

Diploma Thesis

Influence of airflows on the hygrothermal behaviour of timber beam ceilings heads in buildings built in the Wilhelminian period

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Einfluss von Luftströmungen auf das hygrothermische Verhalten von Tramköpfen in Gründerzeitgebäuden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Norbert Grötzl

Matr.Nr.: 1025544

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Bednar**

Dipl.-Ing. **Paul Wegerer**

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/206, A-1040 Wien

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Senning, Februar 2019

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, welche mich während meiner gesamten Studienzeit unterstützt und beraten hat. In diesen Zug möchte ich mich auch nochmals bei den Korrekturlesern dieser Arbeit bedanken.

Für die Betreuung der Diplomarbeit, die geleisteten Hilfestellungen und die Geduld die sie während der Erstellung der Arbeit aufbringen mussten möchte ich mich bei meinen Betreuern Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar und natürlich auch Herrn Dipl.Ing Paul Wegerer bedanken.

Ein weiteres Dankeschön ergeht an die vielen Institutsmitarbeiter des Forschungsbereichs Bauphysik und Schallschutz welche mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Manfred Grüner und Herrn Ing. Harald Hofbauer für ihre Unterstützung bei den Messungen in der Neilreichgasse danken.

Dabei darf ich mich auch stellvertretend für die Firma Gassner&Patner bei Herrn Dipl.-Ing Jürgen Brenner bedanken, welcher erst die CO₂ Messungen im Gründerzeithaus der Neilreichgasse möglich gemacht hat.

Kurzfassung

Im Wiener Baubestand stellt die Holztramdecke die am weitest verbreitete Deckenkonstruktion dar. Viele dieser, in der Gründerzeit errichteten, Gebäude sind mittlerweile sanierungsbedürftig. Das Tramkopfaufleger an der Außenmauer stellt dabei eine Wärmebrücke dar, welcher zusätzliche Beachtung geschenkt werden muss. Vor allem in Hinblick auf zu sanierende Gebäude mit einer möglichen nachträglich aufgetragenen Innendämmung gilt festzustellen, warum sich einige dieser Tramköpfe noch in tadellosen Zustand befinden, während andere bereits nahezu vollständig vermodert sind. Dazu werden die Auswirkungen eines luftumströmten Tramkopfdetails in dieser Arbeit genauer betrachtet. Insbesondere auch die Auswirkungen einer Luftströmung auf die Dauerhaftigkeit bzw. die Schimmelfälligkeit einer solchen Konstruktion.

Im ersten Schritt wurden mögliche Strömungsursachen und auch Strömungspfade untersucht. Am wahrscheinlichsten kommt es dabei zu einer Strömung zwischen zwei übereinanderliegenden Räumen aber auch eine direkte Luftströmung nach oder von außen wäre im Bereich des Möglichen.

Ein weiterer Punkt ist die grundlegende Fragestellung ob es tatsächlich zu einer Luftströmung zwischen den Geschoßen kommen kann. Hierzu wurden Versuche in einem Gründerzeithaus durchgeführt. Dabei wurde der Luftvolumenstrom, im Bereich der Tramaufleger, von einem Raum in den darüberliegenden Raum gemessen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es bei abgehängten Decken zu starken Luftströmungen kommen kann, hingegen bei sauber verputzten Decken nur minimale Luftströme messbar sind.

Für die Durchführung von hygrothermischen Simulationen eines Tramkopfdetails wurden die auftretenden Druckunterschiede für die verschiedenen Strömungsursachen betrachtet. Sobald eine Luftströmung zur oder von der Außenseite des Gebäudes möglich ist, kommt es zu einer Vervielfachung der auftretenden Druckunterschiede. Die größten Druckunterschiede treten infolge von Windbeanspruchungen auf. Ihre Abbildung ist jedoch insofern schwierig, da diese als wechselnde Druck- und Sogbeanspruchung vorkommen und dabei direkt von der Gebäudeausrichtung abhängig sind.

Die Simulationen selbst wurden mittels des Finiten-Element-Programms HAM4D durchgeführt. Durch sie wurde der eingeschwungene Feuchtezustand im Holz unter Berücksichtigung von Diffusion und Konvektion ermittelt. Es wurde dabei zwischen verschiedenen Kombinationen von Innenklimaten und Strömungsrichtungen variiert. Die Simulationen haben gezeigt, dass die historischen Aufbauten funktionsfähig sind und es zu keinen kritischen Feuchtigkeiten kommt. Dennoch sind die auftretenden Feuchtigkeiten höher als bei Simulationen ohne Konvektion, wodurch bei Schlagregenbelastung oder anderen Bauteilaufbauten problematische Feuchtigkeiten entstehen können. Problematisch werden Wandaufbauten mit nachträglich angebrachter Innendämmung, diese führen bereits durch die Berücksichtigung der Luftströmung zu einer Schimmelgefährdung. Bei derartigen Konstruktionen sind Randbedingungen wie trockenes Innenklima oder besonders luftdicht ausgeführte Tramkopfdetails von entscheidender Bedeutung, ob es tatsächlich zu einer Schimmelbildung kommt. In den Simulationen konnte auch gezeigt werden, dass eine Luftströmung um den Tramkopf durchaus positive Effekte hervorrufen kann. Wichtig sind dabei vor allem das erwähnte Innenklima und die Strömungsrichtung.

Abstract

In the Viennese building stock, the timber beam ceiling represents the most widespread ceiling construction. Many of these buildings, constructed during the Wilhelminian period, are now in need of refurbishment. The beam head in the outer wall represents a thermal bridge, which must be given additional attention. Especially for buildings with a subsequently installed interior insulation, it should be investigated why some of these beam heads are still in perfect condition, while others are already mouldered. For this purpose, this thesis examined the effects of an air flowed beam head more precisely and investigated the effects of an airflow on the durability or mould susceptibility of such a construction.

In the first step possible causes and paths of an airflow were investigated. The flow path with the highest probability arises between two stacked rooms but also a direct flow of air to or from the outside would be in the range of possibilities.

Another point is the basic question, whether an airflow between different floors is even plausible. For this purpose, experiments were carried out in a house build in the Wilhelminian period. The air volume flow, in the area of beam bearing, from one room to the room above was measured. The investigations have shown that strong airflows can occur, but with thoroughly plastered ceilings only minimal airflows can be detected.

For performing hygrothermal simulations of a beam head detail, the differences in pressure for the different flow causes were considered. As soon as an airflow to or from the outside of the building is possible, there is a significant increase in the pressure differences that occur. The largest pressure differences come about as a result of wind. However, their illustration is difficult because they occur as alternating pressure and suction stress and they are directly dependent on the orientation of the building.

The simulations themselves were performed with the finite-element-program HAM4D. They determined the steady state vibration of moisture in the timber, with regard to diffusion and convection. Different combinations of indoor climates and flow directions were varied. The simulations have shown that the historical structures are fully functional and that there is no critical humidity. Nevertheless, the occurring humidity is higher than in simulations without convection. Which can result in problematic humidity when driving rain arises or the component structures get changed. Wall constructions with a retrofitted internal insulation are problematic, since already causes the air flow mould growth. In such construction's boundary conditions such as dry indoor climate or a particularly air-tight executed beam head detail are of crucial importance, if it comes to mould growth. The simulations also showed that airflow around the beam head can produce positive effects. For that phenomenon the interior climate and the direction of flow are important.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Gliederung der Arbeit.....	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Tramdecke.....	2
2.2	Luftströmung.....	3
2.2.1	Strömungsursachen.....	3
2.2.2	Luftdichte Schicht und Leckagen	3
2.2.3	Strömungspfade	5
2.2.4	Strömungsgleichung.....	7
3	Messung des Luftvolumenstroms	9
3.1	Ziel - Motivation	9
3.2	Methode.....	9
3.2.1	Strömungspfad	9
3.2.2	Messung	9
3.2.3	Auswertung	10
3.3	Versuchsaufbau	11
3.3.1	Objekt	11
3.3.2	Räume.....	12
3.4	Messungen	16
3.4.1	1. Messtag – Messungen 01, 03 und 04.....	16
3.4.2	2. Messtag – Messungen 05 und 06.....	20
3.4.3	3. Messtag – Messungen 08, 11 und 12.....	23
3.5	Ergebnisse.....	27
3.5.1	Vergleich des Massenstroms.....	27
3.5.2	Vergleich des Volumenstroms mit Nusser/Zirkelbach	29
3.5.3	Zusammenfassung.....	34
4	Bestimmung typischer Druckunterschiede	35
4.1	Ziel - Motivation	35
4.2	Gebäudeinterner Auftrieb.....	35
4.2.1	Methode.....	35
4.2.2	Ergebnisse.....	37
4.3	Stack Effect	39

4.3.1	Methode	39
4.3.2	Ergebnis	40
4.4	Winddruck	41
4.4.1	Methode	41
4.4.2	Ergebnis	44
4.5	Vergleich	45
4.6	Zusammenfassung	46
5	Simulation eines umströmten Tramkopfdetails	47
5.1	Ziel - Motivation	47
5.2	Methode	47
5.2.1	Hygrothermische Simulation	47
5.2.2	Programm HAM4D	47
5.2.3	Auswertung	49
5.3	Untersuchte Varianten	49
5.4	Eingangsdaten	50
5.4.1	Modell	50
5.4.2	Materialdaten	51
5.4.3	Klimadaten	52
5.4.4	Leckage	53
5.4.5	Auswertungszellen	54
5.5	Ergebnisse	55
5.5.1	Verteilung der Feuchtigkeit	55
5.5.2	Verlauf der Feuchtigkeit	56
5.5.3	Vergleich der Varianten	58
5.6	Zusammenfassung	64
6	Zusammenfassung	66
6.1	Messung des Luftvolumenstroms	66
6.2	Bestimmung typischer Druckunterschiede	67
6.3	Simulation eines umströmten Tramkopfdetails	68
7	Literaturverzeichnis	71
8	Anhang	74

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Ab dem 19. JH wurden bereits vermehrt Tramdecken errichtet, besonders bei den zahlreichen Neubauten der Wiener-Gründerzeit war es die am häufigsten ausgeführte Deckenkonstruktion. Der Tramkopf ist in eine Vollziegelmauer eingelassen und bildet somit an der Außenwand eine kritische 3-dimensionale Wärmebrücke. Durch die dort auftretenden niedrigeren Temperaturen kommt es zu erhöhten Feuchtigkeiten aus der Feuchtediffusion. Dies ist problematisch, da für die Holzkonstruktion bei zu hohen Feuchtigkeiten die Gefahr einer Holzzerstörung besteht. Verstärkt wird diese Gefährdung noch durch weitere Faktoren wie Schlagregen und konvektivem Feuchteeintrag. Im Zuge von Renovierungen werden diese alten Gebäude häufig mit einer Innendämmung thermisch saniert. Dadurch wird die Temperatur weiter reduziert und es kommt zu einer früheren Kondensation infolge Feuchtediffusion und -konvektion.

Dennoch werden bei Renovierungen immer wieder, neben bereits vollkommen vermoderten Tramköpfen, auch Tramköpfe in tadellosen Zustand freigelegt. Es stellt sich also die Frage, weshalb nur ein Teil der alten Tramdecken aus der Gründerzeit zusammengefault ist. Dazu gilt es noch zu klären welchen Einfluss die Konvektion der Luft um den Tramkopf spielt. Dabei muss auch der Zustand der luftdichten Schicht und ihrer Leckagen beachtet werden. In der Arbeit sollen die Auswirkungen entsprechender Luftströmungen sowohl bei unsanierten als auch bei Tramdecken mit Innendämmung untersucht werden.

1.2 Gliederung der Arbeit

Zuerst werden grundsätzliche Überlegungen angestellt. Dabei soll aufgezeigt werden wie es zu einer Durchströmung der Tramköpfe kommen kann und wie die Strömungspfade verlaufen können. Anhand dieser Überlegungen soll eine grundsätzliche Einschätzung der negativen und eventuell positiven Folgen einer Durchströmung erläutert werden.

Die restliche Arbeit kann noch in zwei große Teile gegliedert werden.

Im ersten Teil der Arbeit wird analysiert inwieweit eine Durchströmung überhaupt als realistisch angesehen werden kann und in weiter Folge wie luftdicht eine gründerzeitliche Konstruktion tatsächlich ist. Dazu wurde an einem unsanierten Gründerzeithaus in einer Reihe von Messungen der Massenstrom, welcher um die Tramköpfe strömt, bestimmt. Die Messungen fanden zwischen Räumen mit verschiedenen Vornutzern und somit unterschiedlichen Zuständen der luftdichten Schicht statt. Dadurch soll einerseits ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der luftdichten Schicht und dem Massenstrom hergestellt werden und andererseits ein Vergleich mit den Luftdichtheitsklassen aufgestellt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit werden mithilfe von 4D-Simulationen (räumlich und zeitlich) die Überlegungen vom Beginn der Arbeit überprüft. Dabei sollen verschiedene Varianten untersucht werden um die Auswirkung einzelner Parameter bestimmen zu können. Mithilfe dieser Simulationen soll letztendlich die Schimmelgefährdung der einzelnen Varianten bestimmt und verglichen werden. Um diese Simulationen durchführen zu können wurden zuvor die möglichen auftretenden Druckunterschiede bestimmt. Dies erfolgte durch die Auswertungen von gemessenen Klimadaten einer Wohnung und einer Wetterstation in Wien.

2 Grundlagen

2.1 Tramdecke

Ein Großteil des Wiener-Altbaus wurde in der Gründerzeit errichtet. Zur damaligen Zeit wurden etwa 80% der Neubauten mit einer Tramdecke ausgeführt. Auch davor gehörte die Tramdecke zu einer der am weitest verbreiteten Decken. Somit stellten die Tramdecken den Großteil der Bestandskonstruktionen in Wien dar. Von besonderer Bedeutung sind diese Decken vor allem bei mittlerweile notwendigen Sanierungsmaßnahmen und infolge der strengeren Wärmeschutzbestimmungen.

Eine Tramdecke besteht aus einzelnen Balken, den Trämen, welche die tragende Funktion übernehmen. Über den Trämen ist eine Schalung angebracht. Auf dieser befindet sich, zur Erhöhung des Schall- und Brandschutzes, eine Beschüttung welche meist aus Sand, Schlacke oder Ziegelbruch bestand. Auf Polsterhölzer welche in die Schüttung eingelassen sind befindet sich wiederum ein Blindboden und der Fußbodenbelag, oftmals ein Dielenfußboden. An der Unterseite der Träme befindet sich ebenfalls eine Schalung auf welcher eine Schilfmatte mit dem Deckenputz befestigt wurde.

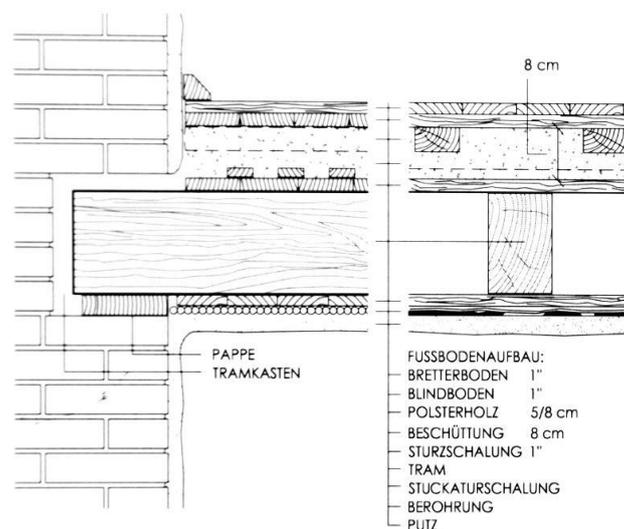


Abb. 2.1.1: Klassisches Tramkopfdetail (RICCABONA-10, 258), mit eingelassenem Tramkopf bei welchem die Luft des Tramkastens eine Wärmebrücke darstellt.

In Abb. 2.1.1 erkennt man, dass der Tramkopf in die Außenmauer eingelassen ist. Durch die den Tramkopf umgebende Luft bildet sich dort eine Wärmebrücke aus. Bei den Tramköpfen vieler alter Konstruktionen kam es aufgrund von Bau- bzw. Planungsfehlern oder einer falschen Nutzung, vor allem im Bereich der Sanitärräume, zu einer Verrottung bzw. Zerstörung durch Schädlinge. Deswegen benötigt dieses Detail bei Sanierungen ein besonderes Augenmerk. Es gibt jedoch auch noch zahlreiche Konstruktionen welche sich in tadellosen Zustand befinden.

Besonders kritisch sind thermische Sanierungen. Diese müssen oftmals, aufgrund einer schutzwürdigen Außenfassade, mit einer Innendämmung ausgeführt werden. Durch die Verschiebung der kühleren Temperaturen nach innen würde es sich dabei, auch ohne einer Wärmebrücke, um feuchte-problematische Konstruktionen handeln. Deswegen ist eine zusätzliche luftdichte und diffusionshemmende

Schicht oftmals notwendig. Dadurch ergibt sich wiederum ein zusätzliches Potential für Planungs- und Ausführungsfehler.

(dieses Kapitel stellt eine Zusammentragung aus folgenden Literaturquellen dar: (KEHL-12; PECH-06; SCHREDER-16; GIEBELER-08; WEGERER-12))

2.2 Luftströmung

2.2.1 Strömungsursachen

Eine Luftströmung entsteht durch einen unterschiedlichen Luftdruck zwischen zwei Standorten. Im betrachteten Fall der Tramkopf-Durchströmung kommen die Räume unterhalb und oberhalb der Tramdecke (I_1 und I_2) sowie die Außenseite (A) als Standorte in Frage (siehe Abb. 2.2.2). Der Luftdruck ist einerseits von der Höhe des betrachteten Standorts, andererseits auch von der dortigen Temperatur abhängig. Für einen Druckunterschied kommen nach (HAGENTOFT-01) drei verschiedene Ursachen infrage:

- ◆ Stack Effect (Thermischer Auftrieb)
- ◆ Winddruck
- ◆ Mechanische Lüftungsanlagen

Bei einem Temperaturunterschied zwischen zwei Standorten, bei (HAGENTOFT-01) als Stack Effect beschrieben, wird in dieser Arbeit zusätzlich zwischen Stack Effect und gebäudeinternen Auftrieb unterschieden.

Mit gebäudeinternem Auftrieb ist ein Temperaturunterschied innerhalb eines Raumes oder eines Gebäudes gemeint, welcher zu einer Zirkulation der Luft führt. Als Beispiel kann ein kühleres Treppenhaus herangezogen werden. Durch die Wohnungstüren sind zwei übereinanderliegende Räume mit dem Treppenhaus verbunden. Sobald es auch eine Leckage zwischen den Räumen gibt, kommt es zu einer Zirkulation der Luft durch einen Teil des Gebäudes. Somit auch zu einer Strömung durch die Decke zwischen den beiden Räumen.

Unter Stack Effect, zu Deutsch Kamineffekt, wird in dieser Arbeit ein Temperaturunterschied zwischen innen und außen betrachtet. Durch zwei Leckagen in der Gebäudehülle kommt es zu einer Luftströmung von außen nach innen und innen nach außen. Maßgebend ist dabei nicht nur der Temperaturunterschied, sondern auch der Abstand der beiden Leckagen zueinander. Je höher der Abstand desto größer ist der Druckunterschied und somit auch der Luftstrom.

Der Winddruck setzt sich aus den Außenwinddruck und den Innendruck zusammen. Dabei können beide Drücke unabhängig voneinander positive (Windsog) und negative (Winddruck) Werte annehmen. Als Ursachen für den Innendruck sind eine undichte Gebäudehülle sowie offene Fenster und Türen anzuführen, wobei dabei alle Gebäudeseiten zu betrachten sind.

Mechanische Lüftungsanlagen erzeugen durch den Luftstrom auch einen Druckunterschied, welcher sich auf andere Leckagen auswirkt. Mechanische Lüftungsanlagen wurden in dieser Arbeit aber nicht näher betrachtet, da die meisten Gründerzeithäuser nicht mit derartigen Anlagen ausgestattet sind.

2.2.2 Luftdichte Schicht und Leckagen

Eine luftdichte Schicht verhindert eine Luftströmung durch eine Konstruktion. Sie stellt zudem häufig auch eine diffusionshemmende oder sogar diffusionsdichte Abdichtung dar. Eine Leckage ist eine

Fehlstelle in dieser Schicht, wodurch eine Strömung stattfinden kann. In (KEHL-12) wurden bereits Überlegungen bezüglich der luftdichten Schichten eines Tramkopfdetails angestellt, diese wurden in der Arbeit weitergeführt.

Die luftdichte Schicht einer Geschoßdecke zum unterhalb liegenden Raum, stellt der Deckenputz auf der Unterseite dar, welcher durch Risse beschädigt werden kann. Häufig treten diese im Bereich zwischen Wand und Decke auf, da hier zwei unterschiedliche Materialien mit verschiedenen Schwind- und Quell-Eigenschaften aufeinandertreffen. Eine weitere, wenn nicht sogar häufigere Leckage stellen nachträgliche Durchdringungen der Deckenuntersicht dar. Dies wären vor allem Aufhängungen und Stromanschlüsse von Lampen, eine abgehängte Decke aber auch montierte Gardinenleisten. In Küchen stellen auch die Dunstabzüge eine maßgebende Leckage dar, da jedoch die Küchen meist im Rauminnen platziert wurden sind diese für die Durchströmung des Tramkopfes an der Außenmauer meist nicht von Bedeutung. Diese typischen Leckagestellen werden durch (HALL-13) bestätigt. Hauser befasst sich zwar mit modernen Holzhäusern, bei diesen handelt es sich im Grund ebenfalls um Tramdecken bei welchen der Deckenunterputz durch eine Gipskartonplatte ersetzt wurde.

Betrachtet man den Fußboden einer Decke, gestaltet sich das finden einer luftdichten Schicht schwieriger. Nach (GIEBELER-08) wurden die Zwischenräume der Dielen oftmals durch Ausspanen¹ verschlossen um einen Austritt von Staub aus den unteren Schichten zu verhindern. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass diese luftdichte Schicht mit der Zeit durch Schwingung der Decke aber auch durch Quellen und Schwinden der Dielen zerstört wird. Eine weitere luftdichte Schicht könnte ein entsprechender Fußbodenbelag darstellen. So wäre ein Laminatboden relativ dicht im Vergleich zu Dielen- oder Teppichböden, welche nur einen geringen Strömungswiderstand bieten. Eine häufige Stelle für Undichtheiten ist der Anschluss von Fußboden und Wand. Dort kommt meist eine Sesselleiste zum Einsatz, diese ist meist nur angenagelt. Besser wäre eine Verklebung, wobei hier wiederum das Risiko einer Zerstörung aufgrund unterschiedlichen Quell- und Schwindverhalten besteht. Bei einer Renovierung kommt häufig ein Estrich mit PE-Folie oder auch nur ein Trockenestrich zum Einsatz. Vor allem eine PE-Folie stellt eine sehr gute luftdichte Schicht dar. Problematisch ist dabei wieder der Anschluss zur Wand. Da dort meistens auch ein Streifen Trittschalldämmung eingebracht wird, wird die PE-Folie nicht mit der Wand luftdicht verklebt und es ergibt sich eine Leckage über den gesamten Umfang des Fußbodens.

Nach außen hin stellt die verputzte Außenmauer selbst die luftdichte Schicht dar. Der Außenputz von Gründerzeithäusern ist in vielen Fällen bereits beschädigt, dadurch kommt es laut (SCHREDER-16) infolge von Witterung, vor allem Schlagregen, zu einem Auswaschen der Mauerwerksfugen. In Verbindung mit Setzungsrissen können sich diese Fugen bis ins Innere fortsetzen. Besonders problematisch ist hier eine defekte Regenwasserableitung bei einem Gesimse. Dadurch kann es dort zu einem intensiveren Abbau des Mörtels kommen und somit zu einer Luftströmung durch die Außenmauer selbst (siehe Abb. 2.2.1). Eine weitere Möglichkeit für Leckagen sind Lüftungsöffnungen oder nachträglich eingebaute Klimaanlage. Häufiger jedoch werden Leckagen im Bereich von Fensteranschlüssen auftreten. Hierbei kommen bei älteren Fenstern oftmals eine geringere Ausführungsqualität und Abnutzungserscheinungen zu tragen.

¹ ein nachträgliches Verschließen mit eingeleimten Holzspänen (GIEBELER-08, S. 146)

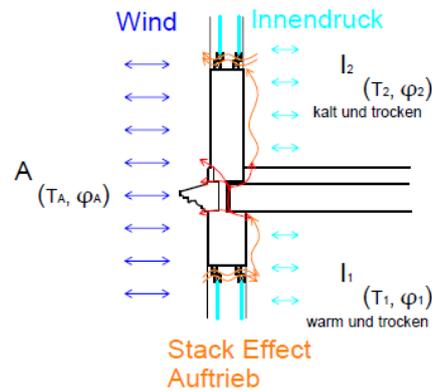


Abb. 2.2.1: Mögliche Luftströmungen, direkt nach außen über Fugen im Mauerwerk oder indirekt über Fugen im Fensteranschluss der angrenzenden Räume. Es ist auch die Überlagerung der Winddrücke mit dem Stack Effekt sichtbar.

Bei der Renovierung von Gründerzeithäusern wird häufig auf eine Innendämmung zurückgegriffen. Während Ca-Si-Platten keine zusätzliche Dampfbremse benötigen, ist für herkömmliche Mineralwolle eine zusätzliche Dampfbremse notwendig. Diese fungiert dabei auch als luftdichte Schicht. Diese luftdichte Schicht kann entweder mit den luftdichten Schichten von Fußboden und Deckenunterseite verbunden werden oder um die einzelnen Tramköpfe, entlang der Außenwand geführt werden. Der Vorteil der letzteren Variante wird in (WEGERER-17) genauer erläutert. Durch die durchgehende luftdichte Schicht ist eine Entkopplung von Tramkasten- und Tramzwischenraum möglich.

2.2.3 Strömungspfade

Aus den zuvor aufgezählten Leckagen ergeben sich drei verschiedene Strömungspfade.

- ◆ Von innen nach außen
- ◆ Von innen nach innen
- ◆ Von außen nach innen

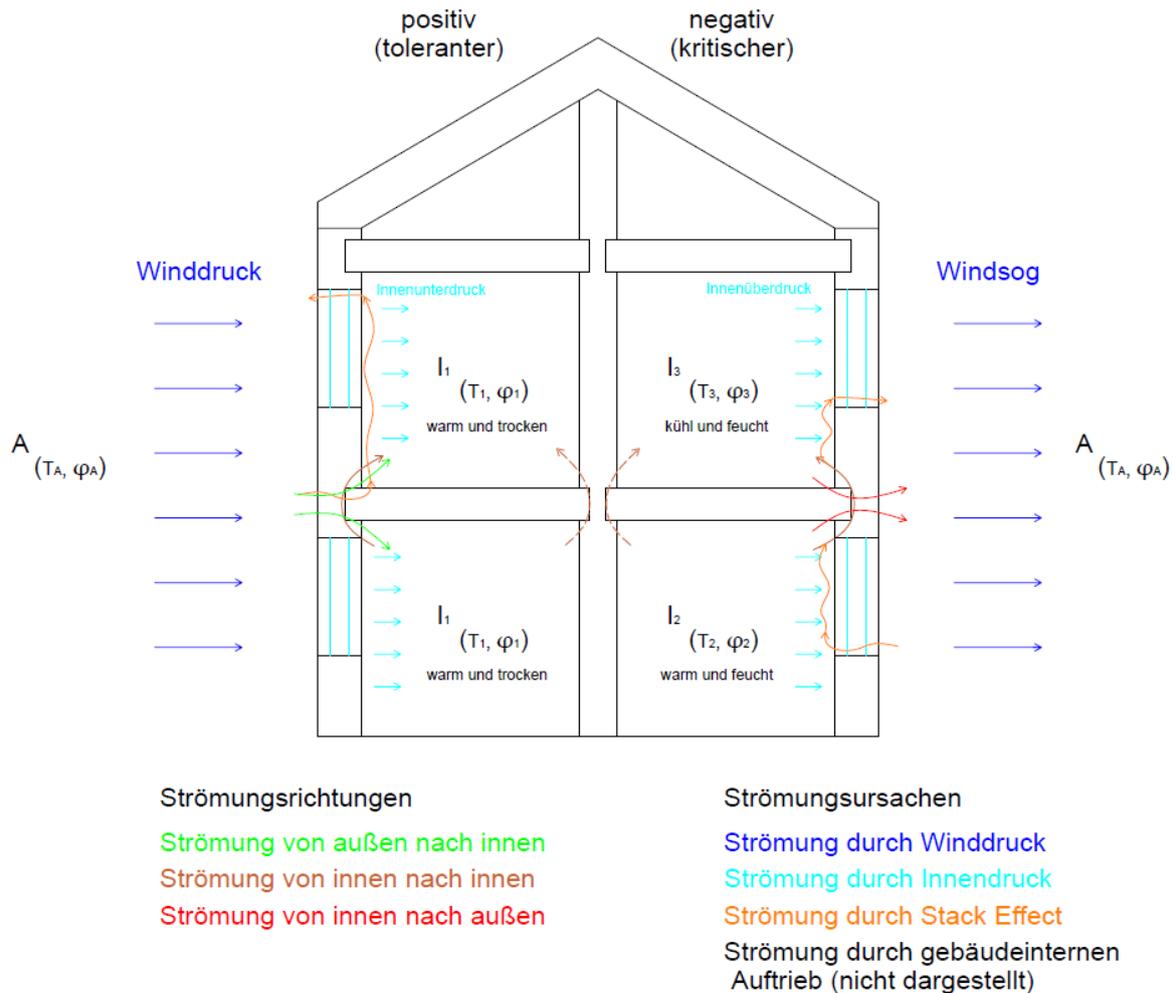


Abb. 2.2.2: Übersicht der möglichen Strömungsursachen und Strömungspfade. Links eine günstige Strömung von außen nach innen bzw. von einem trockenen Innenraum. Rechts ungünstige Strömungen von außen nach innen oder innen nach innen bei feuchtem Innenklima.

Bei einer Strömung von innen nach außen gibt es eine Leckage nach außen im unmittelbaren Bereich des Tramkopfhohlraumes und eine weitere Leckage zu einem der beiden Innenräume. Diese Variante der Strömung wird durch Windsog und Innenüberdruck verstärkt. Damit der Stack Effect wirken kann, ist eine zweite Leckage nach außen notwendig. Diese muss unterhalb der ersten Leckage liegen, beispielsweise bei dem darunterliegenden Fenster (siehe Abb. 2.2.1). Durch die Strömung vom Innenraum in die Konstruktion wird relativ feuchte und warme Luft in die Konstruktion gebracht. Durch die niedrigeren Temperaturen in der Konstruktion herrscht ein niedrigerer Sättigungsdampfdruck. Weshalb die relative Feuchtigkeit zusätzlich noch erhöht wird und eine Kondensation in der Konstruktion möglich wird. Deswegen ist dieser Strömungspfad als kritisch anzusehen.

Der Strömungspfad von innen nach innen besitzt je eine Leckage zu den Innenräumen. Auch bei dieser Variante gelangt feuchte und warme Luft in die Konstruktion. Der Unterschied ist, dass die zweite Leckage jedoch an einem Innenraum angrenzt und sich dort höhere Temperaturen einstellen sollten. Dadurch ist bei dieser Variante mit nicht so hohen Feuchtigkeiten zu rechnen. Bei diesem Strömungspfad wären mögliche Leckagestellen für den Stack Effect Fensteranschlüsse in den beiden Innenräumen. Der Winddruck würde hier nur indirekt angreifen. Um den Winddruck direkt ansetzen zu können wäre ein offenes Fenster im unteren Raum denkbar, wodurch die Luft nach oben gedrückt wird. Bei einem offenen Fenster im Obergeschoß würde Windsog zu einem vergleichbaren Ergebnis führen. Es

ist auch denkbar, dass der Winddruck/-sog, eventuell mit reduzierter Intensität, über eine entsprechend große Leckage ständig wirkt. Auch der Auftrieb, also unterschiedliche Temperaturen in den Innenräumen, kann hier zu einer Durchströmung führen. Dazu muss es jedoch mindestens eine weitere Leckage zwischen den Geschoßen oder zum Treppenhaus geben, wodurch es zu einer gebäudeinternen Zirkulation kommen kann.

Die Letzte angeführte Variante von außen nach innen besitzt die selben Leckagepositionen wie die erste Variante. Jedoch wird hier ein Winddruck mit Innenunterdruck angesetzt. Zusätzlich befindet sich, für den Stack Effect, die zweite Leckage nach außen im darüberliegenden Geschoß. Dadurch wird von außen relativ kühle und trockene Luft in die Konstruktion gedrückt. Gleichzeitig kann die Konstruktion auch über die Leckage nach innen hin austrocknen. Dadurch ergibt sich ein positiver Effekt und es ist mit geringeren Feuchtigkeiten zu rechnen.

Eine vierte, eher theoretische Variante ist eine luftdichte Decke. Dabei bilden sowohl der Deckenputz als auch der Fußbodenbelag eine luftdichte Schicht. Dadurch kommt es nur im Deckenhohlraum zu einer Zirkulation. Ursache dieser Strömung wären die unterschiedlichen Temperaturen im Bereich der Decke, des Bodens und der Außenmauer. Durch Konvektion wird dabei jedoch keine Feuchtigkeit in die Konstruktion getragen. Es erfolgt nur eine Umverteilung der Feuchtigkeit welche in die Konstruktion hineindiffundiert ist, weshalb ebenfalls geringere Feuchtigkeiten zu erwarten sind. Diese Variante ist aber aufgrund der im allgemeinen undichten Randbereiche des Fußbodenbelags nicht als realistisch anzusehen.

In der Realität werden sich kombinierte Variationen der oben beschriebenen Möglichkeiten ausbilden. So kommt es vor allem bei Wind zu einer ständigen Änderung von Druck und Sog. Auch gibt es bei realen Bauwerken wesentlich mehr als nur zwei Leckagen. Dementsprechend kommt es zu wesentlich komplexeren Strömungspfaden über mehrere Räume und auch Geschoße (siehe Abb. 2.2.3).

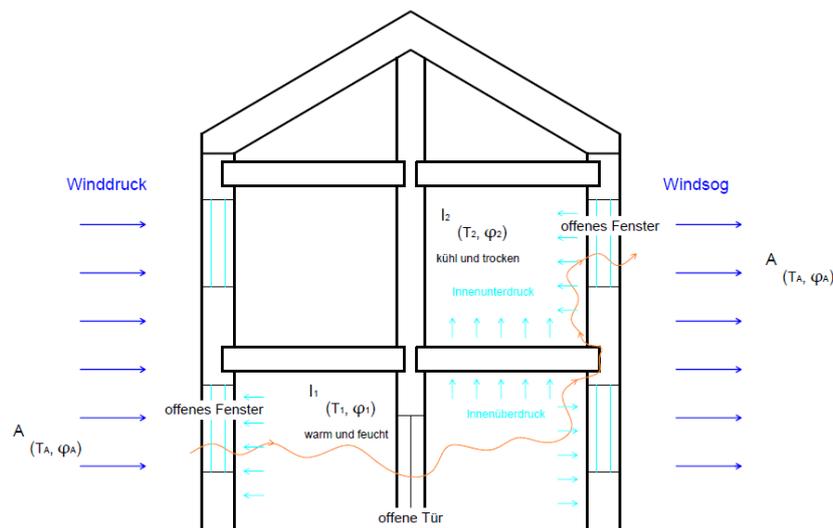


Abb. 2.2.3: Möglicher Verlauf eines Strömungspfad durch ein Gebäude. Eine realistische Luftströmung kann über viele Öffnungen und Leckagen über mehrere Räume und Geschoße führen.

2.2.4 Strömungsgleichung

Die Funktionsgleichung des Luftvolumenstroms (1) kommt unter anderen in der (DIN EN 12114) zur Anwendung. Sie gibt das Luftvolumen an, welches pro Sekunde in oder aus einem System gefördert

wird, bezogen auf einen m^2 einer Fläche. Bei einer luftdichten Konstruktion kommt es zu keinem Luftvolumenstrom. Somit wird hier der Strom durch eine Leckage beschrieben, deshalb wird auch oft die Bezeichnung Leckagestrom verwendet (siehe (DIN EN ISO 9972)). Abhängig ist der Luftvolumenstrom von dem Strömungskoeffizienten, welcher ein Maß für die Größe der Leckage ist, dem Strömungsexponenten, dieser beschreibt die Art und Form der Leckage, und vom Druckunterschied, welcher die Strömungsursache (Kapitel 2.2.1) darstellt. Eine Alternative zum Luftvolumenstrom stellt der Massenstrom dar, dieser beschreibt eine absolute Luftmenge in kg/s . Bei der Umrechnung der beiden Größen ändert sich nur der Strömungskoeffizient, der Strömungsexponent bleibt bei beiden Varianten gleich.

$$\dot{V} = C * p^n \quad (1)$$

\dot{V}	Luftvolumenstrom in $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$
C	Strömungskoeffizient in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s}\text{Pa}^n)$
p	Druckunterschied in Pa
n	Strömungsexponent in -

Der Strömungskoeffizient beschreibt wieviel m^3 Luft bei einem Druckunterschied von einem Pa^n in einer Sekunde durch einen m^2 einer Fläche strömt. Somit beschreibt C die Luftdichtheit eines Bauteils. Deswegen wird der Strömungskoeffizient in (NUSSER-12) zur Einteilung in die Luftdichtheitsklassen nach Nusser und nach Zirkelbach herangezogen. Die unterschiedlichen Werte der beiden Einteilungen ergeben sich aus den jeweiligen Strömungsexponenten, welche unterschiedlich angesetzt wurden.

Der Strömungsexponent beschreibt das Strömungsverhalten und die Form der Leckage. Nach (DIN EN ISO 9972) sind nur Werte zwischen 0,5 und 1,0 zulässig. Der Wert von 0,5 entspricht dabei einer turbulenten Strömung. Charakteristisch für eine solche Strömung wäre nach (Anleitung HAM4D-VIE-15) ein rundes Loch. 1,0 würde einer laminaren Strömung entsprechen, hier kann von einer eher länglichen Leckage ausgegangen werden. Liegt der Strömungsexponent außerhalb dieses Bereichs ist es nach (SOLCHER-13) wahrscheinlich, dass sich der Strömungswiderstand im Lauf der Messung geändert hat. Eine mögliche Ursache für einen kleinen Wert $<0,5$ wäre eine lose Folie, welche durch einen zusätzlichen Überdruck angepresst wird und somit besser abdichtet. Im Gegensatz dazu würde ein Wert >1 zu einem exponentiellen Anstieg der Strömung führen und somit eine Leckage darstellen, welche immer undichter wird je höher der Druckunterschied ist. Ein Beispiel für eine solche Leckage könnte beispielsweise eine Sandschicht sein welche mit steigendem Druck aufgewirbelt wird, vergleichbar mit einem Sandwärmespeicher (BACHINGER-13). In der Praxis sind Werte zwischen 0,6 und 0,8 zu erwarten. Wo bei ein höherer Exponent nach (HALL-13) auch auf eine geringere Anzahl von Leckagen und somit auf eine dichtere Konstruktion schließen lässt.

3 Messung des Luftvolumenstroms

3.1 Ziel - Motivation

Um sinnvolle Simulationen eines Tramkopfdetails durchführen zu können, muss zuvor festgestellt werden ob tatsächlich ein Luftstrom durch den Tramkopf möglich ist und in welcher Größenordnung sich diese Luftströmung befindet. Zur Evaluierung kann diese mit den bekannten Luftdichtheitsklassen aus dem Holzbau verglichen werden. Man erhält dadurch Auskunft ob die grundlegende Notwendigkeit besteht eine Durchströmung zu berücksichtigen oder ob die Luftdurchlässigkeit klein genug ist um eine Durchströmung praktisch ausschließen zu können. Mit den Ergebnissen soll schlussendlich eine realistische Festlegung der Leckagegröße für die Simulation eines Tramkopfdetails ermöglicht werden.

3.2 Methode

3.2.1 Strömungspfad

Der Strömungspfad wurde von einem Raum zum unmittelbar darüberliegenden Raum untersucht. Dieser Luftströmungspfad ist vergleichsweise einfach zu messen und von weniger Faktoren abhängig als alternative Strömungspfade. Beim kritischeren Strömungspfad von innen nach außen wäre eine Messung des Luftvolumenstroms bzw. der CO₂-Konzentration an der Außenseite des Gebäudes sehr aufwendig. Hinzu kommt, dass sowohl Leckagen in der Außenmauer als auch der Strömungspfad über Fugen im Mauerwerk nur schwer zu lokalisieren sind. Die einzelnen Messungen wären auch nur schwer vergleichbar, da hier zwei voneinander unabhängige luftdichte Ebenen auftreten würden (siehe Kapitel 2.2.2).

3.2.2 Messung

Da eine direkte Messung des Volumenstroms nicht möglich ist, wurde der Massenstrom über eine CO₂ Messung ermittelt. Dazu werden zwei übereinanderliegende Räume betrachtet. Der untere Raum wird mit CO₂ geflutet und hat die Funktion einer Quelle. Durch einen im Quellraum erzeugten Überdruck strömt CO₂ in die umliegenden Räume. Im oberen Raum wird an der Außenmauer der Bereich über den Tramköpfen (die Senke) abgedichtet (siehe Abb. 3.3.1). So wird jener Teil des Massenstroms im oberen Raum separiert, welcher um die Tramköpfe strömt oder zumindest in deren unmittelbarer Nähe. In der Senke kann der Anstieg der CO₂-Konzentration gemessen werden und in weiterer Folge kann der Massenstrom berechnet werden. Während einer Messung werden dabei mehrere Überdruckstufen betrachtet und somit wird die Herleitung einer Strömungsfunktion ermöglicht. Um eine weitere Messung durchführen zu können war es notwendig die Senke zu entlüften um die Ausgangskonzentration wiederherzustellen.

Mit den Messungen wurde in den beiden obersten Geschoßen begonnen. An jeden Messtag wurde jeweils ein Geschoß nach unten gewechselt. Dadurch konnte an drei Messtagen verteilt auf einen Zeitraum von einer Woche gemessen werden. Dabei wurden insgesamt acht komplette Messungen aufgezeichnet. Die Zeiträume zwischen den Messungen wurden ebenfalls aufgezeichnet. Die Nummerierung erfolgte dabei chronologisch und umfasst auch die Zwischenzeiten, deshalb ist die Nummerierung der einzelnen Messungen nicht durchgehend. Am 3. Messtag kam es aufgrund eines Stromausfalls zu zusätzlichen Zwischenmessungen.

3.2.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte mittels Microsoft Excel 2016. Ziel der Messungen ist die Erstellung einer Funktion, welche den Luftvolumenstrom in Abhängigkeit vom Druckunterschied beschreibt (siehe (1)). Dazu wurden zuerst für die einzelnen Druckstufen und Sensoren Massenströme ermittelt. Aus den einzelnen Werten für die Sensoren wurde ein Mittelwert je Druckstufe gebildet. Aus diesen kann eine Verlaufsfunktion über die verschiedenen Druckstufen gebildet werden. Bezieht man den Massenstrom auf eine Bezugsfläche, kann man diesen auf einen Luftvolumenstrom umrechnen.

