

COOLE HÜLLE

Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik





**HOLZ
FORSCHUNG
AUSTRIA**

Cooler Hülle - Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik

Endbericht - Onlineversion

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: F518

Gefördert durch die Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor:innen

Dr. Martin Felhofer, DI (FH) Christina Fürhapper, Mag. Elisabeth Habla, DI Claudia Koch,
Dr. Christian Lux, Dr. Maximilian Neusser (TU Wien), Dr. Bernd Nusser,
Mara Schumacher M.Sc., DI Alexander Stenitzer, DI Johannes Tieben-Köttl,
Dipl. HTL Ing. Michael Truskaller

Weitere Projektmitarbeiter

Wolfgang Hochschorner, Johannes Reiter, Ing. Daniel Resch,
Elias Uiblein, Gregor Wurlitzer

Beteiligte Verbände und Firmen

Bundesgremium Baustoff-, Eisen- und Holzhandel, Bundesinnung Holzbau, Fachverband
der Holzindustrie Österreichs - Fachgruppe Bau und Fachgruppe Laubholz,
Österreichischer Fertighausverband, Verband der Europäischen Hobelindustrie,
ARWAG Wohnpark Errichtungs-, Vermietungs- und Beteiligungsgesellschaft m.b.H, Getzner
Werkstoffe GmbH, J. u. A. Frischeis GmbH, MIGRA Gemeinnützige Wohnungsges.m.b.H,
Osmo Holz und Color GmbH & Co KG, Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH, SHIGA
GmbH, Stora Enso WP Bad St. Leonhard GmbH, Weiss GmbH, Weissenseer Holz-System-
Bau GmbH

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	6
1.1	Projektziele	10
1.2	Projekt-/Berichtsstruktur.....	11
2	Stand des Wissens	12
2.1	Thermisches Verhalten	12
2.2	Bauakustisches Verhalten	16
2.3	Feuchteresistentes Verhalten	19
3	Methoden, Ergebnisse und Diskussion	21
3.1	Sommerlicher Wärmeschutz.....	21
3.1.1	Hintergrund	21
3.1.2	Varianten und Messungen	22
3.1.3	Auswirkungen auf Oberflächentemperaturen	23
3.1.4	Einfluss Zusatzdämmung auf Fassadenschirm	26
3.1.5	Untersuchungen zur Alterung von Holzoberflächen	27
3.1.6	Auswirkungen auf Wärmeströme	28
3.1.7	Handlungsempfehlungen - Wärmeschutz.....	29
3.2	Schallschutz.....	30
3.2.1	Messungen.....	30
3.2.2	Simulationen	38
3.3	Feuchteresistenz	51

3.3.1	Neue Anforderungen an Holzfassaden.....	51
3.3.2	Schnellbewitterungsversuche in der Klimakammer	52
3.3.3	Welchen Einfluss hat eine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung bei offenen Fassaden?.....	53
3.3.4	Ist eine Nageldichtung hinter der Traglattung erforderlich?.....	55
3.3.5	Wie können Längsstöße optimal gestaltet werden?.....	56
3.3.6	Wie sollte die Geometrie der Traglatten gestaltet werden?	57
3.3.7	Haben Holzfassaden einen Einfluss auf die Korrosion von Verblechungen?	58
3.3.8	Handlungsempfehlungen - Feuchteresistenz	59
4	Zusammenfassung.....	59
4.1	Sommerlicher Wärmeschutz – Freilanduntersuchungen und Simulationen (Anhang 1)	59
4.1.1	Freilanduntersuchungen	60
4.1.2	Simulationsstudie	61
4.2	Sommerlicher Wärmeschutz – Alterung von Fassadenoberflächen (Anhang 2)	62
4.3	Schallschutz – Bauakustische Messungen (Anhang 3).....	63
4.3.1	Einfluss Fassadenart	63
4.3.2	Einfluss Verschraubung	64
4.3.3	Einfluss Lattungsebene	64
4.3.4	Optimierungsansätze	65
4.3.5	Einfluss Bauteilgröße/Prüfraumvolumen	65
4.4	Schallschutz – Bauakustische Simulationen (Anhang 4).....	66
4.5	Feuchteresistenz - Konstruktiver Holzschutz (Anhang 5).....	68
4.6	Feuchteresistenz - Umweltverhalten und Korrosion (Anhang 6).....	69
4.6.1	Beschleunigte Leaching-Verfahren	69

4.6.2	Beschleunigte Korrosionsverfahren	70
4.6.3	Praxisrelevanten Erkenntnisse.....	70
4.7	Handlungsempfehlungen (Anhang 7)	71
5	Danksagung	73
6	Literatur.....	73

Anhang 1: AP3 Kühle Fassade – Freilanduntersuchungen und Simulationen

Anhang 2: AP3 Kühle Fassade – Alterung von Fassadenoberflächen

Anhang 3: AP4 Leise Fassade – Bauakustische Messungen

Anhang 4: AP4 Leise Fassade – Bauakustische Simulationen

Anhang 5: AP5 Feuchteresistente Fassade – Konstruktiver Holzschutz

Anhang 6: AP5 Feuchteresistente Fassade – Umweltverhalten und Korrosion

Anhang 7: AP6 Handlungsempfehlungen

1 Einleitung

Das Erdklima ist einem ständigen Wandel unterzogen. In den letzten Jahrzehnten zeigte sich jedoch eine derart drastische Änderung des Erdklimas, wie sie seit Beginn der Wetteraufzeichnungen bisher noch nicht dokumentiert wurde. Entsprechend wissenschaftlichen Klimaprognosemodellen wird für Europa eine maximale mittlere Temperaturzunahme von 5,5 °C bis zum Jahr 2100 vorhergesagt [1]. Abbildung 1 zeigt, wie sich die globale Durchschnittstemperatur entsprechend verschiedenen Klimamodellen bis zum Jahr 2100 entwickeln könnte.

