

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Einfluss von Ausführungsvarianten für die Kabeldurchführung und Folienüberlappung auf die Luftdichtheit von Holzdächern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas BEDNAR

und als verantwortlich mitwirkender Assistent

Projektass. Dipl.-Ing. Christoph HARREITHER

E206

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Zlatibor Dregic

0325533

Arndtstrasse 21/3/21
A-1120 Wien

Wien, am

DANKSAGUNG

Ich möchte Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn Thomas Bednar herzlich für die Betreuung dieser Diplomarbeit und für die viele wertvollen Ratschläge und Hinweise danken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Christoph Harreither für die fachliche und freundliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit.

Weiters gilt ein besonderer Dank dem Laborpersonal des Instituts für seine große Hilfsbereitschaft während meiner Versuche: Dipl. Ing. Manfred Grüner und Ing. Harald Hofbauer.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mich all die Jahre tatkräftig unterstützt haben und ohne die es mit nicht möglich gewesen wäre, dieses Studium zu führen. Vor allem möchte ich mich bei meiner Frau Milica für ihre Liebe, Geduld und grenzenlose Unterstützung in den zeitintensiven Phasen der Diplomarbeit bedanken.

Einen besonderen Dank möchte ich hier auch meinen Freunden Sasa Zivkovic, Sinisa Suvajac, Dusko Erak, und Cristian Borleat übermitteln.

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird die Luftdichtheit von flachgeneigten Dachkonstruktionen unter variierenden Einflussfaktoren analysiert. Luftdichtheit steht in engem Zusammenhang mit Wärme- und Feuchteschutz sowie dem Brand- und Schallschutz von Gebäuden. Die Luftdichtheit hat einen bedeutenden Einfluss auf Raumklima, Bauschäden und Energieverlust. Nur durch die Dichtheit der Hülle lassen sich Bauschäden, infolge des mitgeführten Wasserdampfes im Luftzug, vermeiden.

Im ersten Teil der Arbeit werden Wirkungen von verschiedenen Leckagen in Abhängigkeit ihrer Größe und Art auf die Luftdichtheit einer flachgeneigten Dachkonstruktion untersucht. Die Leckagen sind auf der Innenseite bzw. auf der Außenseite der Dachkonstruktion eingebaut. Weiters werden bei unterschiedlichen Versuchen Dachkonstruktionen mit bzw. ohne luftdichte Ebene analysiert. Dabei werden CO₂ Konzentration in drei Zonen (Labor, Gefach und Raum) gemessen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Wirkung von Mineralwolldämmungen in Gefächern untersucht. Hier wurde zwischen teilweiser Dämmung bzw. Volldämmungen mit unterschiedlichen Leckagen an der Innen- und Außenseite der Dachkonstruktion unterschieden.

ABSTRACT

In the present work, the air tightness of flat angled roof structures is analysed under varying factors. Air tightness is closely related to thermal insulation and humidity protection as well as the fire protection and sound insulation of buildings. The air tightness has a significant impact on indoor climate, structural damage and loss of thermal energy. Only by ensuring the air tightness of the building shell, structural damage caused by water vapor entrained by airflow can be avoided.

In the first part of the study, effects of various leaks are investigated as a function of their size and type on the air tightness of a low pitched roof construction. The leaks are implemented on the inside or on the outside of the roof construction. The roof constructions are analysed by performing different experiments with and without air tight level. The measurements of CO₂ concentration are divided into three zones: in the laboratory, the timberframes and the room.

In the second part of the thesis effects of mineral wool insulation in timber frames are analysed with variation of partial and full insulation. In this study a 10 mm thick leakage on the inner side and different leaks on the outside of the roof structure have been arranged.

Formelzeichen

ppm	dimensionslos	Parts per Million (Teil von einer Million) 10^{-6}
$D_{\text{lab/gef}}$	in ppm	Druckdifferenz zwischen Labor und Gefach
$D_{\text{lab/raum}}$	in ppm	Druckdifferenz zwischen Labor und Raum
\dot{m}	in kg/d	Massenstrom in kg/d
Δc	in ppm/d	Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Dachkonstruktion
c_r	in ppm	CO ₂ -Konzentration im Raum
c_g	in ppm	CO ₂ -Konzentration im Gefach
V	in m ³	Luftvolumen des Raumes
ρ	in kg/m ³	Dichte der Luft $\rho=1.20 \text{ kg/m}^3$ bei 20°
P	in Pa	Luftdruck
n_{50}	in Pa	Luftwechselrate bei 50 Pa
V_{50}	in m ³ /h	Volumenstrom bei 50 Pa Differenzdruck
\dot{V}	in m ³ /(m ² s)	Volumenstromdichte
C	in m ³ /(m ² sPa ^b)	(Luft-) Leckagekoeffizient
Δp	in Pa	Druckdifferenz
b	dimensionslos	Luftströmungsexponent
V	in m ³ /h	Volumenstrom

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	2
KURZFASSUNG	3
ABSTRACT	4
Formelzeichen	5
Inhaltsverzeichnis	6
1. Einleitung	8
2. Grundlagen	9
2.1. Allgemeines	9
2.1.1. Flachdachkonstruktionen	9
2.1.1.1. Unbelüftete Flachdächer	10
2.1.1.2. Belüftete Flachdächer	12
2.1.2. Gründe für Luftdichtheit	13
2.2. Begriffsbestimmungen	15
2.2.1. Luftdichtheit und Winddichtheit	15
2.2.2. Luftdichtheit	15
2.2.3. Winddichtheit	16
2.2.4. Differenzdruckverfahren	17
2.2.5. Blower-Door	18
2.3. Auswertung	20
3. Stand des Wissens	21
3.1. Luftdichtheit	21
3.2. Luftdichte Kabeldurchführung	25
3.3. Luftdichte Folienüberlappung	25
4. Versuchsaufbau	28
4.1. Versuchsaufbau	28
4.2. Materialkennwerte	36
4.3. Außenklima	37
4.4. Innenklima	37
4.5. Verwendete Messgeräte	38
4.5.1. CO ₂ -Messung	38
4.5.2. Druckmessung	39
4.5.3. Messdatenerfassungs-Schalt-System	39
4.5.4. Temperaturmessung	39
4.5.5. Erzeugung von Luftdruck	39
4.6. Art der Auswertung	40
5. Messabweichung	42

5.1.	Zufällige Messabweichung	42
5.2.	Systematische Messabweichung	43
5.3.	Messabweichung bei Versuchsdurchführung.....	44
6.	Auswertung	45
6.1.	Messung Versuch 1 – Steigung auf drei unterschiedliche Druckhöhen.....	46
6.2.	Messung Versuch 2 – Steigung auf fünf unterschiedliche Druckhöhen.....	50
6.3.	Messung Versuch 3 – Dampfbremse auf Innenseite Dachkonstruktion	52
6.4.	Messung Versuch 4 – konstante CO ₂ -Konzentration im Labor ..	54
6.5.	Vergleich der ersten vier Versuchsdurchführungen	56
6.6.	Messung Versuch 5 und 6 – unterschiedliche Leckagen	58
6.7.	Messung Versuch 7 – Ausschaltung von Lüftungen	61
6.8.	Messung Versuche 8, 9, 10 -mit innenliegender Leckagen 10 mm 62	
6.9.	Messung Versuch 10, 11 – unterschiedliche Versuchsdurchführungen	64
6.10.	Messung Versuch 12 - Vergleich der Versuche mit einer Innenleckage von Ø 10 mm	67
6.11.	Vergleich von $D_{lab/gef}$ zwischen den Gefächern	72
6.12.	Einfluss der Anordnung der Außenleckage auf die Volumenstromdichte	74
6.13.	Messung Versuche 14 bis 17 ohne und mit Mineralwolle und unterschiedlichen Leckagengroße	76
6.14.	Auswertung des Massenstromes aufgrund der Leckagen in der Dachkonstruktion	86
7.	Zusammenfassung und Fazit.....	90
8.	Abbildungsverzeichnis	91
9.	Tabellenverzeichnis	94
10.	Literaturverweis	95

1. Einleitung

Seit jeher ist die Gebäudehülle so luftdicht wie möglich ausgeführt worden. Einfache Dichtungsmaßnahmen, wie das Stopfen mit Moos bei Holz-Blockbauten, sind zeugen von diesen Anstrengungen. Bei Massivbauten war es vor allem der Verputz, der die dichtende Funktion übernahm. Der Luftaustausch erfolgte in der Regel über undichte Fenster. Bei Wohnhäuser, die nach 1945 hergestellt wurden, ist ein natürlicher Luftwechsel von 0,3 bis 0,5 und die relative Raumluftfeuchtigkeit von nur 30 bis 35%. In Deutschland ist nach der Einführung der Energieeinsparverordnung das Thema Luftdichtheit eine größere Bedeutung gewachsen. [HAN07]

Eine niedriger Luftwechsel n_L ist die Anforderung für ein dichtes Gebäude. Durch die schlechte Planung und unprofessionelle Handwerksarbeit kommt es zur Leckagenbildung, die nach Fertigstellung des Gebäudes überprüft werden kann und dann auch überprüft werden muss.

Ein luftdichtes Haus hat viele Vorteile für den Bewohner: Der Komfort ist höher, der Heizenergieverbrauch ist kleiner und es werden Bauschäden vermieden. Für ein vernünftiges Lüftungskonzept ist ein dichtes Haus eine zwingende Voraussetzung. Bauschäden entstehen, wenn Luft aus Wohnräumen durch die Dämmung in kühlere Bereiche gelangt und die Feuchte dort kondensiert (Schimmelbildung). Der Luftdichtheitsgrad ist somit ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines Wohngebäudes.

Ziel dieser Arbeit ist die Auswirkungen von Leckagen, die durch die Kabeldurchführung in der Dachkonstruktion verursacht werden, quantitativ zu zeigen. Hier wurden verschiedene Leckagen in eine Flachdachkonstruktion im Labor experimentell untersucht. Basierend auf den gewonnenen Messdaten werden die verschiedenen Lösungsvarianten verglichen.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Versuchsraum in Holzbauweise mit 8 Dachgefächer an der TU Wien aufgestellt. Es wird besonders auf die Leckagen in Dachkonstruktionen bei der Folienüberlappungen und Kabeldurchführungen geachtet.

2. Grundlagen

2.1. Allgemeines

2.1.1. Flachdachkonstruktionen

Form von Dächern war lange Zeit von Witterungsbeanspruchungen bestimmt. So wurden in Nord- und Mitteleuropa Steildächer und in Südländern Flachdachkonstruktionen ausgeführt. Die damaligen Konstruktionen bestanden aus Kant- oder Rundhölzern, auf denen Reisig, Zweige oder Rinden kreuzweise verlegt wurden. Die oberste Schicht wurde aus ca. 30 bis 50 cm starkem Lehm gebaut. Mit der Entdeckung des Bitumens wurde in den europäischen Ländern die Ausführung von Flachdächern bedeutend. Die erste Entwicklung der wärmeisolierten Flachdächer wurde um 1930 begonnen. Unter bauphysikalischen Gesichtspunkten wurden Flachdächer nach dem zweiten Weltkrieg geplant. Der Standardaufbau bestand aus einer Ausgleichsschicht, einer Dampfbremse, der Wärmedämmung und einer mindestens 3-lagigen Bitumenabdichtung [PEC11]. Die Flachdächer sind in zwei Kategorien eingeteilt:

- Kategorie 1: genutzte Dachfläche - ÖNORM B 2209 – 2
- Kategorie 2: nicht genutzte Dachflächen – ÖNORM B 2220

In der Normung – ÖNORM B 2220 [ON096] sind Dächer mit einer Neigung von 1° bis 22° als Flachdächer bezeichnet.

Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise ermöglichen eine wirtschaftliche Konstruktion mit hohem Vorfertigungsgrad und großen Spannweiten.

Flachdächer lassen sich nach ihrer Konstruktion in zwei unterschiedliche Bauformen unterscheiden

- einschalige, unbelüftete Flachdächer oder „Warmdächer“ und
- zweischalige, belüftete Flachdächer oder „Kaltdächer“

2.1.1.1. Unbelüftete Flachdächer

Warmdach besteht grundsätzlich aus einer Tragkonstruktion, auf welche die Wärmedämmung und die Dachhaut bündig anschließen. Zu beachten ist, dass oberhalb der Tragkonstruktion immer eine luftdichte Schichte verlegt wird. Bei dieser Bauweise des Daches wird die Dachhaut direkt auf die Dämmschicht aufgebracht. Dabei wird die Wärmedämmung nach unten, also zur Raumseite hin, durch eine dampfdiffusionsoffene Abdeckung geschützt. Die Wetterhaut dieser Dächer besteht aus verschiedensten Dichtungsmaterialien. Die material- und verarbeitungstechnischen Anforderungen bei Verwendung der Dichtungsmaterialien sind in ÖNORM B 7220 [ONO02] geregelt. Warmdächer haben den Nachteil, dass im Fall eines Schadens an der Dachhaut die Wärmedämmung durchfeuchtet wird, da die unten liegende Dampfbremse auch das Abfließen verhindert.

Grundsätzlich wird zwischen Dächern mit Dämmung in der Konstruktionsebene und jenen mit Aufsparrendämmung unterschieden.

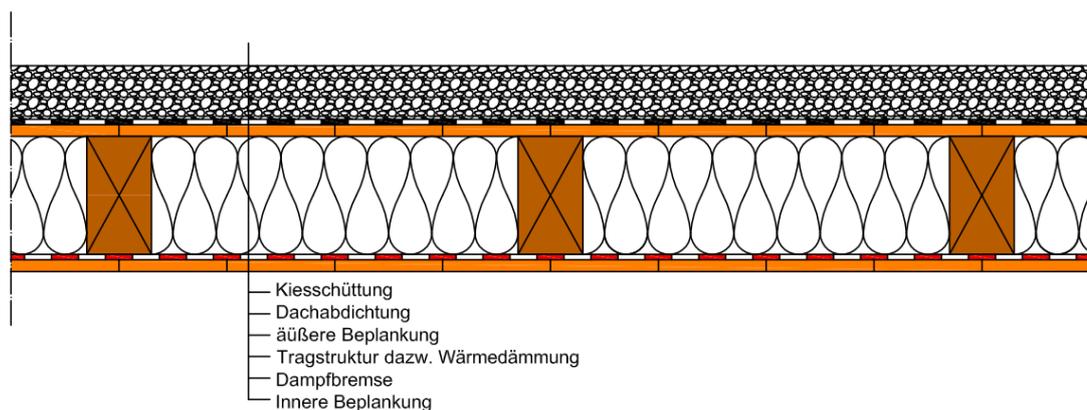


Abb. 1: Warmdachkonstruktion

Das Umkehrdach unterscheidet sich gegenüber das Warmdach dadurch, dass die Wärmedämmung über der Dachabdichtung verlegt wird. Da die Wärmedämmung komplett der Witterung ausgesetzt ist, kann natürlich nicht jeder Dämmstoff verwendet werden. Die Wärmedämmplatten sind einlagig zu

verlegen und dürfen nicht zweilagig verlegt werden. Der Vorteil von Umkehrdächern ist, dass die Abdichtungsschicht von mechanischer Beschädigung und UV-Strahlung dauerhaft geschützt ist [PEC11]. Des Weiteren ist vorteilhaft, dass man nach Einbau der Dachabdichtung in den weiteren Bauphasen nicht mehr von der Witterung abhängig ist.

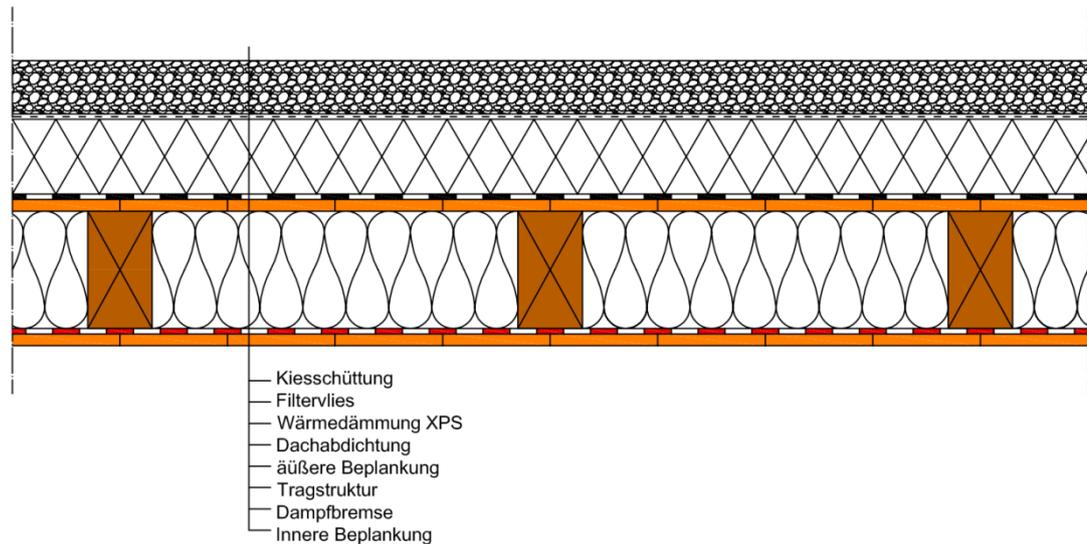


Abb. 2: Umkehrdachkonstruktion

Das Duo- und Plusdach ist eine nicht belüftete einschalige Dachkonstruktion, welche eine Kombination von Warmdach und Umkehrdach, Kombination aus Zwischen- und Aufsparrendämmung, darstellt. Das Plusdach kommt zum Einsatz, wenn beispielweise die Dämmung des Daches nur von außen verbessert werden soll und zwischen den Sparren bereits gedämmt wurde. Die optimale Aufteilung des Gesamtwärmedämmwertes bei dem Duodach ist ein Drittel unterhalb der Dachhaut und zwei Drittel des Dämmwertes oberhalb der Dachhaut. Der Aufbau ist grundsätzlich bauphysikalisch kritischer als andere Aufbauten. Es soll immer eine Dampfdiffusionsberechnung durchgeführt werden. [PEC11]

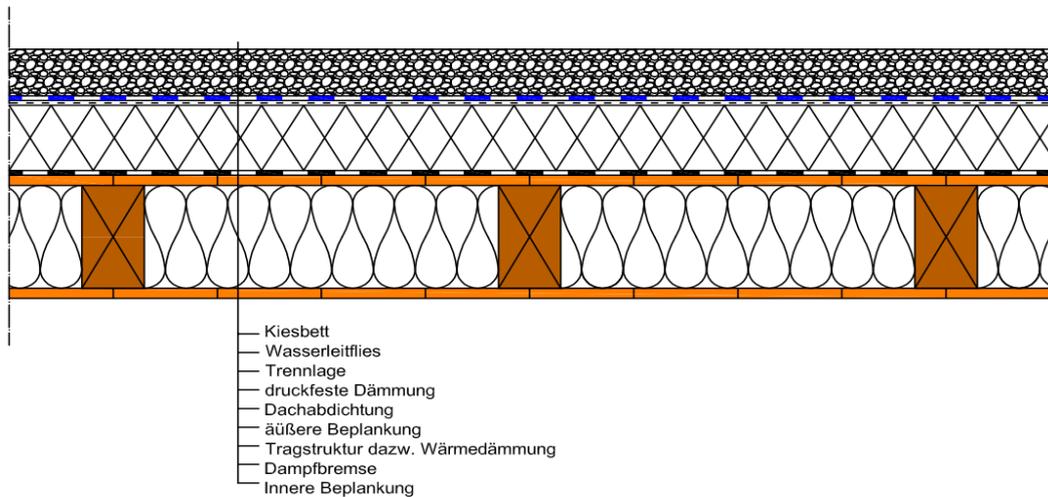


Abb. 3: Duodachkonstruktion

2.1.1.2. Belüftete Flachdächer

Wenn die Rede von belüfteten Dächern ist, dann sind dies solche, bei denen direkt über der Wärmedämmung eine belüftete Luftschicht angeordnet ist. Belüftete Flachdächer bestehen im Regelfall aus zwei Tragkonstruktionen:

- der oberen Tragkonstruktion mit dem Oberflächenschutz und
- der Dachabdichtung und einer unteren Tragkonstruktion – Dämmebene.

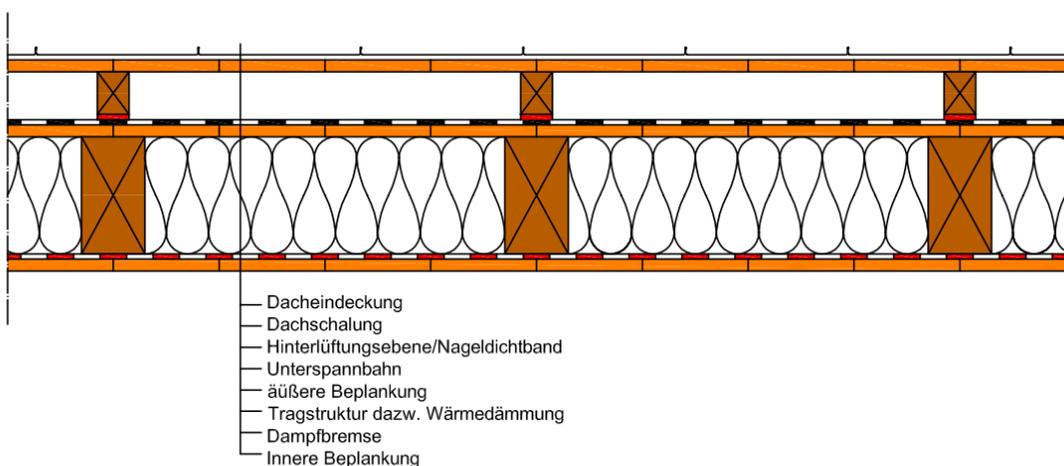


Abb. 4: Belüftete Flachdach

2.1.2. Gründe für Luftdichtheit

Die Gründe für eine luftdichte Bauweise von beheizten und / oder klimatisierten Gebäuden sind vielfältig und wohlbekannt. Luftdichtheit steht in engem Zusammenhang mit Wärme- und Feuchteschutz sowie dem Brand- und Schallschutz von Gebäuden. Zum Erreichen einer luftdichten Gebäudehülle, ist es erforderlich, sich schon zu Beginn der Planungsphase eines Gebäudes mit dem Thema zu befassen. Zunächst ist zu klären, wo die Luftdichtheitsebene eines Gebäudes verläuft und aus welchen Materialien sie besteht.

Eine luftdichte Gebäudehülle ist aus folgenden Gründen notwendig:

- Reduzierung des Heizenergieverbrauchs: Besonders im Winter findet durch die große Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und Umgebung ein Luftaustausch aufgrund des thermischen Auftriebs statt. Die erwärmte Innenluft strömt im oberen Teil des Gebäudes durch Undichtheiten der Gebäudehülle nach außen (Exfiltration), während im unteren Teil des Gebäudes kalte Luft durch die undichte Gebäudehülle nachströmt (Infiltration).

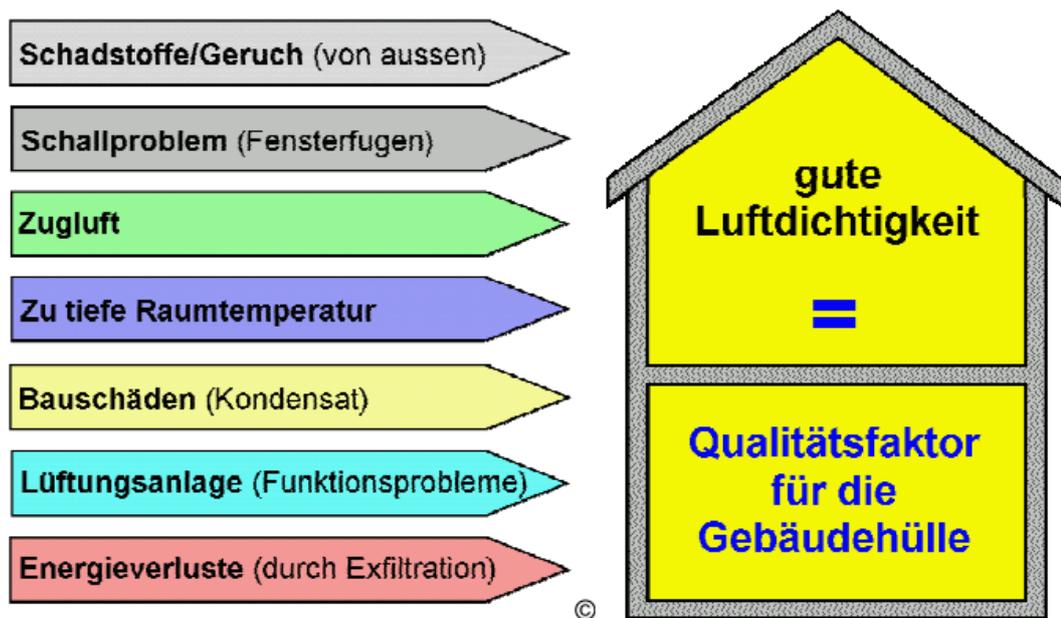


Abb. 5: Gründe für Luftdichtheit; [MIE04]

- Sommerlicher Wärmeschutz: Nach dem Motto: "Was gut gegen Kälte ist, ist auch gut gegen Hitze" bleiben gut Luftdichte Häuser an heißen Sommertagen innen kühler als die Außentemperatur.
- Vermeidung von Tauwasser in der Konstruktion: Wenn warme, feuchte Luft aus dem Innenraum in den kälteren Bereich der Baukonstruktion gelangt, kann der enthaltene Wasserdampf kondensieren. Es entstehen Feuchtbereiche, die zu Schimmelpilzbildung führen und Bauschäden verursachen können.
- Sicherstellung des Schalldämmmaßes von Bauteilen: Bei der Schallübertragung herrschen ganz spezielle physikalische Gesetze. Bereits schmale Schlitze in einer Wand lassen die Wand als schalldurchlässig erscheinen. Die schallleitende Wirkung von kleinen Ritzen wird meist unterschätzt. Lärmbelastung senkt die Wohnqualität.
- Sicherstellung der Dämmwirkung von Außenbauteilen: Wärmedämmung beruht auf dem Einschluss von Luft in Hohlräumen des Dämmmaterials. Wenn das Dämmmaterial von Luft durchströmt wird, wird ihm die Wärme entzogen und das Dämmmaterial verliert seine Wirkung.
- Sicherstellung der Funktion der Lüftungsanlage: Mit einer Lüftungsanlage mit oder ohne Wärmerückgewinnung möchte man den hygienisch notwendigen Lüftungsbedarf decken. Besonders problematisch ist dies bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Luft gelangt nicht über den Wärmetauscher ins Gebäude und kann somit nicht genutzt werden. Nur eine luftdichte Gebäudehülle gewährleistet den optimalen Betrieb der Lüftungsanlage [TRA 14].
- Vermeidung von kalten Fußböden im Erdgeschoss: Kalte Außenluft, fällt nach unten und bildet eine kalte Luftzone in Fußbodennähe

2.2. Begriffsbestimmungen

2.2.1. Luftdichtheit und Winddichtheit

Luft- und Winddichtheit von Gebäuden und einzelner Bauteile ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal für energieeffizientes Bauen. Es ist eine Anforderung an der Gebäudehülle das Raumklima, die Lärmbelastung, die Bauschadensfreiheit, die Innenluft und die Energiebilanz zu beeinflussen. Die luftdichte Schicht (in der Regel an der Rauminnenseite) und die winddichte Schicht (an der Gebäudeaußenseite) verhindern gemeinsam eine unzulässige Durchströmung in der Konstruktion. Luftdichtheit und Winddichtigkeit sind zwei unabhängige Themen, die nicht miteinander verwechselt werden dürfen.

2.2.2. Luftdichtheit

Fähigkeit einer Ebene bei innenseitiger Luftdichtheitsebene, ein Durchströmen der Gebäudehülle zu verhindern. Die Luftdichtheit beeinflusst den Wärme- und Feuchtigkeitshaushalt einer Konstruktion. Unter Luftdichtheit wird die Verhinderung von konvektiven Strömen verstanden, das heißt, das Eindringen von Luft in Bauteile von innen nach außen [RIC10]. Die DIN 4108 Teil 7 [DIN11] beschreibt die Anforderung an die Luftdichtheit. Bei der Dachkonstruktion wird die luftdichte Schicht mit Rauminnenseite Dampfbremse gebildet. Die Luftdichtheit eines Gebäudes ist ein Qualitätsmerkmal und aktueller Stand der Technik.

Um eine fehlerhafte Luftdichtheitsebene zu gewährleisten soll auf die folgende Aspekte beachten werden:

- Leitungen und Installationen luftdicht ausführen
- Die luftdichte Schicht darf nicht perforiert werden

Fehlende Luftdichtheit kann zu einer Durchströmung der Konstruktion von innen nach außen führen. Die möglichen Folgen sind:

- Tauwasserausfall in der Konstruktion
- Verminderter Wärmeschutz

- Niedrige Oberflächentemperatur

Die dabei auftretenden Risiken sind:

- Schäden an der Konstruktion
- Schimmelbildung
- Zugscheinungen (durch Abkühlung der inneren Oberflächentemperatur) [RIC10]

2.2.3. Winddichtheit

Unter Winddichtheit versteht man grundsätzlich die Vermeidung des Einströmens der kalten Außenluft in die Dämmung und eine damit verbundene Reduktion der Dämmwirkung. Somit wird die Wärmedämmschicht geschützt und die Dämmeigenschaft der Bauteile nicht beeinträchtigt. Bei allen Dachflächen spielt die konstruktiv richtige Ausführung der Winddichtungsebene eine bedeutende Rolle. Die Wirksamkeit der Wärmedämmung hängt nicht nur vom verwendeten Dämmstoff und dessen Dicke ab, sondern auch davon, ob die gesamte Fläche wind- und luftdicht ausgeführt wurde. Selbst durch kleine Ritze von weniger als 1cm Breite verursachen große Wärmeverluste infolge des erhöhten Luftaustauschs.

