

eine Imprägnierung mit einer Deckschicht empfohlen werden kann. Dabei sollten Schutzmittel verwendet werden, welche auf natürlichen Inhaltsstoffen basieren.

Im letzten Teil des Berichts werden einige mögliche Materialalternativen genauer beschrieben, welche für die Herstellung von Lüftungstechnischen Bauteilen verwendet werden können. Dabei werden Materialien wie Karton, Dämmmaterialien, Kunststoffe, Bio-Kunststoffe, Holzwerkstoffe und formgepresste Zelluloseplatten spezifiziert. Davon können Holzwerkstoffe und Karton als Materialien mit dem meisten Potenzial für Lüftungsführende Bauteile angesehen werden.

Abstract Englisch

The Paris Agreement calls on countries worldwide to develop a long-term climate strategy. Swiss politics is backing on the 2050 net-zero climate strategy. Net-zero means that all greenhouse gas emissions caused by humans must be removed from the atmosphere through reduction measures. The bottom line is that Switzerland should no longer emit any greenhouse emissions. Potential for improvement can be found in the building sector, which is responsible for 24% of national CO₂ emissions. A possible reduction in greenhouse gas emissions can be achieved if materials with a better ecological balance are used in the construction of the building services equipment.

This bachelor thesis deals with possible material alternatives for the fabrication of air-conducting components in a residential building. In particular, it is examined whether a ventilation distribution made of wood can represent a valid alternative. An experimental setup, which is made of spruce wood and functionally represents a simple bidirectional ventilation system that is used for the practical investigations.

At the beginning, the applicable normative requirements for ventilation components are elicited and qualitatively described. The investigated test construction fulfils the technical requirements in most cases. Although there is no clear statement regarding the airtightness class of the structure.

The next part of the report deals with the operational stability, hygiene assessment and moisture resistance of the experimental setup. The above criteria are investigated in an experiment. In the process, the superstructure is subjected to a hardness test. The experiment represents a continuous simulation of a wet cell with shower operation, which is ventilated with a wooden duct system. The experiment lasts 672 hours and exposes the wooden duct to moisture that can theoretically occur during 344 shower operations. Temperature and humidity values prevailing in the system during the experiment are measured and evaluated. In parallel, wood moisture measurements are carried out to assess the moisture absorption of the duct material.

The experiment shows that the construction has sufficient resistance to the air saturated with moisture. The measured equilibrium moisture content of spruce wood does not exceed the maximum permissible values of 20%, above which microbial infestation would be possible. However, the superstructure shows cracking on the inner surfaces of the channel. Therefore, protective treatment should be considered.

Next, the report deals with possible wood preservation measurements, based on DIN standard series 350 - "Durability of wood and wood products". Classifications and properties of possible protection methods and products are described in more detail. From this it can be seen that impregnation with a top coating can be recommended for the wooden ducts. Preservatives based on natural ingredients should be used.

In the last part of the report, some possible material alternatives, which can be used for the production of ventilation components are described in more detail. Materials such as cardboard, insulation materials, plastics, bioplastics, wood-based materials and compression-moulded cellulose boards are specified. Of these, wood-based materials and cardboard can be considered to have the most potential for ventilation-related components.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Ausgangslage	3
2.1. Industriepartner	3
2.2. Aufgabenstellung	3
2.3. Methoden	4
3. Anforderungen an Materialien für Lüftungsanlagen	5
3.1. Primäre Anforderungen.....	5
3.1.1. Brandschutz	5
3.1.2. Hygiene.....	6
3.1.3. Dichtheit.....	7
3.1.4. Betriebsfestigkeit.....	8
3.1.5. Feuchteresistenz.....	8
3.1.6. Robustheit	8
3.1.7. Lebensdauer	9
3.2. Ökobilanz	9
3.3. Zusammenfassung.....	11
4. Versuchsaufbau	12
4.1. Grundaufbau	12
4.2. Funktion	12
4.2.1. Konstruktion	12
4.2.2. Aussenluft und Fortluft	13
4.2.3. Abluft.....	14
4.3. Material	14
4.3.1. Holzplatten	14
4.3.2. Dämmung.....	15
4.3.3. Dichtungsband	15
4.3.4. Schrauben	15
4.3.5. Schnitt	16
5. Art und Prinzip der Untersuchung.....	17
5.1. Art des Versuches	17
5.2. Versuchsbedingungen	17
5.3. Versuchsprinzip	19

6.	Erweiterung Grundaufbau	21
6.1.	Leitungen	21
6.2.	KWL-Gerät	21
6.3.	Dampf-Luftbefeuchter	22
6.4.	Dampfbehälter	23
6.5.	Logger-Station	24
7.	Förderwerte und -Mengen	25
7.1.	Luftmenge	25
7.2.	Einstellung der Luftmenge am KWL-Gerät	25
7.3.	Feuchtemenge	26
7.4.	Einstellung des Dampf-Luftbefeuchters	27
7.4.1.	Betriebszyklen	27
7.4.2.	Ansteuerung der Regulierung	28
7.4.3.	Zeitschaltuhr	28
7.4.4.	Einstellung der Dampfmenge	28
8.	Messkonzept	33
8.1.	Temperatur und relative Feuchte	33
8.2.	Holzfeuchte	34
9.	Auswertung der Messungen	35
9.1.	Logger Messungen – Temperatur und Feuchte	35
9.1.1.	Verlauf der Temperatur und Feuchte	35
9.1.2.	Veränderungen der Werte während Betrieb	37
9.2.	Holzfeuchte / Wassergehalt-Messungen	39
9.2.1.	Gemessene Werte und Umrechnung	39
9.2.2.	Verlauf der Wassergehalt-Werte	40
9.3.	Beurteilung der Messresultate	41
9.3.1.	Betriebszeit	41
9.3.2.	Temperatur und Feuchte	41
9.3.3.	Wassergehalt vom Holz	42
9.4.	Qualitative Beurteilung des Materials	43
9.4.1.	Verfärbungen der Oberflächen	43
9.4.2.	Oberflächenstruktur	43
9.4.3.	Sichtbare Beschädigungen	44

9.4.4. Mikrobieller Befall	44
9.5. Fazit Versuch	44
10. Holzschutzmassnahmen.....	46
10.1. Konstruktiver Holzschutz	46
10.2. Natürlicher Holzschutz	47
10.3. Chemischer Holzschutz	48
10.3.1. Biozidfreie Mittel	48
10.3.2. Biozidhaltige Mittel	48
10.4. Klassifizierung der chemischen Holzschutzmittel	49
10.5. Anwendungsverfahren von Holzschutzmitteln	51
10.6. Holzschutzprodukte	52
10.7. Beschichtung der Holzkanäle	54
10.7.1. Empfohlene Holzschutzmassnahmen	54
11. Alternative Materialien	55
11.1. Wieso ein anderes Material?	55
11.2. Materialien	55
11.2.1. Karton	55
11.2.2. Dämmmaterialien	57
11.2.3. Kunststoff	58
11.2.4. Bio-basierte Kunststoffe	59
11.2.5. Holzwerkstoffe	61
11.2.6. Formgepresste Zelluloseplatten	63
11.3. Zusammenfassung	64
12. Fazit.....	66
13. Abkürzungsverzeichnis	68
14. Abbildungsverzeichnis	69
15. Tabellenverzeichnis	71
16. Normenverzeichnis	72
17. Literaturverzeichnis	73

1. Einleitung

Seit dem 19. Jahrhundert beeinflusst die menschliche Bevölkerung die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre. Die anthropogenen Ursachen für den verstärkten Treibhauseffekt beinhalten Personen- und Gütertransport, die Herstellung von Konsumgütern, Massentierhaltung, Bauwesen, Verbrennung fossiler Energieträger und veränderte Landnutzung, wie die Rodung von Wäldern. Schon heute ist die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre so hoch geworden, dass zu viel Wärme gespeichert wird.¹

Der aus dem Treibhausgas fließende Klimawandel und die Erderwärmung sind heute Realität und können mittlerweile nicht mehr bestritten werden. Die Folgen der Erderwärmung sind massiv und vielfältig: Wetteranomalien, Hunger, Flüchtlingsströme und Konflikte. Ob Eisschilde, Gletscher oder Permafrost: überall auf der Erde gehen die Eismassen zurück. Die Landwirtschaft in Mitteleuropa erlebt spürbare Ernteeinbussen und mehrere Millionen Menschen im globalen Süden verlieren ihre Lebensgrundlagen.²

Das Leitziel des Pariser Klimaschutzabkommens ist zu verhindern, dass der weltweite Anstieg der Durchschnittstemperatur 2°C überschreitet und so tief wie möglich unter 1.5°C beschränkt bleibt. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die globalen Emissionen massiv gesenkt werden.³

Die schweizer Politik setzt auf das 2050 Netto-Null Klimaziel. Netto-Null bedeutet, dass alle durch Menschen verursachten Treibhausgas-Emissionen durch Reduktionsmassnahmen wieder aus der Atmosphäre entfernt werden müssen. Die Schweiz soll unter dem Strich keine Treibhausemissionen mehr ausstossen.⁴

Heute ist der schweizer Gebäudesektor für 24% der nationalen CO₂-Emissionen verantwortlich. Um bis spätestens im Jahr 2050 einen Netto-Null-CO₂-Austoss zu erreichen, kann und muss der Gebäude- sowie Bausektor die Führungsrolle einnehmen, wenn die Klimaziele erreicht werden sollen. Schon heute werden Investitionsbudgets für einzelne Bauprodukte, Gebäude und ganze Städte erteilt, um die Forschungen und Entwicklungen voranzutreiben. Die leistungsorientierten Ziele sollen die Schweizer Baugesetze und Normen so beeinflussen, dass in Zukunft nachhaltigere Projekte entwickelt und fertiggestellt werden können. Die erneuerbaren Energiequellen müssen gefördert werden, damit der Ausstieg aus fossilen Energieträgern ermöglicht werden kann. Die schon teilweise vorhandenen

¹ (Klima-Kollekte - Kirchlicher Kompensationsfonds gGmbH, 2018)

² (Deutsche Welthungerhilfe e. V., o. A.)

³ (Schweizerische Energie-Stiftung, 2022)

⁴ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2020)

Technologien, welche emissionsarme Konstruktionen ermöglichen, sollen ein Vorbild sein und mehr an Bedeutung gewinnen.⁵

Der vorliegende Bericht befasst sich mit einer solchen emissionsarmen Konstruktion. Geprüft wird, ob für den Wohnungsbau Lüftungskanäle aus Holz verwendet werden können. Es wird untersucht, ob das Material als ökologischere Alternative zu konventionellen Lüftungsleitungen aus Stahlblech in Frage kommt. Holz gilt als nachwachsender Rohstoff.

⁵ (Habert, 2019)

2. Ausgangslage

Ausgangslage für die vorliegende Arbeit ist die Aufgabenstellung der Hochschule Luzern, welche vom Industriepartner Strüby Holzbau AG eingereicht wurde. In diesem Kapitel wird die Aufgabenstellung detailliert beschrieben.

2.1. Industriepartner

Der Industriepartner Strüby Holzbau AG ist ein innovativer Gesamtleistungsanbieter in den Bereichen Architektur, Immobilien, Wohn-, Industrie-, Gewerbe- sowie Holzbau. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Verwendung von Schweizer Holz gesetzt. Ein wichtiger Tätigkeitsbereich ist die Planung und Werkstellung von energieeffizienten Wohngebäuden, welche die heutigen Energie-Standards, wie beispielsweise Minergie, erfüllen. Dabei wird bei der Produktion auf einen hohen Vorfertigungsgrad geachtet.

Mit dem Minergie-Label werden Gebäude mit einem tiefen Energieverbrauch und einem Wohnkomfort gekennzeichnet. Dabei spielt oftmals eine kontrollierte Wohnungslüftung (KWL) eine bedeutende Rolle⁶. Die Verteilungen der KWL werden üblicherweise mit klassischen verzinkten Stahlblechrohren ausgeführt. Dieser Aspekt stellt eine Herausforderung für den Industriepartner dar. Konstruktiv sind die runden Leitungen schwer in den Vorfertigungsprozess zu integrieren, da die Verarbeitung von Blechrohren für Holzbaufirmen artfremd ist.

Mit dem Ziel den Vorfertigungsprozess weiterzuentwickeln und sich dabei auf die kenntnisreichen Erfahrungen mit Holz als Baumaterial, sowie auf die vorhandene Infrastruktur zu stützen, wurde die Frage gestellt, ob sich das breit verwendete Konstruktionsholz als alternatives Material für Lüftungsleitungen eignet.

Für eine praktische Untersuchung dieser Idee wurde von der Firma Strüby Holzbau AG ein Mock-Up-Aufbau entworfen und im Gebäudetechniklabor der Hochschule Luzern, Technik und Architektur, errichtet.

2.2. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Eignung von nachhaltigen und alternativen Materialien, insbesondere Holz, für Lüftungsleitungen zu untersuchen. Dabei werden folgende Fragen untersucht:

- Wie weit kommt Holz grundsätzlich als Material für Lüftungskanäle in Wohngebäuden in Frage?
- Gibt es normative Vorgaben, respektive Einschränkungen für die Anwendung von Holzkanälen?

⁶ (HEV Schweiz, o. A)

- Kann unbeschichtetes Konstruktionsholz verwendet werden oder ist eine Beschichtung in Betracht zu ziehen?
- Sind weitere alternative Lüftungsmaterialien, insbesondere natürlich nachwachsende Rohstoffe, allenfalls ebenso interessant wie Holz?

Diese Fragen werden mit den Methoden und Untersuchungen aus dem nächsten Kapitel beantwortet.

2.3. Methoden

Um die ersten zwei Fragen beantworten zu können, werden zuerst die Abklärungen in Bezug auf die normativen Vorgaben, welche zur Zeit der Berichterfassung als aktuell gelten, gemacht. Bei den Vorgaben sind primär die Lüftungs- und energietechnischen Aspekte interessant. Weiter werden die brandschutztechnischen Aspekte thematisiert. Der zukünftige Einsatz der Holzleitungen soll primär bei Wohnbauten stattfinden. Daher wird auf die Anforderungen, welche primär für Wohnbauten gelten, näher eingegangen.

Um die Eignung des unbeschichteten Konstruktionsholzes als Material für Lüftungsleitung zu überprüfen, wird der Versuchsaufbau verwendet. Die praktische Untersuchung wird auf das unbeschichtete Holz beschränkt. Die möglichen Beschichtungen werden aufgrund der für die Aufgabe verfügbaren Zeit nur thematisiert und nicht praktisch untersucht. Als weiteres werden am Versuchsaufbau Kriterien wie Dichtheit, Reinigbarkeit, sowie Einflüsse der Feuchte- und Temperaturschwankungen auf die Dauerhaftigkeit geprüft. Der Versuchsaufbau wird unter anderem dazu verwendet, um eine qualitative Aussage über das Risiko von mikrobiellen Belastungen machen zu können.

Die Auswertung der Resultate erfolgt mit den Vorgaben des Industriepartners, zusätzlichen Recherchen zu den geltenden Normen und Richtlinien, sowie den öffentlich verfügbaren Quellen.

Als Grundlage für die Untersuchung der alternativen Materialien wird der Bericht «Alternative Materialien für Lüftungsanlagen» von Settembrini et al. verwendet. Mit der Recherche in öffentlich verfügbaren Quellen wird nach zusätzlichen Informationen gesucht.

3. Anforderungen an Materialien für Lüftungsanlagen

Die Menschen verbringen den grössten Teil des Tages in geschlossenen Räumen: beim Arbeiten, Einkaufen, Ausübung von sportlichen Aktivitäten oder Schlaf. Damit der Aufenthalt und die Arbeit in den Räumlichkeiten als angenehm empfunden werden, muss die Raumluftqualität stimmen. Dabei übernehmen die Lüftungstechnischen Anlagen sehr wichtige Funktionen, indem sie eine optimale Temperatur und Luftfeuchte gewährleisten und saubere Luft ins Gebäude fördern.

In diesem Kapitel werden die elementaren Anforderungen an die lufttechnischen Anlagen, insbesondere die Lüftungsleitungen untersucht. Als Grundlage für die Beurteilung der Eignung werden die Normen und Richtlinien verwendet, welche im Zeitpunkt der Berichtserfassung als aktuell gelten. Die unten aufgeführten Kriterien müssen vom eingesetzten alternativen Material erfüllt werden, um eine Plausibilität des zu untersuchenden Materials für die Lüftungstechnischen Anwendungen bestätigen zu können.

Da der praktische Teil der vorliegenden Arbeit den Schwerpunkt auf Holz als Lüftungsleitungsmaterial legt, wird jeweils pro Kriterium kommentiert, ob das Holz die benötigten Anforderungen erfüllt. Weiter werden einige Vorteile von Holz aufgeführt. Der Einsatz der Leitungen wird dabei auf die Wohnbauten beschränkt.

Die Zusammenstellung der Erkenntnisse für die anderen alternativen Materialien, welche für den Bericht Relevanz aufweisen, ist im Kapitel *11 Alternative Materialien* aufgeführt.

3.1. Primäre Anforderungen

3.1.1. Brandschutz

Die Beurteilung über die Zulässigkeit des zu untersuchenden Materials stützt sich auf die Brandschutzrichtlinien (BSR) der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF).

Das zu untersuchende Fichtenholz zählt zu den Nadelhölzern. Andere Beispiele von Nadelhölzern sind Tanne, Lärche, Föhre, Douglasie, Arve, Red Cedar und weiteren Holzarten. Laut Recherchen und Angaben des Industriepartners weisen die Holzarten dieser Kategorie ein Brandverhalten von RF3 auf.⁷ Gemäss VKF BSR 13-15 werden die Baustoffe mit einem zulässigen Brandbeitrag mit dem Brandverhalten von RF3 «nicht leicht brennbar» beschrieben. Werden die Leitungen innerhalb eines Brandabschnittes installiert, gilt für Gebäude geringer und mittlerer Höhe, sowie für

⁷ E-Mail-Korrespondenz mit Strüby AG Nr. 4, 10.05.2022 (Anhang)

Hochhäuser ein maximal zulässiges Brandverhalten von RF3(cr).⁸ Dabei steht «cr» für Baustoffe mit «kritischem Verhalten»). Befinden sich die Leitungen in vertikalen Fluchtwegen oder traversieren durch mehrere Brandabschnitte, müssen die Leitungen einen RF1 aufweisen.⁹

Solange die Leitungen innerhalb eines Brandabschnitts installiert werden, entsprechen die Lüftungsleitungen aus Fichtenholz den geltenden Brandschutzrichtlinien. Ein praktisches Beispiel dafür ist eine Wohnungseinheit mit einem KWL-Gerät und Leitungen innerhalb des Brandabschnittes.

3.1.2. Hygiene

Die hygienischen Anforderungen an die lufttechnischen Anlagen, sowie deren Bestandteile lassen sich mit Hilfe von SIA 382/1:2014 formulieren.

Laut dieser Norm ist bei der Planung und Ausführung der Anlage darauf zu achten, dass die Lüftungszentrale und das Leitungssystem so zugänglich sind, dass eine einwandfreie Wartung und der Ersatz von Komponenten gewährleistet werden können. Ebenso muss besonders Wert auf die Reinigbarkeit des ganzen Leitungssystems, sowie die Vermeidung der feuchten Stellen im Leitungssystem gelegt werden. Um den Schutz von Menschen und Umwelt zu gewährleisten, dürfen die verwendeten Baustoffe keine gefährlichen Schadstoffemissionen ausstossen.¹⁰



Abbildung 1: Reinigungswelle und Zubehörbürsten (Bösch MRS AG, o. A.)

Die Lüftungsleitungen im KWL-Bereich lassen sich laut Dienstleistungsanbieter grundsätzlich gut reinigen. Dabei werden rotierende Lüftungsbürsten mit flexiblen Wellen eingesetzt. Als Antrieb für die rotierende Welle kann beispielsweise eine konventionelle Akku-Bohrmaschine verwendet werden. Solche Reinigungsbürsten gibt es in diversen Ausführungen. Ein spezielles Beispiel dafür ist eine Bürste mit einer Endoskop-Kamera, welche den

⁸ (VKF, 2017, S. 5)

⁹ (VKF, 2017, S. 12)

¹⁰ (SIA382/1, 2014, S. 30)

Reinigungsprozess vereinfachen kann.¹¹ Die Bürste wird an einem Ende der Lüftungsleitung ins Leitungsnetz eingeführt und wird rotierend durch den Netzverlauf geleitet. Am anderen Ende des Kanalnetztes wird gleichzeitig ein unterdruckerzeugendes Sauggerät angeschlossen, welches die von der Oberfläche gelösten Schmutzpartikel absaugt und diese in einen Auffangbehälter umleitet. Bei diesem Reinigungsprozess handelt es sich um eine Trockenreinigung, d.h. es wird kein Wasser oder Putzmittel verwendet.

Gemäss telefonischer Auskunft der Reinigungsunternehmen Rohrmax und Sauter AG Kaminfeger und Lüftungsreinigung, kann diese Reinigungsmethode bei Lüftungsleitungen aus Holz angewendet werden. Bei optimaler Bürstenhärte sollte die Holzoberfläche geschont bleiben und von Verunreinigungen befreit werden können. Eine Schwierigkeit stellen die 90° Umlenkungen der Leitungen dar. Der Reinigungsprozess wird dadurch erschwert, aber nicht verunmöglicht.¹²

Bei vorhandenen Revisionsöffnungen und allgemeiner Zugänglichkeit zum Kanalnetz kann die Reinigung der Leitungen gewährleistet werden. Für eine praktische Bestätigung und Effektivität der konventionellen Methoden sollte dieser Prozess an einem Aufbau untersucht werden.

3.1.3. Dichtheit

Die Lüftungsleitungen müssen mindestens die Klasse B und teilweise die Klasse C gemäss den Normen SN EN 1507, SN EN 12237 und SN EN 15727 erfüllen. Gemäss SIA 382/1:2014 gilt, dass die Klasse B eine Minimalanforderung für alle Abluft- und Fortluftanlagen mit Überdruck innerhalb des Gebäudes ist.¹³

Die Recherche ergab keine Quellen, welche auf die Dichtheitsprüfungen von ähnlichen Holzkanal-Aufbauten hinweisen. Daher muss die zu untersuchende Holzleitung auf Dichtheit geprüft werden, um eine präzise Aussage betreffend der Dichtheitsklasse machen zu können.

Die Leitungswände des Versuchsaufbaus sind aus Massivholzplatten angefertigt. Gemäss DIN 4108-7:2011-01 gelten Massivholzplatten als luftdicht.¹⁴ Daher hängt es vom Verbindungsmaterial und dessen Applikation ab, ob die geforderte Dichtheitsklasse eingehalten werden kann.

¹¹ (Bösch MRS AG, o. A.)

¹² Telefon-Korrespondenz mit Fa Rohrmax und Sauter AG (Anhang)

¹³ (SIA382/1, 2014, S. 56-57)

¹⁴ (Deutsches Institut für Normung - DIN, 2012, S. 17)

3.1.4. Betriebsfestigkeit

Gemäss SIA382/1:2014 müssen die Lüftungstechnischen Anlagen und dementsprechend die Materialien einem Über- bzw. Unterdruck von rund ± 500 Pa standhalten. Bei mittleren Anlagen beträgt der massgebende Druck rund $\pm 1'000$ Pa. Der für Wohnbauten typische Druck kann mit ca. ± 200 Pa angenommen werden.¹⁵

Der Versuchsaufbau wird durch ein KWL-Gerät mit Luft versorgt. Der gemessene Luftvolumenstrom in der Leitung beträgt ca. $50 \text{ m}^3/\text{h}$ und entspricht gemäss SIA 382/1:2014 dem Volumenstrom einer «Nassraum mit Dusche»-Nutzung im kontinuierlichen Betrieb.¹⁶ Während des Versuches wurden Leckage-Prüfungen mit Dräger Rauchröhrchen durchgeführt¹⁷. Dabei konnten keine Leckagen festgestellt werden. Bei einer Wohnbaunutzung mit Druckdifferenz von ± 200 Pa in der Lüftungsleitung und nutzungsmässigen Volumenströmen sollten daher keine Undichtheiten auftreten. Somit erfüllen die Holzkanäle des Versuchsaufbaus die praktischen Anforderungen, welche die Betriebsfestigkeit der Anlage betreffen.

