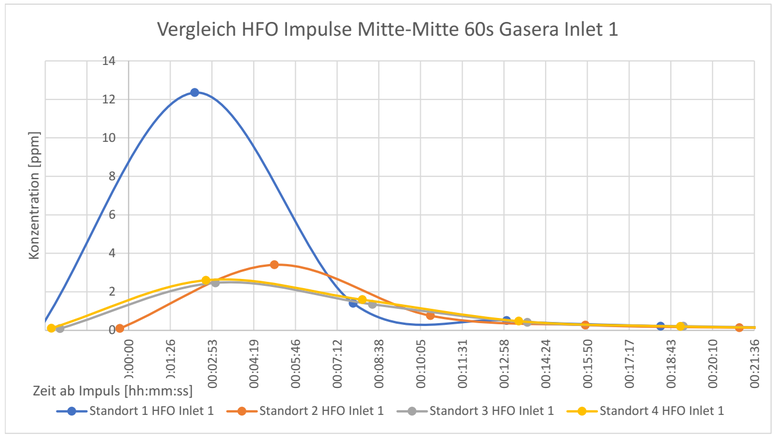
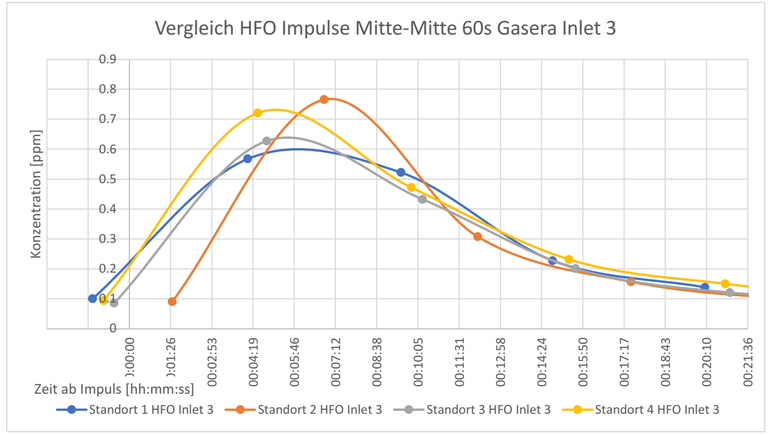
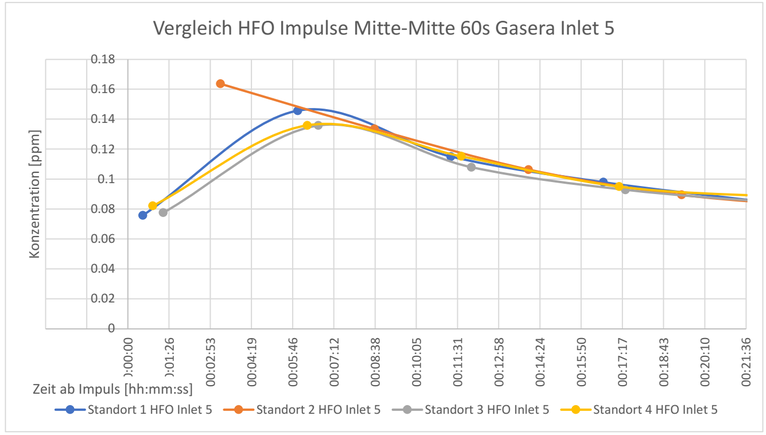


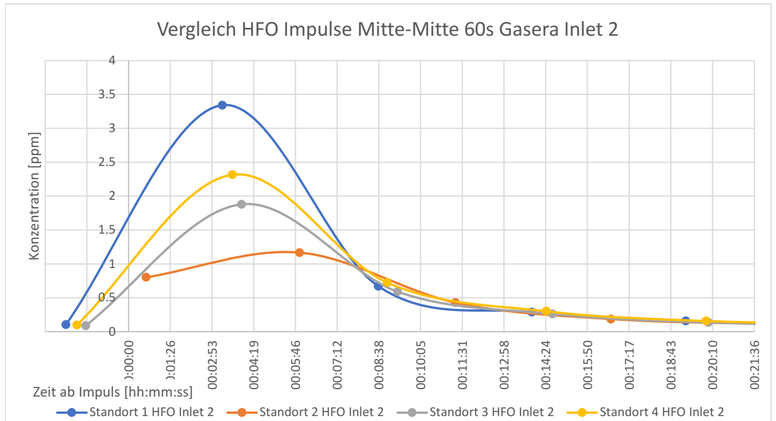
Diagramm HFO Puls Mitte-Mitte 60s

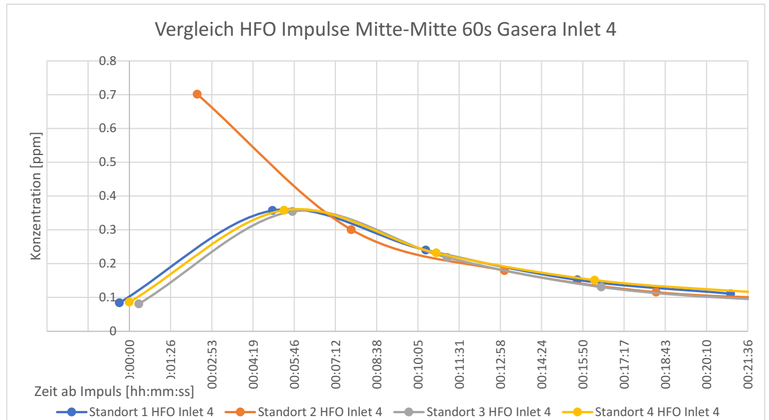
Gasera

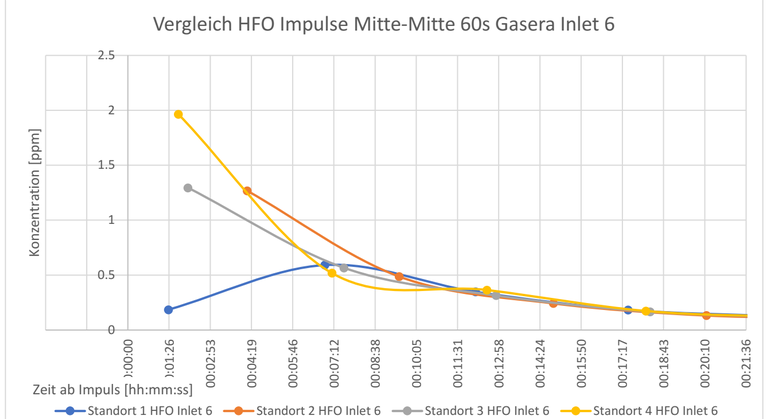




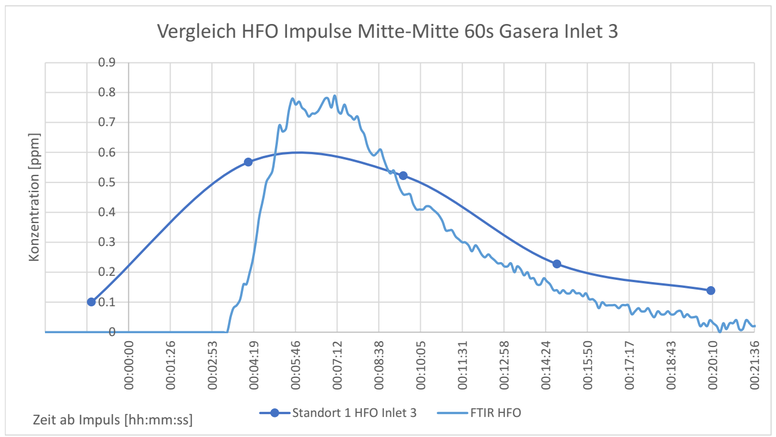


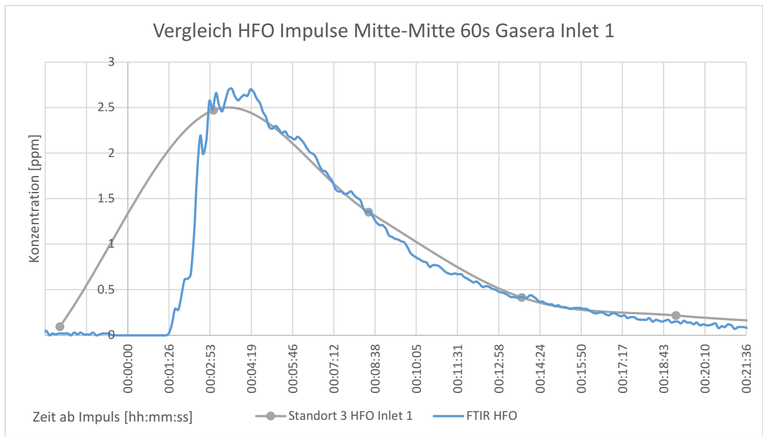






Vergleich Gasera mit FTIR





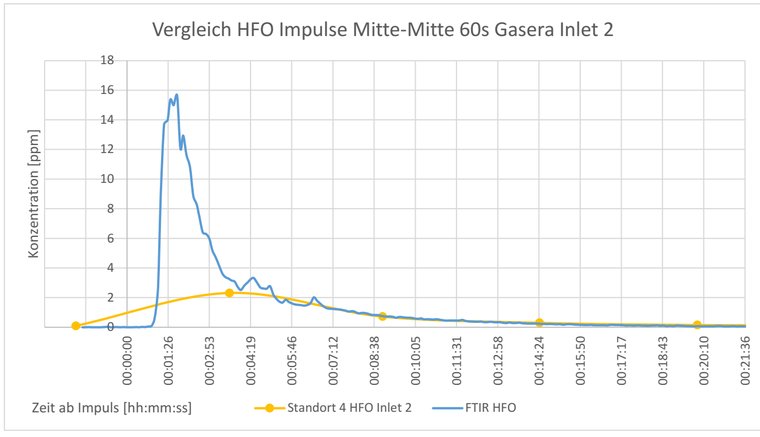
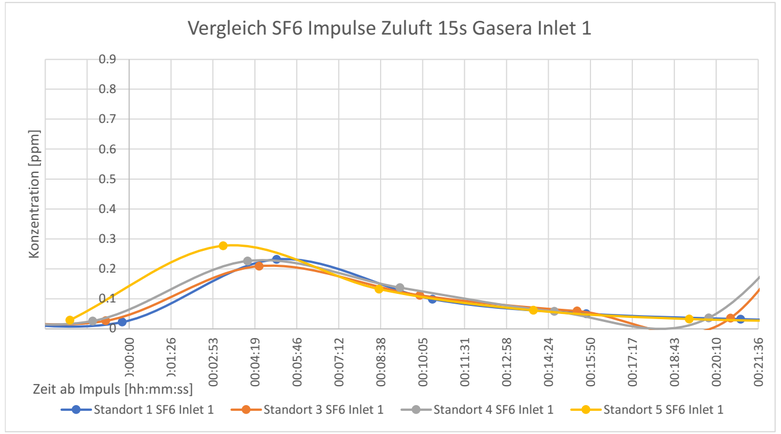
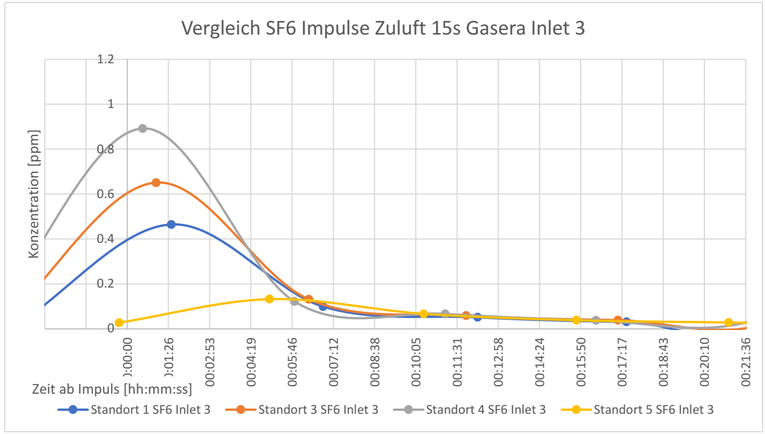
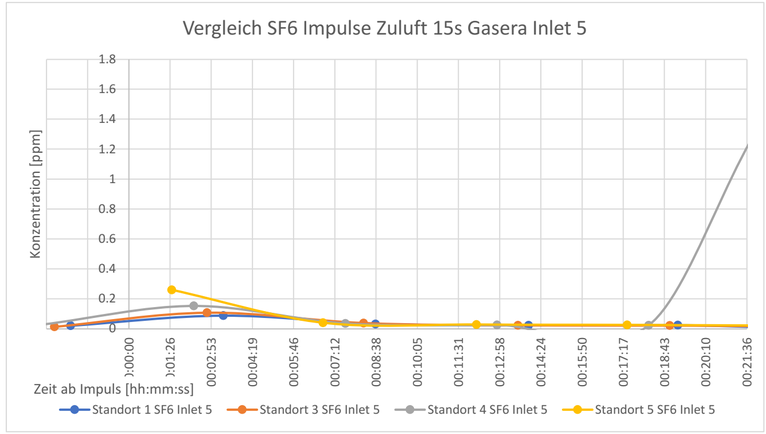