Bei fehlender Winddichtheit kann zu einer Durchströmen der Konstruktion führen. Die möglichen Folgen sind:

- Tauwasserausfall in der Konstruktion
- Verminderter Wärmeschutz
- Niedrige Oberflächentemperatur

Die dabei auftretenden Risiken sind:

- Schäden an der Konstruktion
- Schimmelbildung
- Zugscheinungen [RIC10]

2.2.4. Differenzdruckverfahren

Mit dem Differenzdruck-Messverfahren wird die Luftdichtheit der Hülle von Gebäuden oder Gebäudeteilen gemessen. Es kann benutzt werden:

- um die Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes oder Gebäudeteil zu messen
- um die relative Luftdurchlässigkeit verschiedener ähnlicher Gebäude zu vergleichen
- um die Leckage in der Gebäudehülle aufzuspüren
- um die Verringerung der Luftdurchlässigkeit zu bestimmen

Die Luftdichtheitsmessung nach EN ISO 9972 [EN12] unterscheidet zwischen den folgenden beiden Verfahren:

Verfahren A

- Die Prüfung des Gebäudes im Naturzustand, d.h. die Gebäudehülle befindet sich in dem Zustand, in dem Heizungs- oder Klimaanlage in Betrieb sind.
-

Verfahren B

- Die Prüfung der Gebäudehülle. Die Messung erfolgt, sobald die sog. „luftdichte Ebene“ oder Gebäudehülle fertiggestellt ist. In der Gebäudehülle befinden sich die äußeren Öffnungen, welche zuvor geschlossen bzw. abgedichtet werden müssen. Wärmeerzeuger mit Raumlufverbund und Mechanische Lüftungs- und Klimaanlage werden ausgeschaltet.

Für die Endabnahme und als ENEC-Nachweis, muss die Messung nach dem Verfahren A vorgenommen werden. Es werden keine weiteren Maßnahmen getroffen, um Luftdichtheit zu verbessern.

Eine Messung, wo die luftdichte Ebene noch zugänglich ist, ist sinnvollerweise mit Verfahren B durchzuführen. Rohrdurchlässe und ähnliches, müssen vorübergehend noch abgedichtet werden.

Ideale Wetterverhältnisse für die Differenzdruck-Messverfahren sind kleine Temperaturdifferenzen und niedrige Windgeschwindigkeiten.

Bei der Messung unterscheidet man zwischen Über- und Unterdruckmessung in Gebäuden oder Gebäudeteilen. Die ÖNORM B8110-5 schreibt den maximalen Luftdichtheitswert für die einzelnen Gebäudetypen vor.

Tabelle 1: Genormte Luftwechselraten

Objekt	Grenzwert nach ÖNORM B8110-5
Passivhaus mit mechanischer Lüftung	$n_{L50} < 0,6/h$
Niedrigenergiegebäude mit mechanische Lüftung	$n_{L50} < 1,5/h$
Gebäude ohne mechanische Lüftung	$n_{L50} < 3,0/h$

Die 3,0/h bedeuten, dass in einer Stunde bei einer Druckdifferenz zwischen innen und außen von 50 Pa dreimal das beheizte Luftvolumen des Gebäudes durch Undichtheit ausgetauscht werden darf.

Um einem Druck in der Gebäudehülle zu erzeugen, gibt es verschiedene Ausrüstungen.

2.2.5. Blower-Door

Blower-Door ist am meisten verwendete Anlage um Luftdurchlässigkeitsmessungen an der Gebäudehülle durchzuführen. Für die Messung werden zunächst alle Fenster und Türen sowie Öffnungen zur Außenseite oder begrenzenden Gebäudeteilen geschlossen. Bei diesem Test wird ein Ventilator, der sogenannte Blower-Door, luftdicht in die Öffnung eingesetzt. Der Ventilator wird mittels eines verstellbaren Metallrahmens, der von einer luftundurchlässigen Plane umgeben ist, in eine Tür- oder Fensteröffnung eingesetzt. Dabei drückt sich der Rahmen über Gummidichtungen im Tür- oder Fensterrahmen fest. Mit dem

regelbaren Ventilator wird entweder Luft in das Gebäude hineingeblasen (Überdruck) oder daraus abgesaugt (Unterdruck). Gezielt wird dabei der Druckbereich zwischen 10 bis 60 Pa (Über- oder Unterdruck) abgefahren und dabei der entsprechende Volumenstrom bestimmt. Die Tür oder das Fenster, in der die Blower-Door eingesetzt wird, kann dann natürlich nicht mit gemessen werden. Messinstrumente bestimmen die zwei Druckdifferenzen:

- Druckdifferenz zwischen Außen- und Innenraum
- Druck im Ventilator und damit die Größe des Luftraums

Die Messungen bei den kleinen Druckdifferenzen sollten besonders vorsichtig durchgeführt werden, damit die Daten nicht verfälscht werden.

[RIC10]



Abb. 6: Blower-Door

2.3. Auswertung

Luftdichtheit eines Gebäudes oder Gebäudeteils kann durch Unterdruck- oder Überdruckmessung als standardisiertes Messverfahren (Blower-Door-Messung nach EN ISO 9972) bestimmt werden. Als Maßzahl für die Luftdichtheit eines Gebäudes wird die Luftwechselrate (n_{50} -Wert) herangezogen.

Luftwechselrate: Zur Charakterisierung des Luftaustausches dient die Luftwechselrate n mit der Einheit $1/h$. Sie gibt an, wie oft das Luftvolumen eines Raumes pro Stunde ausgewechselt wird.

$$n_{50} = V_{50}/V$$

n_{50} – Luftwechselrate bei 50 Pa

V_{50} – Volumenstrom bei 50 Pa Differenzdruck

3. Stand des Wissens

3.1. Luftdichtheit

Hauser und Hall (2003) haben in 51 Einfamilienhäuser in Leichtbauweise die Luftdichtheit der gesamten Gebäude sowie einzelne Leckagen untersucht. Es waren 41 Einfamilienhäuser Neubauten im Alter von weniger als 1 Jahr und die restlichen zehn Einfamilienhäuser waren zwischen zwei und vierzehn Jahren alt. Insgesamt wurden 26 Firmenobjekte untersucht. Die meisten Luftdichtheitsschichten sind aus Folien mit raumseitiger Gipskartonverkleidung oder OSB-Platten ausgebildet. Die untersuchten Einfamilienhäuser waren mit einer Fensterlüftung oder mit installierter Lüftungsanlage ausgestattet. Es ist für alle Häuser ein mittlerer n_{50} -Wert von $2,4 \pm 0,2 \text{ h}^{-1}$ bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass zum Vergleich der Untersuchung aus den Jahren 1996 ein deutlicher Rückgang der Undichtheiten an linienförmigen Anschlüssen geschah. Typische Leckagestellen sind in der Abb. 7 dargestellt.

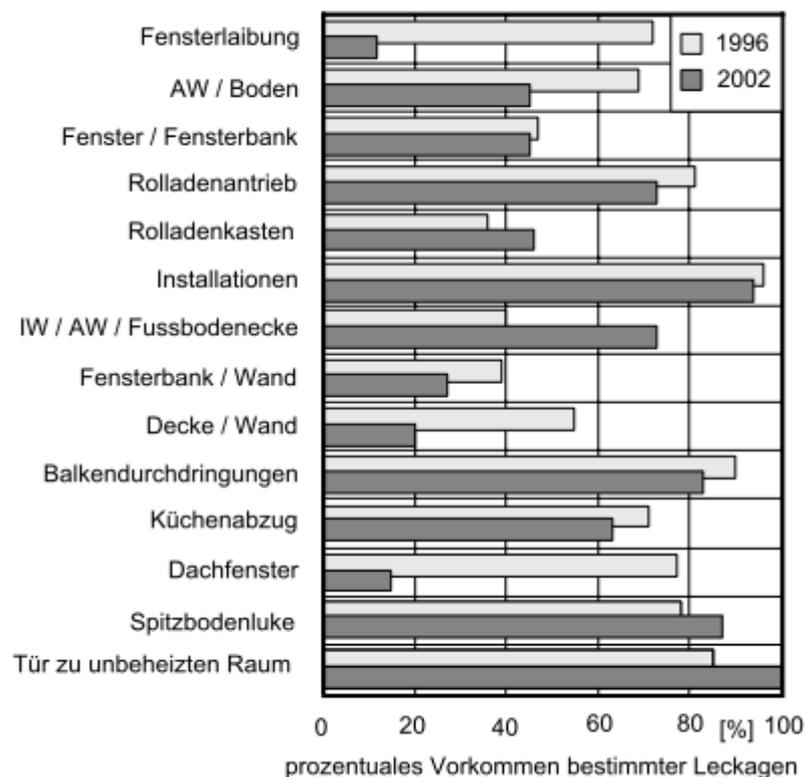


Abb. 7: Typische Leckagen im Gebäude. Vergleich aus den Jahren 1996 und 2002 gemäß Literaturangaben aus Hauser und Hall (2003)

Die Untersuchungen der Einzelleckagen vor Ort wurden mit einem n_{50} -Wert Unterdruck durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Volumenstromverläufe bei der Folienüberlappung sich nach Lage der Folie unterscheiden.

Reichel und Hartmann [ZEL95] zeigen in Deutschland durch Luftdichtheitsuntersuchungen in Etagenwohnungen und Eigenheime (Ein- und Zweifamilienhäuser, Reihen- und Doppelhäuser), dass die Ein- und Zweifamilienhäuser systematisch undichter sind als Etagenwohnungen. Die n_{50} -Werte zeigen bei den neuerrichteten Häusern im Mittel zwischen 4 bis 6 h^{-1} und bei den Häusern mit einem Erreichungsziel eine geringe Luftdurchlässigkeit von $n_{50}=2,6 \text{ h}^{-1}$ [Zel95]. In mehr als die Hälfte der Eigenheime wurde zumindest Dachgeschoßausbau von den Eigentümern selbst übernommen.

Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, dass das Aufbringen der Luftdichtheitsebene durch unqualifizierte Handwerker eine Verdoppelung der Luftdurchlässigkeit im Vergleich der Ausführung von professionellen Fachleuten verursacht wird.

Bernd Nusser [NUS12] hat sich in seiner Dissertation mit Luftdichtheit und Luftfeuchtigkeit beschäftigt. Es wurden Freilanduntersuchungen an 16 hölzernen Flachdachkonstruktionen auf die Dauerhaftigkeit und der hygienische Vorgang in einem Gefache analysiert. Leckagen in der Luftdichtheitsschicht, welche sich unter baupraktischen Bedingungen nicht zu 100% vermeiden lassen, erhöhen die notwendige Rücktrocknung. Der Grad der Luftdichtheit hängt von den Fertigungsbedingungen und Ausführungsqualität ab. Diese Faktoren werden durch die Definition der Luftdichtheitsklassen (LDK) A+, A, B und C berücksichtigen.

Auf 50 Einfamilienhäuser im Holzbau, wobei die meisten im Jahr 2008 von fünf größten österreichischen Fertighausunternehmen fertiggestellt wurden, sind auf Luftdichtheit untersucht worden. Es sind alle potentiellen Leckagen mit 95%-Quantile erfasst. Der Lichtkabelausslass in Decken/Dächern und Wandfläche liegt bei $0,48 \text{ m}^{-2}$ pro m^2 Raumgrundfläche.

Die Gleichung (3.1) beschreibt den Leckagevolumenstrom bei einer Kabelauslassdichte von $0,48 \text{ m}^{-2}$. Für Spalt- und Rissleckagen wird typischer Strömungsexponent von $2/3$ verwendet [Hans07]

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (3.1)$$

Q Leckagevolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$

ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

Bankvall und Sikander [SIK07] haben sich mit einem Forschungsprogramm für den Luftverkehr in und über die Gebäudehülle beschäftigt. Das Programm besteht aus drei Teilen:

1. Modellierung konvektiver Prozesse in Bauteilen,
2. Systeme Modellierung und Analyse des Luftverkehrs in und durch die Gebäudehülle, als Teil eines Ganzen Gebäude und
3. Luftdichtheit des Gebäudes, einschließlich Demonstration der Ergebnisse und deren Anwendung für die Praxis

Es hat sich gezeigt, dass viele Arten von Beschädigungen und Probleme durch schlechte Luftdichtheit verursacht werden.

In Studie Praxis-Test MINERGIE [ZEL04] wird zeigt, dass die Bewohner mit einer Lüftungsanlage zum Großteil zufrieden sind. Die Zufriedenheit bezieht sich auf die Raumluftqualität und den Schallschutz gegen Außenlärm.

Sandberg [SAN05] beschreibt die typischen Probleme durch schlechte Luftdichtheit von Konstruktionen. Hierbei wurde beim Projekt in Zusammenarbeit mit den schwedischen Baufirmen eine Organisation mit dem Ziel kritische Entwürfe und kritische Phasen der Bauarbeiten, soweit dies die Luftdichtheit betrifft, zu untersuchen. Viele der Schwachstellen, die im Zuge der Baumaßnahmen auftraten, wurden ebenfalls getestet und im Labor analysiert.

Die Ergebnisse zeigen den Bedarf an Informationen und Schulungen für Erreichung mangelfreier und luftdichter Gebäudeausführung.

In einigen Länder ist eine standardisierte Niedrigenergiehäuser Bescheinigung eingefügt, wie „Passivhaus“ in Deutschland und Österreich und „Minenergie“ in der Schweiz. Beide Bescheide erfordern einen Schwellenwert der Luftdichtheit (0,6 Luftwechsel pro Stunden bei 50 Pa). Es wurde sehr oft angenommen, dass die OSB Platte ausreichend luftdicht als Luftbarriere wirkt, die jüngsten Fälle beweisen das Gegenteil. Langmans, Klein und Roels [ZEL10] haben die Luftdurchlässigkeit von acht Handelsmarken von OSB-Platten, wobei die meisten der westeuropäischen Marken sind, verglichen. Die Ergebnisse haben eine große Variation der Luftdurchlässigkeit den OSB-Platten von $<0,001 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}/\text{Pa}$ bis $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}/\text{Pa}$ gezeigt. Die meisten bereits getesteten OSB-Marken mit vorhandener Luftleckage im Bauteil entsprechen dem Passivhaus-Standard $n_{L50} < 0,6/\text{h}$. Durch die Beschränkung des Testaufbaus, sind die Luftdurchlässigkeiten kleiner als $0,001 \text{ M}^3/\text{m}^2/\text{h}/\text{Pa}$ mit geringerer Genauigkeit gemessen. Die Ergebnisse der gemessenen Luftdurchlässigkeiten sind in der Abb. 8 zusammengefasst.

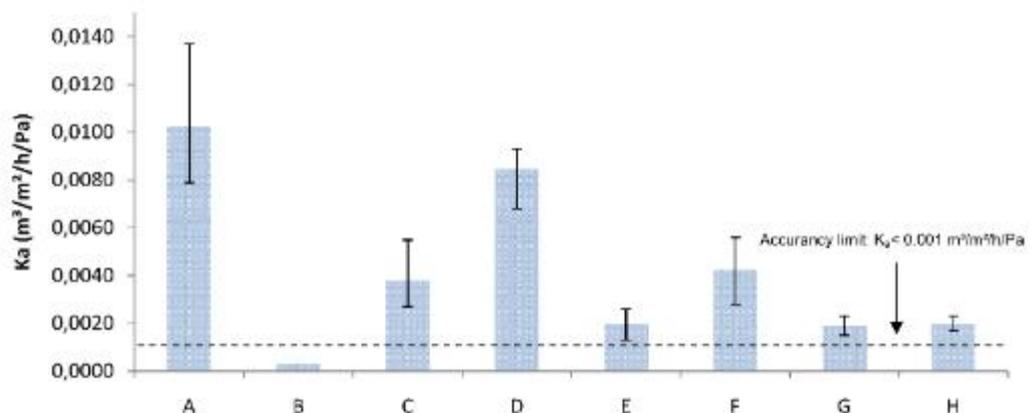


Abb. 8: Luftdurchlässigkeit der verschiedenen OSB-Marken getestet [ZEL10]

Die Ergebnisse in der Abb. 8 zeigen deutlich eine große Differenz zwischen der Luftdurchlässigkeit einzelnen OSB-Marken. Es ist auch eine große Variation innerhalb der gleichen Marke bemerkt, obwohl nur drei Proben von jeder OSB-Marke gemacht wurden.

3.2. Luftdichte Kabeldurchführung

Typische luftundichte Stellen sind Kabeldurchführungen durch Luftdichteebene und Steckdosen. Heute existieren am Markt unterschiedliche Produkte für luftdichte Kabeldurchführungen und Steckdosenanschlüsse.



Abb. 9: Kabeldurchführung, Fehler in der Praxis

Hall & Hauser [HAL03] haben gezeigt, dass die Durchführung von elektrischen Leitungen durch Löcher nur als Einzelleitung ausgeführt werden müssen. Der Volumenstrom steigt mit der Anzahl der Leitungen in einem Bündel.

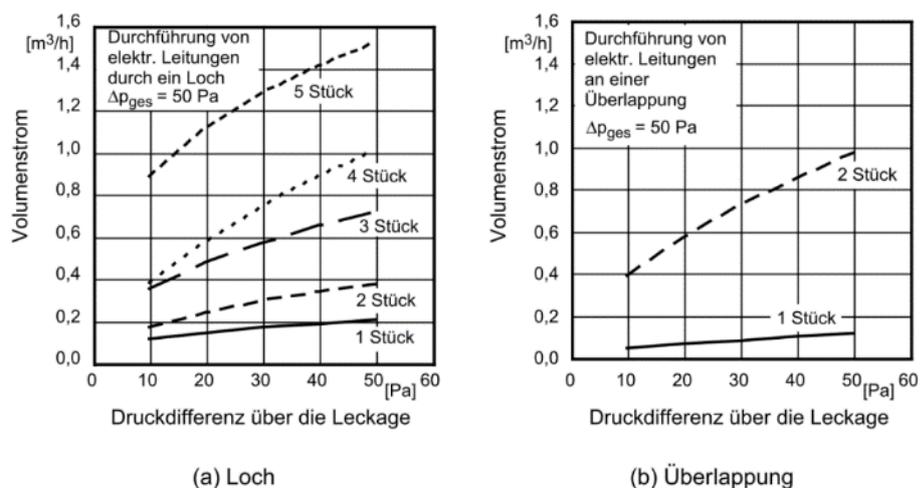


Abb. 10: Auswertung der Leckagevolumenstrom über Durchführungen von elektrischen Leitungen, [HAL03]

3.3. Luftdichte Folienüberlappung

Reichel [REI99] untersuchte in seinen wissenschaftlichen Arbeiten die Überlappungsbreite der Dampfsperre, welche horizontal oder vertikal an der Unterseite der Sparren angeordnet wird. Die Luftdurchlässigkeit bei 50 Pascal Differenzdruck mit einer Folienüberlappung von 5 cm erreicht einen Wert von 4 bis 6 $\text{m}^3/(\text{h m})$ bei horizontaler bzw. 2,5 bis 3,5 $\text{m}^3/(\text{h m})$ bei vertikaler Verlegung der Folie. Durch die vollständige Befestigung der Stöße bei der vertikalen Verlegung der PE-Folie auf den Sparren, wurden geringere n_{50} -Werte erreicht. Eine Reduzierung der Überlappungsbreite unter 5 cm führt zu einem deutlichen Anstieg des Leckagen- Stromes. Bei einer Überlappungsbreite größer als 10 cm ist keine spürbare Verbesserung der Luftdichtheit.

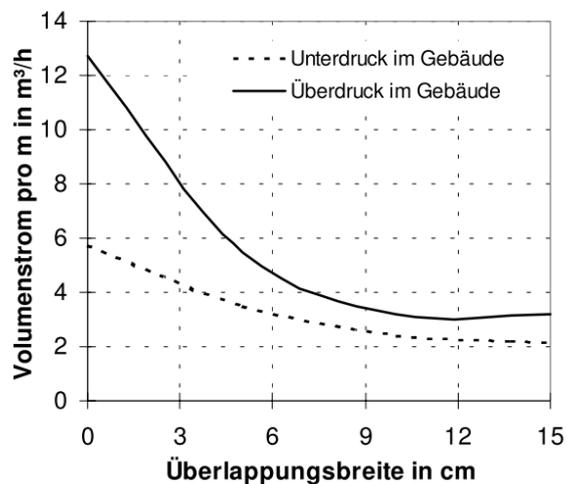


Abb. 11: Luftdurchlässigkeit einer Leichtbauwandkonstruktion (bei 50 Pa) mit horizontal an den Sparren überlappender Dampfsperre

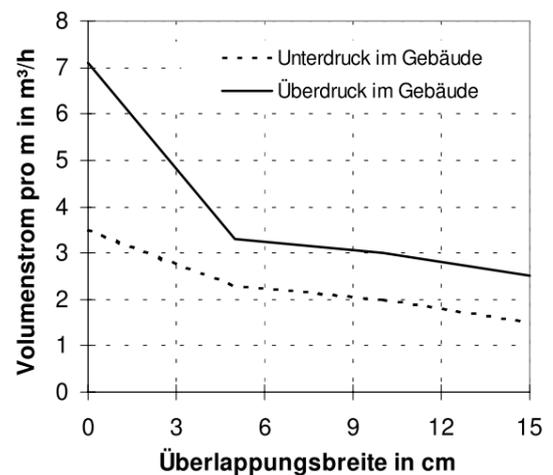


Abb. 12: Luftdurchlässigkeit einer Leichtbauwandkonstruktion (bei 50 Pa) mit vertikal an den Sparren überlappender Dampfsperre

Cammerer, Ackermann und Spitzner [ZEL09] haben sich mit der Dauerhaftigkeit von Verbindungen und Anschlüssen bei Luftdichtheitsschichten beschäftigt. In ihrer Forschungsarbeit ist hauptsächlich das Langzeitverhalten von Luftdichtverklebungen untersucht. Bei der Belastung von Verbindungen der Bahnen wird zwischen scherender, schälender und spaltender Belastungen unterscheiden.

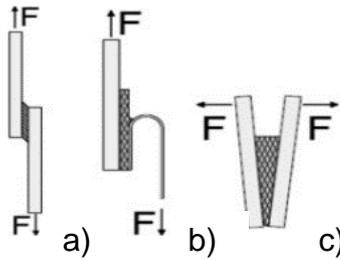


Abb. 13: Belastungsarten von Verbindungen:

- a) scherende Belastung,
- b) schälende Belastung,
- c) spaltende Belastung [ZEL09]

Um die Dauerhaftigkeit der Verklebungen beurteilen zu können, werden drei unterschiedliche künstliche Halterungen vorgenommen und zwei unterschiedliche Prüfmethode. Durch die Produktkombinationen Klebmasse/Luftdichtheitsbahn von den unterschiedlichen Herstellern zeigen die Ergebnisse eine große Bandbreite der ermittelten Schälkräfte. Unterschiedliche Klimabedingungen haben keinen Einfluss auf die Verklebungen. Die Klebmassen hatten überwiegend eine bessere Haftung auf den Substraten als auf den Bahnen. Durch das Einsetzen der scherenen Wechsel- und Dauerbelastungen bei der Produktkombinationen Klebmasse /Luftdichtheitsbahn der unterschiedlichen Hersteller ist auch hier ein deutlicher Unterschied erkennbar.

4. Versuchsaufbau

4.1. Versuchsaufbau

Die Versuche wurden an der TU Wien im Labor Aspanggründe, Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien durchgeführt. Das Versuchsmodell wurde in einem geschlossenen Raum aufgebaut und beinhaltet einen Raum mit einem Fenster und Außentür. Das Versuchsmodell wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.



Blower Door



Raum mit CO₂ -Sensoren

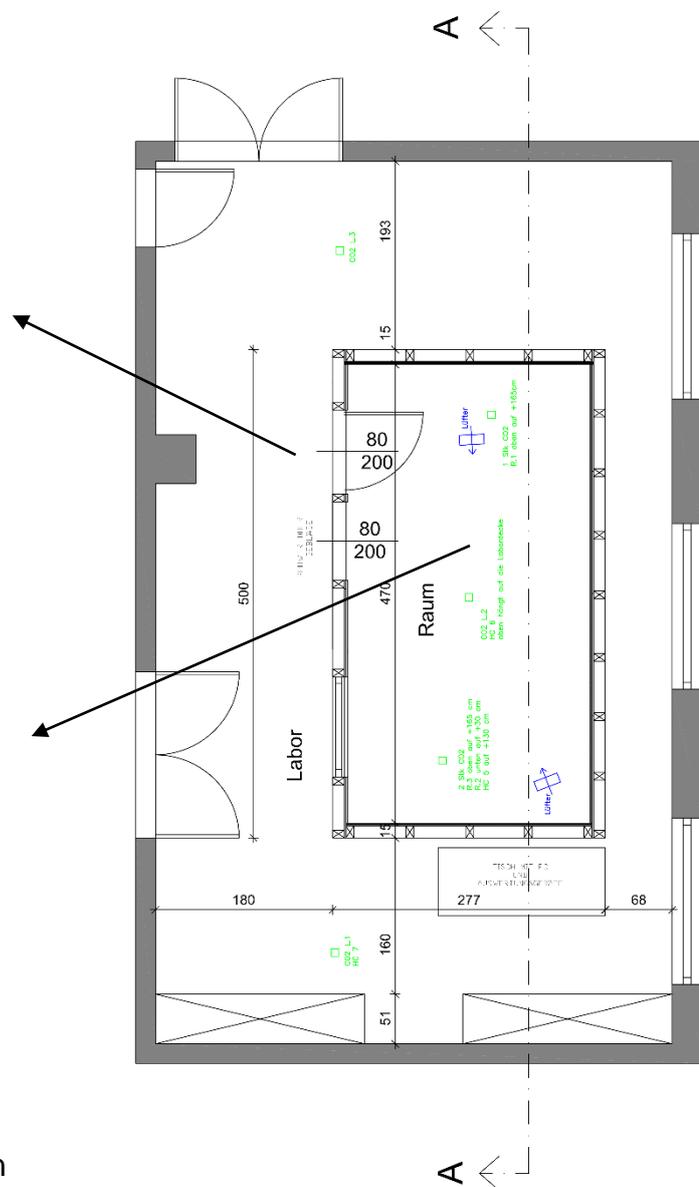
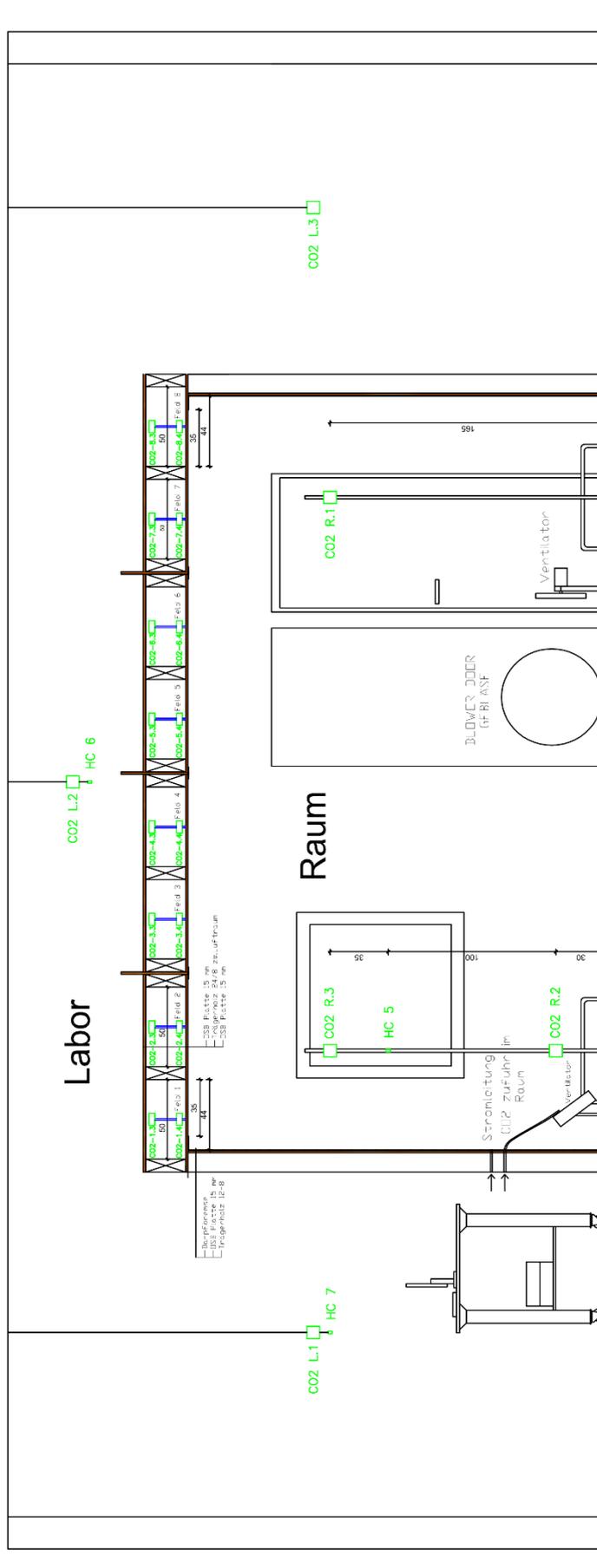


Abb. 14: Grundriss Versuchsmodell



Raumseite: Blower-Door



Links: CO₂ Schlauch
Rechts: Schlauch für
Druckmessung

Abb. 15: Schnitt A-A

Das Versuchsmodell wurde in Holzbauweise aufgebaut und weist eine Länge von 5,00m und eine Breite von 2,77m auf. Um die Luftdichtheit messen zu können, ist statt Luft das Kohlendioxid (CO₂) mit empfindliche CO₂ Sensoren eingesetzt. Die CO₂ Konzentration wird mit einem Schlauch im Raum zugeführt, welcher durch die Wand verläuft. Eine schnellere Verteilung von CO₂-Konzentration im Raum wird mit zwei Ventilatoren geschaffen. Mit sechs CO₂ Sensoren und drei Humichip wird die CO₂-Konzentration und Temperatur im Versuchsraum und Labor gemessen, die in der Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt sind.