Die Messwerte wurden alle drei Sekunden aufgezeichnet. Aufgrund der Schwankungen der einzelnen Messwerte wurde immer der Mittelwert eines Zeitbereiches ausgewertet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Auswertungszeiträume immer mindestens 4 Minuten betragen. Weiters war es notwendig, dass darauf geachtet wurde, möglichst Bereiche mit konstanter CO₂-Konzentration im Quellraum und einen konstanten Anstieg der CO₂-Konzentration in der Senke zu wählen. Insbesondere musste dabei berücksichtigt werden, dass für die einzelnen Sensoren unterschiedliche optimale Zeiträume auftraten. So kam es vor, dass einige Sensoren vorübergehend einen kurzzeitigen negativen Ausschlag aufzeichneten während die anderen Sensoren einen konstanten Anstieg verzeichneten.

Die Berechnung des Massenstroms für eine Druckstufe ist vom Anstieg der CO₂-Konzentration in der Senke und von der Differenz der CO₂-Konzentration zwischen Quelle und Senke abhängig. Weiters ist der Massenstrom noch von der Dichte der Luft und dem Luftvolumen der Senke abhängig.

$$\dot{M} = \frac{\frac{1}{k} \sum_{t_i}^{t_k} \left(\frac{\dot{K}_{i,Senke}}{\bar{K}_{i,Quelle} - K_{i,Senke}} * V_{Senke} * \rho_{Luft} \right)}{86400} \quad (2)$$

\dot{M}	Massenstrom in kg/s
k	Anzahl der Zeitpunkte
t_i	erster Zeitpunkt
t_k	letzter Zeitpunkt
\dot{K}_{Senke}	Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Senke im Zeitbereich $i \pm 10$ in ppm/d
\bar{K}_{Quelle}	Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Quellraum zum Zeitpunkt i in ppm
K_{Senke}	CO ₂ -Konzentration in der Senke zum Zeitpunkt i in ppm
V_{Senke}	Luftvolumen der Senke in m ³
ρ_{Luft}	Dichte der Luft in kg/m ³

Aus den verschiedenen Massenströmen könnte theoretisch nach (DIN EN 12114) eine Funktion für den Massenstrom erstellt werden. Bei diesen Funktionen würde aber der Strömungsexponent außerhalb der Grenzwerte laut Kapitel 2.2.4 liegen.

Betrachtet man den Verlauf der Messungen genauer, können bei einigen Messungen Unregelmäßigkeiten erkannt werden. Diese äußern sich indem die CO₂-Konzentration zuerst sinkt und erst ab einem höheren Druckunterschied steigt. Eine Erklärung dafür ist, dass in Wirklichkeit nicht der Druckunterschied zwischen Quelle und Senke, sondern der zwischen Quelle und Technikraum gemessen wurde (siehe Kapitel 3.3.2.1). Dadurch blieben einige Faktoren wie Winddruck, Temperaturunterschied und Luftzirkulation innerhalb des Gebäudes unberücksichtigt. Diese Faktoren äußern sich durch einen zusätzlichen negativen oder positiven Druckunterschied zwischen den beiden Geschoßen. Aus diesem

Grund wurde der Druckunterschied p aus (1) um eine Unbekannte ΔP erweitert. Diese berücksichtigt den zusätzlichen Druckunterschied zwischen Technikraum und Senke.

$$\dot{M} = C * (\Delta P + P_g)^n \quad (3)$$

ΔP unbekannter Druckunterschied in Pa

P_g gemessener Druckunterschied in Pa

Die Lösung der Gleichungssysteme mit den drei unbekannt Parametern, C , n und ΔP , liefert kein eindeutiges Ergebnis. Deshalb wurden die Unbekannten händisch bestimmt. Dazu wurden für jede Messung die Massenströme aus der Messung mit errechneten Massenströmen aus Gleichung (3) verglichen. Die drei unbekannt der Gleichung wurden dabei solange variiert bis eine bestmögliche optische Übereinstimmung erzielt werden konnte. Zusätzlich zur optischen Anpassung wurde darauf geachtet, dass die Summe der Abweichungen der zusammengehörigen Massenströme möglichst gering ist. Durch die gleichzeitige Bestimmung von allen drei Unbekannt war es möglich, durch stark unterschiedliche Parameter, zwei Lösungen mit ähnlich geringen Abweichungen zu finden. Um Fehler durch Über- oder Unterschätzung von ΔP zu reduzieren wurde der Verlauf der CO_2 -Konzentration in der Senke berücksichtigt. Im speziellen, wie sich der Verlauf der CO_2 -Konzentration bei 0 Pa entwickelt und ab welcher Druckstufe ein Anstieg der Konzentration erkennbar ist. Bei der Bestimmung von C und n wurden auch die Erläuterungen aus Kapitel 2.2.4 berücksichtigt. Die beiden Parameter wurden auch mit den anderen Messungen des jeweiligen Messtages abgestimmt. Nachträglich wurde die Größenordnung von C und n , nach Bereinigung der Druckunterschiede um ΔP , nach (DIN EN 12114) überprüft (siehe Abbildungen in).

Um eine Funktionsgleichung für den Luftvolumenstrom zu bekommen, muss der Strömungskoeffizient durch die Dichte der Luft und eine Bezugsfläche dividiert werden. Um die Ergebnisse mit den Luftdichtheitsklassen nach (NUSSER-12) vergleichen zu können, wurden die Koeffizienten auf die gesamte Deckenfläche bezogen.

$$C_V = \frac{C_M}{\rho_{Luft} * A} \quad (4)$$

3.3 Versuchsaufbau

3.3.1 Objekt

Die Messungen wurden in einem 4 geschoßigen Gründerzeithaus in der Neilreichgasse 3-5 im 10. Wiener-Bezirk durchgeführt. Während der Messungen war ein Teil des Gebäudes noch bewohnt und in einem anderen Teil fanden Renovierungsarbeiten statt. Im Zuge der Renovierungsarbeiten wurden die Messungen in bereits vollständig ausgeräumten Räumen neben dem Treppenhaus durchgeführt (siehe Abb. 3.3.1). Besagte Räume waren dabei übereinander angeordnet und nach Westen ausgerichtet. Aufgrund der Renovierungsarbeiten waren in den Messräumen keine Türen mehr eingebaut. Die Fenster an der Westfassade waren jedoch noch intakt. Im Bereich des Gangs, welcher direkt an der östlichen Außenmauer angrenzt, waren die Fenster während der gesamten Messzeit in geöffneten Zustand.

Tag 2

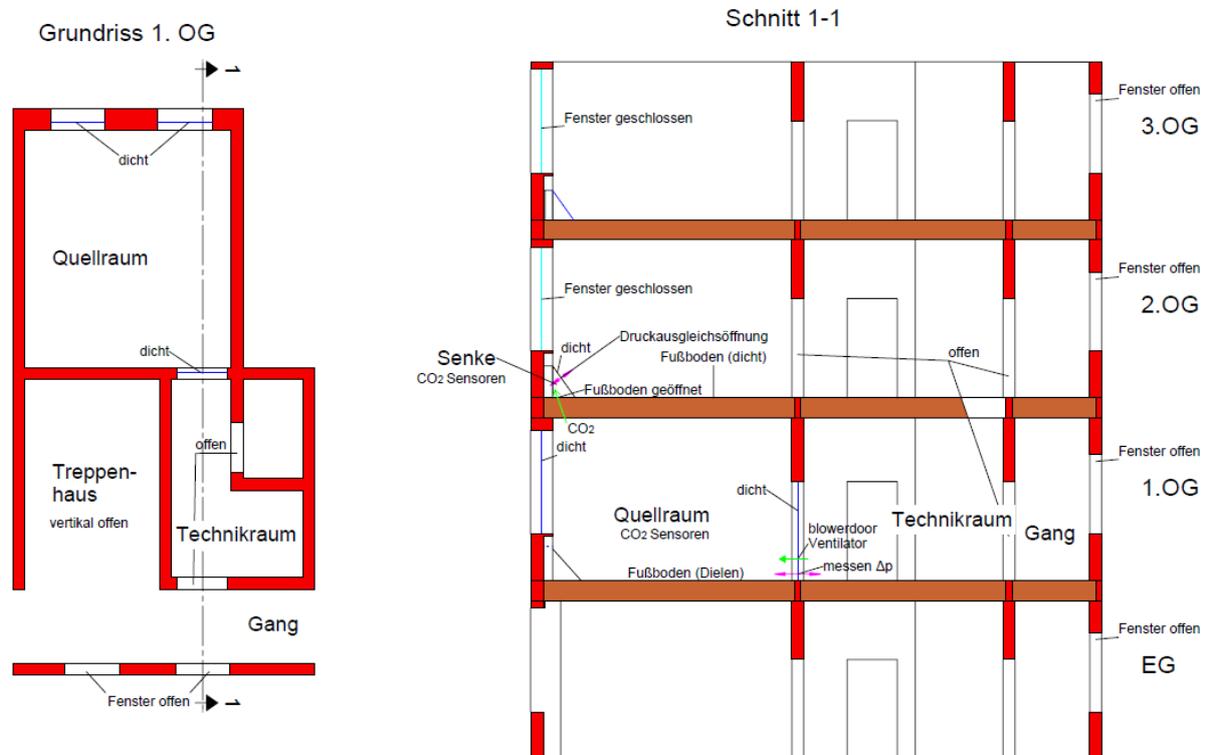
29.5.2017
Messung 05-06

Abb. 3.3.1: Skizze der Räumlichkeiten am Beispiel des zweiten Messtages. Quellraum und Senke sind abgedichtet, bis auf den Ventilator und die Druckausgleichsöffnung. Im restlichen Gebäude ist währenddessen eine ungehinderte Strömung zwischen innen und außen möglich. Die Messung des Druckunterschieds erfolgt zwischen Quellraum und Technikraum.

3.3.2 Räume

Für eine Messung werden 3 unterschiedliche Räume benötigt. In einem Raum befindet sich an der Außenmauer im Bereich der Tramköpfe die Senke. Unter dem Raum mit der Senke befindet sich der Quellraum. Da die Tramdecke zwischen Quellraum und Senke untersucht wird, ist darauf zu achten, dass beide Räume den gleichen Grundriss aufweisen. Der Raum neben dem Quellraum wurde als Technikraum bezeichnet, da von dort die Messungen gesteuert wurden.

Technikraum

Quellraum – unterer Raum

Senke – oberer Raum

3.3.2.1 Technikraum

Im Technikraum befanden sich die Geräte für die Aufzeichnungen sowie die CO₂-Flasche mit zugehöriger Steuerung für die CO₂-Konzentration im Quellraum. Zwischen Technikraum und Quellraum wurde ein Blower-Door-Ventilator eingebaut. Dieser wurde verwendet um den Überdruck im Quellraum zu erzeugen. Der Einfachheit halber und weil die Auswirkungen des Windes auf die Messungen unterschätzt wurden, wurde der Druckunterschied, wie bei einem Blower-Door-Test üblich, zwischen diesen beiden Räumen gemessen.

Dabei wurde angenommen, dass der Druckunterschied zwischen dem oberen und unteren Geschoß etwa 0 ist und somit der gemessene Wert auch die tatsächlichen Druckunterschiede repräsentiert. Die Auswertung der Messergebnisse hat jedoch gezeigt, dass es teilweise doch zu großen zusätzlichen Druckunterschieden kommen kann.

Es wäre bei nachfolgenden Untersuchungen vorteilhaft den direkten Druckunterschied zwischen Quelle und Senke zu messen. Um den tatsächlichen Druckunterschied zwischen Quellraum und Senke messen zu können, könnte eine Leitung durch das Treppenhaus gelegt werden. Problematisch dabei wäre jedoch die Länge der Leitung und die damit verbundenen Verluste. Weiters bestünde die Gefahr einer Beschädigung oder Beeinträchtigung durch den baustellenbedingten erhöhten Personenverkehr im Treppenhaus. Eine direkte Leitung durch die Decke wäre möglich, jedoch müsste zusätzlich zur Abdichtung sichergestellt werden, dass die Schüttung nicht beim Bohren des Lochs ausrinnt. Die sinnvollste Führung der Leitung wäre an der Außenseite der Mauer. Dabei müssten nur Löcher in die Fensterrahmen gebohrt werden.

Um eine Strömung zwischen Senke und oberen Raum ausschließen zu können, wäre es auch notwendig den Druckunterschied zwischen diesen beiden Bereichen zu messen. Dabei sollte auch nur eine Druckausgleichsöffnung vorgesehen werden um eine Luftzirkulation zwischen den beiden Bereichen verhindern zu können.

3.3.2.2 Quellraum

Der Quellraum befindet sich neben dem Technikraum. In diesem Raum wurden alle Öffnungen, wie Türen zu Nebenräumen und gebrochene Fensterscheiben, mit entsprechender Folie und Klebeband abgedichtet. Der Fensterrahmen selbst wurde nicht zusätzlich abgedichtet. Löcher in der Decke, beispielsweise durch eine Aufhängung der Beleuchtung, wurden wiederum vollständig verputzt. Aufgrund des Blower-Door-Ventilators war die Tür zum Technikraum nicht luftdicht. Damit die Auswirkung von Leckagen besser untersucht werden können, wurden nach bestimmten Messungen zusätzliche definierte Leckagen im Bereich der Tramköpfe geschaffen.

Das einströmende CO₂ wurde mittels zweier Ventilatoren im gesamten Raum gleichmäßig verteilt. Um eine gleichmäßige Verteilung überprüfen zu können wurden 3 CO₂-Sensoren im Raum verteilt (siehe Abb. 3.3.2 und Abb. A.1 bis Abb. A.9).



Abb. 3.3.2: Foto des Quellraums vor Messung 01, CO₂-Einblasung durch den blauen Schlauch beim Ventilator, CO₂-Sensoren im Raum hängend.

Es kann nicht festgestellt werden in welche Richtung das CO₂ aus dem Quellraum entweicht. Es wird nur jener Teil gemessen, welcher in die Senke gelangt. Es ist aber genauso möglich, dass ein Großteil des CO₂ in andere Räume oder nach außen strömt. Ohne die angebrachten Abdichtungen wären die Strömungswiderstände nach außen oder in andere Räume der Wohnung wesentlich geringer. Deswegen wäre es möglich, dass es dann überwiegend zu Strömungen in diese Richtungen kommt und eventuell fast kein CO₂ in die Senke transportiert werden würde.

Um in der Praxis die Wärmeverluste gering zu halten würden in einer benutzten Wohnung jedoch dichtere Fenster (zumindest nicht gebrochene Scheiben) und auch eine relativ dichte Wohnungstür eingebaut sein. Für solche Wohnungen, kann angenommen werden, dass in den einzelnen Räumen ähnliche Druckbedingungen herrschen. Eine solche Wohnung wäre durchaus mit dem im Experiment abgedichteten Quellraum vergleichbar. Zusätzliche Leckagen wären dabei vor allem der Notkamin, ein Rauchabzug in der Küche und besagte Wohnungstür. Um die Dichtheit der einzelnen Wohnungseinheit zu beschreiben und ihre Auswirkung auf die Strömung um den Trankopf würde sich der n_{50} -Wert anbieten. Der Zusammenhang müsste allerdings in einer größer angelegten Studie untersucht werden.

3.3.2.3 Senke

Im oberen Raum wurde für die Senke ein liegendes dreiseitiges Prisma mit einer luftdichten Folie und Klebeband abgedichtet und somit vom Rest des Raumes getrennt (siehe Abb. 3.3.3). Die Seitenfläche entsprach dabei einem rechtwinkligen Dreieck mit einer Schenkellänge von etwa einem halben Meter. Aufgrund dieser Höhe wurde eine zusätzliche Abdichtung unter dem Fensterbrett benötigt, eventuelle Undichtheiten beim Fenster, des oberen Raums, haben dadurch keinerlei Auswirkungen auf die Versuche.

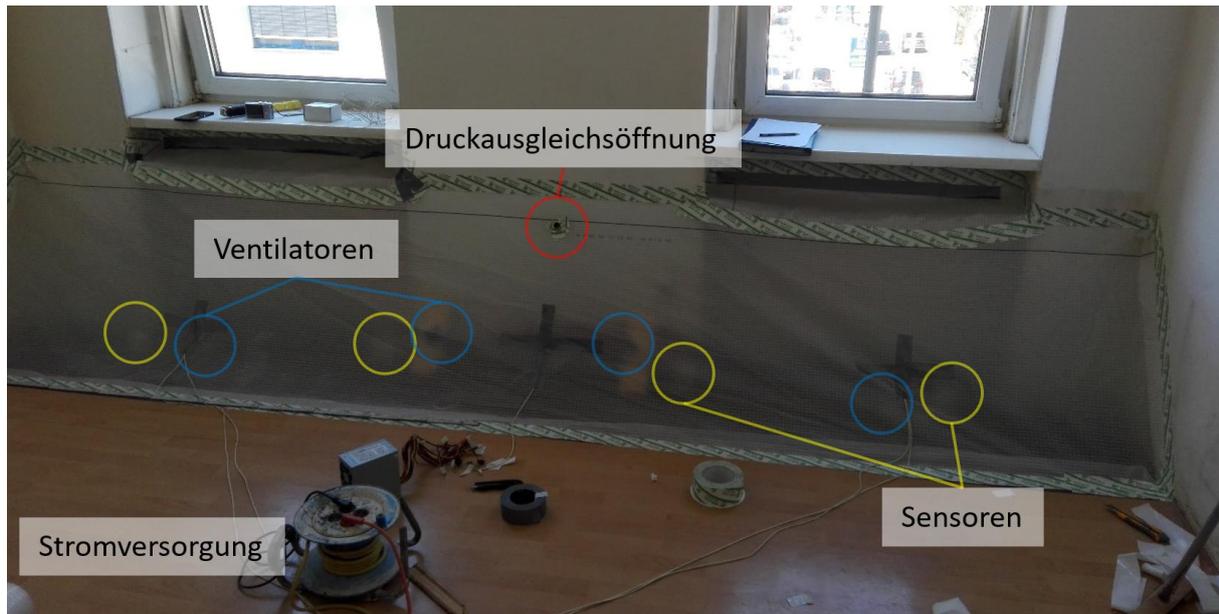


Abb. 3.3.3: Foto der Senke vor Messung 05, mit vier schräg angeordneten Ventilatoren, vier CO₂ Sensoren und einer Druckausgleichsöffnung.

Im Bereich der Senke wurde ein eventuell vorhandener Bodenbelag entfernt. Dadurch sollten zum einen die Strömungswiderstände reduziert werden und zum anderen im Bereich der Senke einheitlichere Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Die CO₂ Messung erfolgte über vier gleichmäßig verteilte CO₂-Sensoren. Da jedoch nicht bekannt war wo das CO₂ in die Senke strömen wird, wäre es möglich, dass ein Sensor genau neben so einer Stelle positioniert wurde und besonders hohe Werte ausgibt, während ein anderer Sensor keinen CO₂-Anstieg misst. Durch den Einbau von Ventilatoren sollte es zu einer Durchmischung kommen. Dadurch ist es wahrscheinlicher, dass die einzelnen Sensoren einheitliche Messwerte liefern und somit weniger Ausreißer in den Messdaten vorkommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass eine möglichst die ganze Senke umfassende Luftzirkulation hervorgerufen wird.

Bei den Ventilatoren handelte es sich um vier einfache PC-Kühler. Für die Stromversorgung diente ein 5 Volt Ausgang eines herkömmlichen PC-Netzteils. Aufgrund von Ausfällen wurde dieses ab der Messung 06 durch einen Adapter mit ebenfalls 5 Volt Ausgangsspannung ersetzt. Durch Umnutzung des Adapters konnten im Quellraum Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit nicht mehr gemessen werden. Diese Informationen waren für die Auswertung jedoch nicht notwendig. Um die Leistung der Ventilatoren zu reduzieren wurden alle vier Ventilatoren an einem 5 Volt-Ausgang angeschlossen. Zusätzlich ist auch noch ein 10 Ohm Widerstand zwischengeschaltet worden.

Um zu verhindern, dass sich in der Senke ein Überdruck einstellt, wurde eine Druckausgleichsöffnung angebracht. Damit es zu keiner Zirkulation mit dem Rest des Raumes kommen kann wurde nur eine Öffnung vorgesehen.

Da im übrigen Raum keine CO₂ Messung erfolgt ist, war es nicht notwendig diesen zusätzlich abzudichten. Aufgrund der Bauarbeiten befanden sich auch keine Türen mehr in den Wohnungen. Um einen Windzug quer durch das Gebäude zu vermeiden blieben die Fenster oberhalb der Senke während der Messungen geschlossen.

Zum Entlüften der Senke mussten die Öffnungen, durch welche die Ventilatoren positioniert wurden, wieder geöffnet werden. Um einen schnelleren Austausch der Luft mit dem umgebenden Raum zu

ermöglichen sind die Ventilatoren, mit Strömungsrichtung nach außen, in diesen Öffnungen platziert worden. Durch geöffnete Fenster oberhalb der Senke und die dadurch hervorgerufenen starken Windsog konnte der Luftwechsel zusätzlich beschleunigt werden. Nachdem die CO₂-Konzentration wieder auf Startniveau abgefallen ist, wurden die Öffnungen wieder abgedichtet.

3.4 Messungen

3.4.1 1. Messtag – Messungen 01, 03 und 04

Am ersten Messtag erfolgte die Messung des Luftvolumenstroms vom 2.OG in das 3. OG. Im 3. OG war ein Teppichboden verlegt, welcher im Bereich der Senke entfernt wurde. Im Bereich der Außenmauer war aufgrund der Bauarbeiten bereits der Putz entfernt worden. Um eine Abdichtung der Senke zu ermöglichen wurde in der Höhe von ca. 60 cm ein Putzstreifen angebracht auf welchem die Folie angeklebt werden konnte. Im Quellraum befand sich ein relativ dichter Laminatboden. Als Fenster waren moderne Einfachfenster mit Isolierverglasung eingebaut, wobei bei diesen teilweise die Dichtung beschädigt war. Besonderes Merkmal dieses Raumes war eine montierte Gardinenleiste oberhalb der Fenster.

3.4.1.1 Messung 01

Zu Beginn der ersten Messung wurde der Versuchsaufbau optimiert. Ursprünglich waren zwei Druckausgleichsöffnungen mit jeweils einem Rohr mit einem Durchmesser von einem $\frac{3}{4}$ Zoll vorgesehen. Bei den Ventilatoren waren nur zwei der vier Ventilatoren im Bereich der Senke platziert (siehe Abb. A.1 und Abb. A.2), die beiden Ventilatoren außerhalb der Senke waren zu Beginn der Messung abgeklemmt. Durch das Hinzuschalten der weiteren Ventilatoren sollte die Leistung der Ventilatoren in der Senke reduziert werden. Zusätzlich wurde auch ein elektrischer Widerstand in der Höhe von 10 Ohm eingebaut. Damit sollte eine zu starke Strömung in der Senke und ein spürbarer Luftstrom nach außen verhindert werden. Da diese Maßnahmen nicht ausreichend waren um eine Strömung aus der Senke zu verhindern, wurden die Druckausgleichsöffnungen verschlossen und eine neue Druckausgleichsöffnung mit einem $\frac{3}{4}$ Zoll in Mitte der Senke geschaffen (vergleiche Abb. A.2 und Abb. A.1). Durch diese Maßnahme konnte die Luftströmung aus der Senke unterbunden werden.

In der nachfolgenden Grafik ist der Messverlauf der CO₂-Messung dargestellt. In blau und grün sind die CO₂-Konzentrationen der jeweiligen Sensoren abgebildet. Die durchgezogenen blauen Linien stellen dabei die Sensoren der Senke dar, wobei der Farbton von links beginnend immer heller wird. Die strichlierten grünen Linien stellen die Messwerte der Sensoren im Quellraum dar. Die punktierte orange Linie zeigt den Druckunterschied zwischen Quellraum und Technikraum, sie zeigt auch die untersuchten Druckstufen, bei Messung 01 wären das 10, 20, 30 und 40 Pa. Dazugehörend stellen die schwarzen horizontalen Linien den jeweiligen Auswertungszeitraum der Druckstufe dar.

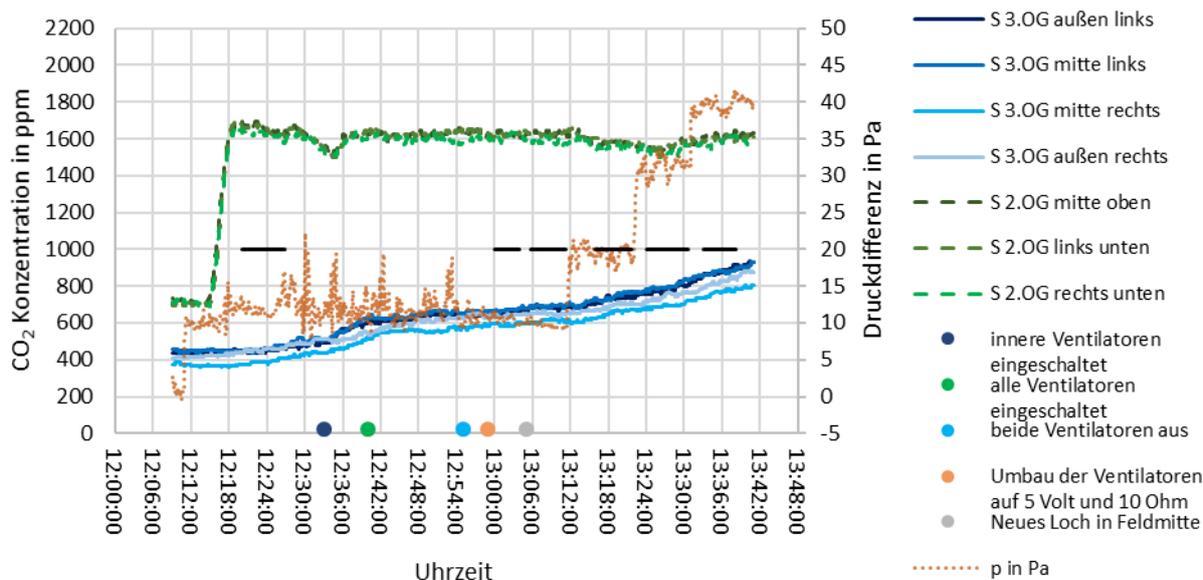


Abb. 3.4.1: Verlauf von Messung 01. Zu Beginn der Messung wurde die Anordnung der Ventilatoren und der Druckausgleichsöffnung optimiert. Für die Auswertungsbereiche (schwarzer Strich) wurden für jede Druckstufe (orange) Stellen mit möglichst konstantem CO_2 Verlauf im Quellraum (grün) und gleichmäßigem Anstieg der Konzentration in der Senke (blau) gewählt.

Zum Zeitpunkt als die Ventilatoren eingeschaltet wurden kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der CO_2 -Konzentration. Nach dem Hinzuschalten der außenliegenden Ventilatoren reduziert sich die Steigerung der Konzentration wieder. Eine mögliche Ursache für den starken Anstieg wäre eine lokale Windböe in Verbindung mit einem kurzen Regenschauer (um 12:34). Wahrscheinlicher aber ist, dass es erst durch das Einschalten des Ventilators zu einer Durchmischung der Luft in der Senke gekommen ist und ab diesem Zeitpunkt die Sensoren einen deutlichen Anstieg der CO_2 -Konzentration aufgezeichnet haben. Nachdem sich das CO_2 gleichmäßig in der Senke verteilt hat, erfolgt der Anstieg der Konzentration wieder langsamer. Die Übereinstimmung mit dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme aller Ventilatoren wäre dabei als Zufall anzusehen.

Tab. 3.1: Parameter für Messung 01

Parameter	Größe
ΔP	-6 Pa
C	$10.0\text{E}-06 \text{ kg/sPa}^n$
n	0.8

Zu Beginn der Messung bleibt die CO_2 -Konzentration annähernd konstant. Betrachtet man den Sensor „mitte rechts“ erkennt man zu Beginn einen leicht negativen Verlauf. Aus diesen Verläufen kann ein geringes negatives ΔP abgeleitet werden. Die optimale Übereinstimmung ergibt sich durch die Wahl der Parameter nach Tab. 3.1, in Abb. A.18 ist die Anpassung der Parameter graphisch dargestellt. Der Strömungsexponent ist dabei relativ hoch und entspricht eher einer laminaren Strömung. Der Grund dafür ist, dass die Befestigungslöcher der Gardinenleisten größtenteils durch Schrauben verschlossen waren und somit eine relativ dichte Konstruktion entstand. Der Strömungskoeffizient ist dabei niedriger als bei den beiden Vergleichsmessungen am selben Tag.

Eine Alternative mit ähnlich niedrigen Abweichungen würde ein ΔP von -10 Pa benötigen. Ein derartiger Druckunterschied ist jedoch nicht aus den Messkurven abzulesen, da ansonsten bei 10 Pa kein

Anstieg der Konzentration sichtbar sein dürfte. Zusätzlich wäre der Strömungsexponent unterhalb des Grenzwertes für turbulente Strömung (0,5) und der Strömungskoeffizient sogar höher als bei den beiden Messungen 03 und 04, welche ein zusätzliches Loch aufweisen.

3.4.1.2 Messung 03

Bei den Messungen 03 und 04 wurde eine zusätzliche Leckage in Form eines Loches mit 10 mm angebracht. Dieses Loch wurde neben der Gardinenleiste, in der Mitte der Außenmauerlänge, in die Deckenuntersicht gebohrt. Um einen Vergleich zwischen eingeschalteten und ausgeschalteten Ventilatoren zu bekommen, wurden die Ventilatoren erst bei 10 Pa Druckdifferenz eingeschaltet. Die restliche Messung erfolgte mit eingeschalteten Ventilatoren. Aufgrund des defekten Netzteils kam es gegen Ende der Messung zu einem Ausfall der Ventilatoren welcher erst bei der Entlüftung der Senke bemerkt wurde.

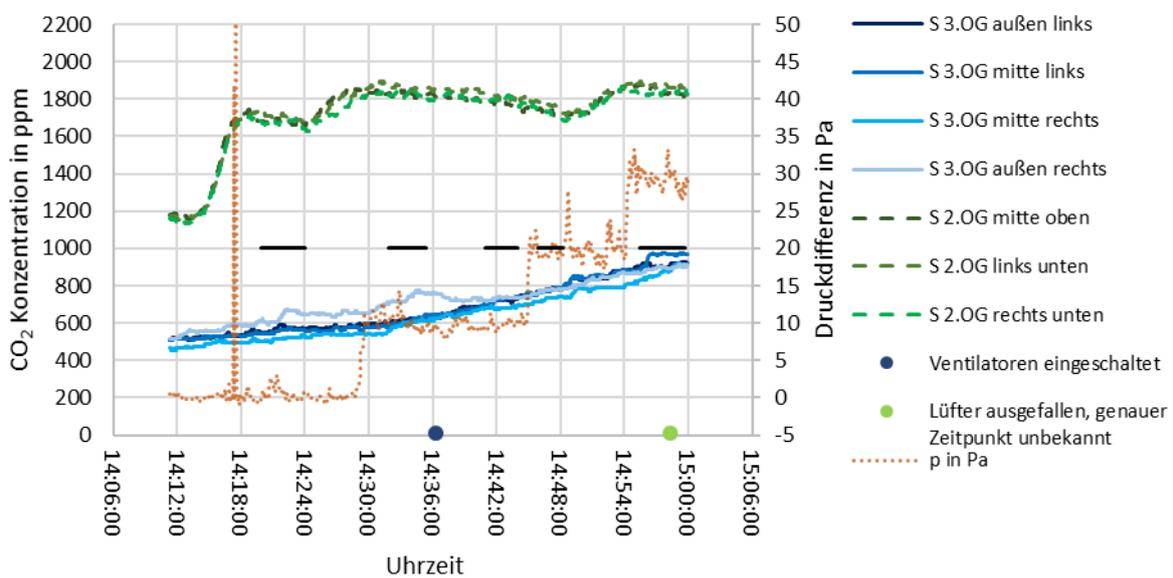


Abb. 3.4.2: Verlauf von Messung 03. Durch Einschalten der Ventilatoren wird das CO₂ gleichmäßiger in der Senke verteilt.

Bei dieser Messung ist die Auswirkung einer Durchmischung in der Senke am deutlichsten erkennbar. Betrachtet man den Verlauf des Sensors außen rechts sieht man, dass dieser stark von den Messwerten der anderen Sensoren abweicht. Erst durch das Einschalten der Ventilatoren kommt es zu einer Durchmischung und einem Ausgleich der Messwerte. Der sprunghafte Anstieg um 14:56 kann darauf zurückgeführt werden, dass die Stromversorgung über das Netzteil aufgrund eines Defekts in unregelmäßigen Abständen ausgefallen ist.

Tab. 3.2: Parameter für Messung 03

Parameter	Größe
ΔP	5 Pa
C	29.0E-06 kg/sPa ⁿ
n	0.55

Es ist bereits bei einem gemessenen Druckunterschied von 0 Pa ein Anstieg der CO₂-Konzentration sichtbar. Damit ist naheliegend, dass ΔP im positiven Bereich liegen muss. Der Strömungsexponent

wird geringer als bei Messung 01 angenommen, da ein zusätzliches rundes Loch eher für ein turbulentes Strömungsverhalten spricht. Der Strömungskoeffizient ist dabei durch das zusätzliche Loch wiederum größer als bei Messung 01.

Eine andere vergleichbare Kombination der Parameter wäre bei einem zusätzlichen Druckunterschied von 0 bis -3 Pa möglich. Dabei würde der Strömungsexponent mit 0,4 jedoch wieder unterhalb des Grenzwertes liegen. Der Strömungskoeffizient wäre dadurch beinahe doppelt so hoch.

3.4.1.3 Messung 04

Der einzige Unterschied zwischen den Messungen 03 und 04 ist, dass bei Messung 04 die Ventilatoren absichtlich ausgeschaltet wurden. Am Ende der Messung wurden bei einer Druckstufe von 40 Pa die Ventilatoren nochmal eingeschaltet, da Messung 03 bei 30 Pa Druckunterschied abgebrochen wurde. Eine direkte Übernahme in die Auswertung von Messung 03 ist aber aufgrund der unterschiedlichen ΔP nicht möglich (vergleiche Abb. A.21).

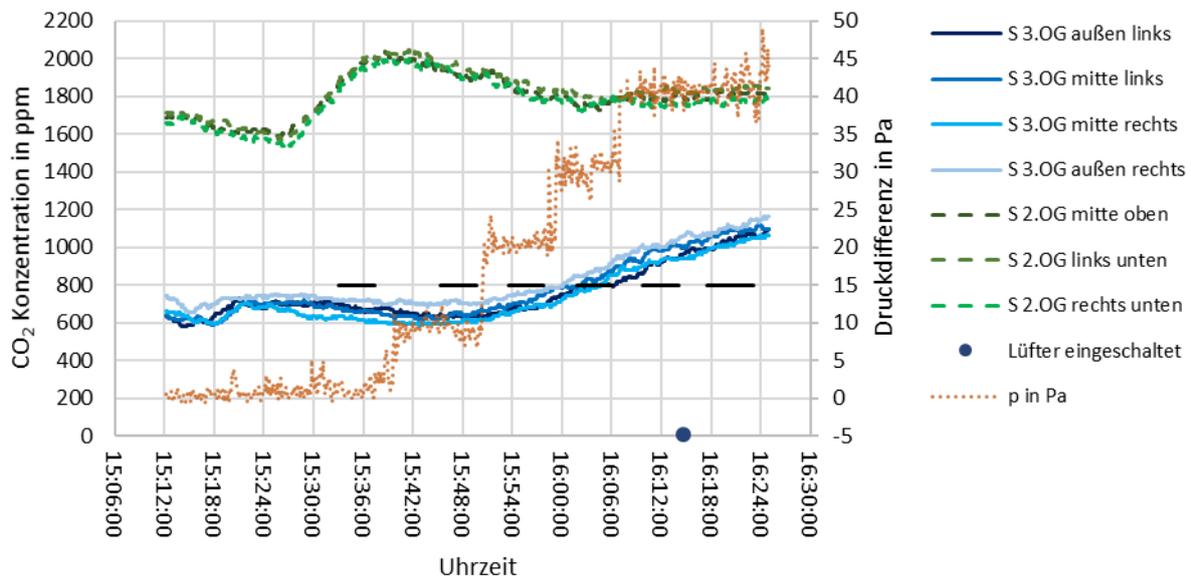


Abb. 3.4.3: Verlauf von Messung 04. Hier ist kein Unterschied zwischen aus- und eingeschalteten Ventilatoren erkennbar.

Der Abfall der CO_2 -Konzentration zu Beginn der Messung kommt noch vom Entlüften der Senke. Nach Verschließen der Öffnungen kommt es zu einem kurzen Anstieg der Konzentration. Die Ventilatoren saugen die Luft in Bodennähe aus der Senke. Nach dem Verschließen der Löcher vermischt sich das Rest- CO_2 mit der übrigen Luft und es kommt zu einem kurzzeitigen Anstieg. Ein ähnlicher Anstieg der Konzentration kann auch in Messung 02 (siehe Abb. A.14) nach dem Entlüften festgestellt werden.

Im Gegensatz zu den Messungen 01 und 03 ist bei dieser Messung der Einfluss der ausgeschalteten Ventilatoren nicht deutlich erkennbar. Um 16:14 werden die Ventilatoren zwar eingeschaltet, jedoch kommt es nur zu einer geringfügigen Reduzierung der Streuung der einzelnen Sensoren. Demnach wäre es möglich, dass es während der Messungen oder durch die Messungen selbst zu einer Änderung des Strömungspfades kommen kann.

Tab. 3.3: Parameter für Messung 04

Parameter	Größe
ΔP	-7 Pa
C	21.0E-06 kg/sPa ⁿ
n	0.65

Bei der Druckstufe mit 0 Pa ist ein Abfall der CO₂-Konzentration sichtbar. Die Konzentration bleibt bei einer Druckstufe von etwa 10 Pa konstant. Daraus lässt sich ein Überdruck in der Senke ableiten und somit ein zusätzliches negatives ΔP von -7 Pa. Da bis auf die ausgeschalteten Ventilatoren die Messungen 03 und 04 übereinstimmen, sind für den Strömungsexponenten und den Strömungskoeffizienten ähnliche Werte wie bei Messung 03 zu erwarten. Bei dem Massenstrom bei 30 Pa handelt es sich wahrscheinlich um einen Ausreißer, deswegen wurde dieser bei der Optimierung der Parameter nicht berücksichtigt (siehe Abb. A.20). Durch die relativ eindeutige Festlegung von ΔP gibt es keine Kombinationsmöglichkeit der Parameter mit einer vergleichbar guten Übereinstimmung. Dadurch können jedenfalls die in Messung 03 bestimmten Parameter bestätigt werden.

3.4.2 2. Messtag – Messungen 05 und 06

An diesem Tag wurde zwischen 1. OG und 2. OG gemessen. Im Bereich der Senke wurde der Laminatboden des 2. OG entfernt. Die Folie der Senke konnte direkt auf die Tapete geklebt werden. Bei diesen Messungen wurden alle vier Ventilatoren eingebaut. Jeweils zwei wurden in Längsrichtung der Senke und je zwei schräg nach oben, von der Mitte in Richtung der Fenster, angeordnet (siehe Abb. A.5, Abb. A.6 und Abb. 3.3.3). Die schräg angeordneten Ventilatoren sollten eine bessere vertikale Durchmischung gewährleisten. Als Druckausgleichsöffnung wurde wieder ein Rohr mit einem $\frac{3}{4}$ Zoll Durchmesser verwendet. Im Quellraum war kein Fußbodenbelag verlegt, es war nur der Blindboden vorhanden. Als Fenster waren Kastenfenster eingebaut. Bei diesen waren an einem Flügel sowohl Glas als auch Dichtung beschädigt. Die Decke hingegen war vollständig verputzt und wies keinerlei Öffnungen auf. Im Vergleich zu den anderen Messungen konnte an diesem Messtag mit relativ geringen Volumenströmen ein hoher Druckunterschied aufgebaut werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass dieser Raum trotz Dielenboden und Kastenfenster relativ dicht war.

3.4.2.1 Messung 05

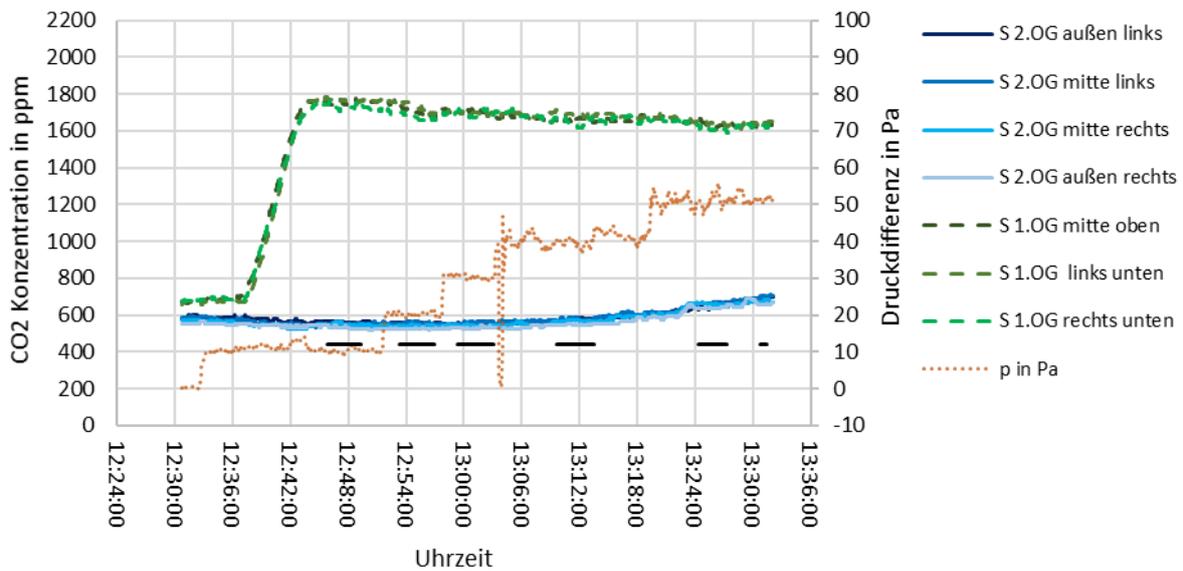


Abb. 3.4.4: Verlauf von Messung 05. Bis zu 20 Pa Druckdifferenz kommt es zu einer Reduktion der CO₂ Konzentration in der Senke.

Betrachtet man den Verlauf dieser Messung erkennt man nur einen geringen Anstieg der CO₂-Konzentration. Es ist gut ersichtlich, dass eine vollverputzte Decke eine gute luftdichte Schicht darstellt.

Tab. 3.4: Parameter für Messung 05

Parameter	Größe
ΔP	-22 Pa
C	2.0E-06 kg/sPa ⁿ
n	1

In der Druckstufe von 10 Pa ist ein Abfall der CO₂-Konzentration festzustellen. Optisch bleibt die Konzentration zwischen 20 und 30 Pa konstant. Betrachtet man zusätzlich die Massenströme der Auswertungspunkte lässt sich erkennen, dass der kleinste Massenstrom bei 20 Pa auftritt und somit ΔP eher bei -20 liegen wird. Da keine sichtbaren Leckagen vorhanden sind wird von einer relativ dichten Konstruktion mit einem hohen Strömungsexponenten ausgegangen. Die Optimierung der Parameter bestätigt einen hohen Strömungsexponenten, wobei dieser aufgrund des in 2.2.4 beschriebenen Grenzwertes mit 1,0 festgelegt wurde. Eine geringfügig bessere Übereinstimmung kann mit einem Strömungsexponenten von 1,9 und einem um eine 10er-Potenz geringeren Strömungskoeffizienten erzielt werden. Ein so hoher Strömungsexponent würde bedeuten, dass der Strömungswiderstand mit steigendem Druckunterschied deutlich abnimmt. Wobei hier anzumerken ist, dass die Abweichungen beider Varianten in Relation zu den anderen Messungen minimalst sind.