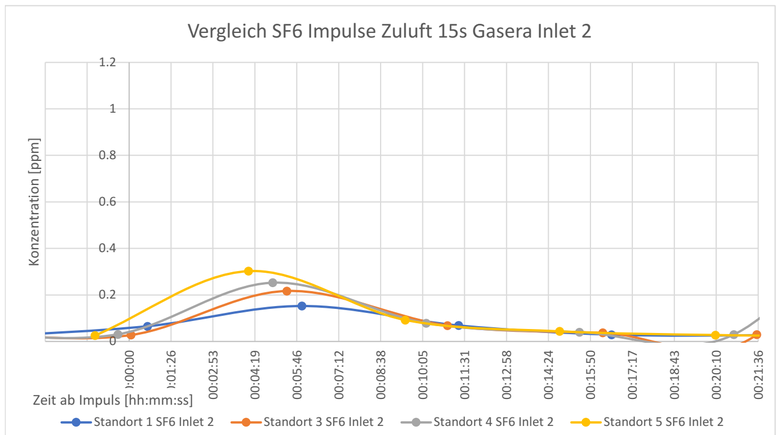
Diagramm SF6 Puls Zuluft 15s

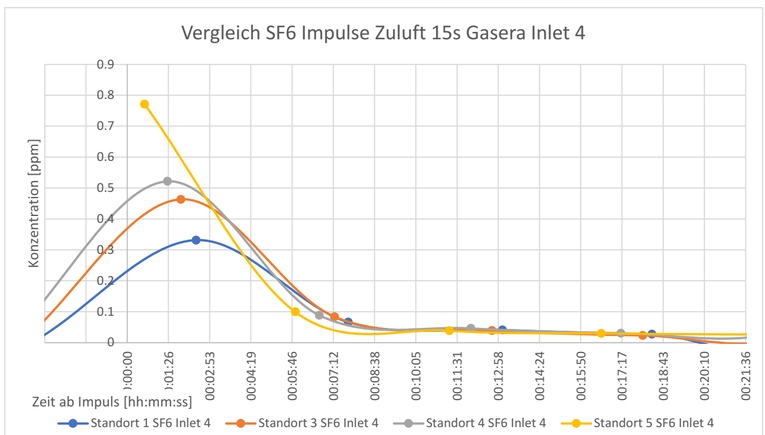
Gasera











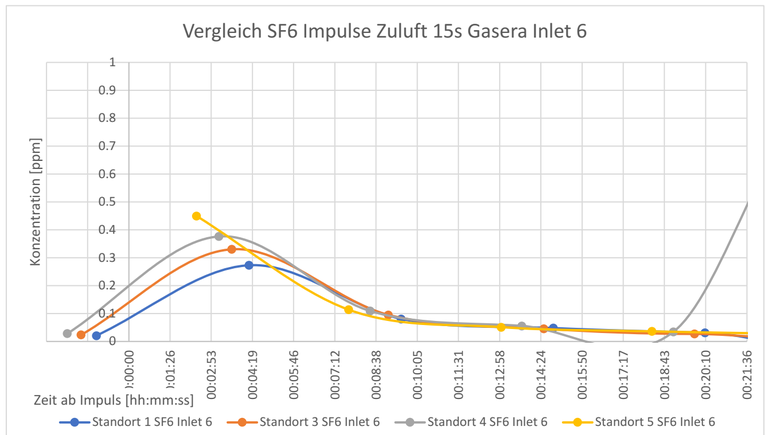
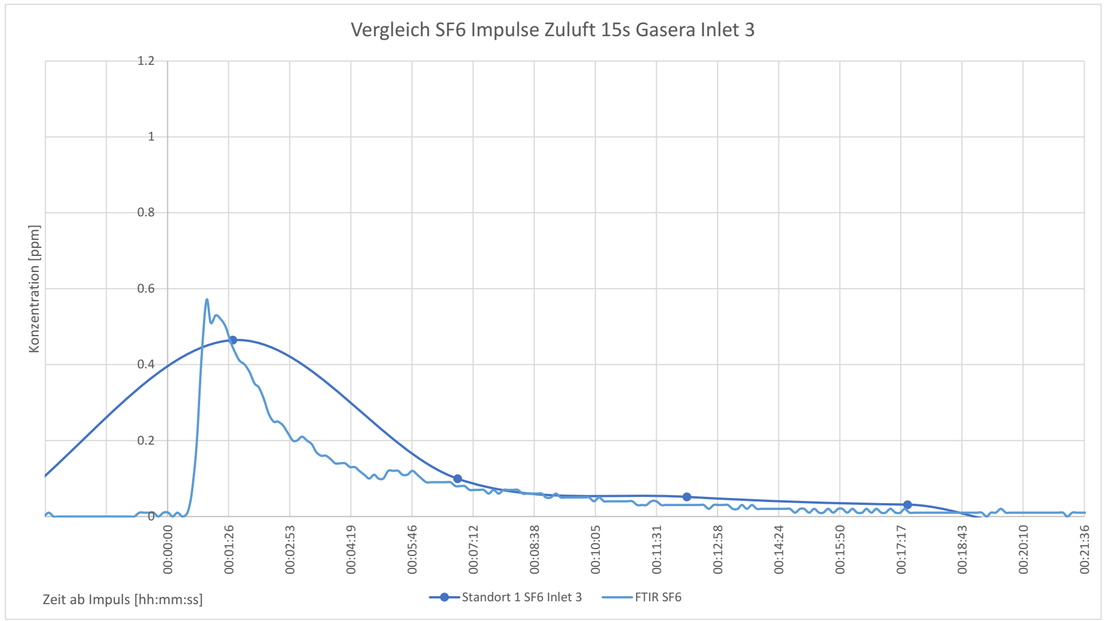
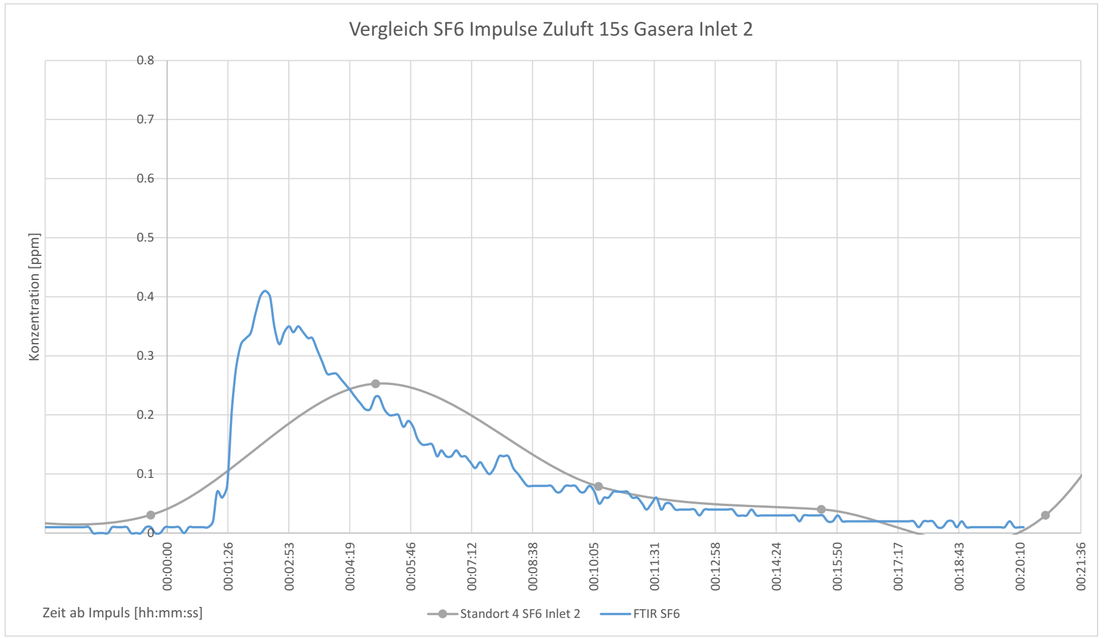
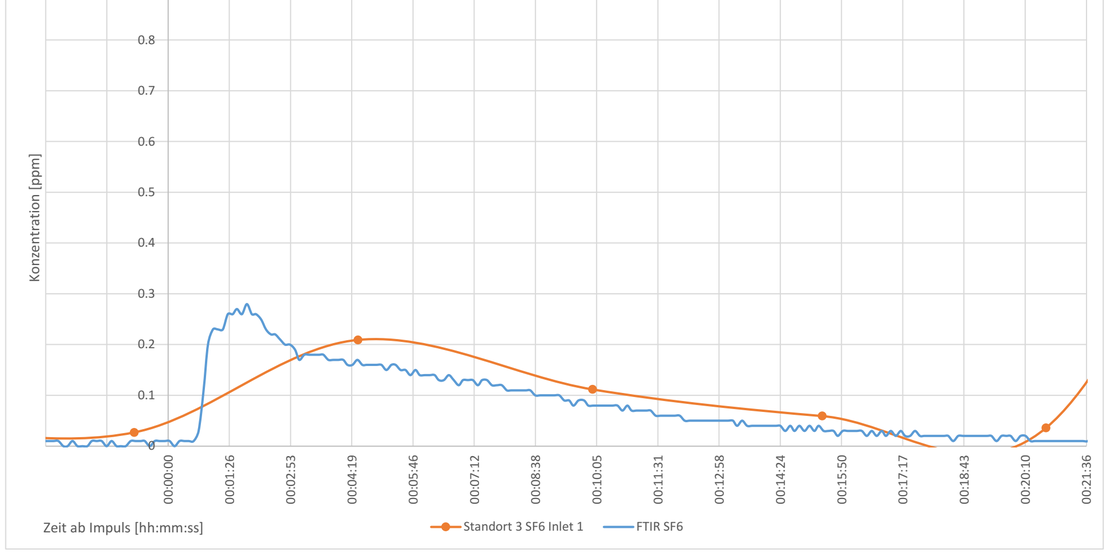