3.1.5. Feuchteresistenz

Die Recherche ergab keine quantitativ formulierten Anforderungen an das Lüftungsnetz. Allgemein gilt, dass besonders Wert auf die Vermeidung von feuchten Stellen im Leitungssystem gelegt werden muss.

Die Auswirkungen der Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen auf die Innenoberfläche des Holzkanals, welche bei einer Wohnungsnutzung anfallen, werden mit dem Versuchsaufbau geprüft. Die Untersuchungen sind im Kapitel 4 *Versuchsaufbau* aufgeführt.

3.1.6. Robustheit

Holz gilt als eines der ältesten Baumaterialien der Menschheitsgeschichte und verfügt über gute bautechnische Eigenschaften mit einer langen Lebensdauer. Gutes Beispiel dafür sind die 500 Jahre alten Fachwerkhäuser¹⁸. Die Holzwerkstoffe werden im Gebäudeausbau breit eingesetzt und können somit eine genügende Robustheit für die Lüftungstechnischen Anwendungen aufweisen.

¹⁵ (SIA382/1, 2014, S. 50)

¹⁶ (SIA382/1, 2014, S. 45)

¹⁷ (Dräger MSI - Messtechnik und Messgeräte, 2022)

¹⁸ (Schaar, 2021)

3.1.7. Lebensdauer

Gemäss SIA 382/1:2014 beträgt der Richtwert für die technische Lebensdauer von Lüftungsleitungen 30 Jahre.¹⁹ Momentan fehlen die Erfahrung und Erkenntnisse für den Einsatz des Holzes als Lüftungsleitungsmaterial, vor allem über eine 30 jährige Zeitspanne. Bekannte Anwendungen von Holzwerkstoffen im Bau zeigen, dass eine lange Lebensdauer im Innenausbau möglich ist.

Für eine konkrete Aussage müssen Langzeitversuche und Beobachtungen durchgeführt werden. Ein weiterer Faktor, welcher die Lebensdauer beeinflussen kann, ist die Temperatur- und Luftfeuchteschwankung, welcher das Holz in einer Wohnung ausgesetzt ist. Die Ergebnisse der Untersuchung im Rahmen dieses Bachelor Berichts sind im Kapitel 9.5 *Fazit Versuch* aufgeführt.

3.2. Ökobilanz

Ein wichtiger Vorteil von Holzwerkstoffen könnte die Ökobilanz sein. Da es sich bei Holz um einen nachwachsenden Rohstoff handelt, welcher auch regional gewonnen wird, ist zu erwarten, dass die Herstellung der Holzkanäle weniger umweltschädlich ist als die Herstellung aus Stahlblech.

Für diese Untersuchung wurde ein vereinfachter Ökobilanzvergleich gegenüber Stahlblechleitungen erstellt. Als Grunddaten für den Vergleich wurden die zum Zeitpunkt der Berichtserfassung aktuellen Ökobilanz-Kennwerte von KBOB²⁰ verwendet.

Verglichen werden die Grössen des kumulativen Primärenergieaufwands für die Herstellung und Entsorgung, kumulative Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung, sowie die Gesamtbewertung der Umweltbelastungspunkte. Da die vorher erwähnten Kennwerte auf einen Kilogramm Baustoff Bezug nehmen, wurde für den Vergleich jeweils mit dem Gewicht von einem Meter Leitung gerechnet. Die Dimensionen der Leitungen betragen 10 cm x 10 cm für den Holzkanal und 10 cm Durchmesser für das Stahlblechrohr.

Die detaillierten Daten für den Vergleich, sowie die Berechnung der Ökobilanz und deren Resultatdiagrammen sind im externen Anhang ersichtlich.

¹⁹ (SIA382/1, 2014, S. 69)

²⁰ (KBOB, 2022)

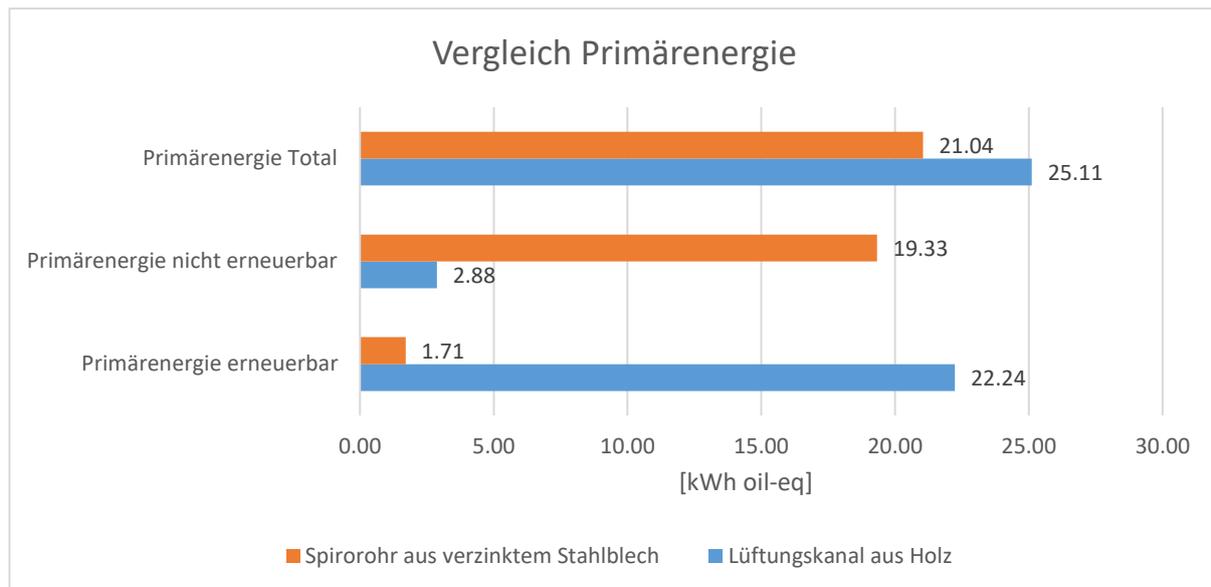


Abbildung 2: Ökobilanz-Vergleich Primärenergie

Aus dem oben aufgeführten Diagramm lässt sich feststellen, dass für die Herstellung vom Holzkanal 4.07 kWh effektiv mehr Energie benötigt wird. Der Grund dafür ist die Masse der Holzkonstruktion. Für einen Meter Holzkanal werden ca. 4.3 kg Fichtenholz benötigt, für eine Stahlblechleitung hingegen nur ca. 1.2 kg verzinktes Stahlblech.

Eine andere Erkenntnis ist die Art der benötigten Primärenergie. Für die Herstellung und Entsorgung von einem Holzkanal können bis zu 89 % der Energie aus erneuerbaren Quellen verwendet werden. Bei Stahlblechleitungen stammt hingegen 92 % der Energie aus nicht erneuerbaren Quellen.

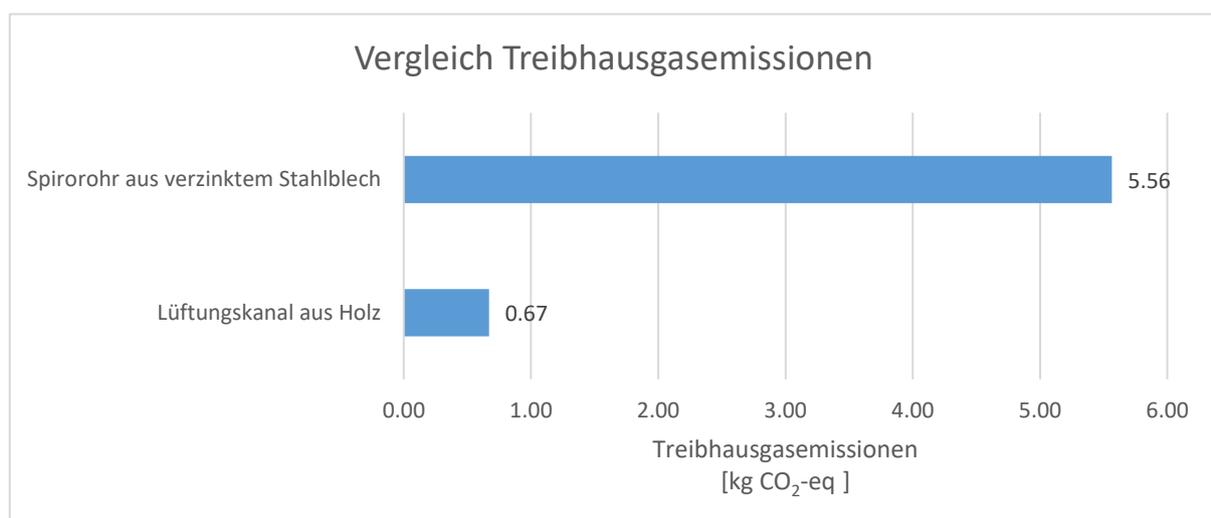


Abbildung 3: Ökobilanz-Vergleich Treibhausgasemissionen

Laut den Kennwerten von KBOB wird bei der Herstellung und Entsorgung der benötigten Materialmenge von verzinktem Stahlblech für einen Meter

Lüftungsleitung ca. 8 mal mehr kg CO₂-eq ausgestossen als für eine gleich lange Leitung aus Holz.

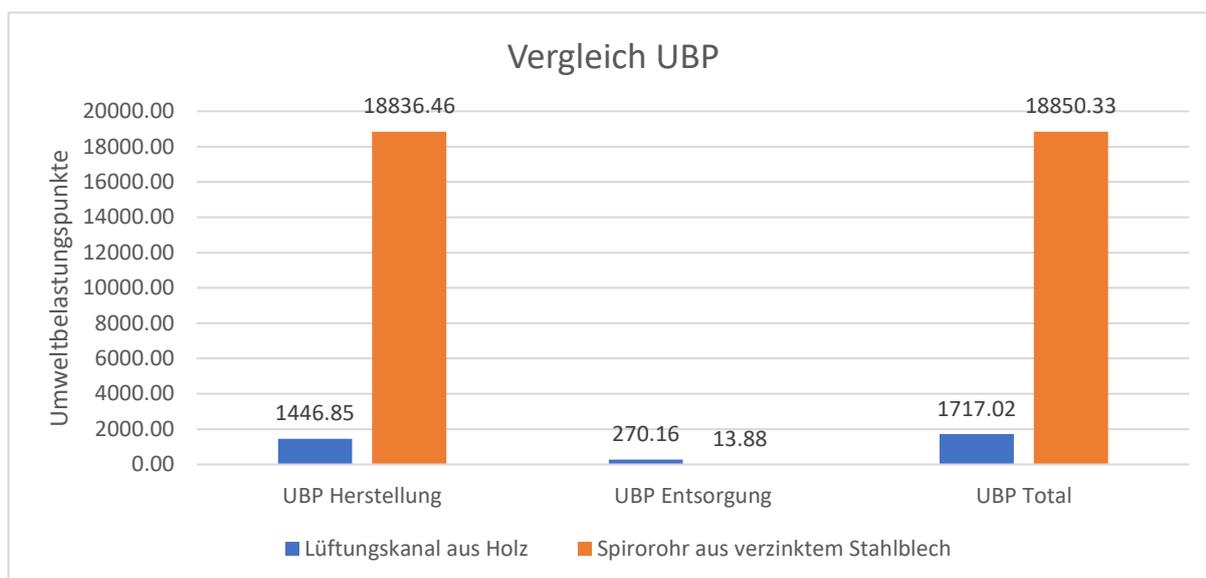


Abbildung 4: Ökobilanz-Vergleich Umweltbelastungspunkte

Ein deutlicher Vorteil ist beim Vergleich der erzeugten Umweltbelastungspunkte ersichtlich. Für die Herstellung und Entsorgung von einem Meter Lüftungskanal aus Holz beträgt die Anzahl der Umweltbelastungspunkte ca. 11 mal weniger als bei Stahlblech.

Aus den vorliegenden Vergleichen lässt sich bestätigen, dass die Gesamtoökobilanz für Holzleitungen bessere Resultate aufweist als jene von Stahlblechleitungen.

3.3. Zusammenfassung

Holz scheint aus technischer Sicht die grundlegenden Anforderungen an die Lüftungstechnischen Bauteile zu erfüllen. Die Erfüllung der Anforderungen, wie Luftdichtheitsklasse und Betriebsfestigkeit konnten nicht genau bestätigt werden, da die Recherche keine offiziellen Prüfungen von vergleichbaren Konstruktionen erwies. Mit genügender Abdichtung der Leitungen sollten diese Kriterien aber auch erfüllt werden können. Die Feuchteresistenz, sowie das Risiko von mikrobiellem Befall wird anhand des Versuchsaufbaus im Kapitel 9 *Auswertung der Messungen* thematisiert.

4. Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der vom Industriepartner errichtete Grundaufbau erläutert. Die Funktion, Konstruktion und das verwendete Material werden detailliert beschrieben.

4.1. Grundaufbau

Der Industriepartner Strüby Holzbau AG möchte den Einsatz von Konstruktionsholz als Material für Lüftungsleitungen überprüfen lassen. Das Ziel ist den Aufbau der vorgefertigten Deckenelemente mit Integration von luftleitenden Kanälen zu erweitern. Um den Produktionsprozess so einfach wie möglich zu halten, wurde auf die konventionellen Lüftungsleitungen aus Stahlblech verzichtet. Die Verarbeitung und Integration der Stahlblechleitungen sind für den Holzbauunternehmer artfremd, bringen Transportkosten mit sich und nutzen die vorhandenen Holzressourcen nicht adäquat. Anstelle der konventionellen Leitungen sollen Kanäle aus Holz mit ähnlichen Querschnitten verwendet werden.

Für die praktische Untersuchung der Konstruktion wurde ein Mock-Up Versuchsaufbau entworfen und im Februar 2022 im Gebäudetechnik Labor der Hochschule Luzern, Technik und Architektur, aufgebaut.

4.2. Funktion

Der Aufbau ist eine bidirektionale Lüftungsanlage und stellt das Prinzip von den in Deckenelementen integrierten Holzleitungen dar. Diese besteht aus einer Aussenluft-, Fortluft- und Abluftleitung. Dabei wurde keine dedizierte Zuluftleitung erstellt. Die Fortluft- und Aussenluftleitungen wurden mit Steinwolldämmplatten von aussen gedämmt.



Abbildung 5: Grundaufbau ohne Erweiterung

4.2.1. Konstruktion

Die Leitungen haben eine viereckige Form und bestehen jeweils aus vier Holzplatten, welche zwischen den Verbindungen mit Dichtungsband abgedichtet wurden. Die Platten wurden bei den Stössen mit

Selbstbohrschrauben verbunden. Die Schraubenverbindungen wurden ca. alle 40 cm auf der gesamten Länge der Leitungen angebracht. Die Umlenkungen wurden ohne Luftleitvorrichtungen ausgeführt und sind in Form von 90°-eckigen Bögen ausgeführt. Die Holzleitungen wurden an den Wänden der Innenfassade und am Gelände des Werkstatt-Podests befestigt. Als Befestigungsvorrichtung dienen eckige Holzkonstruktionen aus Dreischicht-Fichteplatten.

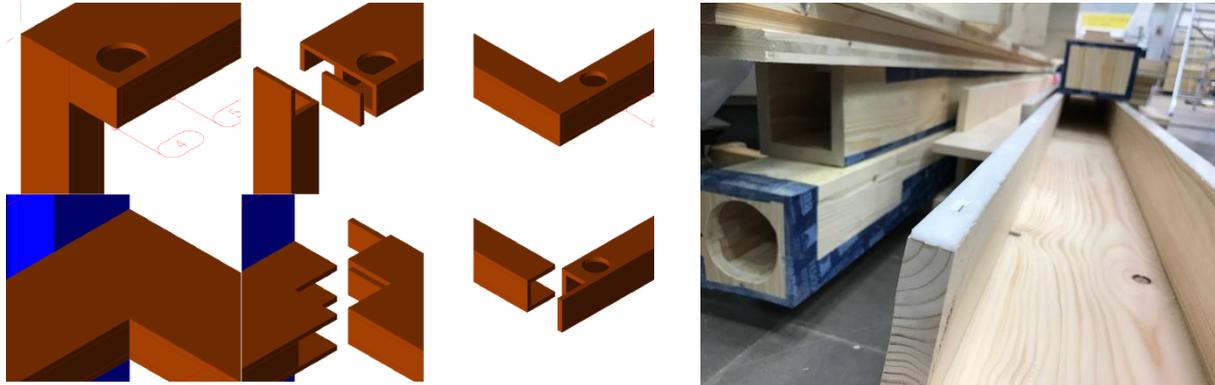


Abbildung 7: links: Visualisierung von Umlenkungen und Stossverbindungen (Strüby AG)
Abbildung 7: rechts: Dichtungsband auf den Kanalkanten

4.2.2. Aussenluft und Fortluft

Die Leitungen für Fortluft und Aussenluft werden miteinander entlang der Innenfassade geführt und mit einer gemeinsamen Innenwand aus Holz getrennt. Die Dimension beider Leitungen beträgt 150 mm Breite und 100 mm Höhe. Die beiden Leitungen besitzen eine gemeinsame 90° Umlenkung, welche zum Werkstatt-Podest führt. Die Fortluftleitung endet mit einer runden Öffnung mit einem Durchmesser von 150 mm. Diese Öffnung fördert die Luft frei ins Labor.



Abbildung 8: Fortluft- und Aussenluftleitung, Grundaufbau

Die Aussenluftleitung beginnt mit einer ca. 1 m langen eckigen Stutze, welche an den Hauptkanal angeschlossen ist. Diese Stutze beginnt ca. 60 cm oberhalb der Aussenluft-Ansaugöffnung an der Innenfassade des Labors und ist mit einer 90° Umlenkung zum Aussenluftkanal verbunden. Die

Stutzenöffnung ist 150 mm breit und 100 mm hoch. Die Aussenluft- und Fortluftleitungen haben je eine runde Öffnung, welche sich beim Werkstatt-Podest befinden. Diese sind für den Anschluss des KWL-Geräts vorgesehen. Die Gesamtlänge der Fortluftleitung beträgt ca. 8.7 m und die Aussenluftleitung ca. 19.5 m.

4.2.3. Abluft

Die Abluftleitung ist ein viereckiger Holzkanal mit einem Querschnitt von 100 mm Höhe und Breite. Der Aufbau ist identisch mit dem der Aussenluft und Fortluft. Der Abluftkanal besitzt eine 90° Umlenkung, welche die Leitung entlang dem Werkstatt-Podest führt. Die Gesamtlänge beträgt ca. 7.6 m. Die Abluftleitung besitzt drei Öffnungen mit einem Durchmesser von 100 mm. Die erste Öffnung für den Anschluss an das KWL-Gerät ist nach oben gerichtet. Die zweite Öffnung nach der Umlenkung ist ebenfalls nach oben gerichtet. Die dritte Öffnung dient für den Lufteintritt und ist an der Stirnseite am Ende der Leitung platziert.

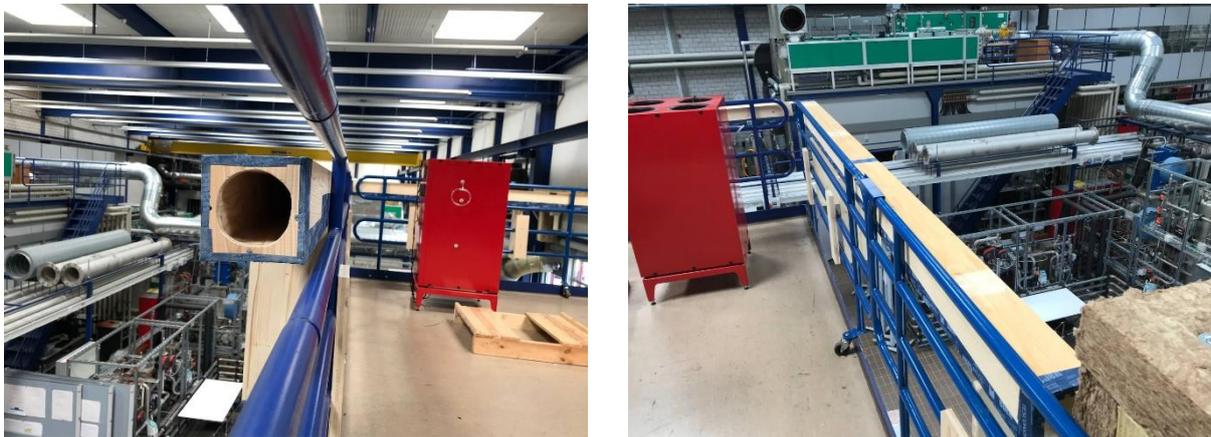


Abbildung 9: Abluftleitung, Grundaufbau

4.3. Material

In diesem Unterkapitel werden die für den Grundaufbau verwendeten Materialien, sowie deren Bedeutung und Eigenschaften beschrieben. Die Holzkanäle bestehen aus Massivholzplatten, Dichtungsband, Schrauben und Dämmplatten.

4.3.1. Holzplatten

Die Holzleitungen vom Versuchsaufbau sind aus zwei Zentimeter dicken Massivholzplatten aus schweizer Fichtenholz angefertigt. Solche Platten werden vom Industriepartner als Konstruktionsholz verwendet und sind somit ein lukratives Material, da kein zusätzlicher Beschaffungsaufwand und keine zusätzlichen Beschaffungskosten entstehen. Zudem besitzt der Industriepartner eine langjährige Erfahrung in Bezug auf die Verarbeitung und auf die vorhandene Infrastruktur.

Das Experiment soll zeigen, ob das Grundmaterial eine genügende Resistenz gegen die in Wohnnutzungen herrschenden Lufteigenschaften aufweisen kann. Für den ersten Versuchsaufbau wurde darauf verzichtet die Platten mit einer Schutzbeschichtung zu behandeln. Eine passende Schutzschicht wird erst bei ungenügenden Ergebnissen des Versuchs in Betracht gezogen.



Abbildung 10: Massivholzplatten für Grundaufbau

4.3.2. Dämmung

Die Aussenluft- und Fortluftleitungen wurden mit Steinwollämmplatten von aussen gedämmt. Das verwendete Produkt ist Flumroc Dämmplatte 3 mit einer Stärke von 100 mm auf der oberen und unteren Seite. Seitlich wurde eine Dämmdicke von 80 mm eingesetzt²¹. Diese Dämmplatten werden mit natürlichem Bindemittel hergestellt und besitzen Wärmedämmungs-, Schallschutz- und Brandschutztechnische Eigenschaften. Solche Dämmplatten werden im Innen- sowie Aussenbereich eingesetzt.

4.3.3. Dichtungsband

Zwischen den Plattenverbindungen wurde auf die Stösse ein weisses Dichtungsband aus Polyurethan-Schaumstoff angebracht. Das verwendete Produkt besitzt eine selbstklebende Schicht, wurde aber zusätzlich mit Tackerklammern befestigt. Das Dichtungsband wurde verwendet, um der Konstruktion eine Luftdichtheit zu gewähren.

4.3.4. Schrauben

Für die Plattenbefestigung wurden konventionelle Senk-Holzschrauben aus verzinktem Stahl verwendet. Die gewählte Länge beträgt 55 mm und der Durchmesser 3.5 mm.

²¹ (Flumroc AG, 2022)

4.3.5. Schnitt

Unten ist der Querschnitt von Abluft-, sowie Aussenluft- und Fortleitung abgebildet.