3.4.2.2 Messung 06

Während der Messung 05 wurde gezielt auf Ausfälle der Ventilatoren geachtet. Als Ursache konnte das Netzteil bestimmt werden. Deshalb wurde dieses gegen den 5 Volt Adapter der Temperatur und

Luftfeuchtigkeitsmesser ausgetauscht (siehe Abb. A.8). Bei Messung 06 wurden zwischen den Trämen zusätzliche Leckagen mit jeweils 10 mm Durchmesser gebohrt. Der Abstand der Träme wurde nach (GIEBELER-08) und (PECH-06) mit ca. 80 cm angenommen. Aus den daraus ergebenden fünf Bohrungen ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 79 mm² (siehe Abb. A.7).

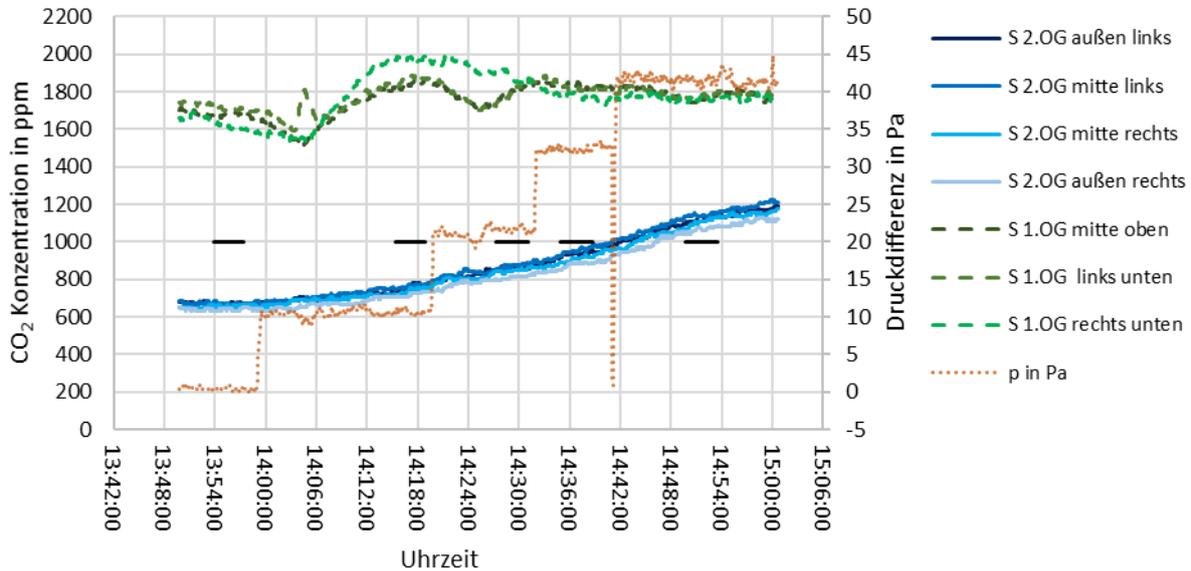


Abb. 3.4.5: Verlauf von Messung 06.

Bei dieser Messung weichen die Sensoren im Quellraum zeitweise stark voneinander ab, zusätzlich weisen einige Zeitbereiche einen starken Anstieg bzw. Abfall der Konzentration auf. In diesen Bereichen ist die Wahl des Auswertungsbereiches besonders kritisch, da bereits kleine Verschiebungen des Bereichs eine relativ große Veränderung des Massenstroms bewirken können.

Tab. 3.5: Parameter für Messung 06

Parameter	Größe
ΔP	0 Pa
C	31.0E-06 kg/sPa ⁿ
n	0.55

In der Druckstufe 0 Pa ist die CO₂-Konzentration nahezu konstant. Je nach Wahl des Auswertungszeitraums ergibt sich ein leicht positiver oder negativer Massenstrom. Aufgrund dessen wurde der zusätzliche Druckunterschied mit 0 Pa festgelegt. Für die beiden übrigen Parameter sind relativ gute Näherungen sowohl mit niedrigem als auch hohem Strömungskoeffizienten möglich. Aufgrund der fünf zusätzlichen, runden Leckagen wurde ein eher niedriger Strömungsexponent gewählt. Die bestimmten Parameter wurden auch mit einer Exponentialfunktion, welche nach (DIN EN 12114) ermittelt wurde, überprüft (siehe Abb. A.23). Eine mögliche Erklärung weshalb bei dieser Messung besonders hohe Abweichungen bei den Sensorwerten im Quellraum und auch im Vergleich der Exponentialfunktion mit den Messergebnissen auftraten, findet sich im Wetter dieses Zeitraumes. Dieses weist während der Messung zahlreiche Änderungen der Windrichtung auf, welche durch die Messdaten aus (BOKU-Met) bestätigt werden. Die Änderungen können sich sowohl auf die Durchmischung des Quellraums als auch

auf die Größe und Richtung von ΔP ausgewirkt haben. So kann eine bessere Übereinstimmung erzielt werden, wenn ΔP ab der Druckstufe von 20 Pa um zusätzlich 10 Pa reduziert wird.

3.4.3 3. Messtag – Messungen 08, 11 und 12

Am letzten Messtag wurde zwischen EG und 1.OG gemessen. Im 1. Obergeschoß war wie zuvor beschrieben nur der Blindboden verlegt, welcher keinerlei abdichtende Eigenschaften aufwies. Ansonsten wurde die Senke wie bereits am 2. Tag aufgebaut. Im Quellraum war eine abgehängte Decke montiert. Vom Bereich der Tramaufleger wurde diese etwa eineinhalb Meter in den Raum hinein entfernt. Der Deckenputz selbst war von den Aufhängungen und weiteren Durchlässen für Kabel regelrecht durchlöchert (siehe Abb. A.13). Ein Abdichten der Konstruktion wäre praktisch unmöglich gewesen. Als Fenster waren im Erdgeschoß wieder Kastenfenster eingebaut, wobei bei einem der Flügel ein Teil des Glases ausgebrochen war und abgedichtet werden musste.

Durch den Umstand, dass aufgrund der Bauarbeiten in den Obergeschoßen am Gang die Fenster geöffnet waren und aufgrund von starken Windverhältnissen kam es an diesem Tag zu besonders starken Durchzugerscheinungen im Gebäude. Bereits beim Abdichten der Senke stellte sich in dieser ohne Druckausgleichsöffnung ein signifikanter Überdruck ein (wie bei Abb. A.10). Dieser konnte jedoch durch die Druckausgleichsöffnung mit einem 1" Rohr (2,9 cm²) ausgeglichen werden.

3.4.3.1 Messung 08

Trotz der Druckausgleichsöffnung blähte sich bei Messung 08, bei etwa 10 Pa Druckunterschied, die Folie wieder auf (siehe Abb. A.10). Um den entstehenden Überdruck und den damit einhergehenden zusätzlichen Strömungswiderstand zu umgehen, wurden gegen Ende der Messung, zwei zusätzliche größere Druckausgleichsöffnungen geschaffen (siehe Abb. A.9 und Abb. A.11). Diese Öffnungen wiesen dabei eine Gesamtfläche von 84 cm² auf.

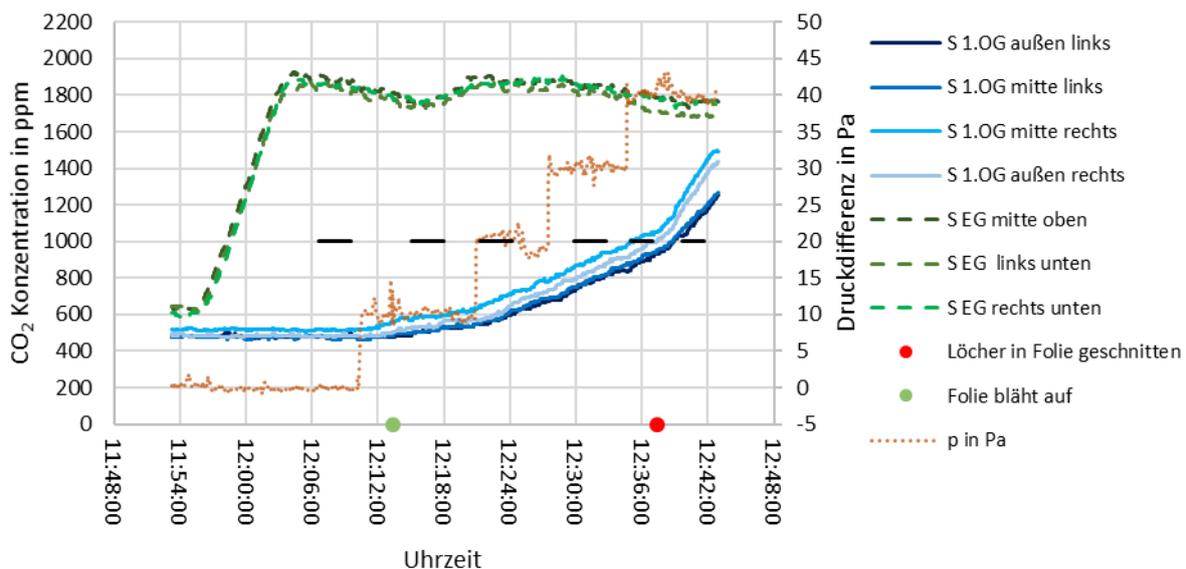


Abb. 3.4.6: Verlauf von Messung 08. Durch zusätzliche Löcher (Druckausgleichsöffnungen) kann der Überdruck in der Senke entweichen und es kommt bei gleicher Druckstufe zu einer deutlichen Erhöhung des Anstiegs.

Trotz des Überdruckes in der Senke kommt es zu keiner Abnahme der CO₂-Konzentration. Demnach ist der Überdruck stets kleiner als der im Quellraum aufgebrachte Druckunterschied und es bildet sich nur ein erhöhter Widerstand gegen die Durchströmung der Decke aus. Da sich der Überdruck erst wieder mit 10 Pa einstellt ist davon auszugehen, dass der Überdruck in der Senke mit höheren Druckunterschied in der Quelle steigt. Daraus lassen sich allerdings keine Rückschlüsse auf die Größe von ΔP ziehen, außer dass eine Zunahme im Laufe der Messung wahrscheinlich ist.

Am Verlauf der Messung ist deutlich erkennbar wie sich der Überdruck in der Senke auf den CO₂-Anstieg auswirkt. Unmittelbar nachdem die beiden zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen angebracht wurden kommt es zu einem signifikanten Anstieg der CO₂-Konzentration. So steigert sich der Massenstrom von 0,9 auf 3,8 g/s. Wobei die Genauigkeit der Berechnung durch die immer geringer werdende Differenz zwischen Quellkonzentration und Senkenkonzentration abnimmt. Auffallend ist auch, dass nach Aufbringen der zweiten großen Druckausgleichsöffnung, um 12:39, die rechten und linken Sensoren stark unterschiedliche Konzentrationen gemessen haben. Eine Ursache dafür ist, dass der Dielemboden auf der rechten Seite der Senke größere Spalten aufwies und somit einen geringeren Widerstand gegen die Luftströmung aufwies (siehe Abb. A.12). Dies ist auch in geringerem Ausmaß bereits vorher erkennbar, wird jedoch durch die Luftzirkulation in der Senke, aufgrund der Ventilatoren, wieder aufgehoben. Was zur zweiten Ursache führt nämlich, dass es durch die zwei zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen zu einer Strömung zwischen Senke und oberen Raum kommt. Dadurch werden die Ventilatoren umgangen und es kommt zu einer schlechteren Durchmischung in der Senke und zu den stark unterschiedlichen Messwerten.

Aufgrund der Ausbildung eines Überdruckes in der Senke ist diese Messung nicht repräsentativ für eine abgehängte Decke. Der Vollständigkeit halber und zum Vergleich erfolgt dennoch eine Einteilung in die Luftdichtheitsklassen und eine Gegenüberstellung mit den anderen Messungen in den folgenden Kapiteln.

3.4.3.2 Messung 11

Die Messungen 11 und 12 wurden mit besagten größeren Druckausgleichsöffnungen durchgeführt, ansonsten wurden beide Messungen unter den gleichen Bedingungen wie Messung 08 durchgeführt. Aufgrund des relativ schnellen Anstiegs der CO₂-Konzentration musste die Zeitspanne, in der die Druckstufe gehalten wurde, reduziert werden. Deswegen sind bei den Messungen 11 und 12 auch die Auswertungszeiträume nur etwa 2,5 Minuten lang.

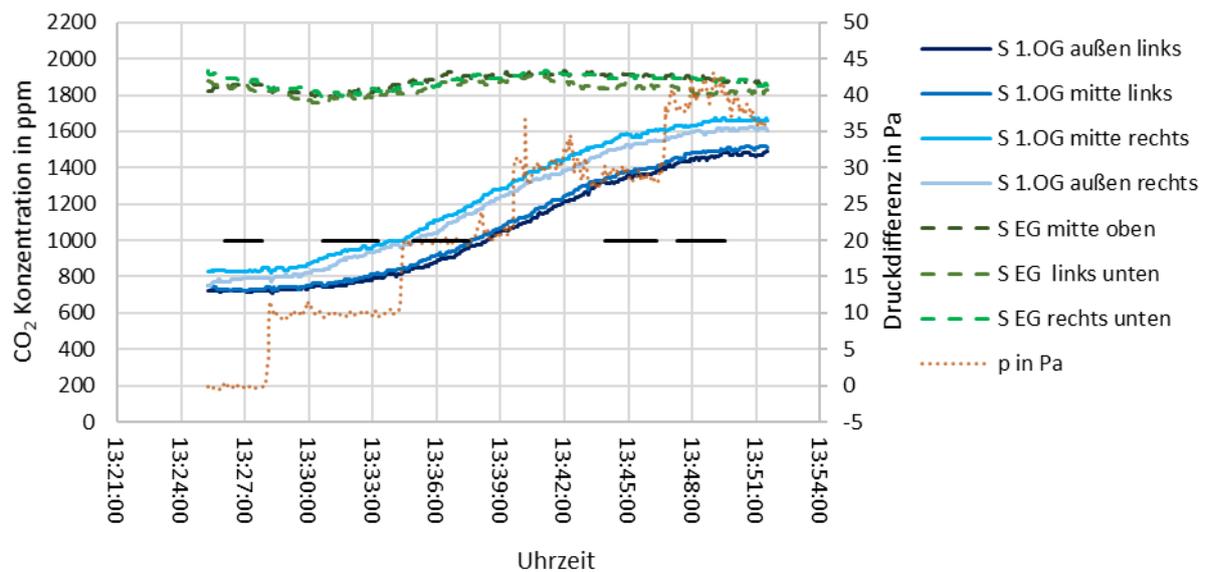


Abb. 3.4.7 Verlauf von Messung 11. Die großen Unterschiede zwischen linken und rechten Sensoren in der Senke sind auf die zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen zurückzuführen.

Auffällig ist, dass der Knick welcher durch eine Steigerung des Massenstroms entsteht bei dem Sprung von 0 auf 10 Pa zeitlich versetzt auftritt, während bei den anderen Sprüngen der Druckstufen dieser unmittelbar erfolgt.

Gegen Ende der Messung, bei der Druckstufe von 40 Pa weisen Senke und Quellraum beinahe eine gleiche CO_2 -Konzentration auf. Der Massenstrom kann deswegen nur mit einer geringen Genauigkeit berechnet werden. Dies wird sichtbar sobald man den Verlauf der berechneten Massenströme aus der Messung mit den Massenströmen aus den bestimmten Parametern vergleicht (Abb. A.25).

Tab. 3.6: Parameter für Messung 11

Parameter	Größe
ΔP	0 Pa
C	$230.0\text{E-}06 \text{ kg/sPa}^n$
n	0.6

Durch die bei Messung 08 beschriebene Strömung zwischen Senke und oberem Raum ist es möglich, dass CO_2 aus der Senke, an den Sensoren vorbei, hinausgezogen wird. Die Sensoren würden somit nicht die gesamte Menge an CO_2 registrieren können, wodurch es zu einer Unterschätzung der CO_2 -Konzentration in der Senke kommen würde. Es ist also möglich, dass die tatsächlichen Massenströme noch höher als in den Berechnungen liegen.

Hinzu kommen die hohen Windbeanspruchungen und der Überdruck in der Senke gegenüber dem oberen Raum. Durch diese ist eine zusätzliche Sogbeanspruchung mit hohem ΔP wahrscheinlich. Betrachtet man jedoch den Verlauf der Messung bei 0 Pa und den Verlauf der Zwischenmessungen kommt es dort zu keinem nennenswerten Anstieg der Konzentration. Demnach würden die hohen Massenströme vorrangig aus der abgehängten Decke resultieren. Entweder wird das durch den Windsog zusätzlich strömende CO_2 direkt an den Sensoren in den oberen Raum gesogen oder der zusätzliche Druckunterschied aus dem Windsog stellt sich nur zwischen Senke und oberem Raum ein und hat tatsächlich keine Auswirkungen auf den Massenstrom zwischen den Geschoßen.

Aufgrund der obigen Erläuterungen wurde ΔP mit 0 Pa festgelegt. Aus dem Verlauf der berechneten Massenströme geht eindeutig ein niedriger Strömungsexponent hervor. Dieser spricht auch für die zahlreichen Bohrungen welche an der Deckenunterseite zur Montage der abgehängten Decke vorhanden waren. Bei der Annahme eines ΔP von 20 Pa können vergleichbar geringe Abweichungen nur unter Vernachlässigung der Massenströme bei 0 Pa und 40 Pa erreicht werden.

3.4.3.3 Messung 12

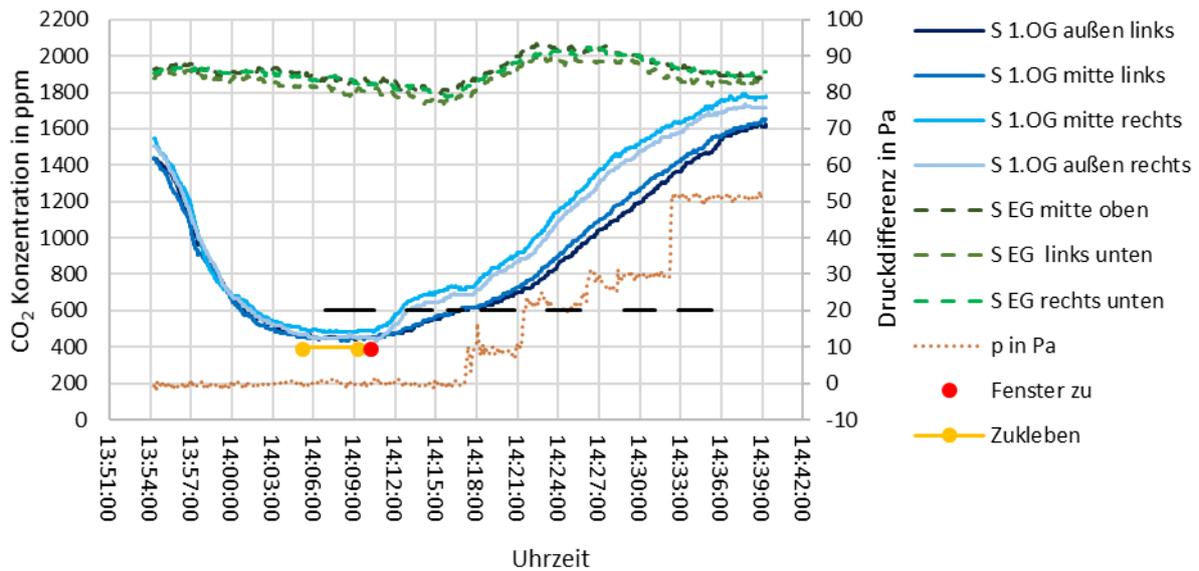


Abb. 3.4.8: Verlauf von Messung 12. Bei den hohen Druckdifferenzen führen die geringen Differenzen der CO_2 Konzentration in Senke und Quelle zu höheren Ungenauigkeiten bei den berechneten Massenströmen.

Auffallend bei dieser Messung ist der schnelle und hohe Anstieg der CO_2 -Konzentration direkt nach dem Entlüften der Konstruktion. Dabei dürfte es sich um den gleichen Effekt wie bei Messung 04 handeln nur das dieser wesentlich stärker ausgeprägt ist. Grund für die hohe Intensität dürfte die besonders undichte Decke und die lokale Windbeanspruchung sein.

Bei der Zwischenmessung 09 kommt es zu einem gleichhohen Anstieg der CO_2 -Konzentration jedoch auf einen Zeitraum von etwa 15 Minuten (siehe Abb. A.16). Wobei die Konzentration für etwa 6 Minuten auf der halben Höhe konstant bleibt. Daraus ist erkennbar, dass es aufgrund des Windsogs zu einem zusätzlichen Luftstrom zwischen Quellraum und Senke gekommen ist, dieser jedoch zeitlich begrenzt war.

Tab. 3.7: Parameter für Messung 12

Parameter	Größe
ΔP	2 Pa
C	$280.0\text{E}-06 \text{ kg/sPa}^n$
n	0.6

Für die Wahl der Parameter wurden die gleichen Überlegungen und Annahmen wie bei Messung 11 getroffen. Zusätzlich wurden die beiden Massenströme, welche während bzw. direkt nach dem Entlüften berechnet wurden, nicht für die Wahl der Parameter miteinbezogen.

Wird bei dieser Messung der Massenstrom bei 0 Pa durch den Massenstrom direkt nach dem Entlüften ersetzt, kann eine ähnlich gute Anpassung mit einem ΔP von 15 Pa und einem n von 1,1 erreicht werden. Gegen diese Wahl der Parameter spricht aber, dass der Strömungsexponent außerhalb des Grenzwertes liegt und dass der Strömungskoeffizient etwa genauso groß wäre wie jener bei Messung 06, also mit nur 5 Löchern in der Decke.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Vergleich des Massenstroms

Für den Vergleich der Verlaufsfunktionen wurden mittels der zuvor bestimmten Parameter die Massenströme bzw. Volumenströme für bestimmte Druckunterschiede berechnet. Für die Messungen 03 und 04 sowie 11 und 12 wurde auch jeweils eine Parametervariante untersucht, welche für die berechneten Massenströme aus beiden Messungen optimiert wurde.

Tab. 3.8 Auflistung der bestimmten Parameter für die jeweilige Messung

Variable	Einheit	01	03	04	03/04
Änderung		Gardinenleiste	1 Loch	ohne Ventilatoren	
ΔP	Pa	-6	5	-7	-
C	kg/sPa ⁿ	10.0 E-06	29.0 E-06	21.0 E-06	25.0 E-06
n	-	0.8	0.55	0.65	0.6

05	06	08	11	12	11/12
Sauber verputzt	5 Löcher	Abgehängte Decke	größere Druckausgleichsöffnungen		
-22	0	0.5	0	2	-
2.0 E-06	31.0 E-06	31.0 E-06	230.0 E-06	280.0 E-06	250.0 E-06
1	0.55	0.9	0.6	0.6	0.6

Vergleicht man die gewählten ΔP miteinander fällt auf, dass diese auch bei Messungen an einem Tag stark unterschiedlich sein können. Es ist deswegen anzunehmen, dass sich der jeweilige Druckunterschied auch während der einzelnen Messungen stark verändern kann. Diese Veränderung kann aber nur über eine direkte Messung sinnvoll abgebildet werden. Der Höchstwert der zusätzlichen Druckdifferenz tritt bei Messung 05 auf und liegt bei 22 Pa. Unter der Annahme, dass ΔP vorrangig aus Windkräften hervorgerufen wird, handelt es sich dabei um plausible Werte (siehe Kapitel 4.4).

Durch ein zusätzliches Loch in der Deckenuntersicht steigt der Strömungskoeffizient von Messung 01 auf über das Doppelte an. In Abb. 3.5.2 ist ersichtlich, dass diese Steigerung durch die gleichzeitige Reduzierung des Strömungsexponenten teilweise kompensiert wird. Eine Steigerung tritt auch infolge der 5 Löcher bei Messung 06 auf, dieses Mal jedoch um das 10-fache. Aufgrund der deutlichen Auswirkungen dieser Löcher wird bestätigt, dass vorrangig die Deckenuntersicht für die Luftdichtheit zwischen den beiden Geschoßen verantwortlich ist. Demzufolge spielt der Aufbau im Inneren der Decke nur eine untergeordnete Rolle für die Frage ob eine Durchströmung stattfindet. Von Bedeutung könnte aber auch ein dichter Fußbodenbelag sein, sofern dieser an den Randbereichen dicht ausgeführt wurde, dies ist in der Regel aber nicht der Fall.

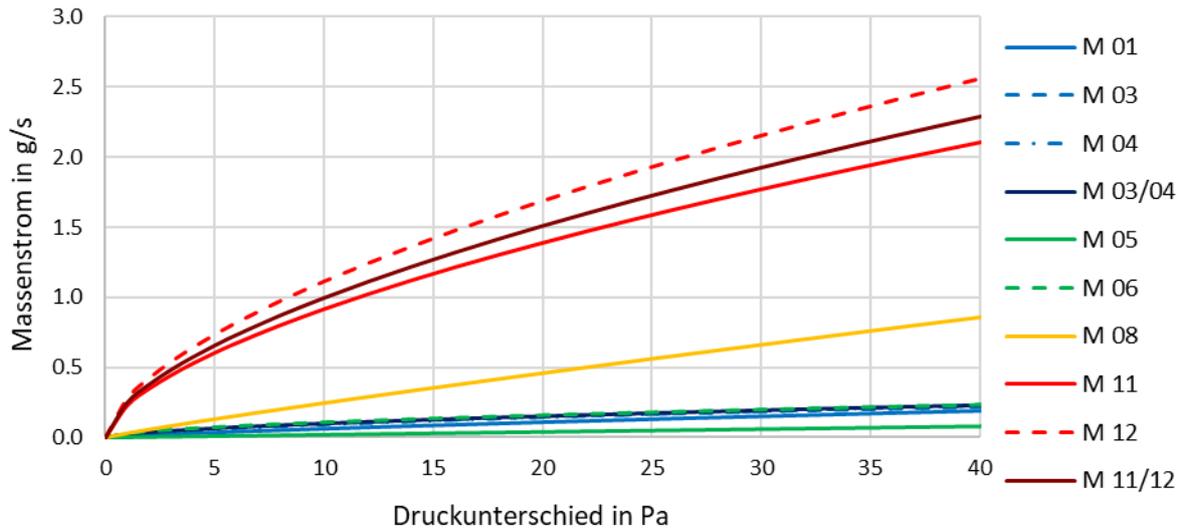


Abb. 3.5.1: Vergleich der Massenstromfunktionen mit abgehängter Decke (rot/orange). Die Strömungskoeffizienten der Varianten mit abgehängter Decke sind im Vergleich zu den übrigen Messungen um Größenordnung höher. M 08 zeigt den reduzierten Massenstrom einer zu klein dimensionierten Druckausgleichsöffnung und eines dadurch entstehenden Überdruckes in der Senke.

Durch den Verlauf von Messung 08 ist erkennbar wie stark sich ein erhöhter Druckwiderstand innerhalb der Senke auswirken kann. Trotz dieses erhöhten Strömungswiderstandes kommt es zu deutlich höheren Massenströmen als bei den davor durchgeführten Messungen. In Abb. 3.5.1 wird auch sichtbar, dass die Strömungskoeffizienten der Messungen mit der abgehängten Decke eine Größenordnung höher sind als bei den übrigen Messungen. Die Messungen 11 und 12 weisen bei niedrigen Druckunterschieden einen fast identischen Verlauf auf, erst bei hohen Druckunterschieden wird der unterschiedliche Strömungskoeffizient deutlich.

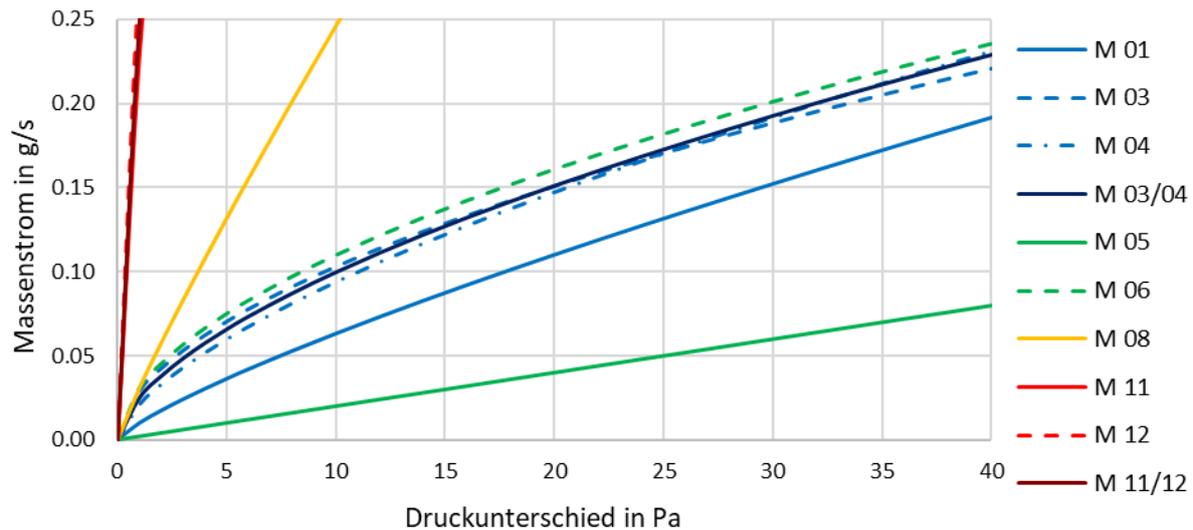


Abb. 3.5.2: Vergleich der Massenstromfunktionen mit verputzter Unterdecke. Bei der sauber verputzten Decke (M 05) kommt es durch den hohen Strömungsexponenten von 1, trotz des um eine Größenordnung kleineren Strömungskoeffizienten, zu einem starken Anstieg des Massenstrom bei hohen Druckunterschieden. Durch fünf zusätzliche Löcher in der Decke (M 06) werden vergleichbare Massenströme wie mit einer Gardinenleiste und einem Loch (M 03 und M 04) erreicht. Zwischen den Messungen mit (M 03) und ohne (M 04) Ventilator sind keine charakteristischen Unterschiede festzustellen.

Vergleicht man nun die Messungen der ersten zwei Messtage miteinander, erkennt man, dass bei Messung 05 mit Abstand die geringsten Strömungen auftreten. Eine Gardinenleiste führt bereits zu einer deutlichen Steigerung. Die Messungen von Gardinenleiste mit einem zusätzlichen Loch und der Messung mit 5 Löchern führt fast zu demselben Massenstrom. Für eine Gardinenleiste könnte somit als Richtwert eine Decke mit 3-4 Löchern angesetzt werden. Bei einem Lochdurchmesser von 10 mm, entspricht das einer Gesamtleckagegröße von 2,4-3,1 cm². Die Kombination aus Messung 03 und 04 folgt zuerst Messung 03 und nähert sich immer mehr Messung 04 an, sie liegt somit immer näher am höheren Wert der beiden Messungen.

In der Abb. 3.5.2 erkennt man die Unterschiede der Strömungsexponenten deutlich. Der Strömungsexponent ist bei den originalen Deckenuntersichten (01 und 05) vergleichsweise hoch. Das spricht für eine relativ dichte Konstruktion. Bei Messung 05 entspricht der Verlauf einer geraden Linie während die Messung 01 bereits leicht gekrümmt ist. Durch zusätzliche runde Bohrungen in der Deckenunterschicht reduziert sich der Strömungsexponent auf einen Wert von etwa 0,6. Hier sind vor allem bei niedrigen Drücken starke Krümmungen erkennbar. Auch bei der undichten abgehängten Decke beträgt der Strömungsexponent 0,6. Dadurch kann die Tendenz aus (HALL-13), dass dichtere Konstruktionen, mit weniger und kleineren Leckagen, höhere Strömungsexponenten aufweisen bestätigt werden. Jedoch zeigen die Ergebnisse auch, dass diese Erkenntnis nur auf die dichteren Konstruktionen (01 und 05) angewendet werden kann. Bei undichteren Konstruktionen bleibt der Strömungsexponent um 0,6.

3.5.2 Vergleich des Volumenstroms mit Nusser/Zirkelbach

3.5.2.1 Bezogen auf die ganze Deckenfläche

In seiner Arbeit (NUSSER-12) beschreibt Nusser den Einfluss einer Luftströmung auf die Dauerhaftigkeit eines flach geneigten Holzdaches. Als Indikator für die Luftdichtheit der Konstruktion führt er dabei die Luftdichtheitsklassen ein. Diese sind an die Luftdichtheitsklassen nach Zirkelbach angelehnt,

berücksichtigen aber einen Strömungskoeffizienten. Damit entsprechen sie dem Verlauf der Messkurven bei höheren Druckunterschieden besser. In ihren Arbeiten beziehen die Autoren dabei den Volumenstrom auf die innenliegende luftdichte Schicht der Dachkonstruktion. Damit die durchgeführten Messungen mit der Literatur verglichen werden können, wurde der Volumenstrom auf die Deckenunterseite des unteren Raumes (ca. 19,5m²) bezogen.

Tab. 3.9 Kriterien der Luftdichtheitsklassen nach Nusser und Zirkelbach

Klasse	Nusser A+	Nusser A	Nusser B	Nusser C	ZB A	ZB B	ZB C
C m ³ /(m ² sPa ⁿ)	5.0E-07	1.0E-06	2.0E-06	4.0E-06	3.9E-07	1.1E-06	1.9E-06
n	0.66	0.66	0.66	0.66	1	1	1

Die Luftdichtheitsklassen nach Zirkelbach weisen aufgrund ihres Strömungsexponenten von eins einen geraden Funktionsverlauf auf. Dadurch besitzen sie bei geringen Druckunterschieden geringere Volumenströme als die Messungen mit zusätzlichen Leckagen und bei höheren Druckunterschieden wiederum höhere Volumenströme. Dieses Verhalten wird in Abb. 3.5.3 besonders gut bei der Luftdichtheitsklasse A nach Zirkelbach sichtbar. Im Vergleich dazu erkennt man, dass die Luftdichtheitsklassen nach Nusser mit den Verläufen der Messungen bei höheren Drücken besser übereinstimmen. Bei hohen Druckunterschieden kommt es jedoch genauso zu Abweichungen. Diese Abweichungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Strömungskoeffizienten und -exponenten der Messungen und Luftdichtheitsklassen.

Die ausschließliche Betrachtung des Strömungskoeffizienten zur Beurteilung der Luftdichtheit der Konstruktion wäre demnach falsch. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob die hohen Winddrücke anzusetzen sind oder nur vergleichsweise niedrige Druckunterschiede, welche beispielsweise infolge des Stack Effects auftreten würden. Weiters ist zu berücksichtigen, dass die niedrigeren Druckunterschiede zwar häufiger vorkommen, jedoch die höheren Druckunterschiede einen größeren Einfluss auf den zusätzlichen Feuchteeintrag haben.

Die Einteilung der Messungen (siehe Tab. 3.10) in eine der Luftdichtheitsklassen erfolgte einmal strikt nach Zuordnung des Strömungskoeffizienten und einmal unter Betrachtung des Funktionsverlaufs. Für die Bewertung des Verlaufs der Messungen werden die höheren Druckunterschiede, welche allein vom Wind hervorgerufen werden, berücksichtigt. Daher wurde auf Grundlage der Ergebnisse und Überlegungen aus Kapitel 4.5, der Funktionsverlauf bis zu einem Druckunterschied von 40 Pa betrachtet. Die 40 Pa entsprechen in etwa dem 95%-Quantil der untersuchten Winddrücke.

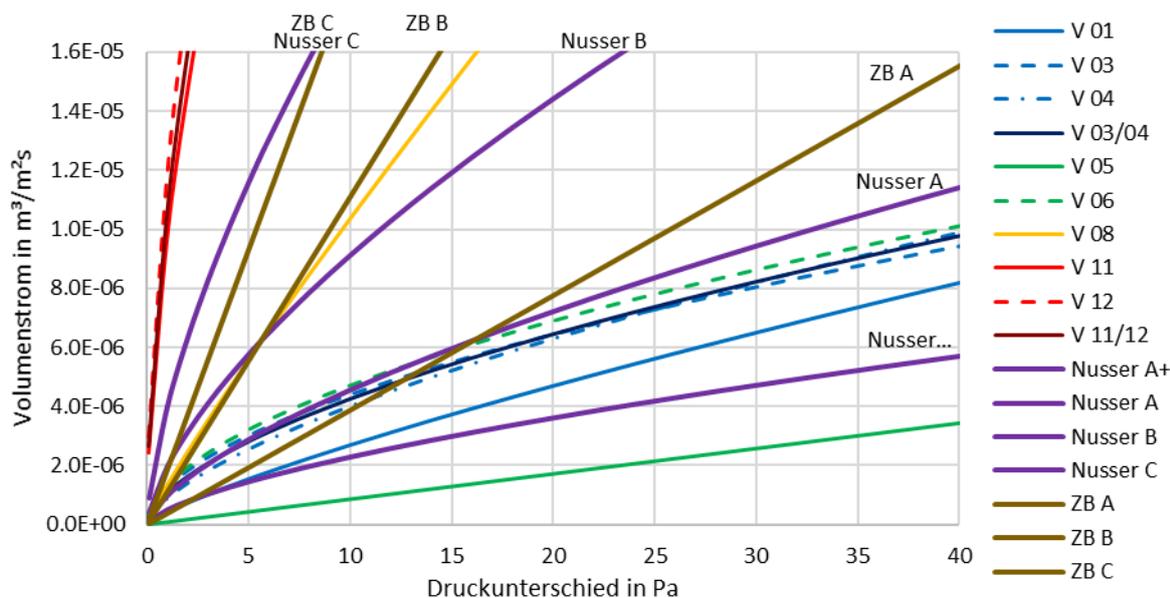


Abb. 3.5.3: Vergleich der Luftdichtheitsklassen bezogen auf die gesamte Deckenfläche. Aufgrund des Verlaufs der berechneten Volumenströme ist für die Klassifizierung die Einteilung nach Nusser den geraden Funktionen von Zirkelbach vorzuziehen. Die Messungen mit abgehängter Decke (V 11 und V 12) sind als undicht zu klassifizieren. Die sauber verputzte Decke (V 05) erfüllt hingegen die Anforderungen einer luftdicht ausgeführten Konstruktion. Sowohl die Variante mit Gardinenleisten (V 01) als auch jene mit zusätzlichen Löchern (V 03, V 04 und V 06) sind der Luftdichtheitsklasse A nach Nusser zuzuordnen.

Im Gegensatz zu den übrigen Messungen weist die Messung 05, wie die Luftdichtheitsklassen nach Zirkelbach, einen Strömungsexponenten von 1 auf. Durch die fehlenden Leckagen ist diese Messung aber besonders dicht und unterschreitet die Anforderungen der Luftdichtheitsklasse A+ nach Nusser auch noch bei hohen Drücken deutlich. Auch für die Messungen 01 (und 08), welche ohne zusätzliche Löcher durchgeführt wurde, ist ein relativ hoher Strömungsexponent bestimmt worden. Für die originalen² Messungen ist daher eine Einteilung nach Zirkelbach möglich. Diese Messungen nähern sich den geraden Verläufen an, sind aber dennoch stark genug gekrümmt um auch durch die Luftdichtheitsklassen nach Nusser gut abgebildet werden zu können. Erfolgt eine Einteilung nur über den Strömungskoeffizienten führt eine Beurteilung nach Zirkelbach zu einer massiven Unterschätzung der Luftdichtheitsklasse (siehe Tab. 3.10). Im Vergleich dazu würde eine Einteilung nach Nusser zu einer Überschätzung der Luftdichtheit ab einem Druckunterschied über 3 Pa führen.

Die Messungen 11 und 12 sind bei niedrigen als auch bei hohen Druckunterschieden weit über den Luftdichtheitsklassen nach Nusser und Zirkelbach. Erst bei einem Druckunterschied von 60 bis 100 Pa erfolgt die Überschneidung mit der Luftdichtheitsklasse C nach Zirkelbach. Diese Messungen sind somit keiner Luftdichtheitsklasse zuzuordnen und als undicht zu klassifizieren.

3.5.2.2 Bezogen auf einen Meter Außenwand

Für Leckagen, wie jene bei der abgehängten Decke, welche über die gesamte Fläche gleichmäßige Öffnungen aufweisen oder für einzelne Aufhängungen in Deckenmitte, stellt die Deckenfläche als Bezugsfläche einen sinnvollen Richtwert für die Luftdichtheit dar. In dieser Arbeit wird jedoch, im Vergleich zur Literatur, in erster Linie der Luftstrom um den Tramkopf untersucht. Insofern werden sich Leckagen im Umfeld der Tramköpfe stärker auswirken als Leckagen in Deckenmitte. Als Beispiel könnte hier die Gardinenleiste aus der ersten Messung aber auch die zusätzlich gebohrten Löcher angeführt werden.

² Messungen 01 und 05, also ohne runde Löcher

Bei diesen könnte durch die relativ große Fläche der Decke eine Unterschätzung des tatsächlichen Volumenstroms auftreten. Damit der lokale Einfluss der Leckagen besser erfasst werden kann, wäre bei dieser Art von Leckage ein Bezug auf die Wandlänge sinnvoller. Theoretisch würde eine Mischung aus beiden Varianten die Auswirkungen von Leckagen am besten beschreiben. Jedoch sind die Positionen der Leckagen im Normalfall nicht bekannt, deshalb ist es schwierig eine Abhängigkeit zwischen Leckageauswirkung und Abstand der Leckage von den untersuchten Tranköpfen zu berücksichtigen. Um zu eruieren welchen Einfluss der Abstand der Leckage tatsächlich hat, müssten separate Untersuchungen durchgeführt werden. Allerdings sollten diese nach Möglichkeit im Labor durchgeführt werden um die Anzahl an unbekanntem Faktoren so gering wie möglich zu halten.

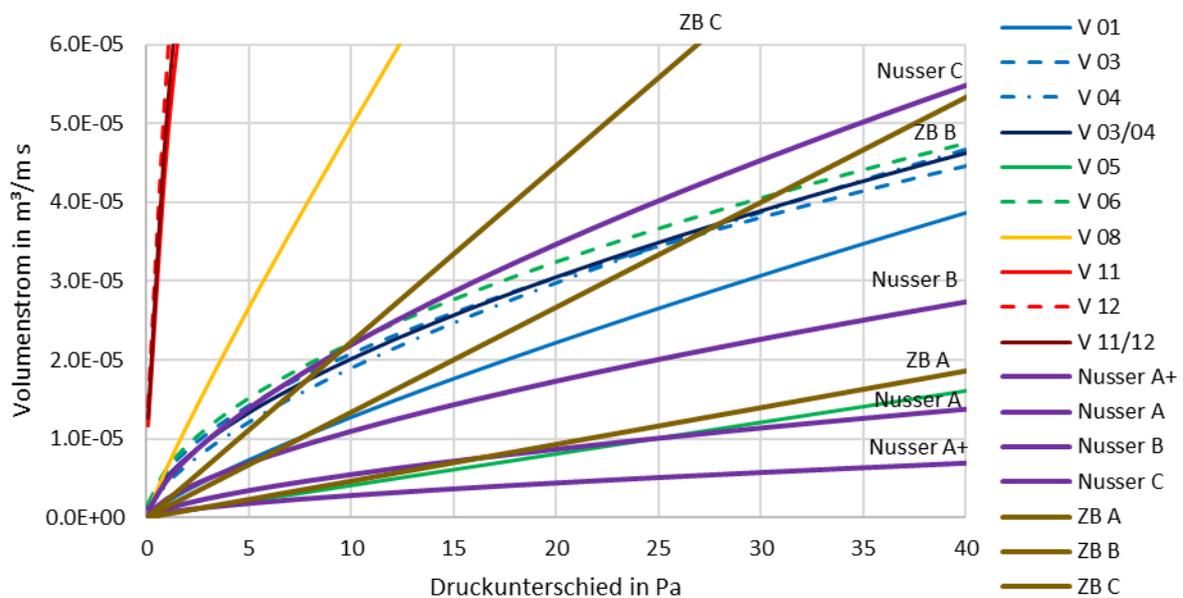


Abb. 3.5.4: Vergleich der Luftdichtheitsklassen bezogen auf einen Meter Außenwand. Im Vergleich zur Abb. 3.5.3 kommt es aufgrund des gleichbleibenden Luftvolumendurchgangs bei kleinerer Bezugsfläche zu einer kritischeren Einteilung in die Klassen. So erreicht z.B. die sauber verputzte Decke (V 05) bei hohen Druckunterschieden nur noch Klasse B nach Nusser. Eine solche Einteilung kann bei kleinen Räumen oder komplizierten Grundrissen zutreffender werden, wenn die Deckenfläche sinkt aber die Anzahl an Leckagen in der der Deckenuntersicht gleichbleibt oder steigt.