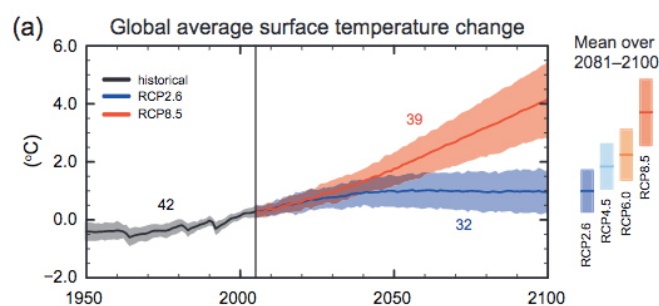


Abbildung 1: Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 unter den zwei extremen RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) unter Berücksichtigung von 32 bzw. 39 Modellen. Rechts sind die durchschnittlichen Temperaturen zwischen 2081 und 2100 unter allen vier RCP-Szenarien dargestellt. [2]

Gemäß [1, 2] werden in Mitteleuropa trockenere Sommer und Winter mit erhöhten Niederschlagsmengen erwartet. Die Hitzewellen werden gemäß den Klimaprognosen zunehmen, wobei u.a. Mitteleuropa einschließlich des Alpenraumes durch extreme Temperaturen belastet werden wird. Abbildung 2 zeigt, wie sich die Anzahl der Hitzetage (Tage mit Temperaturmaximum ≥ 30 °C) in Wien in den letzten 100 Jahren entwickelt hat, die starke Zunahme ist deutlich zu erkennen.

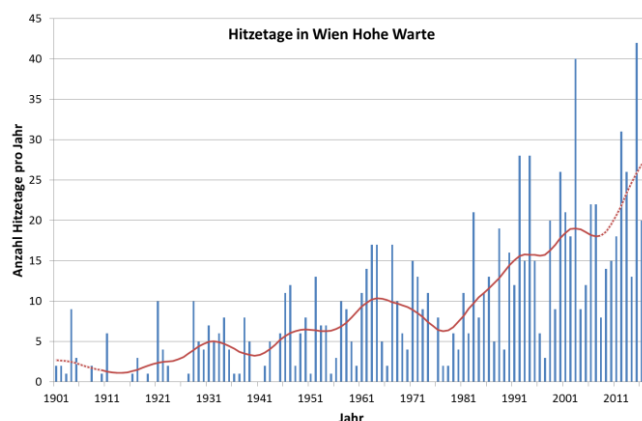


Abbildung 2: Entwicklung der Hitzetage seit Beginn des 20. Jahrhunderts an der Station Wien Hohe Warte. [2]

Stützend auf Raumklimasimulationen wird von Voss und Künz [3] gezeigt, dass sich der Heizwärmebedarf von Nichtwohngebäuden (Büro, Schule, Hotel) aufgrund des Klimawandels in Deutschland bis 2050 deutlich reduzieren wird. Die sommerlichen Raumtemperaturen sowie der Kältebedarf werden jedoch deutlich, nicht nur in Bürobauten, zunehmen.

In den letzten Jahren hat auf politischer und gesellschaftlicher Ebene ein Umdenken in Richtung ressourcenschonender, ökologischer Bauweise stattgefunden. Die österreichische Bundesregierung hat in ihrem Regierungsprogramm 2020 dem Kampf gegen den Klimawandel hohe Priorität eingeräumt. Österreich hat sich bereits 2015 zu der Agenda 2030 verpflichtet und auch der European Green Deal nimmt die Baubranche in die Verantwortung, die Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) zu erreichen. Churkina et al. zeigen in [4], dass städtische Holzbauten als Kohlenstoffsенke wirken können mit einem globalen CO₂ Einsparungspotential von 0.01-0.68 Gt C yr⁻¹.

Der Baustoff Holz liegt dadurch im Trend. In Österreich hat sich der Holzbauanteil, bezogen auf die Nutzfläche, von 14 % im Jahr 1998 auf 24 % im Jahr 2018 sehr deutlich erhöht [5]. Rund ein Viertel der neu errichteten Gebäude wird inzwischen in Holz gebaut (Definition Holzhausbau: > 50 % der tragenden Konstruktion des Gebäudes besteht aus Holz oder Holzwerkstoffen).

Im gegenständlichen Projekt werden Fassaden aus Holz untersucht. Entsprechend Abbildung 3 sollen die Fassaden der Zukunft

- architektonisch variabel sein,
- eine lange Lebensdauer aufweisen und wiederverwertbar/recyclbar sein,
- den Nutzeranforderungen (z.B. schallschützend) gerecht werden
- einen Mehrwert (z.B. Verbesserung der Behaglichkeit) liefern
- dem Standort gerecht werden

und

- das Klima schützen,
- die Ressourcen schonen,
- eine Klimawandelanpassung¹ ermöglichen.

Holzfassaden zeigen somit ein hohes Potential für zukunftsichere Fassaden. Im Zuge des Projektes werden die Punkte 2-4 für Holzfassaden weiterentwickelt. Primär sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf das sommerliche Raumklima (Stichwort „sommerliche Überwärmung“) durch optimierte Holzfassaden reduziert und somit eine Klimawandelanpassung ermöglicht werden.

¹ „Klimawandelanpassung bedeutet, die nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels zu antizipieren und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um den Schaden, den sie verursachen können, zu verhindern oder zu minimieren, oder die sich bietenden Chancen zu nutzen. Gut geplante, frühzeitige Anpassungsmaßnahmen sparen Geld und Leben (GRÜNSTATTAU, 2020).“ [6]



Abbildung 3: Anforderungen an die Fassade der Zukunft [6]

Hinterlüftete Holzfassaden bieten gegenüber Putzfassaden unter anderem den Vorteil, dass ein Teil der solar eingebrachten Wärme durch den natürlichen Luftaustausch in der Fassade (Windwirkung, thermischer Auftrieb) abgeführt werden kann [7]. Abbildung 4 verdeutlicht die Wärmeübertragungsvorgänge an Außenwänden. Durch gezielte Beeinflussung des Wärmemanagements einer hinterlüfteten Holzfassade (z.B. Wärmeabtransport durch erhöhten natürlichen Luftwechsel) wird der Wärmestrom in den Innenraum im Vergleich zu WDVS-Putzfassaden somit reduziert.