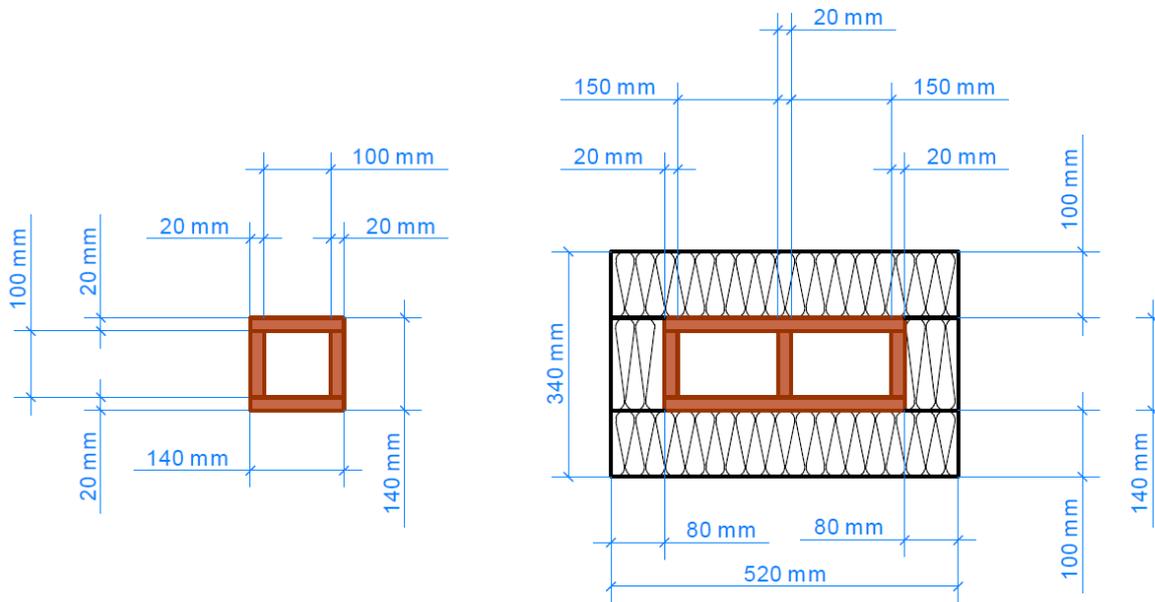


Abbildung 11: Querschnitt Holzkanäle. Links: Abluft; rechts: Aussenluft und Fortluft

5. Art und Prinzip der Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Art und das Prinzip der Untersuchung, sowie die für die Messungen definierten Bedingungen vorgestellt. Die Untersuchung soll zeigen, wie sich die feuchte Luft, die Temperatur-, sowie die Luftfeuchteschwankungen auf den Holzkanal auswirken.

5.1. Art des Versuches

Laut SIA 382/1:2014 müssen die Lüftungsleitungen eine Lebensdauer von 30 Jahren aufweisen können.²² Um eine konkrete Aussage bezüglich der Auswirkungen der Feuchte auf das Material zu machen, sollte eine Langzeitbeobachtung durchgeführt werden. Da dieser Bericht im Rahmen einer Bachelorthesis erstellt wird, ist die Zeit, welche für die Durchführung der Messungen und die Auseinandersetzung des zu untersuchenden Gegenstands, auf ca. 5 Monate begrenzt. Die Beobachtungen, welche bei einem Langzeitversuch während dieser Zeitspanne gemacht worden wären, wären mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht genug aussagekräftig ausgefallen. Daher macht es Sinn anstelle eines Langzeitversuchs einen Härtetest durchzuführen.

Dabei werden die Bedingungen, welchen der Versuchsaufbau ausgesetzt wird, qualitativ denen entsprechen, welche bei einer normalen Nutzung im extremen Fall auftreten könnten. Quantitativ soll der Versuch einer höheren Anzahl Ereignissen mit extremen Bedingungen ausgesetzt werden, als in der Realität zu erwarten wäre. Diese Massnahme soll helfen den Prozess zu beschleunigen, um die Widerstandsfähigkeit des zu untersuchenden Materials nach mehreren Jahren Betrieb abzuschätzen.

Um eine Aussage mit höherer Qualität und Authentizität zu erhalten, sollte ein Versuch über eine längere Zeitspanne durchgeführt werden. Dabei müssen die Bedingungen maximal denen entsprechen, die in der Realität auftreten.

5.2. Versuchsbedingungen

Die zu untersuchenden Leitungen sollen in der Zukunft in Bauten mit einer Wohnnutzung eingesetzt werden. Somit müssen die Bedingungen, welchen das System ausgesetzt wird, deren einer Wohnnutzung entsprechen.

Laut SIA 180:2014, beträgt das maximal zulässige Tagesmittel der Raumluftfeuchte für eine Raumlufttemperatur von 20°C und 20°C Aussentemperatur 78% r. F.²³ Bei der Betrachtung der Werte für tiefere Aussentemperaturen, ergibt sich eine Reichweite zwischen 30 % und 78 %.

²² (SIA382/1, 2014, S. 69)

²³ (SIA180, 2014, S. 46)

Diese Werte sind gemittelt und von der Aussenlufttemperatur und Aussenluftfeuchte abhängig. Sie gelten als maximal zulässig in Bezug auf die Vermeidung von Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbefall an Oberflächen im bewohnten Raum. Somit sollte in Wohnräumen bei normalen Bedingungen nicht mehr als 78 % r. F. auftreten.

Aussenlufttemperatur °C	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$p_{v,i,max}$ in Pa	1823	1605	1418	1255	1114	988	880	786	703
$v_{i,max}$ in g/m ³	13,5	11,9	10,5	9,3	8,2	7,3	6,5	5,8	5,2
$\varphi_{i,max}$ in % bei $\theta_i = 20^\circ\text{C}$	78	69	61	54	48	42	38	34	30
Taupunkt $\theta_{i,D,max}$ in °C	16,0	14,1	12,2	10,3	8,6	6,8	5,1	3,5	1,9

Abbildung 12: (SIA180, 2014), SIA 180 Tabelle 10

Eine andere Raumnutzung innerhalb eines Wohnbaus, wo tendenziell mehr Feuchte anfällt, sind die Nasszellen. Insbesondere die Räume welche eine Dusche vorsehen. In der SIA 180:1999 wurden Richtwerte für die Feuchteproduktionen typischer Feuchtequellen aufgelistet.

3.1.3.3 Die momentane Feuchteproduktion G kann mit Hilfe der Richtwerte in Tabelle 3 bestimmt werden

Tabelle 3 Richtwerte der Feuchteproduktion G typischer Feuchtequellen

Feuchtequelle	Feuchteproduktion G g/h
Person, leichte Arbeit	30– 60
Person, Haushaltarbeit	60– 90
Person, schwere Arbeit	100– 200
Kochen	400– 800
Geschirrspüler	200– 400
Duschen	1500–3000
Wannenbad	600–1200
Offene Wasserfläche (pro m ²)	30– 50
Topfpflanze	7– 15
Gummibaum (Ficus)	10– 20

Abbildung 13: Richtwerte der Feuchteproduktion G , Tabelle 3 (SIA180, 1999)

Somit kann angenommen werden, dass beim Duschen innerhalb einer Stunde bis zu 3000 g Feuchte anfällt.

Laut dem Bericht von Pr. Dr. Sedlbauer, welcher sich mit Feuchteproduktion in Wohnräumen befasst, kann die Dauer eines Duschvorgangs stark variieren. Dabei werden minimale und maximale Duschlängen von 5 und 21 Minuten aufgelistet. Ein arithmetischer Durchschnitt beträgt in Sedlbauers Statistik dabei 9.44 Minuten²⁴. Es wurde ein Wert von 15 Minuten gewählt,

²⁴ (Sedlbauer, 2017, S. 62)

da es sich bei diesem Versuch um einen Härtetest handelt und der Wert fast zwei Standardabweichungen über dem arithmetischen Mittel liegt.

Mit der Annahme einer durchschnittlichen Duschzeit von 15 Minuten und einer maximalen Feuchteproduktion von 3000 g/h wird für die Untersuchung davon ausgegangen, dass bei einem durchschnittlichen Duschvorgang 750 g Feuchte in die Luft freigegeben werden.

Beim Duschen wird in der Regel gesättigter Wasserdampf in die Luft freigesetzt. Ist der Duschaum mit einem Abluftauslass ausgestattet, wird ein Teil des freigesetzten Wasserdampfes zusammen mit der Raumluft, gemischt mit der Luft aus der Nachströmungsöffnung (z.B. Türspalt) direkt von dem Auslass angesogen und weiter durch das Lüftungsnetz geleitet. Der andere Teil des freigesetzten Wasserdampfes kondensiert auf den Raumboflächen und verdunstet mit der Zeit zusammen mit dem Duschrestwasser. Beides trägt zur Erhöhung der Raumluftfeuchte bei.

Beim Vergleich mit anderen typischen Feuchtequellen und deren Feuchteproduktion kann laut SIA 180:1999 ein Duschvorgang und die Verdunstung von Kondenswasser als die Feuchtequelle mit den höchsten Feuchtwerten betrachtet werden.

Diese Erkenntnis dient als Grundlage für die durchgeführten Messungen und das Versuchsprinzip. Der Grundaufbau musste dementsprechend erweitert werden, um einen Raum mit Feuchtequelle, Verdunstung von Kondensat und einer Belüftung zu simulieren. Die genaue Erweiterung ist im Kapitel 6 *Erweiterung Grundaufbau* beschrieben.

5.3. Versuchsprinzip

Das Prinzip des Versuches besteht aus zwei abwechselnden Phasen: Feuchteproduktion, welche das Duschen simuliert und die Verdunstung von Kondensat.

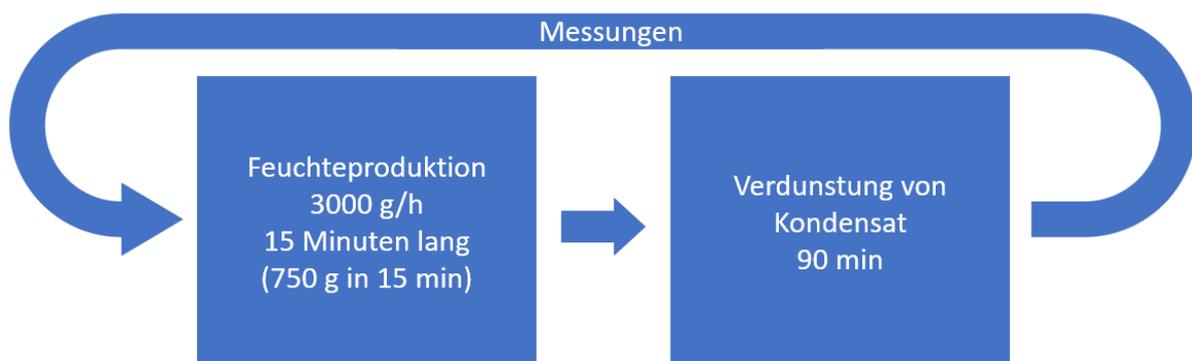


Abbildung 14: Versuchsprinzip

Dabei werden die Temperatur- und Feuchtebedingungen der Luft gemessen, welche im System herrschen. Die Messungen werden während der

ganzen Dauer des Versuches durchgeführt. Die Messpunkte, welche dabei generiert werden, ermöglichen die graphische Darstellung der Messgrößen.

Da die Temperatur- und Luftfeuchtwerte allein keine Ergebnisse über die Widerstandsfähigkeit der Holzkanäle liefern, werden zusätzliche Messungen an der Kanaloberfläche benötigt. Ein wichtiger Wert für die Beurteilung eines Holzwerkstoffes und seiner Eigenschaften im Holzbau ist der Feuchtegehalt des Materials.

6. Erweiterung Grundaufbau

Der Grundaufbau musste erweitert werden, damit die Messungen nach dem Prinzip vom Kapitel 5.3 *Versuchsprinzip* durchgeführt werden konnten. Das System wurde mit zusätzlichen Stahlblech Rohrleitungen und flexiblen Lüftungsschläuchen an das KWL-Gerät und den Dampfbehälter angeschlossen. Ein Dampf-Luftbefeuchter wurde an den Dampfbehälter angeschlossen, um eine Feuchtequelle zu simulieren. Der Aufbau wurde mit Messlöchern für Temperatur- und Feuchtefühler erweitert, welche mit der Logger-Station verbunden wurden.

6.1. Leitungen

Es wurden zusätzliche Leitungen aus Stahlblech und flexible Lüftungsschläuche verwendet. An die Abluft-, Aussenluft- und Fortluftkanäle wurden runde Stahlblech Stutzen angebracht, um die Holzkanäle und das KWL-Gerät mit flexiblen Lüftungsschläuchen zu verbinden. Bei der Abluft wurde eine Revisionsöffnung mit einer Dimension von 100 mm und einem demonstrierbaren Deckel vor der ABL Umlenkung eingerichtet.

Die vorderseitige Ansaugöffnung vom Abluftkanal wurde mit Spirorohrbögen an den Dampfbehälter angeschlossen. Die Luftnachströmung des Dampfbehälters wurde ebenso mit Spirorohr ausgeführt. Die Aussenluftstutze wurde mit einem flexiblen Lüftungsschlauch und einem Formstück mit der Öffnung an der Innenfassade verbunden.



Abbildung 15: Revisionsdeckel für Feuchtemessungen ABL und Verbindung von Dampfbehälter

Alle Spirorohrleitungen und Schläuche wurden bei den Verbindungsstellen mit einem Klebeband abgedichtet, damit eine höhere Dichtheit gewährleistet werden kann.

6.2. KWL-Gerät

Für den Versuch wurde ein KWL-Gerät der Firma Hoval verwendet. Der Typ ist HomeVent FRT 451. Das gewählte Gerät besitzt einen Rotationswärmetauscher für Wärme- und Feuchterückgewinnung. Der maximale

Volumenstrom beträgt gemäss den Herstellerdaten 450 m³/h. Für eine einfachere Bedienung verfügt das Gerät über ein Bedienungspanel.

Das KWL-Gerät wurde zwischen Abluft- und Aussenluftleitungen auf dem Werkstatt-Podest platziert. Die Aussenluft- und Fortluftöffnungen wurden direkt an die entsprechenden Holzkanäle mit flexiblen Lüftungsschläuchen verbunden. Die Zuluftöffnung wurde in die Höhe verlängert und mit einem Spirorohrbogen zum Labor ausgerichtet. Für Einregulierungszwecke wurde eine Iris-Blende mit einem Durchmesser von 180 mm eingesetzt. Die Abluftöffnung wurde mit einem T-Stück in die Höhe erweitert. Die beiden Abgänge des T-Stückes wurden von 180 mm auf 100 mm reduziert. Der erste Abgang wurde mit einem flexiblen Lüftungsschlauch an den Holzkanal verbunden. Der zweite Abgang saugt die Luft direkt von der Halle ab. Die beiden Abgänge wurden mit Iris-Blenden mit einem Durchmesser von 100 mm ausgerüstet.



Abbildung 16: Das KWL-Gerät Hoval FRT 451 und die Anschlussleitungen

6.3. Dampf-Luftbefeuchter

Um eine Feuchtequelle zu simulieren wurde ein Dampf-Luftbefeuchter der Firma Condair (Modell Defensor Mk5-16 Visual.) verwendet. Die maximal einstellbare Dampfleistung beträgt 16 kg/h.

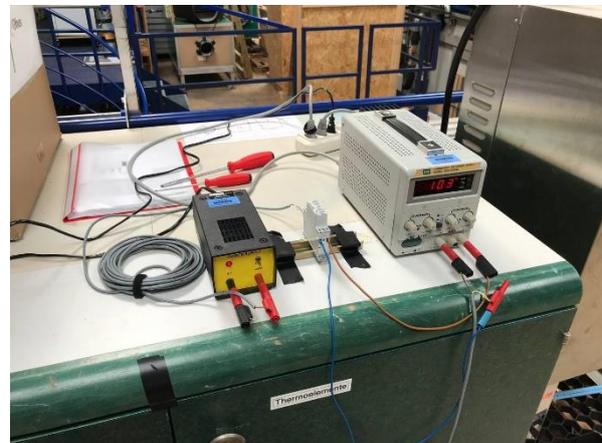


Abbildung 17: Dampf-Luftbefeuchter Defensor Mk5 Visual und Zeitschaltuhr-Aufbau

Das Gerät besitzt ein integriertes Bedienpanel und wurde zusätzlich mit einer Zeitschaltuhr erweitert, damit das Gerät während dem Betrieb zwischen den definierten Zeitzyklen automatisch umschalten kann.

Der Dampfzylinder besitzt 4 Anschlüsse: Wasserversorgung, Kondensatabscheidung, Entkalkung und Wasserdampfaustritt. Für die Wasserversorgung wurde normales Leitungswasser verwendet. Die Kondensat- und Entkalkungsanschlüsse wurden mit flexiblen Wasserschläuchen in den Wassersammelbehälter geführt, welcher sich im Erdgeschoss des Labors befindet.

Die weiteren Angaben bezüglich der Einstellungen und die detaillierten Betriebseigenschaften sind im Kapitel aufgeführt.

6.4. Dampfbehälter

Der Dampfbehälter ist ein Fass, welches aus recyceltem Polypropylen besteht. Der Behälter besitzt einen entfernbarer Deckel und hat ein Inhaltsvermögen von 310 l.

Der Behälter verfügt über drei Öffnungen: Anschluss an Abluftnetz, Nachströmungsöffnung und eine Stütze für den Anschluss an den Dampfzylinder. Der Durchmesser der Lüftungsstutzen beträgt 100 mm, Dampf-schlauchstutze 50 mm.



Abbildung 18: Dampfbehälter und die Anschlüsse

Das Volumen des Behälters wird verwendet, um eine Nasszelle mit Duschbetrieb zu simulieren. Während einem «Dusch»-Vorgang, wird der Behälter mit Wasserdampf aus dem Dampfzylinder, während 15 Minuten Betrieb, gefüllt. Der Wasserdampf wird mit der Luft aus der Nachströmungsöffnung vermischt und durch das Abluftkanal zum KWL-Gerät geführt. Während der Dampfproduktion bildet sich Kondensat an den Innenwänden und auf dem Boden des Behälters. Folgend wird der Behälter 90 Minuten ohne Dampfproduktion durchlüftet und dabei das angefallene Kondensat teilweise verdunstet. Das Restkondensat sammelt sich auf dem Behälter-Boden.

Die weiteren Angaben bezüglich des Versuchsprinzips und die detaillierten Betriebseigenschaften sind im Kapitel 7.4 Einstellung des Dampf-Luftbe-
feuchters aufgeführt.

6.5. Logger-Station

Um die Ergebnisse der Messungen von Temperatur- und Luftfeuchte bei dem Versuchsaufbau über den Zeitraum des Experimentes zu erfassen, wurde eine Logger-Station verwendet. Die Station besteht aus einem Computer mit Ein- und Ausgabeperipheriegeräten, einem Messwert-Logger und den Vorrichtungen für die nötigen Fühleranschlüsse. Für die Messungen im Kanalnetz, sowie im Raum, wurden kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler verwendet. Für die Temperaturmessungen im Behälter wurde ein Pt100 Temperaturfühler verwendet.



Abbildung 19: Logger Station und Messgeräte-Anschlüsse

7. Förderwerte und -Mengen

In diesem Kapitel werden die für Betrieb relevanten Förderwerte- und Mengen, sowie die Methoden deren Einstellung beschrieben.

7.1. Luftmenge

Die Luftförderung im System wird mit dem KWL-Gerät Hoval FRT451 verrichtet. Die Seiten der Aussenluftleitung betragen 150 mm breite und 100 mm Höhe. Die berechnete Querschnittsfläche beträgt 0.015 m^2 . Bei einer Annahme, dass der Luftvolumenstrom nicht mehr als $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei solcher Dimension und einer Wohnungsnutzung betragen wird, darf die maximale Luftgeschwindigkeit im Kanal 3 m/s betragen. Laut SIA382/1:2014, entspricht diese Geschwindigkeit den Richtwerten bezüglich den maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten in Luftleitungen.²⁵

Somit lässt sich folgender maximal zulässiger Volumenstrom berechnen:

$$\dot{V}_{MAX} = A * B * w * 3600 \text{ s/h} = 0.10 \text{ m} * 0.15 \text{ m} * 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 162 \text{ m}^3/\text{h}$$

Mit:

A Kanalhöhe, 0.10 m

B Kanalbreite, 0.15 m

w maximale Geschwindigkeit, 3 m/s

Der maximal zulässige Volumenstrom für die Aussenluft, respektive Fortluftleitung, beträgt $162 \text{ m}^3/\text{h}$ und darf bei der Einstellung des KWL-Geräts nicht bedeutend überstiegen werden. Da die Untersuchung den Fokus auf die Abluftleitung setzt, dient der maximale Volumenstrom nur als eine Grössenordnung für die Luftmengeneinstellung.

7.2. Einstellung der Luftmenge am KWL-Gerät

Der Gesamtvolumenstrom wurde direkt mit dem Bedienpanel des Lüftungsgerätes eingestellt. Dabei wurde zuerst die theoretische Leistungsstufe, welche sich für den gesuchten Volumenstrom prozentual ausrechnen lässt, eingegeben.

Es wurde entschieden ein Wert von ca. $150 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Gesamtluftmenge anzustreben. Dabei soll der Volumenstrom in der Abluftleitung nicht weniger als $40 \text{ m}^3/\text{h}$ betragen, was dem Richtwert der SIA 382/1:2014 für Nasszellen mit Dusche entspricht.²⁶

²⁵ (SIA382/1, 2014, S. 50)

²⁶ (SIA382/1, 2014, S. 45)

Um den Wert von 150 m³/h gewährleisten zu können wurden zusätzlich die Iris-Blenden bei der Abluft und Zuluft Stutzen verwendet. Diese Messwerte und die Einstellungen für die Iris-Blenden und vom KWL-Gerät, sowie die effektive Luftmengen sind in der folgenden Abbildung aufgelistet.

Iris-Blende Abluft Holzkanal Ø100 qv=k*Wurzel(dP) in [l/s]		Iris-Blende Abluft Raum Ø100 qv=k*Wurzel(dP) in [l/s]		Iris-Blende Zuluft Raum Ø180 qv=k*Wurzel(dP) in [l/s]		Hoval KWL-Gerät FRT 451		
qv	13.5 [l/s]	qv	27.5 [l/s]	qv	42.1 [l/s]	V _{MAX}	ZUL/ABL	443 [m ³ /h]
qv	48.5 [m ³ /h]	qv	99.1 [m ³ /h]	qv	151.7 [m ³ /h]	Einstellung		45 [%]
ΔP	29 [Pa]	ΔP	28 [Pa]	ΔP	8 [Pa]	V _{IST}	ZUL	151.7 [m ³ /h]
k	2.5 [-]	k	5.2 [-]	k	14.9 [-]	V _{IST}	ABL	147.5 [m ³ /h]
Pos.	6 [-]	Pos.	3.5 [-]	Pos.	5 [-]			

Abbildung 20: Luftmengen Iris-Blenden und KWL-Gerät

Um die Ergebnisse der Umrechnungen zu bestätigen, wurde eine zusätzliche Volumenstrom-Messung mit einer anderen Methode durchgeführt. Dafür wurde der ACIN FlowFinder Mk2 verwendet. Dabei handelt es sich um ein Messgerät, welches nach dem Druckkompensationsprinzip arbeitet. Die Messöffnung von FlowFinder lässt sich mit einem Adapter erweitern, welcher sich an die jeweilige Geometrie des zu messenden Luftauslasses anpassen lässt und den Druckabfall durch einen eingebauten Stützventilator kompensiert.

Die Messungen mit dem FlowFinder ergaben die Resultate von 45, 46 und 47 m³/h. Das resultierende arithmetische Mittel der Messungen lässt sich mit 46 m³/h ausrechnen. Somit wurden die Iris-Blenden für die Gesamtvolumenströme und den Abluftkanal korrekt eingestellt.

Die Luftmenge für den Abluft-Holzkanal beträgt somit 46 m³/h. Der gewählte Wert entspricht gemäss SIA 382/1:2014 dem Richtwert für Abluftvolumenstrom in einem Nassraum mit Dusche bei kontinuierlichem Betrieb. Die Luftmenge wurde während der ganzen Untersuchung konstant gehalten.

7.3. Feuchtemenge

Wie im Kapitel 5.2 *Versuchsbedingungen* beschrieben wurde die anfallende Feuchtemenge mit 3000 g/h definiert. Bei einem 15 Minuten Betrieb beträgt dies umgerechnet 750 g.

Als Feuchtequelle wurde der Dampf-Luftbefeuchter Defensor Mk5 Visual verwendet. Der Dampf-Luftbefeuchter funktioniert drucklos. Er arbeitet nach dem Widerstandsheizprinzip, d. h. der Dampf wird im Dampfzylinder mit mehreren Widerstandsheizelementen erzeugt. Das Gerät wird in der Praxis für Raumluftbefeuchtung in Lüftungs- und Klimaanlage verwendet.