Diagramm SF6 Puls Zuluft 15s

Vergleich Gasera mit FTIR







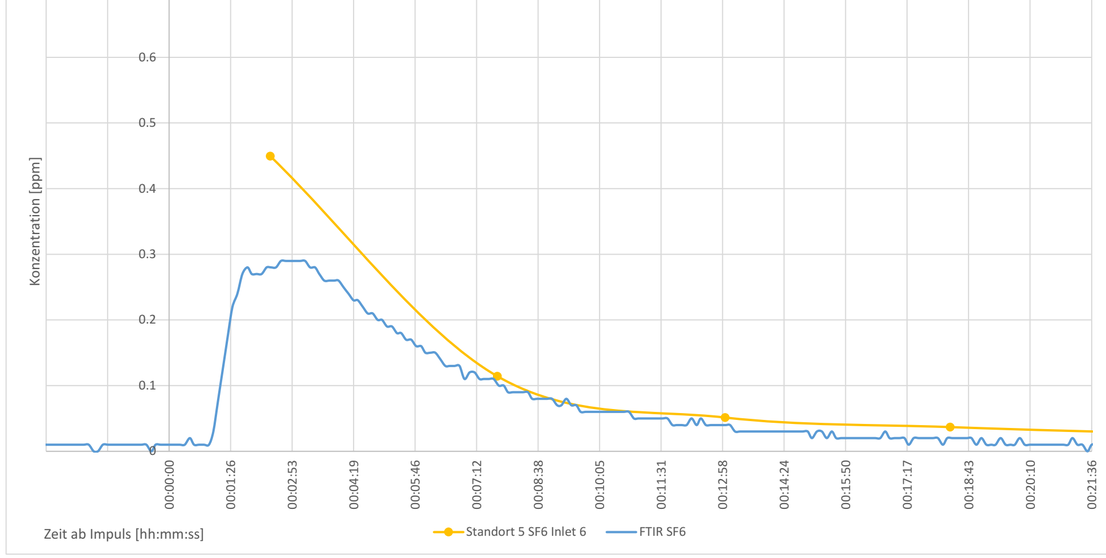
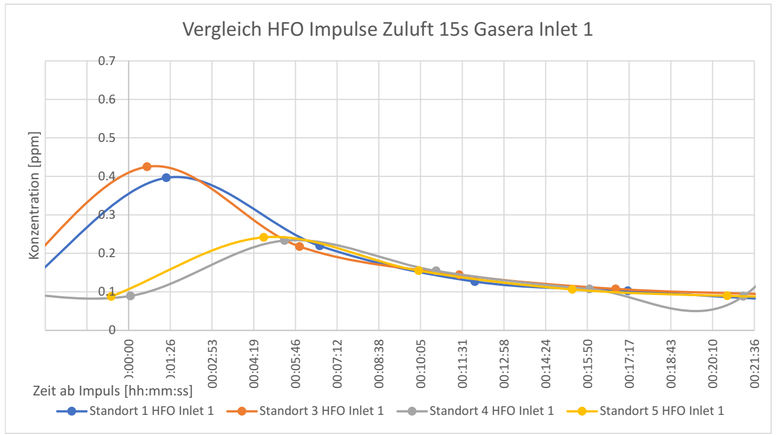
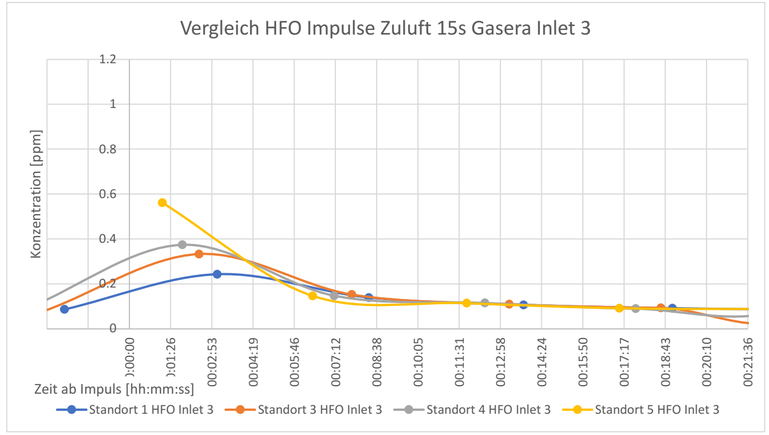
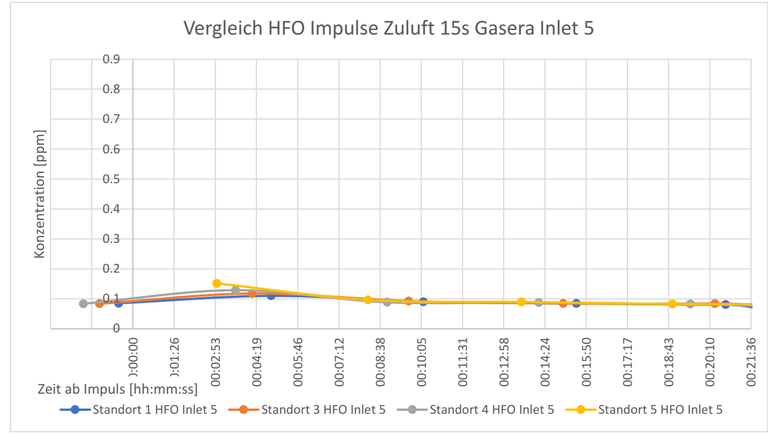


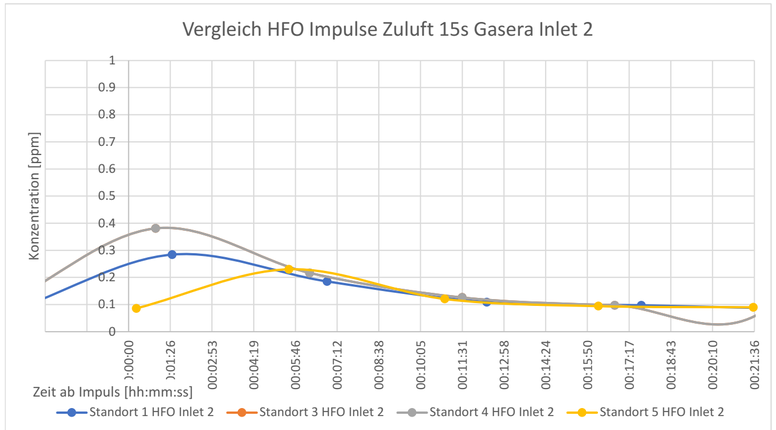
Diagramm HFO Puls Zuluft 15s

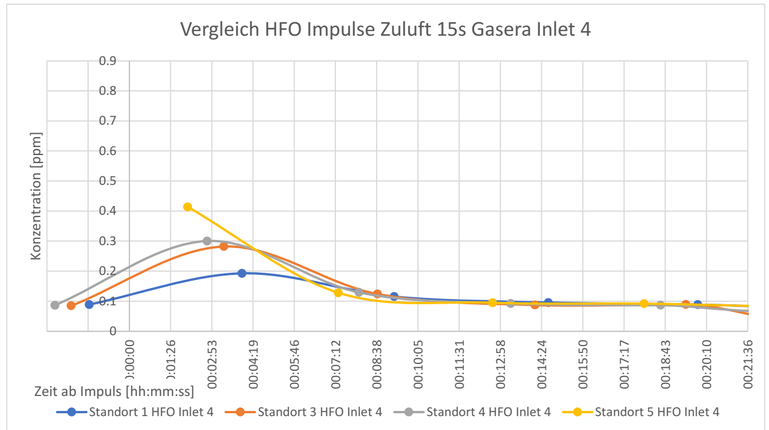
Gasera











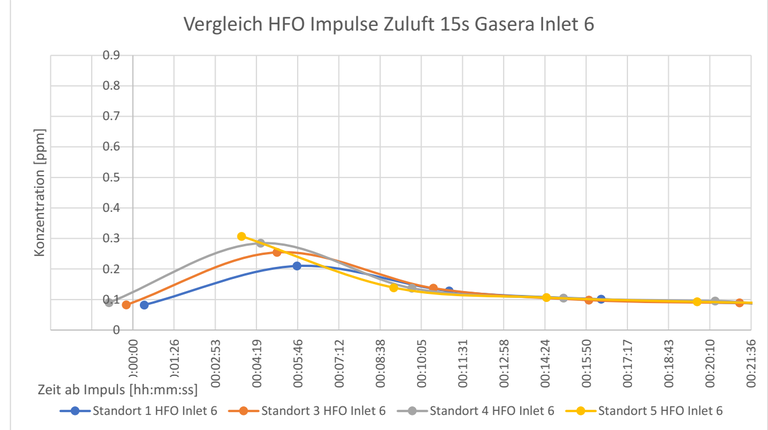
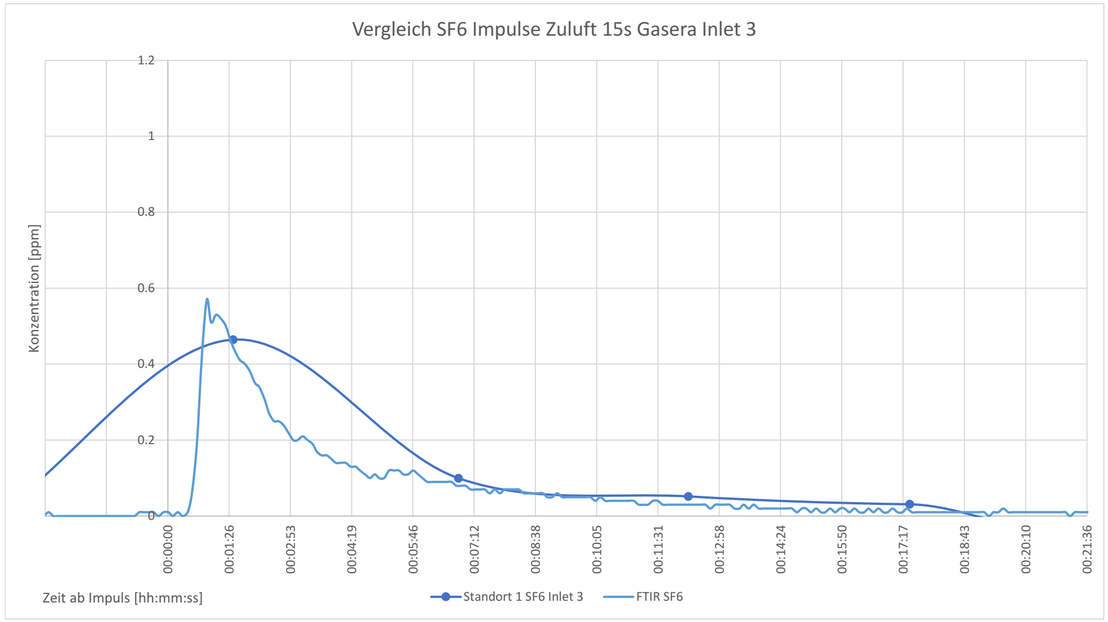
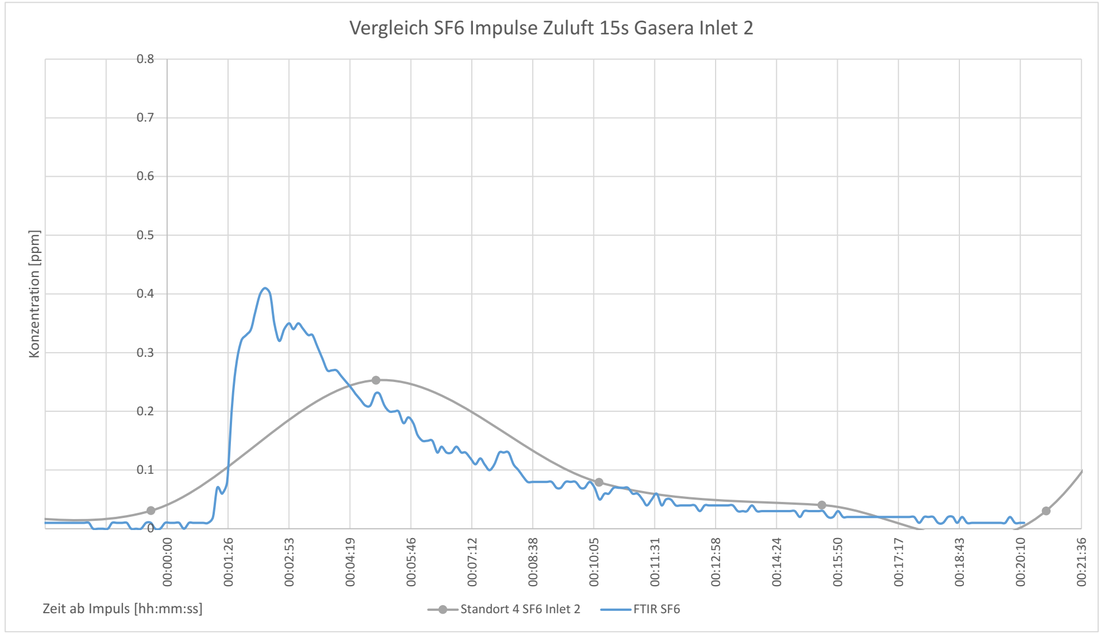
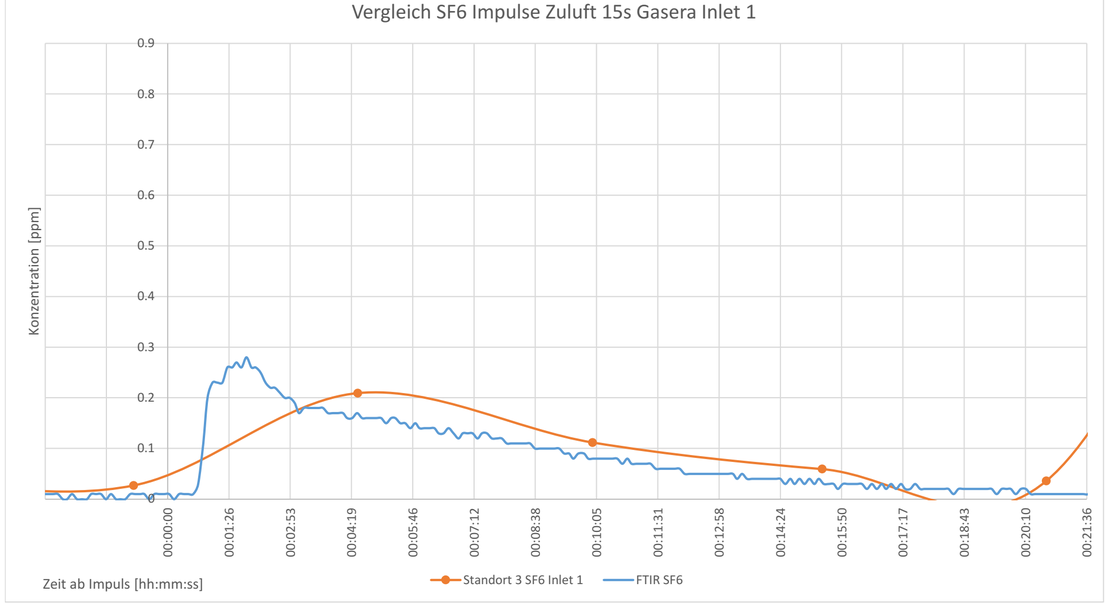