Um diesen Unterschied deutlich zu machen, wurde der Volumenstrom auf einen Meter der raumbegrenzenden Außenmauer bezogen. Die Strömungskoeffizienten der Luftdichtheitsklassen wurden dazu mit einem 1,2 m breiten Deckenstreifen multipliziert. Die angesetzte Breite von 1,2 m wurde hierbei frei gewählt und entspricht etwa einem Viertel der gesamten Raumbreite. Die Senke ist mit 0,5 bis 0,6 m etwa halb so breit wie die gewählte Bezugsfläche.

3.5.2.3 Einteilung nach Klassen

Tab. 3.10 Einteilung der Messungen in die Luftdichtheitsklassen nach Nusser und Zirkelbach

		Messung	01	03	04	03/04
		Änderung	Gardinenleiste	1 Loch	ohne Ventilatoren	
Bezugsfläche gesamte Decke	C in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^n)$		4.28E-07	1.24E-06	8.98E-07	1.07E-06
	n in -		0.80	0.55	0.65	0.60
	Einteilung nach	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf
	Klasse nach Nusser	A+ A	B A	A A	B A	
		Klasse nach Zirkelbach	B A	C B	B B	B B
Bezugsfläche ein Meter	C in $\text{m}^3/(\text{msPa}^n)$		2.02E-06	5.87E-06	4.25E-06	5.06E-06
	n in -		0.80	0.55	0.65	0.60
	Einteilung	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf
	Klasse nach Nusser	B C	undicht C	C C	undicht C	
		Klasse nach Zirkelbach	C C	undicht C	undicht C	undicht C
		Messung	05	06		
		Änderung	Sauber verputzt	5 Löcher		
Bezugsfläche gesamte Decke	C in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^n)$		8.57E-08	1.33E-06		
	n in -		1.00	0.55		
	Einteilung nach	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf			
	Klasse nach Nusser	A+ A+	B B (A)			
		Klasse nach Zirkelbach	A A	C B		
Bezugsfläche ein Meter	C in $\text{m}^3/(\text{msPa}^n)$		4.03E-07	6.24E-06		
	n in -		1.00	0.55		
	Einteilung	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf			
	Klasse nach Nusser	A+ A	undicht C			
		Klasse nach Zirkelbach	A A	undicht C		
		Messung	08	11	12	11/12
		Änderung	Abgehängte Decke	größere Druckausgleichsöffnung		
Bezugsfläche gesamte Decke	C in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^n)$		1.30E-06	9.65E-06	1.17E-05	1.05E-05
	n in -		0.90	0.60	0.60	0.60
	Einteilung nach	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf
	Klasse nach Nusser	B C	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht
		Klasse nach Zirkelbach	C B	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht
Bezugsfläche ein Meter	C in $\text{m}^3/(\text{msPa}^n)$		6.24E-06	4.63E-05	5.64E-05	5.03E-05
	n in -		0.90	0.60	0.60	0.60
	Einteilung	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf	Koeff. Verlauf
	Klasse nach Nusser	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht
		Klasse nach Zirkelbach	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht	undicht undicht

Bezieht man den Volumenstrom auf die gesamte Deckenunterseite wird Messung 05 in die Luftdichtheitsklasse A+ nach Nusser bzw. A nach Zirkelbach eingeteilt. Damit ist diese praktisch luftdicht. Die Auswirkungen einer Gardinenleiste werden allein durch den Strömungskoeffizienten nicht sichtbar. Nach Nusser ist die Decke genauso luftdicht während nach Zirkelbach eine zu hohe Luftdurchlässigkeit angenommen wird. Erst durch Betrachtung des Verlaufs kann eine sinnvolle Einteilung in die Klasse A erfolgen. Diese Über- und Unterschätzung der Verläufe ist auch bei den Messungen 03 und 06

erkennbar. Aufgrund der sehr hohen Volumenströme und Koeffizienten der Messungen des letzten Messtages ist bei diesen keine Zuordnung möglich.

Wie erwartet weisen die Messungen durch die Änderung der Bezugsfläche eine schlechtere Luftdichtheitsklasse auf. Bei der Einteilung rein nach Strömungskoeffizient sind dabei die meisten Messungen als undicht zu klassifizieren. Selbst die „dichte“ Messung 05 verschlechtert sich von Klasse A+ zu A, womit diese nicht mehr als luftdicht bezeichnet werden kann. Bei dieser Bezugsfläche fällt auch auf, dass fast alle Messungen um eine Klasse besser zu bewerten sind, sobald man auf den Verlauf achtet und nicht nur auf den Strömungskoeffizienten. So würden alle Messungen (außer jene mit der abgehängten Decke) mindestens Klasse C nach Nusser entsprechen, was für luftdichte Schichten dem Stand der Technik entsprechen würde.

Die gewählten Parameter liegen bis auf Messung 11 und 12 in den Bereichen der Luftdichtheitsklassen nach Nusser bzw. Zirkelbach. Es wurden auch die erwarteten Ergebnisse bestätigt, nämlich dass die Messung 05 relativ dicht und die Messungen 11 und 12 undicht sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Messungen durchaus realistische Ergebnisse erbracht haben.

3.5.3 Zusammenfassung

Die Messungen und deren Auswertungen werden von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, welche nur teilweise bekannt bzw. messbar sind. Aufgrund dieser zahlreichen Faktoren, welche sich nicht nur von Messtag zu Messtag sondern auch innerhalb einer Messung ändern können und der geringen Anzahl an durchgeführten Messungen, ist die Auswertung und Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen nicht eindeutig möglich. Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich somit eher um eine stichprobenartige Falluntersuchung als um eine umfassende Parameterstudie.

Es kann zwar festgestellt werden, dass es zu einer Durchströmung des Tramkopfes kommt. Jedoch kann, aufgrund der Vielzahl an Faktoren und unterschiedlicher Randbedingungen der einzelnen Messungen, kein allgemein gültiger Richtwert für die Größe einer solchen Strömung angegeben werden. Es können jedoch Rückschlüsse auf gewisse Tendenzen getroffen werden. So ist die vollständig verputzte Decke nahezu strömungsdicht, während die abgehängte Decke so gut wie keinen Strömungswiderstand bietet. Dadurch wird deutlich, dass der Hauptindikator der Zustand der Deckenuntersicht ist. Dieser ist wiederum von den Nutzern der Räumlichkeiten abhängig. Für eine herkömmliche Nutzung (ohne abgehängter Decke) mit einzelnen Aufhängungen und Durchlässen für Lampen oder einer Gardinenleiste, stellen die Luftdichtheitsklassen nach (NUSSER-12) einen guten Näherungswert für den Strömungswiderstand dar. So können als Richtwerte für die Größe einer Leckage bei augenscheinlich dichten Decken die Klasse A+ und für Decken mit Leckagen die Klassen A und B angesetzt werden.

Es sollte auch beachtet werden, dass sich die Luftdichtheitsklassen nach Nusser auf die gesamte Deckenuntersicht beziehen. Für lokale Leckagen in Auflagernähe, wie einer Gardinenleiste, ist jedoch die Deckengröße nicht unbedingt ausschlaggebend. Würde man die Ergebnisse des Volumenstroms auf einen kleineren Raum umlegen würde dies zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Massenstroms führen. Für solche Leckagen könnte es sinnvoller sein den Volumenstrom auf einen Meter Auflagerlänge zu beziehen.

4 Bestimmung typischer Druckunterschiede

4.1 Ziel - Motivation

Für die verschiedenen Strömungsursachen aus Kapitel 2.2.1 soll die jeweilige Größenordnung des Druckunterschiedes bestimmt werden. Dies soll auf Grundlage von in Wien gemessenen Temperaturen und Windgeschwindigkeiten sowie Windrichtungen geschehen. Mithilfe der bestimmten Größenordnungen sollen realistische Druckunterschiede für die Simulationen gewählt werden können.

4.2 Gebäudeinterner Auftrieb

Unter diesem Punkt wird nur der thermische Auftrieb im Gebäudeinneren betrachtet. In Gründerzeitgebäuden sind Treppenhäuser oft nicht geheizt und weisen deswegen niedrigere Temperaturen als die Wohnungen auf. Es bilden sich somit zwei Temperaturzonen, das kühlere, vertikal durchgehende Treppenhaus und die wärmeren, übereinanderliegenden aber durch Decken getrennten Wohnungen. Die Wohnungstüren können dabei als Leckage zwischen den unterschiedlichen Temperaturzonen angesehen werden. Betrachtet man nun das Tramkopfdetail kann es aufgrund der dortigen Leckagen zwischen den Wohnungen zu einer Strömung von unten nach oben kommen bzw. zu einer Zirkulation der Luft innerhalb des Gebäudes.

Eine weitere Strömungsursache kann die Schichtung der Temperatur innerhalb eines Raumes sein. Die wärmeren Luftschichten befinden sich an der Deckenunterseite und die kälteren Luftschichten über dem Fußboden. Durch diese Temperaturdifferenzen kann es ebenfalls zu einer Zirkulation zwischen zwei übereinanderliegenden Räumen kommen. Dazu ist jedoch auch noch eine zweite Leckage zwischen den jeweiligen Geschoßen notwendig. Diese könnte beispielsweise am gegenüberliegenden Deckenaufleger oder auch in einem Nachbarraum liegen. Verstärkt wird diese Zirkulation durch unterschiedliche Raumtemperaturen der übereinanderliegenden Räume. Auch ein heißer Radiator führt zu hohen Temperaturdifferenzen, wobei es bei diesem vor allem zu einer Zirkulation im Raum selbst kommt.

4.2.1 Methode

Zur Bestimmung der Temperaturen in einem Gründerzeithaus wurden in einer Wohnung in der Nähe der BOKU (Universität für Bodenkultur Wien) die Temperaturen gemessen. Es befanden sich je zwei Sensoren in Wohn- und Esszimmer, jeweils einer in Fußbodennähe und einer an der Wohnungsdecke. Bei dem Wohngebäude handelt es sich um einen klassischen Gründerzeitbau mit einer Raumhöhe von 3,44m. Zusätzlich zu den gemessenen Temperaturen wurde für die Wohnungen auch ein über das Jahr sinusförmiger Temperaturverlauf betrachtet. Der Verlauf schwankt dabei zwischen 26 und 22 °C.

Da für das Treppenhaus keine Messdaten vorhanden waren, wurde für den Temperaturverlauf wieder eine Sinusfunktion angesetzt. Im Winter erreicht diese ein Minimum von 16 °C und im Sommer ein Maximum von 24°C.

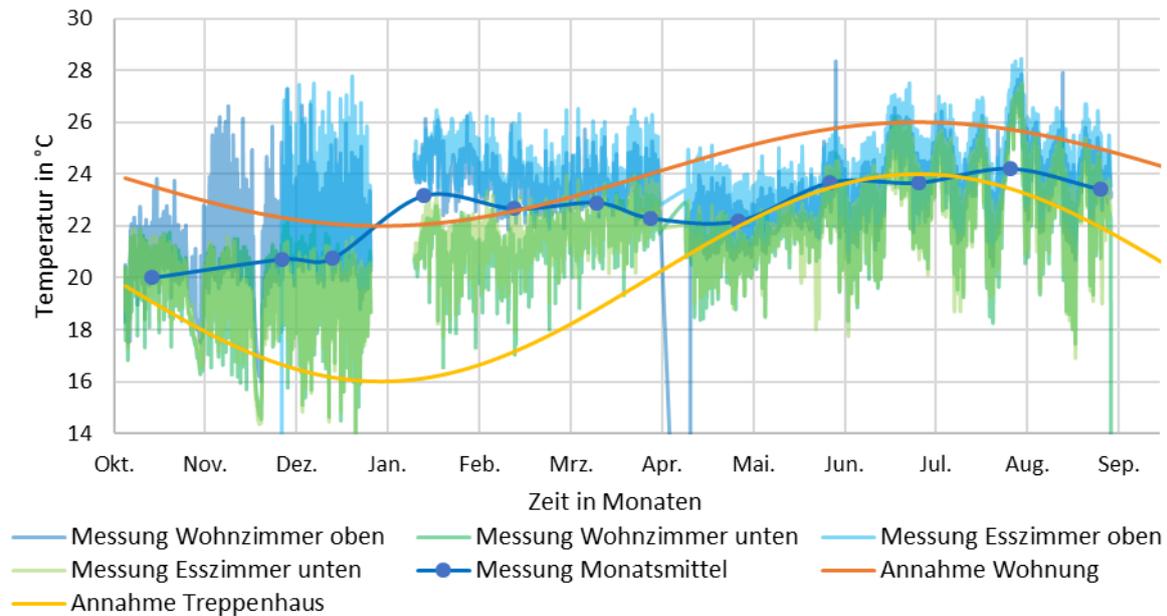


Abb. 4.2.1: Untersuchte Temperaturverläufe für den gebäudeinternen Auftrieb.

Die Berechnung der Druckdifferenz erfolgt nach Formel (5) aus (HAGENTOFT-01). Für den Abstand der Leckage zur neutralen Druckebene z wird $H/2$ eingesetzt. H ist in der Berechnung mit der Geschoßhöhe ($H=3,65$ m) gleichgesetzt (siehe auch Abb. 4.3.1). Für die Innentemperatur wurde einmal der aus den Messungen berechnete Mittelwert der vier Sensoren herangezogen und weiters der angenommene Sinusverlauf für die Wohnungen. Der angenommene Sinusverlauf für das Treppenhaus wurde für die Außentemperatur in der Formel eingesetzt.

Es wurden auch die Druckdifferenzen berechnet, wobei für die Innentemperatur die Messwerte des oberen Sensors und für die Außentemperatur jene des unteren Sensors eingesetzt wurden. In Tab. 4.1 sind die untersuchten Varianten nochmal zusammengefasst. Zur besseren Anschauung wurden die Messdaten der Sensoren, welche in 15 Minuten Schritten vorliegen, stündlich als auch monatlich gemittelt.

Formel für Stack Effect aus (HAGENTOFT-01, S. 76)

$$\Delta P = z * 3456 * \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (5)$$

z Abstand der Leckage von neutraler Druckebene in m
 T_e Außentemperatur in K
 T_i Innentemperatur in K

4.2.2 Ergebnisse

Tab. 4.1 Übersicht über die Untersuchten Varianten

Bezeichnung der Variante	Messung	Sinus	Wohnung Wohn- / Esszimmer
T_e	Angenommener Sinusverlauf für das Treppenhaus (16-24 °C)	Angenommener Sinusverlauf für das Treppenhaus (16-24 °C)	Aus dem Deckensensor
T_i	Mittelwert aus den vier Sensoren der Wohnungsmessung	Angenommener Sinusverlauf für das Innenklima (22-26 °C)	Aus dem Bodensensor

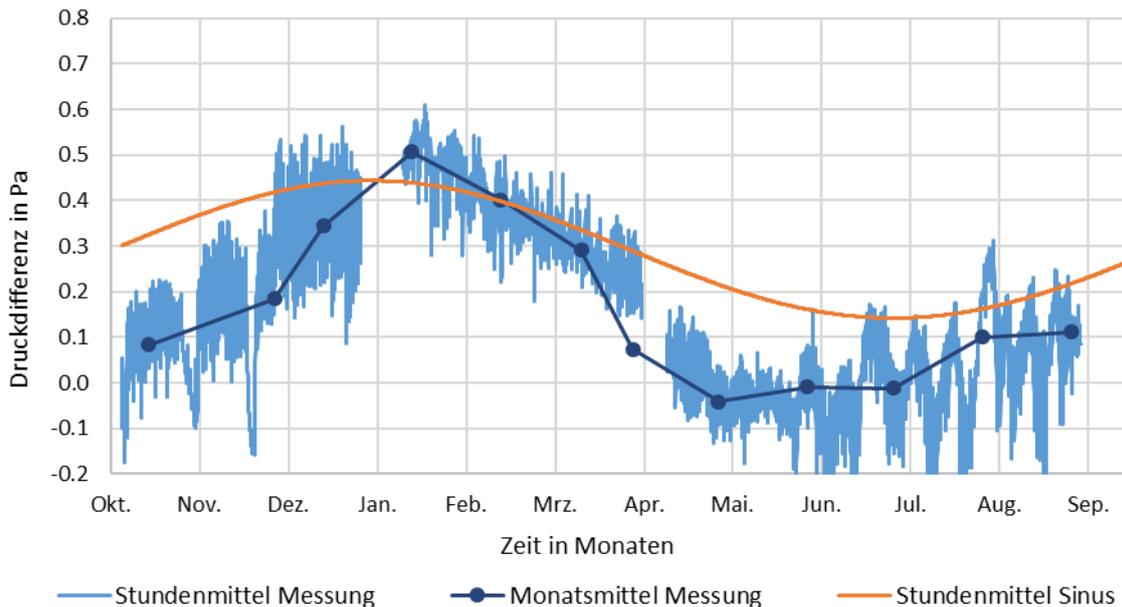


Abb. 4.2.2: Druckdifferenzen des gebäudeinternen Auftriebs aus den gemessenen Wohnungstemperaturen bzw. eines angenommenen Sinusverlaufs.

Für den gebäudeinternen Auftrieb ergeben sich Druckdifferenzen von ca. 0,5 Pa. Die höchsten Werte treten im Winter auf, wenn das Treppenhaus abgekühlt und die Wohnungen beheizt sind. Die negativen Druckdifferenzen in Abb. 4.2.2 ergeben sich, wenn in der betrachteten Wohnung niedrigere Temperaturen auftreten als im Treppenhaus (siehe Abb. 4.2.1). Die Druckdifferenzen zwischen den beiden angenommenen Sinuskurven betragen zwischen 0,14 und 0,44 Pa. Im Gegensatz dazu erreichen die Druckdifferenzen aus den gemessenen Werten bis zu 0,61 Pa bei einer durchschnittlichen Differenz von nur 0,16 Pa.

Betrachtet man die Varianten Wohnzimmer und Esszimmer, also die Temperaturdifferenzen aus den oberen und unteren Sensoren eines Raumes, erhält man Druckdifferenzen welche etwa halb so groß sind. In Abb. 4.2.3 erkennt man, dass in den Wintermonaten die Spitzen der Stundenmittel bis zu drei Mal so hoch sind wie die Monatsmittel. Die Monatsmittel sind dabei zwar kleiner aber die Spitzenwerte überschreiten dafür die Werte aus der Variante Sinus.

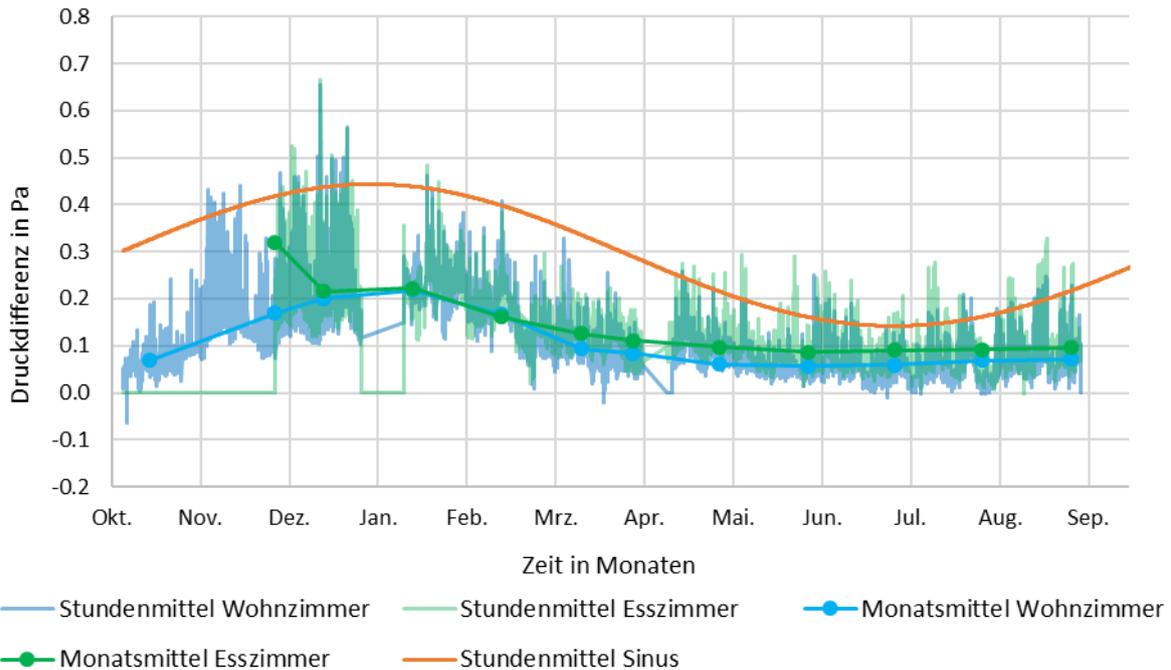


Abb. 4.2.3: Druckdifferenzen des Auftriebs infolge der Temperaturdifferenz zwischen Decke und Boden innerhalb eines Raumes. Die Druckdifferenzen sind dabei halb so groß wie die Druckdifferenzen zwischen Wohnung und Treppenhaus.

Der sinusförmige Verlauf der Messergebnisse ergibt sich aus den jährlichen Schwankungen des Außenklimas. Durch die im Winter kühleren Außentemperaturen sinkt auch die Innentemperatur, weshalb die Räume lokal über Radiatoren erhitzt werden. Dadurch ergeben sich größere Temperaturunterschiede zwischen beheizten und unbeheizten Räumen. Im Vergleich dazu erfolgt im Sommer eine Aufheizung durch Sonneneinstrahlung und interne Wärmequellen wie Personen oder Maschinen. Der relativ konstante Verlauf der Monatsmittel im Sommer lässt sich somit auf die ausgeschaltete Heizung zurückführen. Die noch vorhandenen geringen Schwankungen ergeben sich aus den internen Wärmequellen und der solaren Erwärmung durch die Fenster.

Zusätzlich zu dieser Betrachtung wurden auch die Druckdifferenzen für ausgewählte Temperaturunterschiede in Tab. 4.2 tabellarisch dargestellt. Der 3 °C Temperaturunterschied stellt sowohl die durchschnittliche Temperaturdifferenz der Variante Messung als auch den 95 %-Fraktilewert der untersuchten Temperaturdifferenzen aus Wohn- bzw. Esszimmer dar. Der nächste Eintrag der Tabelle soll die Auswirkungen eines kühlen Treppenhauses bei aufgeheizten Wohnungen im Sommer darstellen. Der Unterschied von 8 °C stellt das Maximum aller untersuchten Messwerte dar. Der dritte und vierte Wert weist bereits eine Temperaturdifferenz von 13 bzw. 22°C auf. Denkbar wäre hier ein ungedämmtes Treppenhaus während einer Kälteperiode. Bei den letzten beiden Werten soll der Einfluss des Leckageabstandes verdeutlicht werden. Dazu wird eine Strömung über die doppelte und vierfache Geschosshöhe betrachtet, dies würde drei bzw. fünf übereinander liegenden Wohnungen entsprechen.

Tab. 4.2 Vergleich verschiedener Temperaturdifferenzen

T_{oben}	in °C	19	16	9	0	16	16
T_{unten}	in °C	22	24	22	22	22	22
ΔT	in °C	3	8	13	22	6	6
ΔH	in m	3.65	3.65	3.65	3.65	7.3	14.6
ΔP	in Pa	0.22	0.59	0.99	1.72	0.89	1.78

Im Vergleich der einzelnen Berechnungen ist deutlich, dass üblicherweise keine Druckdifferenzen über 1 Pa auftreten werden. Bei kleinen Temperaturdifferenzen innerhalb eines Gebäudes sogar nur 0,5 Pa, dies entspricht dem Maximalwert der Sinus-Variante bzw. einer Temperaturdifferenz von 7 °C. Erst bei höheren Temperaturdifferenzen und Leckageabständen kommt es zu höheren Druckunterschieden.

Als Näherung für eine hygrothermische Simulation kann eine Sinus-Funktion angesetzt werden. Diese Funktion sollte das Maximum im Jänner und sein Minimum im Juni besitzen, wobei die Amplituden nach den angesetzten Temperaturunterschieden gemäß Tab. 4.2 auszurichten wären.

4.3 Stack Effect

Der Stack Effect betrachtet eine Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Im Vergleich zum vorherigen Kapitel treten hier vor allem im Winter noch höhere Temperaturdifferenzen auf. Wie zuvor werden auch hier zwei Leckagen für eine Strömung benötigt. Durch die untere Leckage wird kalte Luft in das Gebäude gezogen und durch die obere Leckage strömt warme Luft aus dem Gebäude. In Abb. 4.3.1 sind die Druckverläufe innen und außen sowie die daraus resultierenden Luftströme abgebildet.

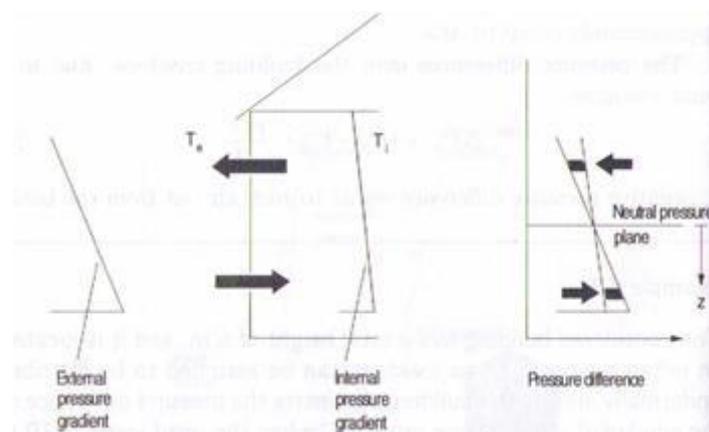


Abb. 4.3.1: Druckverteilung an der Außen- und Innenseite einer Mauer und die daraus resultierende Druckdifferenz. (HAGENTOFT-01, S. 76)

4.3.1 Methode

Die Messdaten stammen wieder aus derselben Wohnung. Die Messwerte der innenliegenden Sensoren wurden dieses Mal raumweise gemittelt. Zusätzlich zu den Sensoren in Wohn- und Esszimmer wurde auch ein Sensor an der Außenseite des Gebäudes ausgewertet. Die Druckdifferenz wird wieder nach der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Formel (5) bestimmt.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für den Abstand der beiden Leckagen wieder die Geschoßhöhe mit 3,65 m angenommen. In weiterer Folge wurde z mit der halben Höhe (1,825 m) festgelegt. Als Leckagen wären damit beispielsweise zwei Mauerwerksfugen bei den Geschoßdecken oder zwei undichte Fensterstürze denkbar. Wie im vorherigen Kapitel wurden wieder Stundenmittelwerte als auch Monatsmittelwerte untersucht.

4.3.2 Ergebnis

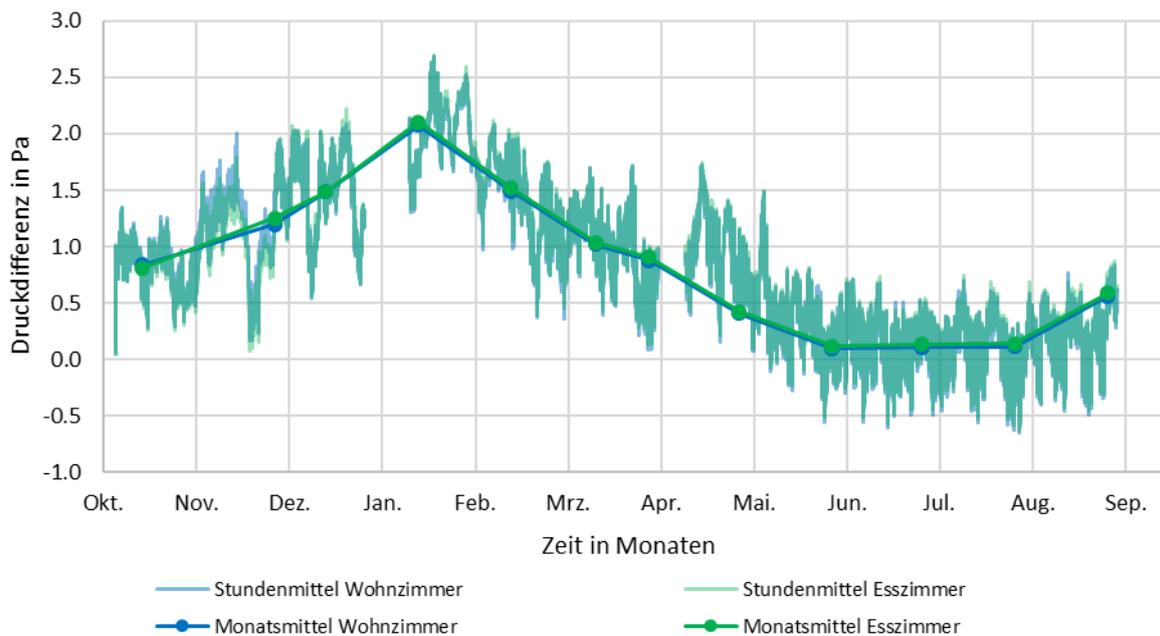


Abb. 4.3.2: Verlauf der Druckdifferenz infolge des Stack Effect's über ein Jahr.

Es ist deutlich sichtbar, dass die höchsten Druckdifferenzen im Winter auftreten. Währenddessen kommt es im Sommer bei kleinen Temperaturunterschieden zwischen innen und außen zu kleineren Druckdifferenzen, wobei sich die Druckverhältnisse auch umkehren können. Betrachtet man die Monatsmittelwerte kommt es im Sommer praktisch zu keinen Strömungen. Im Vergleich zu Abb. 4.2.3 sind bei Abb. 4.3.2 nur minimale Unterschiede zwischen Wohn- und Esszimmer erkennbar. Dies ist auf die Außentemperaturen zurückzuführen, welche für beide Räume gleich sind.

Zur Berücksichtigung in einer Simulation ergibt sich bei diesen Daten das Problem eines unvollständigen Datensatzes. Für die Monatsmittelwerte bietet es sich an, eine einfache Annäherung über eine Sinusfunktion vorzunehmen. Diese sollte ihren Maximalwert von 2 Pa im Jänner erreichen während sie im Sommer auf 0 zurück geht. Für eine genauere Simulation mit Stundenwerten kann eine Kombination aus Sinus- und Cosinus-Funktionen angewendet werden. Mit dieser können auch die Spitzen und eventuell sogar kurzzeitige negative Druckdifferenzen im Sommer abgebildet werden. Spezielle Änderungen des Nutzungsverhaltens wie eine reduzierte Heizung über einen Urlaub können jedoch nicht über eine derartig periodische Funktion erfasst werden.

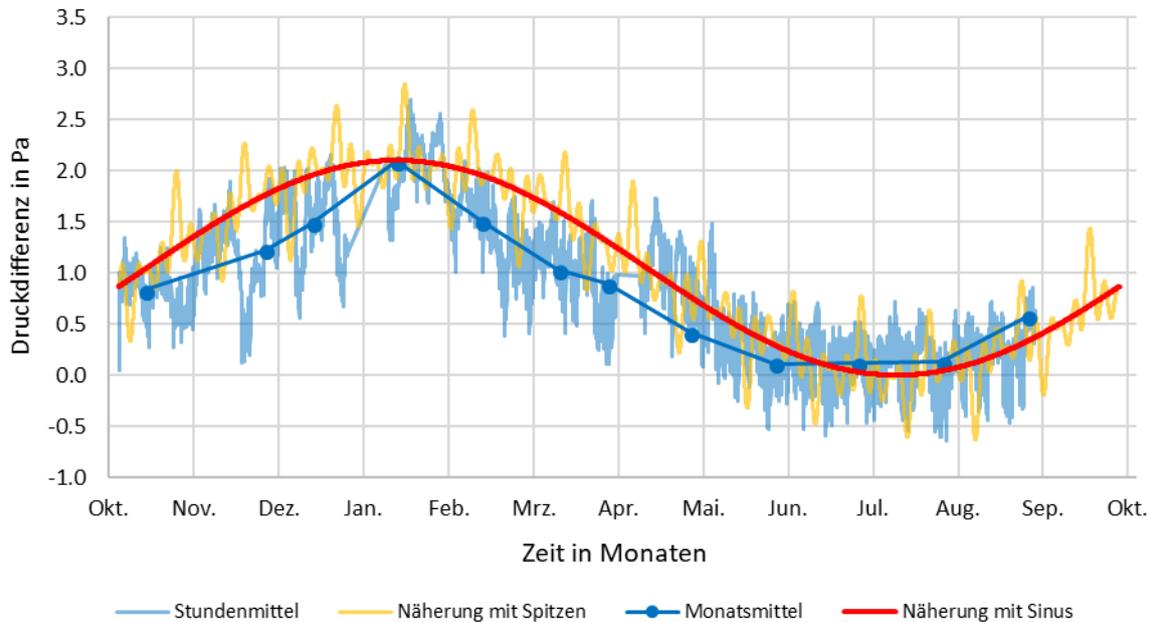


Abb. 4.3.3: Vergleich der Näherungsfunktionen für den Stack Effect. Eine einfache Sinusfunktion kann die Monatsmittelmerte gut abbilden, für eine genauere Berechnung bietet sich die Berücksichtigung zusätzlicher Spitzenwerte an.

Für Abb. 4.3.3 wurden die Stunden- und Monatswerte von Wohn- und Esszimmer gemittelt. Man erkennt, dass die Verläufe des Monatsmittels gut mit denen eines einfachen Sinus übereinstimmen. Auch die gewählte Funktion mit Spitzen (die genaue Formel (B.1) befindet sich im Angang) passt sich gut den Messwerten an. Der vertikale Versatz der Druckdifferenzen im Winter ergibt sich aus einer Umstellung des Heizungsverhaltens. Versetzt man die Kurven im Winter gedanklich nach oben kommt es zu einer noch besseren Übereinstimmung.

4.4 Winddruck

Der Winddruck ist abhängig von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Vor allem die Windrichtung ist von großer Bedeutung, da diese auch das Vorzeichen des Außenwinddrucks festlegt. Auch die Gebäudeform und Höhe beeinflussen die Größe des Winddrucks. Unabhängig von diesen Faktoren muss noch der Innendruck addiert beziehungsweise subtrahiert werden.

4.4.1 Methode

Zur besseren Vergleichbarkeit mit den obigen Untersuchungen, eines Wohnhauses in der Nähe der BOKU, bieten sich die Messdaten der Wetterstation der BOKU an. Auf (BOKU-Met) werden unter anderen die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und die Böengeschwindigkeit alle 10 Minuten ausgegeben. Bei der Windgeschwindigkeit handelt es sich um den Mittelwert der 10 Minuten während die Böengeschwindigkeit den Höchstwert in den 10 Minuten angibt. Für die Berechnung wurde das 10-Minuten-Mittel herangezogen, da die Spitzenwerte nur für kurze Zeit auftreten und teilweise den Mittelwert um das Dreifache überschreiten.

Die Berechnung des Winddrucks erfolgt nach der Formel (B.2) aus (HAGENTOFT-01). Bei dieser wird die Windrichtung durch den Außendruckbeiwert berücksichtigt. Dieser wird um den Innendruckbeiwert korrigiert und anschließend mit einer korrigierten Windgeschwindigkeit und der Luftdichte

multipliziert. Die Windgeschwindigkeit wird in etwa in 3 m oberhalb eines 25 m hohen Gebäudes gemessen. Deswegen muss diese Windgeschwindigkeit noch um einem Geländebeiwert und die Gebäudehöhe korrigiert werden (siehe Formel (B.3)). Die Gebäudehöhe wurde dazu mit 15 m angenommen, dies entspricht in etwa einem Gebäude mit vier Geschoßen.

4.4.1.1 Außendruckbeiwert

Zur Berechnung des Außendruckbeiwerts wurde (SWAMI-87) herangezogen. Dort wurde eine Funktion erarbeitet, welche den Druckbeiwert in Abhängigkeit von Windrichtung und einem Gebäudeformbeiwert errechnet (siehe Formel (B.4)). Zusätzlich ist auch noch der Außendruckbeiwert bei 0° Anströmrichtung zur Berechnung notwendig. Dieser kann laut (DIN EN 1991-1-4) einen Wert zwischen 0,7 und 1,0 annehmen. Im Vergleich dazu wird er in (HAGENTOFT-01) für Gebäude niedriger Höhe mit 0,4 festgelegt. Da sich die Empfehlung aus (MUEHLEISEN-13) zwischen diesen Werten befindet wurden die dort empfohlenen 0,6 für die Berechnung verwendet. Der Gebäudeformbeiwert beschreibt das Verhältnis der Länge und der Breite eines Gebäudes. Da Gründerzeithäuser in der Regel in geschlossener Bauweise errichtet wurden, kann für das Verhältnis der gesamte Gebäudeblock herangezogen werden. Da bei solch einem Gebäudeblock alle möglichen Verhältnisse vorkommen, wurde der Einfachheit halber ein Verhältnis von Länge zu Breite mit eins gewählt.

Die Auswertung der Windrichtungen aus der Wetterstation der BOKU zeigt, dass am Standort Wien der Wind hauptsächlich von Nordwesten kommt. Dies würde bedeuten, dass sich bei der Berechnung überwiegend positive Winddrücke ergeben würden. Für das Tramkopfdetail ist jedoch nach den Überlegungen aus Kapitel 2.2.3 ein Windsog maßgebend. Deswegen wurde eine Südostfassade betrachtet, dadurch werden die Druckverhältnisse gedreht und für das Gebäude gilt nun eine Ausrichtung auf 240° statt 0°. Es wurde auch eine Südfassade mit umgekehrten Druckverhältnissen berechnet. Eine solche Fassade ist für die Simulationen im Kapitel 5 angenommen worden, da bei den Simulationen der Schlagregen vernachlässigt wurde und dieser hauptsächlich von den entgegengesetzten Seiten eintrifft. Die Formel von (SWAMI-87) ist auf 180° beschränkt, deswegen ist es notwendig die Windrichtungen darüber zu spiegeln, siehe Abb. 4.4.1.

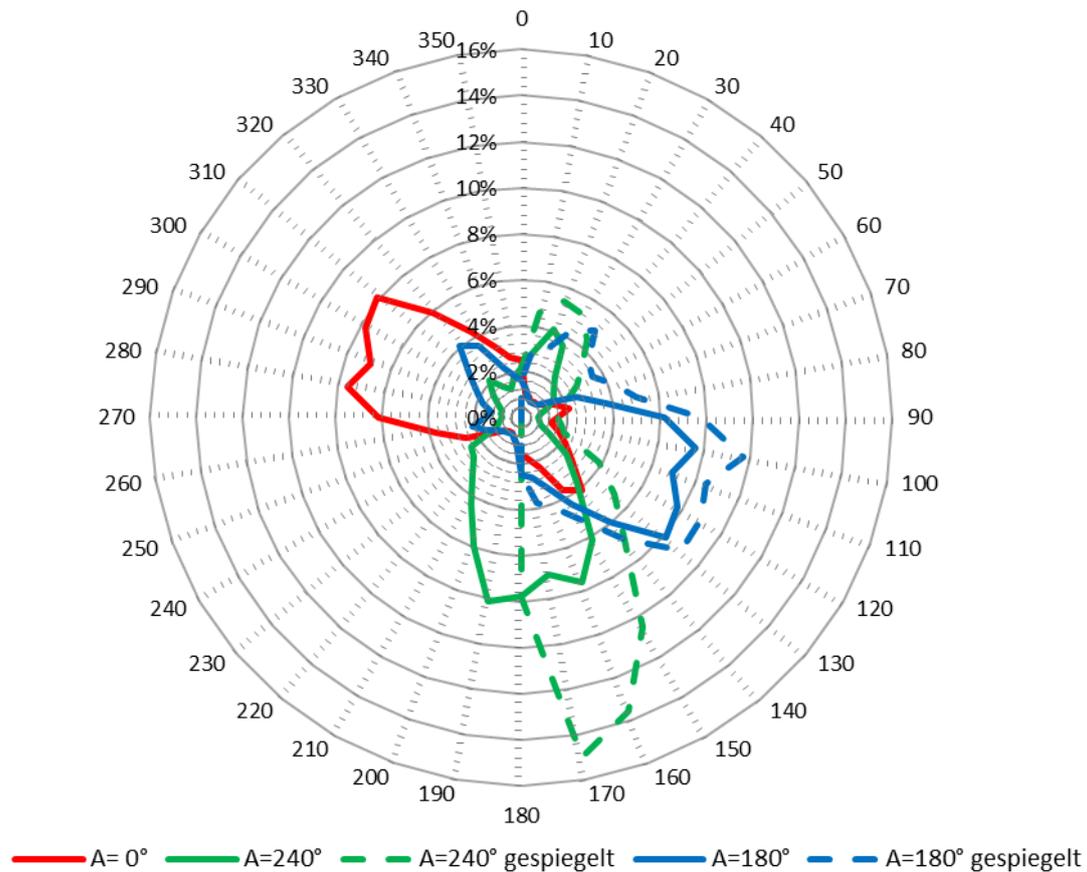


Abb. 4.4.1: Anteile der Windrichtungen in Wien über ein Jahr. Eine Windrichtung von 0° (oben) bedeutet eine direkte Anströmung einer Nordfassade (Winddruck), während bei 180° (unten) die gegenüberliegende Gebäudeseite angeströmt wird (Windsog). Die Ausrichtung A=180° entspricht einer Südfassade bzw. A=240° einer Südostfassade. Die gespiegelten Windrichtungen sind für die Berechnung der Außendruckbeiwerte notwendig.

4.4.1.2 Innendruckbeiwert

Nach (DIN EN 1991-1-4) ist der Innendruck unabhängig vom Außenwinddruck, zu jedem Zeitpunkt (Stundenmittel) kann demnach entweder ein Unterdruck oder Überdruck angesetzt werden. Theoretisch gibt es also unendlich viele Kombinationsmöglichkeiten für den Messbereich. Die drei wichtigsten wären:

- ◆ nur Überdruck, also ein positiver Druckbeiwert von +0,2
- ◆ nur Unterdruck, also ein negativer Druckbeiwert von -0,3
- ◆ variabler Über- oder Unterdruck, je nach Außendruckbeiwert der negative oder positive Druckbeiwert

In (HAGENTOFT-01) wird nur ein Innenunterdruck beschrieben, der dort empfohlene Druckbeiwert stimmt jedoch mit dem aus der Norm bekannten Wert von -0,3 überein. Um die maximalen Beträge für den Winddruck zu erhalten wurde mit der oben beschriebenen dritten Möglichkeit weitergerechnet. Im Anhang in Abb. B.28 findet sich eine Gegenüberstellung der 3 verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten.