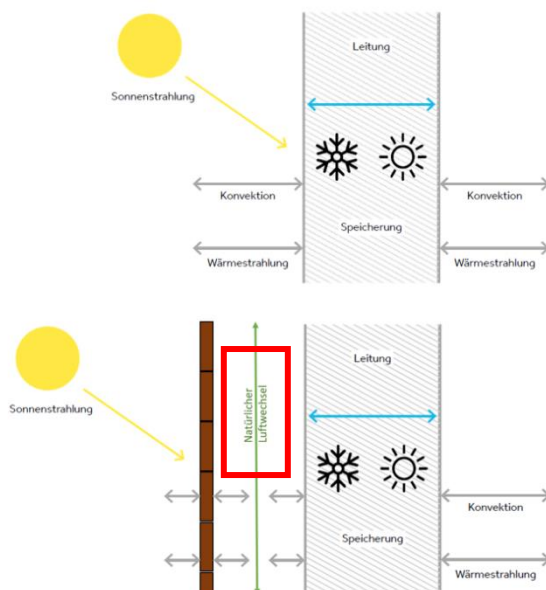


Abbildung 4: Abbildung der für die Wärmeübertragung von außen nach innen, maßgeblichen Effekte (oben: Putzfassade, unten: hinterlüftete Fassade), geändert nach [8]

Entsprechend Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik [9] kann der Wärmeeintrag in einen Wandbildner durch eine 50 mm starke Hinterlüftung um 82 % reduziert werden (Abbildung 5). Aktuelle Ergebnisse in [10] zeigen, dass durch eine Erhöhung der Hinterlüftungsspaltbreite der Wärmestrom in die Wand nochmals weiter gesenkt werden kann. Im Zuge des Projektes wird u.a. diese Wärmeabfuhr von vorgehängten Fassaden untersucht.

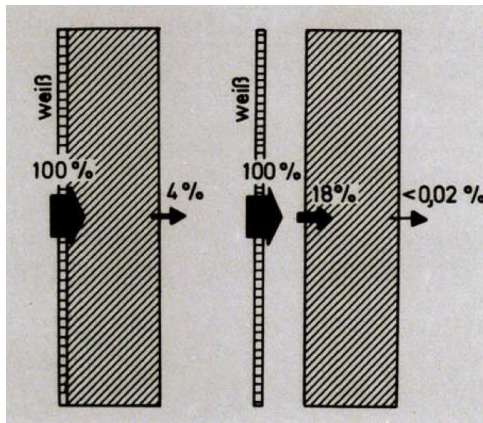


Abbildung 5: Gemessene prozentuale Anteile der Wärmeströme durch eine unbelüftete (links) und eine belüftete (rechts) Holzrahmenbauwand an einem Sommertag [9]

Eine Optimierung der thermischen Eigenschaften von Holzfassaden darf jedoch nicht auf Kosten der akustischen Schutzwirkung solcher Fassaden gehen. Laut aktuellen WHO-Leitlinien für Umgebungslärm werden die gesundheitlichen Risiken durch Straßen-, Schienen- und Fluglärm nun höher als bei vorhergehenden Risikobeurteilungen eingeschätzt [11, 12]. Menschen müssen demnach in verstärktem Maße vor der gesundheitsschädlichen Wirkung von Verkehrslärm geschützt werden. Die WHO empfiehlt der Politik deshalb geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die verkehrsbedingte Lärmbeeinträchtigung des Menschen zu reduzieren. Eine zielführende Maßnahme stellt beispielsweise die Steigerung der Schalldämmung der Gebäudehülle, wie z.B. von Außenwänden dar. Im gegenständlichen Projekt wird die bauakustische Verbesserung der Holzfassaden somit stets im Zusammenhang mit den Optimierungsschritten im Bereich der sommerlichen Überwärmung betrachtet.

Höhere Durchschnittstemperaturen in der Hinterlüftungsebene von Holzfassaden verstärken durch ausgeprägtere Schwind- und Quellvorgänge die Bildung von Fugen und Rissen in Holzoberflächen, wodurch es zur verstärkten Bildung von Feuchtenestern kommt. Damit, sowie durch immer wärmere Bedingungen, steigt die Gefahr eines mikrobiellen Befalls des Holzes. Durch eine optimierte Hinterlüftung wird diese Gefahr verringert, was zu einem reduzierten Wartungsaufwand und somit langfristig zu einer höheren Akzeptanz von Holzfassaden führt.

Zusätzlich bedarf es zur Optimierung der Feuchteresistenz beschleunigter Messverfahren, die eine verlässliche a priori-Abschätzung der Auswaschung von Holz- und / oder

Beschichtungsmittelkomponenten aus unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen ermöglichen. Neben dem wichtigen Aspekt der Feuchtebeständigkeit, sind auch potenzielle ökotoxikologische Einflüsse durch unbeabsichtigt freigesetzte Substanzen in die Umwelt von großer Relevanz (vgl. Grundanforderung 7 in [13]).

Im Zuge von Gutachtertätigkeiten war die Holzforschung Austria in der Vergangenheit u.a. mit Korrosionsproblemen im Zusammenhang mit Holzfassaden konfrontiert, insbesondere an Brandschutz-, Abschluss- und Attikablechen, Befestigungsmitteln, Fensterbänken oder Beschlägen. Abbildung 6 zeigt dies exemplarisch an Brandschutzblechen in unterschiedlich ausgeprägtem Fortschritt.