Diagramm HFO Puls Zuluft 15s

Vergleich Gasera mit FTIR







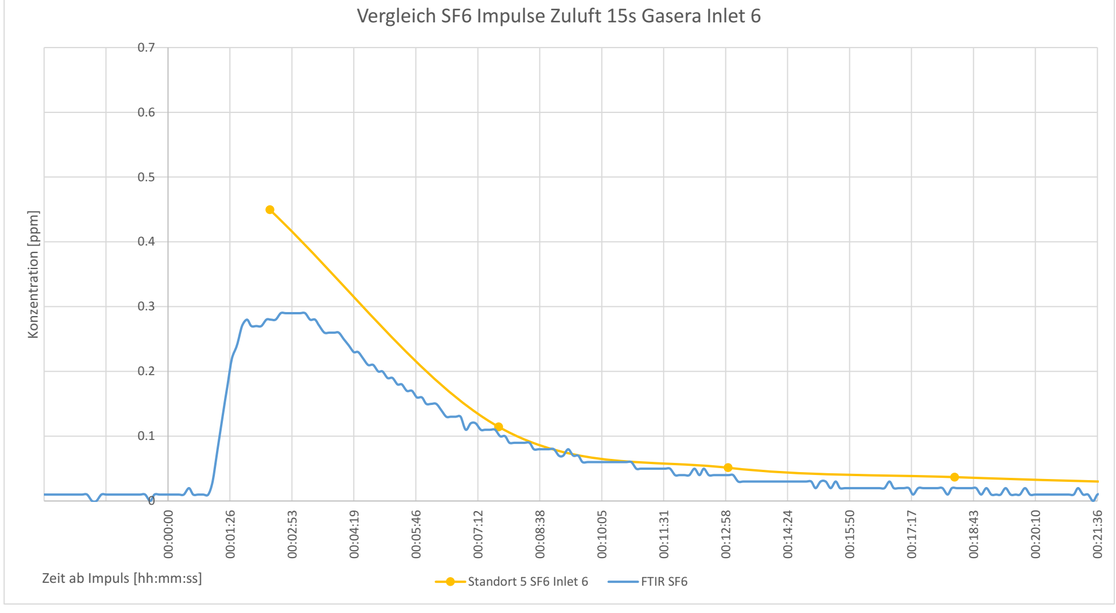
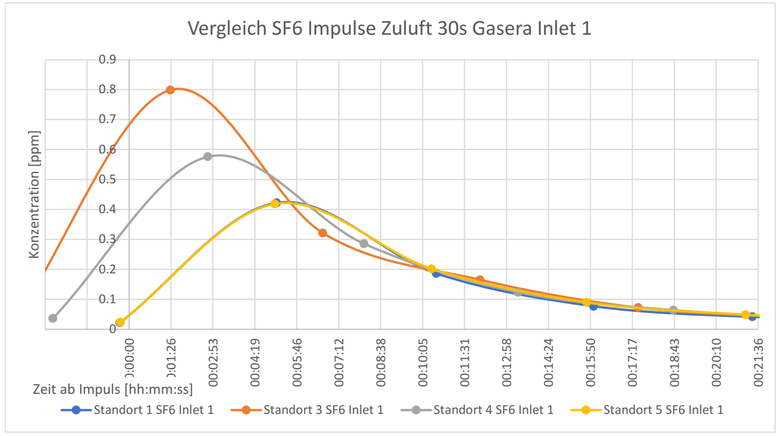
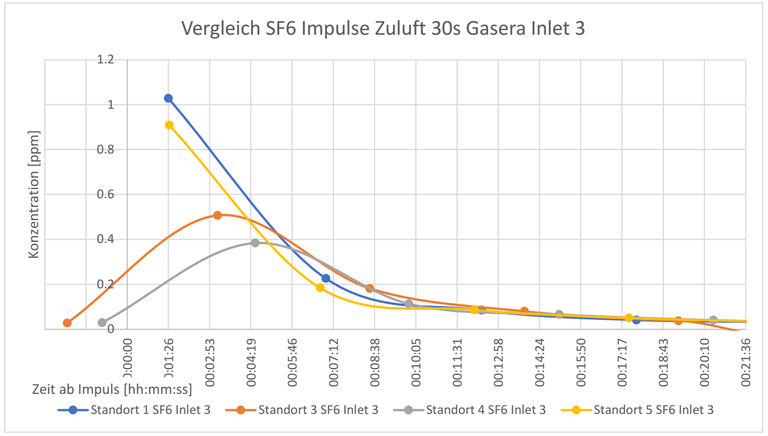
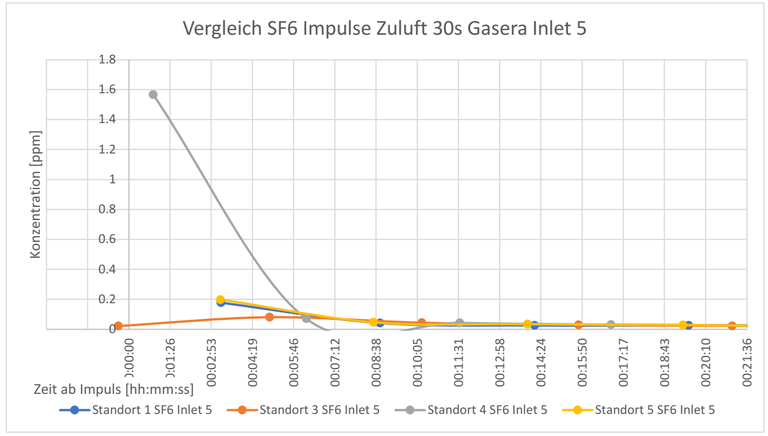


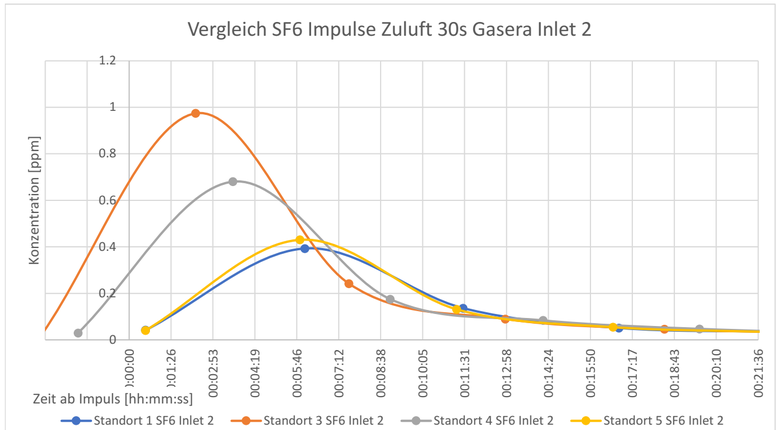
Diagramm SF6 Puls Zuluft 30s

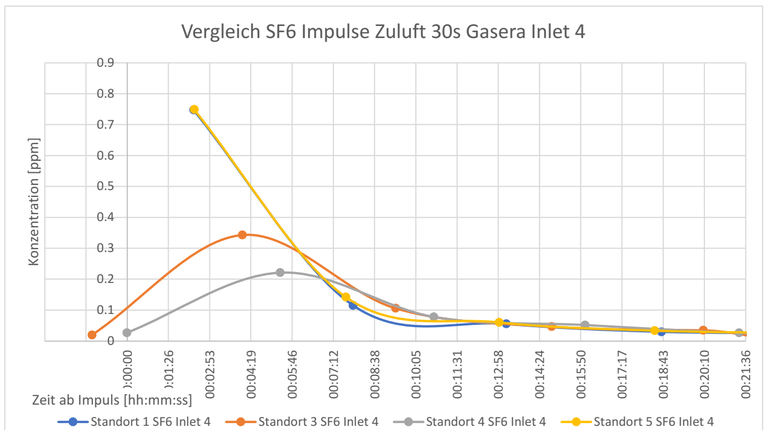
Gasera











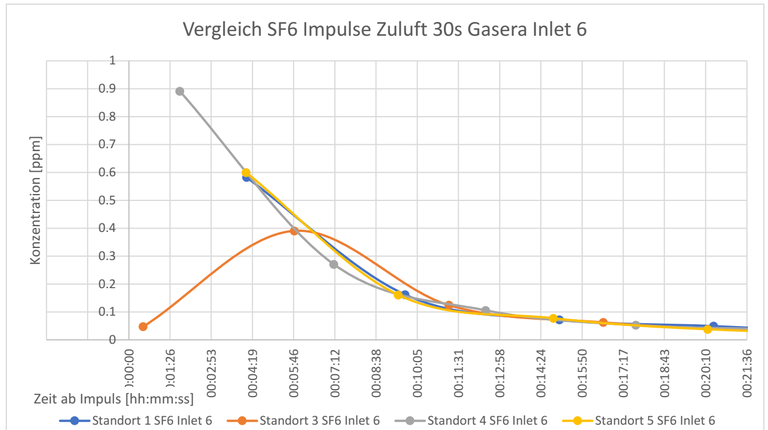
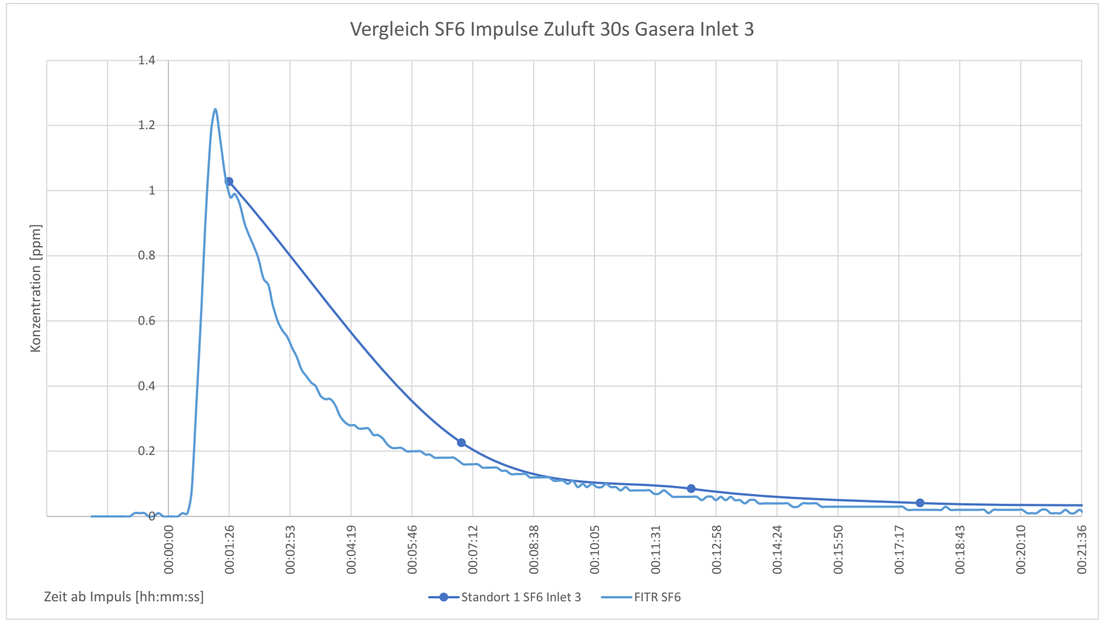
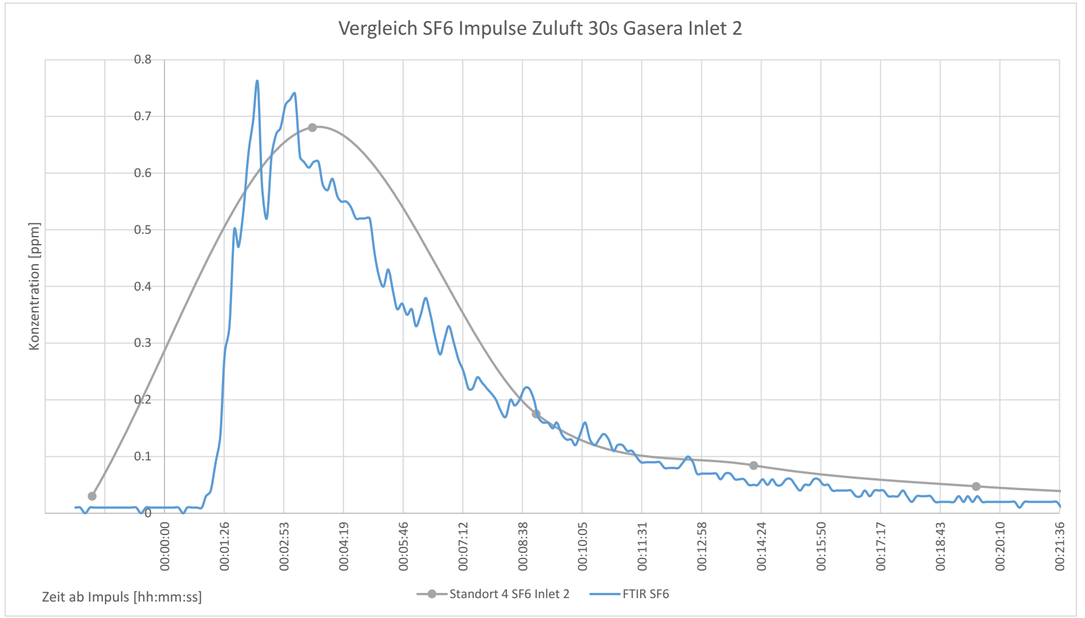
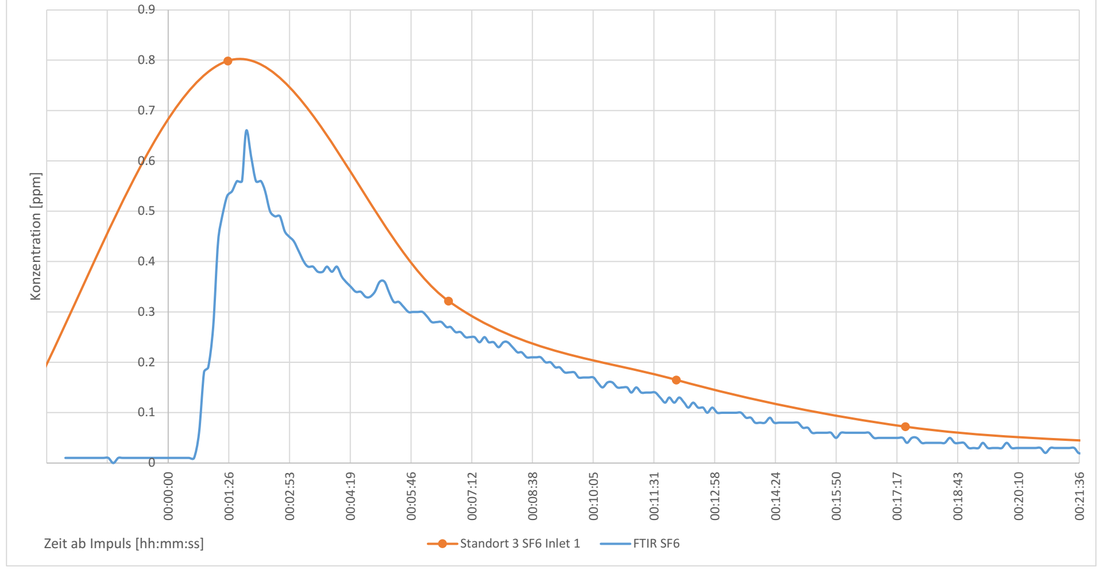