Überdachung ist als Flachdachkonstruktion mit einer Neigung von 5° ausgeführt und besteht aus acht Gefächern (Abb. 16, Abb. 17, Abb. 18) wobei darin jeweils sechs CO₂ Sensoren pro Gefach und vier Lüfter eingebaut sind. Ein Sparrenfeld wird in meiner Arbeit als ein Gefach bezeichnet. Zur Messung der Temperatur in der Dachkonstruktion ist in den zwei Gefächern (Gefach 3 und Gefach 6) jeweils ein Humichip eingebaut. Acht Gefächer sind auf vier Felder aufgeteilt, so dass zwei Gefächer ein Feld bildet. Die Gefächer in einem Feld sind mit einem Holzträger getrennt, der einer 100%-igen Luftdichtheit nicht entspricht. Dies bedeutet, dass die Luft von einem Gefach in den anderen strömen kann. Um eine luftdichte Hülle zu schaffen, sind auf den Gefächern raumseitig eine Dampfbremse und laborseitig PE-Folie geklebt. Die Abklebungen von Dampfbremse und PE-Folie erfolgen für die Versuche mit einem Aluklebeband bzw. Gewebeklebeband. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hier um kurzzeitige Laborversuche handelt und für die gestellte Zielsetzung der Einsatz von Gewebeklebebandes ausreichend ist. In den folgenden Abbildungen sieht man das Versuchsmodell und die eingebaute CO₂ Sensoren.

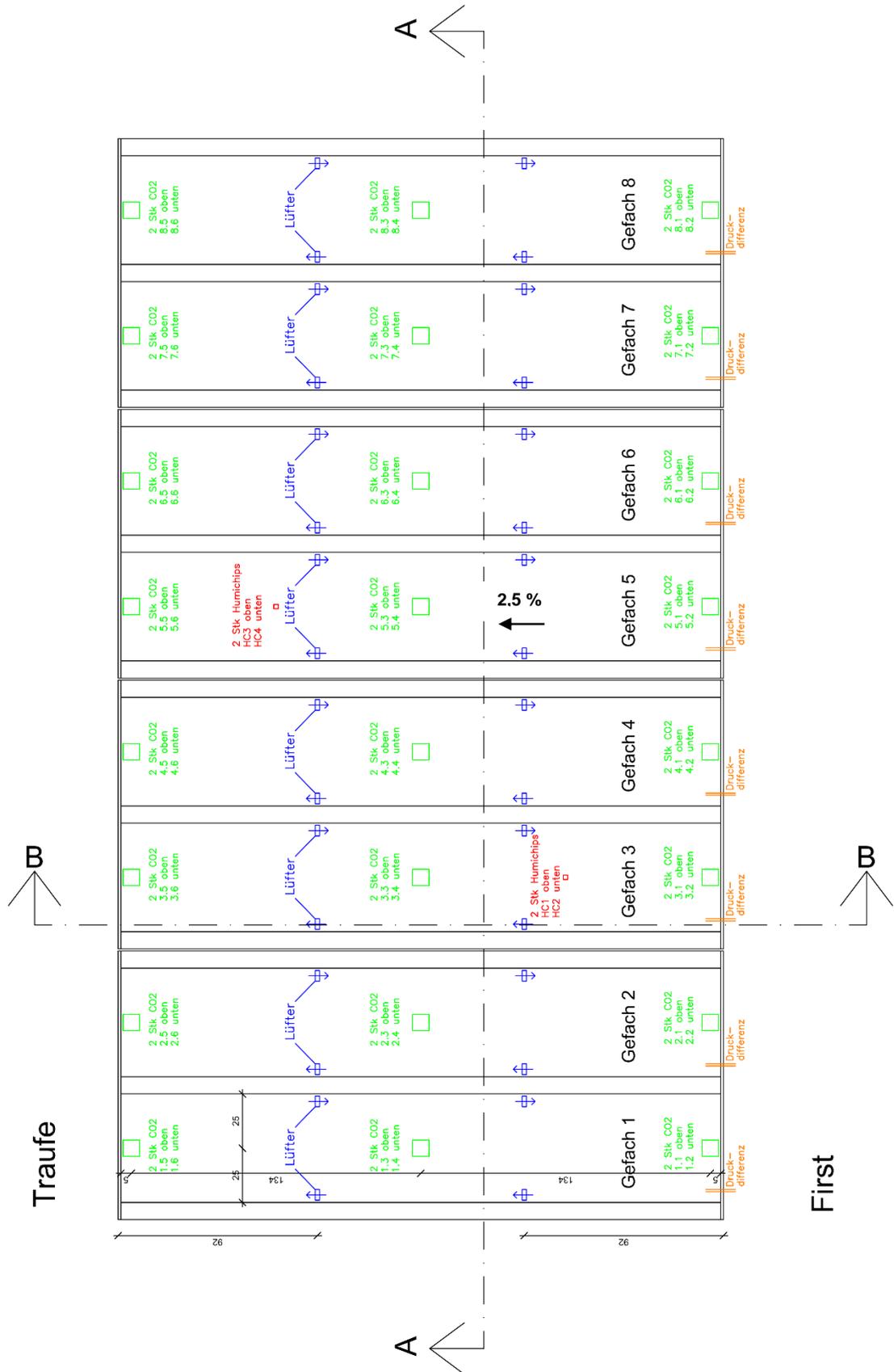
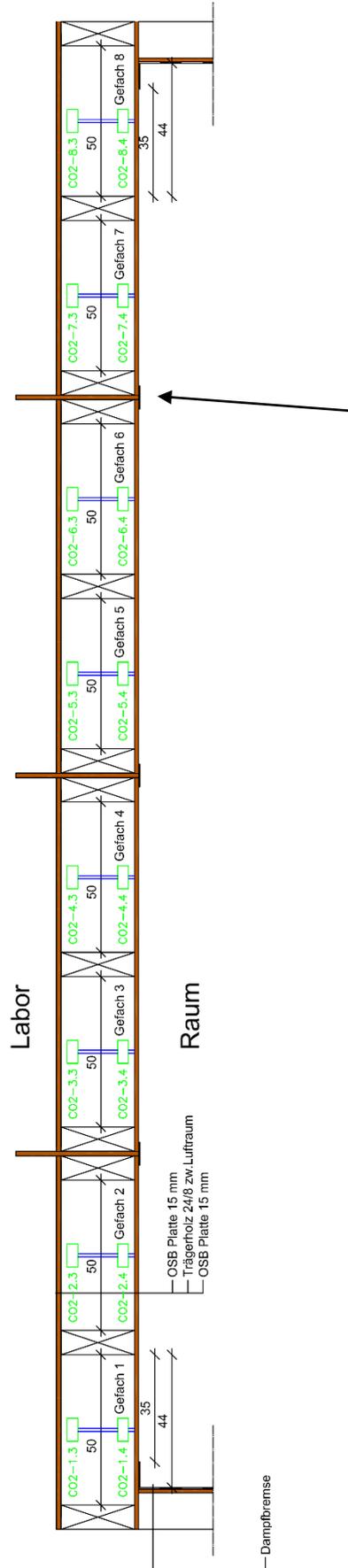


Abb. 16: Dachebene, CO₂ Sensoren Nummerierung, Lüfter und Humichip Anordnung in der Gefache

Schnitt A-A



Fuge zwischen die Felder sind mit Alukleberband luftdicht abgeklebt



Feld in Bauzustand, Montage CO₂-Sensoren und Lüfter

Abb. 17: Schnitt A-A, Anordnung von Dachsensoren in den Gefächern

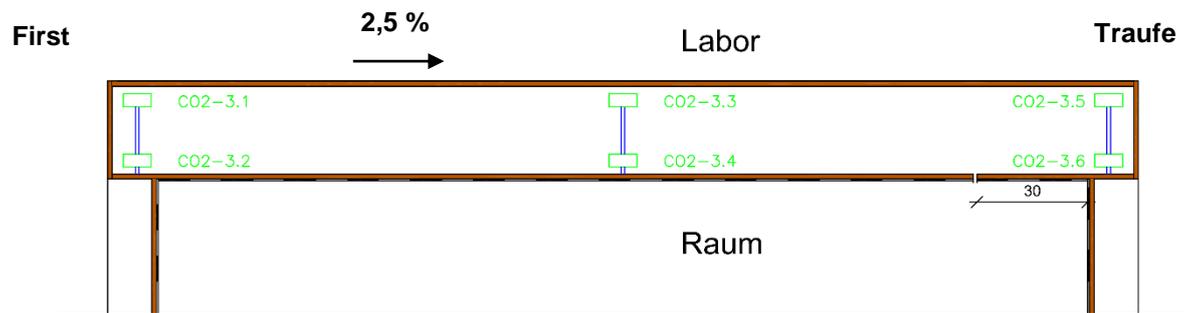


Abb. 18: Schnitt B-B, Anordnung von Dachsensoren in den Gefächern

Versuch Nummer	Bezeichnung	Dampfbremse innen	Leckage innen [mm]	Mineralwolle	Leckage Außen [mm]	PE-Folie Außen	Anzahl der unterschiedl. Druckstufen	CO ₂ im Labordef. [ppm]	Anmerkung
1	V1_DBI0_Li0_Miwo0_La0_Fola0						3		
2	V2_DBI0_Li0_Miwo0_La0_Fola0						5		
3	V3_DBI1_Li0_Miwo0_La0_Fola0	x					3		
4	V4_DBI1_Li0_Miwo0_La0_Fola0	x					3	ca.500	
5	V5_DBI1_Li5_Miwo0_La0_Fola0	x	5				3	ca.500	
6	V6_DBI1_Li5_Miwo0_La0_Fola0	x	5				3	ca.500	DBI ist bei d. Leckage geklept
7	V7_DBI1_Li5_Miwo0_La0_Fola0	x	5				3	ca.500	Ventilatoren sein ausgeschalten
8	V8_DBI1_Li10_Miwo0_La0_Fola0	x	10				3	ca.500	
9	V9_DBI1_Li10_Miwo0_La10_Fola0	x	10		10		3	ca.500	
10	V10_DBI1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	x	10		38		3	ca.500	
11	V11_DBI1_Li10_Miwo0_La10_Fola0	x	10		38		3	ca.500	Druckstufen einzeln durchgeführt
12	V12_DBI1_Li10_Miwo0_La3*38_Fola0	x	10		3 x 38		3	ca.500	
13	V13_DBI1_Li10_Miwo0_La0_Fola1	x	10			x	3	ca.500	Messung Druckdifferenz in Gefach
14	V14_DBI1_Li10_Miwo0_La38_Fola1	x	10		38	x	3	ca.500	
15	V15_DBI1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	x	10	x	38		3	ca.500	Miwo im G1-G4 24 cm und G5-G8 12 cm
16	V16_DBI1_Li10_Miwo0_La0_Fola1	x	10	x		x	3	ca.500	Miwo im G1-G4 24 cm und G5-G8 12 cm
17	V17_DBI1_Li10_Miwo0_La38_Fola1	x	10	x	38	x	3	ca.500	Miwo im G1-G4 24 cm und G5-G8 12 cm

Abb. 19: Aufbauten von Versuchen

Die Kabelleitungen sind in den Gefächern mit Hilfe von selbstklebenden Dichtungsmanschetten von der Firma „Keiser“ oder „Isocell“ luftdicht ausgeführt (Abb.20 und Abb. 21).



Abb. 20: Links: Firstseite, Rechts: Traufenseite



Abb. 21: Kabledurchführung in den Dachgefächern mit einer Kabelmanschette, luftdicht angeschlossen

Die CO₂ Sensoren sind an drei unterschiedlichen Stellen auf der Ober- und Unterseite je Gefach angeordnet. Der Aufbau und die Abmessungen der Dachkonstruktion sowie die Position der CO₂ Sensoren sind in der Abb. 22 dargestellt. Je Versuch werde eine eigene Situation für die Luftströmungsmessung durchgeführt.



Abb. 22: Links: 2 Gefach mit eingebauten CO₂ Sensoren und Lüfter

4.2. Materialkennwerte

Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, müssen die Materialkennwerte festgelegt werden, welche für alle Versuche durchgeführt werden. In Tabelle 2 wurden die Baustoffkenndaten der verwendeten Baustoffe zusammengestellt:

Tabelle 2: Materialkennwerte der verwendeten Materialien

Baustoff	Dicke [mm]	Rohdichte [Kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ [W/mK]	μ -Wert
Holz	80	650	0,15	50
OSB-Platten	15	650	0,13	50
Gipskartonplatten	15	900	0,25	10

Die Kabelleitung wird von außen nach innen durch OSB-Platten mit den Dichtungsmanschetten ausgeführt (Abb. 23).



Abb. 23: Dichtungsmanschette Firma Isocell

4.3. Außenklima

Das Versuchsmodell wird in einem geschlossenen Raum aufgebaut, so dass die äußeren klimatischen Bedingungen, wie Sonnenstrahlung, Regen und Schnee ausgeschlossen sind. Mit Hilfe von Ventilatoren wird die CO₂-Konzentration im Raum besser ausgeglichen und somit die Ergebnisse zielführender erbracht.

4.4. Innenklima

Raumklima ist durch die mechanische Raumentlüftung vor den Messungen auf das Außenklima angepasst.

4.5. Verwendete Messgeräte

4.5.1. CO₂-Messung

Die CO₂-Konzentration wurde mit dem Messwerterfasser Model EGQ222F002 der Firma SAUTER (SAUTER Head Office, CH-4016 Basel, Im Surinam 55) gemessen. Mit wachsendem CO₂-Gehalt in der Raumluft tritt eine erhöhte IR-Lichtdämpfung ein. Messbereich von CO₂-Konzentration ist zwischen 0 und 2000 ppm mit einer Messgenauigkeit von ± 50 ppm. Für die Durchmischung der CO₂-Konzentration wurden Ventilatoren eingesetzt. Das Auslesen der Messgeräte erfolgt über einem PC mit Messdatenerfassungssystem (Aqilent 34972A).

Das CO₂-Messprinzip basiert auf der Infrarotspektroskopie:

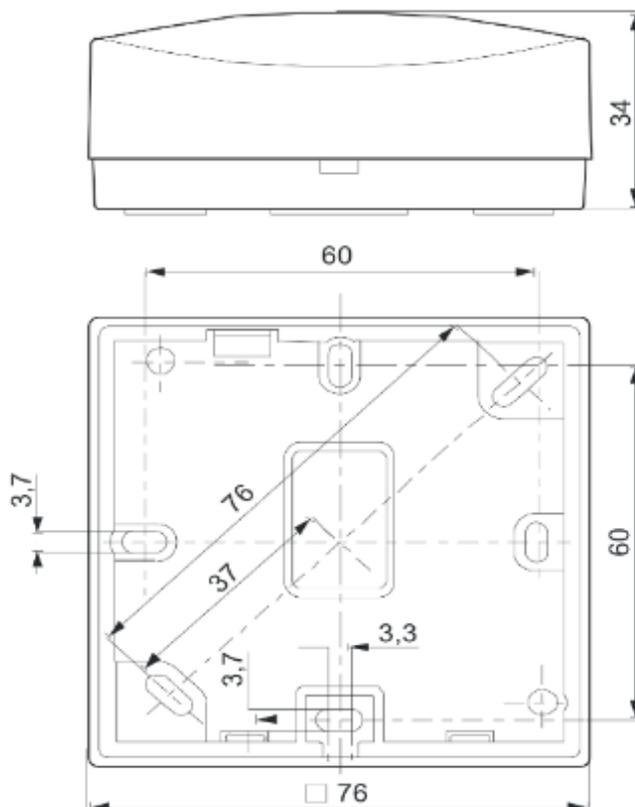


Abb. 24: SAUTER Model EGQ222F002

4.5.2. Druckmessung

Für die Druckmessung wird das Druckmessgerät Delta p von der Firma „Halstrup wacher“ verwendet.

4.5.3. Messdatenerfassungs-Schalt-System

Für die Datenerfassung wurde die Messdatenerfassung-/Schalt-Systemf Agilent 34972A verwendet im Zeitintervall von 5 sec Diese besteht aus einem 3-Slot-Meinframe mit eingebautem 6-1/2-Stellen- Digitalmultimeter. Das Zeitintervall der Datenerfassung wurde auf 5 sec eingestellt. Das Messdatenerfassung-Schalt-System ist mit einem Rechner verbunden, auf den alle Daten erfasst und angezeigt werden.

4.5.4. Temperaturmessung

In der Versuchsanlage wurde ein Gerät vom Typ Humichip 17204 vom Hersteller Vaisala eingesetzt.

Betriebstemperaturbereich: -20...+80°C

4.5.5. Erzeugung von Luftdruck

Für die Luftdichtheitsmessung der Versuchsanlage wurde Blower-Door verwendet. Hierbei kam das Monopolis Blower-Door Model 4 zur Umsetzung.

4.6. Art der Auswertung

Volumenstromdichte zwischen Raum und Gefach kann nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^b \quad (4.1)$$

\dot{V} Volumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$

C Luftstrom Koeffizient in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^b)$

Δp Druckdifferenz zwischen den Raum und Dachkonstruktion in Pa

b Leckage Exponent

Betrachtet man einen Zeitraum mit annähernd konstanter CO_2 -Konzentration im Labor und im Testraum, kann man die Masseneinführung \dot{m} in der Dachkonstruktion in kg/d berechnen.

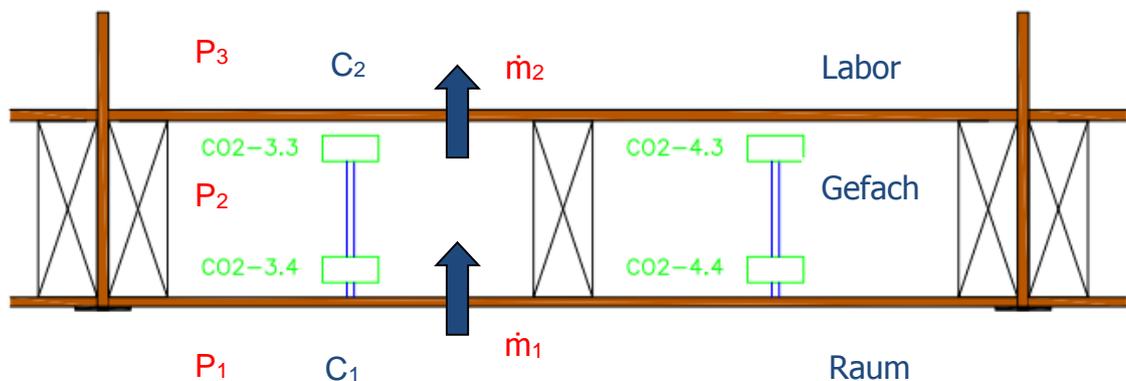


Abb. 25: Querschnitt ein Feld (zwei Gefächer)

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot C_{ges} \cdot \Delta p^{b_{ges}} = C_{ges} \cdot (P_1 - P_3)^{b_{ges}} \cdot \rho \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\Delta c}{c_r - c_g} \cdot V \cdot \rho = \rho \cdot C_1 \cdot \Delta p^{b_1} = C_1 \cdot (P_1 - P_2)^{b_1} \cdot \rho \quad (4.3)$$

$$\dot{m}_2 = \rho \cdot C_2 \cdot \Delta p^{b_2} = C_2 \cdot (P_2 - P_3)^{b_2} \quad (4.4)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

Angenommen, dass die

$$b_1 = b_2 = b_{ges}$$

Dann ist

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (4.5)$$

\dot{m} Massenstrom in kg/d

Δc Anstieg der CO₂-Konzentration in der Dachkonstruktion in ppm/d

c_r CO₂-Konzentration im Raum in ppm

c_g CO₂-Konzentration in der Gefach in ppm

V Volumen des Gefaches in m³

ρ Dichte der Luft kg/m³ $\rho=1.20$ kg/m³

b Luftströmungsexponent dimensionslos

P Luftdruck in Pa

Für die Auswertung von Massenstrom wird ein Mittelwert von allen sechs CO₂-Sensoren pro Gefach bzw. von allen CO₂-Sensoren im Raum bestimmt.

Sollten die Messungen mit mindestens zwei Druckstufen durchgeführt werden, können der (Luft-) Leckage Koeffizient und der Luftströmungsexponent mittels exponentieller Regression gemittelt werden.

Vergleich der Volumenstromdichte von unterschiedlichen Versuchen wird mit dem Mittelwert von Gefach 3 bis Gefach 6 ermittelt.

5. Messabweichung

Messen bedeutet, eine physikalische Größe mit einer normierten Einheit zu vergleichen. Physikalische Messungen sind nur in sehr seltenen Fällen frei von Abweichungen, die Messabweichung vom „wahren“ Wert. Die Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem wahren Wert wird als Fehler bezeichnet.

$$\Delta x = x - x_w \quad (5.1)$$

Δx Fehler (Messabweichung)

x Messwert

x_w Wahrer Wert

Da man den Wert von x_w nicht kennt, ist es nicht möglich, den Fehler einer Messung exakt zu bestimmen. Man ist deshalb darauf angewiesen, den Fehler abzuschätzen. Das Thema des Messfehlers regelt die Norm DIN 1319.

Die bei einer Messung auftretenden Fehler werden in zwei Fehlerklassen eingeteilt.

5.1. Zufällige Messabweichung

Als zufällige Messabweichung wird ein Messfehler bezeichnet, der durch ein Versehen oder einen äußeren Einfluss der Messwert deutlich übersteigt.

Zufällige Messabweichung resultiert aus:

- Falsche Bedienung von Messgeräten
- defekte Messgeräte
- schlechte Versuchsbedingungen

Zufällig heißt dabei: der konkrete Messwert x kann sowohl nach oben (+) als auch nach unten (-) von tatsächlichen Wert abweichen. Zufällige Messabweichung ist prinzipiell vermeidbar. Zufällige Messabweichung ist daran

zu erkennen, dass in der Messtabelle oder in der graphischen Darstellung einer der Messwerte eine sehr große Abweichung von den übrigen Messwerten aufweist. Zufällige Messabweichungen lassen sich mit mathematischer Berechnung nicht beseitigen. [DIN95]

5.2. Systematische Messabweichung

Der systematische Fehler ist bei jeder Messung erhalten. Es muss versucht werden, solche Effekte zu erkennen und zu minimieren. Durch wiederholende Messungen wird diese Art von Abweichung nicht verringert. Detaillierte Kenntnisse der Messbedingungen und der Messgerätes erlauben manchmal ein Ersetzen der Abweichung durch eine Korrektur. Systematische Fehler beeinflussen die Richtung, sie können sich sowohl addieren als auch gegenseitig aufheben.

- Sie treten bei unveränderten Messbedingungen stets mit dem gleichen Wert auf
- Sie sind objektiv bedingt durch die Unvollkommenheit der Messgeräte und Messmethoden, d.h. sie sind unvermeidbar.
- Sie sind durch das System bestimmt, d.h. bei wiederholten Messungen mit ein und derselben Messanordnung lassen sie sich weder erkennen noch ausschalten.
- Bestimmte Messmethoden beeinflussen sogar das physikalische Geschehen bzw. sind die Messmethoden an bestimmte Denkmodelle angepasst und führen somit zu unvermeidbaren systematischen Fehlern.
- Durch genauere Messgeräte und Messverfahren sind diese Fehler jedoch zu ermitteln und können damit korrigiert werden.
- Bei den Messgeräten erfolgt die Genauigkeit der Messung innerhalb der angegebenen Toleranzen, dadurch sind die systematischen Fehler und die Güte des Messwertes bestimmt.

- Systematische Fehler werden als "Unrichtigkeiten" bezeichnet, bei geeigneter Wahl der Messanordnung (Präzisionsmessungen) können sie gegenüber den zufälligen Fehlern vernachlässigt werden. [DIN95]

5.3. Messabweichung bei Versuchsdurchführung

- Einstellen von Druckdifferenz: durch die mechanische Einstellung von Druckdifferenz ist mit einer Abweichung von ± 3 Pa zu rechnen. Vermeidung von diesen Fehlern ist mit Verwendung von einem digitalen Gerät möglich.
- Wetterbedingung: Die Genauigkeit der Messung ist auch von Windgeschwindigkeit abhängig, dadurch dass bei der Messung für eine konstante CO₂-Konzentration im Labor zu halten ist, haben wir die Fenster geöffnet.

6. Auswertung

Die Versuche wurden im Labor der Technischen Universität in Aspanggründe zwischen Dezember 2013 und August 2014 durchgeführt. Zu Beginn wurden die Vorversuche durchgeführt, um Dichtheit der einzelnen Gefächer zu vergleichen. Für den Vergleich von Versuchen wird folgende Bezeichnung verwendet.

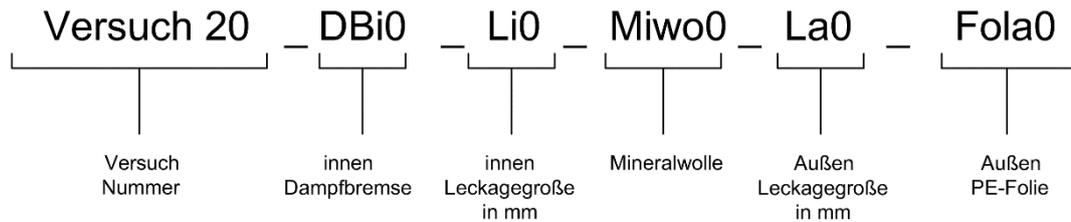


Abb. 26: Versuch Bezeichnung

Jedes Bauelement erhält zusätzlich eine Bezeichnung mit Nummer. Die Nummern bedeuten:

- 0 Element ist nicht eingebaut
- 1 Element ist eingebaut

6.1. Messung Versuch 1 – Steigung auf drei unterschiedliche Druckhöhen

Der Versuch 1 ist ein Vorversuch, um einen besseren Überblick über das Thema Luftdichtheit von einzeltem Gefach zu schaffen. Im Versuch 1 besteht die Dachkonstruktion Abb. 27 nur aus zwei OSB Platten und Trägerstruktur. Die Dachkanten und die Verbindung von zwei Dachelementen sind mit einem Aluminiumband Luftdicht angeklebt.

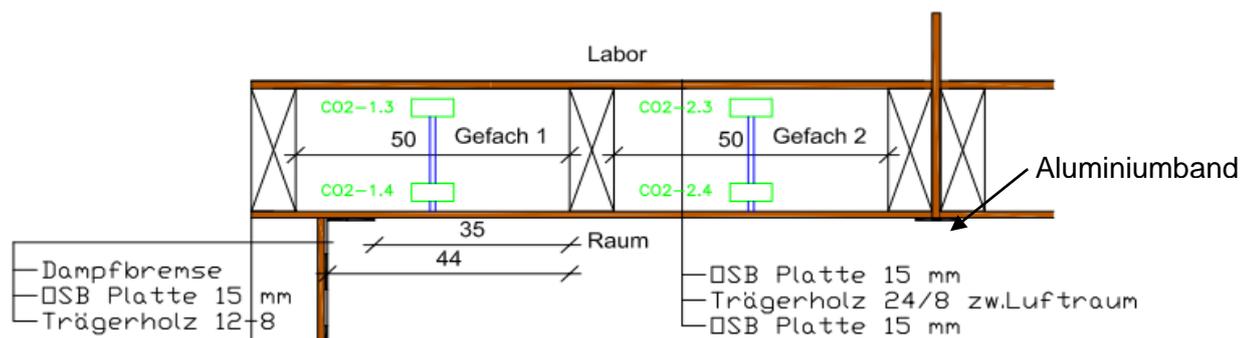


Abb. 27: Dachaufbau Versuch 1

Die Messung beginnt mit der Verwendung von Kohlendioxid (CO₂) und Einstellen von Überdruck in dem Versuchsraum. Gleichzeitig erfolgt die CO₂-Konzentration in die Dachkonstruktion. Die Messungen werden mit drei unterschiedlichen Druckstufen durchgeführt. Der Versuch wird mit einer konstanten CO₂-Konzentration im Raum, um etwa 1800 ppm durchgeführt. Die CO₂-Konzentration im Labor steigt durch die Leckagen in den Gefächern. Die Temperatur wurde sowohl im Raum und als auch im Labor konstant mit ca. 20°C gemessen. Man kann in der Abb. 28 erkennen, dass die CO₂-Konzentration in den Gefächern proportional mit der Druckstärke steigt. Die Undichtheit in der Dachkonstruktion ist durch die unvermeidbaren kleinen Konstruktionsleckagen als auch die Luftundichtheit von OSB-Platte verursacht. Durch den Vorversuch wurde festgestellt, dass noch keine luftdichte Ebene vorhanden ist.