4.4.2 Ergebnis

Die Wetterdaten der BOKU liegen alle 10 Minuten vor. Diese wurden wieder stündlich gemittelt, wobei die einzelnen Windrichtungen nach ihrer Geschwindigkeit gewichtet wurden. Dies geschieht aufgrund der Annahme, dass eine höhere Geschwindigkeit einen größeren Einfluss auf die Durchströmung des Gebäudes hat. Besonders wichtig ist dies, da teilweise Geschwindigkeiten von 0 m/s vorkommen und sich die Windrichtung innerhalb einer Stunde auch ändert. Auf ein Monatsmittel wurde hier aufgrund der großen Schwankungen der Geschwindigkeiten, also der Größe des Betrags, sowie der Windrichtungen und somit auch der Vorzeichen verzichtet.

Da der Datensatz der BOKU unvollständig ist, wurden die berechneten Winddrücke mit einem Klimafile eines Referenzjahres der Hohen Warte Wien verglichen. Dieses Klimafile wurde im Zuge der Arbeit (SCHWALLER-14) erstellt und beschreibt ein feuchtetechnisch kritisches Jahr im Raum Wien. Da nur positive Luftdrücke im Klimafile enthalten sind wurde dieses mit -1 multipliziert, wodurch man einen Windsog erhält.

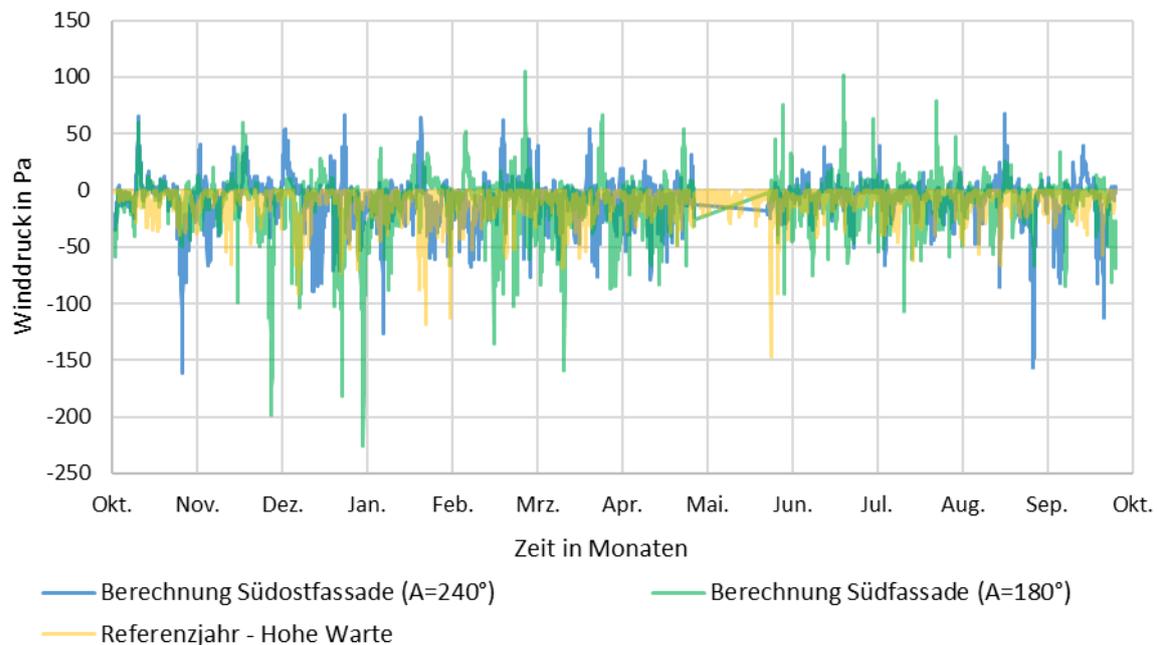


Abb. 4.4.2: Vergleich des Winddruckes aus den Messdaten der BOKU für eine Süd- und eine Südostfassade mit dem Referenzklima der Hohen Warte.

Betrachtet man die Abb. 4.4.2 ist erkennbar, dass die Berechnungen aus den Messdaten der BOKU zu wesentlich höheren Spitzen führen. Im Verlauf sind sich allerdings alle drei Messungen ähnlich. Betrachtet man ausschließlich den Windsog und vernachlässigt man die Innendruckbeiwerte stimmen die statistischen Kenngrößen des Winddrucks erstaunlich gut mit dem Referenzklima überein (siehe Tab. 4.3). Die vorhandenen Differenzen resultieren wahrscheinlich aus anderen Windrichtungen und einer Vernachlässigung der Innendruckbeiwerte im Referenzklima. Darüber hinaus war für die Arbeit von Schwaller vor allem die Schlagregenbelastung von Bedeutung und nicht die Windstärke oder Windhäufigkeit. Deswegen ist es nicht abwegig, dass das in dieser Arbeit untersuchte Klima höhere Spitzenwerte aufweist als das Referenzjahr.

Für die Simulation soll der kritischste Fall untersucht werden, dies ist jener, bei welchem über das gesamte Jahr hindurch Windsog herrscht. Das modifizierte Referenzjahr der Hohen Warte erfüllt diese

Bedingung. Zusammen mit der relativ guten Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den BOKU-Messdaten, kann das Referenzjahr somit als gute Alternative für die Auswertung der BOKU-Messdaten angesehen werden.

4.5 Vergleich

Für den Vergleich wurde der eigentlich negative Windsog positiv dargestellt. Dadurch wird eine übersichtlichere Gegenüberstellung der auftretenden Druckgrößen ermöglicht. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Größenordnung der verschiedenen Strömungsursachen ist in Abb. 4.5.1 nach dem Jahreswechsel der untere Bereich vergrößert dargestellt.

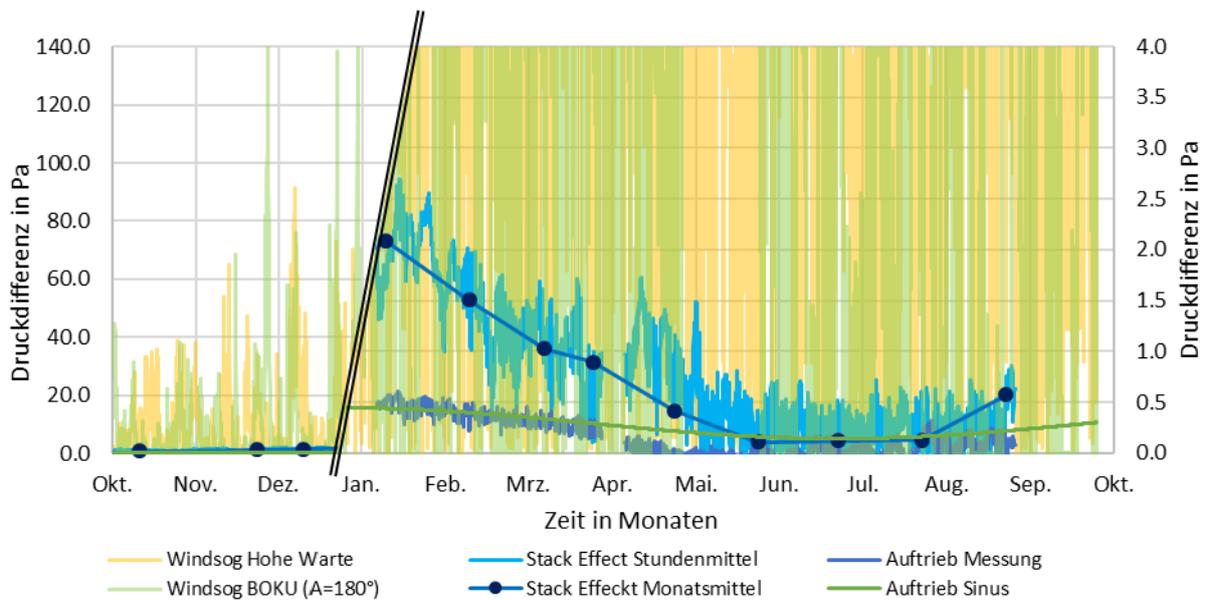


Abb. 4.5.1: Graphische Gegenüberstellung der berechneten Druckdifferenzen.

Links sieht man das Verhältnis von Windsog und Auftrieb bzw. Stack Effect. Wird der Winddruck für eine Simulation angesetzt können Auftrieb und Stack Effect vernachlässigt werden. Rechts ist der Bereich niedriger Druckdifferenzen vergrößert, um auch die Unterschiede zwischen Auftrieb und Stack Effect deutlich zu machen. Druckdifferenzen infolge des Stack Effects sind dabei bis zu 7-mal so groß als jene des Auftriebs.

Bereits in Abb. 4.5.1 ist deutlich ersichtlich, dass die einzelnen Strömungsursachen stark unterschiedliche Größenordnungen aufweisen. Beim gebäudeinternen Auftrieb und Stack Effect treten die höchsten Druckdifferenzen im Winter auf, währenddessen sich im Sommer beide Verläufe null annähern. Im Vergleich zu diesen Druckdifferenzen sind die Drücke des Windsogs wesentlich größer, sodass sowohl Auftrieb als auch Stack Effect vernachlässigbar klein erscheinen sobald der Winddruck angesetzt wird (Siehe auch Abb. B.29 und Abb. B.30)

Tab. 4.3 Tabellarische Gegenüberstellung statistischer Werte der berechneten Druckdifferenzen

Gebäudeinterner Auftrieb	Sinus	Messung	Wohnung		Stack Effect		
	Stundenmittel	Stundenmittel	Stundenmittel	Monatsmittel	Stundenmittel	Monatsmittel	
Maximum	0.44 Pa	0.61 Pa	0.66 Pa	0.24 Pa	Maximum	2.69 Pa	2.09 Pa
Mittelwert	0.29 Pa	0.16 Pa	0.12 Pa	0.13 Pa	Mittelwert	0.88 Pa	0.87 Pa
95% Quantil	0.44 Pa	0.49 Pa	0.25 Pa	0.23 Pa	95% Quantil	2.00 Pa	1.77 Pa
66% Qunatil	0.36 Pa	0.25 Pa	0.13 Pa	0.12 Pa	66% Qunatil	1.12 Pa	1.08 Pa
Standardabweichung	0.11 Pa	0.19 Pa	0.07 Pa	0.07 Pa	St.Abw.	0.68 Pa	0.63 Pa

Winddruck	Hohe Warte	Südostfassade (A=240°)		Südfassade (A=180°)			
	Stundenmittel	Stundenmittel	nur Windsog	ohne Innendruck nur Windsog	Stundenmittel	nur Windsog	ohne Innendruck nur Windsog
Maximum	146.31 Pa	161.97 Pa	161.97 Pa	111.68 Pa	226.31 Pa	226.31 Pa	170.34 Pa
Mittelwert	9.38 Pa	7.80 Pa	14.60 Pa	9.71 Pa	9.78 Pa	16.21 Pa	11.14 Pa
95% Quantil	30.63 Pa	40.22 Pa	46.48 Pa	31.92 Pa	48.33 Pa	54.23 Pa	38.60 Pa
66% Qunatil	9.51 Pa	10.11 Pa	15.32 Pa	10.02 Pa	10.51 Pa	16.10 Pa	10.77 Pa
Standardabweichung	11.26 Pa	18.84 Pa	16.98 Pa	11.58 Pa	22.14 Pa	20.84 Pa	15.03 Pa

Durch die Auswertung der Tabelle wird ersichtlich, dass sich die Stundenmittel und Monatsmittel des Auftriebs bzw. des Stack Effects hauptsächlich im Maximum unterscheiden, die Mittelwerte und Quantile sind fast identisch. Der Stack Effect weist dabei durchschnittlich vierfach so hohe Werte auf als die Varianten des Auftriebs. Auch in der tabellarischen Darstellung wird deutlich, dass die Winddrücke eine Größenordnung über den Druckdifferenzen aus dem Stack Effect liegen. Vergleicht man die Winddrücke aus den Berechnungen der BOKU-Messdaten, mit jenen des Referenzklimas der Hohen Warte sind die berechneten Werte höher. Das Maximum ist bei einer Südfassade um 2/3 höher und damit auch höher als bei einer Südostfassade. Selbiges gilt auch für die Mittelwerte und Quantile, jedoch nicht so stark ausgeprägt. Wird bei der Berechnung nur der Windsog berücksichtigt und die Innendruckbeiwerte vernachlässigt, treten nur noch geringe Differenzen zwischen den Winddrücken auf, vor allem wenn Mittelwerte und Quantile betrachtet werden.

4.6 Zusammenfassung

Der gebäudeinterne Auftrieb ist gegenüber den anderen Druckdifferenzen sehr klein (siehe Tab. 4.3). Wird kein Winddruck berücksichtigt, kann der Auftrieb für eine Strömung von innen nach innen zum Stack Effect hinzuaddiert werden. Wird hingegen der Winddruck berücksichtigt sind sowohl Auftrieb als auch Stack Effect vernachlässigbar klein. Für eine Näherung von Auftrieb und Stack Effect bieten sich Sinusfunktionen mit einem Maximum im Jänner an. Aufgrund der relativ großen und regelmäßigen Schwankungen des Stack Effects kann dieser auch durch eine kombinierte Sinus- und Cosinus-Funktion abgebildet werden (siehe Abb. 4.3.3). Für den Winddruck ist aufgrund der hohen und unregelmäßigen Schwankungen keine Näherungsfunktion sinnvoll. Hier kann jedoch auf ein Referenzklima nach (SCHWALLER-14) zurückgegriffen werden. Dadurch können jedenfalls unvollständige Datensätze ausgeglichen werden, um plausible Simulationen über das gesamte Jahr durchführen zu können.

5 Simulation eines umströmten Tramkopfdetails

5.1 Ziel - Motivation

Dieses Kapitel soll einen Überblick darüber geben, wie sich bestimmte Parameter bei einer Durchströmung des Tramkopfes auf das hygrothermische Verhalten von Tramköpfen auswirken. Insbesondere sollen dabei verschiedene Strömungspfade betrachtet werden. Weiters sollen die Auswirkungen einer Innendämmung einer klassischen Konstruktion gegenübergestellt werden. Aus den Feuchtigkeiten und Temperaturen, welche für die einzelnen Varianten ermittelt wurden, soll letztendlich die Dauerhaftigkeit bestimmt werden. Also wie gefährdet das Tramkopfdetail für den Holzabbau durch Pilze und Schädlinge ist.

5.2 Methode

5.2.1 Hygrothermische Simulation

Im Gegensatz zum gewöhnlichen Glaserverfahren (DIN EN ISO 13788), welches nur eine stationäre Betrachtung der Feuchtediffusion ermöglicht, sind mit hygrothermischen Simulationen wesentlich umfangreichere Analysen möglich. Nach (DIN EN 15026) sollen derartige Simulationen auch instationäre Modelle unter Berücksichtigung von Feuchte- und Wärmespeicherung, Strahlungswärme sowie den Feuchtetransport über Flüssigkeiten und Konvektion erfassen. Durch die Verwendung von realistischen Rand- und Anfangsbedingungen kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Simulation im Vergleich zu anderen Verfahren wesentlich erhöht werden. Es ergeben sich eine Vielzahl von Aufgabenstellungen welche mithilfe einer Simulation gelöst werden können:

- ◆ Austrocknen bei einer Anfangsfeuchte
- ◆ Porenkondensation durch Feuchtediffusion
- ◆ Feuchteleitung aufgrund von Schlagregen
- ◆ Kondensation und Trocknung infolge von Wärmestrahlung
- ◆ Wärmeverluste infolge von Verdampfung

Darüber hinaus bieten entsprechend entwickelte Programme auch die Möglichkeit 2D und 3D Probleme, wie Wärmebrücken, zu modellieren und zu lösen. Es können auch Konstruktionen, bei welchen es zu einer jährlichen Zu- bzw. Abnahme von Feuchtigkeit kommt, über mehrere Jahre hinweg simuliert werden. Dadurch können sinnvolle Aussagen über die Dauerhaftigkeit von Konstruktionen getroffen werden. Eine Simulation bietet somit eine einfache Alternative zu einer Langzeitstudie.

5.2.2 Programm HAM4D

Die Simulationen für das Tramkopfdetail wurden mit dem Finite-Differenzen-Programm HAM4D durchgeführt. Dieses wurde auf Basis des, im Zuge der Dissertation von (BEDNAR-00) erstellten, Programm HMS programmiert. Die Software wird am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz an der Technischen Universität Wien auf Grundlage der (DIN EN 15026) fortwährend verbessert und weiterentwickelt. Für die Arbeit wurde die Programmversion HAM4D_VIE V1.0, VERSION_090204 verwendet.

Die Grundlage für die Simulation bildet ein 3D-Modell eines Bauteils oder Details. Dieses setzt sich aus einzelnen Zellen zusammen, welche zu verschiedenen Materialblöcken mit diversen Eigenschaften

zusammengefasst werden. Es können dabei neben konstanten auch feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeiten und Diffusionswiderstände definiert werden. Darüber hinaus kann auch die Luftdurchlässigkeit, die Flüssigkeitsleitfähigkeit und -speicherfunktion aber auch das Gefährdungspotenzial für Verrottung und Schimmelbildung festgelegt werden. An den Rändern der Bauteile werden Randbedingungen definiert. Die Randbedingungen beschreiben Außen- und Innenklima, diesen Klimafiles liegen dabei stündliche Datensätze zugrunde. Das Programm kann somit zu jeder vollen Stunde das Temperatur- und Feuchtefeld berechnen. Dabei werden auch die Strömungsverläufe von Flüssigkeiten und Luftschichten berechnet. Über das Klimafile können zudem solare Einstrahlung und Schlagregen berücksichtigt werden. In den Ausgabeoptionen bietet das Programm auch die Möglichkeit die Schimmelgefährdung, Frostgefahr und potenzielle Verwitterung wiederzugeben. Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist, dass das Programm in der Lage ist, Leckagen durch Massenstromquellen oder durch fest definierte Strömungspfade zu berücksichtigen.

Ein weiterführender Überblick über die HAM4D zugrundeliegenden Formeln und Rechenschritte findet sich in folgenden Literaturen: [(BEDNAR-00), (WEGERER-10), (HUMER-11) und (SCHWALLER-14)]

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Strömungsmechanik in dieser Arbeit werden die HAM4D zugrunde gelegten Mechanismen ausführlicher erläutert.

Um Leckagen berücksichtigen zu können muss zuerst die Luftströmung im Programm aktiviert werden. Dabei handelt es sich um thermisch indizierte Luftströmungen wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Diese können vom Programm nur berücksichtigt werden, wenn für die jeweiligen Materialzellen eine Permeabilität (Luftdurchlässigkeit) größer als 0 definiert wurde. Ein typisches Beispiel für ein solches Material wäre eine lose Mineralwolle aber auch ein Lufthohlraum. Bei anderen Materialien, mit einer Permeabilität von 0, kommt es zu keiner Luftbewegung, diese werden vom Programm sozusagen als luftdicht angesehen.

Für einen Luftstrom durch solche Materialschichten, wie beispielsweise Putz und Schalung, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

Die erste Möglichkeit stellt die Anlegung eines Luftpfades dar. Der Volumenstrom berechnet sich dabei aus Formel (6). Diese Formel stellt eine modifizierte Variante zu jener aus der (DIN EN 12114) dar. Diese wird noch durch einen Luftdichtheitsfaktor ergänzt, vergleichbar mit (NUSSER-12). Die einzelnen Zellen, durch welche eine Luftströmung erfolgt, müssen vor der Berechnung manuell festgelegt werden. Wobei die erste und letzte Zelle nach bzw. vor einer dichten Materialschicht liegen. Diese Zellen stellen die zwei Leckagen dar, durch welche Luft in das und aus dem Bauteil dringt. Der herrschende Druckunterschied wird dabei aus den Randbedingungen entnommen, welche mit den zwei Zellen verknüpft sind. Die restlichen Parameter, wie Strömungsexponent, werden direkt bei Eingabe des Luftpfades festgelegt.

Formel für konvektive Feuchteinträge

$$\dot{m} = \rho * C * f * \Delta p^n \quad (6)$$

\dot{m}	Luftmassenstrom in kg/m ² s
ρ	Luftdichte mit 1,2 kg/m ³
C	Luftvolumenstromkoeffizient in m ³ /m ² sPa
f	Luftdichtheitsfaktor
Δp	Druckdifferenz in Pa
n	Leckageexponent

Sollte der Luftpfad nicht bekannt sein, sondern nur die Lage der Leckagen, kann auch ein Luftstrom über eine Massenstromquelle eingegeben werden. Im Unterschied zur vorherigen Vorgangsweise werden dieses Mal nur die Leckagezellen und die zugehörigen Randbedingungen definiert. Zusätzlich muss noch die Form und Größe der Leckage festgelegt werden. Sobald die Temperatur des Taupunkts der verknüpften Randbedingung unterschritten wird kommt es zur Kondensatbildung in der Leckagezelle. Das Programm unterscheidet dabei zwischen runden Löchern und länglichen Spalten. Den angeführten Formeln (7) und (8) wurde ein Strömungsexponent von 0,5 sowohl für runde als auch für längliche Öffnungen zugrunde gelegt.

Definition einer Leckage als Loch (runde Öffnung)

$$C * \rho = 1,2 * 10^{1,8268 * \log_{10}(d_L * 1000) - 5,9756} \quad (7)$$

d_L Lochdurchmesser in mm

Definition einer Leckage als Spalt (längliche Öffnung)

$$C * \rho = b_S * 1,2 * 10^{1,0035 * \log_{10}(h_S * 1000) - 3,106} \quad (8)$$

b_S Spaltbreite in mm

h_S Spalthöhe in mm

Für die durchgeführten Simulationen wurde die zweite Methode verwendet, da der Luftpfad nicht bekannt ist und sich je nach Position der Leckage auch ändert.

5.2.3 Auswertung

Die Simulation erfolgt über mehrere Jahre, so lange bis sich ein eingeschwungener Zustand ausbildet. Dabei handelt es sich um einen immer wiederkehrenden Verlauf von Feuchtigkeit und Temperatur. Dieser Zustand wird durch die sich jährlich wiederholenden Klimadaten ermöglicht. Wesentlichen Einfluss auf die Dauer der benötigten Jahre nehmen neben der Zellenanzahl (Qualität des FE-Netzes) auch die Wahl der Anfangsfeuchtigkeit in den Zellen.

Für die Auswertung der Simulation sollten eine besonders kritische Zelle und eine weniger kritische Vergleichszelle betrachtet werden (siehe Kapitel 5.4.5). Für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion sind in erster Linie die Holzzellen verantwortlich, da diese verwittern und durch Schimmelbefall zerstört werden können. Von Bedeutung ist dabei das Verhältnis zwischen der Feuchtigkeit einer Zelle und ihrer Temperatur. Die Bewertung erfolgt dabei nach (WTA-Merkblatt 6-8). Dort werden bestimmte Grenzwerte für die maximale relative Luftfeuchtigkeit in den Holzporen für eine bestimmte Temperatur angegeben. Werden diese Grenzwerte überschritten kommt es nicht sofort, sondern erst nach einer bestimmten Zeit, zu einer Schimmelbildung.

5.3 Untersuchte Varianten

Bei den verschiedenen Varianten wurden der Strömungspfad und die Innenklimate verändert. Im Gegensatz dazu wurden bei allen Simulationen die gleichen Druckdifferenzen und Leckagegrößen angesetzt. Bis auf die Varianten mit zusätzlicher Innendämmung blieb auch der Aufbau des Details gleich. Als Grundlage für die Auswertung wird das kritische Tramkopfdetail mit einer Luftströmung von innen nach außen herangezogen. Dazu wird auch die Variante mit umgekehrten günstig wirkenden

Luftvolumenstrom, also von außen nach innen, betrachtet. Eine weitere Variante stellt eine Strömung von innen nach außen dar, jedoch mit trockenerem Innenklima des unteren Raumes (Quellraum). Weitere Simulationen wurden mit einem veränderten Strömungspfad von innen nach innen bzw. von unten nach oben durchgeführt. Dabei wurden einmal die gleichen Innenklima wie bei der ersten Simulation angesetzt und bei einer weiteren Simulation das Innenklima des oberen Raumes (Senke) variiert. Bei den Varianten mit Innendämmung wurde wieder das Standardklima mit einer Strömung von innen nach außen und ein trockeneres Klima in der Senke mit einer Strömung von innen nach innen angesetzt. Zudem wurden auch alle Varianten einmal ohne Luftströmung simuliert. Die in Kapitel 2.2.3 erwähnte theoretisch luftdichte Konstruktion wurde ebenfalls simuliert. Eine tabellarische Übersicht (Tab. 5.1) der untersuchten Varianten findet sich in Kapitel 5.5.3.

5.4 Eingangsdaten

5.4.1 Modell

Als Grundlage für das Modell (siehe Abb. 5.4.1) wurde die Detailskizze aus (RICCABONA-10) herangezogen. Für den Tram wurde ein Rechteckquerschnitt mit 16/20 aus Weichholz gewählt. Dieser liegt 15 cm auf einer 44 cm starken Vollziegelmauer auf. Die Außenmauer ist beidseitig mit je 2 cm Kalkputz verputzt. Der den Tramkopf umgebene Lufthohlraum, das Tramkastl, beträgt seitlich und stirnseitig je 1 cm, an der Oberseite des Tramkopfes sind 2 cm Luft zum Mauerwerk. Der eigentliche Deckenaufbau beginnt mit 2 cm Kalkputz als Deckenuntersicht. Diese ist auf einer 2 cm starken Vollschalung befestigt, welche wiederum an den Trämen montiert ist. Die eigentlich große Luftdurchlässigkeit an den Stößen der einzelnen Schalungsbretter wird über die Leckage in Kapitel 5.4.4 mitberücksichtigt. Über den Trämen befindet sich wieder eine Vollschalung mit 2 cm. Auf dieser befindet sich die Schüttung aus Sand, in deren Gesamthöhe von 10 cm ein Polsterholz eingelassen ist. Das Polsterholz ist ein 5/8 auf welchem der Blindboden und darüber der Fußboden mit einer Stärke von je 2 cm befestigt ist.

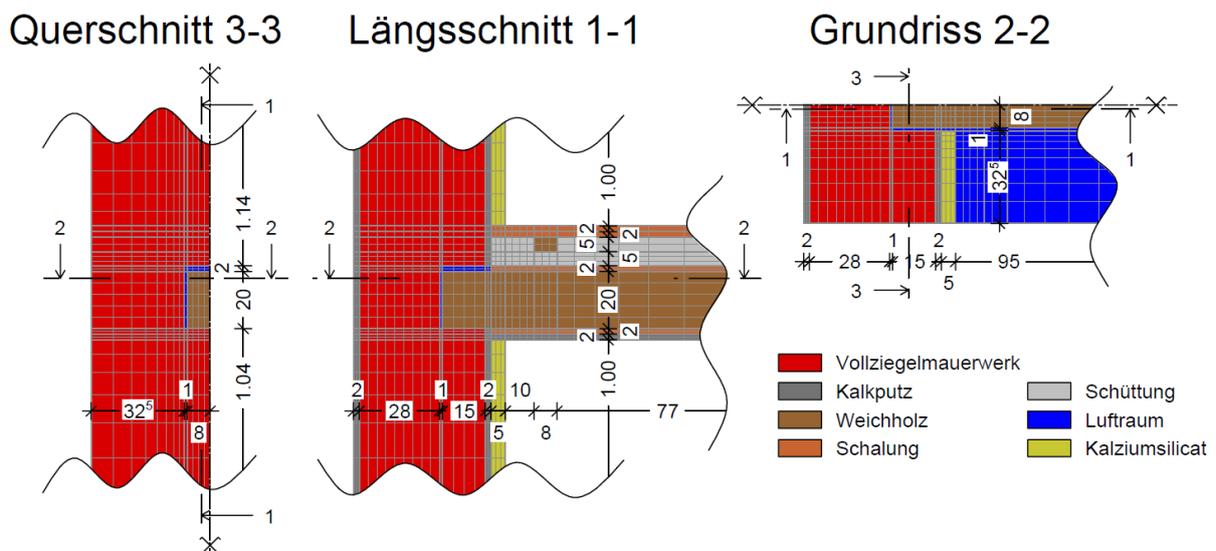


Abb. 5.4.1: Simulationsmodell mit Maßen, Material und Zellteilung.

Für die Varianten mit Innendämmung wurde an den inneren Kalkputz eine 5 cm starke Kalziumsiliatplatte hinzugefügt. Diese Platte wurde bis an die beiden Holzschalungen unterhalb bzw. oberhalb des Tramkopfes geführt. Dadurch wird die Verbindung des Tramzwischenraums mit dem

Tramkopfhohlraum nicht unterbrochen. Dies stellt nach (WEGERER-17) den kritischeren Fall dar, als wenn die Innendämmung den Tram umschließt und die Lufträume trennen würde.

Wird der Decken-Wand-Anschluss von oben betrachtet, ergibt sich ein symmetrischer Aufbau sowohl im Balkenzwischenraum als auch im Tramkopf selbst. Dadurch kann das Modell wesentlich kleiner ausfallen. Es ist ausreichend vom halben Balkenzwischenraum, welcher mit 65 cm Breite angenommen wurde, bis zum halben Tramkopf zu modellieren. Die Bauteillängen wurden einen Meter vom Deckenanschluss weitergeführt. Dadurch sollen Verzerrungen aufgrund von falschen Randbedingungen vermieden werden.

Über die einzelnen Materialblöcke wurde ein feineres FE-Netz gelegt, wobei dieses umso größer wird je weiter man sich vom Tramkopfaufleger entfernt. Hier sei zu erwähnen, dass zugunsten einer kürzeren Rechenzeit auf eine weitere Verfeinerung des Netzes verzichtet wurde. Im Bereich des Tramkopfes würde eine weitere Verfeinerung durchaus eine Steigerung der Genauigkeit der Ergebnisse ermöglichen. Inwiefern eine solche Steigerung sinnvoll ist und auch aussagekräftig bleibt müsste aber gleichzeitig noch evaluiert werden. Dazu müsste eine genauere Betrachtung der Auswirkungen der Streuungen von Klima- und Materialparametern auf das Ergebnis durchgeführt werden.

5.4.2 Materialdaten

Es wurde versucht die Materialkenngrößen möglichst an die Materialien der Gründerzeit anzupassen. Dabei wurde sich an (MASEA) der (ÖNORM B 8110-7) und auch der Datenbank von (WUFI) orientiert.

5.4.2.1 Vollziegelmauerwerk

Das Mauerwerk besteht aus alten Wienerberger Vollziegel und dem sie umgebenden Mörtelbett. Die Materialkenngrößen wurden aus der (WUFI) Datenbank übernommen. Dort gibt es einen Eintrag für Vollziegelmauerwerk. Diese Kenngrößen stimmen in etwa mit den Werten der (ÖNORM B 8110-7) überein und können deswegen als plausibel angenommen werden.

5.4.2.2 Kalkputz

Sowohl für den Innenputz als auch den Außenputz wurde ein Kalkzementputz gewählt. Da bei diesen Untersuchungen der Schlagregen vernachlässigt wird, ist keine weitere Modifikation des Wasseraufnahmekoeffizienten des Außenputzes notwendig. Als Quelle für die Kenngrößen wurde (MASEA) herangezogen.

5.4.2.3 Weichholz und Schalung

Bei dem verbauten Holz handelt es sich vorrangig um Fichtenholz. Aufgrund der Anisotropie von Holz gibt es in (MASEA) Kenngrößen für die Richtungen radial und longitudinal (axial). Problematisch dabei ist, dass der Verlauf des Wärme- und Feuchteflusses nicht genau bekannt ist. Weiters ist anzunehmen, dass der Transport in beide Richtungen erfolgt (vor allem beim Tramkopf). Zusätzlich können in HAM4D nur homogene Materialien eingetragen werden. Deswegen wurden die Kenngrößen für Wärmeleitfähigkeit, Diffusionswiderstand und Wasseraufnahmezahl gemittelt. Für die Feuchtespeicherfunktion wurden die Messdaten der Fichte longitudinal verwendet. Im Vergleich mit der (ÖNORM B 8110-7) werden so geringfügig bessere Materialkennwerte verwendet.

5.4.2.4 Schüttung

Für die Schüttung wurde eine Füllung mit feinkörnigen Sand angenommen. Für die Bestimmung der Materialkenngrößen wurden (MASEA), (ÖNORM B 8110-7) und (DIN EN ISO 10456) miteinander verglichen. Dichte und spezifische Wärmekapazität wurden aus (MASEA) genommen, für die Wärmeleitfähigkeit wurde der geringere Wert aus der (ÖNORM B 8110-7) herangezogen. Für die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigkeitsleitzahl wurde sich an den Kenngrößen für Vollziegel orientiert, wobei die Wassersättigung und die Aufnahmegeschwindigkeit reduziert wurden.

5.4.2.5 Luftraum

Für die Festlegung der Materialkennwerte für die Luftschicht wurden die Normen [EN ISO 10456], (ÖNORM B 8110-7) und (DIN EN ISO 6946) herangezogen. Der Luftraum ist das einzige Material mit einer Luft-Permeabilität, diese wurde mit $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ angenommen.

5.4.2.6 Kalziumsilicat

Bei der Innendämmung wurde das Produkt Multipor von Xella herangezogen, siehe auch (YTONG-MULTIPOR). Dabei handelt es sich um eine Kalziumsilicatplatte. Diese Platten sind diffusionsoffen und besitzen eine gute Wasserleitfähigkeit. Darüber hinaus handelt es sich um einen mineralischen Werkstoff, welcher im Gegensatz zu herkömmlicher Mineralwolle besonders schimmelresistent ist. Aufgrund dieser Eigenschaften ist bei solchen Materialien keine zusätzliche Dampfbremse notwendig. Die Produktkennwerte stimmen dabei großteils mit den angegebenen Materialkennwerten für Kalziumsilicatplatten aus (MASEA) überein.

5.4.3 Klimadaten

5.4.3.1 Außenklima

Das Außenklima wurde für alle untersuchten Varianten gleich angenommen. Dazu wurde das Referenzjahr der Hohen Warte Wien aus (SCHWALLER-14) herangezogen. Die Temperatur schwankt dabei zwischen -7 und 33 °C, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 bis 100 %. Der Absorptionsgrad für solare Einstrahlung wurde mit 0,5 festgelegt, dies entspricht etwa einer hellgrauen Fassade.

Auf die Berücksichtigung von Schlagregen wurde verzichtet. Die Hauptwindrichtung bzw. Wetterseite ist Nordwest, somit trifft auch der Großteil des Schlagregens auf der Nord- bzw. Westfassade des Gebäudes auf. Bei der angenommenen Südfassade tritt überwiegend Windsog auf, wodurch diese auch relativ trocken bleibt und die Vernachlässigung des Schlagregens als realistisch angesehen werden kann (siehe auch Kapitel 4.4.1.1 und (SCHWALLER-14)). Darüber hinaus kann dadurch die Anzahl der Einflussfaktoren auf den Feuchtegehalt reduziert werden.

5.4.3.2 Innenklima

Für die Temperaturen des Innenraumes wurde eine sinusförmige Kurve mit einem Maximum von 26 °C im Sommer und einem Minimum von 22 °C im Winter angenommen. Diese Werte entsprechen auch in etwa den Messergebnissen aus Kapitel 4.2 welche zwischen 19 und 27 °C schwanken. Die relative Luftfeuchtigkeit weist mit maximal 65 % und minimal 50 % den selben Verlauf wie die Temperatur auf.

Für die Varianten mit trockenerem Quellraum wurde die relative Luftfeuchtigkeit im Winter auf 30 % reduziert. Eine solche niedrige Luftfeuchtigkeit kann bei älteren Gebäuden mit Radiatoren, schlechten U-Wert und geringer Luftwechselzahl auftreten. Als Alternative dazu wurde bei den Varianten mit

Strömung von innen nach innen und trockener Senke zusätzlich auch die Temperatur reduziert. Durch die geringeren Temperaturen soll ein anderes Nutzerverhalten abgebildet werden. Das Maximum im Sommer beträgt dabei 22 °C bei 65 % relativer Luftfeuchte und das Minimum 19 °C bei 30 % relativer Luftfeuchtigkeit im Winter.

5.4.3.3 Randbedingungen

Bei den Simulationen wurde sowohl langwellige Strahlung als auch die kurzwellige Strahlung berücksichtigt. Deswegen sind nicht nur Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, sondern auch solare Einstrahlung und die Strahlungstemperatur der Umgebung für die Berechnung notwendig. Für die Strahlungstemperatur des Himmels wurde die um 10°C reduzierte Lufttemperatur angesetzt, während für die Innenräume die Lufttemperatur angenommen wurde.

Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurden nach (RICCABONA-13) für jede Randbedingung separat bestimmt. Für die Außenfassade wurde auch der Einfluss der Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Bei der Decke und dem Boden der Innenräume wurde ein Wärmestrom von unten nach oben angenommen.

5.4.3.4 Druckdifferenz

Für den Druckunterschied wurde für alle Varianten der in den Klimadaten der Hohen Warte hinterlegte Luftdruck herangezogen. Dieser entspricht nach Kapitel 4.4.2 der Größenordnung von angreifenden Windlasten. Weist jedoch im Gegensatz zu den berechneten Winddrücken nur ein positives Vorzeichen auf. Damit kann gezielt eine kritische Strömung von innen nach außen ohne die günstigen Effekte einer Strömung nach innen abgebildet werden.

In den Innenräumen wurde ein sinusförmiger Verlauf des Luftdruckes wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben angewendet. Dabei wurde für den Winter ein Maximum von 2 Pa festgelegt. Diese Größe entspricht den Auswirkungen des Stack Effects.

Da HAM4D nur positive Luftdrücke berücksichtigen kann, wurden bei den meisten Varianten die beschriebenen Außendrucke und Innendrucke vertauscht. Womit im Innenraum ein Überdruck entsprechend der Windlasten angesetzt wurde und im Außenklima der beschriebene Luftdruck von bis zu 2 Pa.

5.4.4 Leckage

Bei den Varianten mit einer Luftströmung von innen nach außen mussten zwei Leckagen definiert werden. Die erste Leckage führt dabei zum unteren Innenraum. Sie befindet sich an der Grenze zwischen Tramzwischenraum und Tramkasten, oberhalb der ersten Schalung direkt seitlich des Trams. Die dazugehörige Leckage zur Außenseite befindet sich in der Symmetrieachse des Trams, im oberen äußeren Eck der Vollziegelmauer. Für die Leckagegröße wurden die Luftdichtheitsklassen aus Kapitel 3.5.2 herangezogen. Als Referenz wurden die Luftdichtheitsklasse A nach Nusser sowie die Messungen 03, 04 und 06 verwendet (siehe Abb. 5.4.2). Es wurde ein rundes Loch mit einem Durchmesser von 1,1 mm gewählt. Daraus ergibt sich mit dem im Programm fixierten Strömungsexponenten von 0,5 ein Strömungskoeffizient von $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa}^{0,5})$. Diese kleine Leckage ergibt sich aus dem Umstand, dass nur ein sehr kleiner Teil der Decke ($0,42 \text{ m}^2$) modelliert wird und die Gesamtleckage auf die gesamte Deckengröße ($19,49 \text{ m}^2$) bezogen wurde, siehe auch Kapitel 3.5.2.1. Wenn man wie im Kapitel 3.5.2.2 beschrieben die Bezugsfläche ändert, würde dies bedeuten, dass eine derartige Leckage zwischen den Verläufen der Luftdichtheitsklassen A+ und A nach Nusser liegt (siehe Abb. C.31). Wobei der Luftvolumenstrom deutlich unter den Messungen 01 und sogar 05 läge.

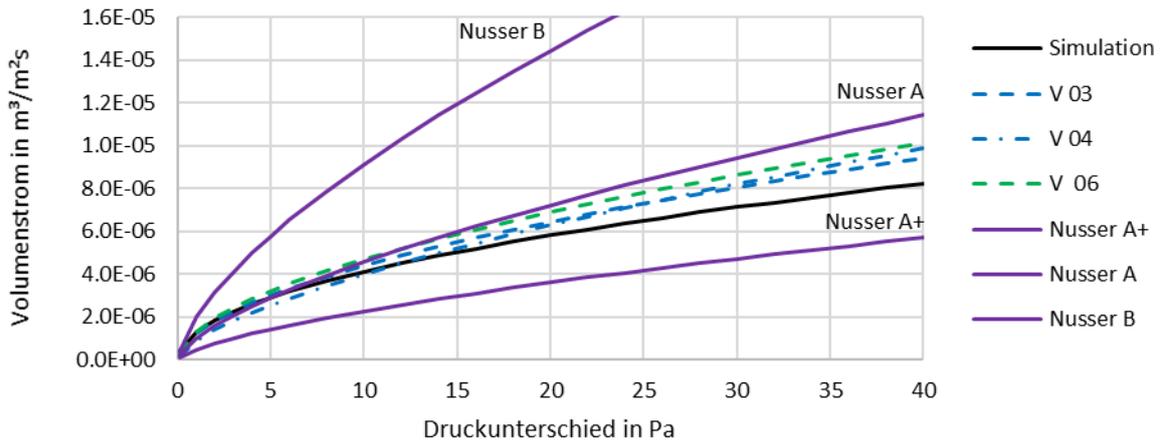
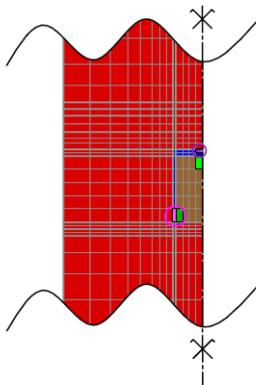


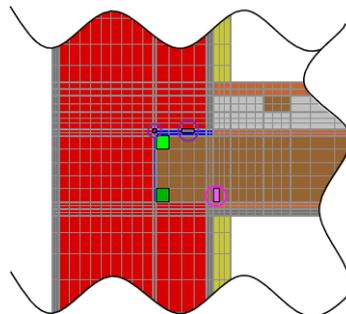
Abb. 5.4.2: Luftvolumenstrom der Leckage im Vergleich zu den Messungen aus Kapitel 3.4 und den Luftdichtheitsklassen nach Nusser, mit der gesamten Decke als Bezugsfläche.

Für die Strömung von innen nach innen wurde die Leckagegröße beibehalten. Auch die Position der unteren Leckage im Innenraum bleibt unverändert. Um eine realistischere Luftströmung innerhalb des Luftraumes zu gewährleisten wurde die Leckagezelle weiter in den Innenraum, bis etwa zur Tramkopfmittle, verschoben. Die zweite Leckage soll jedoch nicht mehr nach außen, sondern in den oberen Raum führen. Deswegen wurde auch die verknüpfte Randbedingung geändert.

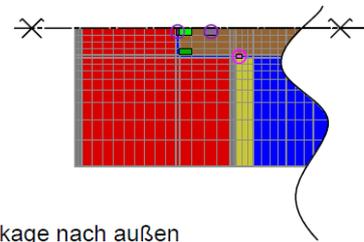
Querschnitt



Längsschnitt



Grundriss



- Leckage nach außen
- Leckage nach oben (nach innen)
- Leckage nach unten (zum Quellraum)
- Auswertungszelle oben
- Auswertungszelle unten

Abb. 5.4.3: Position der Leckagen und Auswertungszellen im Simulationsmodell.