Bei der Verdampfung wird der Wasserdampf durch den Austrittsschlauch zum Einsatzort weitergeleitet²⁷.

Der Austrittsschlauch wurde mit dem Polypropylen Dampfbehälter und der dafür vorgesehenen Vorrichtung von aussen verbunden. Auf der Innenseite wurde die Schlauchvorrichtung mit einem Stahlrohr bis ca. zur Mitte des Behälters weitergeführt. Das Stahlrohr endet mit einem 90° Bogen, welcher nach unten, zum Boden des Behälters, ausgerichtet ist.

7.4. Einstellung des Dampf-Luftbefeuchters

7.4.1. Betriebszyklen

Für den Versuch wurden zwei Betriebszyklen definiert: 15 Minuten Betrieb mit Dampfproduktion und 90 Minuten Verdunstungsphase ohne Dampfproduktion. Bei den Testversuchen stellte sich heraus, dass der Dampf-Luftbefeuchter, während dem Betriebsunterbruch abkühlt und nicht warmgehalten wird. Bei erneuter Aktivierung des Gerätes folgte daher eine Vorwärmzeit, welche von folgenden zwei Faktoren abhängig ist. Erstens: Wie lange der Dampfproduktionsbefeuchter inaktiv war, respektive wie stark sich das Wasser im Dampfzylinder abkühlte. Je kühler das Wasser, desto mehr Zeit wird benötigt, um dieses wieder zum Sieden zu bringen. Der Zweite Faktor ist die Leistungseinstellung des Gerätes. Je höher die Einstellung, desto schneller wärmt sich das Wasser wieder auf die Siedetemperatur auf. Diese Beobachtungen wurden bei den Testversuchen und Einstellungen der Dampfmenge gemacht.

Bei der für den Versuch eingestellten Leistung und einer 90-minütigen Dampfproduktionsphase beträgt die Vorwärmzeit 4 Minuten und +/- 10 Sekunden. Dieser Wert wurde während dem ganzen Versuch beobachtet und blieb unverändert. Aus der Vorwärm-, Betriebs-, und Verdunstungsphase lässt sich folgender, wiederholender Betriebsablauf darstellen:

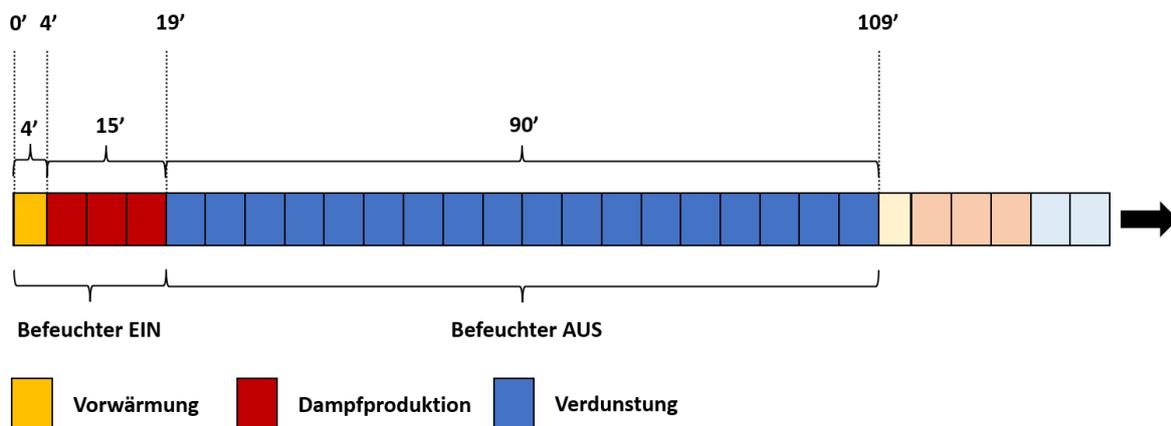


Abbildung 21: Betriebsablauf Dampf-Luftbefeuchter

²⁷ (Condair plc, 2022)

7.4.2. Ansteuerung der Regulierung

Für die Einstellung der oben beschriebenen Zeitzyklen musste die Steuerung des Dampf-Luftbefeuchters extern erweitert werden, da die Bedienebene des Gerätes keine interne Zeitschaltuhr mit mehreren Zyklen vorsieht. Für die Erweiterung wurden eine externe Zeitschaltuhr und eine Spannungsquelle verwendet.

Die Leistung des Dampf-Luftbefeuchters lässt sich mit einem 0-10 V Signal zwischen 0% und 100% von der eingestellten «Soll» Leistung regulieren. Somit wurde die Spannungsquelle an die Klemmen der Steuerkarte des Befeuchters so angeschlossen, dass bei der Aktivierung der Quelle ein 10.3 V Signal auf die Klemme für die Regulierungsstufe-Freigabe geleitet wird. Dieses Signal gibt die Dampfproduktion bei dem der Spannung entsprechenden Wert frei. Beträgt das empfangene Signal 10 V, erfolgt die Dampfproduktion mit den eingestellten «Soll»-Leistungswerten. Bei einem Signal <10 V stellt sich die Leistung proportional zum Eingangssignal ein. Wird das Signal der Spannungsquelle unterbrochen (ein 0 V Signal), erfolgt der Betrieb mit 0 % Leistung. Dies bedeutet das Gerät bleibt theoretisch im Betrieb, aber produziert keinen Dampf und erhitzt sich nicht.

7.4.3. Zeitschaltuhr

Um eine automatische Zeitumschaltung der Betriebszyklen zu ermöglichen, wurde eine externe Zeitschaltuhr installiert. Die verwendete Zeitschaltuhr hat zwei einstellbare Zeitkreise. Jeder Zeitkreis lässt sich beliebig einstellen.

Der erste Kreis wurde mit 19 Minuten eingestellt und beinhaltet den Vorwärmungs- und Dampfproduktionszyklus. Der zweite Kreis wurde mit 90 Minuten eingestellt und ist für den Verdunstungszyklus verantwortlich. Bei beiden Zeitkreisen kann eingestellt werden, was mit dem durchgehenden Signal passieren soll. Während der erste Zeitkreis aktiv ist, wird das 10.3 V Signal durch den Schaltkreis geleitet und gibt somit die Dampfproduktion zu «Soll»-Leistung frei. Bei dem zweiten Zeitkreis wird der Schaltkreis unterbrochen und es werden 0 V an die Dampf-befeuchter-Regulierung gesendet. Dies resultiert einen Betrieb mit 0 % Leistung und stellt die Dampfproduktion ab. Nach 90 Minuten wechselt die Zeitschaltuhr wieder zum ersten Zeitkreis und der Vorgang beginnt von vorne.

7.4.4. Einstellung der Dampfmenge

Für die Vereinfachung des Einstellungsprozesses wurde folgende Annahme gemacht: Die effektiv erzeugte Dampfmenge vom Dampf-Luftbefeuchter in g/h entspricht der gesuchten Feuchtemenge.

Um die anfallende Feuchtemenge von 3000 g/h zu erreichen, mussten die internen Verluste vom Dampfbehälter, welche während dem Betrieb

auftraten, eruiert werden. Diese sind wie folgt ausgeprägt. Der Wasserdampf, welcher durch den Austrittsschlauch vom Dampfzylinder zum Dampfbehälter wandert, kühlt sich auf der Strecke teilweise durch die thermischen Verluste vom Schlauch ab. Es resultiert eine Kondenswasserbildung an der Innenoberfläche des Schlauches. Dieses Kondenswasser fließt dann auf einer Seite aufgrund der Schwerkraft zurück in den Dampfzylinder und auf der anderen Seite in den Dampfbehälter hinein. Dem zufolge entspricht die im Dampfzylinder erzeugte Dampfmenge nicht der Menge wie beim Eintritt in den Behälter. Um die effektive Dampfmenge zu eruieren, wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt.

Kondensat bei der Vorwärmung

Zuerst wurde die Menge des Kondensats, welches während der Vorwärmung entsteht, gemessen. Beim Betriebsstart des Dampfbefeuchters beginnt die Dampfproduktion nicht zeitgleich, sondern verzögert sich. Der Grund dafür ist das Wasser im Dampfzylinder, welches zwischen den Betriebsphasen nicht warmgehalten wird. Es wurde beobachtet, dass während der Vorwärmzeit das Kondenswasser zuerst nur stossweise aus der Dampfstutze austrat. Erst nachdem das Wasser im Dampfzylinder die Siedetemperatur vollständig erreichte, begann das Gerät den Wasserdampf auszustossen. Diese Wassermenge liess sich messen, indem ein Auffangbehälter unterhalb der Dampfaustrittsstutze im Dampfbehälter platziert wurde.

Mit dieser Messung lässt sich zusätzlich die eigentliche Vorwärmzeit bestimmen. In der Abbildung unten ist die graphische Darstellung der Messung aufgeführt.

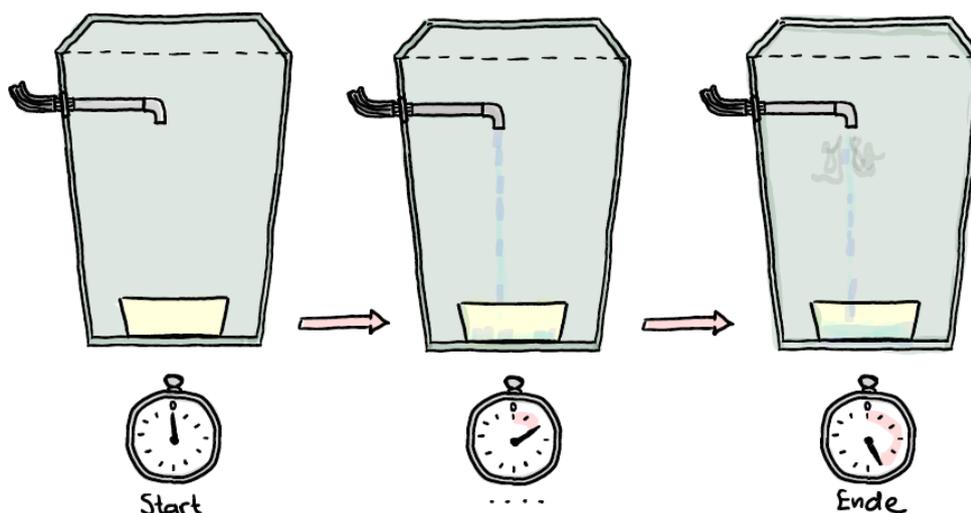


Abbildung 22: Messung Kondensat bei der Vorwärmung

Kondensat während dem Betrieb

Nachdem die Dampfproduktion begonnen hatte, trat aus dem Dampfrohr nicht nur der Wasserdampf, sondern auch ein Anteil des Wassers heraus, welches durch die thermischen Verluste im Dampf Schlauch entstand. Um diese Wassermenge zu eruieren, wurde der Deckel des Dampfbehälters geöffnet und ein Auffangbehälter unterhalb der Dampfaustrittsstutze platziert. Während der Dampfproduktion stieg der austretende Dampf hinauf und entwich aus dem Dampfbehälter. Das zeitgleich austretende Kondensat fiel jedoch herab und sammelt sich im Auffangbehälter.

In der Abbildung unten ist die graphische Darstellung der Messung aufgeführt.

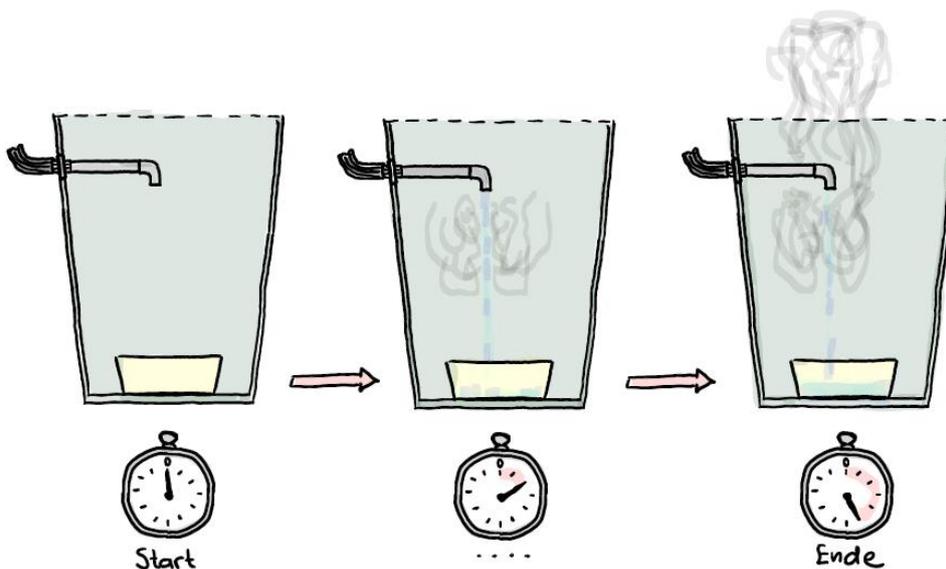


Abbildung 23: Messung Kondensat während dem Betrieb

Resultierende Wassermenge nach der Vorwärmung und Betrieb

Für die resultierende Messung wurde der Deckel des Dampfbehälters geschlossen und die zum Holzkanal führende Abluftöffnung abgeschlossen. Der Bogen der Nachströmungsöffnung wurde mit weiteren Bögen erweitert, sodass der Eintrittsbogen auf der Raumseite nach unten zeigt. Darunter wurde ein Auffangbehälter platziert, um das Kondensat zu sammeln, welches durch den produzierten Wasserdampf vom Dampfbehälter entstand. Nach der Vorwärmzeit und einem 15-minütigen Betrieb wurde jeweils eine 10-minütige Pause eingehalten, damit der heisse Wasserdampf im Behälter abkühlen und sich an den Innenoberflächen des Dampfbehälters ansiedeln konnte. Am Ende des Experiments wurde das entstandene Kondensat von den Innenoberflächen und vom Auffangbehälter gesammelt und gemessen.

In der Abbildung unten ist die graphische Darstellung der Messung aufgeführt.

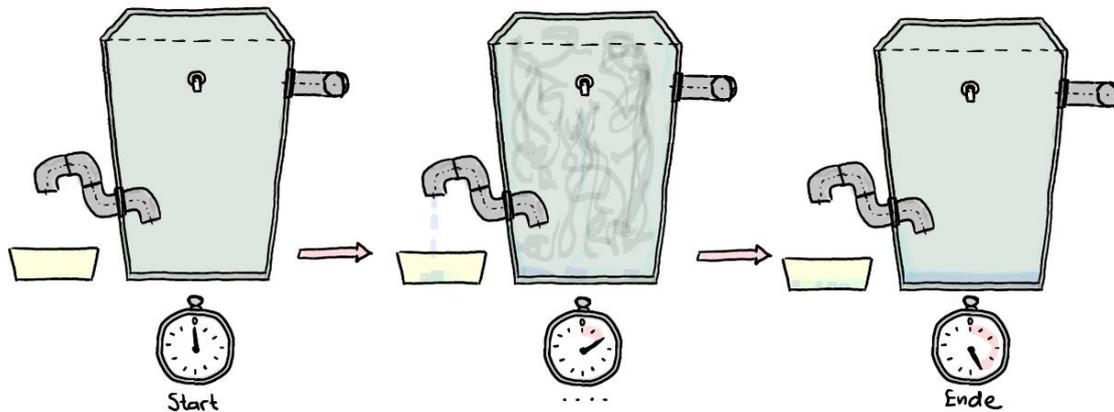


Abbildung 24: Messung Resultierende Wassermenge

Bilanzierung der Messresultate

Für die Berechnung der produzierten Dampfmenge wurden zusätzlichen Annahmen gemacht. Der Verlust von Flüssigkeit, welche auf den Oberflächen des Dampf- und Auffangbehälters zurückbleibt, wird auf 5 ml geschätzt. Der gemessene Wasserinhalt entspricht der Wasserdampfmenge, welche produziert wurde. Die effektiv produzierte Dampfmenge lässt sich somit mit folgender Bilanzgleichung ausrechnen:

$$V_{EFF} = V_{GES} - V_{VORW} - V_{BETR} + V_{VERL}$$

Mit:

V_{EFF}	effektiv produzierte Dampfmenge
V_{GES}	gesamte Wassermenge während Vorwärmung und Betrieb
V_{VORW}	Kondensatmenge während der Vorwärmung
V_{BETR}	Kondensatmenge während dem Betrieb
V_{VERL}	Verluste Oberflächen

Die oben aufgeführten Experimente wurden mit verschiedenen Einstellungen am Dampf-Luftbefeuchter und Betriebspausen durchgeführt, bis die effektiv produzierte Dampfmenge rund 750 g betrug.

Tabelle 4: Messungen Kondensatmenge während der Vorwärmung

Messungen Kondensatmenge während der Vorwärmung V_{VORW}	
Versuch	Gemessen
1	206 ml
2	204 ml
3	207 ml
4	204 ml
5	205 ml
Durchschnitt	205.2 ml

Tabelle 2: Messungen Kondensatmenge während dem Betrieb

Messungen Kondensatmenge während dem Betrieb V_{BETR}	
Versuch	Gemessen
1	192 ml
2	190 ml
3	195 ml
4	194 ml
5	195 ml
Durchschnitt	193.2 ml

Tabelle 3: Messungen gesamte Wassermenge während der Vorwärmung und Betrieb

Messungen gesamte Wassermenge während der Vorwärmung und Betrieb V_{GES}	
Versuch	Gemessen
1	1129 ml
2	1132 ml
3	1130 ml
4	1128 ml
5	1133 ml
Durchschnitt	1130.4 ml

Tabelle 1: Berechnung der effektiv produzierten Dampfmenge

Berechnung der effektiv produzierten Dampfmenge (inkl. ca. 5 ml Verlust) V_{EFF}	
Versuch	Berechnet
1	736 ml
2	743 ml
3	733 ml
4	735 ml
5	738 ml
Durchschnitt	737 ml

Die oben aufgelisteten Messungen resultierten bei der Dampfproduktionsleistung von 28 % und 19 Minuten Betrieb. Davon beträgt die Vorwärmzeit 4 Minuten. Die effektiv produzierte Dampfproduktion pro Stunde beträgt somit ca. 2948 g_W/h.

8. Messkonzept

Im Prinzipschema unten ist das Messkonzept des Versuches dargestellt.

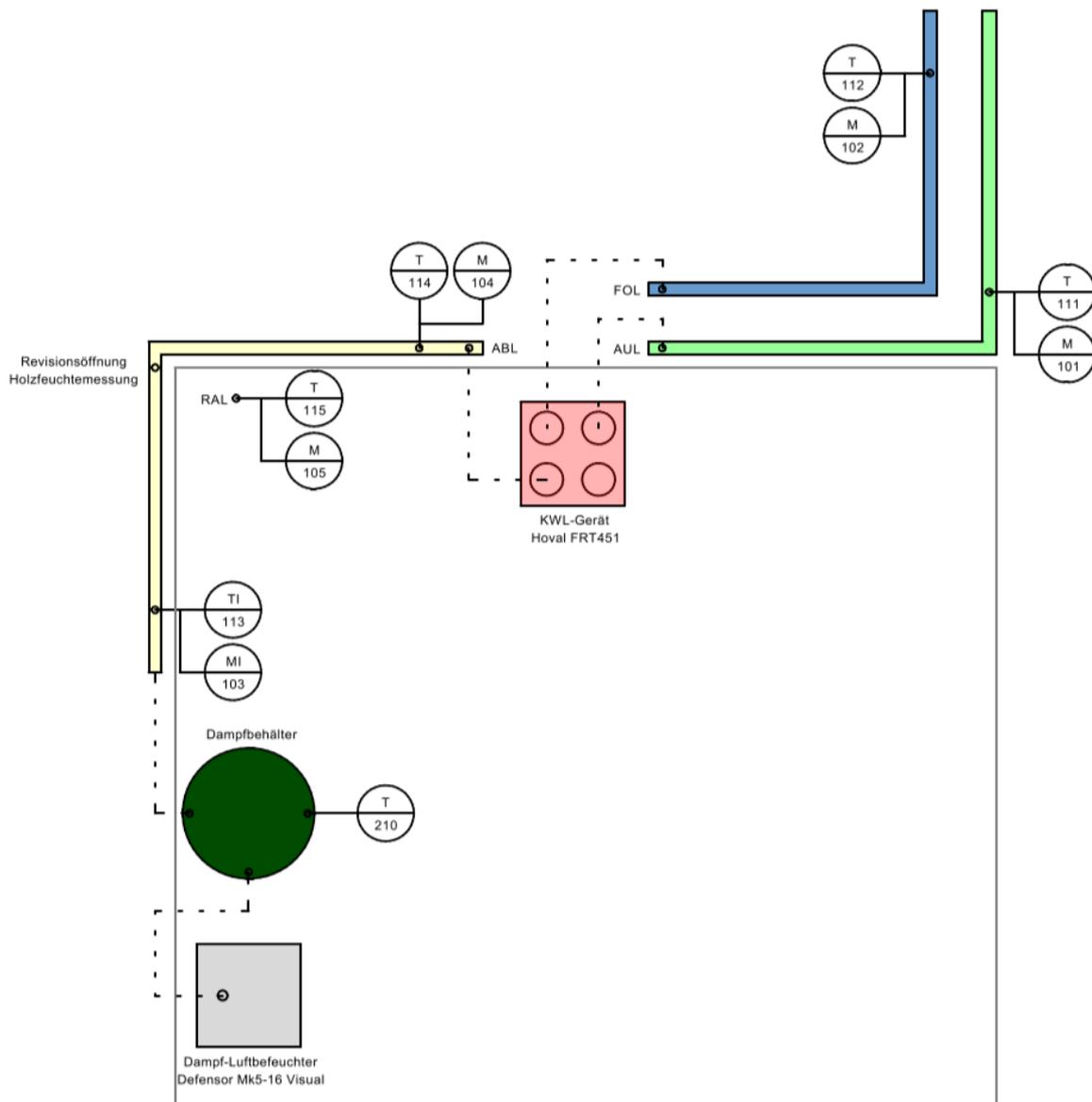


Abbildung 25: Prinzipschema Messkonzept

8.1. Temperatur und relative Feuchte

Im Prinzipschema des Messkonzepts sind die für die Erstellung der graphischen Darstellung benötigten Temperatur und Luftfeuchte-Messstellen abgebildet. Diese Messungen ermöglichen eine Übersicht über die im System herrschenden Temperatur- und Feuchtebedingungen und werden während dem Versuch für die Funktionskontrolle des aufgebauten Systems verwendet.

Die Messungen wurden während der ganzen Versuchslänge durchgeführt und mit dem Logger erfasst. Eine periodische Auswertung und die Sicherung der Daten fanden wöchentlich statt.

In der unterstehenden Tabelle sind die abgebildeten Messtellen aufgeführt und mit Messungs- und Luftart, sowie Positionierung genauer erweitert.

Tabelle 5: Legende Messkonzept

Legende Messkonzept			
Bez. Schema	Messung	Art	Position
T113	Temperatur	Abluft	Kanalnetzeintritt
M103	rel. Feuchte	Abluft	Kanalnetzeintritt
T114	Temperatur	Abluft	Kanalnetzaustritt
M104	rel. Feuchte	Abluft	Kanalnetzaustritt
T111	Temperatur	Aussenluft	Kanalnetzaustritt
M101	rel. Feuchte	Aussenluft	Kanalnetzaustritt
T112	Temperatur	Fortluft	Kanalnetzaustritt
M102	rel. Feuchte	Fortluft	Kanalnetzaustritt
T115	Temperatur	Raumluft	Versuchsaufbau
M105	rel. Feuchte	Raumluft	Versuchsaufbau
T210	Temperatur	Behälter	im Dampfbehälter

8.2. Holzfeuchte

Für die Bestimmung der Holzfeuchte wurde ein Messgerät der Firma Testo (Model 606-1) verwendet. Bei einer Messung müssen die Einstecknadeln des Gerätes ca. 4-5 mm tief ins Holz eingeführt werden²⁸. Über die beiden Einsteckfühler wird der elektrische Widerstand des Holzes, beziehungsweise dessen elektrische Leitfähigkeit, ermittelt. Das Holzfeuchtemessgerät berechnet dann daraus die Restfeuchte. Die Messungen wurden immer an den gleichen 5 Stellen durchgeführt. Der Messungsort befindet sich unterhalb des Revisionsdeckels im Abluftkanal.