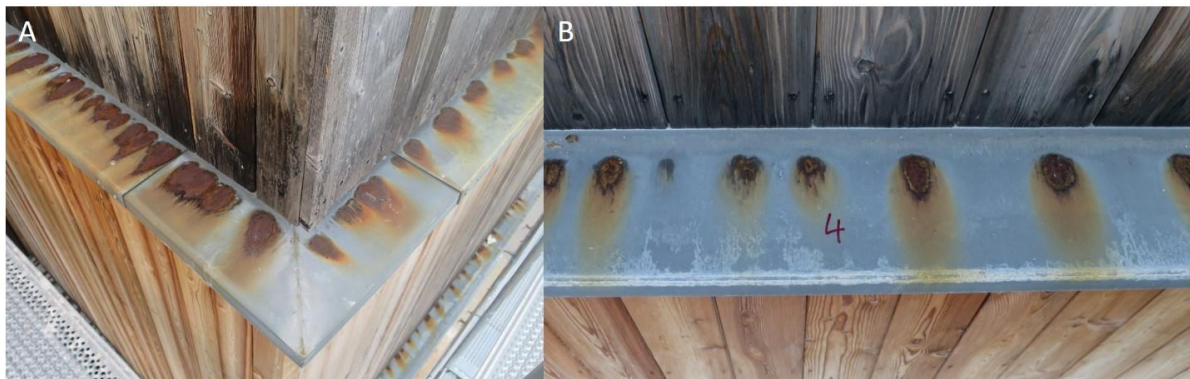


Abbildung 6: Starke Korrosionsschäden an Brandschutzblechen bei einem Objekt mit Lärchenholzfassade A) an der Gebäudeecke mit unterschiedlich starker Bewitterung, B) Detail eines mittleren Korrosionsfortschrittes

Die Wechselwirkungsmechanismen beim Auftreten derartiger Korrosionsschäden sind bisher unbekannt. Vermutet wird bisweilen, dass die Geschoßhöhe und Exposition, wie auch Fugen und Risse wie oben beschrieben aufgrund der erhöhten Abwaschungen hierbei eine erhebliche Rolle spielen. Derartige Korrosionsschäden müssen vermieden werden, um eine dauerhafte und technisch einwandfreie Funktion der Holzfassade zu gewährleisten. Im Projekt wurden deshalb auch Methoden zur Bewertung der Korrosionsgefahr bei Holzfassadensysteme untersucht.

1.1 Projektziele

- Das übergeordnete Ziel des Projektes war es, mit optimierten Holzfassaden dem Einfluss steigender Außentemperaturen auf das sommerliche Raumklima zu begegnen.
- Zusätzlich sollte im Projekt sowohl die Verbesserung der Schalldämmung wie auch der Feuchteresistenz der Holzfassaden untersucht werden.
- Ein weiteres Projektziel bestand darin, das thermische und bauakustische Verhalten von Holzfassaden prognostizierbar zu machen.

Um den Know-how-Transfer in die Branche zu erleichtern, wurden die Projektergebnisse zum Projektende in einem Merkblatt sowie einem Dokument mit Hintergrundinformationen auf www.dataholz.eu publiziert (Anhang 7a/7b).

1.2 Projekt-/Berichtsstruktur

Die Projektbearbeitung erfolgte in sechs Arbeitspaketen entsprechend Abbildung 7.

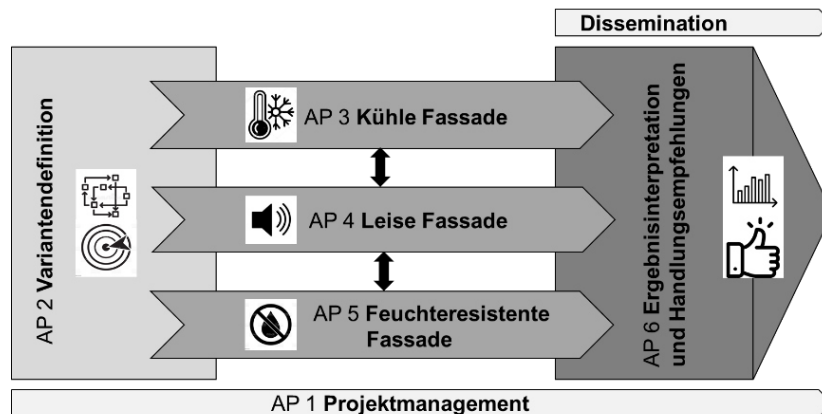


Abbildung 7: Schematische Darstellung der geplanten Projektstruktur mit den Arbeitspaketen (AP) 1-6

Im gegenständlichen Endbericht wird zunächst ein gesamtheitlichen Überblick über die Forschungsarbeiten im Projekt und über wesentliche Projektergebnisse gegeben. Für eine detaillierte Diskussion und weitere Ergebnisse wird auf die ausführlichen Berichte im Anhang verwiesen.

- AP3: Kühle Fassade – Freilanduntersuchungen und Simulationen (Anhang 1)
- AP3: Kühle Fassade – Alterung von Fassadenoberflächen (Anhang 2)
- AP4: Leise Fassade – Bauakustische Messungen (Anhang 3)
- AP4: Leise Fassade – Bauakustische Simulationen (Anhang 4)
- AP5: Feuchteresistente Fassade – Konstruktiver Holzschutz (Anhang 5)
- AP5: Feuchteresistente Fassade – Umweltverhalten und Korrosion (Anhang 6)
- AP6: Handlungsempfehlungen (Anhang 7a/7b)

2 Stand des Wissens

Nachfolgend wird der Stand des Wissens (Sommer 2021) bzgl.

- Thermisches Verhalten
- Bauakustisches Verhalten
- Feuchteresistentes Verhalten

von vorgehängten Fassaden aufgezeigt.

2.1 Thermisches Verhalten

Bei bisherigen Forschungsarbeiten zum Thema sommerliche Raumtemperaturen lag der Fokus zumeist auf transparenten Bauteilen (Glasflächen) sowie der effektiven nächtlichen Belüftung [14–19]. Eigene Untersuchungsergebnisse beschäftigten sich ebenfalls mit dem Potential von optimierten Glasflächen und der nächtlichen Lüftung bzgl. der sommerlichen Überwärmung [20–22].

Wie sehr sich der Innenraum eines Gebäudes aufgrund des Wärmestroms durch Außenwände erwärmt, hängt in erster Linie vom herrschenden Temperaturgefälle zwischen Außen- und Innenoberfläche der Wand ab [23]. Durch eine Absenkung der Außenoberflächentemperatur kann die Erwärmung des Raumes reduziert werden. Dies ist der verfolgte Lösungsansatz im gegenständlichen Projekt.