Diagramm SF6 Puls Zuluft 30s

Vergleich Gasera mit FTIR







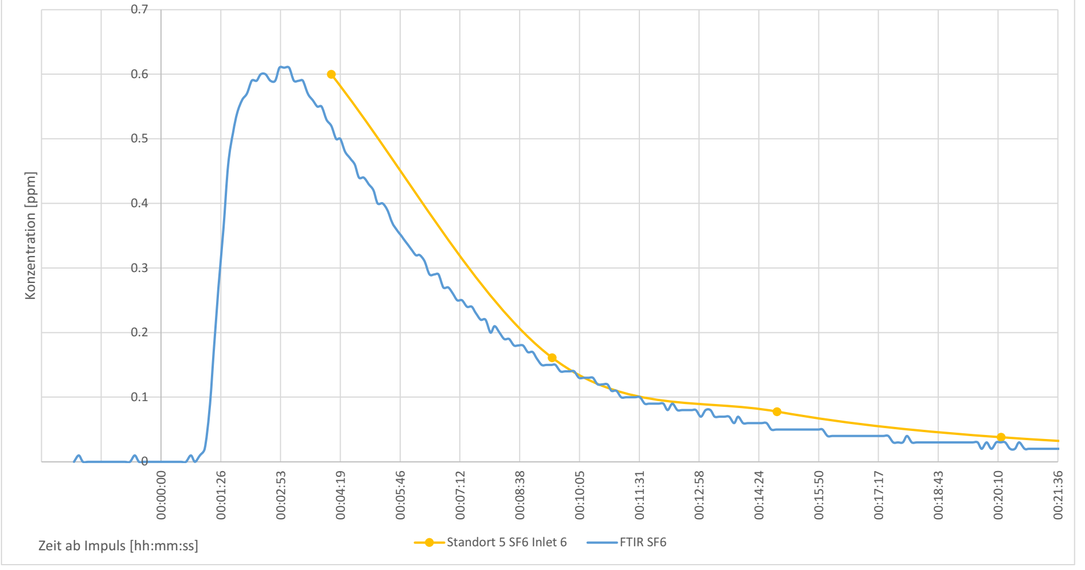
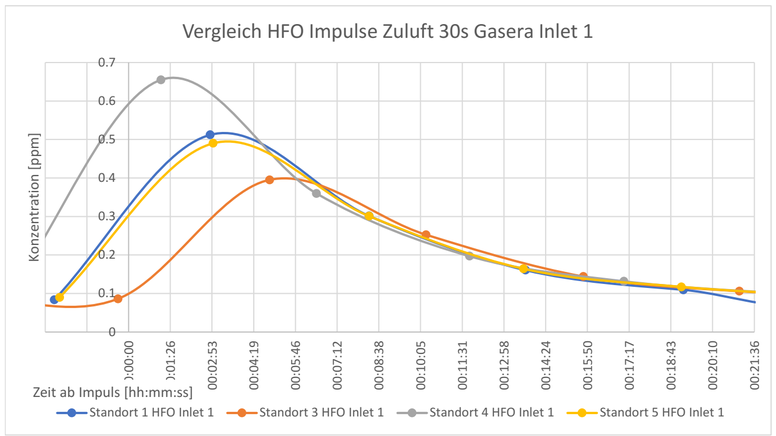
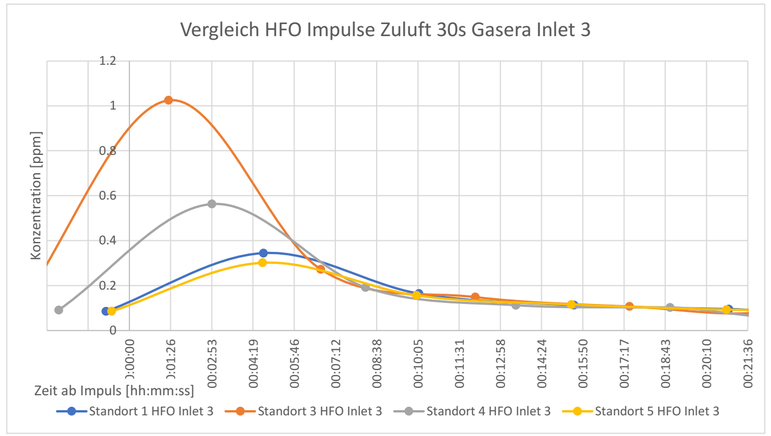
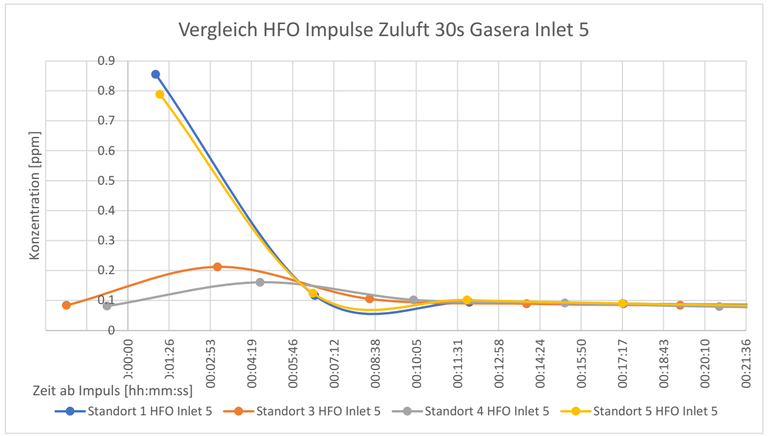