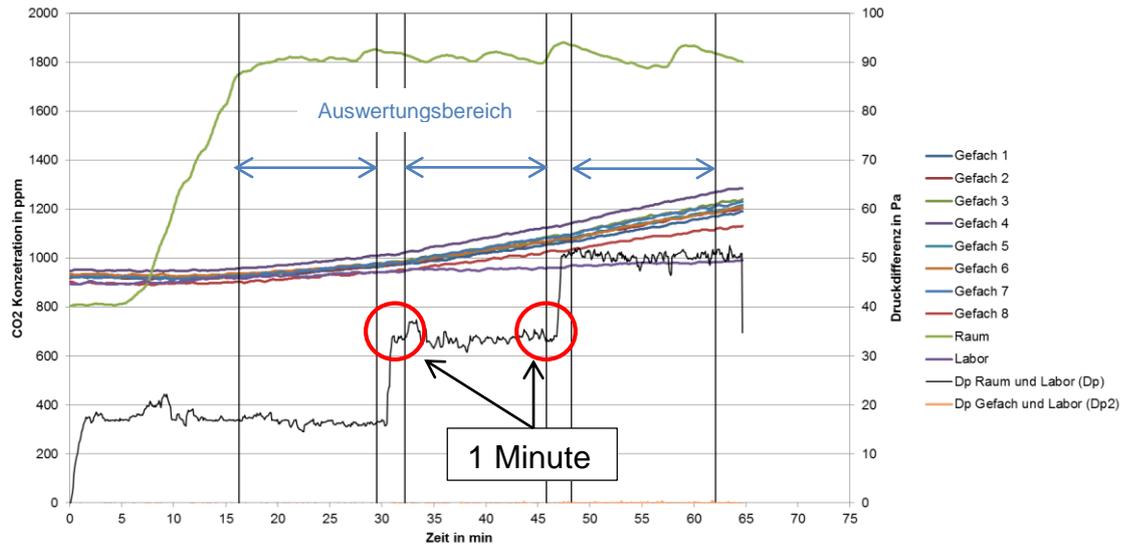


Abb. 28: Mittelwert der CO₂-Konzentration in alle acht Gefache bei drei unterschiedlichen Druckstärken, CO₂-Konzentration im Labor 900-1000 ppm

Für die Auswertung sind die CO₂-Werte eine Minute nach Erreichung bzw. vor der Änderung der Druckhöhe angenommen.

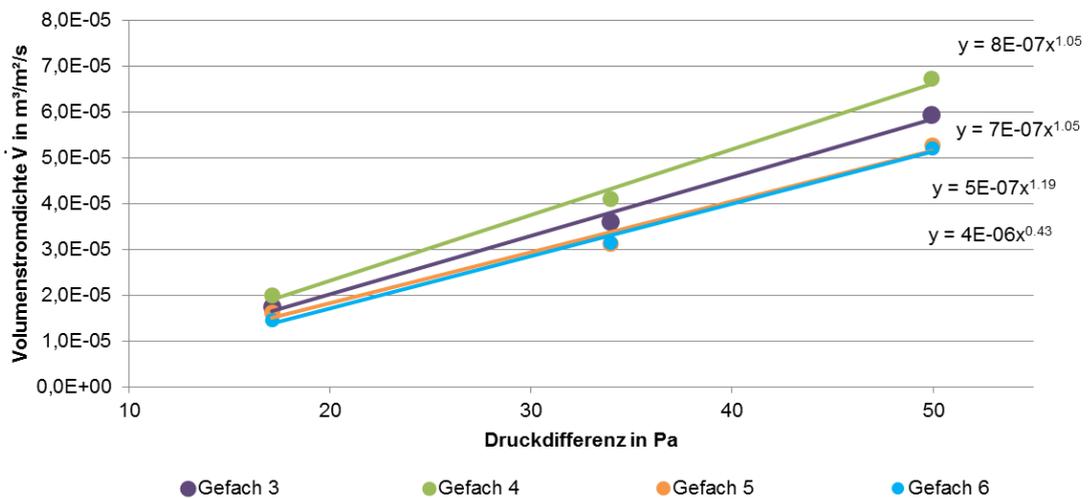


Abb. 29: zeigt den Vergleich vom mittigen Gefach, Gefach 3 bis Gefach 6 an.

In der Abb. 29 erkennt man, dass die Gefächer 3 und 4 eine größere Steigung als die Gefächer 5 und 6 haben.

Die Ursache für die größere Steigung sind folgende zwei Punkte:

1. Undichtheit der Gefächer an der unteren Seite
2. Gefächer weisen eine dichtere obere Seite auf im Vergleich zu den anderen Gefächern

Tabelle 3: Versuch 1

ΔP	Gefach 3	Gefach 4	Gefach 5	Gefach 6
Pa	$m^3/m^2/s$	$m^3/m^2/s$	$m^3/m^2/s$	$m^3/m^2/s$
17,1	1,75E-05	2,01E-05	1,63E-05	1,46E-05
33,9	3,61E-05	4,09E-05	3,14E-05	3,15E-05
49,9	5,94E-05	6,72E-05	5,29E-05	5,21E-05
C	7,92E-07	9,36E-07	8,41E-07	5,74E-07
b	1,10E+00	1,09E+00	1,05E+00	1,15E+00

Durch die unterschiedliche Dichtheit der Gefächer sind auch unterschiedliche Messwerte pro Gefach zu erwarten. In der Abb. 30 erkennt man, dass die Massenstromdichte im Gefach 4 am höchsten ist. Dadurch können wir aufschließen, dass das Gefach 4 am undichtesten ist.

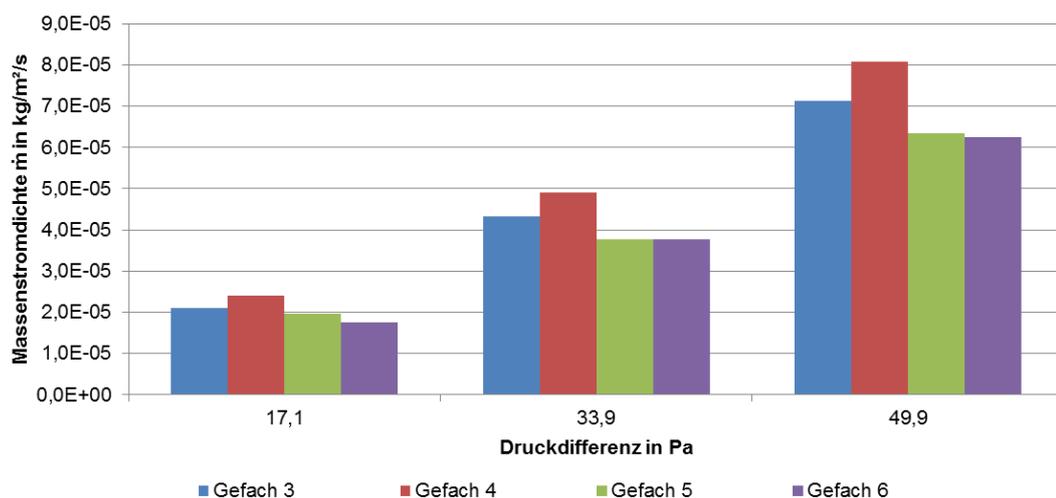


Abb. 30: Vergleich Massenstromdichte; die Massenstromdichte in Gefächern 5 und 6 ist identisch → zwischen den Gefächern ist ein Luftaustausch vorhanden

Die große Steigung der CO₂-Konzentration in den Gefächern ist nur durch die Leckagen auf der Unterseite – Raumorientierende OSB Platten möglich. Die CO₂-Konzentration im Labor steigt durch die Undichtheit in der äußeren OSB Platte. Die zwei Gefächer sind durch einen Balken in der Mitte vom Feld geteilt.

Aufgrund der Undichtheit zwischen den einzelnen Gefächern in einem Feld kommt es zur Luftströmung. Die Abb. 31 zeigt die möglichen Leckagen in den Gefächern.

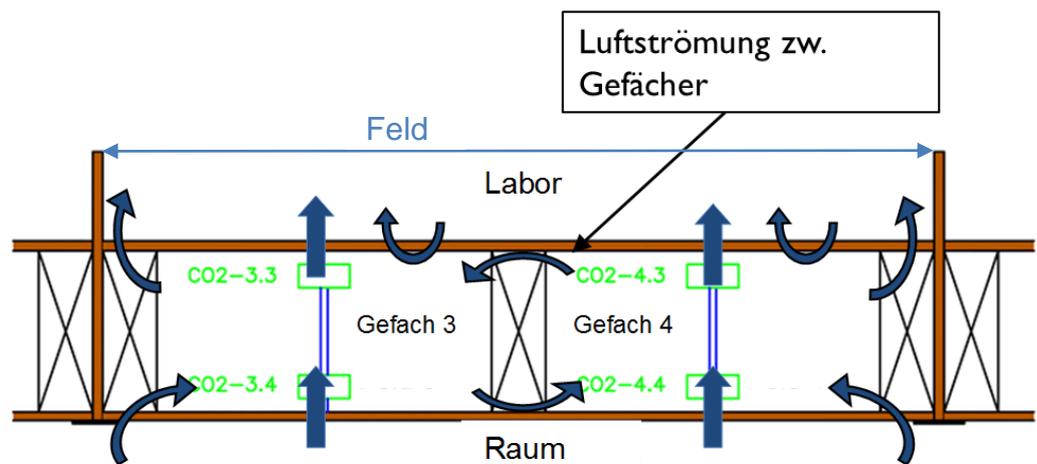


Abb. 31: Leckagen in der Dachkonstruktion- Versuch 1

6.2. Messung Versuch 2 – Steigung auf fünf unterschiedliche Druckhöhen

Der Dachaufbau bleibt gleich wie beim Versuch 1. Im Vergleich zum Versuch 1 wird beim Versuch 2 mit fünf unterschiedlichen Druckhöhen durchgeführt. Hierbei soll festgestellt werden ob unterschiedliche Druckstufenanzahl verschiedene Ergebnisse produzieren (Abbildung 26, 27).

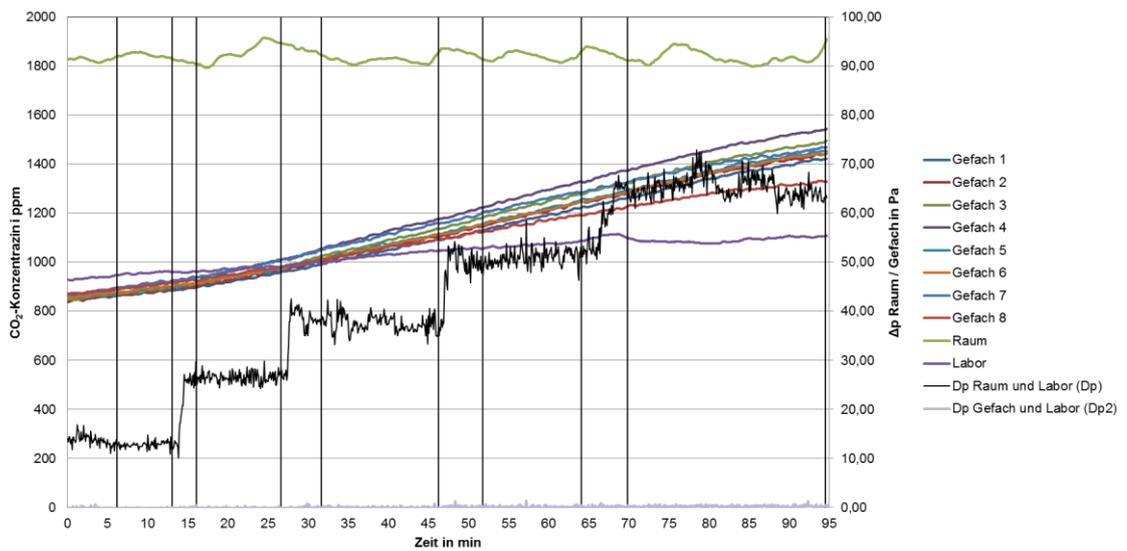


Abb. 32: CO₂-Konzentration bei fünf unterschiedlichen Druckstärken

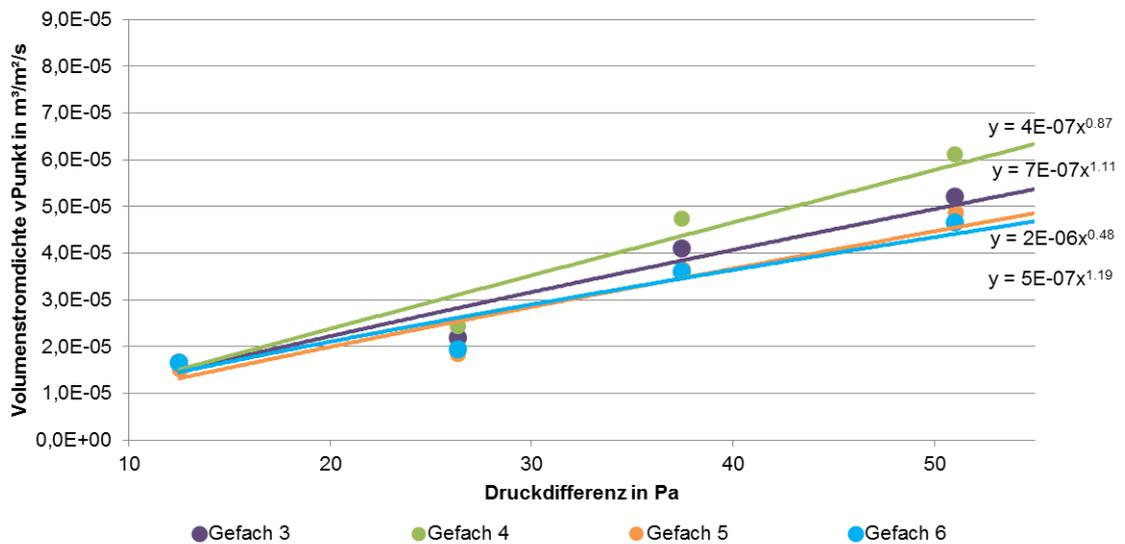


Abb. 33: Volumenstromdichte Vergleich zwischen die Gefache 3 bis 6

Durch die Vergleichung der beide Abbildungen, Abb. 29 und Abb. 33, ist ein vermeidbare unterschiede der Steigung von Volumenstromdichte in den Gefächer erkennbar.

Tabelle 4: Werte der Volumenstromdichte im Versuch 2

ΔP	Gefach 3	Gefach 4	Gefach 5	Gefach 6
Pa	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$
12,5	1,65E-05	1,66E-05	1,53E-05	1,67E-05
26,3	2,18E-05	2,45E-05	1,84E-05	1,96E-05
37,5	4,11E-05	4,75E-05	3,66E-05	3,61E-05
51,0	5,20E-05	6,11E-05	4,86E-05	4,65E-05
65,6	6,54E-05	7,68E-05	5,97E-05	5,70E-05
C	1,63E-06	1,31E-06	1,42E-06	1,97E-06
b	0,87	0,97	0,88	7,90E-01

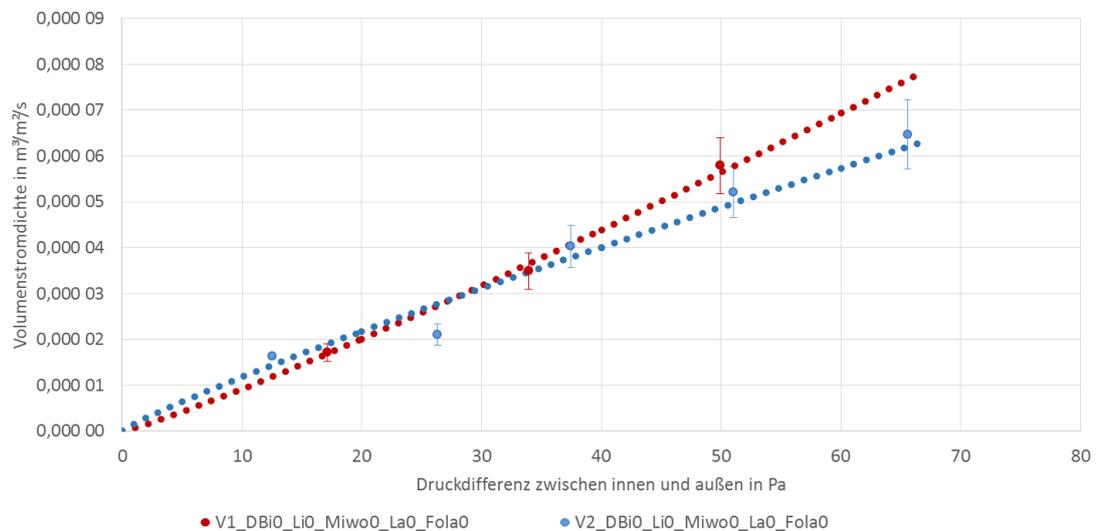


Abb. 34: Volumenstromdichte - Vergleich Versuch 1 und Versuch 2

Durch die unterschiedliche Ausführung von Druckstufen erkennt man in der Abb. 34, dass die Steigung von Volumenstromdichte im Versuch 1 steiler ist. Man erkennt, dass die Steigung der Volumenstromdichte bei den kleineren Druckhöhen 17,3 Pa und 33 Pa fast identisch ist. Wesentliche Unterschiede der Volumenstromdichte beginnen erst ab 40 Pa, welche durch die größere Druckdifferenz zwischen Raum und die Gefächern erklärbar ist.

Aus dem Versuch wurde festgestellt, dass minimale Unterschiede der Volumenstromdichte bei unterschiedlich gewählten Druckstufen erzielt werden (Tabelle 4, Abbildung 28).

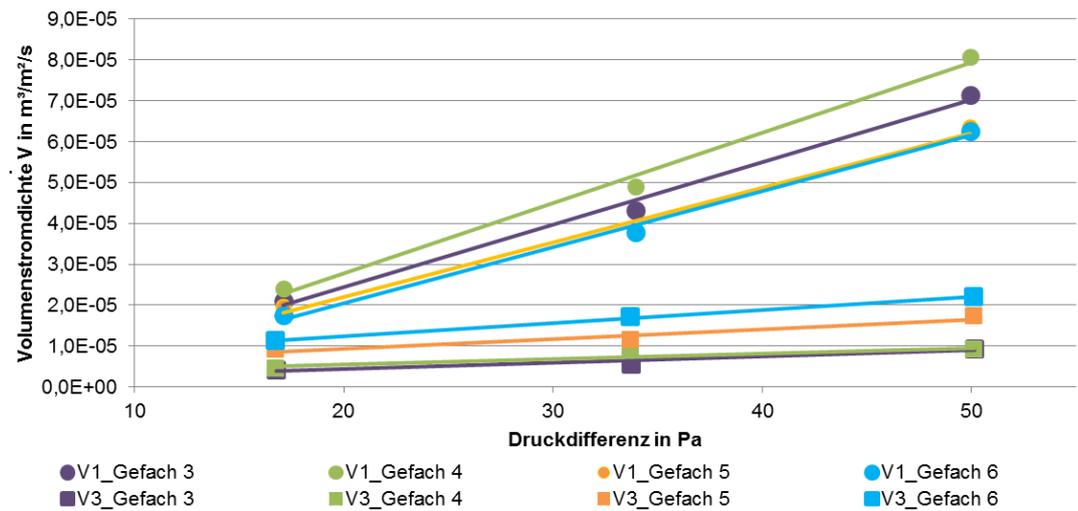


Abb. 37: Vergleich der Steigung von Volumenstromdichte zwischen Gefächern im Versuch 1 und Versuch 3

In der Tabelle 5 sind tabellarisch die Ergebniswerte der Volumenstromdichte aus Versuch 3 dargestellt. Aus dem Vergleich der Werte in der Tabelle 1 und dem Diagramm der Abb. 37 erkennt man, dass die Luftdichtheit der Gefächer 5 und 6 am geringsten ist.

Tabelle 5: Werte der Volumenstromdichte in der Versuch 3

ΔP Pa	Gefach 3 $m^3/m^2/s$	Gefach 4 $m^3/m^2/s$	Gefach 5 $m^3/m^2/s$	Gefach 6 $m^3/m^2/s$
16,8	0,0000042	0,0000046	0,0000091	0,0000112
33,7	0,0000058	0,0000084	0,0000114	0,0000171
50,1	0,0000093	0,0000091	0,0000172	0,0000219
C	0,0000006	0,0000008	0,0000019	0,0000021
b	0,70	0,65	0,55	0,60

6.4. Messung Versuch 4 – konstante CO₂-Konzentration im Labor

Versuch 4 weist den selbigen Dachaufbau der Konstruktion aus Versuch 3 auf, wird jedoch mit einer konstanten CO₂-Konzentration im Labor durch Öffnung des Fensters bewerkstelligt. Die CO₂-Konzentration im Labor wird auf die Außenkonzentration, bei ca. 550 ppm gehalten. Hierbei soll festgestellt werden ob aufgrund geringerer CO₂-Konzentrationen im Labor Unterschiede gezeigt werden.

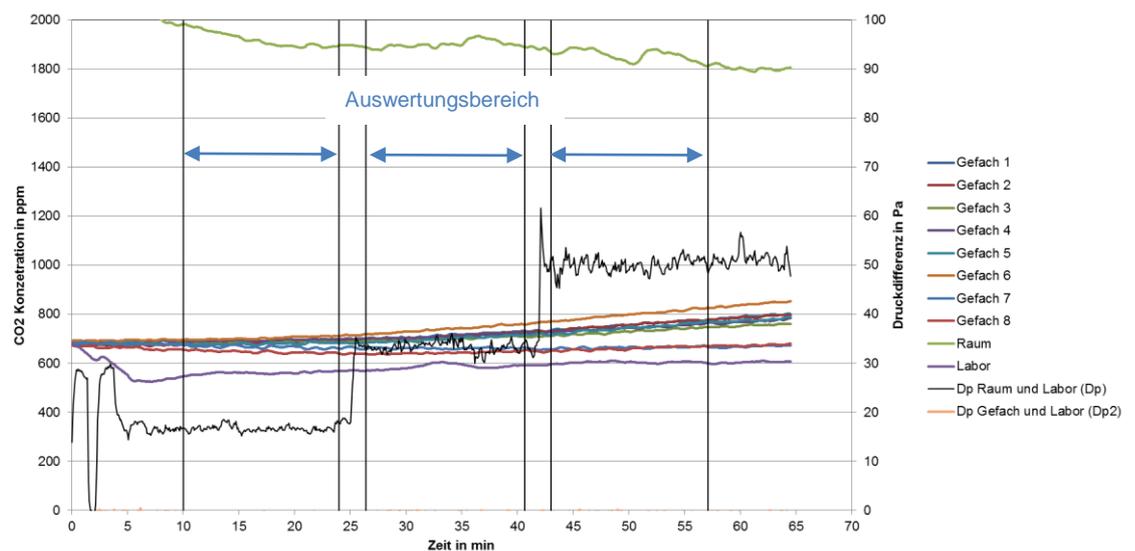


Abb. 38: Mittelwert der CO₂-Konzentration in allen acht Gefächern bei drei unterschiedlichen Druckstärken (CO₂-Konzentration im Labor ca.550 ppm)

Durch die konstante CO₂-Konzentration im Labor ist die Differenz der CO₂-Konzentration größer als bei den ersten drei Versuchen. Dadurch wird die Eindringung der CO₂-Konzentration aus dem Labor in den Gefächern vermieden, welche zu falschen Ergebnissen führen.

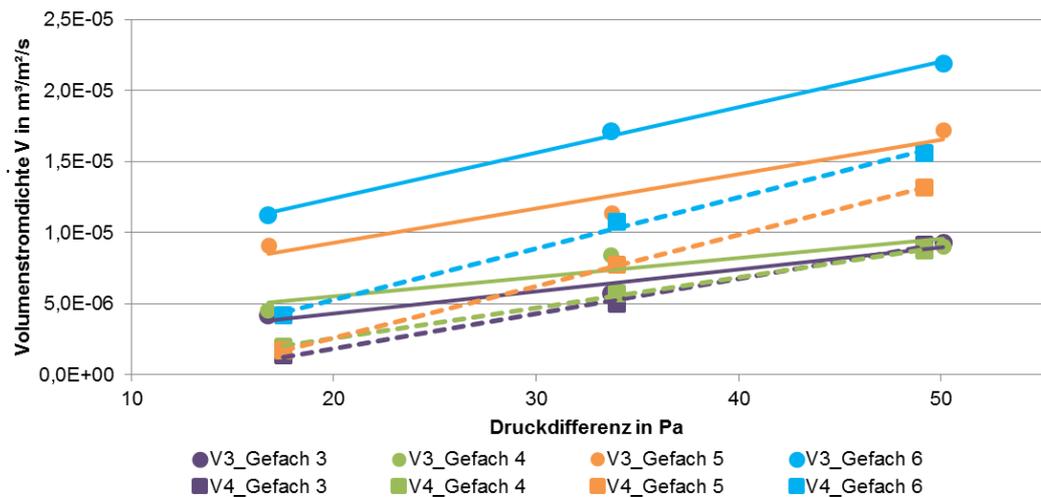


Abb. 39: Vergleich der Steigung der Volumenstromdichte in den Gefächern 3 bis 6, Versuch 3 (Vollinie) und Versuch 4 (Strichlinie)

In der Abb. 39 wird dargestellt, dass die Steigung der Volumenstromdichte zu Versuchsbeginn ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Versuchen existiert. Im Zuge der Versuchsdurchführung wird die Differenz der Volumenstromdichte zwischen den beiden Versuchen 3 und 4 immer geringer, die nach längerer Zeit zur selbigen Volumenstromdichte führt.

6.5. Vergleich der ersten vier Versuchsdurchführungen

Für die Auswertung sind die Mittelwerte, gruppiert der eigenen Bereiche (Gefach, Raum und Labor), angenommen. Hierbei handelt es sich um einen Vergleich von Versuchen mit und ohne Dampfbremse (angeordnet auf der Innenseite der Gefächer), mit unterschiedlichen Druckstufen und CO₂-Konzentration im Labor.

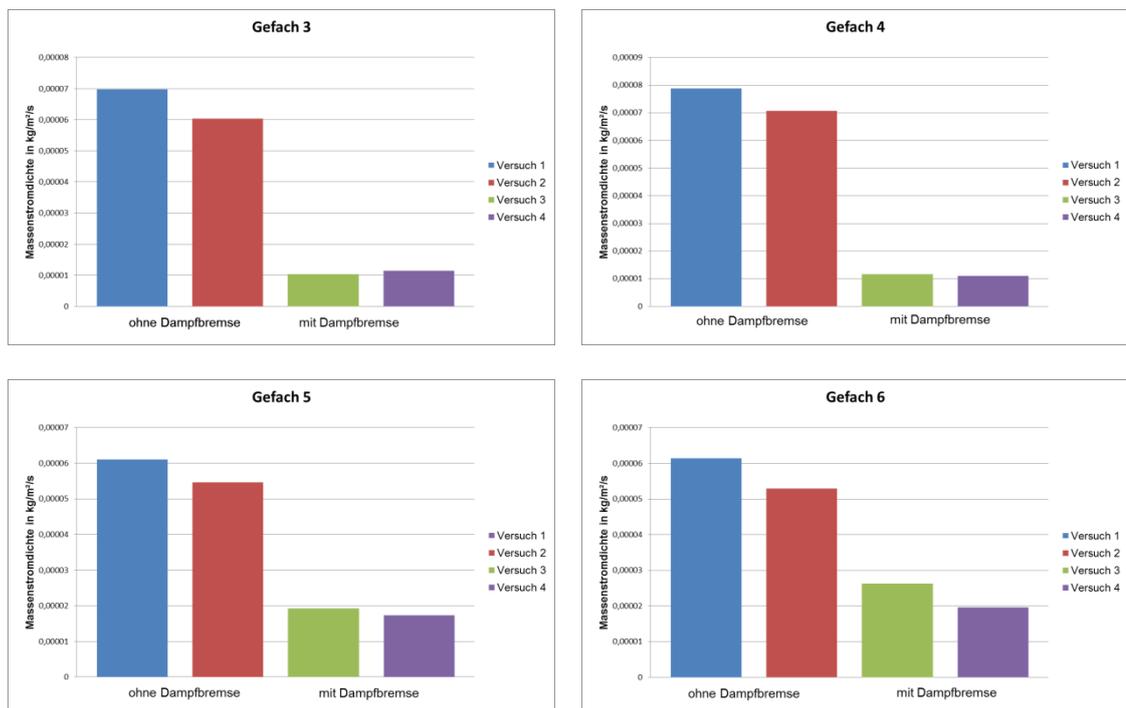


Abb. 40: Vergleich von Massenstromdichte im Gefach 3 bis Gefach 6

Durch den Vergleich der Versuche mit und ohne Dampfbremse auf der Innenseite der Gefächer erkennt man in der Abb. 40, dass die Massenstromdichte bei den Versuchen mit Dampfbremse einen deutlich geringeren Wert aufweist. Durch den Vergleich vom Versuch 3 mit dem Versuch 4 erkennt man, dass der Gehalt der CO₂-Konzentration im Labor einen geringeren Einfluss auf die Massenstromdichte hat. Die niedrigeren Werte der Massenstromdichte im Gefach 3 und 4 als im Gefach 5 und 6 zeigen, dass die Gefächer 3 und 4 dichter sind.

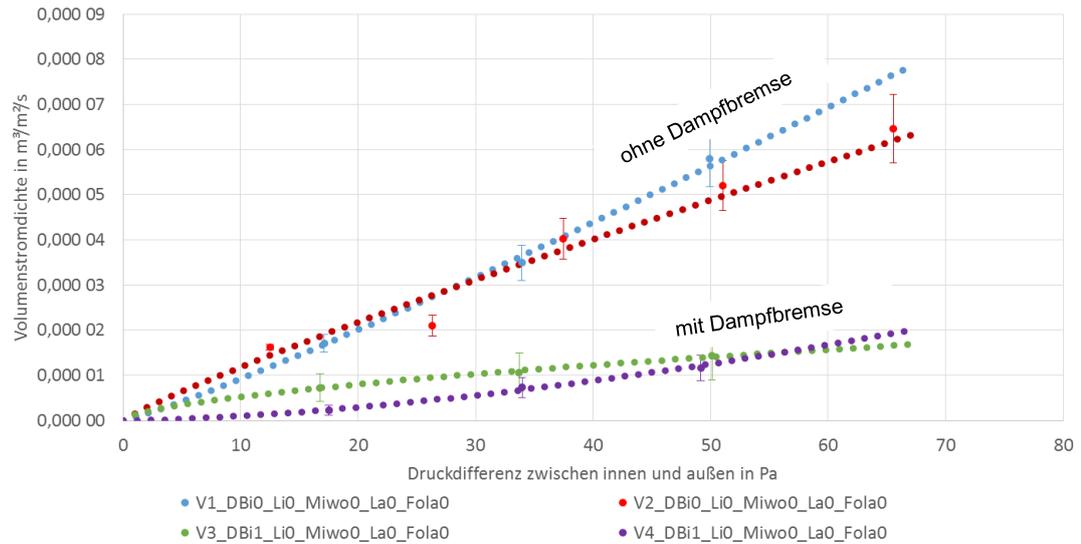


Abb. 41: Steigung der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6

Abb. 41 zeigt den Vergleich von Volumenstromdichte der Versuche mit und ohne Dampfbremse. Man erkennt bei den Versuchen mit der Dampfbremse (Versuche 3 und 4) eine geringere Steigung von Volumenstromdichte als bei den Versuchen ohne Dampfbremse (Versuche 1 und 2). Man kann sagen, dass bereits nur die Luftdichteebene auf der Innenseite der Gefächer ein deutlich besserer Luftdichtheitswert ergibt.