5.4.5 Auswertungszellen

Die Auswahl der Zellen für die Auswertung, erfolgte aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5.5.1 über den Feuchte- und Temperaturverlauf im Tramkopf. Die betrachteten Zellen befinden sich beide an der Stirnseite des Tramkopfes, da dort die höchsten Feuchtigkeiten und zugleich die geringsten Temperaturen auftreten. Die kritischere Zelle befindet sich in unmittelbarer Nähe zur nach außen führenden Leckage, an der Oberseite der Symmetrieebene des Tramkopfes. Für die zweite Zelle wurde die Zelle seitlich unten, in unmittelbarer Nähe zum Auflager gewählt (siehe Abb. 5.4.3).

5.5 Ergebnisse

5.5.1 Verteilung der Feuchtigkeit

Die Betrachtung der Verteilung der Feuchtigkeit erfolgt zum Zeitpunkt der höchsten relativen Feuchtigkeit, bei der Variante „nach außen“. Es ist deutlich ersichtlich, dass die höchsten Feuchtigkeiten im Bereich des Tramkopfes auftreten. In diesem Bereich kommt es aufgrund der Wärmebrücke auch zu vergleichsweise niedrigeren Temperaturen und somit zu einer erhöhten Kondensationsgefahr.

In Abb. 5.5.1 ist die Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit an der Stirnseite des Tramkopfes abgebildet. Die höchsten Feuchtigkeiten treten in der oberen Hälfte der Symmetrieachse des Trams auf. Nach außen und unten wird die Feuchtigkeit immer geringer, wobei der Unterschied nur 6 % beträgt.

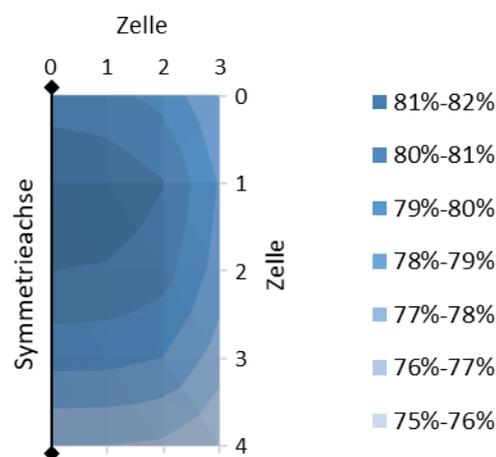


Abb. 5.5.1: Verteilung der Feuchtigkeit an der Stirnseite des Tramkopfes.

Betrachtet man den Verlauf der Feuchtigkeit in Längsrichtung, fällt diese mit zunehmendem Abstand zum Stirnholz deutlich ab. Im Jahresverlauf der Feuchtigkeit wird die Trägheit der Holzkonstruktion deutlich. Die Zelle welche direkt an den Luftraum angrenzt reagiert zuerst. Die übrigen Zellen reagieren zeitlich versetzt, da die Feuchtigkeit erst die Holzzellen am Rand durchdringen muss. In Abb. 5.5.2b reagieren die dritte und alle nachfolgenden Zellen nur minimal versetzt zu ihrer vorherigen, da sich diese direkt unterhalb einer Randzelle befinden. Nach einigen cm stellt sich im Träger eine annähernd konstante Feuchtigkeit über das gesamte Jahr ein. Demzufolge haben die jährlichen Schwankungen nur noch minimalen Einfluss auf diese Schichten.

Aufgrund dieser Verteilung der Feuchtigkeit wurden für die Auswertung die oberste Holzzelle im Stirnholz, in Nähe der nach außen führenden Leckage, und als zweites die Zelle an der Tramseite direkt über dem Mauerwerk gewählt.

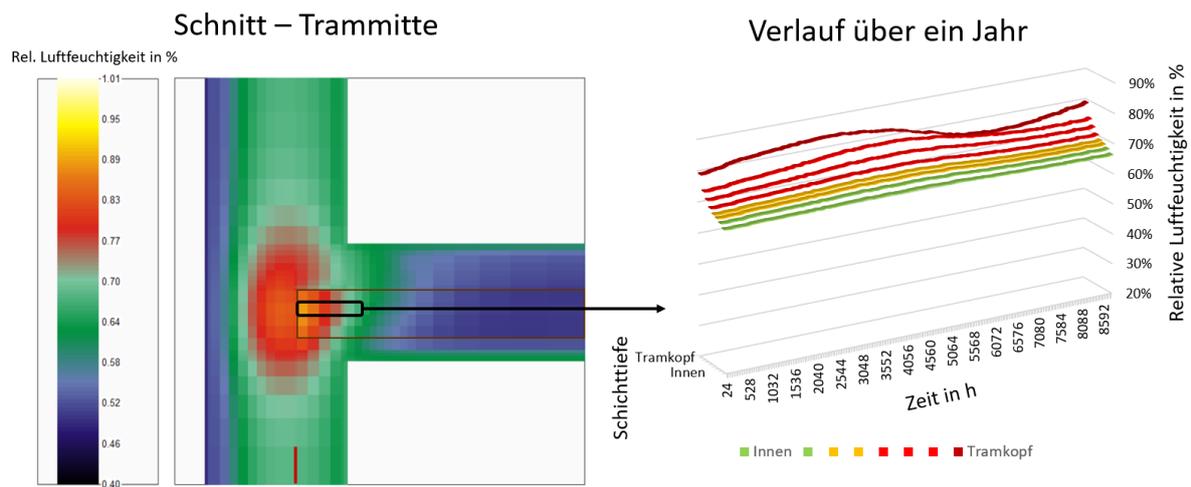


Abb. 5.5.2: Verlauf der Luftfeuchtigkeit im Längsschnitt. Während sich im Stirnholz jährliche Schwankungen abbilden, bleibt die Luftfeuchtigkeit im Traminneren über das Jahr annähernd konstant.

5.5.2 Verlauf der Feuchtigkeit

Für die Betrachtung des Feuchteverlaufs über das Jahr wird wieder die Variante „nach außen“ herangezogen (Abb. 5.5.3a). In Rot wird die absolute Feuchtigkeit der Holzzellen dargestellt. Deren Verlauf entspricht dem der relativen Luftfeuchte aus der vorherigen Abbildung. In Blau und Grün wird der Wasserdampfdruck (Partialdruck) der Luft dargestellt, Dunkelblau repräsentiert das Innenklima, Hellblau das Außenklima und die verschiedenen Grüntöne die einzelnen Luftzellen um den Tramkopf. Vergleicht man die beiden Maximalwerte des Partialdrucks und der absoluten Holzfeuchtigkeit, erkennt man, dass diese gegeneinander verschoben sind. In Anlehnung an das vorherige Kapitel könnte angenommen werden, dass aufgrund der Trägheit des Holzes dieses erst mit 8-monatiger Verzögerung reagiert. Tatsächlich reagieren die beiden Auswertungszellen jedoch unmittelbar. Erklärbar wird dieser Versatz, wenn man die verschiedenen Kurven der Partialdrücke miteinander vergleicht. Durch die Luftströmung vom Innenraum schwankt der Partialdruck in der Konstruktion um jenen des Innenklimas. Im Frühjahr und Sommer sind die Partialdrücke, und somit auch die Feuchtigkeiten, im Luftraum der Konstruktion höher als jene des Außenklimas und Innenraums. Dadurch wird durch eine Strömung vom Inneren der Konstruktion nach außen, ein Austrocknen ermöglicht. In dieser Zeit sinkt die relative Feuchtigkeit im Tramkopf, während im Winter und Herbst der Partialdruck im Innenraum höher als in der Konstruktion ist und somit Feuchtigkeit in die Konstruktion getragen wird. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen im Außenbereich kann dort nur eine geringere Menge an Feuchtigkeit in der Luft gehalten werden. Deswegen kondensiert diese Feuchtigkeit im Bereich der Außenleckage und führt somit zu einem weiteren Feuchteeintrag. Sichtbar wird dies durch einen Anstieg der roten Kurve.

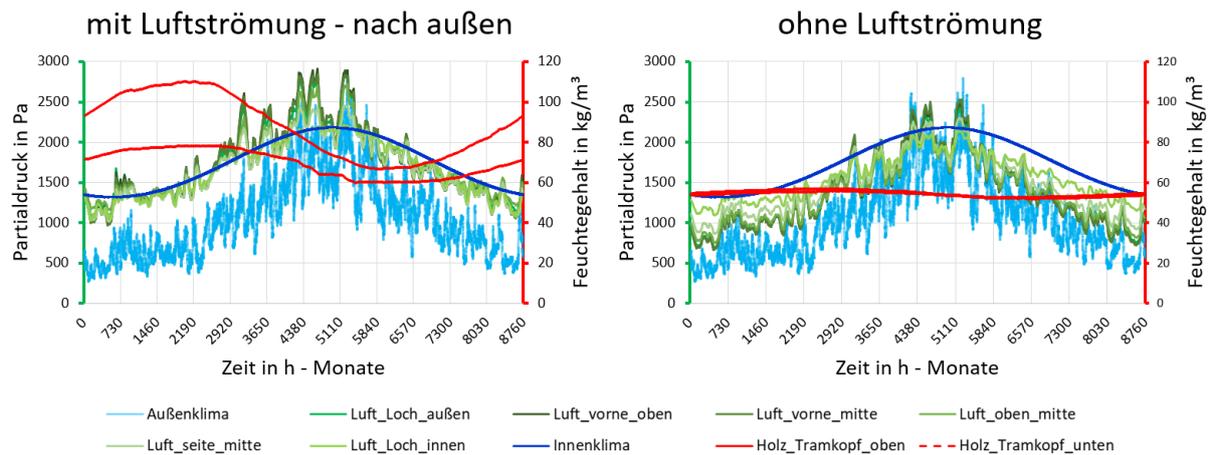


Abb. 5.5.3: Verlauf der absoluten Holzfeuchtigkeit und des Partialdruckes der Luftzellen im Tramkasten über ein Jahr. Bei einer Luftströmung schwanken die Partialdrücke im Tramkasten um jene des Quellraums. Dabei kommt es im Sommer infolge höherer Drücke zum Austrocknen des Tramkopfes. Im Vergleich dazu bleibt die Feuchtigkeit ohne Luftströmung über das ganze Jahr annähernd konstant.

Der Unterschied zwischen der durchgehenden roten Kurve (obere Zelle) und der strichlierten Kurve (untere Zelle) ist auf den unterschiedlichen Abstand zu den Leckagen zurückzuführen, wodurch sich verschiedene Strömungsverhältnisse um die betrachtete Zelle ergeben. Zusätzlich kommt es auch aufgrund von unterschiedlichen Bauteilaufbauten zu unterschiedlichen Temperaturen zwischen den beiden Zellen. Somit beginnt die Konstruktion aufgrund von kälteren Temperaturen, bei der unteren Zelle, erst etwas später auszutrocknen.

Dem Verlauf der Variante „nach außen“ wird in Abb. 5.5.3 die Variante „ohne“ gegenübergestellt. Hier sind dieselben Ursachen für Feuchtigkeitsanstiege und Trocknungsvorgänge feststellbar, jedoch mit einer deutlich geringeren Intensität und einem späteren Trocknungsbeginn. Die Partialdrücke in der Konstruktion bleiben fast das gesamte Jahr unter jenen des Innenklimas und oberhalb jener des Außenklimas. Deswegen bleibt auch die Feuchtigkeit in den Holzzellen über das gesamte Jahr annähernd konstant.

Es ist sichtbar, dass die Schwankungen der Feuchtigkeit vor allem aus der Feuchtekonvektion stammen. Bei den Varianten ohne Luftströmung, bei welchen die Feuchtezunahme ausschließlich auf Feuchtediffusion beruht, stellt sich hingegen ein annähernd konstanter Verlauf der Feuchtigkeit ein.

5.5.3 Vergleich der Varianten

Tab. 5.1 Tabellarische Übersicht über die untersuchten Varianten

Variante	Farbe	ID	Strömung	Außen Funktion	Unterer Raum Klima - Funktion	Oberer Raum Klima - Funktion
nach außen		Nein	innen -> außen	Senke	Standard - Quelle	Standard
nach innen		Nein	außen -> innen	Quelle	Standard	Standard - Senke
ohne		Nein	keine		Standard	Standard
ID_nach außen		Ja	innen -> außen	Senke	Standard - Quelle	Standard
ID_ohne		Ja	keine		Standard	Standard
trocken_nach außen		Nein	innen -> außen	Senke	trocken - Quelle	Standard
trocken_ohne		Nein	keine		trocken	Standard
innen		Nein	innen -> innen		Standard - Quelle	Standard - Senke
innen_trocken		Nein	innen -> innen		Standard - Quelle	trocken - Senke
ohne_trocken		Nein	keine		Standard	trocken
ID_innen_trocken		Ja	innen -> innen		Standard - Quelle	trocken - Senke
ID_ohne_trocken		Ja	keine		Standard	trocken
luftdicht		Nein	nur Zirkulation		Standard	Standard

Zum Vergleich der einzelnen Varianten wird die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit zu ihrer Temperatur dargestellt, siehe Abb. 5.5.4. Diese Darstellung entspricht auch jener im (WTA-Merkblatt 6-8) zur Beurteilung des Holzzerstörungspotenzials durch Schimmelpilze. Als Grundlage für die Vergleiche dienen die beiden Varianten „nach außen“ und „ohne“ aus Abb. 5.5.3.

Außer der Vergleichbarkeit der Varianten und der Beurteilung der Dauerhaftigkeit kann mithilfe der Darstellung, aus der Form der Wolke, auch der Jahresverlauf der Feuchtigkeit am Tramkopf abgeleitet werden. Die Schräglage bzw. die vertikale Streuung der Punktwolke gibt Auskunft darüber, wie stark der Feuchtigkeitsverlauf innerhalb eines Jahres schwankt. So ist die Punktwolke der Variante „ohne“ flach und gerade, während die übrigen Varianten mit Luftströmung starke Schwankungen und somit auch eine Schiefelage aufweisen.

Der Bauch der Punktwolke hingegen ergibt sich aufgrund des Versatzes der Maximalwerte der Feuchtigkeit gegenüber denen des Innen- und Außenklimas bzw. gegenüber des, in der Grafik dargestellten, Temperaturverlaufs. Die Maximalwerte treten im Frühling und Herbst bei etwa gleichen Temperaturen auf. Im Winter bzw. Sommer liegt die Luftfeuchtigkeit dazwischen, dafür erreichen die Temperaturen ihre Höchst- und Tiefstwerte.

5.5.3.1 Standard-Varianten

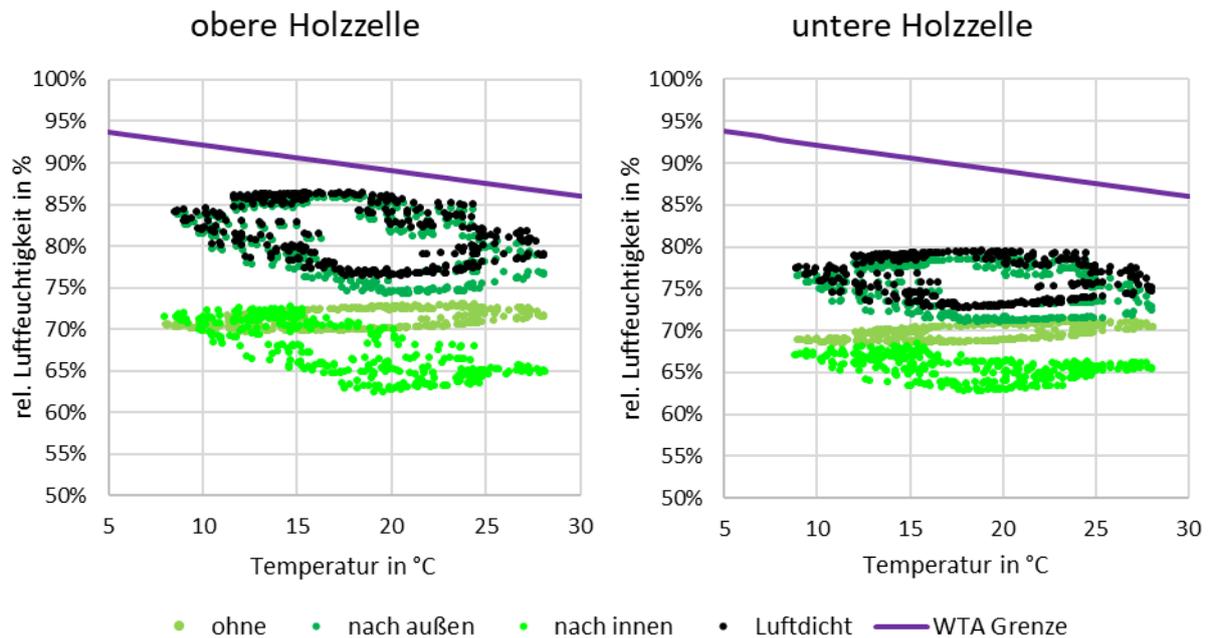


Abb. 5.5.4: Rel. Luftfeuchtigkeit der Holzzellen in Abhängigkeit zur Temperatur der Standard Varianten. Alle Varianten befinden sich unterhalb der WTA-Schimmelrisikogrenze. Eine Strömung nach innen führt zu geringeren Feuchtigkeiten als bei einer Simulation ohne Luftströmung. Zu beachten ist, dass die luftdichte Variante höhere Luftfeuchtigkeiten aufweist als die Variante mit einer Strömung nach außen. Vor allem die negativen Effekte sind in der unteren Holzzelle schwächer ausgeprägt.

In diesen Diagrammen werden die beiden Vergleichsvarianten den Simulationen mit einer Strömung von außen nach innen und der theoretisch luftdichten Variante gegenübergestellt. Werden die zwei Vergleichsvarianten miteinander verglichen ist wie bereits in Abb. 5.5.3 erkennbar, dass bei der Variante „ohne“ nur geringe Unterschiede auftreten. Die unteren Holzzellen weisen eine geringere Schwankung der Feuchtigkeit auf, weshalb sich vor allem im Winter geringere Feuchtigkeiten einstellen. Trotz der höheren Feuchtigkeiten am oberen Tramkopf unterschreiten alle abgebildeten Varianten die festgelegte Grenzkurve nach (WTA-Merkblatt 6-8).

Die Variante „nach innen“ weist wie erwartet geringere Feuchtigkeiten als die anderen Varianten auf. Im Winter treten die gleichen Feuchtigkeiten wie ohne Berücksichtigung einer Luftströmung auf. Im Sommer kann die Konstruktion sogar noch weiter austrocknen. Im Vergleich zu den anderen Varianten fällt auf, dass die Punktwolke in ihren Randbereichen, also im Sommer und Winter, verschwommener ist. Dies kann durch einen geringeren Versatz der Maxima und vor allem durch höhere Abweichungen zur idealisierten Sinuskurve, vergleiche mit Abb. 5.5.3, erklärt werden.

Im Gegensatz dazu ist die Variante „luftdicht“ wesentlich schlechter als vermutet. Vor allem im Sommer, bei höheren Temperaturen, treten dort höhere Feuchtigkeiten als bei den anderen Varianten auf. Aufgrund dieser Simulation könnte angenommen werden, dass eine Leckage in jedem Fall, auch in der simulierten ungünstigen Variante, mit ausschließlicher Strömung nach außen, positive Auswirkungen hat. Demnach besitzen die Konstruktionen mit Leckagen im Sommer ein höheres Trocknungspotenzial und der Großteil der Feuchtigkeitserhöhung erfolgt durch eine Zirkulation der Deckenhohlraumluft. Jedoch sollte hier berücksichtigt werden, dass dies nicht für größere Leckagen gelten muss. Auch bei

Konstruktionen mit getrenntem Luftraum um den Tramkopf und den Deckenzwischenraum sind günstigere Feuchtigkeitsverläufe zu erwarten.

5.5.3.2 Varianten mit Dämmung

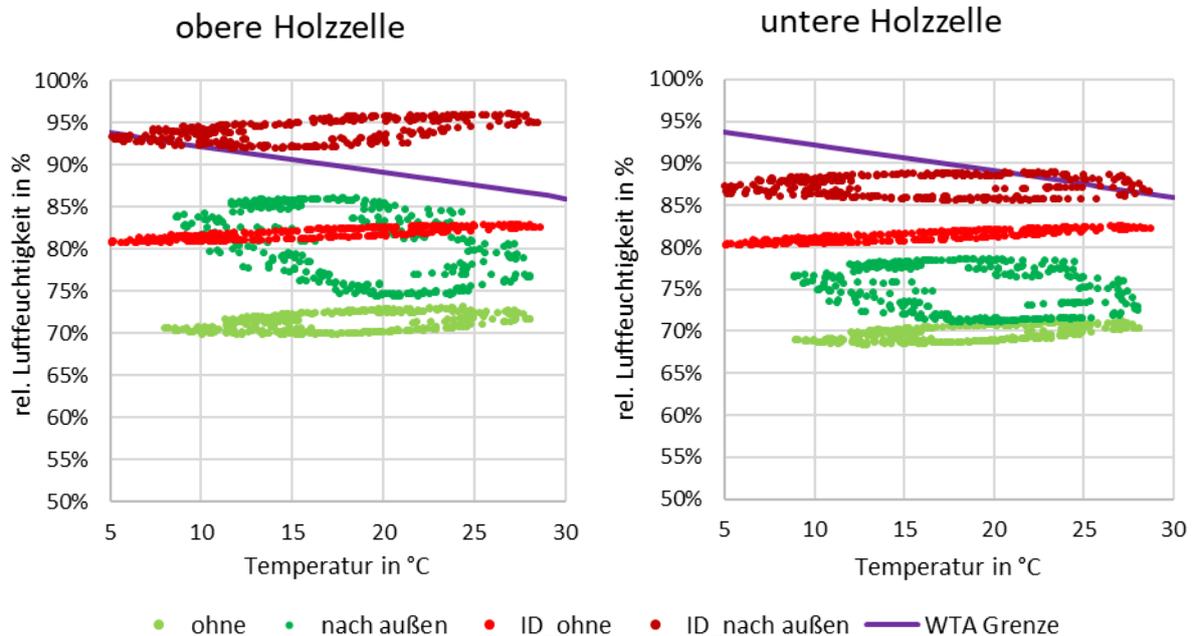


Abb. 5.5.5: Vergleich der Varianten mit Innendämmung. Erst mit Berücksichtigung einer Luftströmung werden kritische Luftfeuchtigkeiten erreicht. Während in den oberen Holzzellen das gesamte Jahr über Schimmelbildung möglich ist, werden in den unteren Holzzellen nur im Sommer kritische Luftfeuchtigkeiten erreicht.

Auffallend bei den Varianten mit ID sind die erwarteten höheren Feuchtigkeiten. Die absolute Holzfeuchtigkeit ist dabei etwa doppelt so hoch als bei der Variante „nach außen“. Die höheren Feuchtigkeiten sind auf die doch wesentlich niedrigeren Temperaturen vor der gedämmten Schicht zurückzuführen. Betrachtet man die relative Luftfeuchtigkeit bei der Leckage nach außen erkennt man, dass diese fast das ganze Jahr über bei 100 % liegt und es deswegen zu Kondensationen kommt. Diese hohe Feuchtigkeit muss aufgenommen werden, dabei dient der Tramkopf als Puffer. Die Folge sind hohe Feuchtigkeiten bei im Vergleich niedrigeren Temperaturen. So liegt die Variante mit ID und Luftströmung durchgehend im gefährdeten Bereich, eine derartige Konstruktion wäre demnach nicht zulässig. Interessant ist auch, dass bei der selben Konstruktion an der Unterseite des Tramkopfes die Feuchtigkeiten fast das gesamte Jahr über im unkritischen Bereich bleiben.

Betrachtet man die Varianten mit Dämmung fällt auf, dass das Maximum der Feuchtigkeit versetzt ist, jedoch geringer als bei der Variante ohne Innendämmung. Die höchsten Luftfeuchtigkeiten treten dabei nicht im Winter, sondern im Sommer auf. Es kommt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Feuchtigkeit mit einer kurzen Trocknungsphase. Woraus die oben erwähnte hohe und auch konstante relative Luftfeuchtigkeit resultiert. Somit weist die Punktwolke auch eine geringere vertikale Streuung, ähnlich der Variante „ohne“ auf. In der unteren Zelle des Tramkopfes kommt es zu einer längeren Trocknungsphase und somit auch zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Feuchtigkeit.

Bei der Variante „ID_ohne“ fallen die jährlichen Schwankungen noch geringer aus. Es ist praktisch auch kein Unterschied zwischen den beiden Zellen oben und unten feststellbar. Im Gegensatz zur Variante mit Strömung wird die Grenzkurve das gesamte Jahr über nicht überschritten. Dadurch besteht die

Gefahr, bei einer Vernachlässigung der Luftströmung, die eigentlich kritischen Feuchtigkeiten zu unterschätzen.

5.5.3.3 Varianten mit trockenem Quellraum

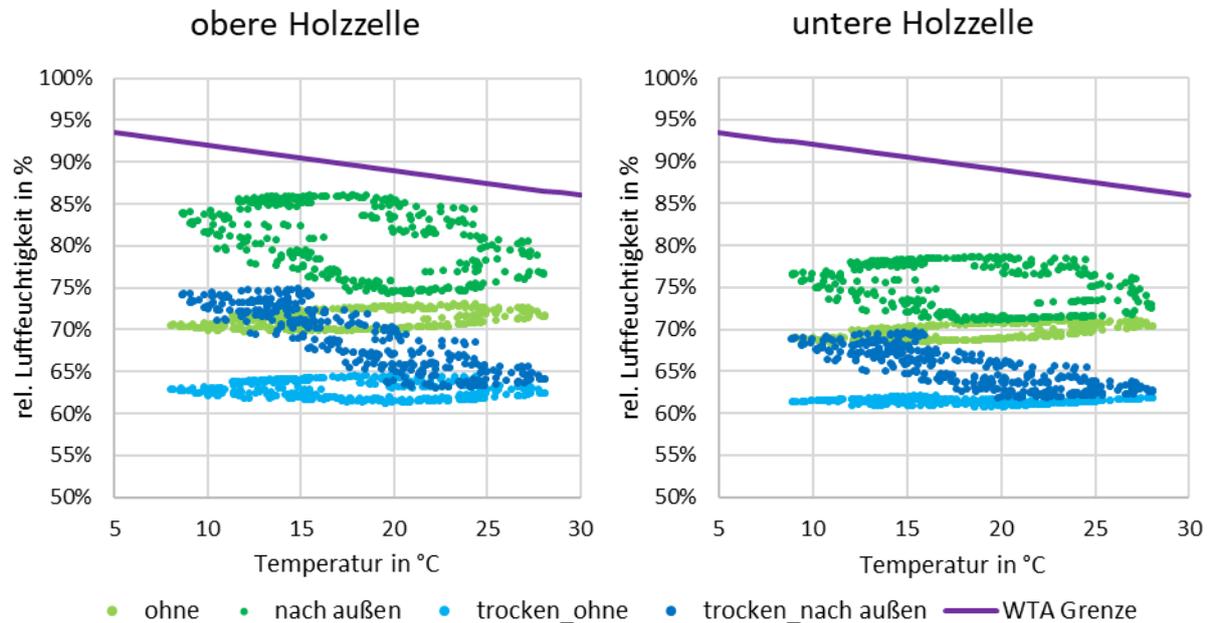


Abb. 5.5.6: Vergleich der Varianten mit trockenerem Innenklima im Quellraum. Die durchströmten Varianten trocknen im Sommer bis zu den Luftfeuchtigkeiten aus, welche bei gleichem Klima aber ohne Luftströmung erreicht werden. Dabei treten niedrigere Luftfeuchtigkeiten auf, als bei der Referenzsimulation ohne Luftströmung.

Bei den Varianten mit trockenerem Klima im Quellraum treten wie erwartet geringere Feuchtigkeiten auf. Die Konstruktion kann aufgrund des trockenen Klimas auch bereits früher zu trocknen beginnen. Dadurch ergibt sich die höchste Feuchtigkeit im Winter und die geringste im Sommer, dann wenn auch die höchste relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum auftritt. Somit fallen bei dieser Variante der Höchstwert des Innenklimas und das Minimum in der Holzzelle beinahe zusammen. Dies führt zu einer beinahe bauchlosen Punktwolke.

Beiden Varianten gelingt es sogar in den Poren der Holzzellen die rel. Luftfeuchtigkeit des Innenklimas (65% im Sommer) zu unterschreiten. Daraus kann ein hohes Trocknungspotenzial abgelesen werden. Durch dieses gelingt es der durchströmten Konstruktion sogar die Werte der Variante ohne Luftströmung zu erreichen.

Durch die relativ trockene Konstruktion sind auch die Differenzen zwischen der oberen und unteren Holzzelle kleiner als bei den Varianten mit Standardklima.

5.5.3.4 Varianten mit einer Strömung von unten nach oben

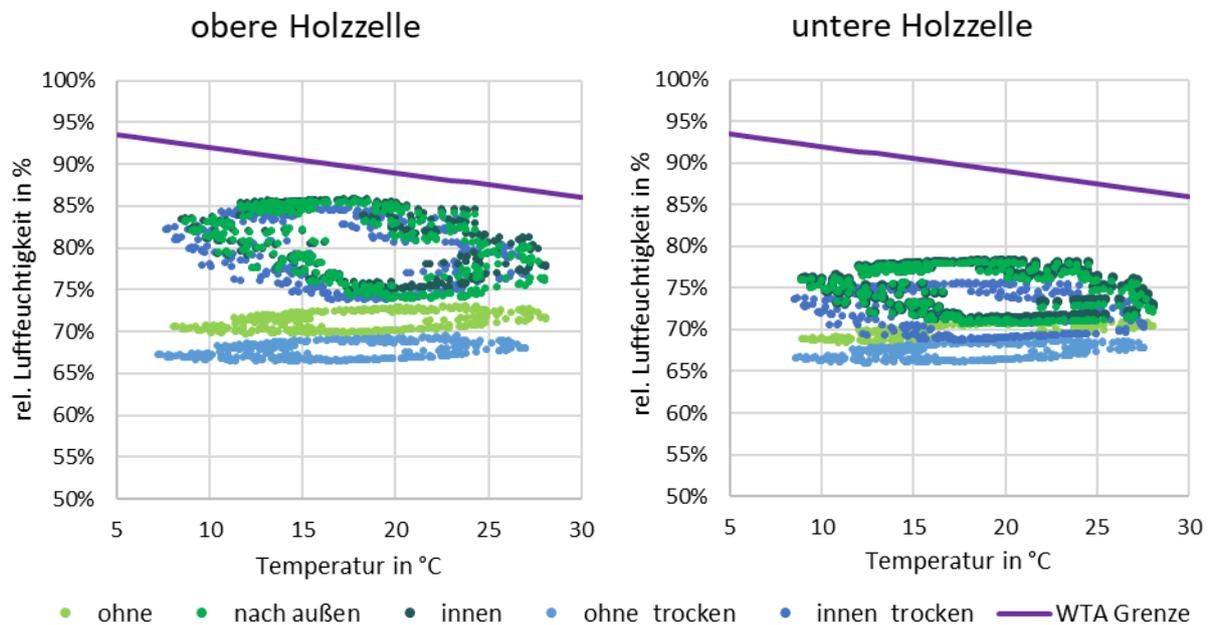


Abb. 5.5.7: Vergleich der Varianten mit Strömung von unten nach oben und trockenerer Senke. Bei einer Strömung zwischen den beiden Innenräumen kommt es zu den gleichen Luftfeuchtigkeiten wie bei einer Strömung von innen nach außen. Auch ein trockeneres Innenklima in der Senke führt zu den gleichen Luftfeuchtigkeiten. Bei den Varianten ohne Luftströmung kommt es hingegen zu einer erkennbaren Reduktion der Luftfeuchtigkeit.

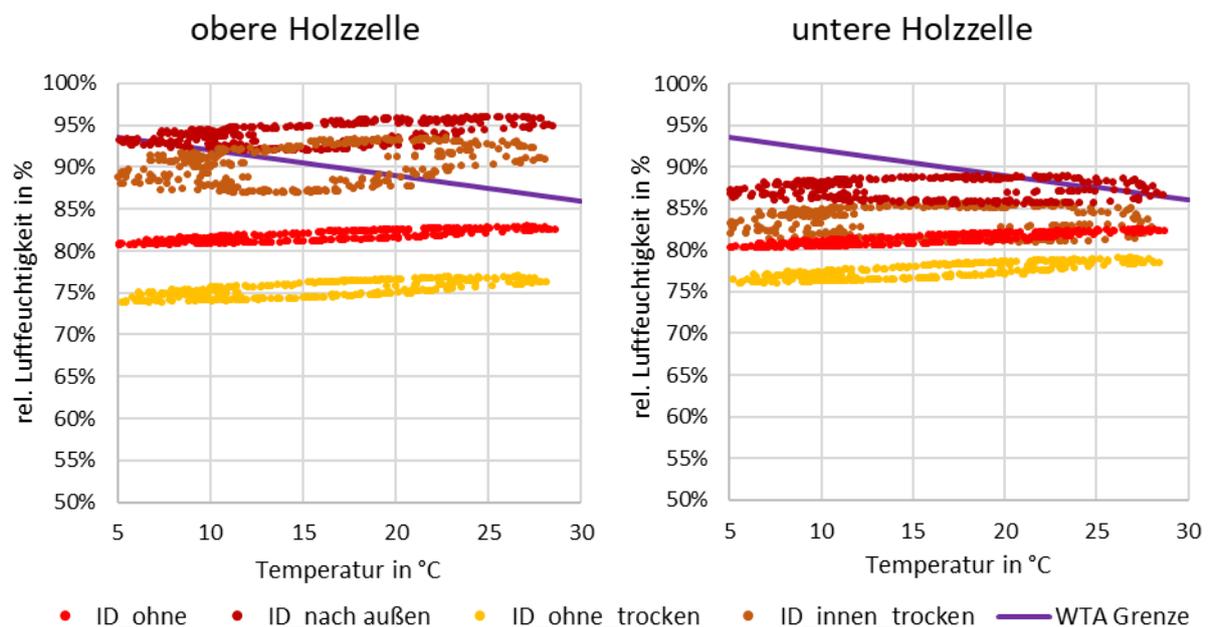


Abb. 5.5.8: Vergleich der Varianten mit Strömung von unten nach oben und Innendämmung. Im Vergleich zu den Varianten ohne Innendämmung kommt es hier auch bei einer Luftströmung zu geringeren Luftfeuchtigkeiten. In der oberen Holzzelle werden dennoch über einen Großteil des Jahres die Grenzfeuchtigkeiten nach WTA überschritten.

In diesem Kapitel wird der alternative Strömungspfad vom unteren in den oberen Raum betrachtet. Vergleicht man die Feuchtigkeiten mit identischem Innenklima, also nur ein neuer Strömungspfad, erhält man fast identische Werte. Hierdurch wird deutlich, dass die innere Leckage, durch welche Luft in die Konstruktion strömt, wesentlich größeren Einfluss hat als die Leckage, an welcher die Luft die

Konstruktion verlässt. Weder die Position noch das vorherrschende Klima haben einen großen Einfluss auf die Feuchtigkeit. Betrachtet man die Variante „innen_trocken“ wird diese Erkenntnis wieder durch minimale Abweichungen mit dem dritten unterschiedlichen Klima (trockenerer Senkenraum) bestätigt.

Bei der im Senkenraum trockeneren Variante ohne Strömung kommt es, im Vergleich zur Variante „trocken_ohne“, zu einer geringeren, aber dennoch deutlichen Reduzierung der Feuchtigkeit. Durch die Vernachlässigung der Luftkonvektion bleibt nur mehr die Feuchtediffusion als Feuchtequelle übrig. Diese ist in erster Linie von den umgebenden Klimabedingungen abhängig, so wirkt sich ein trockeneres Innenklima direkt auf den Feuchtegehalt in der Konstruktion aus. Im Vergleich zu einem trockeneren Quellraum kommt es jedoch zu einer geringeren Reduktion, da hier die Schüttung und der Fußbodenaufbau als zusätzliche Dämmung bzw. als Widerstand wirken und somit einen Teil der positiven Auswirkungen wieder relativieren.

Anders verhält es sich bei den Varianten mit Innendämmung und trockenerem Senkenraum, hier kommt es bei beiden Varianten zu einer deutlichen Reduktion der Feuchtigkeit. In der unteren Holzzeile wird die Feuchtigkeit so weit reduziert, dass trotz Luftströmung die Grenzwerte nicht überschritten werden. Bei der Variante ohne Luftströmung werden hingegen in der unteren Holzzeile höhere Feuchtigkeiten erreicht als in der oberen. Die beiden Varianten mit trockenerem Senkenraum weisen auch eine höhere Schwankungsbreite der Feuchtigkeit auf.

5.5.3.5 Vergleich der Tramkopffeuchtigkeiten

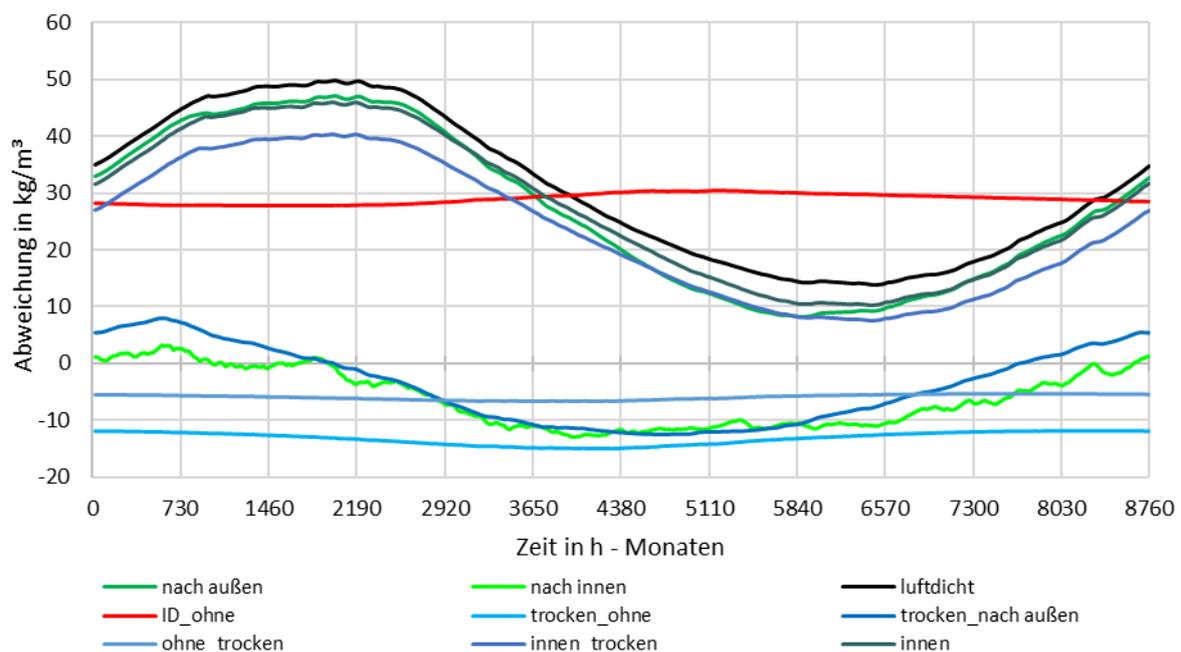


Abb. 5.5.9: Absolute Feuchtigkeitsdifferenz zur Variante „ohne“ in der oberen Holzzeile. Man erkennt die jährlichen Schwankungen der Varianten mit Strömung und deren geringe Unterschiede zueinander. Die Ausnahme dazu bildet die Variante mit trockenerem Quellraum und Strömung nach außen, bei dieser Variante stellen sich ähnliche Feuchtigkeiten wie bei einer Strömung nach innen ein.

In Abb. 5.5.9 sind die Verläufe der Feuchtigkeiten, an der oberen Holzzeile, relativ zur Variante „ohne“ dargestellt. Man kann gut erkennen, dass sich jede Konstruktion wieder dem Durchschnittswert ihrer jeweiligen Variante ohne Strömung annähert. Daraus kann man schließen, dass nicht nur die negativen Effekte im Winter sondern auch die positiven Trocknungseffekte im Sommer verstärkt werden. Bei den

Varianten mit Innendämmung und einer Luftströmung nach außen ist am deutlichsten sichtbar wie die Konstruktion in den Sommermonaten austrocknen kann, jedoch liegt die Feuchtigkeitsdifferenz dabei um das Vierfache über den übrigen Varianten. Deswegen wurde zur Übersichtlichkeit auf eine Abbildung dieser Kurven verzichtet. Die Varianten ohne Strömung, sowohl jene mit ID als auch jene mit trockenerem Innenklima, sind praktisch nur parallel versetzt.

In dieser Grafik sieht man auch, dass die Strömung nach außen und die Strömung von innen nach innen nur marginale Unterschiede aufweisen. Da die Strömung von innen nach innen als am wahrscheinlichsten angesehen werden kann, ist dies ein Indiz dafür, dass derartige Feuchtigkeiten häufig auftreten. Dies wäre auch der Fall, wenn beispielsweise nur die Außenfassade renoviert wurde, also die luftdichte bzw. winddichte Außenschicht wiederhergestellt wurde.

Besonders deutlich erkennt man die durchgehend höhere Feuchtigkeit der luftdichten Variante gegenüber einer Strömung nach außen oder innen. Auch die positiven Effekte einer Strömung von außen nach innen sind gut erkennbar. Hier liegen die Feuchtigkeiten fast durchgehend unter jenen der Variante ohne Luftströmung. Vergleichbar sind diese Werte mit einer Strömung nach außen bei trockenem Innenklima.

Betrachtet man den unteren Teil des Tramkopfes, ergeben sich für die einzelnen Varianten geringere Differenzen zu den jeweiligen Varianten ohne Strömung. Für die Variante mit Strömung nach außen etwa nur die Hälfte. Dies ergibt insofern Sinn, da die Konvektion größeren Einfluss haben sollte, je mehr Luft die betrachtete Holzzelle umströmen kann.

5.6 Zusammenfassung

Die meisten untersuchten Varianten erfüllen die Anforderungen hinsichtlich Temperatur und relativer Porenluftfeuchtigkeit nach (WTA-Merkblatt 6-8). Von den untersuchten Varianten weisen nur jene mit einer Innendämmung und einer berücksichtigten Luftströmung ein Schimmelrisiko auf.

Allgemein ist eine Berücksichtigung der Luftströmung aber auf jeden Fall sinnvoll, da ohne Berücksichtigung der Luftströmung in den meisten Fällen höhere Feuchtigkeiten aufgetreten sind. Eine Ausnahme bildet hier die untersuchte Variante mit einer Strömung von außen nach innen. Besonders problematisch ist eine Vernachlässigung der Luftströmung bei einer aufgetragenen Innendämmung. Bei dieser ansonsten kritischen Konstruktion würden die Anforderungen nach (WTA-Merkblatt 6-8) erfüllt werden und es würde eine Zerstörung der Holzkonstruktion und gegebenenfalls auch eine Belastung der Innenräume durch Schimmelpilze stattfinden.

Bei den Varianten mit Innendämmung sollte jedoch auch berücksichtigt werden, dass bei einer entsprechenden Trennung des Tramkopfhohlraums und des Deckenhohlraums nach (WEGERER-17) geringere Feuchtigkeiten zu erwarten sind. Durch eine entsprechende Trennung kann weniger Feuchtigkeit vom Deckenhohlraum in den kühleren Tramkopfbereich transportiert werden. Die Auswirkungen dieses Feuchtetransports werden im Vergleich der Varianten „luftdicht“ und „ohne“ in Abb. 5.5.9 deutlich sichtbar.

Die tatsächlich auftretende Feuchtigkeit, in einer Konstruktion ohne Innendämmung, wird zwischen den Varianten „nach außen“ und „trocken_nach außen“ liegen. Wobei der günstige Fall mit einer Strömung von außen nach innen, trotz des feuchteren Klimas, der trockenen Strömung nach außen entspricht. Währenddessen stimmen die Feuchtigkeiten einer Strömung nach außen größtenteils mit den Feuchtigkeiten einer Strömung von innen nach innen überein. Somit stellen die oben genannten Varianten sinnvolle Grenzfälle für den Großteil der vorkommenden Feuchtigkeiten dar.