Die Temperaturbedingungen in vorgehängten Fassaden wurden in [7] detailliert beschrieben. Entsprechend den dortigen Untersuchungen bestimmen folgende konstruktive Faktoren die Temperatur in der Hinterlüftungsebene (siehe Gleichung 1):

- Strahlungsabsorptionsverhalten der Außenoberfläche
- Länge und Querschnitt des Hinterlüftungsspalts
- U-Wert des Deckmaterials
- U-Wert des Wandbildners
- Belüftungsstromgeschwindigkeit

$$\vartheta_l [^{\circ}\text{C}] = \frac{U_a \vartheta_a + U_i \vartheta_i + 0,1 \rho_l \vartheta_a A_l v_l / l}{U_a + U_i + 0,1 \rho_l A_l v_l / l} \quad (\text{Gleichung 1 nach [7]})$$

ϑ_l : mittlere Temperatur im Hinterlüftungsspalt in $^{\circ}\text{C}$

U_a : U – Wert des Deckmaterials in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

U_i : U – Wert des Wandbildners in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

ϑ_a : Oberflächennahe Strahlungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$

ϑ_i : innere Oberflächentemperatur in $^{\circ}\text{C}$

ρ_l : mittlere Luftdichte im Belüftungsspalt in kg/m^3

A_l : Belüftungsquerschnitt in m^2

v_l : Strömungsgeschwindigkeit im Hinterlüftungsspalt in m/s

l : Länge des Hinterlüftungsspalts in m

In einem abgeschlossenen Projekt der HFA (PuPURA, [24]) konnten die wesentlichen Faktoren auf die Temperatur in der Hinterlüftungsebene in Steildächern ermittelt werden. Durch Variation der Belüftungsquerschnitte, der Eindeckungsmaterialien und -farben konnten sommerliche Temperaturdifferenzen von bis zu 16 K im Hinterlüftungsspalt erreicht werden, was das große Potential der Temperaturreduktion aufzeigt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Servowood“ der der HFA [25] wurden Untersuchungen zur Wirkung von „Coolen Pigmenten“ in verschiedenen Holzoberflächenbeschichtungen durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die strahlungsbedingte Erwärmung von Oberflächen durch den Einsatz dieser Pigmente signifikant reduziert werden kann. Anhand von Abbildung 8 wird ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur mit Coolen Pigmenten trotz sehr dunklem Erscheinungsbild 9 K unter der einer schwarzen Oberfläche und 4 K unter der einer braunen Oberfläche liegt.

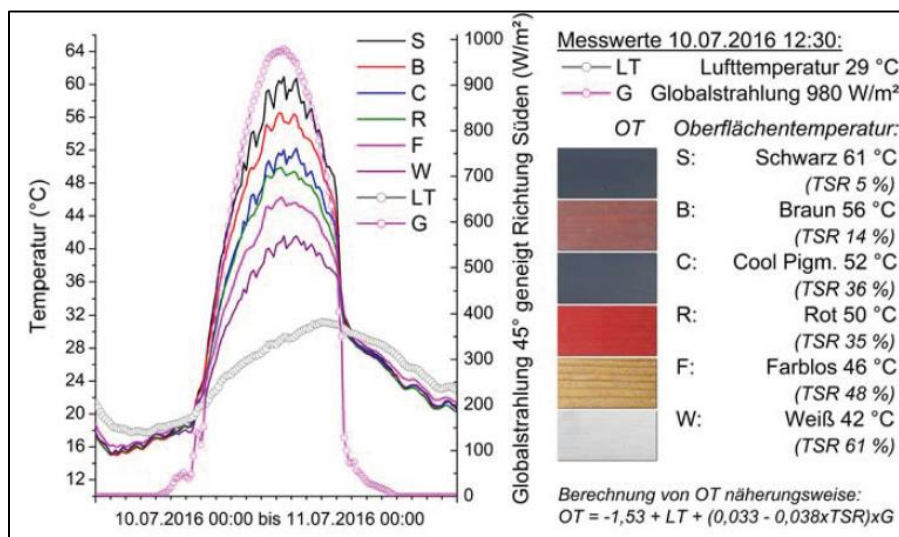


Abbildung 8: Verlauf der Globalstrahlung und der Luft- und Oberflächentemperatur nahe unter der Oberfläche von verschiedenartigen Proben während eines sonnigen Tages in Wien. Anstieg und Rückgang der Oberflächentemperatur mit der Globalstrahlung in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad der Oberfläche (TSR). [26]

Der thermische Effekt von Phase Change Materials (PCM)² als Latentwärmespeicher in Bauteilen ist bereits in vielen Arbeiten behandelt worden [27–32]. Durch die Studien wird ersichtlich, dass der Einsatz von PCM in Außenbauteilen von Gebäuden ein hohes Potential zur Einsparung von Wärme- und Kühlenergie birgt. Sowohl beim sommerlichen als auch beim winterlichen Wärmeschutz lassen sich die entsprechenden Wärmeströme erkennbar reduzieren. [32] fasst die bisherigen Studien zum Einsatz von PCM in der

² Die Wirkungsweise von PCM (z.B. Gipsplatten mit Wachseinschlüssen) besteht darin, dass durch einen Phasenübergang von fest zu flüssig (z.B. des Wachses) die Temperatur des Materials trotz Wärmezufuhr nicht weiter ansteigt. Somit wirken PCM als Latentwärmespeicher oder eine Art „Wärmepuffer“.

Gebäudetechnologie übersichtlich zusammen. Neben dem Hinweis auf das große Potential zur Energieeinsparung wird jedoch auch aufgezeigt, dass noch Forschungsbedarf besteht, um die Einsatzweise von PCM zu optimieren und den maximalen Nutzen zu gewährleisten. Der gezielte Einsatz dieses Materials in hinterlüftete Holzfassaden wurde bisher jedoch noch nicht untersucht.