6.6. Messung Versuch 5 und 6 – unterschiedliche Leckagen

Versuch Nr.	5 und 6
Datum	25.02.2014
Innen Dampfbremse	JA
Innen Leckage	5 mm
Außen Leckage	NEIN
Außen PE-Folie	NEIN
Unterschie. Druckstärken	3
Labor CO ₂	ca. 500

Abb. 42: Versuchselemente der Elemente 5 und 6

In den folgenden zwei Versuchen wird bestimmt, was die fehlende Verklebung der Dampfbremse bei der Kabeldurchführung auf die Luftdichtheit verursacht. In den Versuchsdurchführungen 5 und 6 ist pro Gefach durch die OSB Platte eine Leckage von \varnothing 5 mm auf der Innenseite (Raumseite) der Gefächer ausgeführt. Beim Versuch 5 ist die Dampfbremse nicht geklebt, so handelt sich um eine undefinierte Leckagengröße (siehe Abb. 43 links).



Abb. 43: Links: Versuch 5 ohne Beklebung der Dampfbremse
Rechts: Versuch 6 mit Beklebung der Dampfbremse

Im Versuch 6 ist die Dampfbremse sowie auf der Innenseite als auch auf der Außenseite verklebt, so dass eine definierte Leckage von 5 mm aufweist. Die folgenden Abbildungen zeigen detailliert die Leckagen in den beiden Versuchen.

Leckage im Versuch 5 -> keine definierte Leckage Fläche

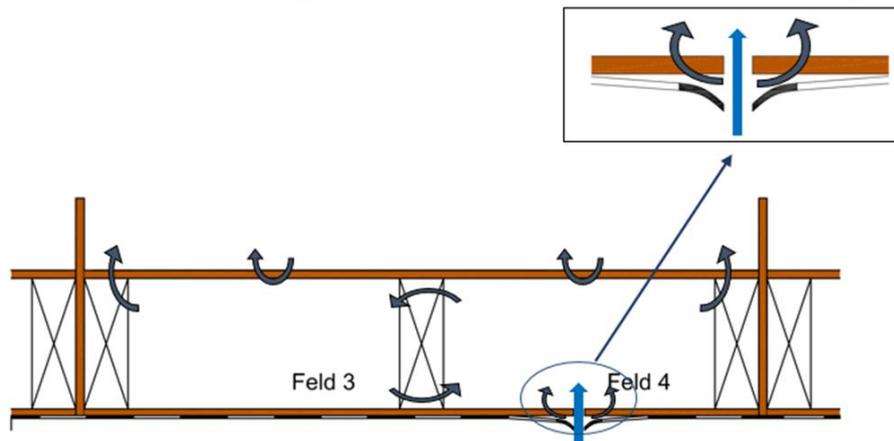


Abb. 44: Leckagen im Versuch 5

Leckage im Versuch 6 -> definierte Leckage Fläche

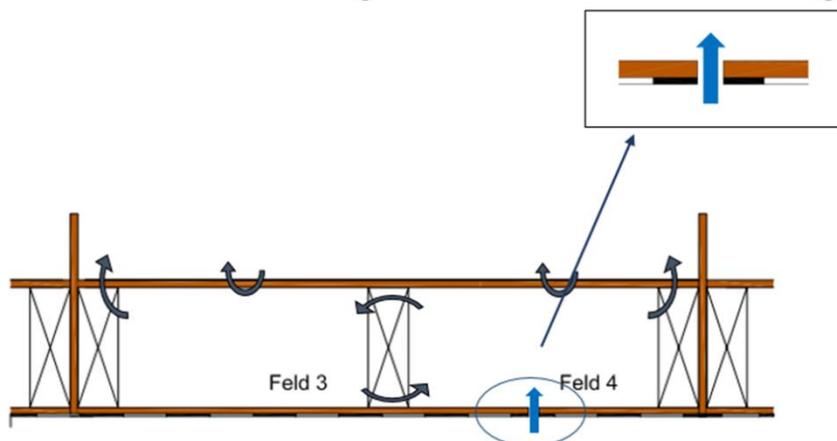


Abb. 45: Leckagen im Versuch 6

Die Abb. 46 zeigt den Vergleich der Volumenstromdichte der beiden Versuche 5 und 6. Durch eine undefinierte und größere Leckagefläche im Versuch 5 ist auch die Luftströmung in den Gefächern größer. Für die Auswertung sind die Mittelwerte von allen sechs CO₂-Sensoren pro Gefach angenommen.

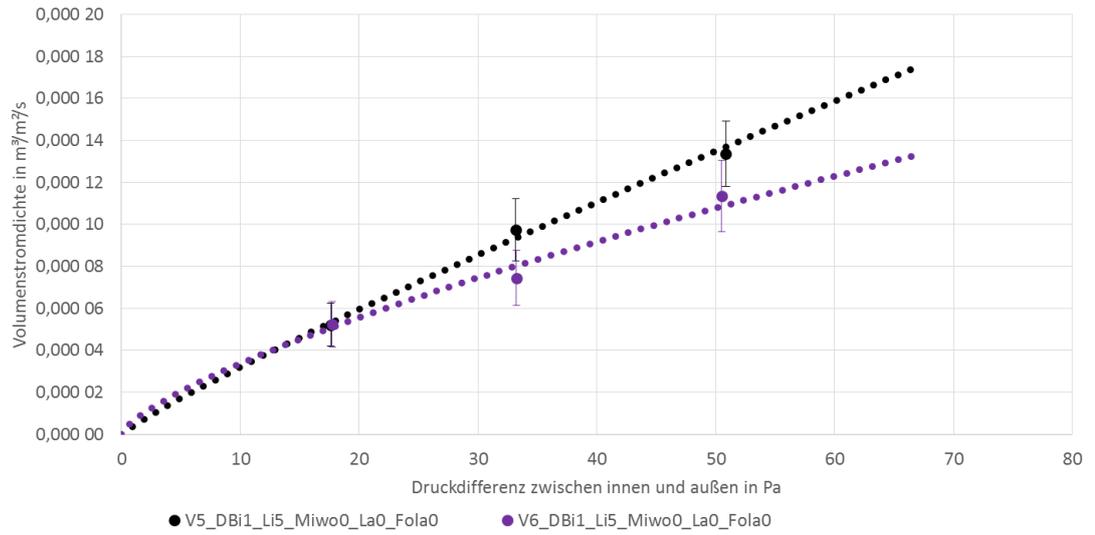


Abb. 46: Mittelwertvergleich der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6

6.7. Messung Versuch 7 – Ausschaltung von Lüftungen

Im Versuch 7 wird der Einfluss von Lüftungen auf die CO₂-Konzentration in den Gefächern analysiert. Der Dachaufbau bleibt gleich, wie im Versuch 6, mit einer definierten Leckage von \varnothing 5 mm pro Gefach.

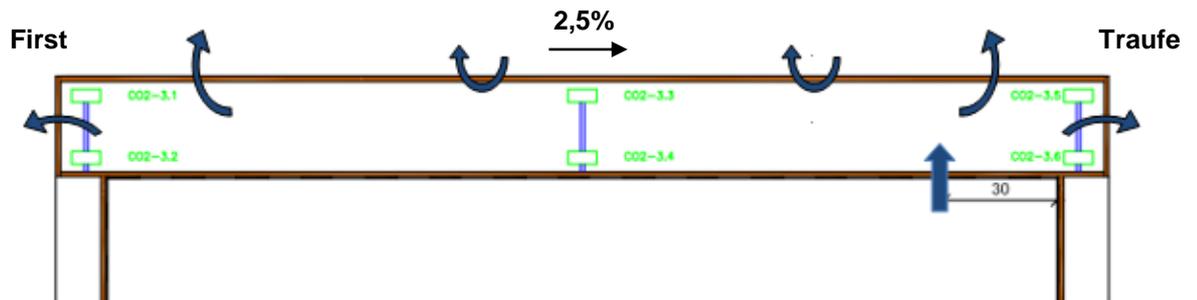


Abb. 47: Längsschnitt durch Gefach 3

Durch die Ausschaltung von Lüftungen werden auf alle CO₂-Sensoren unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen gemessen (Abb. 48). Wie zu erwarten war, wurde die größte CO₂-Konzentration in den Gefächern bei nächstliegenden Leckagen aufgefunden.

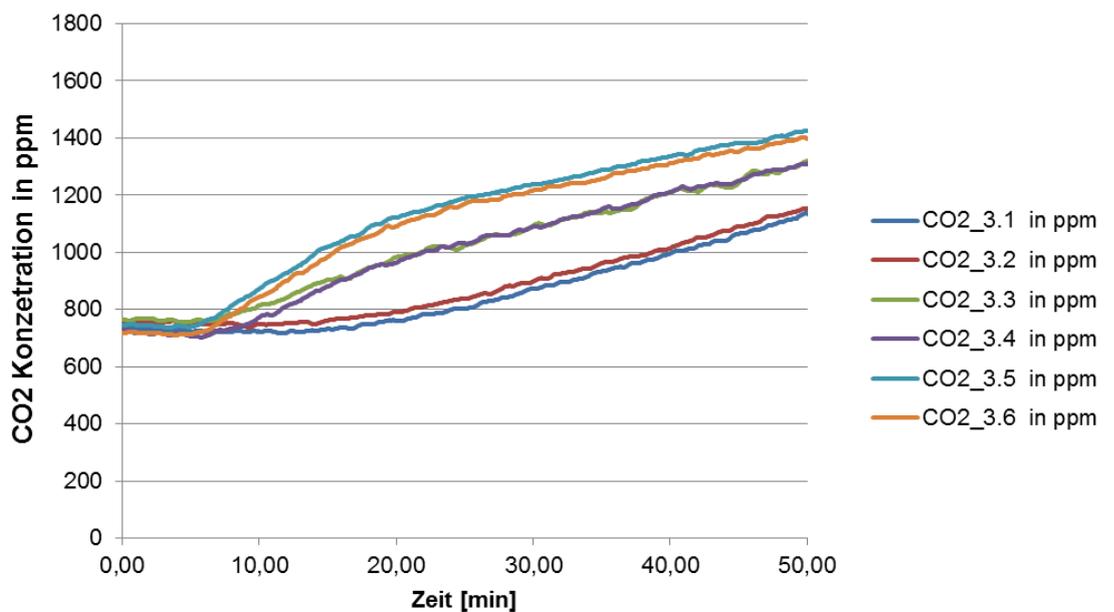


Abb. 48: CO₂-Konzentration im Gefach 3 beim ausgeschalteten Lüfter

6.8. Messung Versuche 8, 9, 10 - mit innenliegender Leckagen 10 mm

Versuchsdurchführungen 8, 9 und 10 sollen zeigen, dass die Volumenstromdichte proportional zur Größe der Außenleckage steigt. Die Versuche werden mit einer Innenleckage (\varnothing 10 mm) und unterschiedlich Außenleckage durchgeführt. Bei allen Versuchen ist auf der Innenseite eine Dampfbremse eingebaut. Der Unterschied bei den Versuchen ist in der Außenleckage, die in der Abb. 49 dargestellt sind.

	Innen Leckage	Außen Leckage
Versuch 8	10 mm	NEIN
Versuch 9	10 mm	10 mm
Versuch 10	10 mm	38 mm

Abb. 49: Übersicht der verschiedenen Leckagen bei den Versuchen

Abb. 50 zeigt die Stellen der eingebauten Leckagen bei den Versuchsdurchführungen. Die Außenleckagen befinden sich direkt über den Innenleckagen, die eine direkte Entlüftung der Gefächer verursachen.

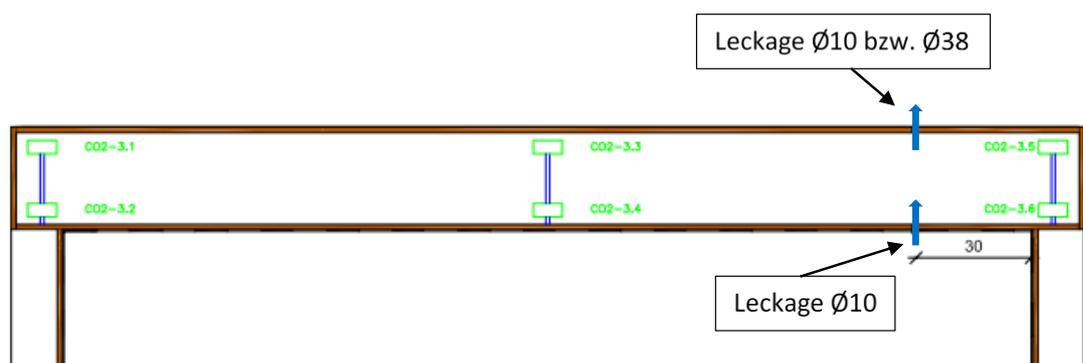


Abb. 50: Längsschnitt durch ein Gefach mit Leckagen

Für die Auswertung sind die Mittelwerte, gruppiert in eigene Bereiche (Gefach, Raum und Labor), angenommen. Durch die Anordnung der Außenleckagen direkt über die Innenleckage wird eine Luftströmung in ein Gefach verursacht, ohne die CO_2 -Konzentration von CO_2 Sensoren zu erfassen. Durch diese Anmerkung kann man in der Abb. 51 erkennen, dass bei dem

Versuch ohne Außenleckage (Versuch 8) die Steigung größer als beim Versuch mit einer Außenleckage \varnothing 10 mm (Versuch 9) ist. Durch den Vergleich von Versuch 9 und Versuch 10 wird bestätigt, dass die Steigung von Volumenstromdichte mit der Größe der Leckage proportional ist.

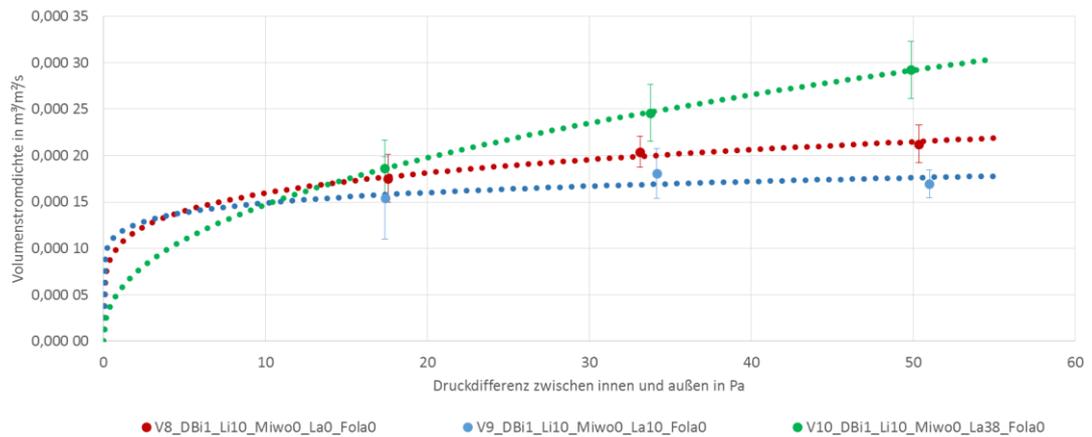


Abb. 51: Steigung der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6

Aus diesen Versuchen lässt sich schließen, dass für eine korrekte Messung der Volumenstromdichte die Außenleckagen nicht direkt über den Innenleckagen angeordnet werden dürfen.

6.9. Messung Versuch 10, 11 – unterschiedliche Versuchsdurchführungen

Der Aufbau der Versuche 10 und 11 ist ident. Auf der Innenseite der Gefächer ist eine Dampfbremse befestigt. Pro Gefach befindet sich auf der Innenseite eine Leckage \varnothing 10 mm und auf der Außenseite eine Leckage in der Größe von \varnothing 38 mm.

Hier soll erkundet werden, welcher Einfluss von unterschiedlichen Durchführungen der Druckstufen verursacht wird. Im ersten Versuch (Versuch 10) erfolgt die Durchführung der Druckstufen in einem Versuch.

Beim zweiten Versuch (Versuch 11) werden die Druckstufen separat in drei Versuche aufgeteilt.

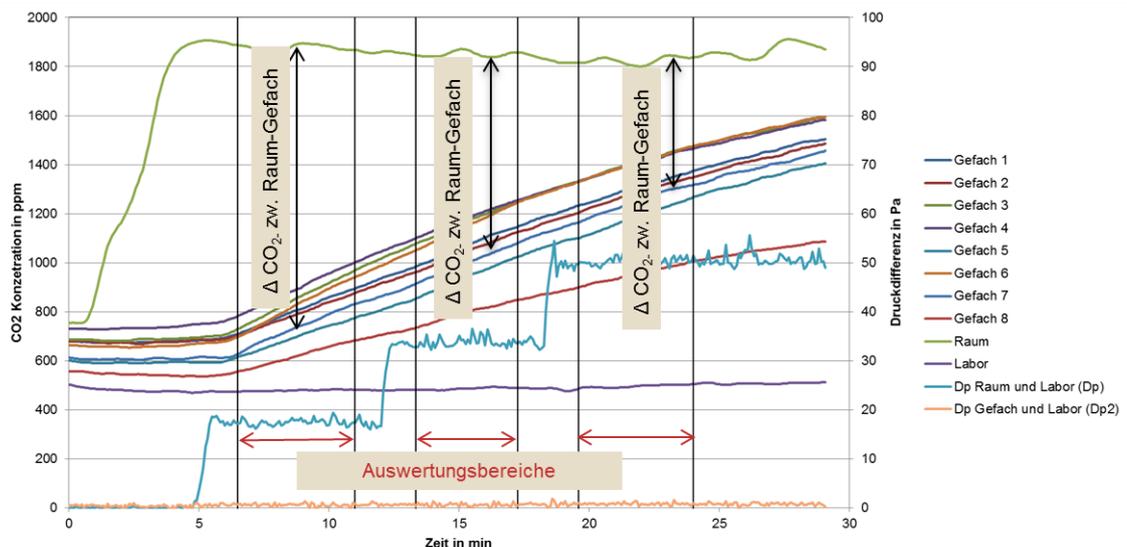


Abb. 52: Versuch 10 mit drei unterschiedlichen Druckstufen in einem Versuch

In der Abb. 52 bis Abb. 54 erkennen wir, dass die ΔCO_2 -Konzentration zwischen Raum und Gefach im Versuch 11 mit einzelnen Druckstufen $\Delta P=33$ Pa und $\Delta P=50$ Pa deutlich höher ist. Die ΔCO_2 -Konzentration zwischen Raum und Gefach bei Versuchen 10 und 11 ist aufgrund der gleichen Aufbauten beginnend bei beiden Versuchen die Messung nach der Entlüftung von Raum gleich bei $\Delta P=17$ Pa. Für die Auswertung wurden die Auswertungsbereiche hergenommen,

welche eine Minute nach der Erreichung der Druckhöhe beginnen und eine Minute vor Ende der Druckstufe endet.

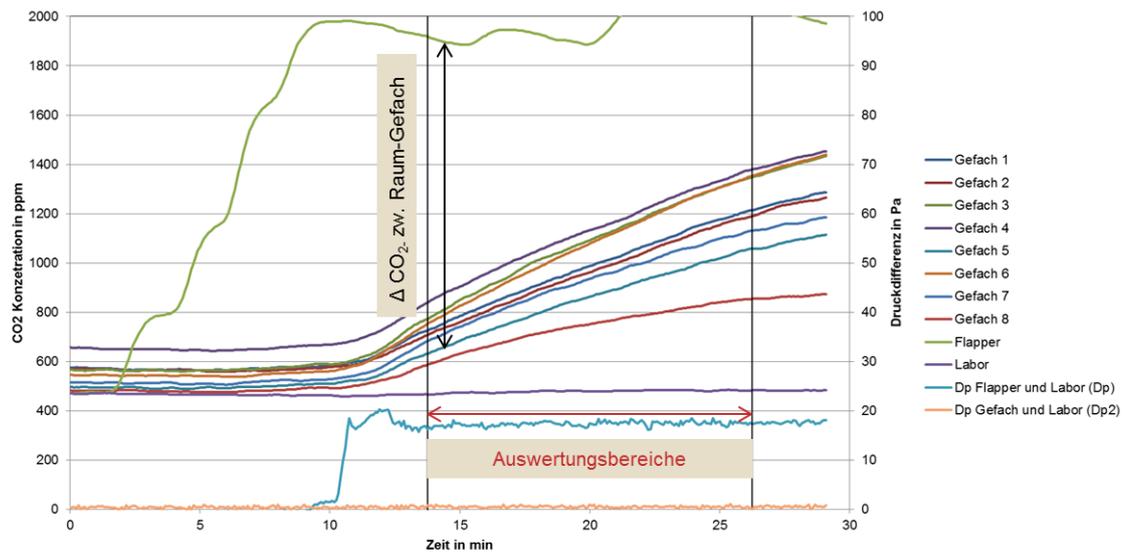


Abb. 53: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=17$ Pa

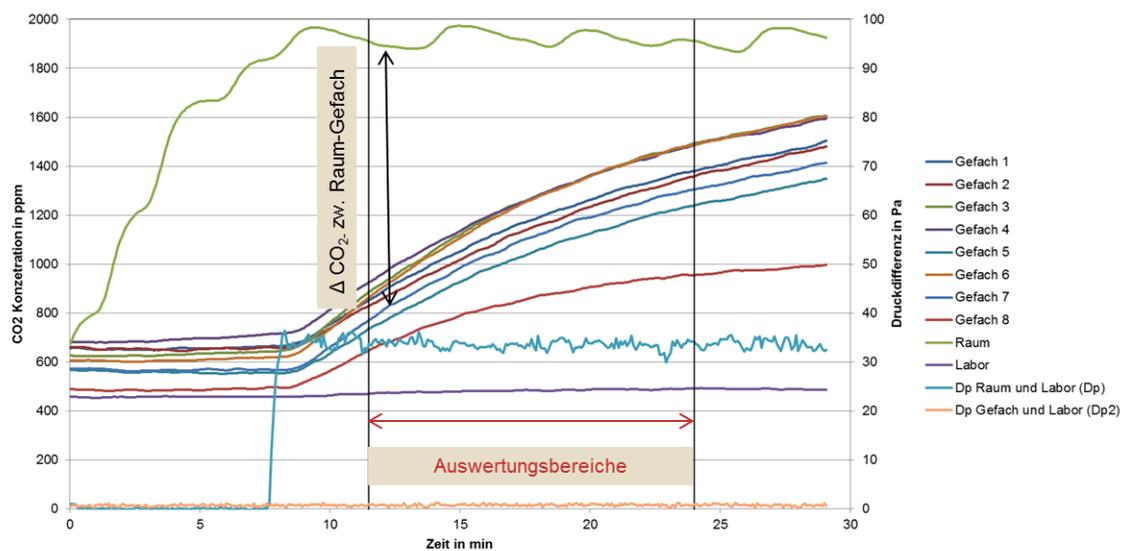


Abb. 54: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=33$ Pa

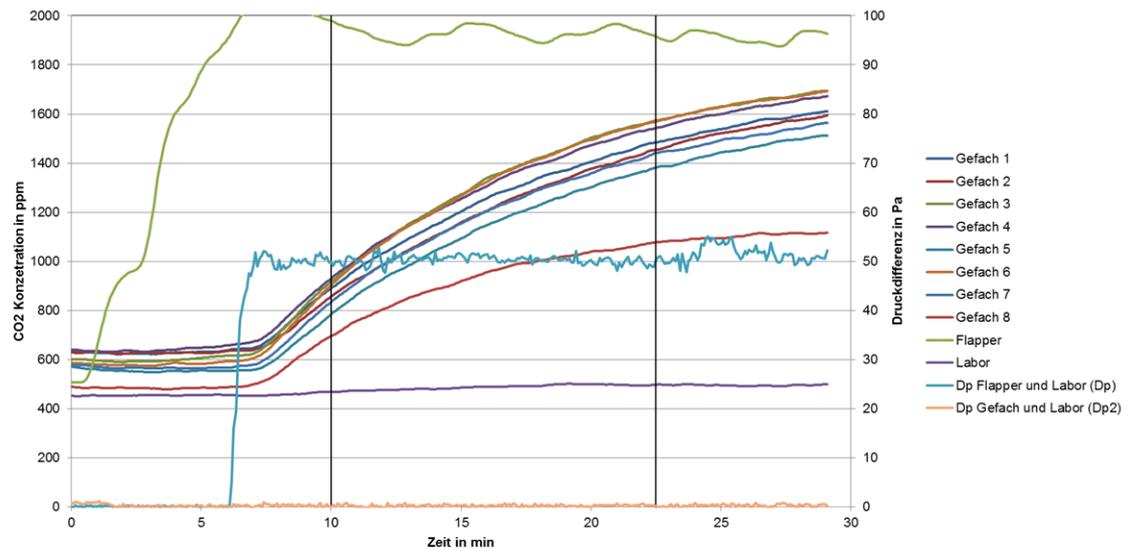


Abb. 55: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=50$ Pa

Im Versuch 11 sind drei unterschiedliche Druckstufen einzeln gemessen und zwischen der Messung der Raum entlüftet worden. Im Vergleich zum Versuch 11 wurde die Messung im Versuch 10 mit drei unterschiedlichen Druckstärken ohne Entlüftung von Raum durchgeführt.

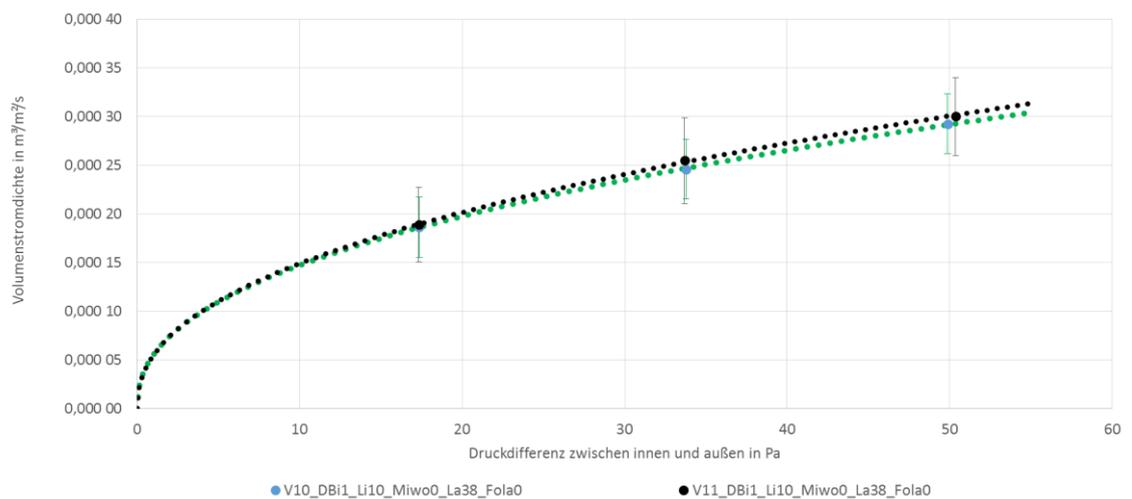


Abb. 56: Volumenstromdichte vergleich

In der Abb. 56 erkennt man, dass der Unterschied zwischen den beiden Versuchen der Steigung von ΔCO_2 -Konzentration zwischen Raum und Gefach fast ident ist. Aus diesem Grund werden die weiteren Versuche ohne Zwischenentlüftung durchgeführt.

6.10. Messung Versuch 12 - Vergleich der Versuche mit einer Innenleckage von $\varnothing 10$ mm

Im Vergleich zu Versuch 11 werden im Versuch 12 zusätzlich zwei Außenleckagen eingebaut. Die Leckagestellen im Gefach sind der Abb. 57 zu entnehmen.

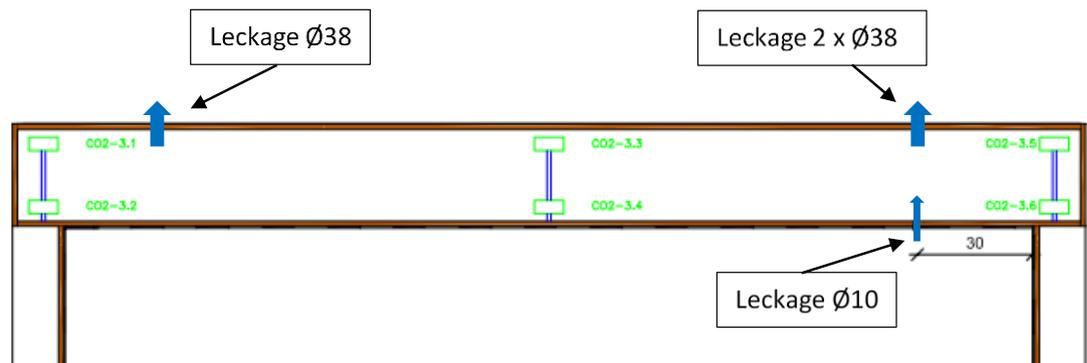


Abb. 57: Leckagestellen

Die Außenleckagen sind so eingebaut, dass die zwei Leckagen $\varnothing 38$ mm mit einem Achsenabstand von 60 mm über die Innenleckage und die dritte Außenleckage gespiegelt auf der anderen Seite befindet.