Es sollte auch beachtet werden, dass die Simulationen ohne Schlagregenbelastung durchgeführt wurden. Demzufolge wären nach (SCHWALLER-14) bei einer Fassade mit entsprechender Ausrichtung höhere Feuchtigkeiten und somit auch eine kritischere Bewertung zu erwarten. Eine andere Ausrichtung der Fassade würde auch zu veränderten Windverhältnissen führen, so würden vermehrt die positiven Effekte einer wechselnden Windbeanspruchung zum Tragen kommen.

Was noch berücksichtigt werden sollte sind mögliche größere Leckagen als jene welche in der Simulation angenommen wurden. Nach den Überlegungen aus Kapitel 3.5.2.3 stellt die gewählte Leckage eine durchschnittlich luftdichte Konstruktion dar. Verändert man jedoch die betrachtete Bezugsfläche kann man auch eine besonders luftdichte Konstruktion erhalten (siehe auch Kapitel 3.5.2.2). Es wäre also möglich, dass sich anders als in den durchgeführten Simulationen in der Praxis höhere Strömungen durch die Konstruktion ergeben. Dadurch würden wiederum die negativen Effekte einer Strömung nach innen verstärkt, aber auch die positiven Trocknungseigenschaften bei einer Strömung von außen nach innen oder bei trockenerem Innenklima im Quellraum.

6 Zusammenfassung

6.1 Messung des Luftvolumenstroms

Die Messungen ob ein Luftvolumenstrom im Bereich der Tramaufleger stattfindet bzw. wie hoch dieser ist fanden in einem Wiener Gründerzeithaus statt. Bei diesem wurden drei übereinanderliegende Geschosdecke untersucht. Die jeweiligen Fußbodenaufbauten und Deckenuntersichten unterschieden sich dabei von Raum zu Raum. In einem Raum war eine Gardinenleiste über den Fenstern montiert, im zweiten eine vollständig verputzte Decke und im dritten eine abgehängte Decke. Bei den ersten beiden Räumen wurden nach der jeweils ersten Messung zusätzliche Leckagen angebracht. Im dritten Raum waren aufgrund der abgehängten Decke bereits zahlreiche Löcher vorhanden weshalb dort zusätzliche Leckagen keinen Sinn machten. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Fußböden zu minimieren wurden diese im Bereich der Tramköpfe entfernt.

Der Massenstrom wurde nicht direkt gemessen, sondern über CO_2 -Messungen in dem unteren abgedichteten Raum (Quelle) und einem abgedichteten Bereich bei den Tramköpfen (Senke) berechnet. Um eine Änderung der Konzentration messen zu können wurde der Quellraum mit CO_2 geflutet und der CO_2 -Anstieg in der Senke gemessen. Deswegen war es notwendig in der Quelle einen Überdruck zu erzeugen, dieser wurde mit einem Blower-Door-Ventilator aufgebracht. Der Druckunterschied wurde dabei zwischen den beiden Räumen gemessen, zwischen denen der Ventilator eingebaut wurde. Damit kein Überdruck in der Senke entsteht wurde diese mit einer Druckausgleichsöffnung versehen. Weiters wurden noch Ventilatoren in der Senke platziert um dort eine gute Durchmischung der Luft zu gewährleisten und um zu verhindern, dass einzelne Sensoren zu hohe oder zu niedrige Konzentrationen messen. Für die Erstellung einer Strömungsgleichung (1) wurde der Massenstrom bei verschiedenen Druckstufen berechnet.

Durch die gleichzeitig im Gebäude durchgeführten Bauarbeiten waren die Fenster der gegenüberliegenden Außenmauer durchgehend geöffnet. Dadurch kam es zu hohen zusätzlichen Winddrücken. Da der Druckunterschied nicht direkt zwischen Quelle und Senke gemessen wurde, musste der gemessene Druckunterschied um ein ΔP korrigiert werden. Dieses beinhaltet vor allem die zusätzlichen Winddrücke aber auch andere unbekannte Faktoren wie den thermischen Auftrieb.

Somit ergeben sich drei unbekannte Parameter (C , n und ΔP), welche aus den Massenströmen und den zugehörigen Druckstufen bestimmt werden müssen. Durch die dritte Unbekannte ist eine eindeutige mathematische Lösung nicht mehr möglich. Die Anpassung der Parameter erfolgte händisch, wobei die Ergebnisse der Strömungsgleichung mit den Messdaten verglichen wurden. Durch die händische Anpassung der Parameter ergibt sich jedoch eine zusätzliche Ungenauigkeit für die Parameter. Deswegen sollte bei zukünftigen Untersuchungen besser der Druckunterschied zwischen Quelle und Senke direkt gemessen werden. Hinzu kommt, dass auch der Auswertungszeitraum für eine Druckstufe, welcher für die Berechnung des Massenstroms benötigt wird, manuell festgelegt wird. Dabei können bereits geringe Verschiebungen dieses Zeitbereichs zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Aus den Parametern C und n wurden für die einzelnen Messungen Strömungsgleichungen gebildet, welche miteinander verglichen wurden. Um einen Vergleich der Ergebnisse mit den Untersuchungen von (NUSSER-12) zu ermöglichen wurde der Volumenstrom auf die gesamte Deckenuntersicht bezogen. Die so berechneten Parameter liegen in der Größenordnung der Luftdichtheitsklassen von Nusser und auch denen von Zirkelbach, daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse realistische Werte wiedergeben.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Deckenuntersicht die maßgebende luftdichte Schicht darstellt. Im vollständig verputzten Zustand ist diese praktisch luftdicht und sogar dichter als die Luftdichtheitsklasse A+ nach Nusser. Auch die Messungen mit undichteren Deckenuntersichten und zusätzlichen Leckagen sind den Luftdichtheitsklassen nach Nusser zuordenbar, diese entsprechen im Schnitt der Klasse A. Die Ausnahme bilden dabei die Messungen mit einer abgehängten Decke, welche aufgrund ihrer zahlreichen Löcher und Durchdringungen zu sehr hohen Volumenströmen führen und dadurch als undicht zu klassifizieren sind. Am letzten Messtag kam es vermutlich aufgrund hoher Windkräfte und zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen zu einer Luftströmung von der Senke in den oberen Raum und damit zu geringeren Messwerten in der Senke. Deswegen wäre es auch vorteilhaft den Druckunterschied zwischen Senke und oberen Raum zu messen, damit besser beurteilt werden kann ob eine Strömung aus der Senke stattfindet. Jedenfalls ist nur eine Druckausgleichsöffnung anzubringen um eine Zirkulation der Luft weitgehendst ausschließen zu können.

Es sollte auch beachtet werden, dass der Volumenstrom auf die gesamte Deckenuntersicht bezogen wird. Für lokale Leckagen in Auflagernähe, wie einer Gardinenleiste, ist jedoch die Deckengröße nicht ausschlaggebend. Würde man die Ergebnisse des Volumenstroms auf einen kleineren Raum umlegen würde dies zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Massenstroms führen. Für solche Leckagen könnte es sinnvoller sein den Volumenstrom auf einen Meter Auflagerlänge zu beziehen.

Die Messungen haben gezeigt, dass es durchaus zu einer Luftströmung um den Tramkopf kommen kann. Dabei richtet sich der Volumenstrom vor allem nach dem Zustand der Deckenuntersicht und reicht von praktisch luftdicht bis zu sehr undicht. Der Zustand der Deckenuntersicht ist wiederum von den Nutzern des Gebäudes abhängig und richtet sich nach deren Bedürfnissen und der Qualität der durchgeführten Arbeiten.

6.2 Bestimmung typischer Druckunterschiede

Für die hygrothermische Simulation des Tramkopfdetails sollten die auftretenden Druckunterschiede untersucht werden. Dazu wurden Temperaturmessungen in einer Wohnung eines Gründerzeithauses durchgeführt. Aus diesen Messwerten wurde der gebäudeinterne thermische Auftrieb bestimmt. Dabei handelt es sich um eine Luftströmung zwischen zwei übereinanderliegenden Wohnungen und einem kühleren Treppenhaus.

Bei derselben Wohnung wurden auch die Außentemperaturen gemessen. Dadurch war es möglich den Druckunterschied infolge des Kamineffekts (im englischen Stack Effect) zu bestimmen. Dieser beschreibt eine Luftzirkulation zwischen den Innenräumen und dem Außenbereich über zwei Leckagen in der Gebäudehülle. Für die Bestimmung des Druckunterschiedes, welcher aus dem Winddruck resultiert, wurden Messwerte aus der Wetterstation der BOKU verwendet.

Der gebäudeinterne Auftrieb und der Stack Effect sind gut miteinander vergleichbar. Der Stack Effekt ist bei der untersuchten Wohnung bis zu siebenmal so hoch wie der Auftrieb. Dies ist auf die größeren Temperaturunterschiede zwischen innen und außen, im Vergleich zu den geringeren Differenzen im Gebäudeinneren, zurückzuführen. Der Druckunterschied (95% Quantil) für den Stack Effect liegt bei 2 Pa, wenn für den Leckageabstand die Geschoßhöhe herangezogen wird. Im Vergleich dazu liegt das 95 % Quantil für den Winddruck bei etwa 40 Pa, also eine Größenordnung höher als bei Stack Effect und Auftrieb. Der maximale Winddruck liegt sogar bei über 200 Pa.

Als Näherung für die Simulation kann für den Auftrieb und Stack Effect eine Sinus-Funktion, welche den Monatsmittelwerten nachempfunden wird, angesetzt werden. Für eine genauere Abbildung des

Stack Effects ist auch eine kombinierte Sinus-Cosinus-Funktion möglich. Mit dieser können zusätzlich die Spitzen der Schwankungen abgebildet werden. Wird der Winddruck bei der Simulation berücksichtigt sollten reale Messdaten bzw. Klimadaten eines Referenzjahres verwendet werden. Für den kritischen Fall des Windsoges bietet sich an, die positiven Drücke des Referenzklimas als negative Druckdifferenz (Windsog) anzusetzen. Der Auftrieb und Stack Effekt können dabei durch eine Sinusfunktion berücksichtigt werden oder aufgrund der geringeren Größenordnung vernachlässigt werden.

6.3 Simulation eines umströmten Tramkopfdetails

Im letzten Kapitel werden die auftretenden Feuchtigkeiten eines Tramkopfes im eingeschwungenen Zustand betrachtet. In weiterer Folge soll daraus die Gefährdung des Tramkopfs durch Schimmelpilze festgestellt werden. Dazu wurden 4-Dimensionale hygrothermische Simulationen mit dem Finite-Differenzen-Programm HAM4D durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen war die Auswirkungen einer Luftdurchströmung um den Tramkopf zu bestimmen. Dazu wurden verschiedene Varianten miteinander verglichen (siehe Tab. 5.1). Um beurteilen zu können ob eine Simulation mit Luftströmung notwendig ist, wurden auch alle Varianten ohne Luftströmung simuliert. Bei den Varianten wurden verschiedene Strömungspfade und Klimarandbedingungen angesetzt. Die unterschiedlichen Strömungspfade sind: Luftströmung von innen nach außen, von außen nach innen und zwischen den Innenräumen, von unten nach oben. Auch eine sanierte Konstruktion mit Innendämmung wurde simuliert.

Bei dem gewählten Modell handelt es sich um eine 40 cm starke Vollziegelmauer in welche ein 16/24 cm starker Tram aus Nadelholz eingelassen ist. Auf der Unterseite befindet sich auf einer Holzschalung ein einfacher Kalkputz während oberhalb wieder eine Schalung mit darüberliegender Sandschüttung und Holzfußboden gewählt wurde. Das verwendete Modell ist in Abb. 5.4.1 dargestellt. Für die Konstruktionen mit Innendämmung wurde der kritischere Fall gewählt, bei welchem die Innendämmung nur bis zur Schalung ober- und unterhalb des Deckenhohlraumes reicht und somit die Hohlräume zwischen den Trämen und jener um den Tramkopf miteinander verbunden sind.

Die Materialkenngrößen wurden großteils aus der Materialdatenbank von (MASEA) entnommen. Die Ausnahme dazu waren die Kennwerte für die Schüttung, da bei dieser keine vollständigen Kennwerte aus der Literatur verfügbar waren. Die fehlenden Kenngrößen wurden näherungsweise aus den Kennwerten für Ziegel abgeleitet.

Für das Innenklima wurden Klimasätze erstellt, welche einen sinusförmigen Verlauf der Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufweisen. Für die Varianten mit trockenem Innenklima wurde die Luftfeuchtigkeit von 50-65 % auf 30-65 % reduziert. Die Temperatur schwankt dabei zwischen 22 und 26 °C. Für das Außenklima wurde das Referenzklima der Hohen Warte genommen, welches bereits in Kapitel 4.4 beschrieben wurde. Die auftretenden Druckdifferenzen wurden aus denselben Klimadaten herangezogen. Die Druckdifferenzen entsprechen dabei einem angreifenden Windsog bzw. Winddruck und sind ausschließlich positiv oder negativ. Es wurden auch für alle Strömungspfade die gleichen Druckdifferenzen angesetzt.

Die für eine Luftströmung notwendigen Leckagen wurden als runde Löcher mit einem Durchmesser von etwa 1 mm festgelegt. Aufgrund der relativ kleinen Deckenfläche des Simulationsmodells entspricht diese Leckage trotzdem noch der Luftdichtheitsklasse A nach Nusser. Die Position der Leckage zum unteren Raum wurde am Tramaufleger an der inneren Mauerkante gewählt. Für die zweite Leckage wurde die Position je nach Strömungsrichtung variiert. Bei einer Strömung nach bzw. von außen

wurde sie an der Tramkopfstirnseite in das obere Eck des Hohlraums gelegt, während sie bei einer Strömung von innen nach innen horizontal nach innen, bis in Mitte des Tramkopfauflegers, verschoben wurde.

Als Grundlage für die Vergleiche der Ergebnisse (siehe Abb. 5.5.5 bis Abb. 5.5.9) wurde die Variante mit einer Konstruktion ohne Innendämmung und einer Strömung von innen nach außen herangezogen. Die Ergebnisse der Simulationen haben gezeigt, dass die Berücksichtigung einer Luftströmung nicht nur zu höheren Feuchtigkeiten, sondern auch zu einer Feuchteschwankung im Jahresverlauf geführt hat. Das Maximum der Feuchtigkeit tritt dabei im Frühjahr auf, somit ergibt sich im Vergleich zum Innenklima ein versetzter Verlauf. Bei den Vergleichsvarianten ohne Luftströmung stellt sich hingegen eine geringere, fast konstante Feuchtigkeit im Jahresverlauf ein.

Durch ein trockeneres Innenklima im Quellraum können die auftretenden Feuchtigkeiten reduziert werden. Vergleichbar sind diese Ergebnisse mit einer Strömung von außen nach innen. Bei einer Luftströmung von innen nach innen tritt kein nennenswerter Unterschied zu einer Strömung von innen nach außen auf. Es ist somit ersichtlich, dass für den Feuchteverlauf vor allem das Quellklima, jenes aus dem die Luft in die Konstruktion strömt, maßgeblich ist. Die Varianten ohne Innendämmung weisen nur Kombinationen von Feuchtigkeit und Temperatur auf, welche sich noch unter den kritischen Werten für Schimmelbildung befinden. Es gilt jedoch zu beachten, dass für die Simulation eine Südfassade angenommen wurde, bei welcher der Schlagregen komplett vernachlässigt wurde. In der Realität sind demnach kritischere Verhältnisse möglich, vor allem bei einer West- oder Nordfassade.

Einzig Varianten mit Innendämmung müssen als kritisch bewertet werden. Diese weisen über das gesamte Jahr hinweg kritische Feuchtigkeiten auf. Bei den Vergleichssimulationen ohne Luftströmung aber mit Innendämmung werden die Grenzwerte eingehalten. Wodurch deutlich wird, dass durch eine Vernachlässigung der Luftströmung eine Unterschätzung des Schimmelrisikos erfolgt.

Es wurden auch Varianten mit einem anderen Klima im oberen Raum untersucht. Bei einer Strömung von innen nach innen treten jedoch praktisch keine Verbesserungen zur Standardvariante mit Strömung nach außen auf. Dadurch wird bestätigt, dass das hineinströmende Klima maßgebender ist. Hinzu kommt, dass die Schüttung wie eine Dämmung wirkt und somit den Tramkopf abschirmt. Dies wird auch durch die geringere Verbesserung, im Vergleich zu trockenerem Quellenklima, bei der Variante ohne Luftströmung deutlich. Bei den Varianten mit Innendämmung kommt es hingegen zu einer deutlicheren Verbesserung. Trotzdem bleiben die Feuchtigkeiten bei einer Luftströmung noch im kritischen Bereich.

Besonders interessant ist die untersuchte luftdichte Variante. Bei dieser kommt es zu einer Zirkulation zwischen Tramzwischenraum und Tramkopfhohlraum aber nicht zu einer Strömung nach innen oder außen. Diese Variante führt sogar zu höheren Feuchtigkeiten als eine Strömung nach außen. Daraus könnte abgeleitet werden, dass eine Leckage immer zu geringeren Feuchtigkeiten führt. Jedoch sind hier noch die gewählten Randbedingungen zu beachten, also kleine Leckagen, zusammenhängender Luftraum, keine Innendämmung und feuchtes Innenklima. In dieser Arbeit konnte auch nicht geklärt werden welchen Einfluss die Größe der Leckage und die Höhe des Druckunterschiedes auf den Feuchtigkeitsverlauf im Tramkopf haben. Auch auf eine intensivere Betrachtung der Verteilung der Leckagen wurde verzichtet. Also ob nur am Auflager oder über der gesamten Decke verteilt Leckagen auftreten.

Es sollte auch bedacht werden, dass in den Simulationen mit dem schlechtesten möglichen Fall, nämlich einem ständig negativen Winddruck, gerechnet wurde. In der Realität werden aber wechselnde Beanspruchungen auftreten, also sowohl positive als auch negative Effekte für die Konstruktion. Die tatsächliche Feuchtigkeit wird also zwischen den Ergebnissen der Varianten nach außen und nach innen

liegen. Zumal auch das tatsächliche Innenklima bei alten Gründerzeithäusern mit herkömmlichen Radiatoren und ohne Wohnraumlüftung eher an das trockene Innenklima heranreichen wird.

7 Literaturverzeichnis

- (WEGERER-12) Wegerer, Paul; Neusser, Maximilian; Bednar, Thomas: Auswirkungen der Luft(un)dichtheit auf die Feuchtebelastung von Konstruktionen mit Innendämmsystemen. In: 7th International BUILDAIR-Symposium. Stuttgart, 11-12. 5. 2012.
- (WEGERER-17) Wegerer, Paul; Bednar, Thomas: Hygrothermal performance of wooden beam heads in inside insulated walls considering air flows. In: 11th Nordic Symposium on Building Physics. Trondheim, 11-14. 6. 2017.
- (GIEBELER-08) Giebeler, Georg; Fisch, Rainer; Krause, Harald; Musso, Florian; Petzinka, Karl-Heinz; Rudolphi, Alexander: Atlas Sanierung. Instandhaltung, Umbau, Ergänzung. Basel: Birkhäuser Verlag; 2008.
- (HAGENTOFT-01) Hagentoft, Carl-Eric: Introduction to building physics. Schweden: Studentlitteratur; 2001.
- (KLOSE-08) Klose, Brigitte: Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2008 (Springer-Lehrbuch).
- (PECH-06) Pech, Anton; Kolbitsch, Andreas; Zach, Franz: Decken. Wien: Springer-Verlag; 2006 (Baukonstruktionen, 5).
- (RICCABONA-10) Riccabona, Christof: Baukonstruktionslehre 1. Rohbauarbeiten. 7. Aufl. Wien: Manz; 2010.
- (RICCABONA-13) Riccabona, Christof; Bednar, Thomas: Baukonstruktionslehre 4. Bauphysik. 9. Aufl. Wien: Manz; 2013.
- (Anleitung HAM4D-VIE-15) Anleitung HAM4D-VIE: Anleitung HAM4D-VIE. Hg. v. Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz. Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie. Wien; 12.2015.
- (HALL-13) Hall, M.; Hauser, G.: In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart. Hg. v. Universität Kassel Fachgebiet Bauphysik. Kassel; 5.2013 (AIF-Forschungsvorhaben, 12611 N). Online verfügbar unter www.uni-kassel.de/fb06/fachgebiete/architektur/bauphysik/forschung/abgeschlossene-projekte/luftdichtheit/in-situ.html, zuletzt geprüft am 16.03.2018.
- (SOLCHER-13) Solcher, Oliver: FLIB Infoblatt. Infoblatt 12/2013 - Prüfbericht nach DIN EN 13829 Teil 2. Hg. v. Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V (FLIB). Berlin; 12.2013. Online verfügbar unter <https://www.flib.de>, zuletzt geprüft am 23.01.2018.
- (SWAMI-87) Swami, Muthusamy; Chandra, Subrato: Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings. Work Performed for ASHRAE Research Project 448-RP. Hg. v. Florida Solar Energy Center. Cape Canaveral; 03.1987 (Final report, FSEC-CR-163-86).

- (BACHINGER-13) Bachinger, Stephan; Niederer, Andreas: Active Fluidisation Storage sandTES. Fluidisierungsverhalten von Quarzsand in Simulation und Experiment. Bachelorarbeit Technische Universität Wien. Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften | Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien; 6.2013.
- (BEDNAR-00) Bednar, Thomas: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden - Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren. Dissertation Technische Universität Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Wien; 02.2000.
- (HUMER-11) Humer, Catrin: Einfluss von Schlagregen auf das Risiko des Konstruktionsversagens und der Schimmelpilzbildung an Innenoberflächen. Diplomarbeit Technische Universität Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Hochbau und Technologie, Wien; 2011.
- (NUSSER-12) Nusser, Bernd: Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen. Dissertation Technische Universität Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Hochbau und Technologie, Wien; 2012.
- (SCHREDER-16) Schreder, Octavia: Die Schaffung neuen Wohnraums durch die Sanierung Wiener Gründerzeithäuser. Ein Kompodium zur Aufwertung und Adaptierung der historischen Bausubstanz. Diplomarbeit Technische Universität Wien. Fakultät für Architektur und Raumplanung | Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege, Wien; 2016.
- (SCHWALLER-14) Schwaller, Johann: Ermittlung eines Bemessungs-Außenklimas für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer innengedämmten Wandkonstruktion. Diplomarbeit Technische Universität Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Hochbau und Technologie, Wien; 2014.
- (WEGERER-10) Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Diplomarbeit Technische Universität Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen | Institut für Hochbau und Technologie, Wien; 6.2010.
- (WUFI) WUFI. Materialdatenbank. Online verfügbar unter <https://wufi.de/de/>, zuletzt geprüft am 11.07.2017.
- (MASEA) MASEA. Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung. Datenbank. Online verfügbar unter <http://www.masea-ensan.de/>, zuletzt geprüft am 11.07.2017.
- (YTONG-MULTIPOR) Ytong-Multipor. Produktkennwerte. Online verfügbar unter <https://www.ytong.at/>, zuletzt geprüft am 26.04.2018.
- (BOKU-Met) BOKU-Met: Monatsübersicht Wetterstation BOKU-Met. Hg. v. Universität für Bodenkultur Institut für Meteorologie (BOKU-Met). Online verfügbar unter <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv/2018/201803/201803.html>. Wien, zuletzt geprüft am 09.03.2018.

- (DIN EN 12114) Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Luftdurchlässigkeit von Bauteilen Laborprüfverfahren: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 04.2000.
- (DIN EN 15026) Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 07.2007.
- (DIN EN ISO 10456) Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 05.2010.
- (DIN EN 1991-1-4) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 12.2010.
- (DIN EN ISO 13788) Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 05.2013.
- (DIN EN ISO 9972) Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 12.2015.
- (DIN EN ISO 6946) Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; 03.2018.
- (ÖNORM B 8110-7) Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte: Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien; 03.2015.
- (WTA-Merkblatt 6-8) Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Stuttgart; 08.2016.
- (KEHL-12) Kehl, Daniel: Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse (2012). In: *Holzbau die neue quadriga* (6), S. 20–25.
- (MUEHLEISEN-13) Muehleisen, Raplh T.; Patrizi, Silverio: A new parametric equation for the wind pressure coefficient for low-rise buildings (2013). In: *Energy and Buildings* (57), S. 245–249.

8 Anhang

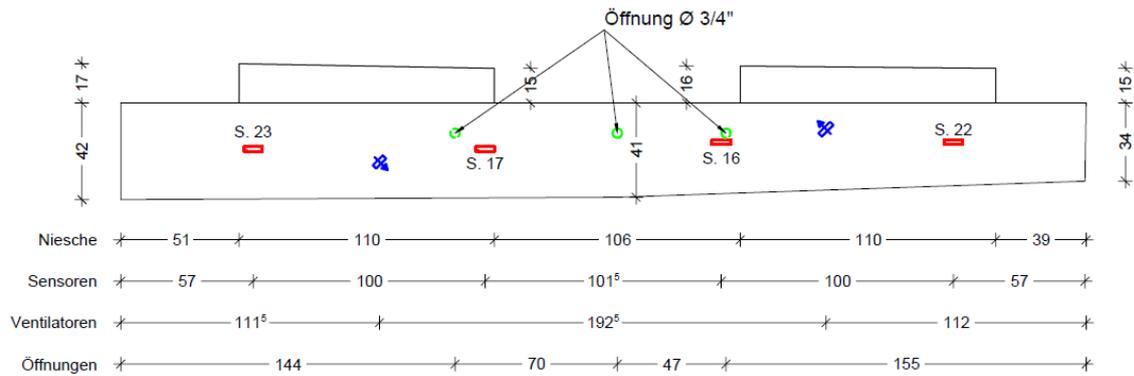
Anhang A

24.5.2017

Messung 01-04

Senkengeschoß
3. OG

Bemaßung in cm



Volumen 0,67 m³

Fläche 1,99 m²

○ = CO₂-Sensor

⊕ = Ventilator

Quellgeschoß
2.OG

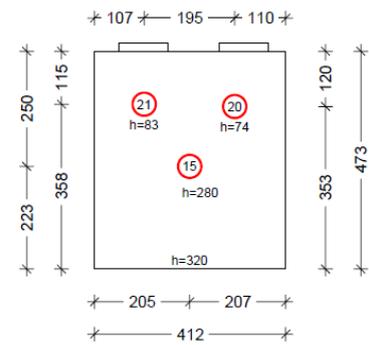


Abb. A.1: Versuchsaufbau am 1. Messtag



Abb. A.2: Foto der Senke vor Messung 01

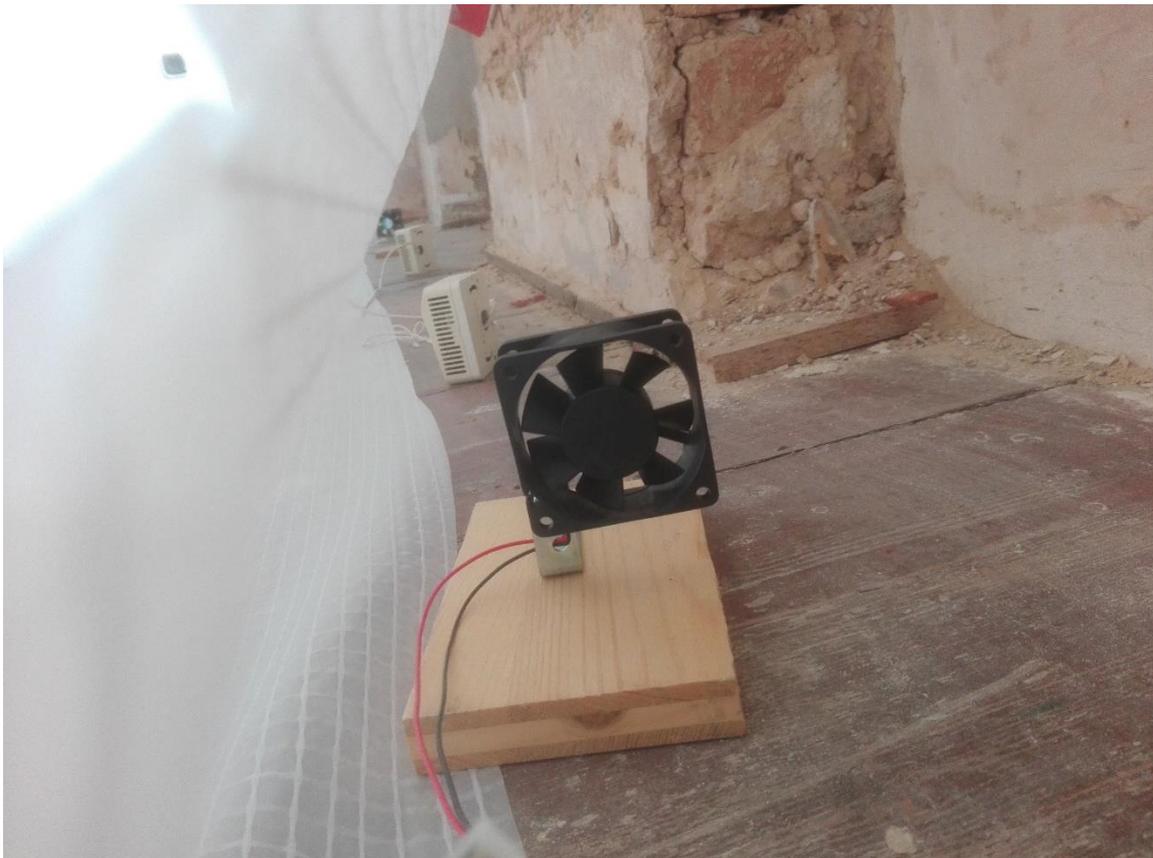


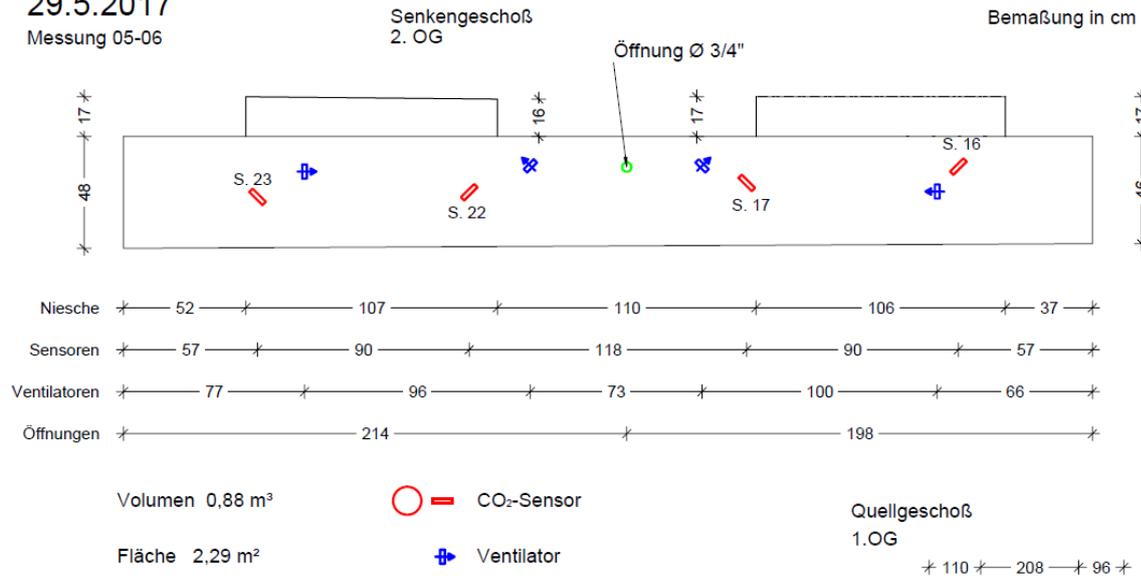
Abb. A.3: Foto in der Senke vor Messung 01



Abb. A.4: Foto des Quellraums vor Messung 01, mit Gardinenleiste

29.5.2017

Messung 05-06



Quellgeschoß
1. OG

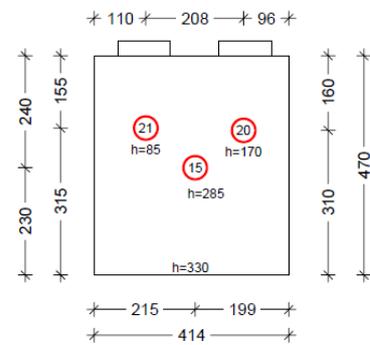


Abb. A.5: Versuchsaufbau am 2. Messtag

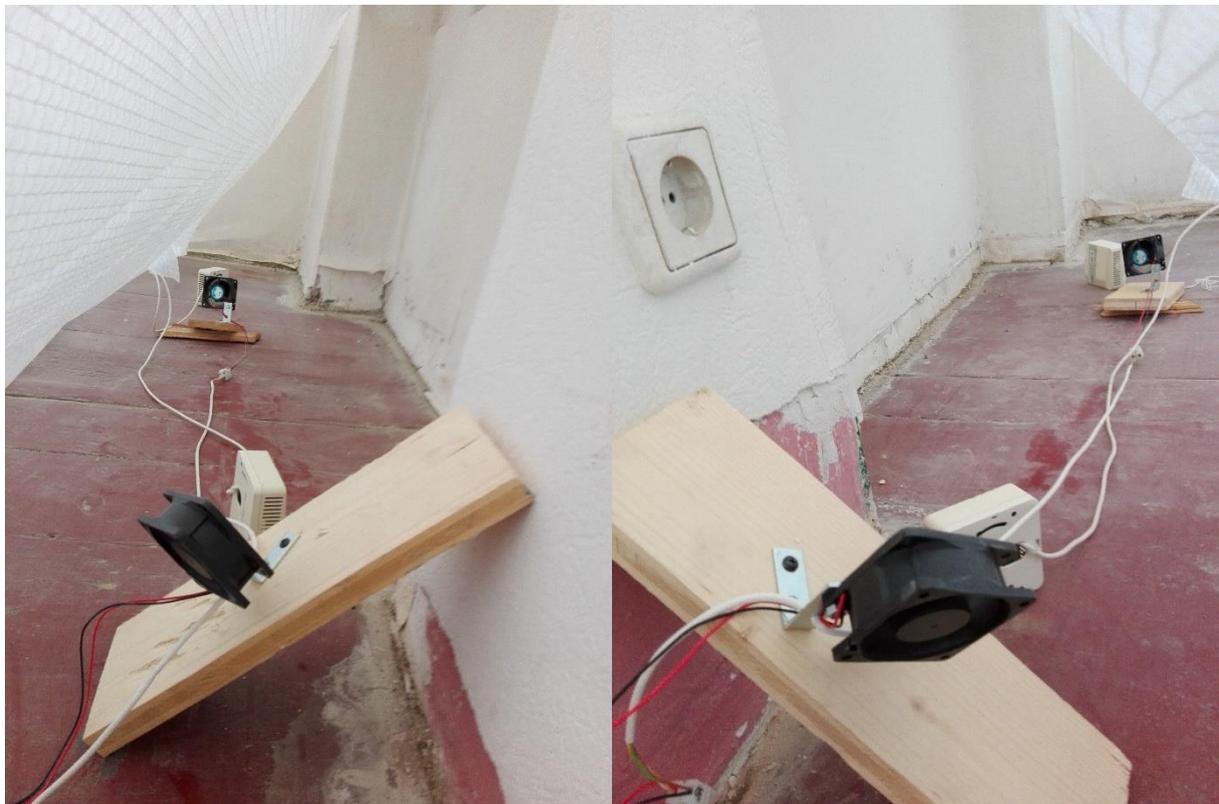


Abb. A.6: Fotos in der Senke vor Messung 05



Abb. A.7: Foto des Quellraums vor Messung 06, mit 5 zusätzlichen Löchern

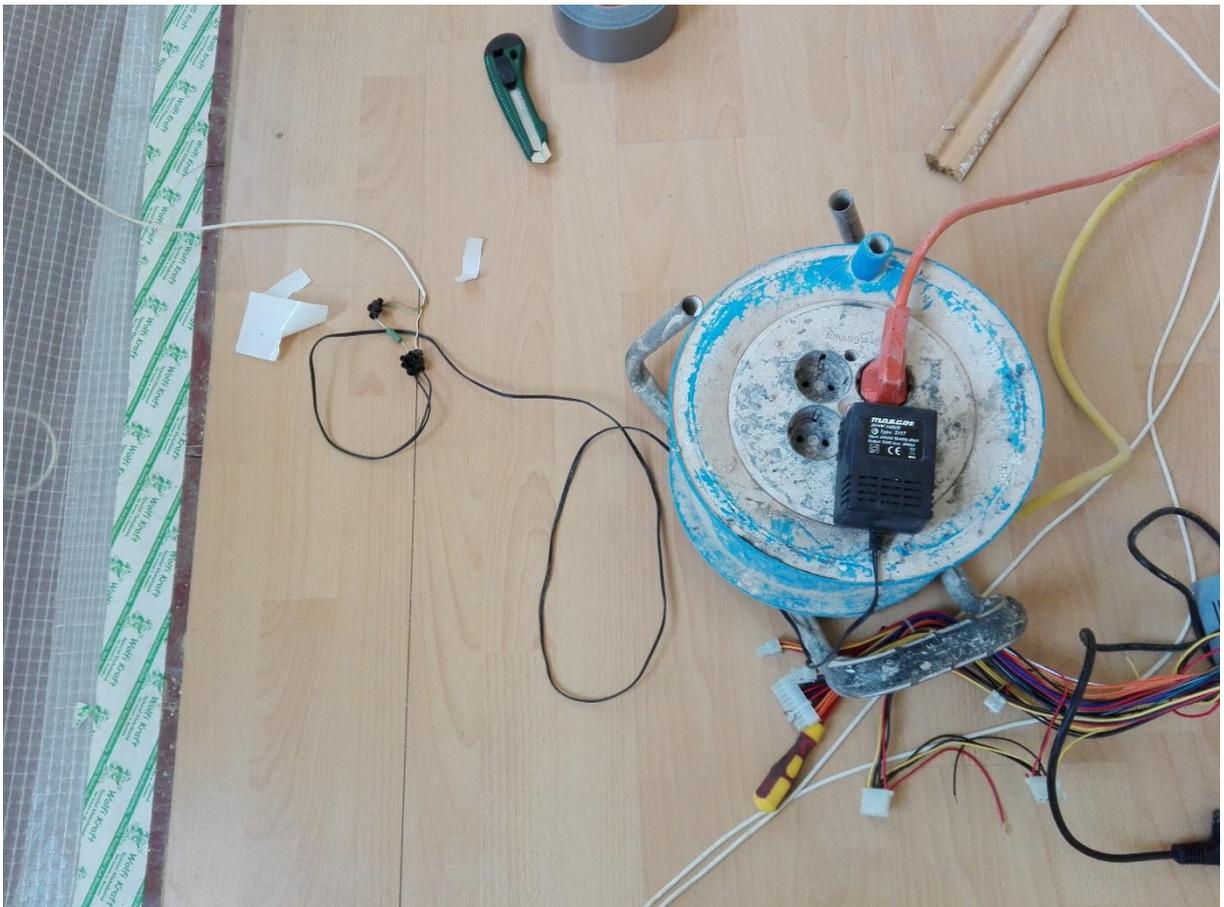


Abb. A.8: Foto der neuen Stromversorgung vor Messung 06

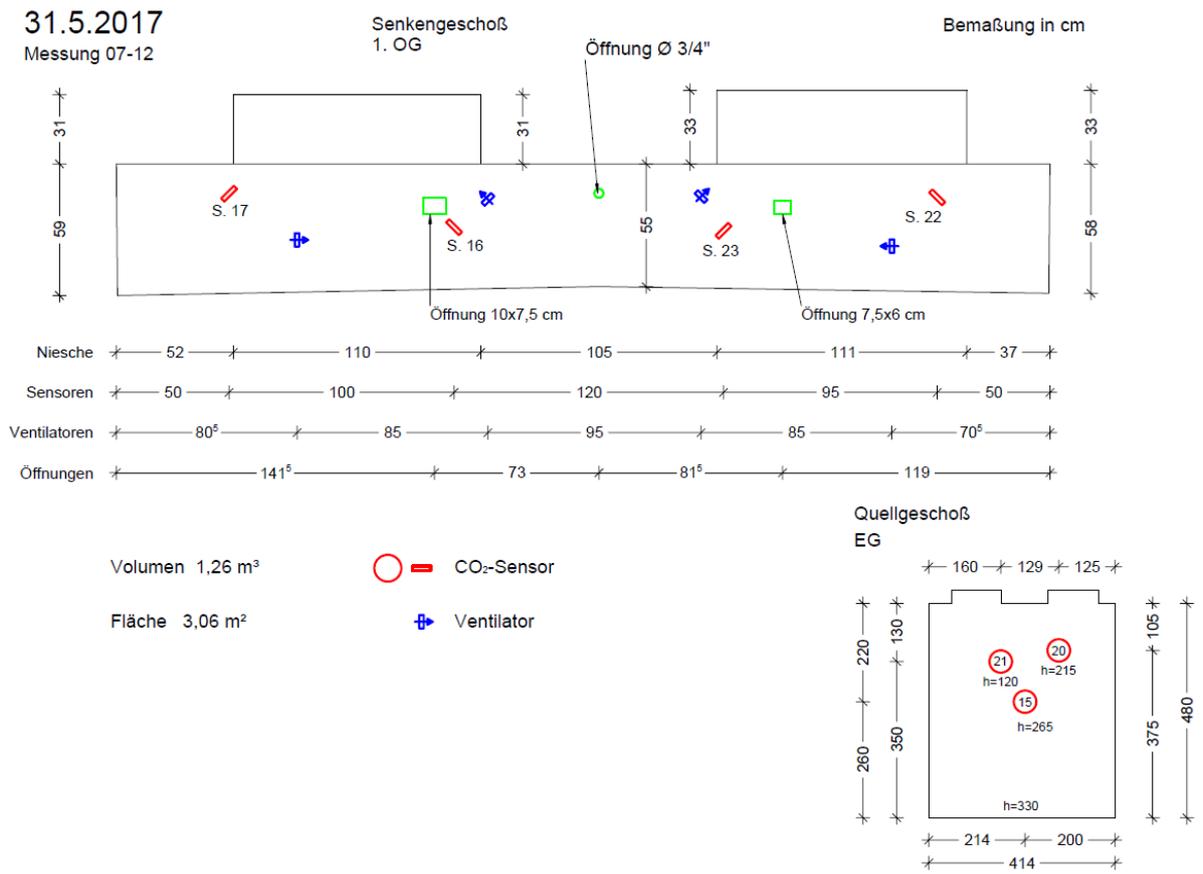


Abb. A.9: Versuchsaufbau am 3. Messtag



Abb. A.10: Aufblähen der Folie bei 10 Pa Druckunterschied, trotz einer Druckausgleichsöffnung



Abb. A.11: Foto in der Senke vor Messung 09, mit größeren Druckausgleichsöffnungen