In [22] wird aufgezeigt, dass bei einem WDVS-Wandaufbau (U-Wert Wand: $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$) durch Einsatz eines hellen Außenputzsystems statt eines dunklen Außenputzsystems die Temperatur an der südlichen Innenwandoberfläche im Durchschnitt um 1 K reduziert werden kann. Dieser Effekt ist auf die geringere solare Absorption der helleren Oberfläche zurückzuführen, wodurch die solar induzierten Wärmeströme in den Innenraum reduziert werden. Inwieweit sich dieser Effekt auch für eine thermische Optimierung von Vorhangfassaden nutzen lässt, wurde bisher noch nicht untersucht.

Geringe Temperaturen in Holzbauteilen führen zu einer reduzierten Trocknung von angefallenem Kondensat und können zu Feuchteschäden führen [33]. Ein ebensolches Schadenspotential weisen Hinterlüftungen auf, welche einen zu geringen Luftvolumenstrom aufweisen um die eingetragene Feuchtigkeit abzuführen [7, 34]. Je nach Modifizierung der Holzfassade können somit potenziell kritische Bedingungen für Wandbildner in Holzbauweise entstehen.

Während des Alterungsprozesses von Holz verändert dieses durch UV-bedingten Ligninabbau und anschließender, niederschlagsbedingter Auswaschung der entsprechenden Abbauprodukte stark seine Farbe [35]. Aus Sicht des Oberflächenschutzes wurde dieser Sachverhalt bereits vielfach untersucht und bewertet [36–39]. Gerade bei unbehandelten, hellen Holzoberflächen führt dieser Prozess zu einer deutlich dunkleren Oberflächenfarbe, durch die sich die solare Absorption des Materials erhöht. Dementsprechend sind bei stark gealterten Holzfassaden tagsüber höhere Temperaturen im Material und den darunter liegenden Schichten zu erwarten als bei frisch verbauten, hellen Holzfassaden. Aus diesem Grund ist eine Veränderung des Einflusses durch die Oberflächenalterung auf Raum- und Umgebungstemperatur zu erwarten.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Literatur, welche im Zusammenhang zum thermischen Verhalten von vorgehängten Fassaden analysiert wurde. Sie zeigt auf, welche thematischen Schwerpunkte in der jeweiligen Literatur behandelt und welche Parameter dabei betrachtet wurden.

Wie anhand von Tabelle 1 ersichtlich wird, wurde bei der Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes nur vereinzelt die opake Fassadenart variiert. [9] betrachtet dabei die Reduktion des Wärmestroms einer hinterlüfteten Holzfassade (5 cm Hinterlüftungsspalt) im Vergleich zu einer nicht hinterlüfteten Fassade, ohne dabei weitere Parametervariationen an der Fassade in Betracht zu ziehen. [17, 18] untersuchen (neben U-Wertvariationen, verschiedene Beschattungssituationen transparenter Bauteile und unterschiedlicher Lüftungsszenarien) den Einfluss einer reflektierenden Fassadenbeschichtung an einer nicht

hinterlüfteten Fassade. Bei den zitierten Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz wurde bisher der Feuchteschutz des Wandbildners in keinem Fall explizit mituntersucht. Die Holzalterung spielte bisher lediglich in Bezug auf die Dauerhaftigkeit und Ästhetik von Oberflächen eine Rolle. Der Luftwechsel im Gebäude ist in der Literatur bereits oft in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz betrachtet worden und wird im geplanten Projekt nur anhand einer Literaturstudie behandelt.

Tabelle 1: Übersicht zu den thematischen Schwerpunkten und den betrachteten Parametern in der Literatur.

	thematischer Bezug				betrachtete Parameter					
Literaturquelle	sommerlicher Wärmeschutz	winterlicher Wärmeschutz	Feuchteschutz Wandbildner	Energieeinsparung	hinterlüftete Fassaden	Wandbildner/Bauweise	Holzalterung	Klimamodell (Klimawandel)	Raumlüftung	Phase Change Materials (PCM)
[9, 10]	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-
[40, 22]	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-
[14]	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-
[15, 16, 19]	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
[17, 18]	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
[21, 20]	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-
[28]	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X
[22]	X	-	-	-	-	X	-	-	X	X
[29]	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
[30, 31]	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X
[32]	X	X	-	X	-	-	-	-	-	X
[34]	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-
[35–39]	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-

2.2 Bauakustisches Verhalten

Die bauakustische Wirkung von WDVS-Fassaden wurde bisher in zahlreichen Studien untersucht. So wird in [41–45] der bauakustische Einfluss von WDVS auf mineralische Massivwände diskutiert, in [46–49] der WDVS Einfluss auf Holzrahmenwände und in [50, 51] der WDVS Einfluss auf Holzmassivwände.

Der Einfluss von vorgesetzten Fassaden, im speziellen von Holzfassaden, wurde hingegen bisher nur vereinzelt untersucht. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der diesbezüglich vorhandenen wissenschaftlichen Literatur, eine Analyse der in den Untersuchungen betrachteten Wandbildner und Einflussfaktoren sowie eine Darstellung, ob in den zitierten Arbeiten Holzfassaden untersucht wurden.

Wie Tabelle 2 zeigt, wurde an Holzfassaden bisher zumeist der Einfluss der Fixierung der Unterkonstruktion und in einer Arbeit – jedoch nur ansatzweise/nicht systematisch - der Einfluss der Belüftungsspalthöhe untersucht. Die anderen, teils vielversprechende Einflussfaktoren wie Luftdichtheit der Fassade und Absorber im Belüftungsspalt aber auch der Einfluss der Höhe des Belüftungsspalt oder der Fassade Masse wurden weder für offene noch für geschlossene Holzfassaden bisher tiefergehend betrachtet. Der bauakustische Einfluss einer offenen oder geschlossenen Holzfassade auf eine Stahlbetonwand wurde bisher ebenfalls noch nie untersucht.