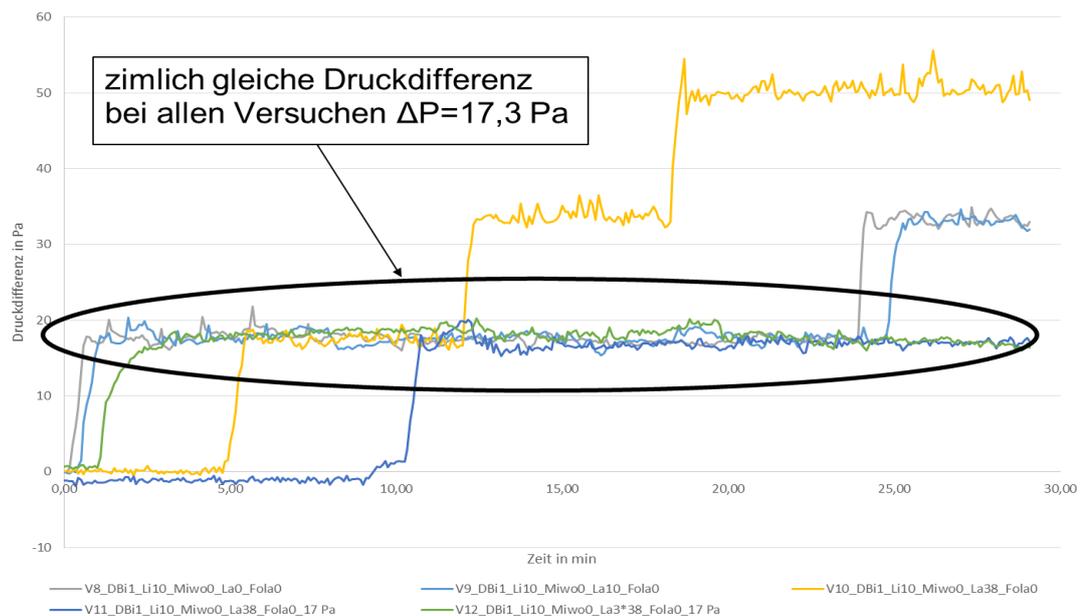


Abb. 58: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=17,3$ Pa

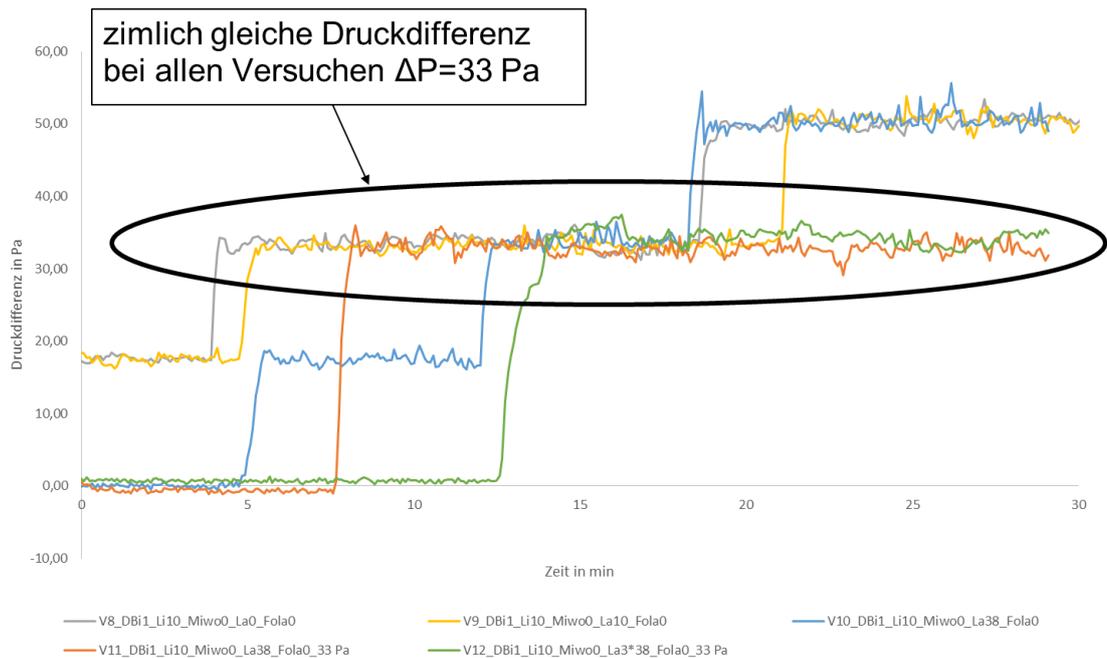


Abb. 59: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=33$ Pa

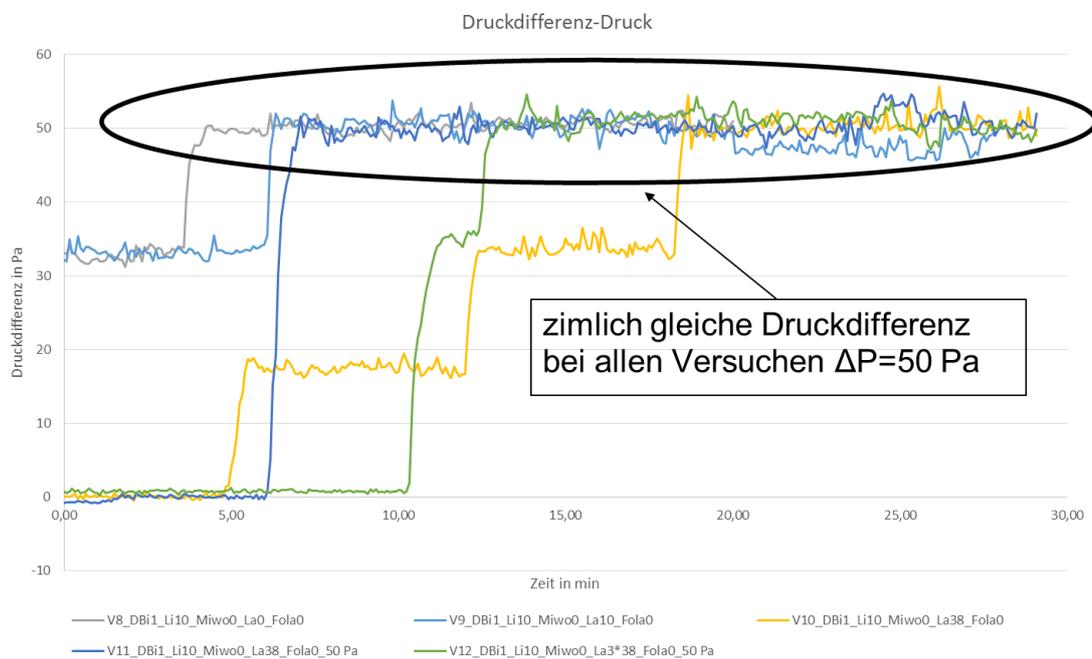


Abb. 60: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=50$ Pa

In den vorigen drei Abbildungen ist ersichtlich, dass die Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern bei allen Versuchen gleich ist.

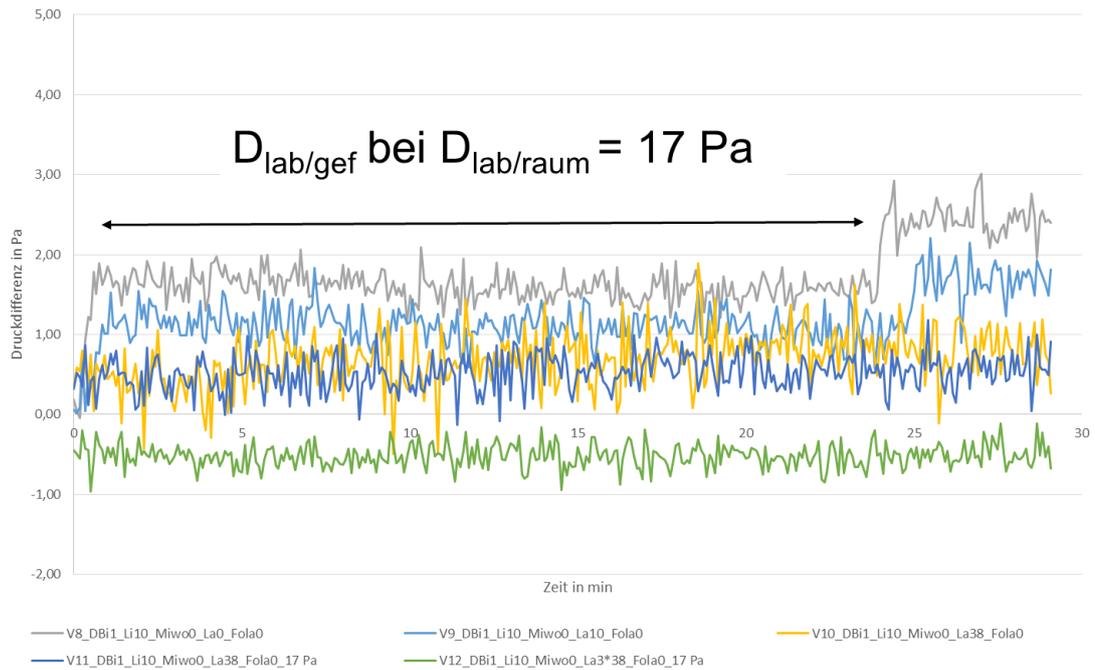


Abb. 61: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei Druckdifferenz zwischen Labor und Raum von $\Delta P=17,3 \text{ Pa}$

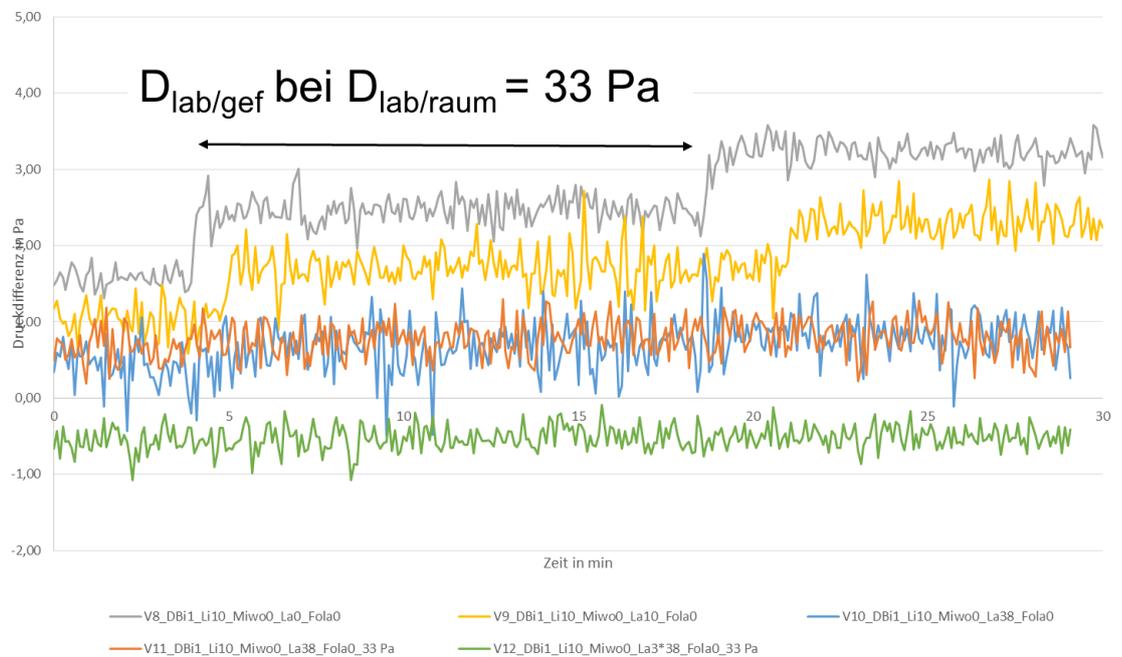


Abb. 62: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei Druckdifferenz zwischen Labor und Raum von $\Delta P=33 \text{ Pa}$

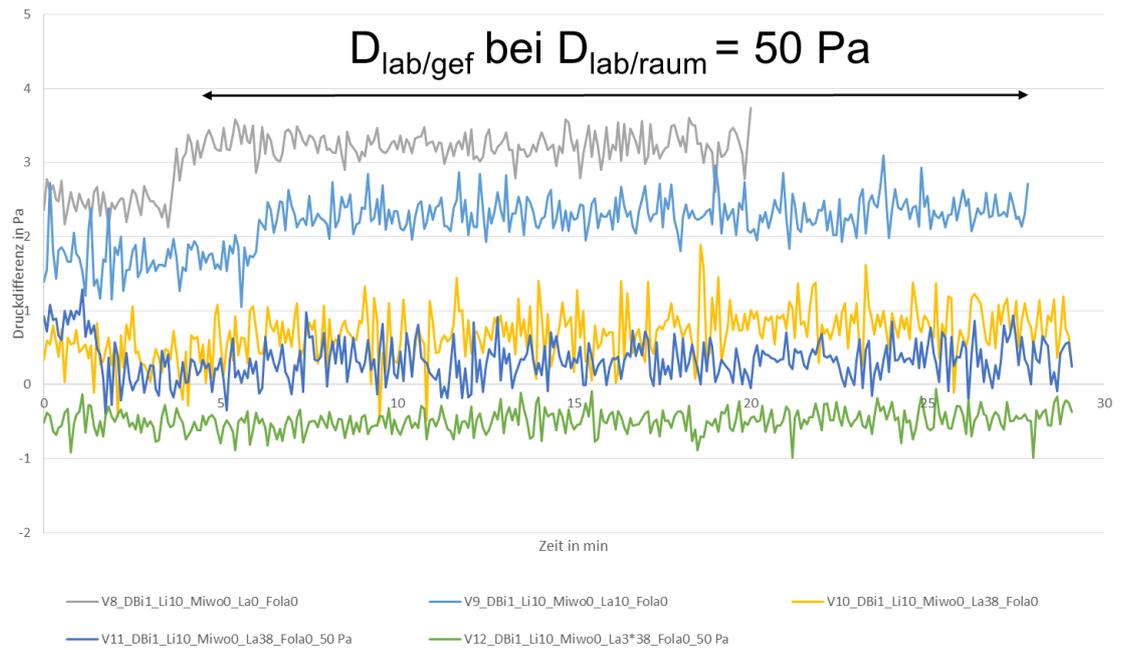


Abb. 63: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei Druckdifferenz zwischen Labor und Raum von $\Delta P=50$ Pa

Durch den Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern ($D_{\text{lab/gef}}$) ist in den letzten drei Abbildungen ersichtlich, dass die $D_{\text{lab/gef}}$ von der $D_{\text{lab/raum}}$ und Dichtigkeit den Gefächer abhängig ist. In der Abb. 63 erkennt man einen deutlichen Einfluss von Außenleckage auf die $D_{\text{lab/gef}}$. So weist der Versuch 8 (keine Außenleckage) den höchsten Wert der Druckdifferenz auf und der Versuch 12 mit größter Fläche der Außenleckage den kleinsten Wert der Druckdifferenz.

Versuch Nr.	8	9	10	11	12
Innen Dampfbremse	JA	JA	JA	JA	JA
Innen Leckage	10 mm				
Außen Leckage	NEIN	10 mm	38 mm	38 mm	3 x 38 mm
Außen PE-Folie	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
Unterschie. Druckstärken	3	3	3	3	3
Labor CO ₂	ca. 500				

Abb. 64: Übersicht der Leckagenanordnungen bei den Versuchsdurchführung

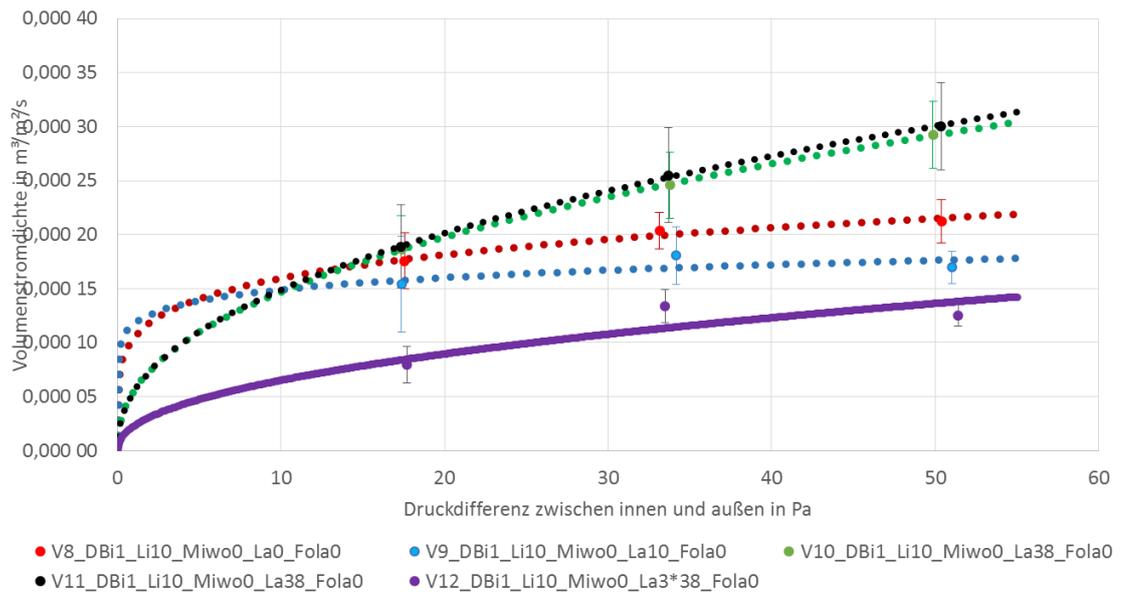


Abb. 65: Vergleich der Volumenstromdichte bei Versuchen mit einer Innenleckage von \varnothing 10 mm

Die Abb. 65 zeigt den Vergleich von drei unterschiedlichen Versuchen. Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Druckstärken und einer CO_2 -Konzentration im Labor von etwa 500 ppm durchgeführt. Die Auswertung ist der Mittelwert aus vier mittig gestellten Gefächern. In der Abb. 65 ist zu entnehmen, dass die Volumenstromdichte vom Versuch 12 mit drei Außenleckagen kleiner ist als bei Versuchen mit größeren Außenleckagen ist. Durch die Anordnung von zwei Außenleckagen direkt über die Innenleckage kommt es zum direkten Entlüftung von den Gefächern ohne die CO_2 -Konzentration von Messgeräten aufgenommen zu werden.

6.11. Vergleich von $D_{lab/gef}$ zwischen den Gefächern

Um die Dichtheit der Gefächer zu prüfen, wurde die $D_{lab/gef}$ zwischen den Gefächern verglichen. Die Gefächer sind seitlich und auf der Oberseite mit PE-Folie abgedichtet (Abb. 66).



Abb. 66: Links: Dach Oberseite → unter $D_{lab/gef}$

Rechts: Blick auf Sparren, außen → unter $D_{lab/gef}$

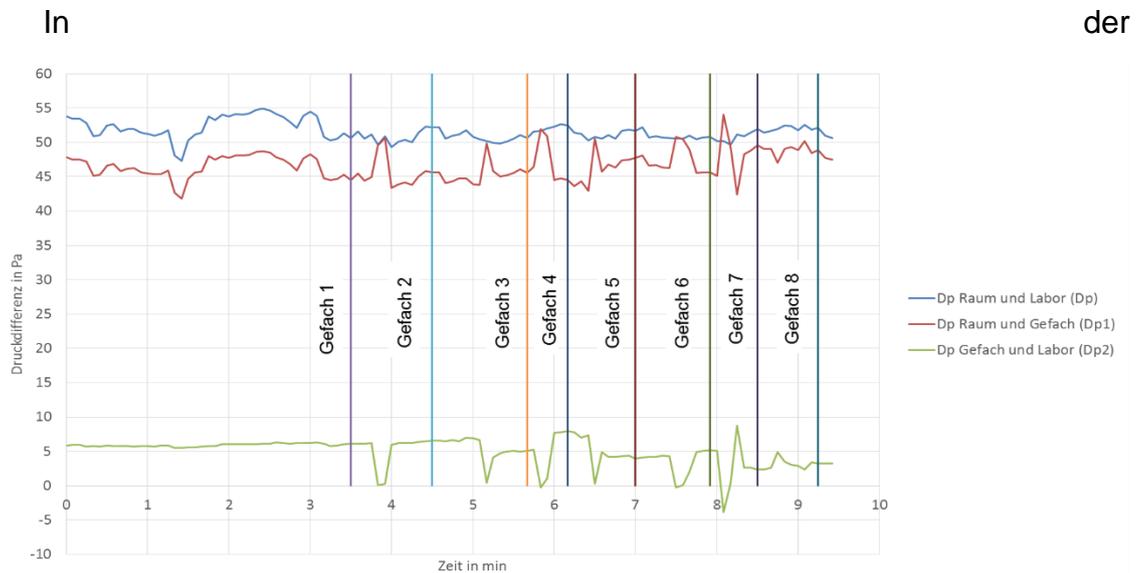


Abb. 67: Vergleich von $D_{lab/gef}$ in den Gefächern

erkennt man, dass die $D_{\text{lab/gef}}$ beim $D_{\text{raum/gef}} = 50 \text{ Pa}$ eine Abweichung von $\pm 1 \text{ Pa}$ aufweist. Durch die unterschiedlichen $D_{\text{lab/gef}}$ in den Gefächern kann man die Dichtheit der Gefächer vergleichen. Es wurde festgestellt, dass die Dichtheit in den Gefächern 1,2 und 4 am größten ist. Für die weiteren Versuche sind zusätzlich die Außenleckagen durch die OSB-Platte und PE-Folie eingebaut.

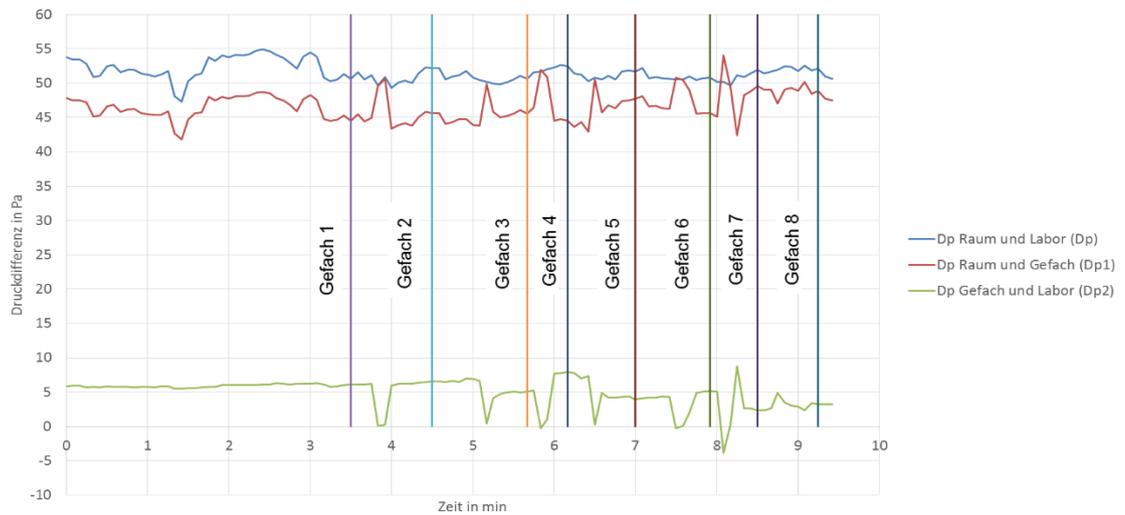


Abb. 67: Vergleich von $D_{\text{lab/gef}}$ in den Gefächern

6.12. Einfluss der Anordnung der Außenleckage auf die Volumenstromdichte

Durch die direkte Luftströmung von Innenleckage zur Außenleckage hat sich in den vorigen Versuchen herausgestellt, dass eine Ausführung der Leckagen gegenüberliegend für die Versuchsdurchführungen nicht günstig sind, da keine realistischen Ergebnisse erzielt werden (Abb. 68). Somit wird im Versuch 20 die Versuchsdurchführung, wie in Abb. 69 dargestellt, ausgeführt.

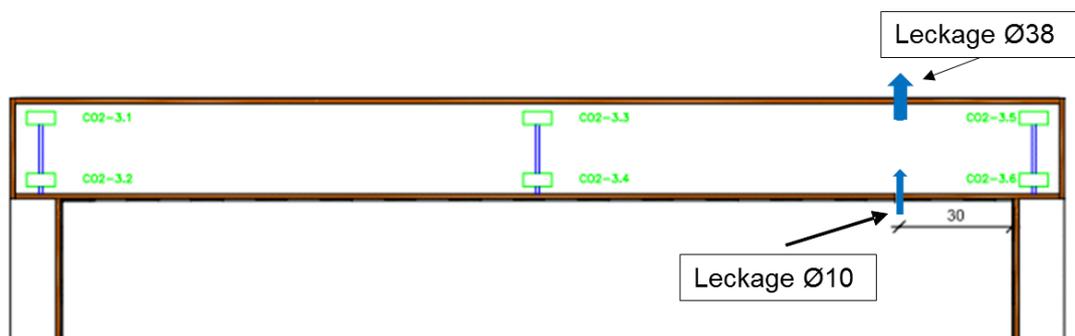


Abb. 68: Leckagestellen im Versuch 11

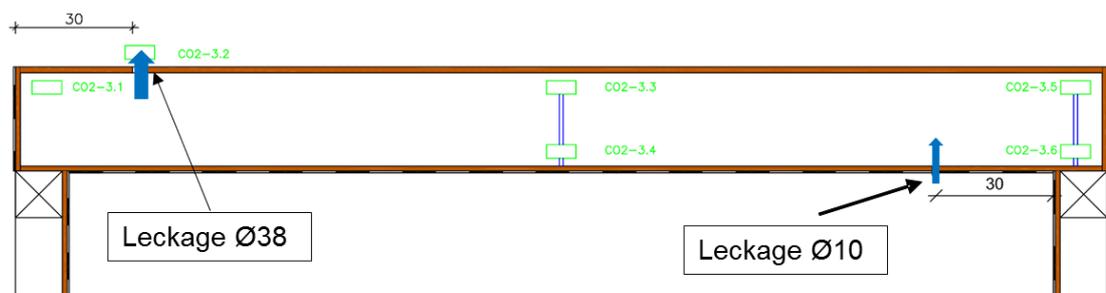


Abb. 69: Leckagestellen im Versuch 14

Im Versuch 11 wird durch direkte Anordnung die Außenleckage über die Innenleckage die Luftströmung von den CO₂-Sensoren nicht genauer gemessen. Durch den Vergleich der Ergebnisse beider Versuche hat sich herausgestellt, dass der Versuch 14 realistische Ergebnisse liefert (Abb. 70).

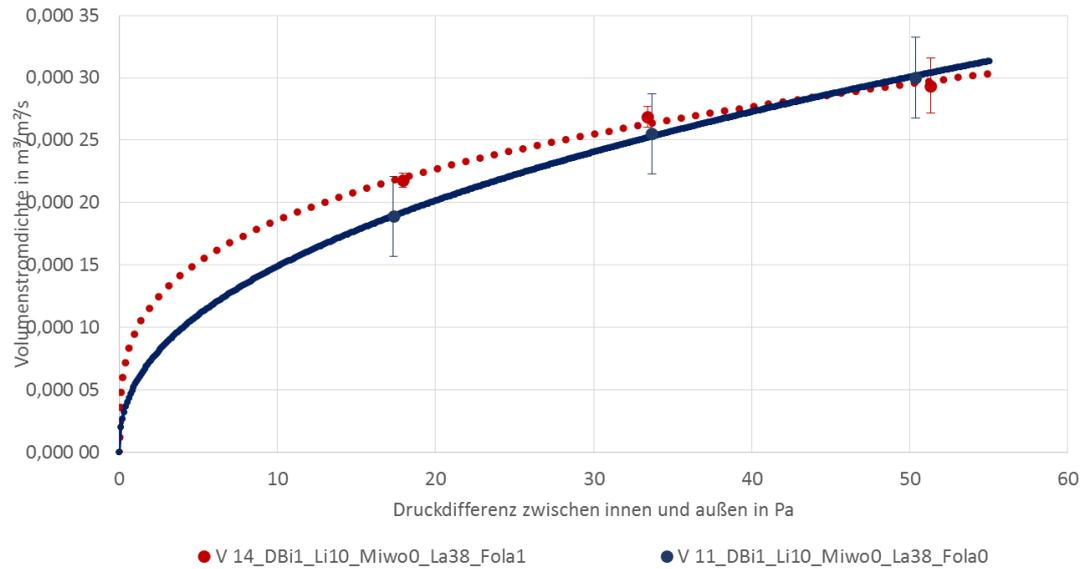


Abb. 70: Volumenstromdichte vergleich

Die Abb. 70 zeigt den Vergleich von Volumenstrom vom Versuch 11 und Versuch 14. Die Volumenstromdichte beim Versuch 14 ist am Anfang höher als beim Versuch 11, die durch indirekte Luftströmung und dadurch auch die schnellere Füllung des Gefaches mit CO_2 -Konzentration erklärbar ist.