Abb. A.12: Vergleich der Dielenfugen auf der linken und rechten Seite der Senke



Abb. A.13: Foto des Quellraums vor Messung 07, Zustand der abgehängten Decke

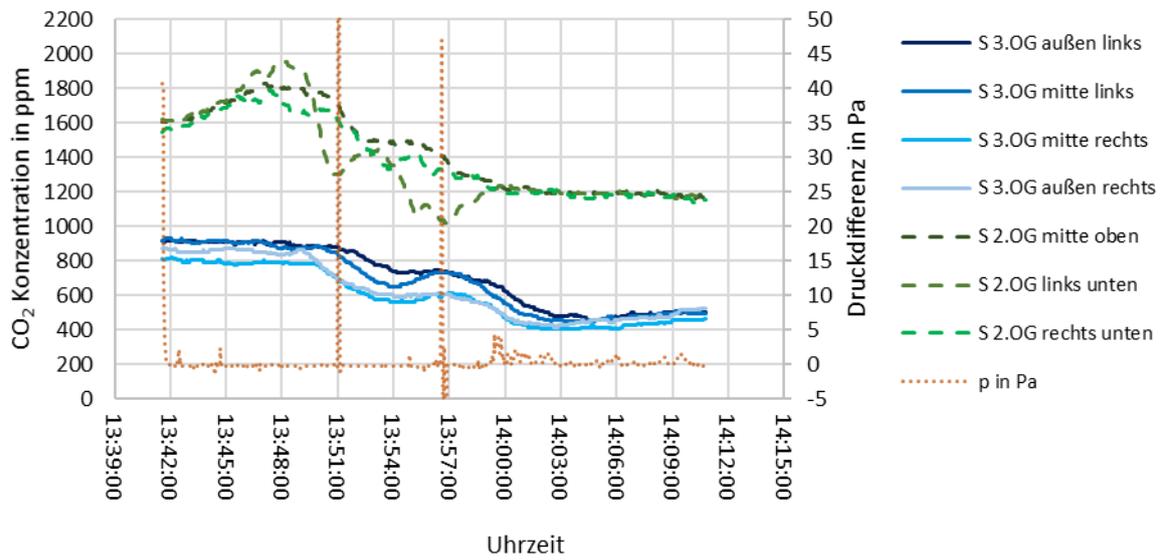


Abb. A.14: Verlauf Messung 02

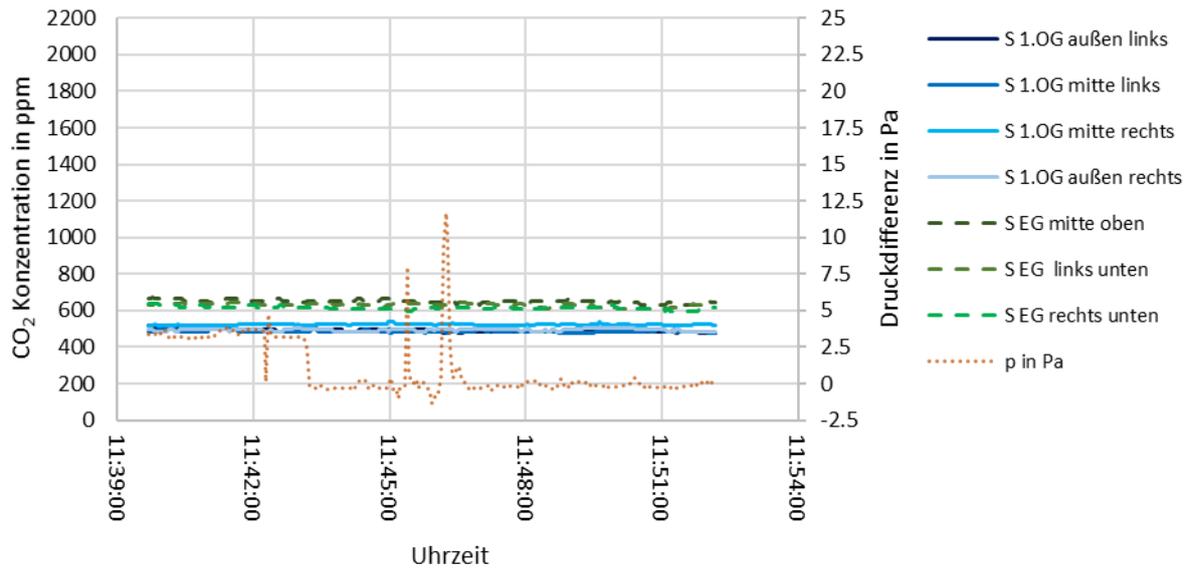


Abb. A.15: Verlauf Messung 07

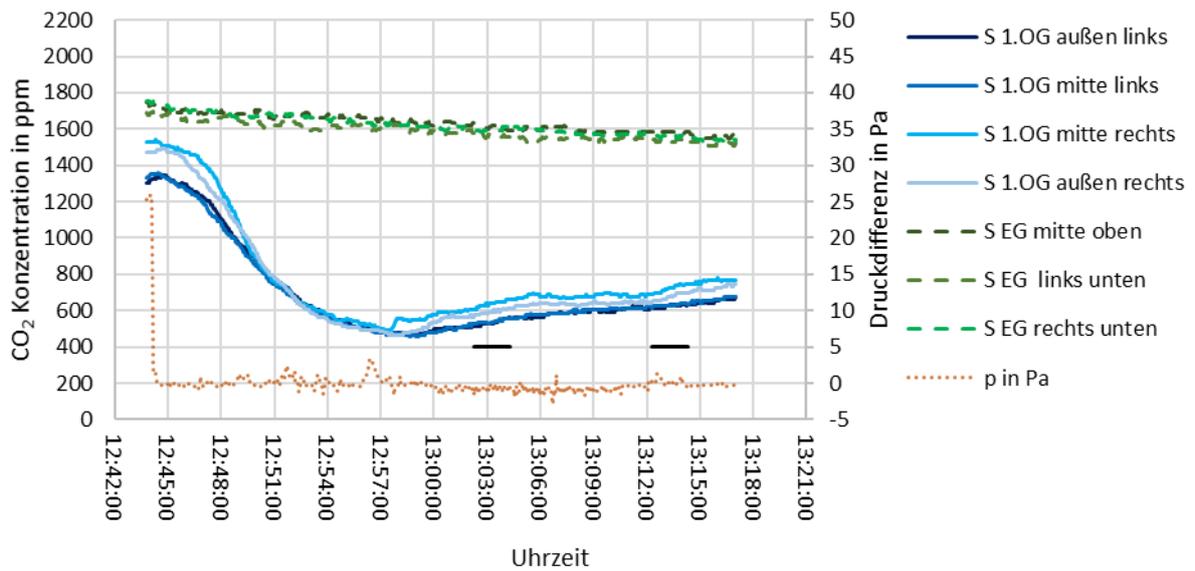


Abb. A.16: Verlauf Messung 09

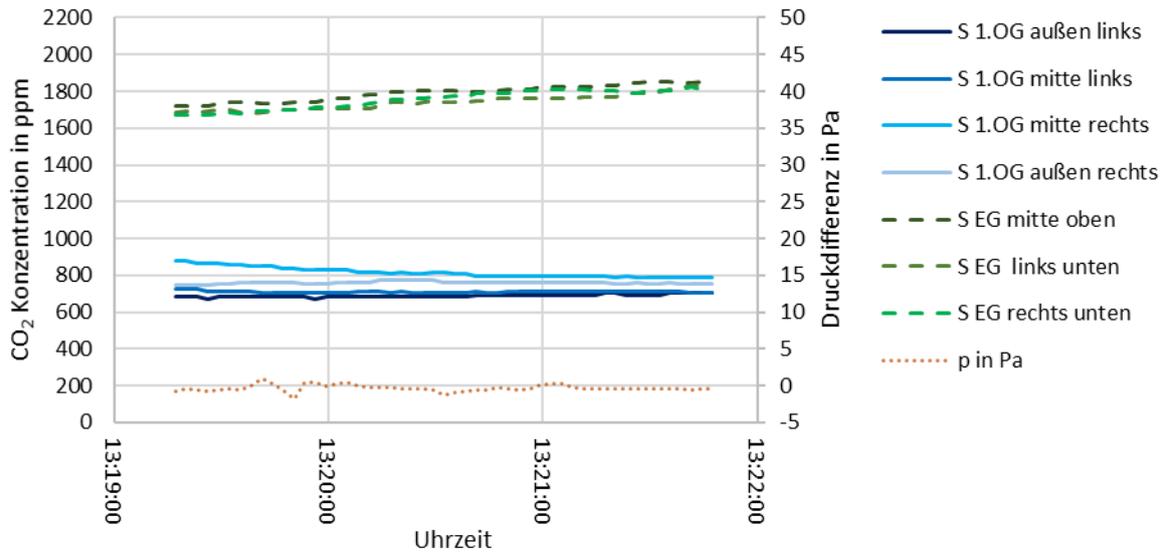


Abb. A.17: Verlauf Messung 10

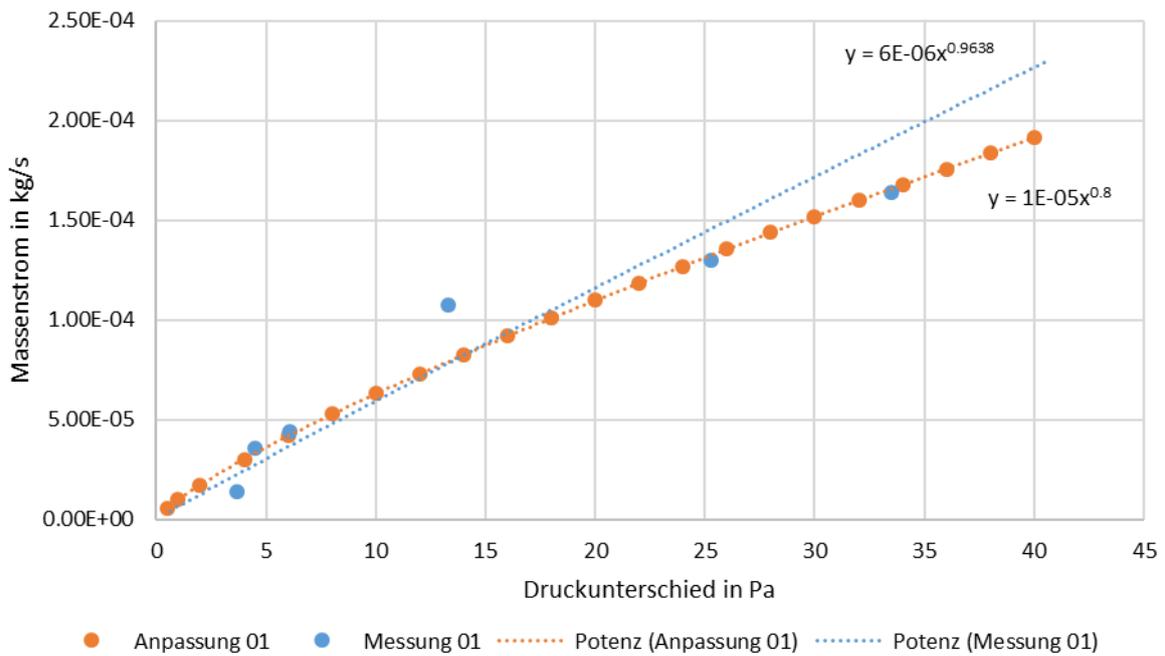


Abb. A.18: Anpassung der Parameter für Messung 01. Vergleich der angepassten Parameter (orange) mit den um ΔP bereinigten Massenströmen aus den Messungen (blau).

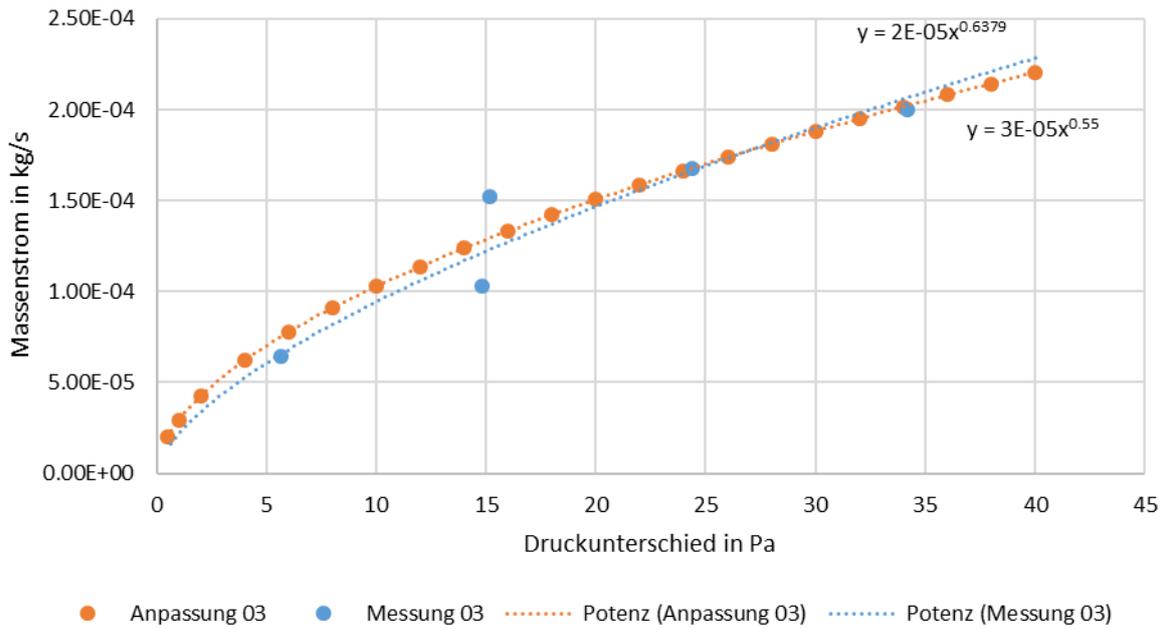


Abb. A.19: Anpassung der Parameter für Messung 03

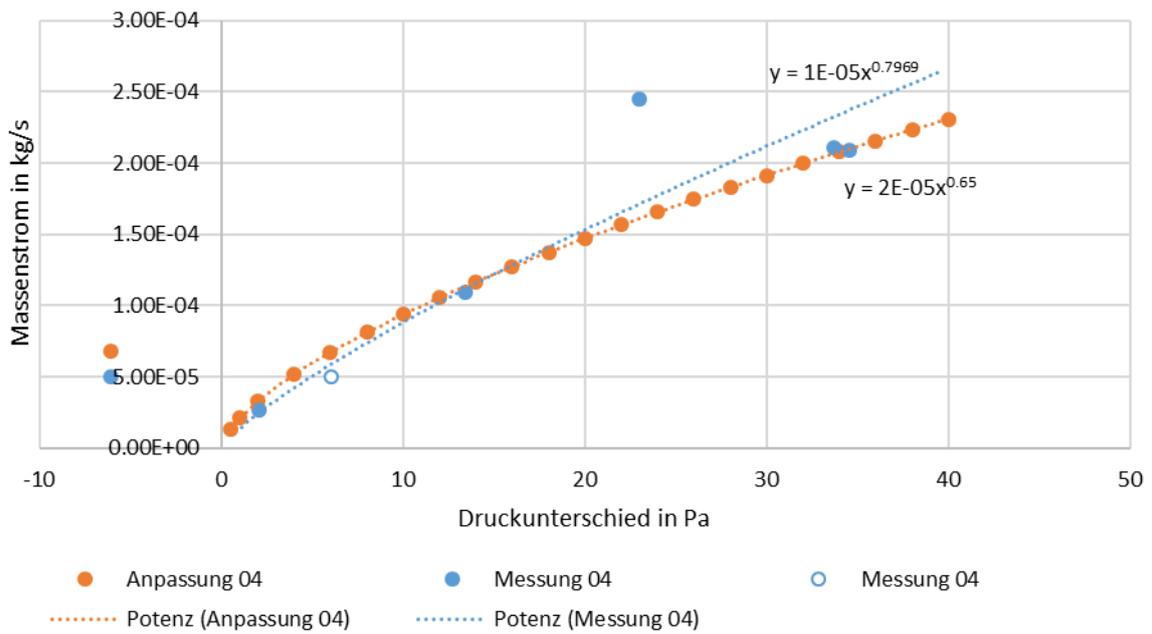


Abb. A.20: Anpassung der Parameter für Messung 04. Bereinigte Massenströme aus der Messung mit negativer Druckstufe werden auch gespiegelt dargestellt (weiß).

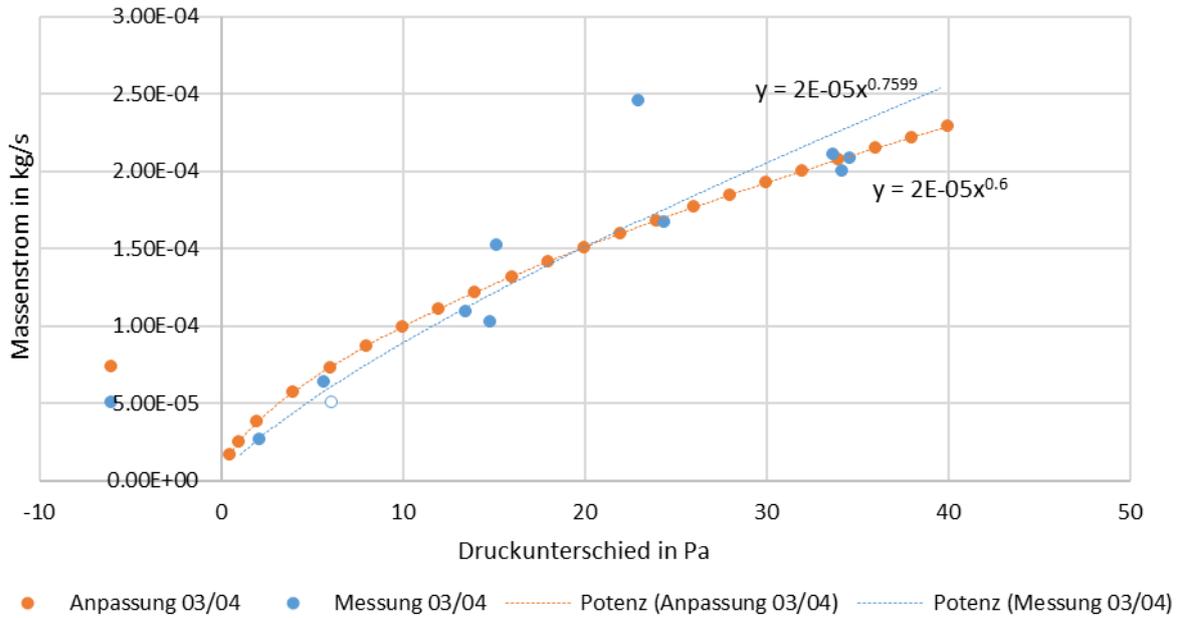


Abb. A.21: Anpassung der Parameter für Messung 03/04

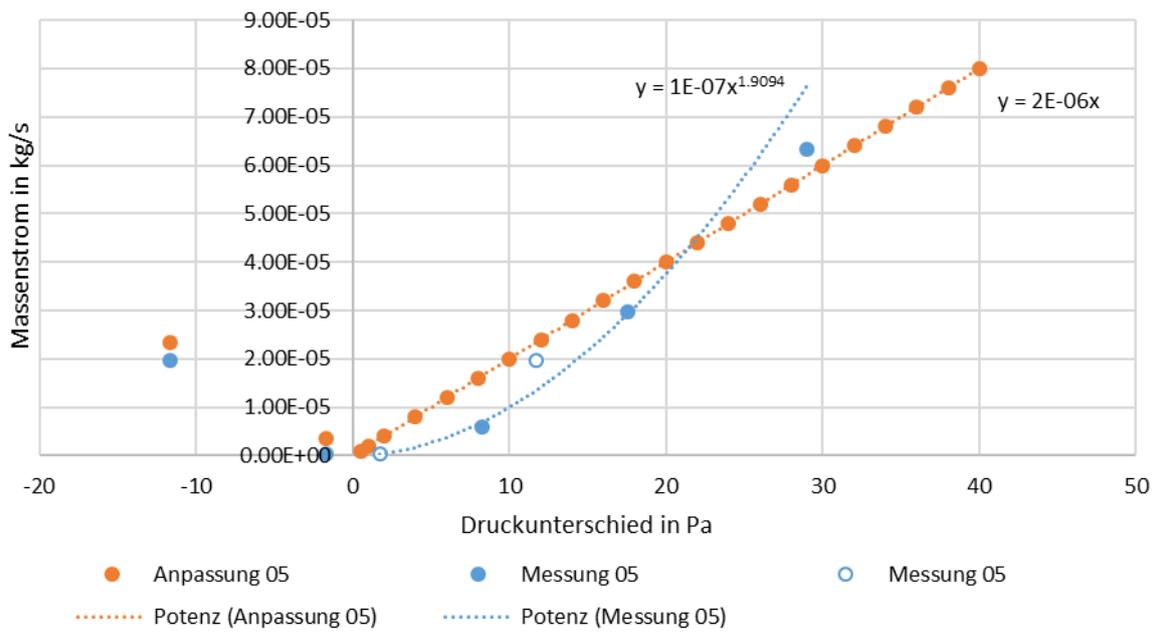


Abb. A.22: Anpassung der Parameter für Messung 05

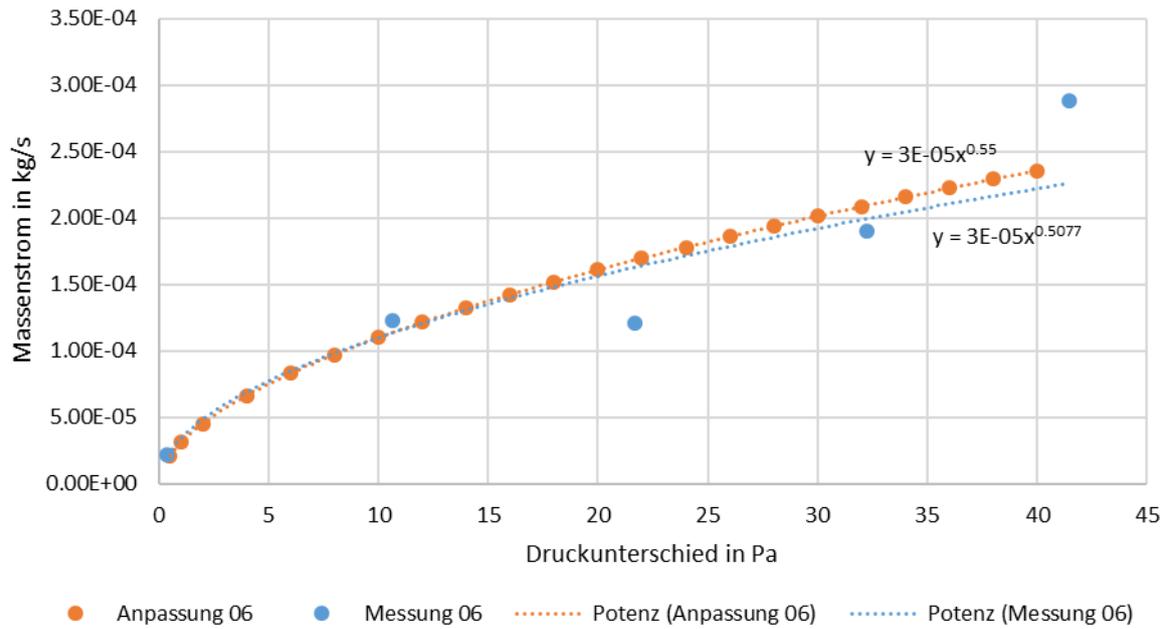


Abb. A.23: Anpassung der Parameter für Messung 06

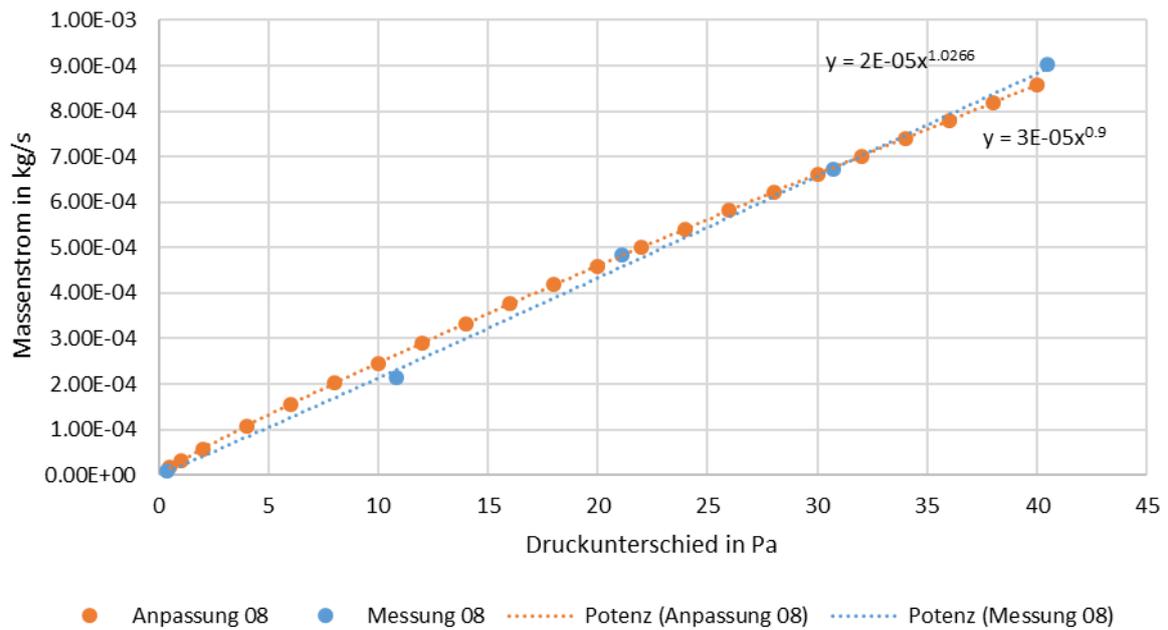


Abb. A.24: Anpassung der Parameter für Messung 08

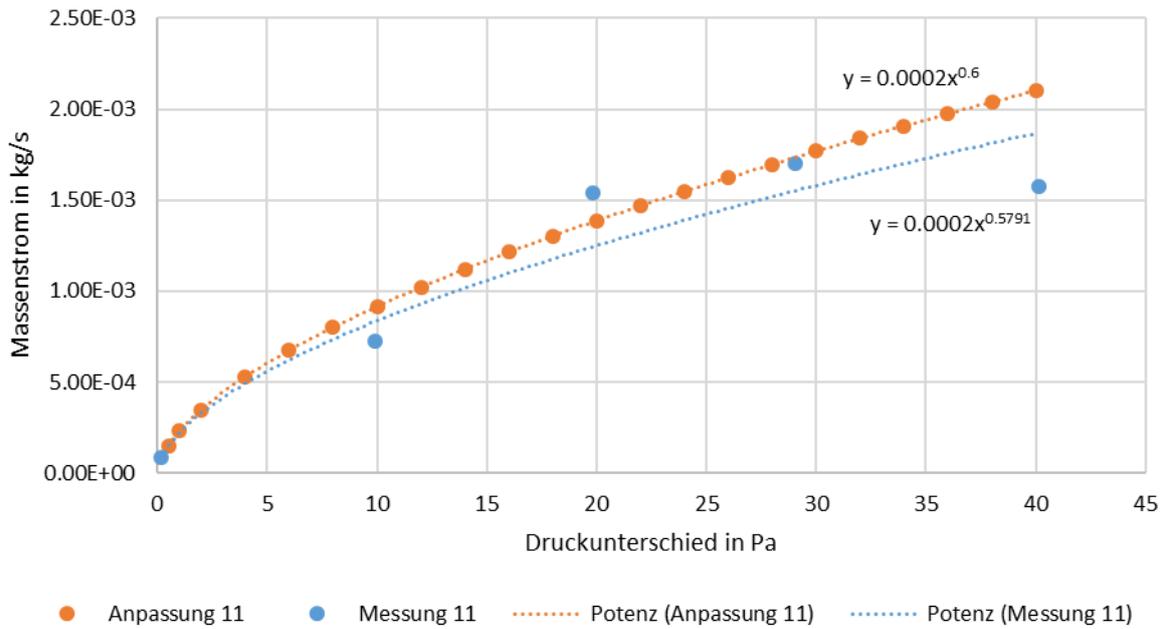


Abb. A.25: Anpassung der Parameter für Messung 11

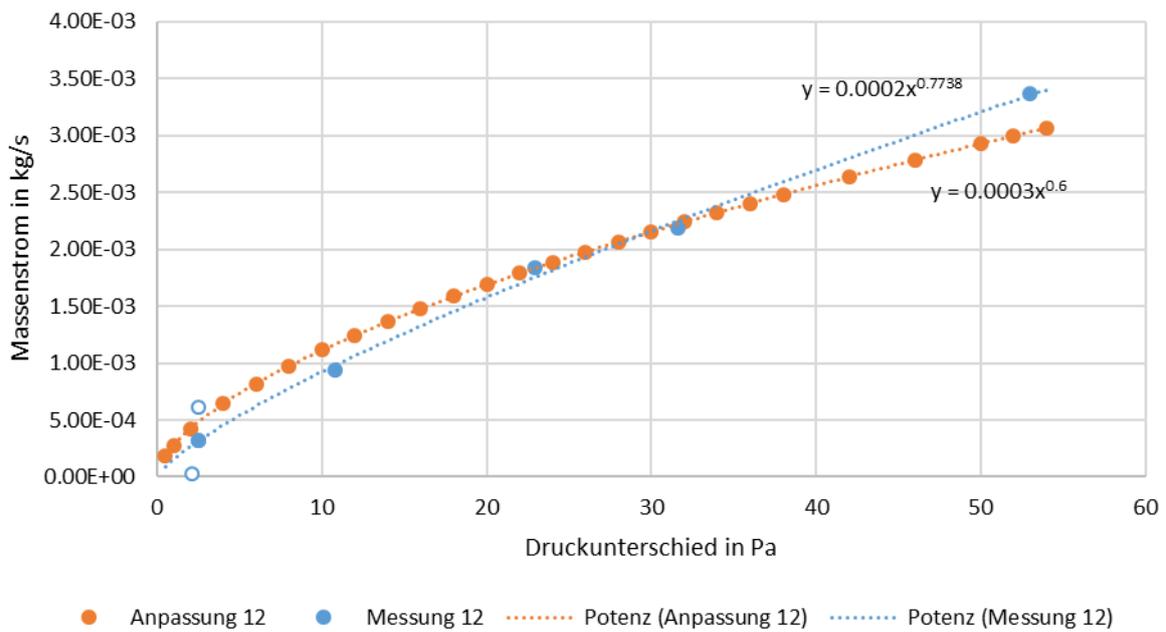


Abb. A.26: Anpassung der Parameter für Messung 12

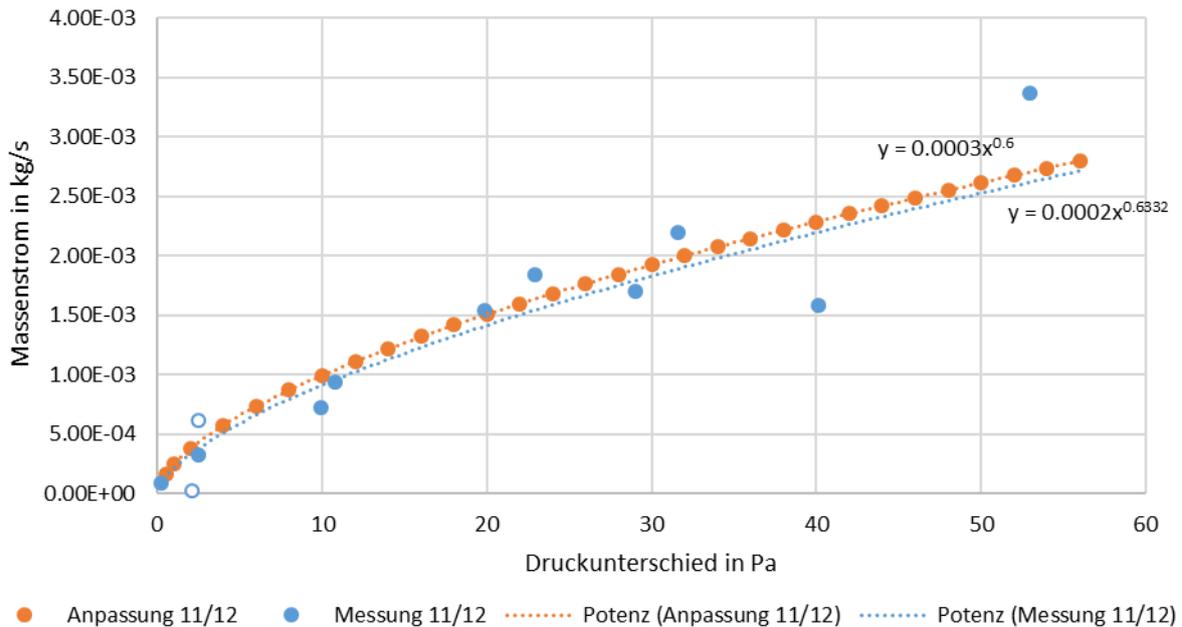


Abb. A.27: Anpassung der Parameter für Messung 11/12

Anhang B

Formel für Näherung des Stack Effects mit Spitzen über das Jahr

$$\Delta P = a * (\sin(t * 2\pi) + 1) + \cos\left(\frac{t * 2\pi}{1000}\right) * \cos\left(\frac{t * 2\pi}{200}\right) * \sin\left(\frac{t * 2\pi}{400}\right) * b \quad (\text{B.1})$$

t Zeitpunkt in h
a, b Variable (a = 2,05; b = 0,75)

Formel für Winddruck aus (HAGENTOFT-01, S. 73–75)

$$\Delta P = (c_{pe} - c_{pi}) * \frac{\rho_{Luft} * v_z^2}{2} \quad (\text{B.2})$$

$$v_z = v_m * k * z^a \quad (\text{B.3})$$

$c_{pe,i}$ Außen- bzw. Innen-Druckbeiwert
 ρ_{Luft} Dichte der Luft ca. 1,2 kg/m³
 v_z Windgeschwindigkeit auf Gebäudehöhe
z Gebäudehöhe in m
k, a Beiwerte für die Geländeart
 v_m Windgeschwindigkeit bei der Wetterstation in m/s

Formel für Außenwinddruckbeiwert aus (SWAMI-87, S. 1–10)

$$c_{pe} = c_{pe,0^\circ} * \ln \left(1,248 - 0,703 * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - 1,175 * \sin(\theta)^2 + 0,131 \right. \\ \left. * \sin(2 * \theta * G)^3 + 0,769 * \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 0,071 * G^2 \right. \\ \left. * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 + 0,717 * \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \right) \quad (\text{B.4})$$

G Gebäudeformbeiwert
 θ Windrichtung
 a_0 bis b_4 Koeffizienten

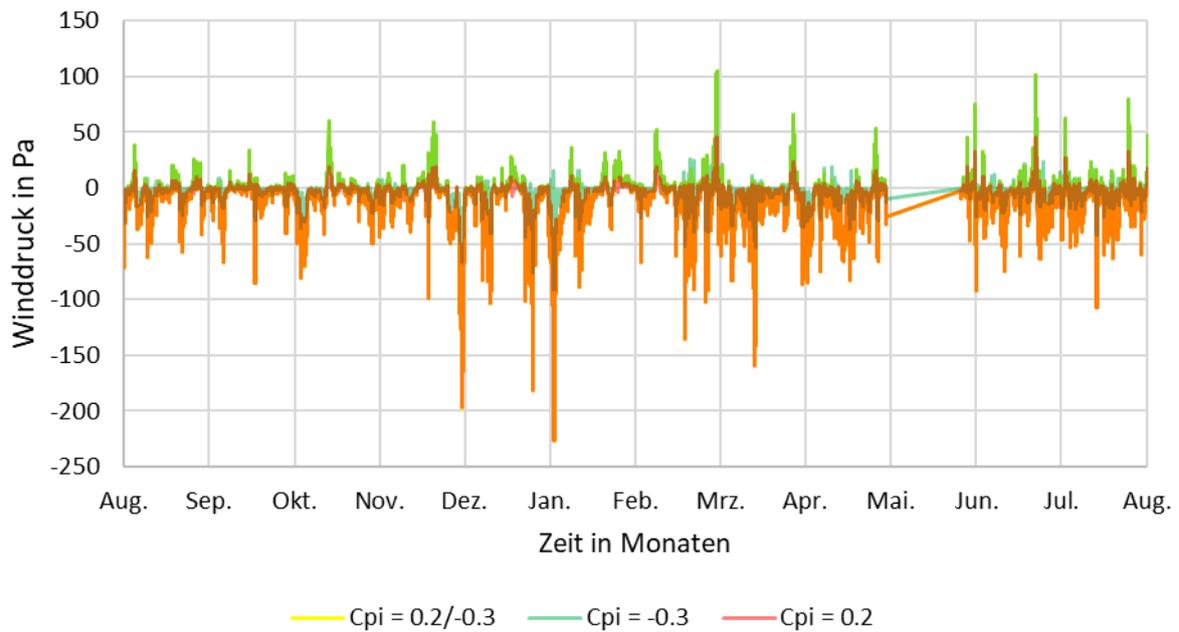


Abb. B.28: Vergleich der drei verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten für den Innendruckbeiwert mit den Winddrücken für eine Südfassade.

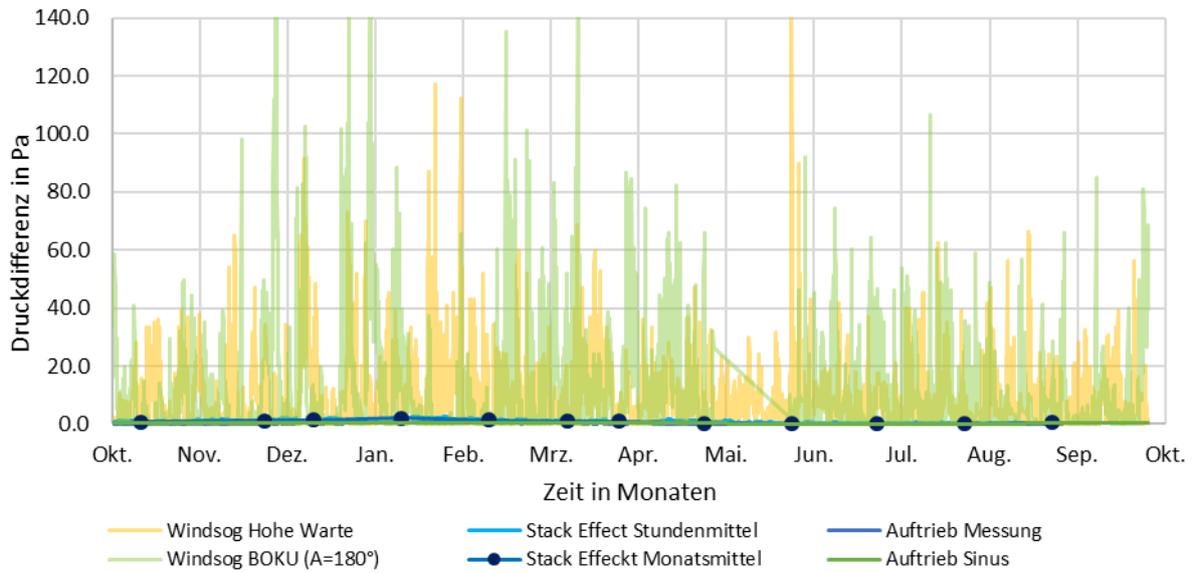


Abb. B.29: Graphische Gegenüberstellung des Windsogs mit Auftrieb und Stack Effect, bei hohen Druckdifferenzen.

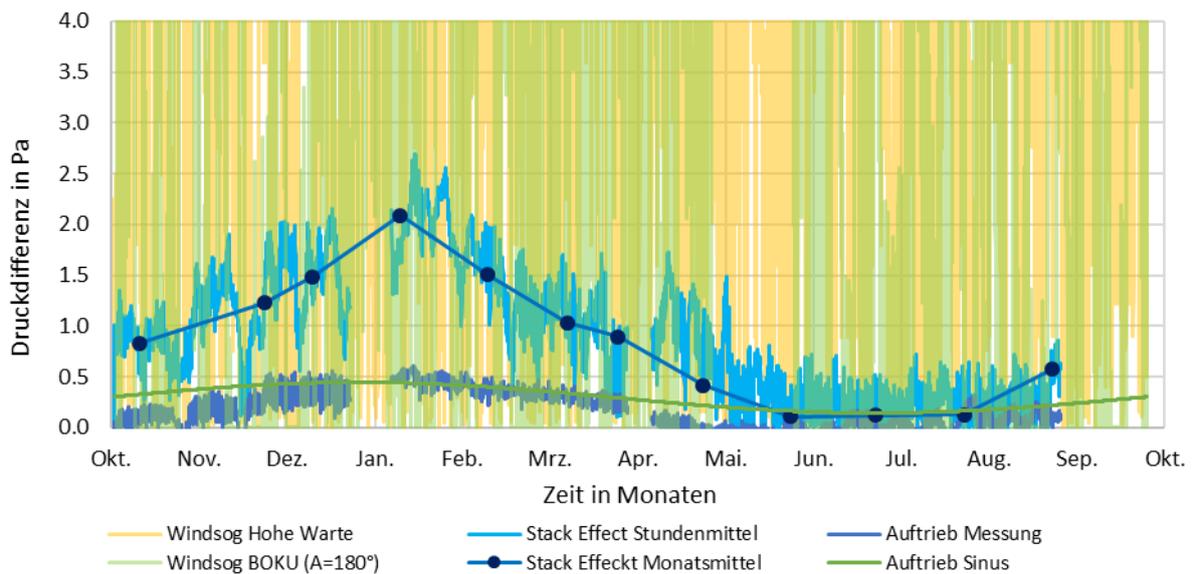


Abb. B.30: Graphische Gegenüberstellung des Windsogs mit Auftrieb und Stack Effect, vergrößerter Ausschnitt bei niedrigen Druckdifferenzen.

Anhang C

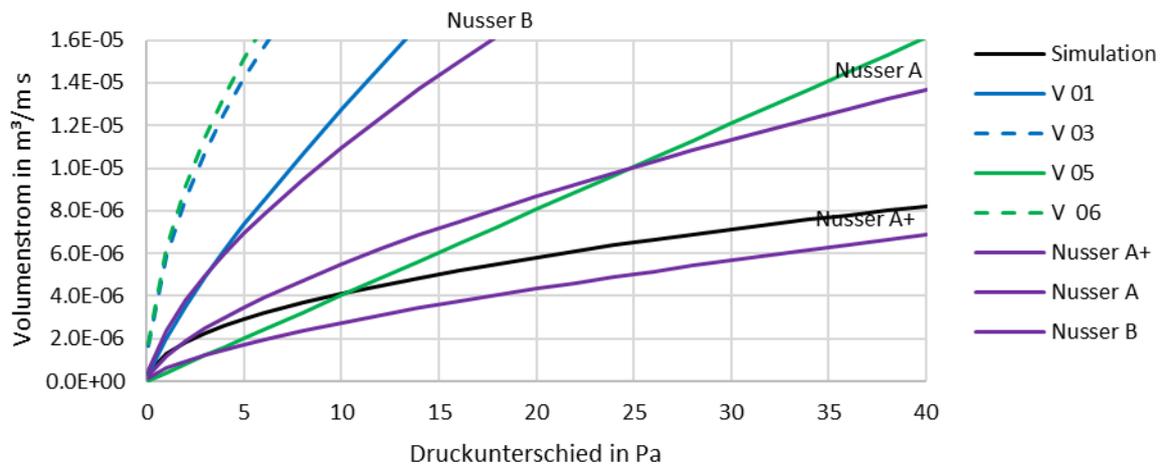


Abb. C.31: Luftvolumenstrom der Leckage im Vergleich zu den Messungen aus Kapitel 3.4 und Luftdichtheitsklassen nach Nusser, mit der Auflagerlänge als Bezugsgröße.