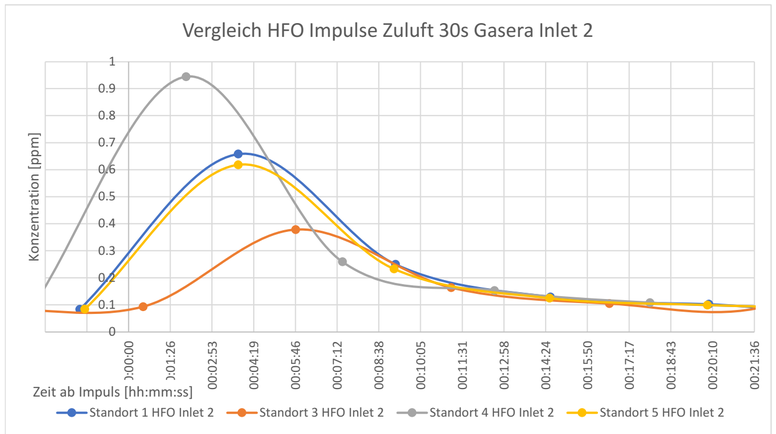
Diagramm HFO Puls Zuluft 30s

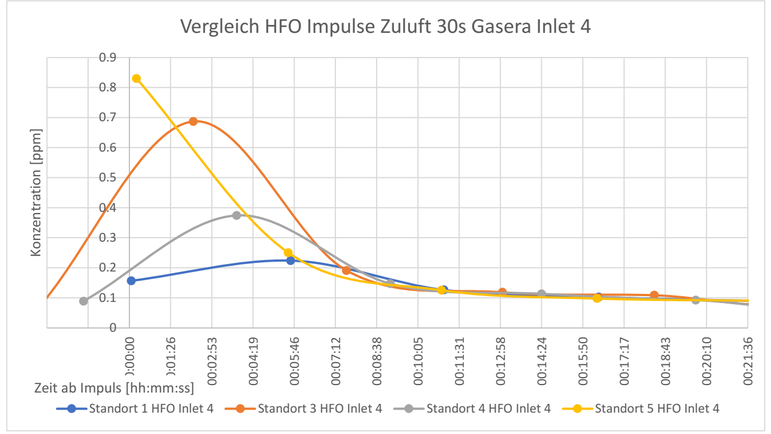
Gasera











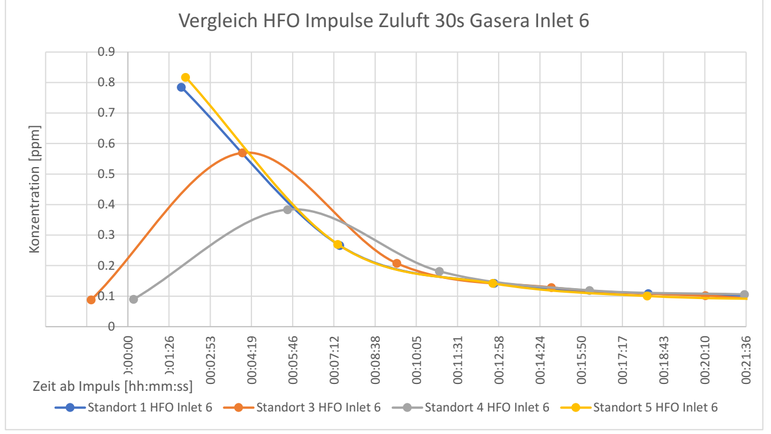
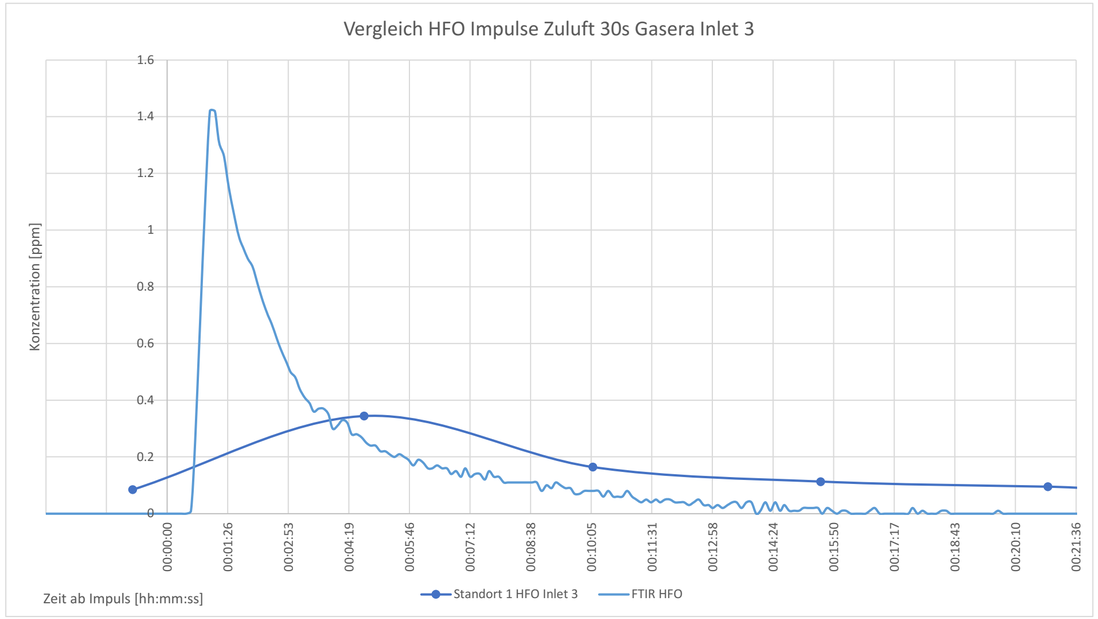
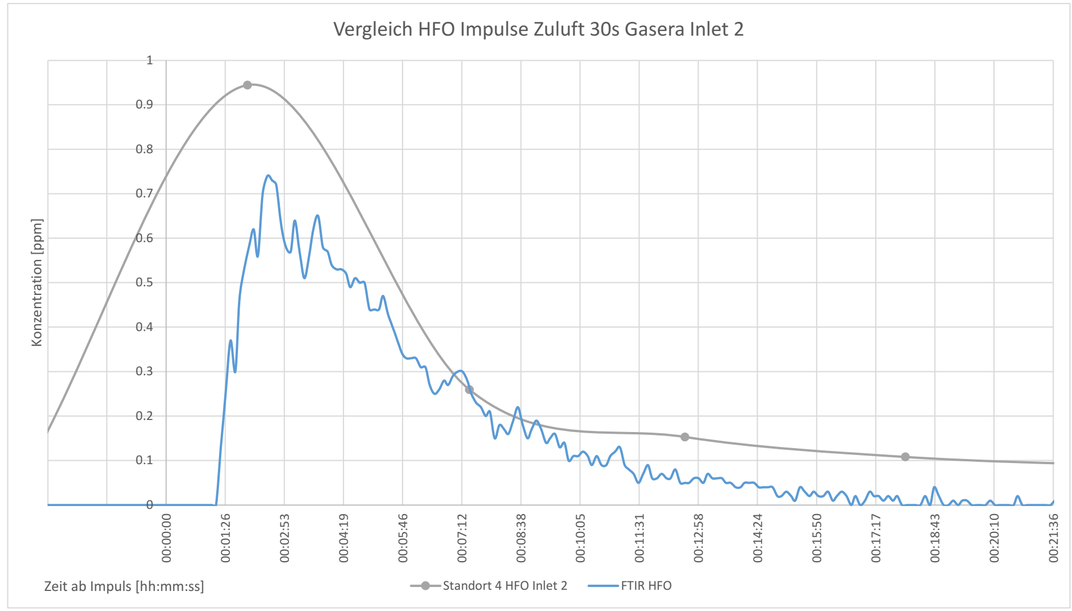
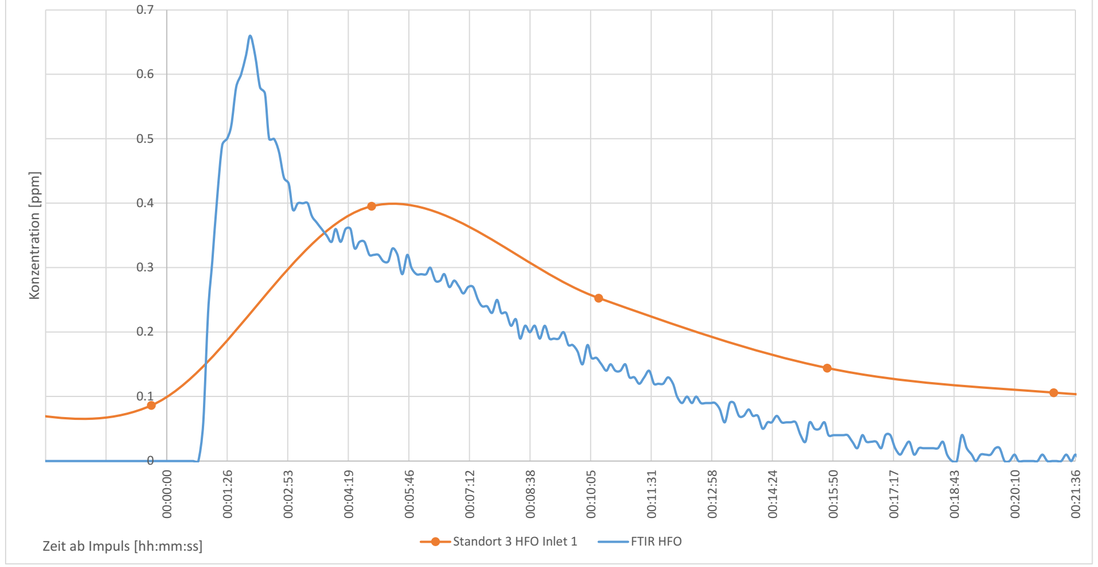


Diagramm HFO Puls Zuluft 30s

Vergleich Gasera mit FTIR







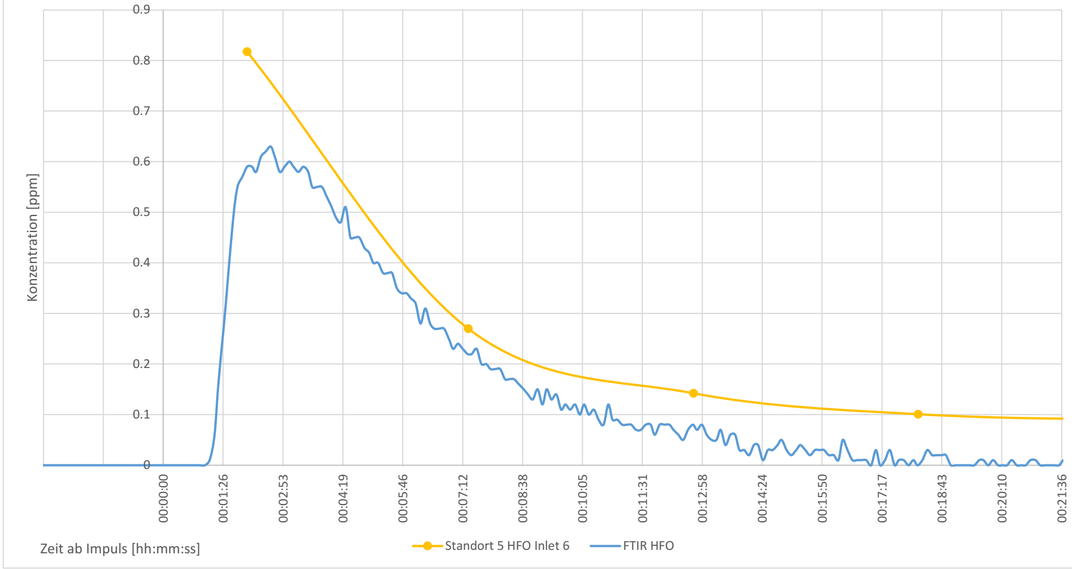


Diagramm Temperatur

	Standort
HP248	Vorne-Wand
HP244	Hinten-Wand
HP243	Vorne-Fenster
HP242	Aussenaufstellung
HP203	Abluft
HP201	Hinten-Fenster
HP196	Zuluft

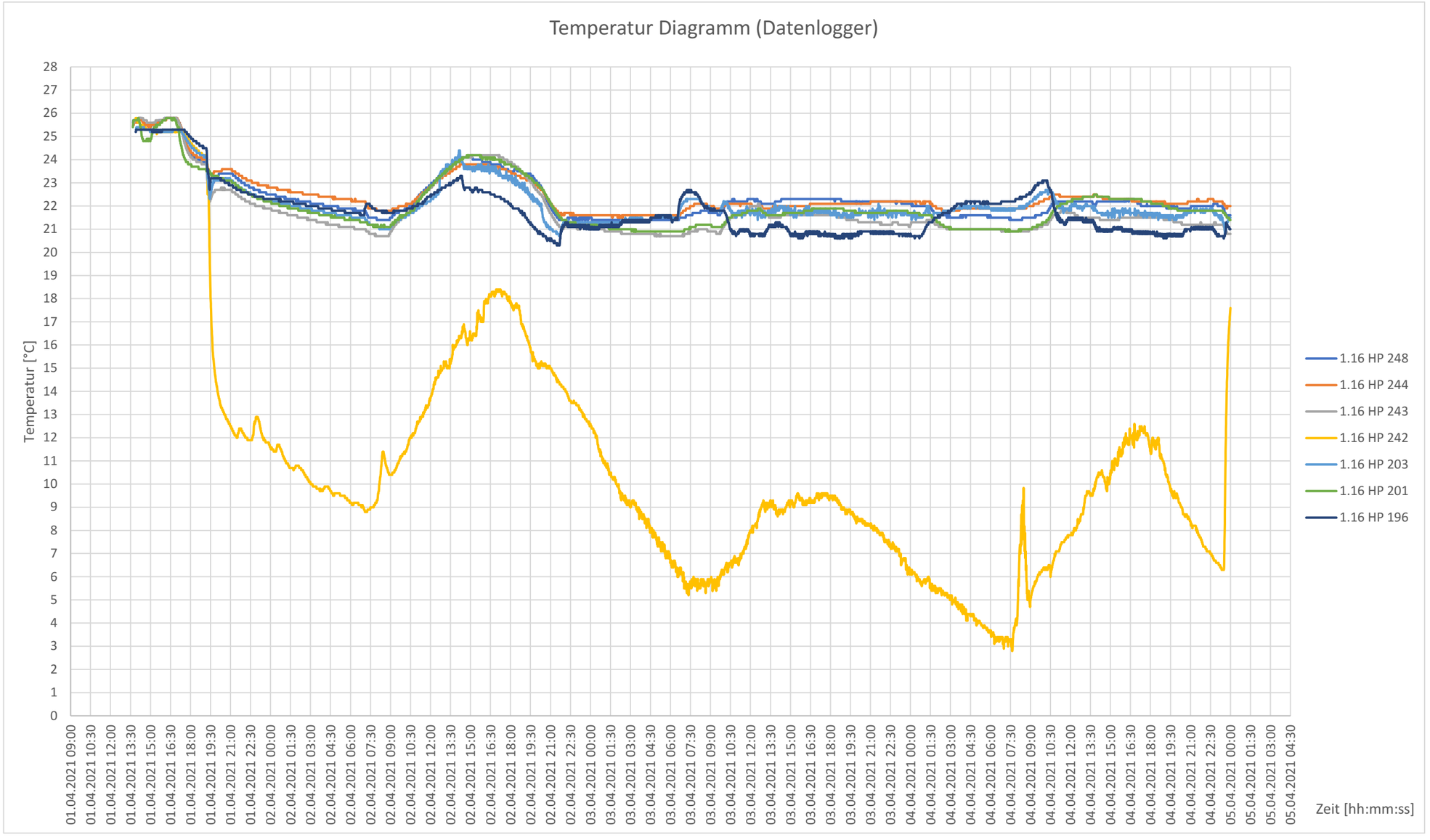


Diagramm absolute Feuchte

	Standort
HP248	Vorne-Wand
HP244	Hinten-Wand
HP243	Vorne-Fenster
HP242	Aussenaufstellung
HP203	Abluft
HP201	Hinten-Fenster
HP196	Zuluft