Da die Holzfeuchtemessungen mit dem vorhandenen Messgerät nicht automatisiert werden können wurden diese 2-3-mal wöchentlich durchgeführt und dokumentiert. Die fehlenden Zwischenwerte werden mit Hilfe von durchgeführten Messresultaten interpoliert.

²⁸ (Testo SE & Co. KGaA, 2022)

9. Auswertung der Messungen

In diesem Kapitel werden die Resultate der Untersuchung genauer erläutert. Die Darstellung des Temperatur- und Feuchteverlaufs wird erklärt und Resultate der Holzfeuchtemessungen, sowie deren Umrechnung werden bewertet. Am Schluss erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

9.1. Logger Messungen – Temperatur und Feuchte

9.1.1. Verlauf der Temperatur und Feuchte

Um eine Übersicht über die gemessenen Werte zu verschaffen, wurde der gesamte Messverlauf pro Versuchstag in graphischer Form dargestellt. In der Abbildung unten ist der Verlauf der Messungen vom 22.04.2022 ersichtlich.

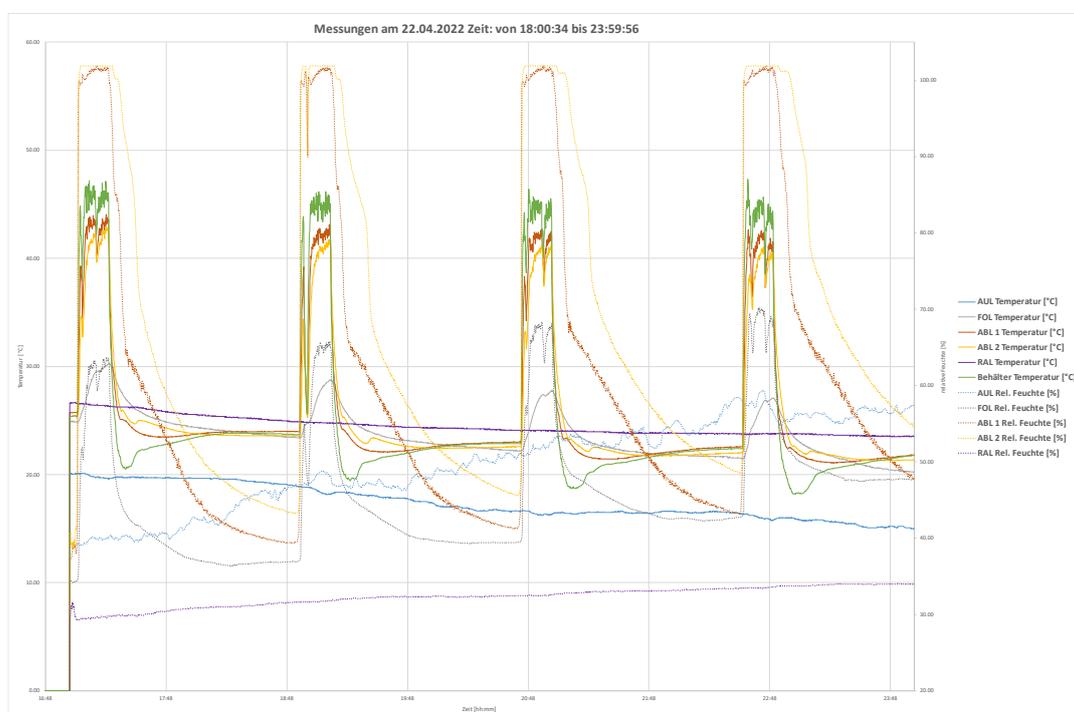


Abbildung 26: Messungsverlauf 22.04.2022

In der Abbildung sind 4 «Dusch»-Zyklen ersichtlich, welche zwischen 18 und 24 Uhr stattfanden. Diese Verlaufsformen wurden während dem ganzen Experiment konstant beobachtet. Dabei lässt sich der Verlauf eines «Dusch»-Zyklus in drei Phasen unterteilen.

In der ersten Phase sind die Vorwärmung und die Befüllung des Dampfbehälters mit Wasserdampf ersichtlich. Dabei lässt sich eine rasche Steigerung der Temperatur- und Feuchtwerte beobachten.

Nachdem die Temperatur und Feuchtigkeit die Höchstwerte erreichen, beginnt die eigentliche «Dusch»-Phase. Dieser Vorgang dauerte wie erwartet 15 Minuten. Bei den Temperaturen im Behälter und im Holzkanal sind Schwankungen im Bereich von ca. 5 K zu beobachten. Die Luft im Holzkanal

ist während dieser Phase gesättigt und die Feuchtwerte betragen konstant 100 % r. F.

Die dritte Phase ist die Verdunstung, welche nach der Unterbrechung der Dampfproduktion stattfindet. Zuerst sinken die Temperatur- und Feuchtwerte im Dampfbehälter und Holzkanal rasch.

Bevor die Temperatur im Behälter den Anfangswert erreicht hat, kann eine Unterkühlung beobachtet werden, welche dem erwarteten Verlauf widerspricht. Der Grund dafür ist die Verdunstung des Kondensats an den Innenwänden des Dampfbehälters. Nachdem diese Flüssigkeit verdunstet ist, erwärmt sich die Luft im Behälter und nähert sich weiter, wie erwartet, dem Anfangszustand.

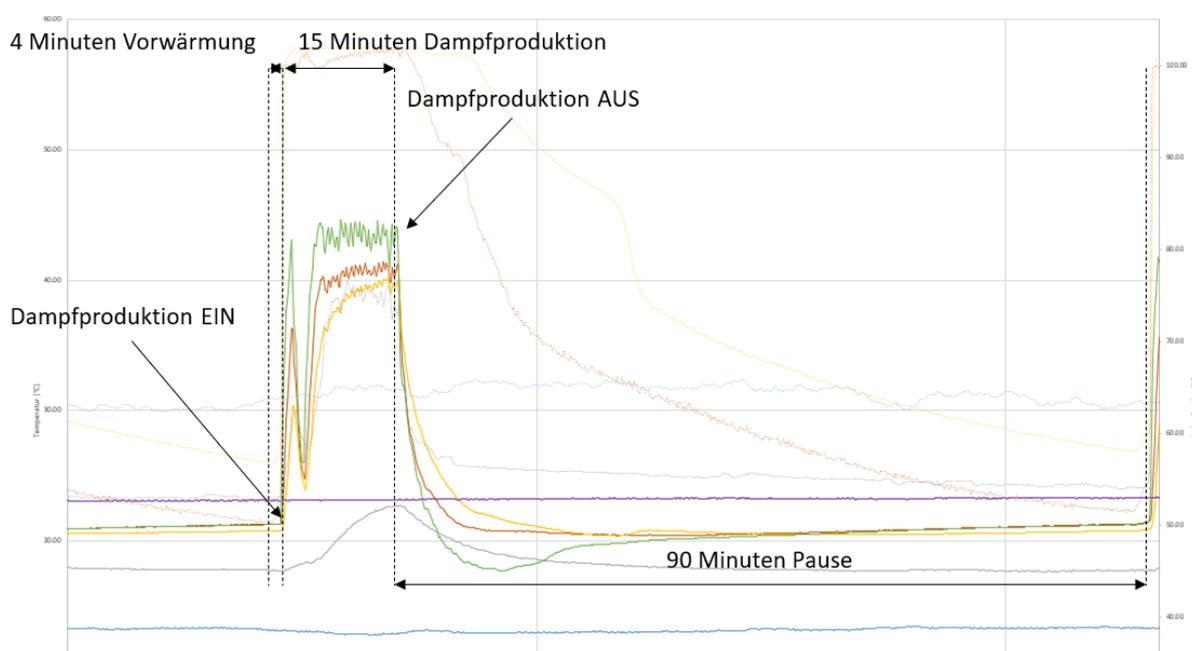


Abbildung 27: Phasen während "Dusch"-Zyklen

Die Luftfeuchtwerte im Holzkanal erreichen während der Verdunstungsphase nicht den Ursprungszustand. Während der Untersuchung wird eine Erhöhung der Werte von ABL Eintritt (MI103) und ABL Austritt (M104) beobachtet. Der Grund dafür ist das im Rahmen des Härtetests gewählte Verdunstungszeitfenster. 90 Minuten reichen nicht aus, um das auf dem Behälterboden angefallene Kondensat vollständig verdunsten zu lassen.

Gleichzeitig weichen die Werte der beiden ABL Messstellen voneinander ab. Beim ABL Austritt (M104) wird feuchtere Luft beobachtet. Der Grund dafür ist die Speichermasse des Holzes, welches stark ausgeprägte hygroskopische Eigenschaften aufweist. Die Luftfeuchte, welche während der Dampfproduktion entsteht, traversiert durch den Holzkanal. Das Wasser reichert sich an den Holzwänden an und diffundiert in die Materialschichten ein. Während der Verdunstungsphase wird diese Feuchte teilweise zurück in die Luft freigegeben. Die Kanalinnenflächen zwischen den beiden ABL

Messstellen befeuchten somit die Abluft. Demzufolge ist die Abweichung der Feuchtwerte zwischen den Messstellen zu beobachten.

9.1.2. Veränderungen der Werte während Betrieb

Während dem Betrieb wurden folgende Messwertschwankungen beobachtet:

Tabelle 6: Verteilung der Werte Während dem Betrieb

MIN und MAX Werte während Betrieb						
		Woche 1	Woche 2	Woche 3	Woche 4	
RAL Temperatur	MAX	28.0	27.4	29.4	29.8	°C
	MIN	22.1	21.6	22.5	22.9	°C
RAL Feuchte	MAX	45.0	46.4	54.4	52.6	% r.F.
	MIN	26.3	27.5	30.3	34.2	% r.F.
AUL Temperatur	MAX	26.3	22.0	27.4	28.7	°C
	MIN	8.8	10.2	13.4	14.6	°C
AUL Feuchte	MAX	85.1	80.4	86.4	82.8	% r.F.
	MIN	34.9	29.1	32.5	34.5	% r.F.
ABL1 Temperatur	MAX	51.0	43.9	49.0	48.9	°C
	MIN	19.3	18.5	20.0	20.7	°C
ABL1 Feuchte*	MAX	61.3	62.7	71.6	70.0	% r.F.
	MIN	44.7	46.0	49.4	43.7	% r.F.
ABL2 Temperatur	MAX	46.5	42.4	46.9	46.7	°C
	MIN	19.0	18.5	19.7	20.3	°C
ABL2 Feuchte*	MAX	70.0	73.0	78.5	77.1	% r.F.
	MIN	46.9	51.0	49.9	57.1	% r.F.
FOL Temperatur	MAX	30.7	30.2	33.0	33.1	°C
	MIN	13.9	14.5	18.1	19.2	°C
FOL Feuchte	MAX	83.9	83.1	83.9	82.5	% r.F.
	MIN	38.0	34.5	37.5	40.5	% r.F.
Behälter Temperatur	MAX	63.1	47.6	51.8	51.9	°C
	MIN	17.1	17.0	18.2	18.7	°C

* Maximum- und Minimumwerte während Verdunstung

Raumlufttemperatur

Die Schwankungen der Raumlufttemperaturen blieben während der Untersuchung konstant. Während den Mittagszeiten erreichte die Temperatur jeweils die maximalen Werte und abends die minimalen Werte. Die durchschnittliche Schwankung betrug dabei 6.4 K. Die minimalen Temperaturwerte betragen 21.6 °C und die maximalen 29.8 °C. Diese Werte können in der Realität bei einer Wohnnutzung durchaus beobachtet werden.

Raumluftfeuchte

Mit der Zunahme der Raumlufttemperatur erhöht sich die theoretische Sättigungsmenge der Luft. Demzufolge konnte bei dem Temperaturanstieg eine Abnahme der Raumluftfeuchte beobachtet werden. Die Schwankungen der Raumluftfeuchte während 4 Wochen Betrieb betragen im Durchschnitt 20 %. Das Minimum betrug 26.3 % und das Maximum 52.6 %. Ähnliche Werte können bei einer realen Wohnnutzung vorkommen.

Aussenlufttemperatur

Bei der Aussenlufttemperatur ist ein Wachstum der minimal vorkommenden Temperaturen zu beobachten. Grund dafür sind die örtlichen Klimabedingungen, welche sich während der Untersuchung veränderten.

Aussenluftfeuchte

Die Schwankungen der Aussenluftfeuchte betragen im Durchschnitt 50.9 %. Maximal wurden 85.1 % beobachtet und minimal 29.1%. Die maximalen Werte wurden während den Niederschlägen registriert.

Temperatur im Behälter

Während der Dampfproduktion nahm die maximale Temperatur ab. Die maximale Temperatur sank von 63.1 °C (Woche 1) auf 51.9 °C (Woche 4). Eine mögliche Erklärung dafür ist die Restkondensatmenge, welche sich während der Untersuchung auf dem Boden vom Dampfbehälter ansammelte und die Luft im Behälter abkühlte. Während der Verdunstung kühlte die Behältertemperatur jedoch auf durchschnittlich 17.8 °C ab.

Temperatur von ABL 1 (Kanal Eintritt)

Bei der Eintrittstemperatur konnte eine geringe Abnahme der Maximalwerte beobachtet werden. Die Abnahme korreliert mit den Behälter-Temperaturwerten, da es sich um die gleiche Luft handelt. Bei den Minimalwerten ist eine geringe Zunahme von 2 K zu beobachten. Der Durchschnitt während der Verdunstung betrug 19.6 °C. Allgemein wurde beobachtet, dass die Temperaturen im Holzkanal während der Dampfproduktion tiefer waren als im Behälter. Während der Verdunstung waren die Temperaturen im Holzkanal ca. 2 K höher als im Behälter.

Feuchte von ABL 1

Nach 4 Wochen Betrieb stieg die maximale Luftfeuchte während der Dampfproduktion von 61.3% auf 70.0%. Bei der Verdunstung war ebenfalls ein Anstieg der Minimalwerte zu beobachten.

Temperatur von ABL 2 (Kanal Austritt)

Im Vergleich zum Kanaleintritt blieb die maximale Temperatur im ABL 2 durchschnittlich bei 46.7 °C. Bei der Verdunstung wurde, wie bei ABL 1, eine Zunahme von ca. 2 K beobachtet.

Feuchte von ABL 2

Die maximalen und minimalen Werte der Luftfeuchte stiegen während der Untersuchung an. In der letzten Versuchswoche betrugen die maximal registrierten Werte 77.1 % und die minimalen 57.1 %.

Die Ursachen für die Steigerung der Luftfeuchte bei den beiden ABL Messstellen sind im Kapitel 9.1.1 Verlauf der Temperatur und Feuchte beschrieben.

9.2. Holzfeuchte / Wassergehalt-Messungen

Die Messungen der Holzfeuchte erfolgten jeweils 2-3 pro Woche, während der ganzen Versuchsdauer. Bei einem Messvorgang wurde, während 3 nacheinander folgenden Duschzyklen der Holzfeuchtegehalt mit dem Testo 606-1 Messgerät gemessen. Als Messstellen wurden 5 aneinander gereihte Einstechstellen verwendet. Die Messstellen befinden sich unterhalb des Revisionsöffnungsdeckels beim Abluftkanal.

Es wurde jeweils unmittelbar vor und nach einer Dampfproduktion gemessen. Die erste Messung zeigt den Holzfeuchtwert nach der Verdunstung. Der Verlauf dieser Messwerte zeigt auf, welche Feuchtemenge während der Härteprüfung in den Holzwänden angereichert wurde. Die zweite Messung soll zeigen, wie viel Feuchte die Kanaloberfläche während der Dampfproduktion aufnehmen kann und ob sich dieser Wert mit der Anzahl der Durchläufe verändert.

9.2.1. Gemessene Werte und Umrechnung

Das Testo 606-1 Messgerät ermittelt die Werte für Holzfeuchte. Für die Beurteilung des Materials ist jedoch der sogenannte Wassergehalt bedeutend. Holzfeuchte darf nicht mit dem Wassergehalt gleichgesetzt werden – für die Bestimmung des Wassergehalts muss die mit dem Messgerät ermittelte Holzfeuchte umgerechnet werden. Während sich die Holzfeuchte auf das Darrgewicht (absolut trockenes Holz) bezieht, beruht der Wassergehalt auf dem Verhältnis von Wasseranteil und Nassgewicht des Holzes.

Mit den Umrechnungsformeln aus der untenstehenden Tabelle lässt sich die Holzfeuchte in den gesuchten Wassergehalt umrechnen.²⁹

Umrechnungsformeln												
Wassergehalt w (%) aus Holzfeuchte u (%)	Holzfeuchte u (%) aus Wassergehalt w (%)											
$w = \frac{u}{100 + u} \cdot 100$	$u = \frac{w}{100 - w} \cdot 100$											
Umrechnungstabelle												
w	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
u	5	11	18	25	33	43	54	67	82	100	122	150

Tab. 1: Umrechnungsformeln und Umrechnungstabelle Wassergehalt (w) – Holzfeuchte (u): ofenfertiges Holz sollte maximal 20 % Wassergehalt bzw. 25 % Holzfeuchte aufweisen.

Abbildung 28: Umrechnung Holzfeuchte / Wassergehalt Tabelle 1 (Schradt, 2006)

9.2.2. Verlauf der Wassergehalt-Werte

Die gemessenen Holzfeuchtwerte wurden mit der Formel aus dem Kapitel 9.2.1 *Gemessene Werte und Umrechnung* umgerechnet. Der Verlauf der umgerechneten Werte lässt sich graphisch im untenstehenden Diagramm darstellen.

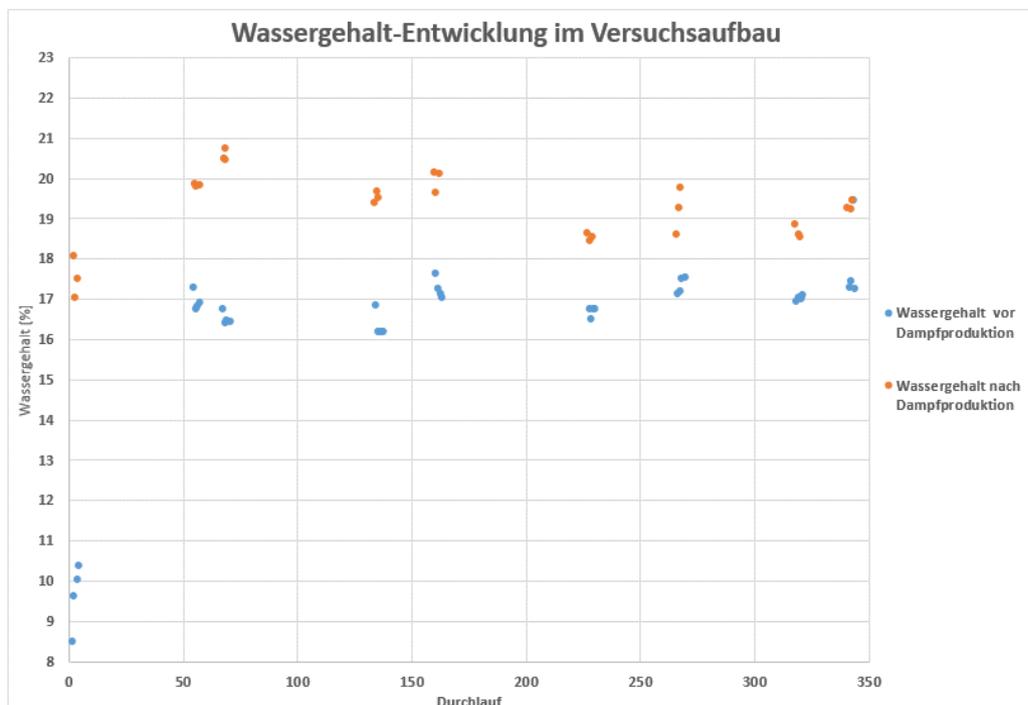


Abbildung 29: Wassergehalt-Entwicklung während Versuchsablauf

²⁹ (Schradt, 2006)

Der Wassergehalt an der Kanalinnenoberfläche betrug vor dem Versuchstart 8.5 %. Innerhalb der ersten 50 Duschzyklen wurde vor und nach der Dampfproduktion eine rasche Erhöhung der Wassergehalt Werte beobachtet. Bei späteren Messungen wird anhand der vorliegenden Werte davon ausgegangen, dass das Material seine Gleichgewichtsfeuchte erreicht hat. Die Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet den Wassergehalt, welcher sich nach längerer Akklimatisierung bei konstanter relativer Feuchtigkeit und konstantem Temperaturniveau ergibt. Das natürliche Holz passt sich dabei während der Akklimatisierung in seinen Eigenschaften vollständig an die Umweltbedingungen an. Die eruierten Werte vor Dampfproduktion in der zweiten Versuchshälfte bleiben konstant schwankend in einem Bereich zwischen 16 % und 18 %. Dies bedeutet, dass die Ausgleichsfeuchte von ca. 17% erreicht wurde und sollte bei weiteren Versuchen nicht ansteigen.

Bei den Werten nach der Dampfproduktion ist eine Überschwingung der Werte zwischen den Duschzyklen 50 und 150 zu beobachten. Später nehmen die Werte eine wiederholende Schwankung im Bereich zwischen 19 % und 20 % ein. Die Überschwingung könnte mit den Holzeigenschaften begründet werden. Dabei hatte das Material beim Versuchsanfang mehr Kapazität für die Feuchteaufnahme. Mit weiteren Duschzyklen wurde ein Anteil von der Luftfeuchte tiefer ins Material diffundiert. Das bereits ins Holz eingedrungene Wasser stellt möglicherweise eine «Barriere» für die neu anfallende Feuchte dar. Somit weist das Holz eine geringere Aufnahmefähigkeit auf.

9.3. Beurteilung der Messresultate

9.3.1. Betriebszeit

Die Versuchslänge wurde auf 4 Wochen begrenzt und dauerte vom 22.04.2022 bis 20.05.2022. Die gesamte Betriebsdauer beträgt ca. 672 Stunden. Insgesamt wurden 344 «Dusch»-Zyklen durchgeführt. Quantitativ entspricht dies 3.8 Monate Betrieb bei der Annahme, dass täglich 3 Duschgänge stattfinden.

9.3.2. Temperatur und Feuchte

Im Vergleich zur relativen Luftfeuchte ist der Einfluss der Temperatur unter normalen Umgebungsbedingungen auf die Holzeigenschaften deutlich geringer. Die thermische Ausdehnung ist gering und kann zum grössten Teil vernachlässigt werden. Die beobachteten Werte der Temperatur und Feuchte im Abluft Holzkanal nähern sich den maximal zu erwarteten Bedingungen in Wohnbauten.

Die Temperatur während der Verdunstung entspricht der in der Realität zu erwartenden Temperatur in einer Nasszelle. Die Temperatur während der

Dampfproduktion ist mit 45-50°C höher als durchschnittlich erwartet, kann aber im Rahmen der Härteprüfung als akzeptabel bezeichnet werden.

Die Luftfeuchtigkeit sinkt während der Verdunstungsphasen unter die Werte von 78 % r. F. welche im Kapitel 5.2 *Versuchsbedingungen* definiert wurden. Die mit Feuchte gesättigte Luft während den Duschzyklen kann in der Realität beim Duschen im Raum entstehen. Allgemein sind die Feuchtwerte höher als bei einer realen Anwendung erwartet, können aber im Rahmen des Härtetests ebenso als akzeptabel bezeichnet werden.

9.3.3. Wassergehalt vom Holz

Die Holzfeuchte beeinflusst die Materialeigenschaften wesentlich. Mit zunehmender Holzfeuchte sinkt die Festigkeit, die Wärmeleitfähigkeit steigt und die Anfälligkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen erhöht sich. Die Bauteilgrösse hat einen deutlichen Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte und das Quell- und Schwindverhalten. Als Ergebnis von Feuchteaufnahme und Trocknung vom Holzquerschnitt können innere Spannungen, Verformungen und bei Überschreiten der Festigkeit häufig Risse entstehen.³⁰

Als biologisches Material ist Holz auch biologisch abbaubar. Holzerstörende Pilze und Insekten können das Holz angreifen und nicht nur das Erscheinungsbild der Oberflächen beeinträchtigen, sondern auch die mechanischen Eigenschaften deutlich verschlechtern. Eine dauerhafte Holzfeuchte $u \leq 20$ % schliesst den Befall von holzerstörenden Pilzen und Insekten aus. Dieser Grenzwert darf nicht über einen längeren Zeitraum überschritten werden. Kurzzeitige Überschreitungen sind dabei laut öffentlich verfügbaren Quellen und Industriepartner unproblematisch.³¹

Die Ausgleichsfeuchte während der Verdunstung wurde mit ca. 17% berechnet. Der Wassergehalt während der Dampfproduktionen übersteigt im Durchschnitt nicht 20 %. Somit wurde die kritische Grenze von 20 % während der Härteprüfung nicht überschritten.