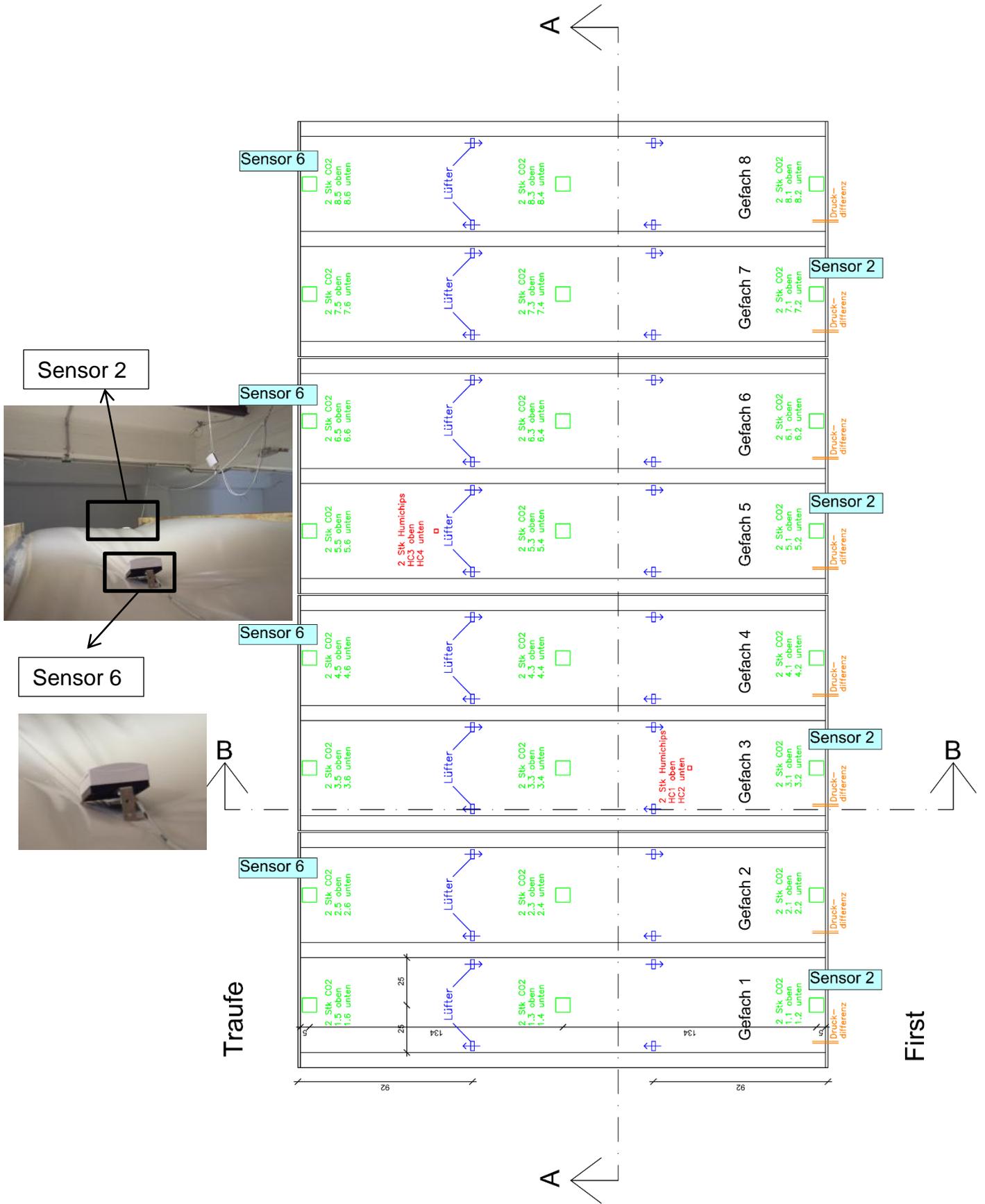


Abb. 73: Dachebene, CO2 Sensoren Nummerierung



Abb. 74: Links: die Mineralwolle in den Gefächern 1 und 2

Rechts: CO₂ Randsensor bei der Gefache mit Mineralwolle $d=24$ cm

Im Versuch 14 wurde keine Mineralwolle angeordnet, während in den anderen Versuchen (15 bis 17) dieses Dämmmaterial verwendet wird. Die eingebaute Mineralwolle ist in den Gefächern 1 bis 4 mit einer Gesamtdicken von 24 cm und in den Gefächern 5 bis 8 mit 12 cm eingebaut.

Bei den Gefächern mit voller Höhe der Mineralwolle ist die Einwirkung durch die Luft auf die Luftströmung geringer.



Abb. 75: Links: die Mineralwolle in den Gefächern 5 und 6 $d=12$ cm

Rechts: die Mineralwolle in den Gefächern 7 und 8 $d=12$ cm

In den folgenden Abbildungen ist zu entnehmen, dass die CO₂-Konzentration im Versuch 14 durch die Luftmischung in Gefächern bei allen CO₂-Sensoren identisch ist. Der Einfluss von Mineralwolle in den Gefächern auf die Luftströmung ist für Gefächer 3 bis 6 in den Abb. 76 bis Abb. 78 dargestellt.

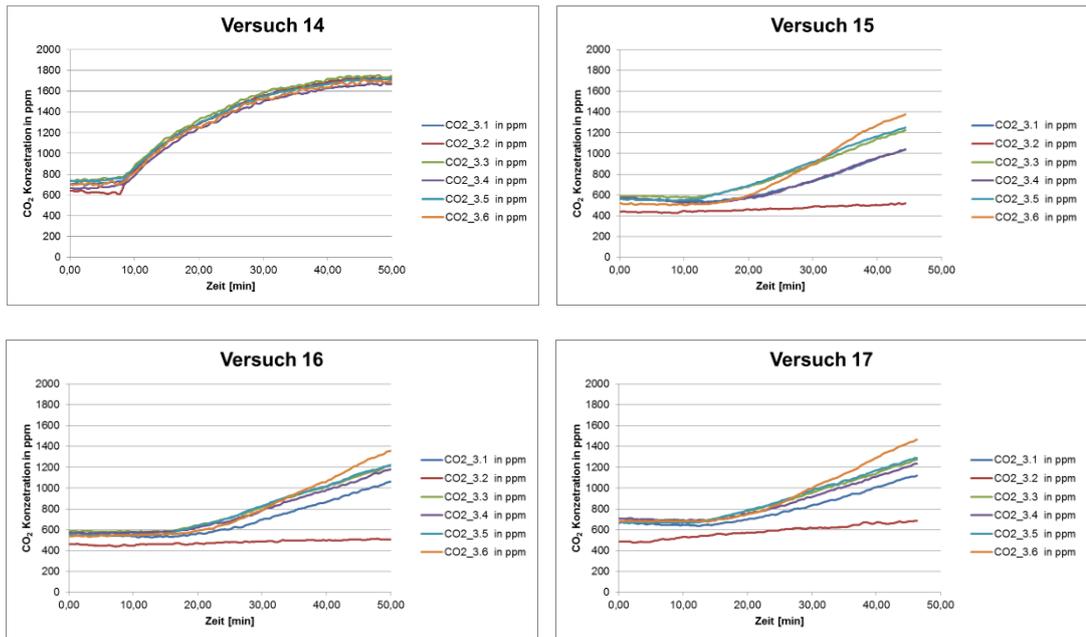


Abb. 76: Die CO₂-Konzentration im Gefach 3

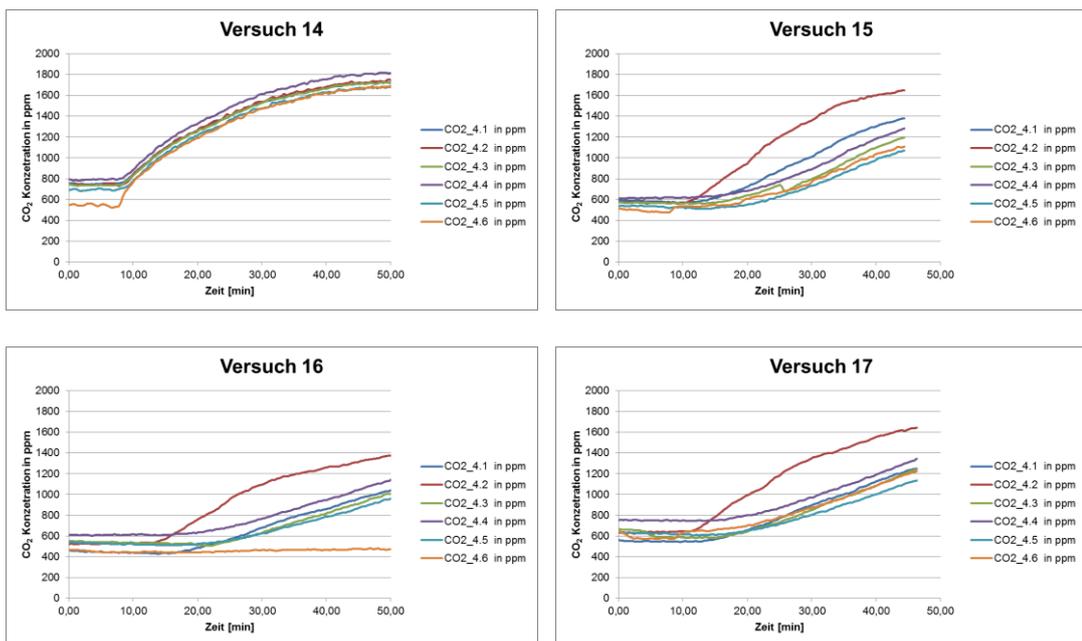


Abb. 77: Die CO₂-Konzentration im Gefach 4

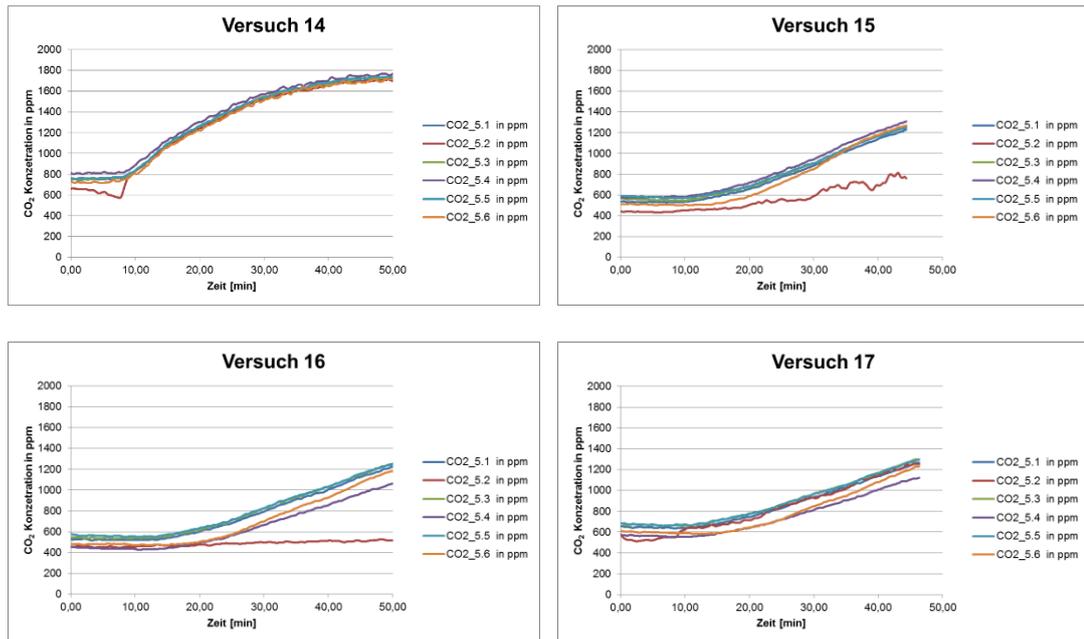


Abb. 78: Die CO₂-Konzentration im Gefach 5

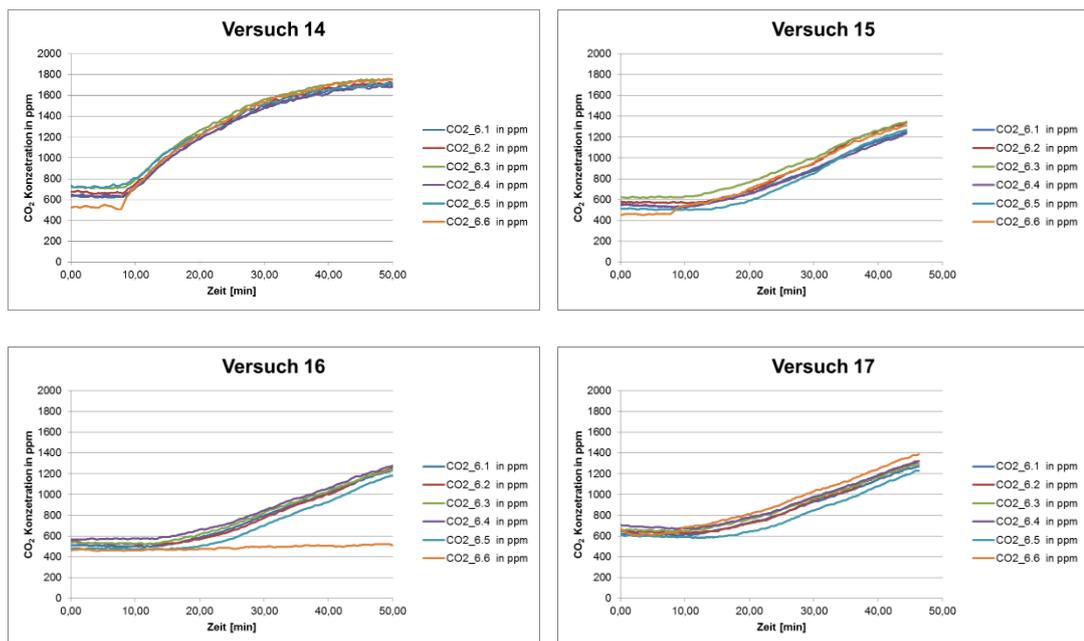


Abb. 79: Die CO₂-Konzentration im Gefach 6

In den obigen Abb. 76 bis Abb. 79 ist ein flacherer Verlauf der CO₂-Konzentration in den Versuchen 15 bis 17 ersichtlich. Die Ursache ist die eingebaute Mineralwolle in den Gefächern. Durch die vollständig ausgeführte Dämmung kommt es zur geringeren Luftströmung in den Gefächern 3 und 4, die

in der Abb. 76 und Abb. 77 (Versuch 15 – Versuch 17) dargestellt sind. In den Gefächern 5 und 6 ist die Dämmung nur zur halben Sparrenhöhe eingebaut, das einer größeren Luftströmung innerhalb des Gefaches verursacht. Die Darstellung der Verläufe der CO₂-Konzentrationen mit 12 cm Dämmung in den Gefächern ist in der Abb. 78 und Abb. 79 zu sehen.

Durch den Vergleich der Versuche mit Mineralwolle kann man erkennen, dass die CO₂ Konzentration im Gefach 5 bei allen CO₂ Sensoren der restlichen Gefächer annähernd ident ist. Durch die Beobachtung des CO₂ Sensors 2 in den Versuchen 15 und 17 erkennt man, dass die CO₂ Konzentration im Gefach 5 deutlich höhere Werte aufweist. Dadurch kann man abschließen, dass die Dicke der Mineralwolle einen großen Einfluss auf die Luftströmung in der Konstruktion hat.

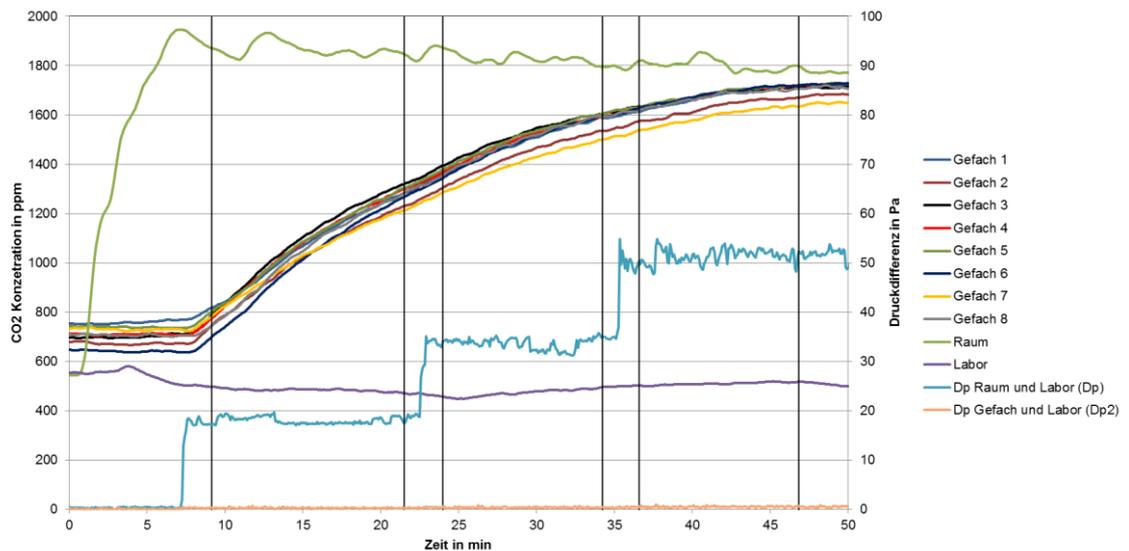


Abb. 80: Versuch 14, Vergleich von CO₂-Konzentration Mittelwerten pro Gefach bzw. Raum oder Labor

Die Abb. 80 zeigt eine deutliche CO₂ Steigung in den Gefächern trotz einer größeren Außenleckage.

Für den Versuch 15 ist in den Gefächern Mineralwolle eingebaut. Auf der Innenseite und Außenseite der Gefächern befindet sich jeweils eine Leckage. Die Abb. 81 zeigt einen deutlichen Unterschied von CO₂-Konzentration zwischen den Gefächern. Die unterschiedliche CO₂-Konzentration ist in den einzelnen Gefächern durch unterschiedlichen Dicken der Mineralwolle und seitlichen Entlüftungen erklärbar.

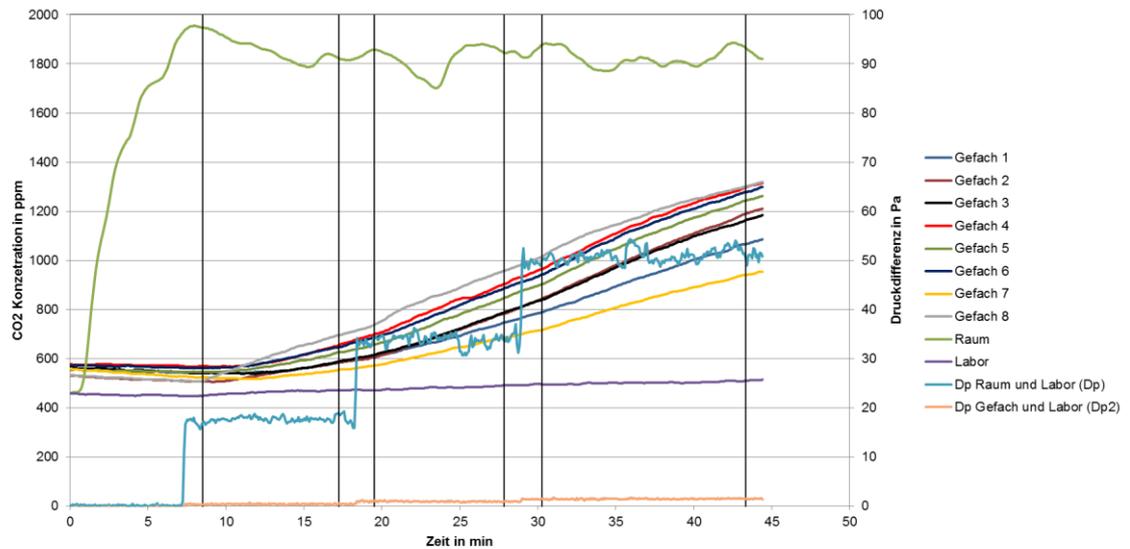


Abb. 81: Versuch 15, Vergleich von CO₂-Konzentration Mittelwerten pro Gefach bzw. Raum oder Labor

Im Versuch 16 ist zusätzlich zum Aufbau des Versuches 15 auf der Außenseite der Dachkonstruktion eine PE-Folie eingebaut. Bei diesem Versuch befindet sich keine Außenleckage, welche eine Druckdifferenz zwischen Gefach und Labor verursacht.

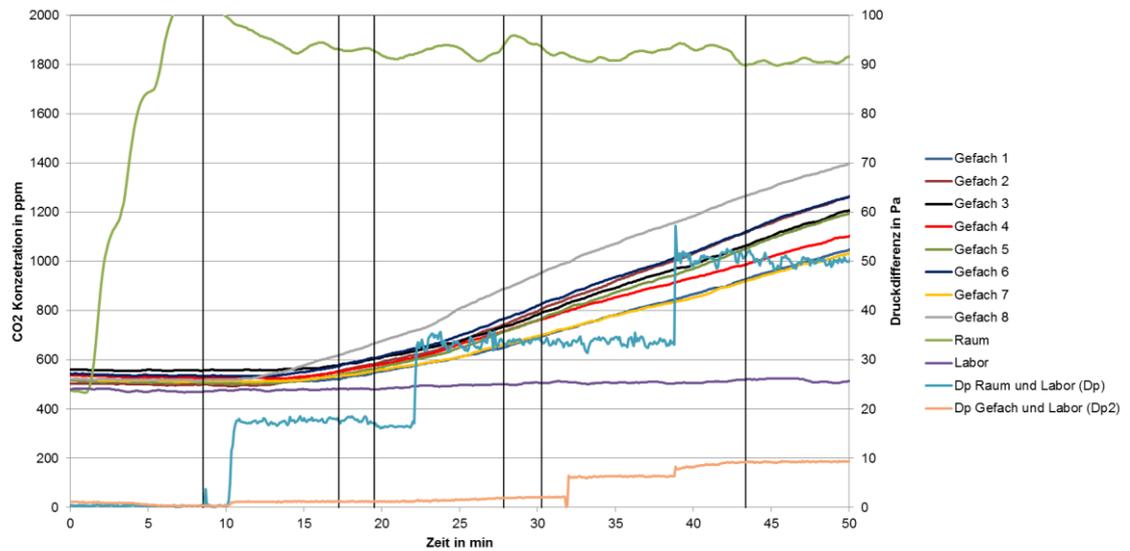


Abb. 82: Versuch 16, Vergleich von CO₂-Konzentration Mittelwerten pro Gefächern bzw. Raum oder Labor

Im Versuch 17 sind zusätzlich durch die PE-Folie Außenleckagen Ø 38 mm eingebaut. Die PE-Folie ist rund um die Außenleckage geklebt, so dass eine definierte Außenleckage vorhanden ist. Durch Ausbildung der Außenleckage ist eine Druckdifferenz zwischen Gefächern und Labor gesunken.

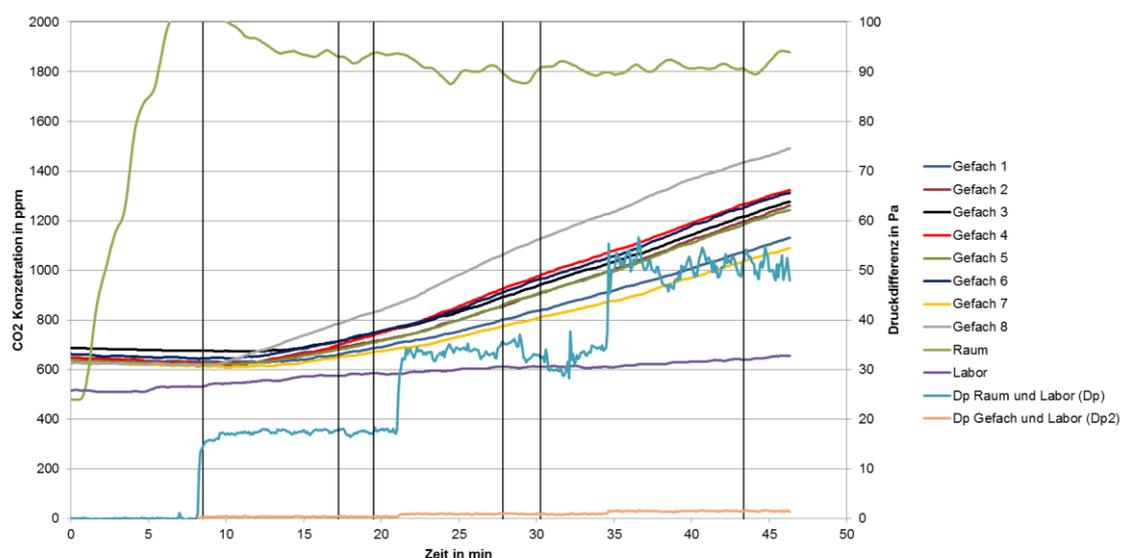


Abb. 83: Versuch 17, Vergleich von CO₂-Konzentration Mittelwerten pro Gefächern bzw. Raum oder Labor

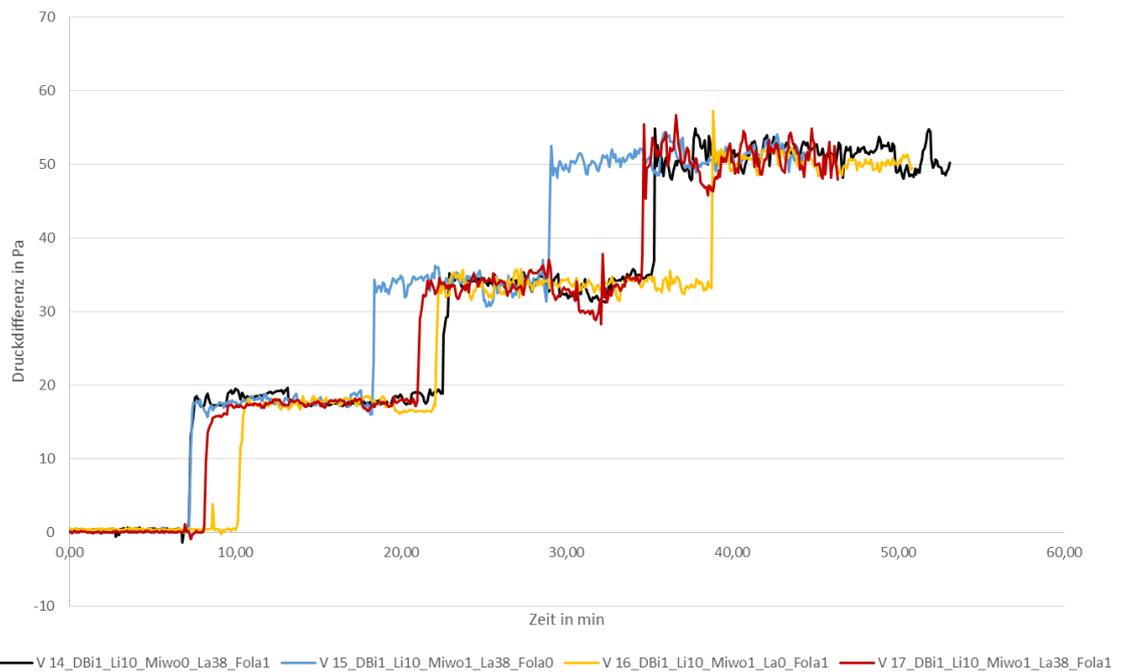


Abb. 84: Vergleich von Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern

Wie aus der Abb. 84 festgestellt werden kann, ist die Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern bei allen Versuchen annähernd ident.

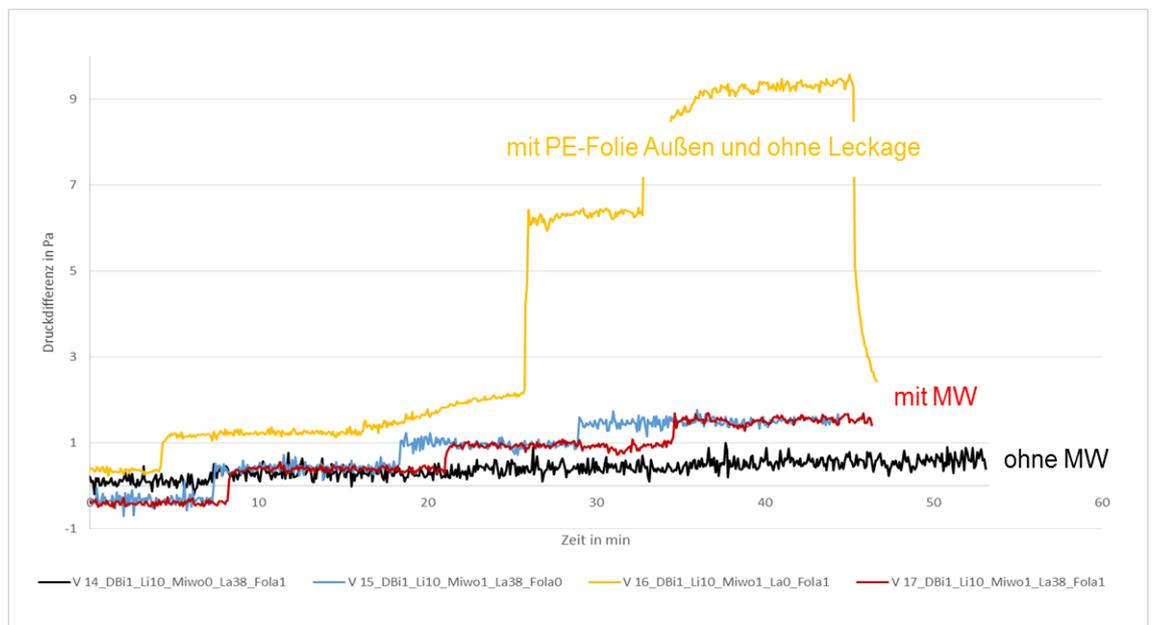


Abb. 85: Vergleich von Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern

In der Abb. 85 ist ersichtlich, dass beim Versuch 15 und Versuch 17 die Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern identisch ist. Dadurch kann man feststellen, dass bei der Dachkonstruktion mit Mineralwolle und Außenleckage die PE-Folie keinen Einfluss auf die Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern besitzt. Die Mineralwolle zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern, die aus dem Versuch 14 und 17 erkennbar ist.