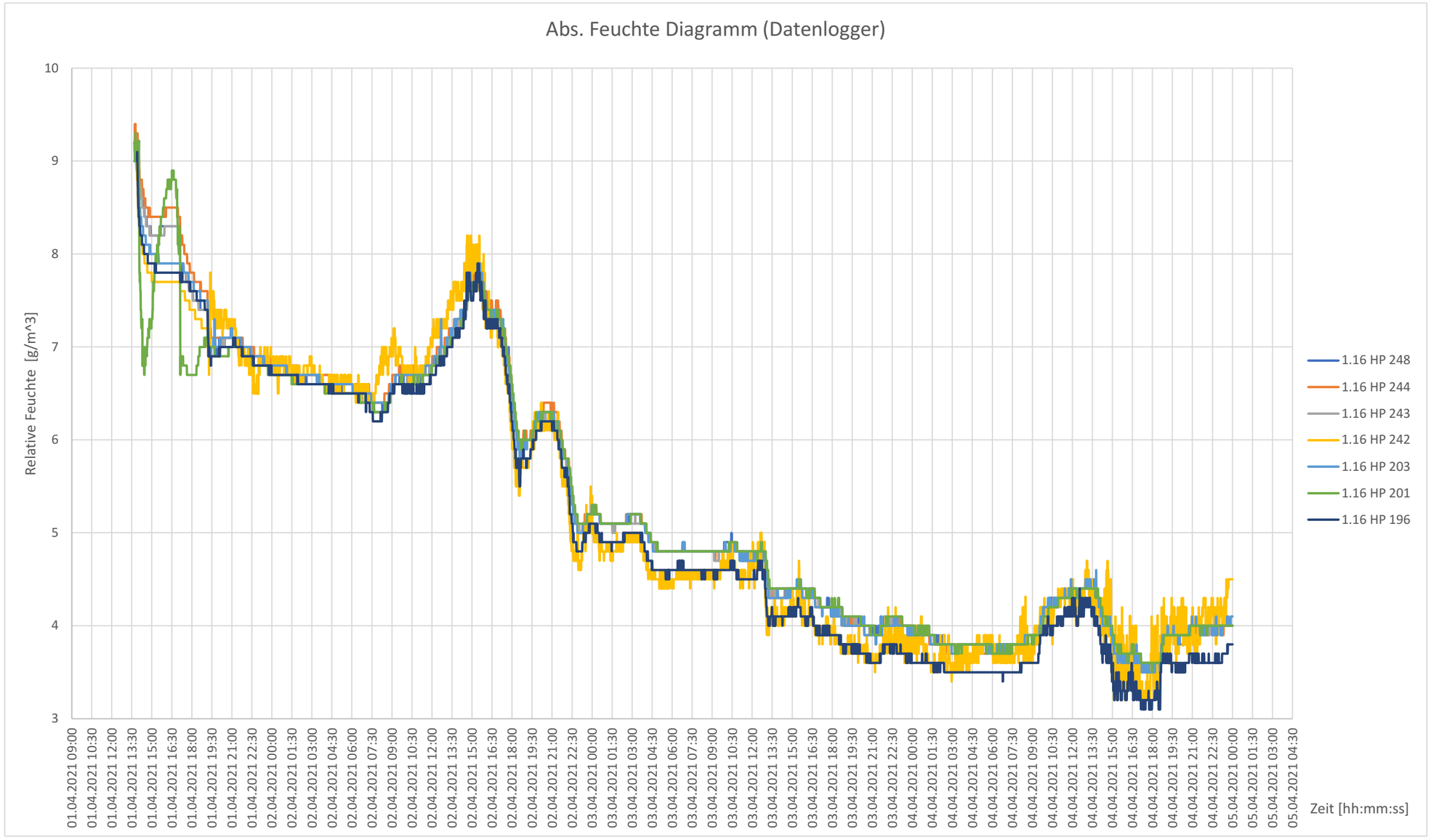


Diagramm relative Feuchte

	Standort
HP248	Vorne-Wand
HP244	Hinten-Wand
HP243	Vorne-Fenster
HP242	Aussenaufstellung
HP203	Abluft
HP201	Hinten-Fenster
HP196	Zuluft

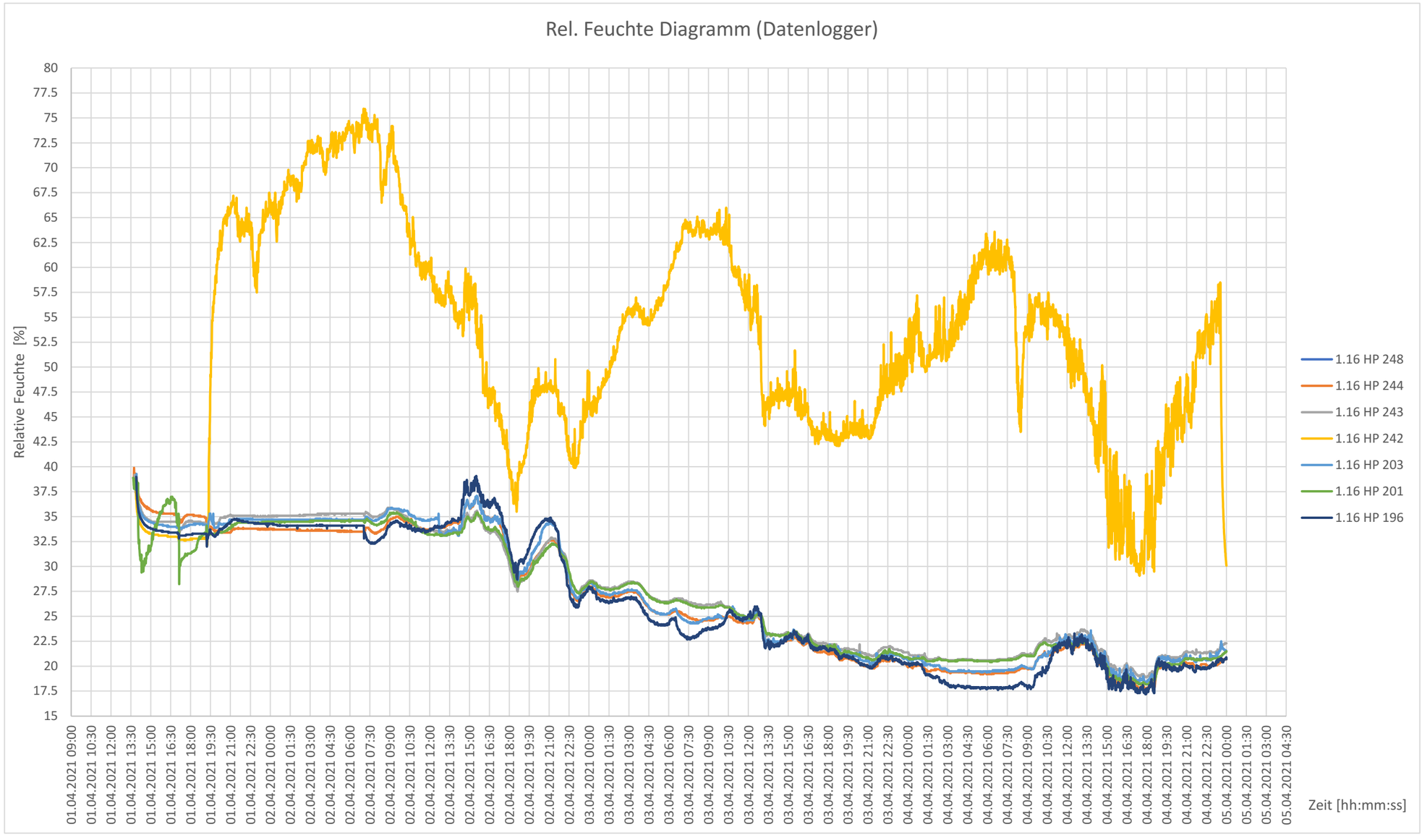
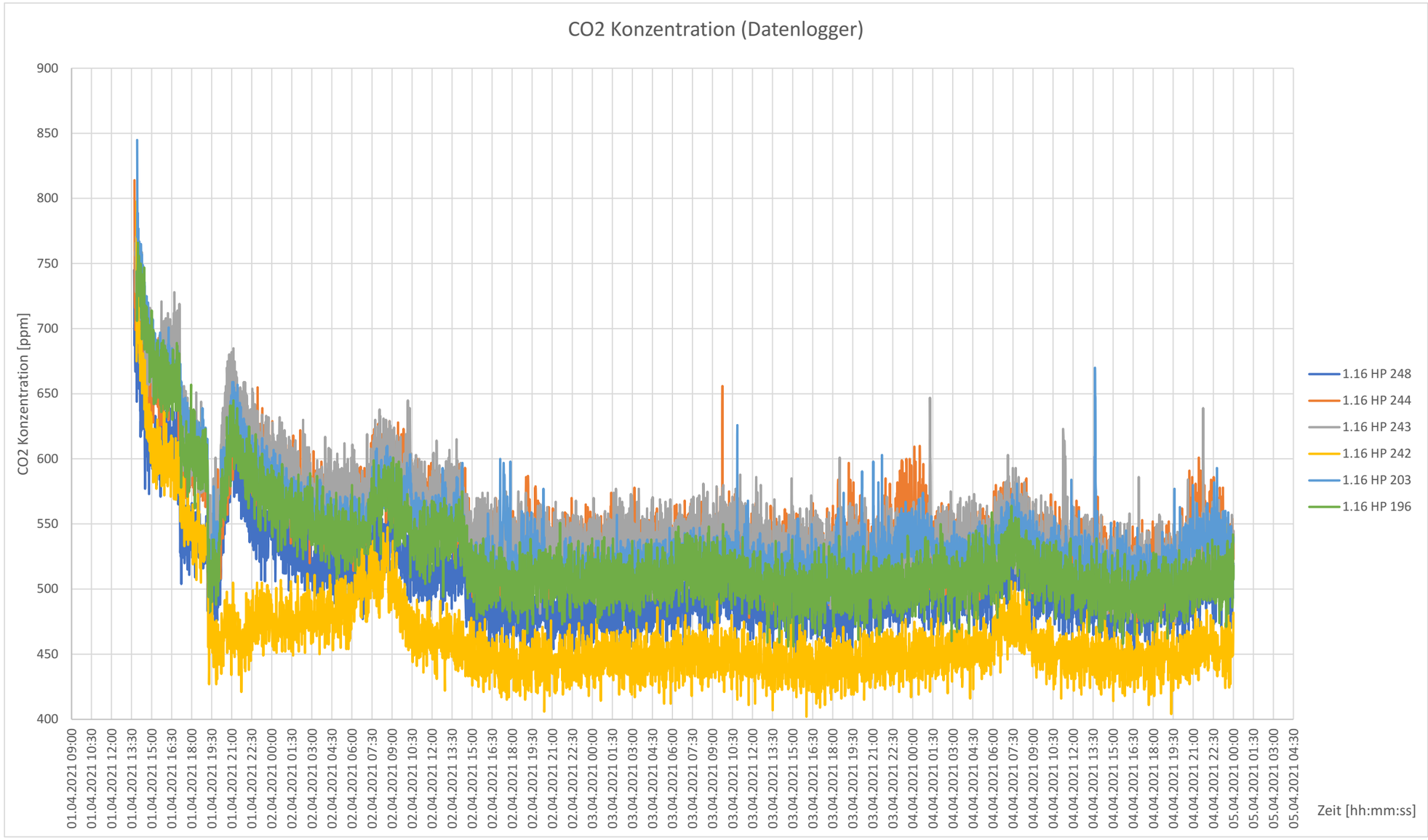
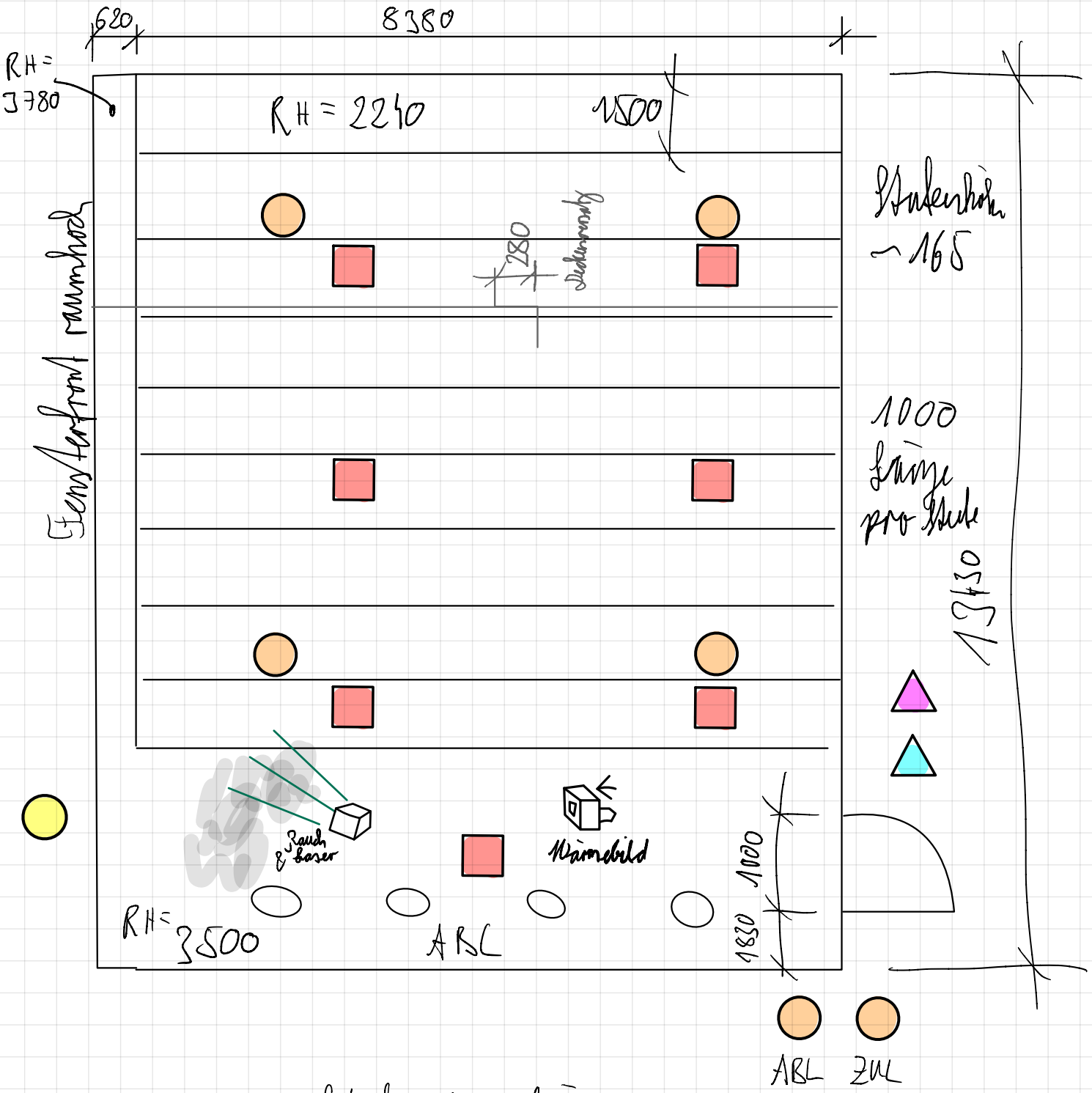