³⁰ (Burgert, o. A., S. 19)

³¹ E-Mail-Korrespondenz mit Strüby AG Nr. 3, 10.05.2022 (Anhang)

9.4. Qualitative Beurteilung des Materials

9.4.1. Verfärbungen der Oberflächen

Zusätzlich zu den Holzfeuchtemessungen wurde die Oberfläche im Bereich unterhalb des Revisionsdeckels fotografiert. Die Fotografien wurden jeweils an den Tagen der Holzfeuchtemessungen gemacht. Diese sollten zur visuellen Kontrolle der Feuchte ausgesetzten Oberfläche dienen.

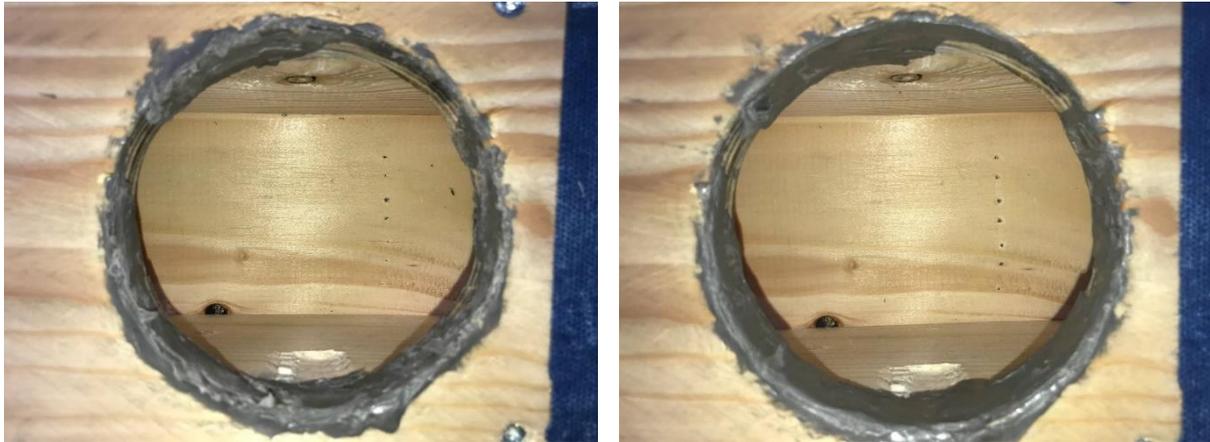


Abbildung 30: Kontrollstelle vor und nach dem Experiment

Das Bild links wurde kurz vor dem Untersuchungsbeginn, am 22.04.2022, gemacht. Das rechte Bild entstand am 20.05.2022 nach der letzten Holzfeuchtemessung. Die beiden Bilder sind identisch. Es sind keine sichtbaren Verfärbungen oder dunkle Stellen ersichtlich.

Die obere Platte des Abluftkanales wurde nach dem Versuchsende deinstalliert, um eine visuelle Kontrolle durchzuführen. Bei den Oberflächen unterhalb der Platte sind ebenfalls keine Verfärbungen oder dunkle Stellen ersichtlich.

Daraus lässt sich schliessen, dass eine nicht behandelte Holzoberfläche bei einem periodischen Kontakt mit feuchter Luft keine stark ausgeprägten Verfärbungen aufweisen wird. Bei längerem Betrieb sind Verfärbungen jedoch nicht ganz ausgeschlossen. Bei Bedarf sollte dies mit einer Langzeituntersuchung geprüft werden.

9.4.2. Oberflächenstruktur

Die Innenoberflächen der Holzkanäle wurden vor der Installation im Labor fein abgeschliffen. Die Oberflächen fühlten sich vor dem Versuch haptisch glatt an. Nach 4 Wochen Betrieb fühlte sich die Oberfläche dezent rauer

und aufgequollen an. Dennoch ist der Unterschied haptisch nicht markant ausgeprägt.



Abbildung 31: Kanal Innenoberflächen nach dem Versuchsende

9.4.3. Sichtbare Beschädigungen

An den Kanalinnenoberflächen sind teilweise kleine, dünne, 2 bis 9 cm lange Risse entstanden. Diese Risse sind laut Industriepartner nicht von grosser Bedeutung und bei der festgestellten Ausprägung nicht für die Konstruktionsstabilität oder Dichtheit relevant. Dennoch können sich bei längeren Betriebszeiten stärker ausgeprägte Risse bilden. Somit sollte eine Beschichtung in Betracht gezogen werden, um die optimalen Schutzmassnahmen zu garantieren.

9.4.4. Mikrobieller Befall

Es konnten keine sichtbaren Bildungen von Schimmel oder anderen biologischen Rückständen an den Kanalinnenoberflächen festgestellt werden. Dennoch wurden bei Versuchsende Wassergehaltswerte beobachtet, welche sich den kritischen 20 % näherten. Aus diesem Grund sind nicht sichtbare Bildungen von schädlichen Organismen nicht ausgeschlossen. In der Praxis oder bei weiteren Untersuchungen sollte dieser Aspekt genauer geprüft werden. Eine mögliche Methode dafür kann bspw. eine Hygieneinspektion mit einer Abklatschprobe oder eine Luftanalyse mit einem Luftkeimsammler sein.

9.5. Fazit Versuch

Die Messergebnisse des Wassergehaltes von Holz nach 4 Wochen Härteprüfung überschreiten die maximal erlaubten Werte nicht. In der Realität oder bei einem Langzeitversuch ist mit deutlich geringeren Feuchte-, sowie Temperaturbelastungen zu rechnen. Daher wird die erwartete Ausgleichsfeuchte in der Theorie geringere Werte aufweisen. Somit erfüllt das Material die Anforderungen in Bezug auf die Feuchteresistenz.

Trotz negativen Erwartungen weisen die qualitativen Untersuchungen keine stark ausgeprägten Veränderungen der Oberflächen, keine sichtbaren Verfärbungen oder mikrobiellen Befall auf. Das Resultat der Härteprüfung kann

somit als positiv bezeichnet werden. Um eine Aussage für längere Betriebsperioden machen zu können, sollten weitere Untersuchungen und Hygieneprüfungen durchgeführt werden.

Es wurde eine Rissbildung an den Innenoberflächen festgestellt, welche sich bei längeren Betriebszeiten vergrössern könnte. Diese Erkenntnis spricht gegen den Einsatz von unbeschichtetem Holz als Material für Lüftungsleitungen.

Mit einer Beschichtung, welche das Material von der Feuchteaufnahme und Rissbildung schützen kann, sollte das Konstruktionsholz genügende Eigenschaften aufweisen können, um als Material für Lüftungstechnische Anwendungen in einem Wohnbau verwendet werden zu können.

10. Holzschutzmassnahmen

Als Grundlage für dieses Kapitel wurden die SN/DIN Normenreihe «Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten», Auszüge aus dem schweizerischen Holzschutzverzeichnis (SHV) von Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Auszüge von der Internetwebsite des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), sowie die Korrespondenz von Strüby AG und seinen Industriepartnern verwendet.

Dieses Kapitel befasst sich mit Holzschutzmassnahmen. Weiter werden die Holzschutzarten, deren Eigenschaften und Auswirkungen auf das Material und Klassifizierungen beschrieben.

Das allgemeine Ziel der Holzschutzmassnahmen ist die Gebrauchsdauer des Materials zu verlängern und somit die Holzbauteile in einem Bauwerk möglichst lange zu bewahren. Dabei unterscheidet man zwischen folgenden Schutzarten.

10.1. Konstruktiver Holzschutz

Laut SHV³² werden die konstruktiven Holzschutzmassnahmen, wie folgt beschrieben.

Durch konstruktiven Holzschutz kann erreicht werden, dass Holz dauerhaft trocken bleibt, beziehungsweise wieder rasch trocknen kann, wenn es nass geworden ist. Damit kann ein Pilzbefall des Holzes weitgehend verhindert werden. Auf konstruktiven Holzschutz sollte generell geachtet werden, auch wenn das Holz zusätzlich mit einem Holzschutzmittel geschützt wird. Bei statisch relevanten Bauteilen im Aussenbereich sind in der Regel zusätzlich zum konstruktiven Holzschutz auch chemische Holzschutzmassnahmen nötig.

Nachfolgend sind einige Empfehlungen von Lignum, Holzwirtschaft Schweiz aufgeführt³³.

- Alle Holzteile sollen möglichst luftumspült oder hinterlüftet sein.
- Oberflächen abschrägen, damit Wasser von der Oberfläche abfliessen und an der Unterkante abtropfen kann.
- Keine kapillaren Kontaktflächen und Stossfugen.
- Grosse Holzquerschnitte dürfen nicht direkt bewittert werden. Sie können mit hinterlüfteten und auswechselbaren Abdeckungen aus Holz geschützt werden.
- Für den Aufbau der Gebäudehülle müssen die bauphysikalischen Grundsätze in Bezug auf Tauwasserbildung, Luftdichtigkeit und eindringendes Wasser berücksichtigt werden.

³² (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 7)

³³ (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2022)

- Im Spritzwasserbereich ist ein Bodenabstand von 300 mm einzuhalten.
- Im Anwendungsbereich von über 18% Holzfeuchtigkeit ist eine Holzart mit einer natürlichen Dauerhaftigkeit zu wählen, welche den Anforderungen des Anwendungsbereichs entspricht. Bei Holzwerkstoffen liegt diese Schwelle bei 12% Holzfeuchtigkeit.

10.2. Natürlicher Holzschutz

Laut Burgert³⁴ werden die natürlichen Holzschutzmassnahmen, wie folgt definiert.

Um einen natürlichen Holzschutz zu gewährleisten, sollte darauf geachtet werden, dass das Kernholz von Holzarten eingesetzt wird, die eine hohe natürliche Dauerhaftigkeit besitzen. Das Splintholz ist hingegen weniger dauerhaft. Das Kernholz der Robinie ist beispielweise so dauerhaft wie das Holz einiger Tropenhölzer, während das Holz der Fichte oder Buche nur wenig dauerhaft ist.

Gemäss der Norm SN EN 350-1 lassen sich Holzarten in sogenannte Dauerhaftigkeitsklassen einteilen. Unten ist die Tabelle mit der Einteilung diverser Holzarten nach natürlicher Dauerhaftigkeit aufgeführt.

Tabelle 7: Natürliche Dauerhaftigkeit einheimischer Holzarten gegen Pilze und Insekten (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 7)

Holzart	Dauerhaftigkeitsklasse		
	Pilze	Insekten	
		Hausbock	Anobium
Fichte	4	SH	SH
Tanne	4	SH	SH
Lärche	3-4	S	S
Douglasie	3-4	S	S
Kiefer	3-4	S	S
Buche	5	D	S
Esche	5	D	S
Edelkastanie	2	D	S
Eiche	2	D	S
Robinie	1-2	D	S

Tabelle 2: Natürliche Dauerhaftigkeit einheimischer Holzarten gegen Pilze und Insekten gemäss SN EN 350-2

Dauerhaftigkeit gegen Pilze: 1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mässig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft. Der Splintanteil aller Holzarten fällt in Klasse 5.
Dauerhaftigkeit gegen Insekten: D = dauerhaft, S = anfällig, SH = auch Kernholz ist als anfällig bekannt (meistens ist Kernholz dauerhaft gegen Insekten)

³⁴ (Burgert, o. A.)

10.3. Chemischer Holzschutz

Gemäss BAFU³⁵ lassen sich die chemischen Holzschutzmassnahmen, wie folgt beschreiben.

Chemische Holzschutzmassnahmen sollten dann ergriffen werden, wenn mit konstruktiven und natürlichen Massnahmen nicht ausreichend geschützt werden kann. Grundsätzlich kann zwischen biozidfreien und biozidhaltigen Mittel unterschieden werden.

Die biozidfreien Schutzmittel können verwendet werden, um das Holz vor Witterungseinflüssen und Verschmutzungen zu schützen. Diese Mittel schützen das Holz mechanisch-physikalisch und enthalten keine Wirkstoffe zur Abtötung der Insekten oder Pilzen. Die biozidhaltigen Schutzmittel enthalten Wirkstoffe, welche das Holz chemisch vor holzerstörenden und holzverfärbenden Organismen schützen. Einige biozidhaltige Schutzmittel können das Material auch vor Witterungseinflüssen schützen.

10.3.1. Biozidfreie Mittel

Laut BAFU³⁶ lassen sich die biozidfreien Holzschutzmittel in die drei folgenden Kategorien unterteilen.

Holzveredelungsmittel

Holzveredelungsmittel werden für Holz verwendet, welches nicht direkt den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist, und schützen das Holz vor Flecken, Schmutz und Staub. Die Holzveredelungsmittel werten einfache Holzarten optisch auf und ergeben matte oder seidengänzende Oberflächen.

Wetterschutzmittel

Wetterschutzmittel werden für Holz verwendet, welches direkt der Witterung ausgesetzt ist, und schützen es vor Witterungseinflüssen wie Nässe und UV-Strahlen.

Verglasungsmittel/Holzverfestigungsmittel

Holzverfestigungsmittel verfestigen das Holz irreversibel durch einen Prozess der Kristallisierung oder Verkieselung und schützen es mechanisch-physikalisch vor einem Pilz- oder Insektenbefall.

10.3.2. Biozidhaltige Mittel

Gemäss BAFU³⁷ schützen die biozidhaltigen mittel das Holz chemisch durch biozide Wirkstoffe vor holzerstörenden und holzverfärbenden Organismen. Solche Holzschutzmittel können bereits bei der Holzlagerung und bei der Vorbehandlung von Holzwerkstoffen verwendet werden. Dabei wird Holz

³⁵ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2021)

³⁶ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2021)

³⁷ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2021)

industriell, mit Verfahren wie Druckimprägnierung oder Kesseldruckimprägnierung, mit Holzschutzmitteln behandelt.

Eine Behandlung mit einem Holzschutzmittel und/oder die Verwendung von vorbehandeltem Holz macht nur dann verwendet, wenn verbautes Holz mit konstruktiven Holzschutzmassnahmen und biozidfreien Produkten nicht ausreichend geschützt werden kann und über einen grösseren Zeitraum bestehen soll, als dies in unbehandeltem Zustand der Fall sein würde.

10.4. Klassifizierung der chemischen Holzschutzmittel

Laut SHV³⁸ lassen sich die Eigenschaften der chemischen Holzschutzmittel, sowie deren Anwendung nach drei nachfolgenden Klassenkategorien beurteilen.

Wirksamkeitsklasse

Die Wirksamkeit von Holzschutzmittel lässt sich in folgenden Wirkungen einteilen.

Tabelle 8: Wirksamkeit von Holzschutzmitteln (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 9)

- B** wirkt vorbeugend gegen Bläuepilze an Bauholz
- BS** wirkt vorbeugend gegen Bläuepilze an Schnittholz
- P** wirkt vorbeugend gegen holzerstörende Pilze auf Bauholz
- MS** zur Verhinderung des Wachstums von Hausschwamm in Mauerwerk
- Ib** Schutzmittel mit bekämpfender Wirkung gegen Insekten in Bauholz
- Iv** Schutzmittel mit vorbeugender Wirkung gegen Insekten in Bauholz
- W** Geeignet für Bauholz, das dauernd der Witterung ausgesetzt ist, jedoch nicht in ständigem Erd- oder Wasserkontakt steht. Bei Holzschutzgrundierungen ist die Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse nur gegeben, wenn eine entsprechende Decklasur aufgetragen wird.
- E** Geeignet für Bauholz, das in ständigem Erd- oder Wasserkontakt steht.

³⁸ (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 8-9)

Eindringungstiefenklasse

Die Anforderungen an die Eindringtiefe von Holzschutzmittel sind in der Norm SN EN 351-1 festgelegt. Sie unterteilt die Eindringtiefe, wie in der Tabelle unten dargestellt, in sechs Klassen: NP 1 bis NP 6.

Tabelle 9: Klassifikation von Eindringtiefen nach SN EN 351-1 (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 8)

Tabelle 4: Klassifikation von Eindringtiefen nach SN EN 351-1

Eindringtiefe-Klasse	Anforderung an die Eindringtiefe
NP1	Keine
NP2	Mindestens 3 mm seitlich im Splintholz
NP3	Mindestens 6 mm seitlich im Splintholz
NP4	Nur für Rundholz: mindestens 25 mm im Splintholz
NP5	Ganzes Splintholz
NP6	Gesamtes Splintholz und mindestens 6 mm im freiliegenden Kernholz

Gebrauchsklassen

Holzschutzmittel werden entsprechend deren Anwendungsbereich und unterschiedlichen biologischen Risiken in Gebrauchsklassen eingeteilt. Laut Norm SN EN 335 werden 5 Gebrauchsklassen unterschieden. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 10: Gebrauchsklassen bei verbautem Holz und empfohlene Schutzmassnahmen (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 6)

Tabelle 1: Gebrauchsklassen bei verbautem Holz und empfohlene Schutzmassnahmen³

Gebrauchsbedingungen	Holzfeuchte	Gebrauchsklasse	Anwendungsbereich	Art der Gefährdung	Empfohlene Massnahmen	
					Ohne chemischem Holzschutz	Mit chemischem Holzschutz
					Dauerhaftigkeitsklasse ⁴	Wirksamkeit ⁵ Eindringtiefeklasse ⁶
Dauernd trocken	~ 10 %	0	Wohnräume, Werkräume, Bauteile in beheizten Räumen	Keine	1 - 5	Keine
Abgedeckt und trocken (ohne Erdkontakt)	10 – 18 %	1.1	Holzkonstruktionen, die einsehbar und leicht zu kontrollieren sind	Insekten	1 - 5	Keine
		1.2	Holzkonstruktionen, die nicht einsehbar und schwierig zu kontrollieren sind	Insekten	D, (S, SH)	Iv NP1
Abgedeckt Risiko einer kurzfristigen Befeuchtung vorhanden (ohne Erdkontakt)	Kurzfristig über 20 %	2.1	Holzelemente in Nassräumen, relative Luftfeuchtigkeit teilweise über 70 %	Schimmelpilze, holzerstörende Pilze,	1 – 5 wenn schlecht kontrollierbar: 1 - 3 (4, 5)	B, wenn schlecht kontrollierbar: P, F NP1
		2.2	Geschützte Fassaden, Untersichten	Keine Fäulnis, Bläuepilze	1 - 5	Evtl. B NP1
		2.3	Balkon unter Vordach, Konstruktionshölzer unter Dach, Fenster in geschützter Lage	Keine Fäulnis, Bläuepilze, Schimmelpilze, Insekten	1 - 4	B, Iv NP1
		2.4	Holzelemente in nicht belüfteten Kellern	Fäulnis, Insekten	1, 2, (3), (4, 5)	P, Iv NP1 evtl. NP2
Nicht abgedeckt (ohne Erdkontakt)	Häufig über 20 %	3.1	Fassadenverkleidungen, Zaunlatten	Geringe Fäulnisgefahr, sofern das Wasser abfließen kann, Bläuepilze, Verwitterung	1, 2, (3), (4, 5)	B, W
		3.2	Konstruktionshölzer, Fenster, Fensterläden, Pergola, Sicht- und Lärmschutzwände	Fäulnis, Insekten, Bläuepilze, Verwitterung	1, 2, (3), (4, 5)	P, B, Iv, W NP2 evtl. NP1
Im Kontakt mit Erde oder Wasser	Ständig über 20 %	4	Masten, Schwellen, Pfähle, Verbauungen, Holz im Wasser (Grenzbereich Luft/Wasser)	Fäulnis durch holzerstörende Pilze einschliesslich Moderfaule, Insekten	1, 2, (3), D	E je nach Einsatzbereich NP3 bis NP6

³ In Anlehnung an HBT1 Holzbautabellen, Lignum Zürich, Ausgabe 2012, ISBN 978-3-906703-29-9

⁴ Dauerhaftigkeit gegen Pilze: 1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mässig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft. Der Splintanteil aller Holzarten fällt in Klasse 5. Dauerhaftigkeit gegen Insekten: D = dauerhaft, S = anfällig, SH = auch Kernholz ist als anfällig bekannt

⁵ Abkürzungen zur Beschreibung der Wirksamkeit: siehe Kapitel 4

⁶ Abkürzungen zur Beschreibung der Eindringtiefe-Klassen: siehe Tabelle 4

() Natürliche Dauerhaftigkeit in der Regel ausreichend; unter bestimmten Gebrauchsbedingungen kann eine Behandlung empfehlenswert sein

{ } Abhängig von Einsatzgebiet, Anforderungen an die Standdauer, Klima, Exposition, usw.

10.5. Anwendungsverfahren von Holzschutzmitteln

Vorbeugende Anwendungsverfahren für Holzschutzmittel lassen sich laut SHV³⁹ in folgende Kategorien unterteilen.

Streichen, Rollen

Manueller Auftrag (mindestens zwei Arbeitsgänge). Das Holzschutzmittel wird mit einem Pinsel oder einer Rolle aufgetragen. Dabei sollten mindestens zwei Arbeitsgänge durchgeführt werden. Dieses Verfahren ist die einfachste Methode, um einen Oberflächen- und Kantenschutz zu gewährleisten. Jedoch werden mit diesem Verfahren nur geringe Eindringtiefen erreicht.

Spritzen

Beim Spritzen wird das Holzschutzmittel mit einer Druck-Spritzpistole zu kleinen Tropfen zerstäubt. Im Vergleich zum manuellen Auftrag mit dem Pinsel ist der Einsatz einer Spritzpistole effizienter und ergibt eine bessere Oberflächenqualität. Es werden, wie beim Streichen, nur geringe Eindringtiefen erreicht. Spritzen hat zudem den Nachteil, dass Holzschutzmittel durch Versprühen verloren geht.

Sprühtunnel

Bei der Anwendung von Sprühtunneln wird das Holz über Fördereinrichtungen in eine Kammer mit einem Sprühhing oder mit Sprühdüsen transportiert und besprüht. Schutzmittel, das nicht vom Holz aufgenommen wurde, wird über eine Wanne aufgefangen und kann dem Kreislauf erneut zugeführt werden.

Tauchen

Beim Tauchverfahren wird das zu behandelnde Holz für mehrere Stunden vollständig in die Tränkflüssigkeit untergetaucht. Einbringmengen und Eindringtiefen sind leicht besser als bei Streichen und Spritzen.

Trogtränkung (Langzeittauchen)

Das zu behandelnde Holz wird für einen bis mehrere Tage vollständig in die Tränkflüssigkeit untergetaucht. Somit werden bessere Eindringtiefen als beim normalen Tauchverfahren erzielt.

Kesseldruckimprägnierung

Bei der Kesseldruckimprägnierung wird das lufttrockene Holz in einen gasdicht verschliessbaren Druckbehälter (Autoklav) platziert, welches einer Vakuumierung ausgesetzt wird. Dabei wird die im Holz enthaltene Luft reduziert. Danach wird der Autoklav mit dem Schutzmittel geflutet. Der Autoklav wird einem Überdruck ausgesetzt und das entlüftete Holz nimmt die Holzschutzmittel auf. Somit erfolgt der Imprägniervorgang. Im Anschluss wird die überschüssige Flüssigkeit mit Hilfe eines Säuberungsvakuums entfernt. Als Schutzmittel werden vor allem

³⁹ (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 9-10)

wasserlösliche Salzverbindungen wie Bor, Kupfer, Fluor und Chrom verwendet. Dabei dient Chrom nur als Fixierungsmittel.

Mit diesem Verfahren lassen sich hohe Eindringtiefen erzielen. Die effektive Eindringtiefe ist dabei vor allem von der gewählten Holzart abhängig.