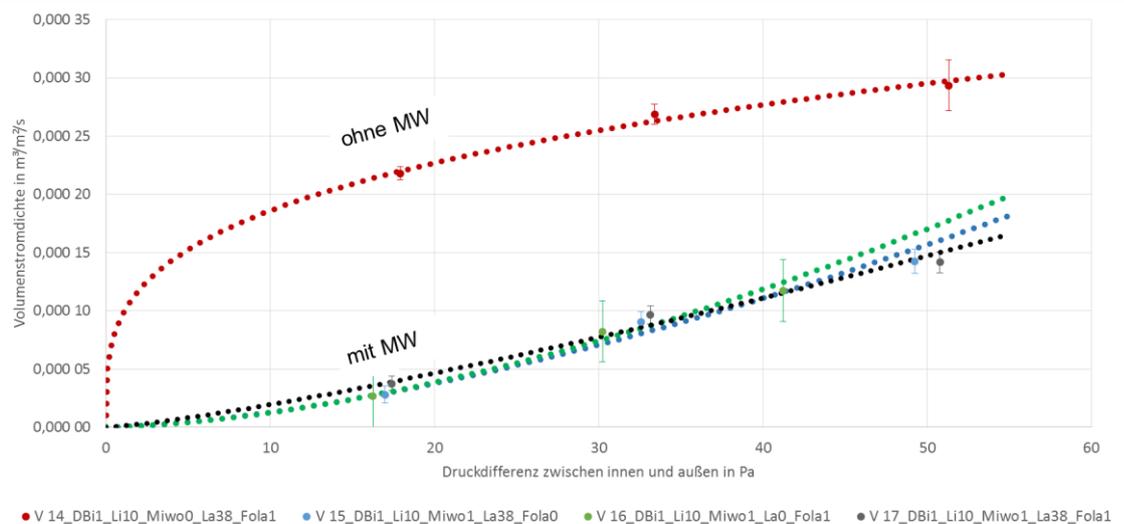


Abb. 86: Vergleich von Volumenstromdichte beim Versuche ohne und mit Mineralwolle

Der Vergleich von Volumenstromdichte ist in den Versuchen mit und ohne Mineralwolle in der Abb. 86 gezeigt. Man erkennt eine deutliche höhere Steigung von Volumenstromdichte in den Gefächern beim der Versuch ohne Mineralwolle. Bei den Versuchen mit Mineralwolle und ausgebildeter Außenleckage, ist in der Abb. 86 mit roten und blauen Linien zu erkennen, hat die PE-Folie auf der Außenseite geringeren Einfluss auf die Luftströmung in der Dachkonstruktion.

6.14. Auswertung des Massenstromes aufgrund der Leckagen in der Dachkonstruktion

Die Berechnung des Massenstroms erfolgt mit der Formel aus Kapitel 4.6. Für die Berechnungen sind folgende Annahmen getroffen worden. Im Versuch 12 sind die äußeren Leckagefläche (3x38 mm) im Vergleich zur inneren Leckagefläche (10 mm) deutlich größer. Es wurde angenommen, dass der Luftstrom Koeffizient C_2 ins Unendliche strebt. Wird Koeffizient C_{ges} und Koeffizient C_2 als unendlich in die Formel 4.6 eingesetzt, lässt sich der Luftstrom Koeffizient C_1 zwischen Raum und Gefach für alle Versuch berechnen. Die Luftstrom Koeffizienten sind in folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 6: Gesamte Luftstrom Koeffizient

Bezeichnung	C_{ges}			
	Gefach 3	Gefach 4	Gefach 5	Gefach 6
V8_DBi1_Li10_Miwo0_La0_Fola0	0,00015760	0,00008467	0,00003977	0,00019501
V9_DBi1_Li10_Miwo0_La10_Fola0	0,00018869	0,00025727	0,00068287	0,00025678
V10_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00006901	0,00007274	0,00001977	0,00006989
V11_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00000222	0,00000240	0,00000204	0,00000204
V12_DBi1_Li10_Miwo0_La3*38_Fola0	0,00000215	0,00000213	0,00000157	0,00000198
V14_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola1	0,00015479	0,00008266	0,00008374	0,00008132
V15_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola0	0,00000006	0,00000052	0,00000042	0,00000063
V16_DBi1_Li10_Miwo1_La0_Fola1	0,00000019	0,00000068	0,00000044	0,00000074
V17_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola1	0,00000052	0,00000116	0,00000090	0,00000116

Tabelle 7: Luftstrom Koeffizienten C_1 und C_2 im Gefach 3 und 4

Bezeichnung	C_1	C_2	C_1	C_2
	Gefach 3		Gefach 4	
V8_DBi1_Li10_Miwo0_La0_Fola0	0,00000215	-0,00000218	0,00000213	-0,00000219
V9_DBi1_Li10_Miwo0_La10_Fola0	0,00000215	-0,00000218	0,00000213	-0,00000215
V10_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00000215	-0,00000222	0,00000213	-0,00000220
V11_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00000215	-0,00007456	0,00000213	-0,00001880
V12_DBi1_Li10_Miwo0_La3*38_Fola0	0,00000215		0,00000213	
V14_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola1	0,00000215	-0,00000218	0,00000213	-0,00000219
V15_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola0	0,00000215	0,00000006	0,00000213	0,00000068
V16_DBi1_Li10_Miwo1_La0_Fola1	0,00000215	0,00000020	0,00000213	0,00000100
V17_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola1	0,00000215	0,00000069	0,00000213	0,00000252

Tabelle 8: Luftstrom Koeffizienten C_1 und C_2 im Gefach 5 und 6

Bezeichnung	C_1	C_2	C_1	C_2
	Gefach 5		Gefach 6	
V8_DBi1_Li10_Miwo0_La0_Fola0	0,00000157	-0,00000164	0,00000198	-0,00000200
V9_DBi1_Li10_Miwo0_La10_Fola0	0,00000157	-0,00000157	0,00000198	-0,00000200
V10_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00000157	-0,00000171	0,00000198	-0,00000204
V11_DBi1_Li10_Miwo0_La38_Fola0	0,00000157	-0,00000688	0,00000198	-0,00007694
V12_DBi1_Li10_Miwo0_La3*38_Fola0	0,00000157		0,00000198	
V14_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola1	0,00000157	-0,00000160	0,00000198	-0,00000203
V15_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola0	0,00000157	0,00000057	0,00000198	0,00000092
V16_DBi1_Li10_Miwo1_La0_Fola1	0,00000157	0,00000062	0,00000198	0,00000118
V17_DBi1_Li10_Miwo1_La38_Fola1	0,00000157	0,00000210	0,00000198	0,00000278

Die Berechnung des Massenstroms folgt mit der Formel 4.2. Die folgenden Abbildungen zeigen vergleich des Massenstroms bei unterschiedlichen Versuchen mit einer innen Leckage von 10 mm.

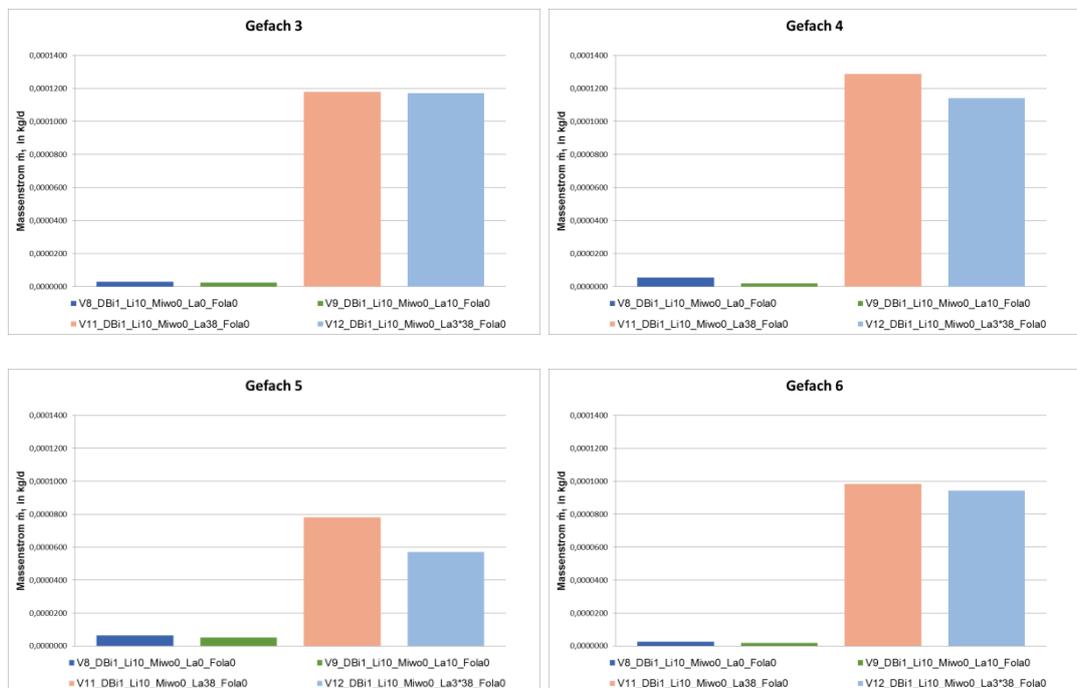


Abb. 87: Vergleichung von Massenstrom zw. Raum und Gefach in den Versuchen mit unterschiedlichen äußeren Leckagen

Die Abb. 87 zeigt ein höherer Massenstrom in den Versuchen mit größerer Leckagefläche. Aufgrund der relativ kleinen äußeren Leckagen von 10 mm im Versuch 9, erkennt man fast kein Unterschied im Vergleich zum Versuch ohne äußeren Leckage (Versuch 8). Der Massenstrom steigt proportional zu dem Verhältnis der Größe der Leckage zwischen Innen und Außen.

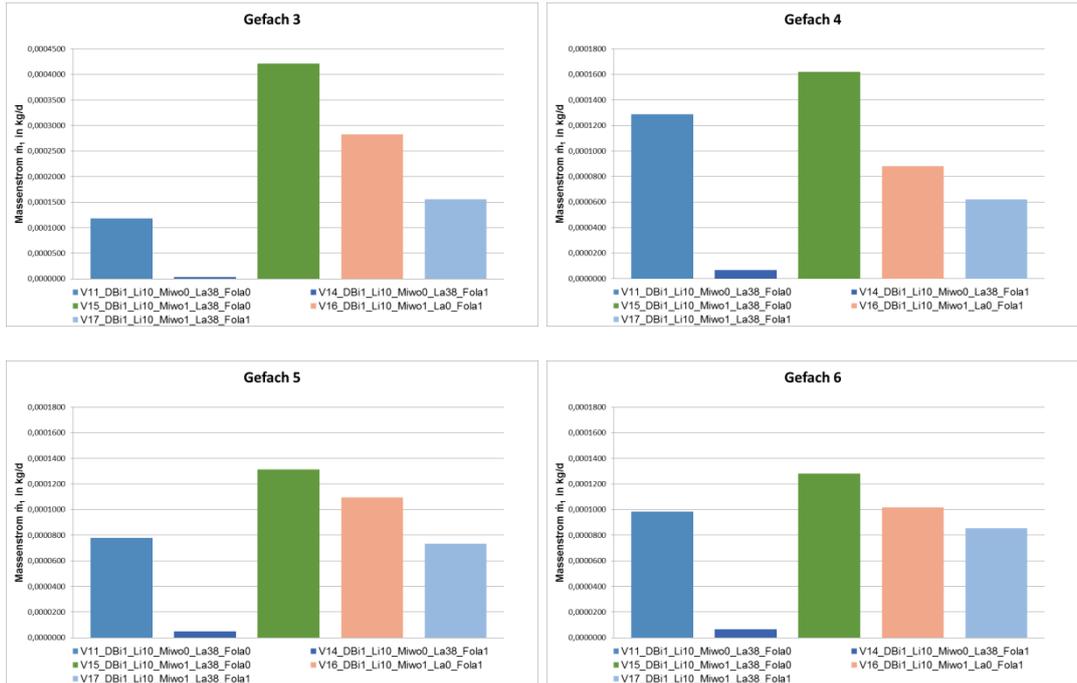


Abb. 88 Vergleich von Massenstrom zw. Raum und Gefach in den Versuchen mit unterschiedlichen außen Leckagen

Die Abb. 88 zeigt die Massenströme bei den Versuchen mit unterschiedlichen Aufbauten und Größen der Leckagen. Durch den Einbau der Folie auf der Außenseite der Gefächer wird die Strömung durch die äußere OSB-Platte verhindert. Die verdeutlicht der Vergleich des Versuches 11 mit 14 und 15 mit 17.

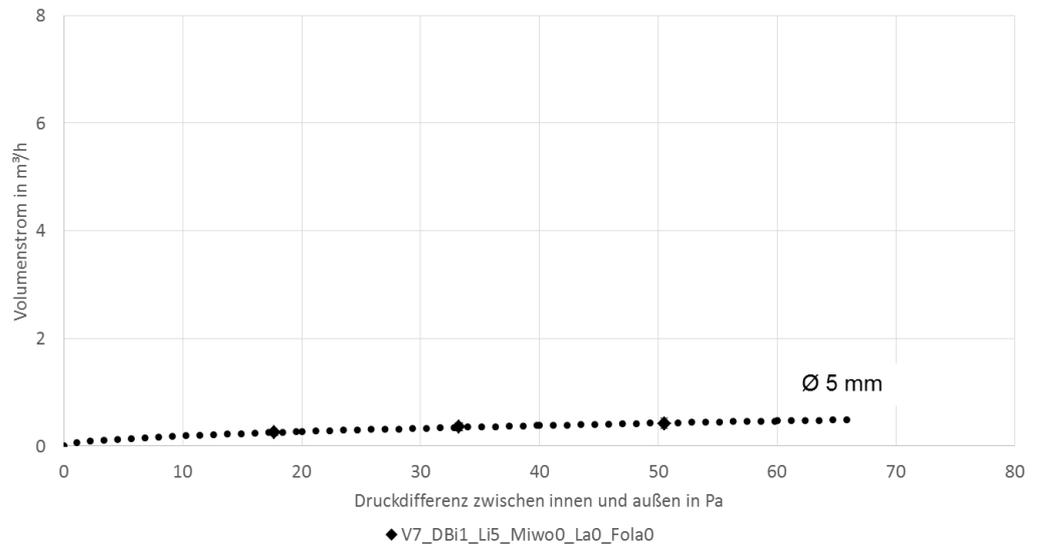


Abb. 89: Leckagevolumenstrom in der Folie in Abhängigkeit von Druckdifferenz

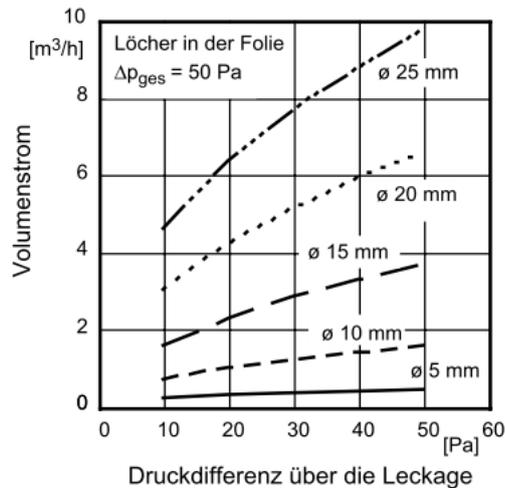


Abb. 90: Leckagevolumenströme in Abhängigkeit von der Druckdifferenz über die Leckagen und der runden Löcher in der Folie. [HAL03]

Die Abb. 89 und Abb. 90 zeigen die Volumenströme in Abhängigkeit von Leckagengrößen. Es wurden Volumenströme bei einem runden Loch $\varnothing 5 \text{ mm}$ untersucht. Der Volumenstrom ist ein Mittelwert aus den Gefächern 3 bis 6. Durch den Vergleich der beiden Abbildungen (Abb. 89 und Abb. 90) ist erkennbar, dass die Volumenströme mit der Leckage von $\varnothing 5 \text{ mm}$ gleich sind. Der Volumenstrom beträgt $V=0,427 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Druckdifferenz von $\Delta P=50 \text{ Pa}$.

7. Zusammenfassung und Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Wirkung von verschiedenen Leckagen auf die Volumenströmung in der Dachkonstruktion. In dieser Arbeit wurde verdeutlicht, dass schon eine kleine Leckage in der Luftdichtheitsebene die Luftströmung verursachen kann. Die Leckagen können zu einem negativen Einfluss auf Raumklima, Bauschäden durch Kondensation, Wärmeverlust und Schalproblem führen. Durch nicht ausreichend luftdichte Bauteile kann warme, feuchte Luft von innen nach außen strömen. In den ersten Versuchen wurde verdeutlicht, dass die OSB-Platte nicht 100 % luftdicht ist. Um eine Luftdichtheitsebene gewährleisten zu können, ist zusätzlich auf der Raumseite eine diffusionshemmende und auf der Außenseite eine diffusionsoffene Abdichtung notwendig. Die Durchführung von unterschiedlichen Rohren durch die Luftdichtheitsebene muss sorgfältig ausgeführt werden. Die Messungen von Volumenströmung durch die Gefächer mit fester großer Leckage auf der Innenseite und unterschiedlichen Leckagen auf der Außenseite haben gezeigt, dass auch die Anordnung von Außenleckagen zu falschen Ergebnissen führen. Dadurch sind weitere Versuche mit einer gegenüber liegenden Außenleckage von Innenleckage durchgeführt worden. Die luftundichte Wärmedämmung in der Dachkonstruktion führt zu einem unregelmäßigen Verlauf der Luftströmung, welche in der Praxis zu einer schwierigen Anordnung der Leckagestellen führen kann.

Die Auswertung des Volumenstroms mit einer Leckage \varnothing 5mm auf der Innenseite der Dachkonstruktion liefert einen Wert von $V=0,427 \text{ m}^3/\text{h}$ bei $\Delta P=50 \text{ Pa}$.

Die Volumenstromdichte bei dem Versuch ohne Mineralwolle (Versuch 14) ist 4-5-mal größer als bei den Versuchen mit Mineralwolle (Versuch 15-17). Der Unterschied der Volumenstromdichte verkleinert sich mit steigender Druckdifferenz auf das 2-3-fache.

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Warmdachkonstruktion	10
Abb. 2: Umkehrdachkonstruktion	11
Abb. 3: Duodachkonstruktion	12
Abb. 4: Belüftete Flachdach	12
Abb. 5: Gründe für Luftdichtheit; [MIE04]	13
Abb. 6: Blower-Door	19
Abb. 7: Typische Leckagen im Gebäude. Vergleich aus den Jahren 1996 und 2002 gemäß Literaturangaben aus Hauser und Hall (2003)	21
Abb. 8: Luftdurchlässigkeit der verschiedenen OSB-Marken getestet [ZEL10].	24
Abb. 9: Kabeldurchführung, Fehler in der Praxis	25
Abb. 10: Auswertung der Leckagevolumenstrom über Durchführungen von elektrischen Leitungen, [HAL03]	25
Abb. 11: Luftdurchlässigkeit einer Leichtbauwandkonstruktion (bei 50 Pa) mit horizontal an den Sparren überlappender Dampfsperre	26
Abb. 12: Luftdurchlässigkeit einer Leichtbauwandkonstruktion (bei 50 Pa) mit vertikal an den Sparren überlappender Dampfsperre	26
Abb. 13: Belastungsarten von Verbindungen:	27
Abb. 14: Grundriss Versuchsmodell	28
Abb. 15: Schnitt A-A	29
Abb. 16: Dachebene, CO ₂ Sensoren Nummerierung, Lüfter und Humichip Anordnung in der Gefache	31
Abb. 17: Schnitt A-A, Anordnung von Dachsensoren in den Gefächern	32
Abb. 18: Schnitt B-B, Anordnung von Dachsensoren in den Gefächern	33
Abb. 19: Aufbauten von Versuchen	34
Abb. 20: Links: Firstseite, Rechts: Traufenseite	35
Abb. 21: Kabeldurchführung in den Dachgefächern mit einer Kabelmanschette, luftdicht angeschlossen	35
Abb. 22: Links: 2 Gefach mit eingebauten CO ₂ Sensoren und Lüfter	36
Abb. 23: Dichtungsmanschette Firma Isocell	37
Abb. 24: SAUTER Model EGQ222F002	38
Abb. 25: Querschnitt ein Feld (zwei Gefächer)	40
Abb. 26: Versuch Bezeichnung	45
Abb. 27: Dachaufbau Versuch 1	46
Abb. 28: Mittelwert der CO ₂ -Konzentration in alle acht Gefache bei drei unterschiedlichen Druckstärken, CO ₂ -Konzentration im Labor 900-1000 ppm	47
Abb. 29: zeigt den Vergleich vom mittigen Gefach, Gefach 3 bis Gefach 6 an	47
Abb. 30: Vergleich Massenstromdichte; die Massenstromdichte in Gefächern 5 und 6 ist identisch → zwischen den Gefächern ist ein Luftaustausch vorhanden	48
Abb. 31: Leckagen in der Dachkonstruktion- Versuch 1	49

Abb. 32: CO ₂ -Konzentration bei fünf unterschiedlichen Druckstärken	50
Abb. 33:Volumenstromdichte Vergleich zwischen die Gefache 3 bis 6.....	50
Abb. 34: Volumenstromdichte - Vergleich Versuch 1 und Versuch 2.....	51
Abb. 35: Dachaufbau Versuch 3	52
Abb. 36: Leckagen im Versuch 3	52
Abb. 37: Vergleich der Steigung von Volumenstromdichte zwischen Gefächern im Versuch 1 und Versuch 3.....	53
Abb. 38: Mittelwert der CO ₂ -Konzentration in allen acht Gefächern bei drei unterschiedlichen Druckstärken (CO ₂ -Konzentration im Labor ca.550 ppm)	54
Abb. 39: Vergleich der Steigung der Volumenstromdichte in den Gefächern 3 bis 6, Versuch 3 (Volllinie) und Versuch 4 (Strichlinie).....	55
Abb. 40: Vergleich von Massenstromdichte im Gefach 3 bis Gefach 6.....	56
Abb. 41: Steigung der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6.....	57
Abb. 42: Versuchselemente der Elemente 5 und 6.....	58
Abb. 43: Links: Versuch 5 ohne Beklebung der Dampfbremse.....	58
Abb. 44: Leckagen im Versuch 5	59
Abb. 45: Leckagen im Versuch 6	59
Abb. 46: Mittelwertvergleich der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6	60
Abb. 47: Längsschnitt durch Gefach 3	61
Abb. 48: CO ₂ -Konzentration im Gefach 3 beim ausgeschalteten Lüfter	61
Abb. 49: Übersicht der verschiedenen Leckagen bei den Versuchen.....	62
Abb. 50: Längsschnitt durch ein Gefach mit Leckagen	62
Abb. 51: Steigung der Volumenstromdichte in Gefächern 3 bis 6.....	63
Abb. 52: Versuch 10 mit drei unterschiedlichen Druckstufen in einem Versuch	64
Abb. 53: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=17$ Pa...65	65
Abb. 54: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=33$ Pa...65	65
Abb. 55: Versuch 11 mit Druckhöhe zwischen Raum und Gefach $\Delta P=50$ Pa...66	66
Abb. 56: Volumenstromdichte vergleich.....	66
Abb. 57: Leckagestellen.....	67
Abb. 58: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=17,3$ Pa.....	67
Abb. 59: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=33$ Pa.....	68
Abb. 60: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern von $\Delta P=50$ Pa.....	68
Abb. 61: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei	69
Abb. 62: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei	69
Abb. 63: Vergleich der Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern bei Druckdifferenz zwischen Labor und Raum von $\Delta P=50$ Pa.....	70
Abb. 64: Übersicht der Leckagenanordnungen bei den Versuchsdurchführunge	70

Abb. 65: Vergleich der Volumenstromdichte bei Versuchen mit einer Innenleckage von \varnothing 10 mm	71
Abb. 66: Links: Dach Oberseite \rightarrow unter $D_{\text{lab/gef}}$	72
Abb. 67: Vergleich von $D_{\text{lab/gef}}$ in den Gefächern	73
Abb. 68: Leckagestellen im Versuch 11	74
Abb. 69: Leckagestellen im Versuch 14	74
Abb. 70: Volumenstromdichte vergleich	75
Abb. 71: Auflistung der Einbauelemente bei den Versuchsdurchführungen	76
Abb. 72: Längsschnitt durch das Gefach, Anordnung der Leckagestellen und Sensoren	76
Abb. 73: Dachebene, CO ₂ Sensoren Nummerierung	77
Abb. 74: Links: die Mineralwolle in den Gefächern 1 und 2	78
Abb. 75: Links: die Mineralwolle in den Gefächern 5 und 6 d=12 cm	78
Abb. 76: Die CO ₂ -Konzentration im Gefach 3	79
Abb. 77: Die CO ₂ -Konzentration im Gefach 4	79
Abb. 78: Die CO ₂ -Konzentration im Gefach 5	80
Abb. 79: Die CO ₂ -Konzentration im Gefach 6	80
Abb. 80: Versuch 14, Vergleich von CO ₂ -Konzentration Mittelwerten pro Gefach bzw. Raum oder Labor	81
Abb. 81: Versuch 15, Vergleich von CO ₂ -Konzentration Mittelwerten pro Gefach bzw. Raum oder Labor	82
Abb. 82: Versuch 16, Vergleich von CO ₂ -Konzentration Mittelwerten pro Gefächern bzw. Raum oder Labor	83
Abb. 83: Versuch 17, Vergleich von CO ₂ -Konzentration Mittelwerten pro Gefächern bzw. Raum oder Labor	83
Abb. 84: Vergleich von Druckdifferenz zwischen Raum und Gefächern	84
Abb. 85: Vergleich von Druckdifferenz zwischen Labor und Gefächern	84
Abb. 86: Vergleich von Volumenstromdichte beim Versuche ohne und mit Mineralwolle	85
Abb. 87: Vergleichung von Massenstrom zw. Raum und Gefach in den Versuchen mit unterschiedlichen außen Leckagen	87
Abb. 88 Vergleichung von Massenstrom zw. Raum und Gefach in den Versuchen mit unterschiedlichen außen Leckagen	88
Abb. 89: Leckagevolumenstrom in der Folie in Abhängigkeit von Druckdifferenz	88
Abb. 90: Leckagevolumenströme in Abhängigkeit von der Druckdifferenz über die Leckagen und der runden Löcher in der Folie. [HAL03]	89

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Genormte Luftwechselraten	18
Tabelle 2: Materialkennwerte der verwendeten Materialien.....	36
Tabelle 3: Versuch 1	48
Tabelle 4: Werte der Volumenstromdichte im Versuch 2	51
Tabelle 5: Werte der Volumenstromdichte in der Versuch 3.....	53
Tabelle 6: Gesamte Luftstrom Koeffizient	86
Tabelle 7: Luftstrom Koeffizienten C_1 und C_2 im Gefach 3 und 4.....	86
Tabelle 8: Luftstrom Koeffizienten C_1 und C_2 im Gefach 5 und 6	87

10. Literaturverweis

- [HAL03] Univ. Prof. Dr.-Ing. G. Hauser und Dipl.-Ing M. Hall: In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart, Mai 2003, Universität Kassel
- [IWU95] Zeller: Bericht des Institutes für Wohnen und Umwelt GmbH Darmstadt, Luftdichtigkeit von Gebäuden, August 1995, Darmstadt
- [ZEL04] Praxistest-MINERGIE: Erfahrung aus Planung, Realisierung, und Nutzung von MINERGIE-Bauten, 16.06.2004
- [NUS12] Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser M.Eng.: Dissertation Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen, März 2012, Wien
- [CAM09] Johannes Cammerer, Thomas Achermann und Martin H Spitzner: Untersuchung zur Dauerhaftigkeit von Verbindungen und Anschlüssen bei Luftdichtheitsschichten mittels Klebmassen und Klebebändern, April 2009, Berlin
- [HAN07] Prof. Dipl. Arch Hansruedi Preisig: Luftdichte gebäudehülle und Wohnungslüftung im Zusammenhang- Rück- und Ausblick für die Schweiz, 2007, Kassel
- [TRA14] Dipl.-Ing. Herbert Trauernicht: Gebäudemestechnik, Link: <http://www.luftdicht.de/warum.htm>, 01.10.2014
- [RIC10] Christof Riccabona und Thomas Bednar: Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik, 2010, Wien
- [EN12] EN ISO 9972: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden-Differenzdruckverfahren, Juli 2012
- [ONO02] ÖNORM B 8110-5: Wärmeschutz im Hochbau - Niedrig- und Niedrigstenergie-Gebäude - Teil 5; Anforderungen und Nachweisverfahren, Dezember 2002, Wien

- [ZEL09] Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München; April 2009, München
- [DIN95] DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik – Teil 1 Grundbegriffe, Jänner 1995, Berlin
- [SIK07] Claes Bankvall und Eva Sikander: Air Transport in Building Envelope and Construction Process, 2007, Sweden
- [ZEL10] J.Langmans, R. Klein und S. Roels; Air permeability requirements for air barrier materials in passive houses, Comparison of the air permeability of eight commercial brands of OSB; Oktober 2010, Denmark
- [REI99] Dipl.-ing Dirk Reichel; Dissertation Zur Zuluftsicherung von nahezu fugendichten Gebäuden mittels dezentraler Lüftungseinrichtungen-Dissertation; September 1999, Dresden