Tabelle 2: Übersicht zu vorhandener Literatur bzgl. Schalldämmung von vorgesetzten Fassaden auf Wandbildnern und die in den Untersuchungen betrachteten Einflussfaktoren, UK = Unterkonstruktion, BS = Belüftungsspalt

	Literaturquelle	Holzfassade	Wandbildner			Untersuchte Einflussfaktoren					
			Stahlbeton	Holzrahmen	Holzmassiv	Fixierung UK	Belüftungsöffnung	Höhe des BS	Absorption im BS	Luftdichtheit	Masse Fassade
geschlossene Fassade	[52]	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-
	[48]	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-
	[53]	X	-	-	X	X	-	X	-	-	-
	[54, 55]	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-
	[56]	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-
	[57]	-	-	-	-	-	X	-	x	X	-
offene Fassade	[52]	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-
	[48]	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-

Der Zusammenhang zwischen der Schalldämmung von Bauteilen und deren thermischen Verhalten wurde u.a. in [58–60, 43, 61] zumeist an Wänden mit WDVS untersucht. Die Autor:innen der Arbeiten kommen mehrfach zu dem Schluss, dass es schwierig ist, Bauteile gleichzeitig thermisch und bauakustisch zu optimieren, da sich bisher keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten finden lassen.

Werden die Einflussfaktoren getrennt nach „thermisch“ und „bauakustisch“ betrachtet, so zeigt sich, dass sich das sommerliche Verhalten von vorgesetzten Fassaden z.B. durch eine

- starke Durchlüftung der Fassade

verbessern lässt [7].

Das bauakustische Verhalten von vorgesetzten Fassaden wird hingegen durch eine

- hohe Luftdichtheit der Fassade

positiv beeinflusst [54, 55, 57].

Dementsprechend können bauakustisch positive Entwicklungsschritte (z.B. Erhöhung der Luftdichtheit der Fassade) einer Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes von

vorgesetzten Fassaden entgegenstehen. Auch sind die baukustischen Auswirkungen von einigen thermisch positiven Maßnahmen (z.B. Dämmstoff im Belüftungsspalt) unbekannt.

Die Prognose der Schalldämmung von komplexen und inhomogenen Bauteilkonstruktionen (z.B. Holzrahmenbau, vorgehängte Fassaden) ist eine bisher noch nicht gelöste Herausforderung. Aus planerischer Sicht können Wänden mit vorgehängten Fassaden derzeit nur aufgrund erfolgter Schallmessungen oder Abschätzungen mit hohen Unsicherheiten [62] geplant werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es hauptsächlich folgende, für die Planungspraxis derzeit noch zu aufwendige Methoden, um frequenzabhängige Prognosen des Schalldämmmaßes von Außenwänden zu erstellen:

- Statistischste Energie Analyse (SEA) [63]
- Finite Elemente Methode (FEM) [64–66, 62, 67]
- Analytischen Modelle [68–70]
- Vereinfachten Lösungsansätze für dezidierte Konstruktionen [71]

Unterschiedliche Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass mittels FEM valide Prognosen der Luftschalldämmung von Wänden in Holzbauweise möglich sind [72], weshalb im gegenständlichen Projekt ebenfalls die FEM zur Simulation der Wände mit vorgehängter Fassade herangezogen wird. Diese Prognosemodelle erreichen eine Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen bei der Simulation von reinen Wandbildnern von $\Delta R \leq \pm 3$ dB [73].

Bisher wurde FEM-Modelle von vorgehängten Fassaden vorrangig für die Nachweisführung in der Statik von Glassfassaden eingesetzt [74]. Prognosen der Verbesserung des Schalldämmmaßes sind in der Literatur nicht zu finden.

Die Literatur kennt viele unterschiedliche Einflussparameter die bei der Modellierung der Schalltransmission durch eine Holzleichtbauwand berücksichtigt werden müssen, diese sind beispielsweise [72]:

- Materialeigenschaften (dynamisches E-Modul, Innerer Verlustfaktor, Querkontraktionszahl, Dichte, Strömungswiderstand, Porosität)
- Geometrie (Bauteilabmessungen, Schichtdicken, Verbindungsmittelabstände)
- Verbindungsmittel (Steifigkeiten, Position, Anzugsmoment)
- Verbindung zwischen Bauteil und Prüfstand

In Kombination mit einer leichten Holzfassade sind die Wechselwirkungen mit den Eigenschaften der Fassaden und diesen Parametern der Wand allerdings noch nicht aufgeklärt. Konkrete Materialkennwerte für geschlossene Holzfassaden zum Einsatz bei FEM-Simulationen sind in der wissenschaftlichen Literatur ebenfalls nur bedingt erhältlich [73].

2.3 Feuchteresistentes Verhalten

Gemäß der Europäischen Bauprodukteverordnung [13] (zuletzt geändert durch (EU) 2019/1020) sind Bauprodukte, hinsichtlich der Freisetzung gefährlicher Stoffe zu bewerten. Für Fassaden wurde u.a. durch das Europäische Normungskomitee CEN/TC 351 eine horizontale, dynamische Oberflächenauslaugprüfung (DSLIT) für das Labor entwickelt [75].

Aus dem Bereich Holzschutz- und Beschichtungsmittelentwicklung stammen sogenannte Labor-Immersionstests (z.B. [76] CEN/TS 15119-1 oder [77] EN 16105) zur Analyse von Auswaschungspotentialen. Beide Verfahren weisen völlig unterschiedlichen Herangehensweise auf (wenig realistischer Worst-Case-Ansatz im Gegensatz zu praxisnäherer Exposition).

Entsprechende Untersuchungen in [78] zeigen, dass mittels Verfahren wie dem DSLIT um zwei- bis viermal höhere Biozidgehalte aus schutzmittelbehandelten Fassadenelementen abgewaschen werden als mittels Immersionstests. Durch die permanente Wechselwirkung zwischen Materialoberfläche und Auslaugmedium kommt es zu einer Überschätzung des Auswaschverhaltens. Zusätzlich können im dauerhaft wässrigen Milieu Degradierungsprozesse stattfinden, wodurch einzelne ausgewaschene Substanzen im Eluat nicht mehr (vollständig) nachgewiesen werden können [79, 80].