Wechseldruckimprägnierung

Die Wechseldruckimprägnierung ist ein spezielles Verfahren der Kesseldruckimprägnierung. Die im Splintholz enthaltene Flüssigkeit wird durch eine wässrige Imprägnierungslösung ersetzt, indem das Holz 400 bis 600 mal einem Wechsel zwischen Vakuum und Druck ausgesetzt wird. Die überschüssige Flüssigkeit wird mit Hilfe eines Säuberungsvakuums abgesaugt oder mittels Wassers abgewaschen.

Mit diesem Verfahren lassen sich hohe Eindringtiefen erzielen. Die effektive Eindringtiefe ist dabei vor allem von der gewählten Holzart abhängig.

Bohrlochtränkung

Bei der Bohrlochtränkung wird das Schutzmittel durch Bohrlöcher in das Holz eingebracht und breitet sich dort aus. Die Eindringtiefe und die Verbreitungsgeschwindigkeit sind dabei von der Holzart und der Zusammensetzung des Schutzmittels abhängig.

10.6. Holzschutzprodukte

Nachfolgend werden einige Holzschutzprodukte aufgelistet und deren Eigenschaften beschrieben. Laut BAFU⁴⁰ werden untenstehende Holzschutzmittel in der Praxis oft verwendet und können als gängigste Mittel bezeichnet werden.

Grundanstriche oder Imprägnierungen

Die Grundanstriche und Imprägnierungen bilden eine Schutzschicht auf unbehandeltem Holz, wodurch der Untergrund weniger saugfähig und der Deckanstrich gleichmässiger und stabiler wird. Die Grundanstriche und Imprägnierungen werden oftmals mit einem Deckanstrich überstrichen. Sollten im Grundanstrich biozide Wirkstoffe enthalten sein, hilft der Deckanstrich, die Auswaschung dieser Wirkstoffe zu reduzieren.

Lackanstriche

Lackanstriche färben das Holz deckend mit der gewählten Farbe ein, so dass die Holzstruktur nicht mehr sichtbar ist. Sie erfolgen oft auf einen Grundanstrich. Der Lackanstrich sollte regelmässig überprüft und bei einer Beschädigung überstrichen werden. Der Lack versiegelt das Holz und schützt es dadurch vor Feuchtigkeit und Verschmutzung, wodurch biozide Wirkstoffe in Lacken und eventuell darunterliegenden Grundanstrichen überflüssig sind.

⁴⁰ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2021)

Lasuren

Lasuren können auf einem Grundanstrich aufgetragen werden und lassen die Holzmaserung durchscheinen. Lasuren gibt es zum Beispiel in Transparent-, Grau- und Brauntönen, sowie anderen holzähnlichen Farben. Lasuren sind wasserabweisend und schützen das Holz dadurch vor Feuchtigkeit. Je nachdem, ob das Holz seine Masshaltigkeit bewahren soll oder nicht, wird eine Dünn- oder eine Dickschichtlasur verwendet. Kombinationslasuren, wie 2 in 1; Grundierung und Lasur, und für Lasuren geeignete Grundanstriche enthalten oft biozide Wirkstoffe.

Ölanstriche

Ölanstriche diffundieren tief in Holz ein, verleihen ihm einen Glanz und schützen es vor Feuchtigkeit und Verschmutzung. Sie können direkt auf das unbehandelte Holz aufgetragen werden. Es gibt Öle für die Aussenanwendung und für die Innenanwendung. Öle eignen sich auch zum Auffrischen von vergrautem Holz. In der Regel enthalten sie keine bioziden Wirkstoffe.

Wachse

Wachse können auf unbehandeltes Holz aufgetragen werden und enthalten in der Regel keine bioziden Wirkstoffe. Sie sind anfällig für Wasserflecken und sind daher nur für den Innenbereich zu empfehlen.

Beizen

Die Beizen verändern die Färbung des Holzes, schützen es aber in keiner Weise. Somit handelt es sich um kein richtiges Holzschutzmittel.

10.7. Beschichtung der Holzkanäle

Aus den Erkenntnissen des Versuchsaufbaus lässt sich schliessen, dass das Fichtenholz, welches als Kanalmaterial dienen soll mit einer Schutzbeschichtung versehen werden sollte. Die Beschichtung soll das Holz vor erhöhter Feuchteaufnahme und das damit verbundene Risiko von mikrobiellem Befall schützen. Zudem soll durch die Schutzmassnahme verhindert werden, dass sich infolge von Feuchteaufnahme und Austrocknung Risse bilden.

10.7.1. Empfohlene Holzschutzmassnahmen

Das verwendete Fichtenholz lässt sich in die Dauerhaftigkeitsklasse 4 für Pilze und SH für Insekten, laut *Tabelle 7*, einteilen. Dies bedeutet, dass das Holz gegen Pilze wenig dauerhaft ist und das Splint-, sowie Kernholz für Insekten anfällig ist.

Laut der *Tabelle 10* handelt es sich beim Holzkanal um die Gebrauchsklasse 2.1 «Holzelemente in Nassräumen, relative Luftfeuchtigkeit teilweise über 70%». Die Art der Gefährdung wird dabei auf Schimmelpilze und holzerstörende Pilze begrenzt. Bei der Annahme, dass die Umgebung der Gebrauchsklasse gut kontrollierbar ist, lässt sich das Fichtenholz für diesen Anwendungsbereich ohne chemischen Holzschutz verwenden. Ist die Umgebung schlecht kontrollierbar werden die Massnahmen P, F und Eindringtiefe von NP1 empfohlen. Das heisst das Schutzmittel soll vorbeugend gegen Bläuepilze und holzerstörenden Pilze auf Bauholz wirken. Die Eindringtiefe kann dabei auf ein Minimum reduziert werden.

Die optimalen Massnahmen, welche die Schutzeigenschaften aufweisen, sind einfache Verfahren wie z.B. Streichen oder Spritzen. Als mögliches Produkt lässt sich ein Grundanstrich oder Imprägnierung mit einem nachfolgenden Deckanstrich empfehlen.

Damit die Schutzmassnahmen den Nachhaltigkeitsansätzen des Industriepartners entsprechen, sollten die gewählten Produkte möglichst regional hergestellt werden und auf umweltschonenden Rohstoffen basieren.

11. Alternative Materialien

In diesem Kapitel werden nicht metallische Materialien aufgelistet und beschrieben, welche anstatt verzinktem Stahlblech für die Erstellung der Lüftungsleitungen interessant sein könnten. Als Grundlage für diese Materialliste wurde der Abschlussbericht von Settembrini et al.⁴¹ verwendet.

Folgende Materialien werden weiter genauer beschrieben:

- Karton
- Dämmmaterialien
- Kunststoff
- Bioplastics
- Holzwerkstoffe
- Formgepresste Zelluloseplatten

11.1. Wieso ein anderes Material?

Laut der Studie von Klinger et al. beträgt der graue Energieanteil für die Herstellung und Entsorgung von Lüftungsverteilungen zwischen 43% und 69% von der gesamten Gebäudetechnik in einem Wohnbau.⁴²

Durch die Verwendung von alternativen Materialien besteht eine Möglichkeit zur Reduktion der grauen Energie für den Herstellungsprozess der Lüftungsverteilungen und kann sich somit positiv auf die Gesamtökobilanz der gebäudetechnischen Anlagen in Bauvorhaben, insbesondere in Wohnungsbauten, auswirken.

11.2. Materialien

11.2.1. Karton

Ein Teil der heute eingesetzten Kartonprodukte wird aus Recyclingkarton hergestellt. Der Recyclingvorgang von Karton kann mittlerweile bis zu 25 mal wiederholt werden. Der Recyclingkarton weist aber in der Regel eine geringere Qualität auf als Karton aus Primärstoffen. Da bei der Herstellung des Recyclingkartons bis zu 6 mal weniger Energie, im Vergleich zum Karton aus primären Rohstoffen, benötigt wird, kann dies ein Vorteil gegenüber «neuem» Karton in Bezug auf die Ökobilanz aufweisen.⁴³

In der Praxis wurden bereits einige Bauobjekte ausgeführt, welche Lüftungsverteilungen aus Karton in Anspruch nehmen. Beispiele davon sind die Westborough Primary School (Grossbritannien) und das XX Office in Delft (Niederlande). Die Karton-Lüftungsverteilungen sind dabei schon länger als 20 Jahre in Betrieb.⁴⁴

⁴¹ (Settembrini, et al., 2022)

⁴² (Klinger, et al., 2014, S. 7)

⁴³ (Settembrini, et al., 2022, S. 19-20)

⁴⁴ (Settembrini, et al., 2022, S. 21-22)

Laut Settembrini et al. ähnelt das Brandverhalten von dichtem Karton demjenigen von Holz⁴⁵. Laut GVB gehört der Karton aber zur Brandverhaltensgruppe RF4 (unzulässiger Brandbeitrag)⁴⁶.

Es sollte daher eine brandschutztechnische Beschichtung des Materials in Betracht gezogen werden.

Die Feuchtigkeit in beheizten Innenräumen stellt für die Kartonanwendung i.d.R. kein Problem dar. In den Räumlichkeiten, wie Garderoben, Nasszellen oder in gewerblichen Küchen, welche starke und schwankende Feuchteinfälle vorsehen könnten aber Probleme auftreten.⁴⁷

Daher ist eine feuchteabweisende Beschichtung in Betracht zu ziehen.

Gemäss Russ et al. sind die Dämmeigenschaften von dichtem Karton schlechter als diejenigen von kartonbasierten Produkten wie Well- oder Wabenkarton. Diese bestehen oftmals aus Recyclingkarton und können eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 0.045 W/mK erreichen.⁴⁸

Aus technischer Sicht scheint Karton eine interessante Alternative zu sein. In Grossbritannien werden mittlerweile Produkte aus Karton auf dem Markt angeboten. Die Firma GatorDuct[®] bietet beispielsweise Lüftungsleitungen aus Karton an. Der Hersteller vermarktet sein Produkt mit Vorteilen gegenüber der konventionellen Lüftungsleitungen aus Stahlblech wie z. B. reduziertem Gewicht, Installationszeit und Transportkosten, sowie dem bedruckbaren Design und natürlichen Dämmeigenschaften.⁴⁹



Abbildung 32: Beispiele GatorDuct[®] Karton-Leitungen (GatorDuct, 2022)

⁴⁵ (Settembrini, et al., 2022, S. 22)

⁴⁶ (GVB - Gebäudeversicherung Bern, 2015)

⁴⁷ (Settembrini, et al., 2022, S. 22)

⁴⁸ (Russ, et al., 2013)

⁴⁹ (GatorDuct, 2022)

11.2.2. Dämmmaterialien

Laut Settembrini et al. können Dämmmaterialien wie beidseitig kaschierte Glaswolle und Steinwolle, sowie expandiertes Polystyrol (EPS) für die Herstellung der Lüftungsleitungen verwendet werden. Heute wird bereits eine Mehrzahl von Produkten von den Firmen Isover (Deutschland), Climate Recovery (Schweden) und Helios (Schweiz) auf dem Markt angeboten.

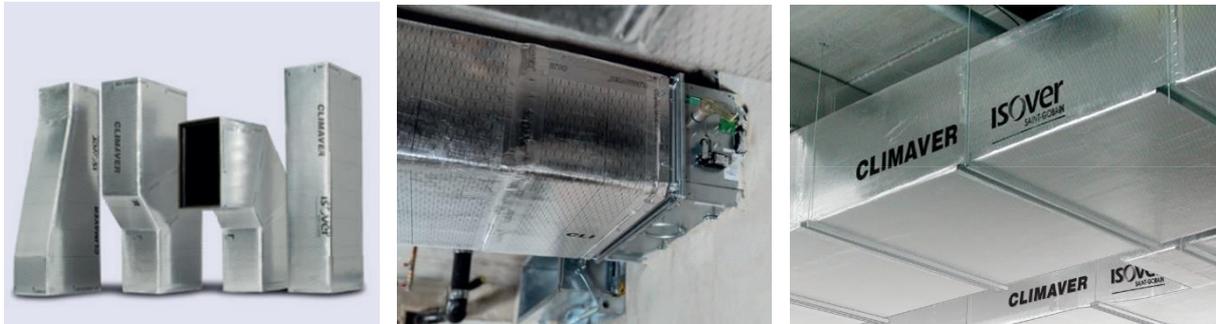


Abbildung 33: Lüftungsprodukte der Firma ISOVER (SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG, o. A.)

Dabei handelt es sich um selbsttragende Konstruktionen, welche in Form und Optik den konventionellen Lüftungsbauteilen aus Stahlblech gleichen und die grundsätzlichen Anforderungen für Lüftungstechnische Bauteile erfüllen⁵⁰

Die Lüftungstechnischen Produkte aus Dämmmaterialien besitzen je nach verwendetem Material folgende positive Eigenschaften:

- Hohe Luftdichtheitsklassen
- Gute Wärmedämmeigenschaften
- Gute Schallschutzeigenschaften
- Gute Brandschutzeigenschaften
- Reduziertes Gesamtgewicht

Zu den negativen Eigenschaften der Leitungen aus Dämmmaterialien kann die Robustheit im Bau und Betrieb, gegenüber konventionellen Bauteilen aus Stahlblech, gezählt werden. Zudem sind die verwendeten Rohstoffe nicht erneuerbar und energieintensiv in der Herstellung. Die zusätzlich verwendeten Beschichtungen und Verbundstoffe können die Trennbarkeit und Wiederverwendung der Bauteile gar verunmöglichen. Demzufolge bieten die Lüftungsleitungen aus Dämmmaterialien keine grösseren ökologischen Vorteile gegenüber den Standardprodukten als eine erhöhte Material Suffizienz.⁵¹

⁵⁰ (Settembrini, et al., 2022, S. 26-27)

⁵¹ (Settembrini, et al., 2022, S. 28-29)

- Geringes Gewicht. In diesem Punkt ist Kunststoff insbesondere gegenüber Metallen konkurrenzlos.
- Glatte Oberflächen ohne Schweissnähte.
- Widerstände gegen Luftströme im (Flex-)Rohr werden reduziert, so dass die Leistung von Ventilatoren niedriger ausfallen kann. Weniger Rauigkeit führt zu weniger Reibungsverlusten.
- Günstige Anschaffungskosten. Kunststoff ist in der Anschaffung deutlich günstiger als andere Materialien.

Nachteile:

- Herstellung. Die Produktion von Kunststoffen, welche aus dem fossilen Rohstoff Erdöl hergestellt werden, ist umweltbelastend. Da sie erst durch Additive ihre spezifischen Eigenschaften erhalten, entstehen grösstenteils Materialien mit geringem Recycling-Potential, welche teilweise toxisch und schwer zu entsorgen sind.
- Hohe Zerbrechlichkeit. Kunststoff ist trotz guter Festigkeit zerbrechlich. Nach rund fünf bis sieben Jahren lässt die Elastizität nach. Dann genügt oftmals ein kleiner Stoss, um einen Bruch auszulösen.
- Ausgeprägte Brennbarkeit. Bereits bei einer Temperatur von 200 °C dehnen sich die Polymer-Lüftungsrohre aus. Dadurch ist eine einwandfreie Funktionsfähigkeit der Lüftungsanlage nicht mehr gewährleistet.
- Entsorgungsproblematik. Kunststoffe weisen eine hohe Recyclingfähigkeit auf, wenn sie in Reinform vorliegen. Ein Grossteil der Kunststoffe ist nach wie vor verunreinigt und kann somit weniger oft und nur in minderwertiger Qualität recycelt werden (Downcycling). Generell gilt allerdings, dass Kunststoffe derzeit fast ausschliesslich thermisch (bei geringem Heizwert) verwertet werden, wobei giftige Gasentwicklung möglich ist. Da wirtschaftliche Anreize fehlen, ist ein stoffliches Recycling zwar perspektivisch in vielen Fällen möglich, wird jedoch nicht praktiziert. Die benötigte Zeit für eine vollständige Zersetzung überschreitet die gewünschte Zeit.

Die Lüftungstechnischen Produkte aus Kunststoff werden bereits in der Praxis als Alternative verwendet. Aufgrund der obenerwähnten Eigenschaften können die Kunststoffbauteile nur beschränkt eingesetzt werden. Primär werden diese zum Beispiel für Deckeneinlagen oder allgemein im Wohnbau verwendet.

Werden in Zukunft mehr Polymere mit besseren Recycling- und Ökobilanzeigenschaften verwendet, so könnten die Kunststoff Leitungen mehr an Bedeutung gewinnen.

11.2.4. Bio-basierte Kunststoffe

Als bio-basierte Kunststoffe oder sogenannte «Bioplastics» werden Kunststoffe bezeichnet, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe produziert

werden. Dabei erfüllen die Bioplastics laut Fact Sheet⁵³ von European Bioplastics eine der folgenden Kriterien:

- Biokunststoffe bestehen mindestens zu einem Anteil aus nachwachsenden Rohstoffen.
- Biokunststoffe sind biologisch abbaubar, d.h. sie lassen sich durch natürlich vorkommende Mikroorganismen zu Wasser und CO₂ abbauen, wobei ein geringer Anteil Biomasse entsteht. Auch Biokunststoffe aus fossilen Rohstoffen können biologisch abbaubar sein.

Die Eigenschaften der bio-basierten Kunststoffe variieren stark je nach Produktionsverfahren oder verwendetem Basisrohstoff. Bei richtig gewähltem Herstellungsverfahren und Rohstoff können Bioplastics durchaus auch Eigenschaften wie herkömmliche Kunststoffprodukte aufweisen.⁵⁴

Laut Settembrini et al.⁵⁵ sind die zwei folgenden Biokunststoffarten für die Lüftungstechnischen Anwendungen interessant und könnten in Zukunft an Bedeutung gewinnen:

Polyacidid (PLA)

PLA ist ein bereits weitverbreitetes Biopolymer. Es entsteht durch die Polymerisation von Milchsäure, welches ein Produkt der Fermentation aus Zucker und Stärke durch Milchsäurebakterien ist. PLA ist farblos und hat sehr ähnliche Eigenschaften wie thermoplastische Polymere. Einige Beispiele für thermoplastische Polymere sind die weit verbreiteten Kunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC).

Da Polyacide zu den Thermoplasten zählen, können sie durch Zuführung von Wärme geformt werden. Gängige Produktionsverfahren wie Extrusion und Spritzguss können für PLA eingesetzt werden. Ein grosser Nachteil ist, dass die Formstabilität nur bis 75°C gegeben ist. Die Hitzebeständigkeit kann aber durch Copolymerisation von hitzebeständigeren Polymeren oder durch Beigabe von Füllstoffen erhöht werden.

Eine wichtige Rolle spielt PLA im FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-Druck. Das macht PLA vor allem auch für den Prototypenbau zu einer günstigeren Alternative als normale Kunststoffe und bietet aber auch im Bereich der Luftverteilung grundlegende Möglichkeiten. Zudem ist PLA ein Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen und ist biologisch abbaubar.

Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)

NFK sind Verbunde aus Kunststoffen (z.B. Polyesterharz, Epoxidharz oder Polyamid) und Naturfasern. Sie erhalten über die eingearbeiteten Naturfasern eine Stabilität, die ohne sie nicht möglich wäre. Heute werden hanffaserverstärkte

⁵³ (European Bioplastics, 2021)

⁵⁴ (Settembrini, et al., 2022, S. 34)

⁵⁵ (Settembrini, et al., 2022, S. 34-35)

Kunststoffe bereits in der Autoindustrie verwendet, um karbon- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe zu ersetzen. Naturfaserverstärkte Kunststoffe sind allerdings aufgrund ihrer Zusammensetzung biologisch nicht abbaubar.

Aufgrund der teilweise geringen Trennbarkeit und nicht verfügbaren kommerziellen Lösungen für die Herstellung der Bio-Polymere, können die Bioplastics mit heutigem Stand der Technik nicht als eine Alternative für Standardprodukte aus PE und PP betrachtet werden. Jedoch nimmt weltweit das Interesse an bio-basierten Kunststoff-Alternativen stetig zu.

Mit den neuen Entwicklungen und Lösungen für die Produktion und Recycling können die bio-basierten Kunststoffe in der Zukunft ein potenziell geeignetes Material für Lüftungstechnische Anwendungen darstellen.

11.2.5. Holzwerkstoffe

Holz als ein nachwachsender Rohstoff gewinnt immer mehr Bedeutung im Bausektor. Heute wird auf dem Markt eine Vielfalt von Produkten angeboten, welche aus Vollholz oder Holzwerkstoffen bestehen.

Als Holzwerkstoffe werden Werkstoffe bezeichnet, welche aus zerkleinertem Vollholz, wie Spänen, Fasern und Furnieren unter Zugabe von Bindemitteln zu Platten oder Formteilen gepresst werden.

Laut Lignum⁵⁶ lassen sich die Holzwerkstoffe allgemein in folgende Gruppen unterteilen.

Holzwerkstoffe aus Vollholz

Zu Holzwerkstoffen aus Vollholz zählen unter anderem Balken, Bretter und Kanteln, die aus Stammholz angefertigt werden. Aus diesen Werkstoffen können breit verwendete Massivholzplatten angefertigt werden.

Massivholzplatten sind neu zusammengesetzte Bretter und Lamellen. Die meist verwendeten, in Europa vorkommenden Holzarten für die Herstellung sind Fichte, Lärche, Buche, Ahorn, Erle und Birke. Für die Produktion der Massivholzplatten wird mit verhältnismässig wenig Einsatz von Energie das Holz zerteilt und neu verleimt. Es werden einlagige, sowie mehrlagige Massivholzplatten hergestellt.

Holzwerkstoffe aus Furnieren

Das Holz wird bei der Verarbeitung zu Holzwerkstoffen auf Furnierbasis von natürlichen Fehlstellen befreit. Die Festigkeit wird erhöht, die Schwind- und Quellverformung wird weitgehend vermindert. Furnier- und Stabsper Holz lässt sich verschrauben, nageln oder verleimen und ist ideal mit anderen Werkstoffen kombinierbar.

Furniersper Holz besteht aus mindestens drei Furnierlagen und ist symmetrisch zur Mittellage aufgebaut. Das Rohmaterial, Laub- oder Nadelholz, wird in der

⁵⁶ (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2007)

Regel geschält, beleimt, kreuzweise geschichtet und unter Wärme gepresst. Furniersperrholz lässt sich unter Hitze verformen. Wird ein Bauteil auf diese Weise hergestellt, dann handelt es sich um Formsperrholz.

Besteht die Mittellage aus Vollholzstäben bzw. hochkant angeordneten Schäl furnieren und die Aussenlage aus minimal einem Deckfurnier, so spricht man von Stab- bzw. Stäbchensperrholz.

Werden Fichten- oder Kieferfurniere faserparallel verleimt, handelt es sich um Furnierschichtholz. Spezielle technische Verfahren erlauben es, Plattenlängen bis 23 Meter herzustellen. Furnierschichtholz kommt hauptsächlich im konstruktiven Ingenieurholzbau für grosse Spannweiten zum Einsatz.

Holzwerkstoffe aus Spänen

Ausgangsmaterial für die Produktion von Holzwerkstoffen aus Spänen ist Restholz aus Wald und Holzindustrie. Das Industrieholz stammt von Laub- oder Nadelbäumen aus den Wäldern. Die Hölzer haben einen Durchmesser von ca. acht Zentimeter und eine Länge von einem bis sechs Meter. Die Sägewerke liefern Nebenprodukte der Schnittwarenherstellung als Restholz. Mit diesen Rohmaterialien lassen sich Produkte, wie Spanplatten, Flachpressplatten, Strangpressplatten und Oriented Strand Boards (OSB), herstellen.

Spanplatten werden unter Einwirkung von Wärme und Druck aus Holzspänen und Kunstharzklebstoff hergestellt. Grundsätzlich wird zwischen Flachpressplatten und Strangpressplatten unterschieden.

Bei Flachpressplatten liegen die Späne mehrheitlich parallel zur Plattenebene. Je nach Verleimung sind sie mehr oder weniger witterungsbeständig und werden so für Möbel und Ausbau oder für Unterböden, Dachauskleidungen usw. eingesetzt. Speziell sind Akustikplatten, Langspanplatten (OSB) und mit Kunstharz beschichtete Flachpressplatten für dekorative Zwecke.