Diagramm CO2-Konzentration

	Standort
HP248	Vorne-Wand
HP244	Hinten-Wand
HP243	Vorne-Fenster
HP242	Aussenaufstellung
HP203	Abluft
HP201	Hinten-Fenster
HP196	Zuluft



Versuchsaufbau HSLA Schulzimmer C21 26.3.21 / KB



ZUL ⇒ Stufendurchlass

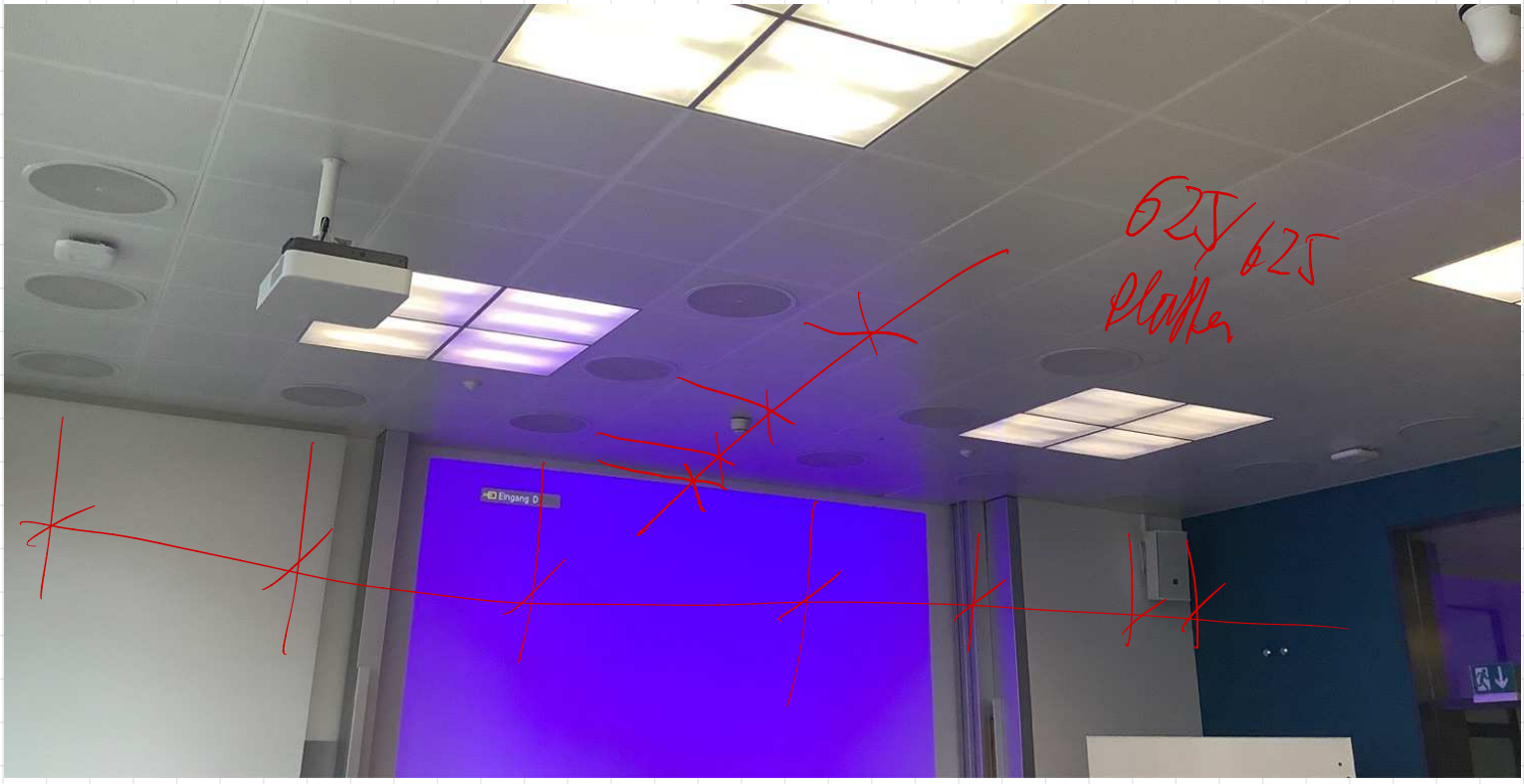
Eindosierung: ZUL; Dozent; Student oben; Student unten

↳ Jeweils als Impulsquelle

↳ Konst. Eindosierung

Legende

- Messstelle Aussen (Logger [°C, % r.F, CO2])
- Messstelle Innen (Gasera-MP, Logger [°C, % r.F, CO2])
- Dummy
- Eindosierung SF6
- Eindosierung HFO1234yf



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 Kapitel 5

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

Daten GASERA ONE

Beschreibung	**GASERA ONE**
Masse (BxLxH)	48.0x14.0x45.0cm
Gewicht	13kg
Stromanschluss	47-63Hz
Leistungsaufnahme	Max. 75W
Spannung	230V
Einsatzgrenzen Gerät	
Max. Anzahl gleichzeitig messbarer Gase	Keine Angaben
Temperatur	0-40°C
Feuchte	<90% r.F. (nicht kondensierend)
Druck	Umgebungsdruck
Aufwärmzeit	30-60min
Scanfrequenz	Keine Angaben
Wellenlängenbereich	Keine Angaben
Kontrolle mit Nullgas	Keine Angaben
Daten Messgas	
Temperatur	0-49°C
Feuchte	<80% bis 31°C; danach linear abnehmend auf 35% bei 49°C
Druck	750-1050mbar
Volumenstrom	1 l/min
Materialien in Kontakt mit dem Tracergas	Viton®, NBR, BaF_2, SiO_2, Glas, Gold, Messing, Nickel, PTFE, Aluminium, rostfreier Stahl, Polyurethan, PU (Ausblas)
Ungenauigkeit	
Drift Nullpunkt	Keine Angaben
Drift Empfindlichkeit	Keine Angaben
Linearität	Keine Angaben
Einfluss Temperatur	Umgebungstemperaturänderung verursacht keinen Drift
Einfluss Druck	Messgasdruckänderung verursacht keinen Drift
Reproduzierbarkeit	<1% der gemessenen Werte unter Betriebsbedingungen bei der Kalibrierkonzentration
Nachweisgrenze	Keine Angaben

Daten Gasmet DX4015

Beschreibung	**Gasmet DX4015**
Masse (BxLxH)	43.9x16.4x44.5cm
Gewicht	13.9kg
Stromanschluss	50-60Hz
Leistungsaufnahme	Max. 300W
Spannung	100-115V oder 230V
Einsatzgrenzen Gerät	
Max. Anzahl gleichzeitig messbarer Gase	50 Gase
Temperatur	Normal 5-30°C / kurzzeitig 0-40°C
Feuchte	Keine Angaben
Druck	Umgebungsdruck
Aufwärmzeit	Keine genauen Angaben
Scanfrequenz	10 Scans/s
Wellenlängenbereich	900-4200cm^{-1}
Kontrolle mit Nullgas	Alle 24h (N_2 empfohlen (5.0 oder besser))
Daten Messgas	
Temperatur	Max. 50°C
Feuchte	Keine Angaben
Druck	Atmosphäre
Volumenstrom	2 l/min
Materialien in Kontakt mit dem Tracergas	Rhodium-beschichtetes Aluminium, monolithische Gold-Schutzschicht, Viton®, Zinkselenid
Ungenauigkeit	
Drift Nullpunkt	<2% vom Messbereich im Kalibrierzeitraum
Drift Empfindlichkeit	Keine
Linearität	<2% vom Messbereich
Einfluss Temperatur	<2% vom Messbereich pro 10K Temperaturänderung
Einfluss Druck	1% Änderung des Messwertes bei Änderung des Druckes um 1%; Änderung des Aussenluftdruckes wird gemessen und kompensiert
Reproduzierbarkeit	Keine Angaben
Nachweisgrenze	Keine Angaben

Daten Emerson Rosemount MLT4

Beschreibung	**Emerson Rosemount MLT4**
Masse (BxLxH)	53.7x48.8x14.0cm
Gewicht	13kg
Stromanschluss	50Hz / 60Hz
Leistungsaufnahme	Max. 240W
Spannung	120V / 230V
Einsatzgrenzen Gerät	
Max. Anzahl gleichzeitig messbarer Gase	Nicht definiert/begrenzt
Temperatur	5-40°C
Feuchte	<90% r.F. bei 20°C / 70% r.F. bei 40°C
Druck	Umgebungsdruck
Aufwärmzeit	15-50min
Scanfrequenz	Keine Angaben
Wellenlängenbereich	Keine Angaben
Kontrolle mit Nullgas	Keine Angaben (Ca. alle 4h sinnvoll)
Daten Messgas	
Temperatur	55°c
Feuchte	Keine Angaben
Druck	≤1500mbar abs
Volumenstrom	0.2-1.5 l/min
Materialien in Kontakt mit dem Tracergas	Keine Angaben
Ungenauigkeit	
Drift Nullpunkt	≤2% pro Woche
Drift Empfindlichkeit	≤0.5% pro Woche
Linearität	≤1% pro Woche
Einfluss Temperatur	Auf den Nullpunkt ≤1% pro 10K / auf die Empfindlichkeit ≤5% (5-40°C)
Einfluss Druck	Bei konstanter Temperatur ≤0.10% pro mbar mit Druckkompensation (Drucksensor) ≤0.01% pro mbar
Reproduzierbarkeit	≤1%
Nachweisgrenze	≤1%

GAS CONVERSION FACTOR CALCULATIONS

Note that temperature and pressure settings have no effect on custom fluids!

	Fluid from	Fluid to
Fluid:	Custom	SF6 ("Sulfur hexafluor..")
Flow:	93.3 mg/s	115.5 mg/s
Pressure:	1 bar (a)	1 bar (a)
Temperature:	20 °C	20 °C
Density (a):	4.790 kg/m^3	6.069 kg/m^3
Heat capacity (cal):	896.3 J/kg.K	713.8 J/kg.K
Viscosity:	1.216E-05 Pa.s	1.550E-05 Pa.s
Thermal cond. (cal):	0.01322 W/m.K	0.01632 W/m.K
Bronkhorst model [1]:	F-201CV-5K0	

1) The model selected determines the calculation method, however, the calculation routines do **not** check whether the model is suitable for the entered flow range and process conditions or not.

	Custom [mg/s]	SF6 [mg/s]	Conversion factor
63.7%	59.43	74.07	1.110
25%	23.32	29.22	1.104
50%	46.65	58.25	1.108
75%	69.97	87.04	1.112
100%	93.30	115.5	1.118

Background information for use by factory only:

Conversion type:	**EL-FLOW 2C**

Daten Dummies

Dummy grau

Dummy blau gross

Dummy blau klein

Dummy	Eingebaute Glühlampen
2.11HP267	60W / 60W / 40W 3xE27
2.11HP268	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP269	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP270	40W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP271	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP272	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP273	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP274	60W / 60W / 60W 3xE27
2.11HP275	60W / 60W 2xE27
2.11HP276	40W / 60W 2xE27
2.11HP277	40W / 60W 2xE27
2.11HP278	40W / 60W 2xE27
2.11HP279	60W / 40W / 60W 3xE27
2.11HP280	60W / 100W 2xE27

Bilder sonstige Arbeitsmittel

Rauchmaschine

Messschläuche

Datenlogger

Wärmebildkamera

Hitzdrahtanemometer