Bei Strangpressplatten liegen die Späne herstellungsbedingt rechtwinklig zur Plattenebene. Es lässt sich hier auch Restholz und Sägemehl verwenden. Diese Platten dienen als Rohlinge für die Produktion von Türblättern und Wandelementen. Zudem kommen sie im Innenausbau und für schallschluckende Decken- und Wandverkleidungen in Frage.

Die OSB-Platten bestehen aus drei Lagen grossflächiger, richtungsorientierter Späne. Die Späne der Aussenlage sind annähernd in Plattenrichtung angeordnet, jene der Mittellage in Querrichtung. OSB-Platten kommen vorwiegend im Baubereich zum Einsatz oder dienen dekorativen Zwecken.

Holzwerkstoffe aus Fasern

Zu Holzwerkstoffen aus Fasern zählen beispielsweise Holzfaserplatten mit weichen, mitteldichten und dichten Faserzusammensetzungen.

Charakteristisch für die Holzweichfaserplatten ist ihr poröser Aufbau, in dem sich viel Luft versteckt. Eine Eigenschaft davon sind gute Dämmwerte. Auf dieselbe Herstellungsweise lassen sich aber auch festere, druckbelastbare Platten herstellen. Mitteldichte Faserplatten (MDF) weisen eine sehr homogene und dichte

innere Faserstruktur auf. Sie lassen daher eine fast grenzenlose Ausbildung der Kanten und der Oberflächen zu. Harte Holzfaserverplatten werden gezielt gepresst und schichtweise optimiert. Dies ergibt eine verfestigte und damit strapazierfähige Oberfläche.

Zur Produktion von Holzfaserverplatten dient Restholz der Holzindustrie und der Forstwirtschaft. Das Ausgangsmaterial wird schonend zerfasert. Die langen Fasern von Nadelholz sind dafür besonders geeignet. Zwei unterschiedliche Verfahren sind für die Herstellung der Platten gängig. Im Trockenverfahren werden die aufgeschlossenen Fasern getrocknet, beleimt und anschliessend gepresst (üblich für MDF und HDF). Im Nassverfahren werden anstelle der künstlichen Beleimung die Holzfasern mit holzeigenen Bindekräften (Lignin) untereinander gebunden (üblich für die Weichfaserverplatten).

Wood Polymer Composites (WPC)

WPC sind neuartige, moderne Verbundwerkstoffe. Sie setzen sich aus einem Holzfaserver- oder Holzfasermehlanteil von 50–80 % sowie aus Kunststoffen (Polypropylen oder Polyethylen) zusammen. Sie verrotten nicht und sind seewasserfest. Sie lassen sich genauso leicht bearbeiten wie Holz und sind splitterfrei.

Ausgangsmaterialien für die Herstellung von WPC sind Holzfasern oder Holzmehl sowie Kunststoffgranulat. In einem Spezialverfahren, der sogenannten Extrusion, verschmelzen die Komponenten unter Druck und Temperatur zu einem Werkstoff, der die Vorteile von natürlichem Holz mit jenem von Kunststoff verbindet.

Holzwerkstoffe können bei der angepassten Formgebung und Beschichtung eine Alternative zu den gängigen Materialien für Lüftungstechnische Bauteile darstellen. Der grosse Vorteil von Bauteilen aus Holzwerkstoffen ist die Ökobilanz für die Herstellung. Durch den Einsatz von nachwachsendem Holz können bessere Werte erzielt werden als bei der Verwendung von herkömmlichen Materialien, wie Stahl oder Kunststoff. Meistens sind auch die Herstellungsverfahren für Holzwerkstoffe energieärmer als die für Stahl.

Ob die Anforderungen für den Einsatz als Lüftungstechnische Bauteile erfüllt sind, hängt von den verwendeten Zusatzstoffen ab. Diese können Eigenschaften modifizieren, im Gegenzug jedoch auch umwelt- und gesundheits-schädlich sein und ein hochwertiges Recycling verhindern⁵⁷.

11.2.6. Formgepresste Zelluloseplatten

Laut Material Archiv⁵⁸ handelt es sich bei den formgepressten Zelluloseplatten um profilierte und flexible Leichtbauplatten. Diese Platten besitzen folgende Eigenschaften und werden folgenderweise zusammengesetzt.

⁵⁷ (Settembrini, et al., 2022, S. 38)

⁵⁸ (Material Archiv, 2010)

Die formgepresste Zelluloseplatte besteht aus ungebleichtem recyceltem Altpapier. Die Wellen- oder Trapezstruktur verleiht dem Plattenmaterial trotz niedrigem Gewicht, eine hohe Stabilität in der Wellenrichtung, bleibt jedoch in der Querrichtung flexibel, weshalb sich die Platte besonders für die Erstellung geschwungener Formen eignet.

Das Altpapier wird sortiert, anschliessend mechanisch zerfasert, gewässert und von Verschmutzung, Rückständen und Fremdstoffen gereinigt. Die letzten papierfremden Bestandteile, z.B. Klebstoffe von rückengeleimten Magazinen oder Selbstklebeetiketten werden durch das Dispergieren zerkleinert und entfernt. Die gewonnene Zellulose wird nicht zusätzlich gebleicht.

Entsprechend herkömmlichen Holzwerkstoffen lässt sich die Zelluloseplatte mit den üblichen Holzbearbeitungsverfahren weiterverarbeiten, unter anderem auch mit CO₂-Laser und Water-Jet. Die Oberfläche kann mit Farben, Lacken, Ölen, Wachsen und Klebstoffen bearbeitet sowie mit 3D-Druckverfahren bedruckt werden.

Die unbehandelten Zelluloseplatten können vollständig recycelt werden, sofern die Oberflächen nicht mit Lacken, Farben oder anderen Schutzmitteln bearbeitet werden.

Mit entsprechender Nachbehandlung und Imprägnierung können formgepresste Zelluloseplatten die technischen Anforderungen für lüftungstechnische Zwecke erfüllen. Durch die Nachbehandlung kann jedoch das Recycling-Potenzial des Materials nicht vollständig gewährleistet werden.

11.3. Zusammenfassung

Karton kann als eine der vielversprechenderen alternativen Materialien für die Herstellung der lüftungstechnischen Bauteile angesehen werden. Gründe dafür sind:

1. Als Primärrohstoff kann teilweise recycelter Karton verwendet werden.
2. Die Plausibilität des Rohstoffs wurde bereits mit funktionierenden Prototypen nachgewiesen.
3. Diverse lufttechnische Produkte aus Karton werden bereits auf dem Markt angeboten.
4. Für Karton gibt es breit angewandte Herstellungs- und Aufbereitungsprozesse.

Karton lässt sich zusätzlich gut nachbehandeln und kann dadurch fehlende Eigenschaften ergänzen.

Die formgepressten Zelluloseplatten, welche auf ähnliche Weise wie Karton hergestellt werden, sind zwar noch nicht für die lüftungstechnischen Anwendungen verwendet worden, könnten aber in Zukunft, parallel zum Karton, auch an Bedeutung gewinnen.

Die meisten Holzwerkstoffe können, mit entsprechender Nachbehandlung, die technischen Anforderungen für den untersuchten Verwendungszweck erfüllen. Die Bauteile aus Holzwerkstoffen basieren auf nachwachsenden Rohstoffen. Somit ist der ökologische Abdruck der meisten Holzwerkstoffe geringer als jene von anderen alternativen Materialien.

Ein gemeinsamer Nachteil, welcher die oben genannten Alternativen aufweisen, ist die verminderte Wiederverwertbarkeit bei der Verwendung von unnatürlichen Mitteln und Verbindungsstoffen für die Nachbehandlung. Sollten für die Herstellung der Zusatzmittel ausschliesslich natürliche Beschichtungen, Bindemittel sowie Kleber verwendet werden, wären die Endprodukte auch biologisch abbaubar.

Die erdölbasierten Alternativen, wie Dämmungen und Kunststoffe, können aufgrund ihres Ursprungs nicht als vollständig nachhaltig eingestuft werden. Diese Materialien besitzen zwar die Festigkeit und andere gesuchte Eigenschaften, jedoch können diese nur selten recycelt werden. Bioplastics verfügen zwar über eine bessere Ökobilanz gegenüber konventionellen Kunststoffen, können aber nicht recycelt werden sofern sie nicht aus 100% biologisch abbaubaren Biokunststoffen hergestellt werden.

12. Fazit

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen, welche in dem vorliegenden Bericht behandelt wurden, liefern folgende Antworten auf die Fragenstellungen aus dem Kapitel 2.2 *Aufgabenstellung*.

Wie weit kommt Holz grundsätzlich als Material für Lüftungskanäle in Wohngebäuden infrage?

Die praktische Untersuchung des Abluftholzkanals wurde in Form einer Härteprüfung durchgeführt. Die Ergebnisse können dabei als positiv betrachtet werden.

Die untersuchte Holzkonstruktion weist eine genügende Resistenz gegen feuchte Luft auf, welche in Nassräumen beim Duschen entstehen kann. Die eingestellte Ausgleichsfeuchte beträgt weniger als der maximal zulässige 20 % Wassergehalt. Während dem Experiment konnten keine klaren Anzeichen von mikrobiellem Befall oder Schimmelbildung festgestellt werden. Allerdings wird eine nicht kritische Rissbildung beobachtet.

Ein klarer Vorteil des Holzes gegenüber Stahlblech als Lüftungsleitungsmaterial ist die Ökobilanz. Die Anzahl der erzeugten Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen durch die Herstellung und Entsorgung von Holzleitungen ist deutlich geringer als bei den konventionellen Rohrleitungen aus verzinktem Stahlblech.

Gibt es normative Vorgaben, respektive Einschränkungen für die Anwendung von Holzkanälen?

Die untersuchte Holzkanalkonstruktion kann die eruierten Anforderungen an Lüftungsbauteile mehrheitlich erfüllen. Es besteht eine Unklarheit betreffend der qualitativen Dichtheitsklasse, welche mit den verfügbaren Quellen nicht eruiert werden konnte. Gemäss Brandschutzanforderungen der VKF dürfen die Holzkanalleitungen nicht durch mehrere Brandabschnitte traversieren, sondern nur innerhalb eines Brandabschnitts eingesetzt werden.

Kann unbeschichtetes Konstruktionsholz verwendet werden oder ist eine Beschichtung in Betracht zu ziehen?

Aufgrund von beobachteten Rissbildungen und stark ausgeprägten hygroskopischen Eigenschaften des Holzes wird empfohlen eine Beschichtung in Betracht zu ziehen. Dafür eignet sich eine Imprägnierung mit einer Deckschicht. Dabei sollten Schutzmittel verwendet werden, welche auf natürlichen Inhaltsstoffen basieren.

Sind weitere alternative Lüftungsmaterialien, insbesondere natürlich nachwachsende Rohstoffe, allenfalls ebenso interessant wie Holz?

Die Recherchen zeigen, dass Lüftungsleitungen aus recyceltem Karton eine interessante Alternative darstellen können. Es wurden mittlerweile Lüftungsbauteile aus Karton in diversen Bauvorhaben eingesetzt. Aus technischer Sicht scheint das Material alle notwendigen Anforderungen an Lüftungstechnische Bauteile zu erfüllen. Wichtige Vorteile von Kartonleitungen sind die Ökobilanz, Materialverfügbarkeit und das geringe Bauteilgewicht.

13. Abkürzungsverzeichnis

Folgende Abkürzungen wurden während der Dokumentation verwendet:

ABL	Abluft
AUL	Aussenluft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BSR	Brandschutzrichtlinien
FOL	Fortluft
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KWL	Kontrollierte Wohnungslüftung
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
RAL	Raumluft
RF	Reaction au feu (Französisch), Brandverhalten
r. F.	relative Feuchte
SHV	Schweizerisches Holzschutzmittelverzeichnis
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
VKF	Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen
ZUL	Zuluft

14. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reinigungswelle und Zubehörbürsten (Bösch MRS AG, o. A.)	6
Abbildung 2: Ökobilanz-Vergleich Primärenergie.....	10
Abbildung 3: Ökobilanz-Vergleich Treibhausgasemissionen	10
Abbildung 4: Ökobilanz-Vergleich Umweltbelastungspunkte	11
Abbildung 5: Grundaufbau ohne Erweiterung	12
Abbildung 7: links: Visualisierung von Umlenkungen und Stossverbindungen (Strüby AG)	13
Abbildung 7: rechts: Dichtungsband auf den Kanalkanten.....	13
Abbildung 8: Fortluft- und Aussenluftleitung, Grundaufbau	13
Abbildung 9: Abluftleitung, Grundaufbau	14
Abbildung 10: Massivholzplatten für Grundaufbau	15
Abbildung 11: Querschnitt Holzkanäle. Links: Abluft; rechts: Aussenluft und Fortluft.....	16
Abbildung 12: (SIA180, 2014), SIA 180 Tabelle 10.....	18
Abbildung 13: Richtwerte der Feuchteproduktion G, Tabelle 3 (SIA180, 1999).....	18
Abbildung 14: Versuchsprinzip	19
Abbildung 15: Revisionsdeckel für Feuchtemessungen ABL und Verbindung von Dampfbehälter	21
Abbildung 16: Das KWL-Gerät Hoval FRT 451 und die Anschlussleitungen	22
Abbildung 17: Dampfbefeuchter Defensor Mk5 Visual und Zeitschaltuhr- Aufbau	22
Abbildung 18: Dampfbehälter und die Anschlüsse.....	23
Abbildung 20: Logger Station und Messgeräte-Anschlüsse	24
Abbildung 21: Luftmengen Iris-Blenden und KWL-Gerät	26
Abbildung 22: Betriebsablauf Dampf-Luftbefeuchter	27
Abbildung 23: Messung Kondensat bei der Vorwärmung	29
Abbildung 24: Messung Kondensat während dem Betrieb	30
Abbildung 25: Messung Resultierende Wassermenge	31
Abbildung 26: Prinzipschema Messkonzept	33
Abbildung 27: Messungsverlauf 22.04.2022	35
Abbildung 28: Phasen während "Dusch"-Zyklen.....	36
Abbildung 29: Umrechnung Holzfeuchte / Wassergehalt Tabelle 1 (Schradt, 2006).....	40
Abbildung 30: Wassergehalt-Entwicklung während Versuchsablauf	40
Abbildung 32: Kontrollstelle vor und nach dem Experiment.....	43
Abbildung 33: Kanal Innenoberflächen nach dem Versuchsende	44
Abbildung 34: Beispiele GatorDuct® Karton-Leitungen (GatorDuct, 2022)	56

Abbildung 35: Lüftungsprodukte der Firma ISOVER (SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG, o. A.)..... 57
Abbildung 36: KWL-Leitungsbauteile aus Kunststoff (Bauverlag BV GmbH, 2017)..... 58

15. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4: Berechnung der effektiv produzierten Dampfmenge	32
Tabelle 2: Messungen Kondensatmenge während dem Betrieb	32
Tabelle 3: Messungen gesamte Wassermenge während der Vorwärmung und Betrieb.....	32
Tabelle 1: Messungen Kondensatmenge während der Vorwärmung	32
Tabelle 5: Legende Messkonzept	34
Tabelle 6: Verteilung der Werte Während dem Betrieb	37
Tabelle 7: Natürliche Dauerhaftigkeit einheimischer Holzarten gegen Pilze und Insekten (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 7).....	47
Tabelle 8: Wirksamkeit von Holzschutzmitteln (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 9).....	49
Tabelle 9: Klassifikation von Eindringtiefen nach SN EN 351-1 (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 8)	50
Tabelle 10: Gebrauchsklassen bei verbautem Holz und empfohlene Schutzmassnahmen (Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2018, S. 6)	50

16. Normenverzeichnis

Folgende Normen, Richtlinien und Gesetze sind für die Erstellung des Berichts verwendet worden:

DIN 4108-7	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden –Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen, sowie -beispiele	Jan. 2011
SIA 180:1999	Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau	18.06.1999
SIA 180:2014	Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden	01.07.2014
SIA 2024	Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik	01.10.2015
SIA 382/1	Lüftungs- und Klimaanlage	19.11.2013
SN EN 1507	Lüftung von Gebäuden – Rechteckige Luftleitungen aus Blech – Anforderungen an Festigkeit und Dichtheit	2006
SN EN 12237	Lüftung von Gebäuden – Luftleitungen – Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech	Aug. 2003
SN EN 15727	Lüftung von Gebäuden – Lüftungsleitungen und Lüftungsbauteile, Klassifizierung entsprechend der Luftdichtheit und Prüfung	2010
SN EN 350-1	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz	Okt. 1994
SN EN 351-1	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Mit Holzschutzmitteln behandeltes Vollholz	2007
SN EN 335	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten	2013
VKF BSR 13-15	Baustoffe und Bauteile	01.01.2017
VKF BSR 14-15	Verwendung von Baustoffen	01.01.2017
VKF BSR 25-15	Lufttechnische Anlagen	01.01.2017

17. Literaturverzeichnis

Bauverlag BV GmbH. (April 2017). *Komfort-Wohnraumlüftung*. Abgerufen am 3. Juni 2022 von https://www.shk-profi.de/artikel/shk_Komfort-Wohnraumlueftung_2350710.html

Bösch MRS AG. (o. A.). *Profiwerkzeuge direkt vom Hersteller*. Abgerufen am 12. Mai 2022 von <https://www.boesch-mrs.ch/de/1344/einfache-reinigungswelle-kwl-15-m-inkl-lueftungsbuerste-105-mm>

Bundesamt für Umwelt BAFU. (24. Dezember 2020). *Indikatives Ziel 2050*. Abgerufen am 11. Mai 2022 von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050.html>

Bundesamt für Umwelt BAFU. (30. März 2021). *Materialschutz - Holz*. Abgerufen am 1. Juni 2022 von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/fachinformationen/sorgfaeltiger-umgang-mit-biozidprodukten/materialschutz/holz.html>

Burgert, P. D. (o. A.). *Werkstoffe I - Teil 2 - Holz und Holzwerkstoffe*. ETH Zürich.

Condair plc. (2022). *Defensor MK5 steam humidifier*. Abgerufen am 17. Mai 2022 von <https://www.condair.com.ng/defensor-mk5>

Deutsche Welthungerhilfe e. V. (o. A.). *Klimawandel - Ursachen und Folgen*. Abgerufen am 11. Mai 2022 von <https://www.welthungerhilfe.de/informieren/themen/klimawandel/>

Deutsches Institut für Normung - DIN. (2012). *DIN 4108-7 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Dräger MSI - Messtechnik und Messgeräte. (2022). *Rauchröhrchen*. Abgerufen am 13. Mai 2022 von <https://draeger-msi.de/produkte/rauchroehrchen/>

European Bioplastics. (August 2021). *Was sind Biokunststoffe?* Abgerufen am 4. Juni 2022 von https://www.petroplast.ch/fileadmin/pdf/HOI_Biokunststoffe_120911.pdf

- Flumroc AG. (2022). *Flumroc-Dämmplatte 3*. Abgerufen am 14. Mai 2022 von <https://www.flumroc.ch/produkte/bauprodukte/detail/flumroc-daemmplatte-3>
- GatorDuct. (2022). *GatorDuct*. Abgerufen am 3. Juni 2022 von <https://www.gatorduct.com/>
- GVB - Gebäudeversicherung Bern. (22. Mai 2015). *RF1 bis RF4 – neue Klassifizierung von Baustoffen*. Abgerufen am 3. Juni 2022 von <https://forum-brandschutz.ch/news/rf1-bis-rf4-neue-klassifizierung-von-baustoffen/>
- Habert, P. G. (10. Oktober 2019). *Ein Aufruf für klimaneutrales Bauen, ETH Zürich*. Abgerufen am 11. Mai 2022 von <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2019/10/blog-habert-klimaneutrales-bauen.html>
- Heureka - Gebäudeversicherung Bern. (o. A.). *Baustoffe und Bauteile in Holz*. Abgerufen am 12. Mai 2022 von <https://heureka.gvb.ch/de/fachthemen/baustoffe-und-bauteile-in-holz/>
- HEV Schweiz. (o. A.). *Energiestandards*. Abgerufen am 11. Mai 2022 von <https://www.hev-schweiz.ch/wohnen/energie-umwelt/minergie/>
- KBOB. (2022). *Ökobilanzdaten im Baubereich*. Abgerufen am 6. Juni 2022 von https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html
- Klima-Kollekte - Kirchlicher Kompensationsfonds gGmbH. (2018). *Ursachen des Klimawandels*. Abgerufen am 11. Mai 2022 von <https://klima-kollekte.de/vermeiden-reduzieren/ursachen-des-klimawandels>
- Klinger, M., Kasser, U., Savi, D., Primas, A., Stettler, Y., & Gujer, P. (2014). *Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen*. Zürich: ARGE LW-Bilanzen.
- Lignum - Holzwirtschaft Schweiz. (2007). *Holzwerkstoffe – Holz in Bestform*. Abgerufen am 5. Juni 2022 von https://www.lignum.ch/holz_a_z/holzwerkstoffe/
- Lignum - Holzwirtschaft Schweiz. (2018). *Schweizerisches Holzschutzmittelverzeichnis*. Abgerufen am 1. Juni 2022 von https://www.lignum.ch/files/images/Downloads_deutsch/Schweizerisches_Holzschutzmittelverzeichnis_2018_Allgemeines.pdf
- Lignum - Holzwirtschaft Schweiz. (2022). *Holzschutz*. Abgerufen am 1. Juni 2022 von https://www.lignum.ch/holz_a_z/holzschutz/

- Material Archiv. (2010). *Celluloseplatte, formgepresst*. Abgerufen am 5. Juni 2022 von https://materialarchiv.ch/de/ma:material_725/?maapi:f_all_groups=ma:group_84
- Russ, A., Schwartz, J., Boháček, Š., Lübke, H., Ihnat, V., & Pažitný, A. (2013). *Reuse of old corrugated cardboard in constructional and thermal insulating boards*. Bratislava: Pulp and Paper Research Institute.
- SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG. (o. A.). *CLIMAVER® A2 neto - Beidseitig kaschierte Glaswolleplatte*. Abgerufen am 3. Juni 2022 von https://www.isover-technische-isolierung.de/sites/isover-ti.de/files/CLIMAVER_-_selbsttragende_Lftungskanle.pdf
- Schaar, C. (20. April 2021). *Holz als Baustoff: Vorteile und Tipps für den Hausbau*. Abgerufen am 13. Mai 2022 von <https://cradle-mag.de/artikel/holz-als-baustoff-vorteile-und-tipps-fuer-den-hausbau.html>
- Schradt, M. (2006). *Wald - Wissenschaft - Praxis*. Abgerufen am 27. Mai 2022 von https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a54_das_problem_mit_der_holzfeuchte_und_dem_wassergehalt.pdf
- Schweizerische Energie-Stiftung. (2022). *50% weniger Energieverbrauch im Gebäudesektor bis 2050*. Abgerufen am 23. Mai 2022 von <https://www.energiestiftung.ch/energieeffizienz-gebaeude.html#:~:text=Der%20gr%C3%B6sste%20Teil%20der%20W%C3%A4rme%20produktion,der%20Schweizer%20CO2%2DEmissionen%20verantwortlich.>
- Sedlbauer, P. K. (2017). *Analyse zu einer einfachen Möglichkeit der Prognose von Feuchteproduktion im Wohnraum auf Basis von Messdaten*. München: Technische Universität (TUM). Abgerufen am 08. Juni 2022 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1485555/1485555.pdf>
- Settembrini, G., Kretschmer, A., Pidoux, A., Hofstetter, S., Primas, A., & Huber, H. (2022). *Alternative Materialien für Lüftungsanlagen*. Luzern: HSLU T&A.
- SIA180. (1999). *Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau*. Zürich: SIA.
- SIA180. (2014). *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Zürich: SIA.
- SIA382/1. (2014). *Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: SIA.

Testo SE & Co. KGaA. (2022). *testo 606-1 - Feuchtemessgerät für Materialfeuchte*. Abgerufen am 16. Mai 2022 von <https://www.testo.com/de-CH/testo-606-1/p/0560-6060>

VKF. (1. Januar 2017). *BSR 13-15 - Baustoffe und Bauteile - Klassifikation*. Abgerufen am 6. Juni 2022

VKF. (1. Januar 2017). *BSR 14-15 - Verwendung von Baustoffen*. Abgerufen am 6. Juni 2022 von <https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-77.pdf/content>