Die Übertragung von im Labor generierten Emissionsdaten auf die Praxis ist generell schwierig. Einerseits bedarf es dazu standardisierter Rechenmodelle, die auf die jeweiligen spezifischen Umgebungsbedingungen angepasst werden müssen. Auf der anderen Seite kann im Labor nur ein sehr limitierter Probenabschnitt betrachtet werden, der oftmals nicht ausreichend repräsentativ für das zu untersuchende Material ist. Gerade bei komplexen Bauteilen, wie den Fassadenelementen, die zudem z.B. durch Konterlatten, Befestigungsmittel oder Brandschutzbleche unterschiedliche Materialkombinationen aufweisen, kann das zu großen Abweichungen zwischen small-scale-Laborversuch und Freilandexposition führen.

Bisher liegen keine Forschungsarbeiten an hinterlüfteten Holzfassaden vor, welche die Wechselwirkungen der eingesetzten Baustoffe und mögliche Auswaschungen untersuchen. Die Notwendigkeit dazu zeigt jedoch [81], wo die Anreicherung von Bioziden in der Kanalisation kausal auf konkrete Stadtstrukturen (z.B. Altbausanierung, Neubau) in Berlin zurückverfolgt werden konnten.

Die unterschiedlichsten Entstehungsmechanismen von Korrosionserscheinungen an Metallen werden in [82] aufbereitet. Bereits hier wird auf sich verändernde Umweltbedingungen eingegangen. Demnach kann Metallkorrosion u.a. durch die Auswahl des richtigen Metalls, durch Schutzschichten (z.B. Anstriche) oder die Kontrolle des pH-Bereichs während des Einsatzes verhindert werden. In [83] wird gezeigt, dass auch moderne Holzschutzmittel beispielsweise eine Schutzschicht auf St37 Stahl bilden können.

Aus brandschutztechnischer Sicht sind Bleche an Holzfassaden je nach Gebäudehöhe gesetzlich vorgeschrieben [84]. In der Praxis zeigen sich jedoch teils deutliche Korrosionserscheinung an solchen Blechen [85].

In [86] wird gezeigt, dass auch eine chemische Holzmodifikation (z.B. acetylieren) zu einer zunehmenden Korrosionswirkungen führt. Neben der korrosiven Wirkung von auf oder ins Holz eingebrachter Chemikalien ist auch die korrosive Wirkung der holzeigenen Inhaltsstoffe in unterschiedlichen Anwendungssituationen bekannt. In [87] werden die Auswirkung von Eichenholzextrakt bei permanentem Kontakt mit unterschiedlichen Metalloberflächen untersucht. Die Autor*innen fanden unter diesen Bedingungen eine höhere Korrosionsbeständigkeit von Kohlenstoff-Stahl vs. Aluminium vs. Kupfer. Auch an unbehandelten Referenzen treten in Labor- und Feldtests Korrosionseffekte an Befestigungsmittel auf [88]. Die Autor*innen von [89] führen einen Teil des Verschleißes von Schneidwerkzeugen auf Korrosionsprozesse während der Holzbearbeitung zurück und demonstrierten dies im Fall von Eiche. Als ebenfalls ungewünschter Begleiteffekt von Korrosion an Metallen sind auch Farbänderungen an Holz, z.B. die Eisen-Gerbstoff-Reaktion der Tannine in Eichenholz bekannt [90].

Einen baupraktischen Überblick zum Stand der Technik für den Korrosionsschutz von Verbindungsmittel im Holzbau mit Stand 2013 bietet [91]. Die in der Praxis auftretenden Korrosionsschäden bei Holzfassaden werden durch den Stand der Technik jedoch bei weitem nicht erklärt, und es bestehen auch keine praxiskonformen Methoden zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit von Metallen bzw. für die Untersuchung gesamter Holzfassaden-Systeme.

Begutachtungen durch die HFA deuten darauf hin, dass die Korrosionserscheinungen verstärkt in Bereichen auftreten, in denen der Wasserablauf aus konstruktiven Gründen verstärkt ist, z.B. im Bereich von Fugen oder Nuten. Vielfach ist auch ein Zusammenhang mit Rissen oder Befestigungen zu erkennen, was den Zusammenhang der Korrosionserscheinungen mit einem vermehrten Anfall von Auswaschungen aus dem Holz nahelegt. Untersuchungen dazu sind nicht bekannt.

3 Methoden, Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden ausgewählte Arbeiten und Ergebnisse aus dem Projekt diskutiert. Für eine detaillierte Beschreibung der Projektinhalte wird auf die ausführlichen Berichte im Anhang verwiesen.

3.1 Sommerlicher Wärmeschutz

Die nachfolgende Diskussion zum sommerlichen Wärmeschutz mit Holzfassaden wurde in [92] publiziert. Für detaillierte Diskussionen und weitere Ergebnisse wird auf Anhang 1 und 2 verwiesen.

3.1.1 Hintergrund

Wie stark sich der Innenraum aufgrund des Wärmestroms durch die Außenwände erwärmt, hängt u.a. von der Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und Innenoberfläche der Wand ab. Durch eine Absenkung der Außenoberflächentemperatur kann, je nach U-Wert des Wandbildners, die Erwärmung des Raumes mehr oder weniger reduziert werden. Untersuchungen von [9] zeigen, dass der Wärmeeintrag in einen Wandbildner durch eine Hinterlüftung der Fassade um 82 % reduziert werden kann, was zu einem geringeren Wärmeeintrag in den Innenraum führt.

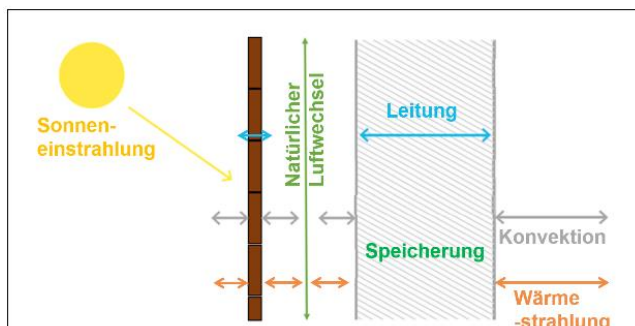
Die Temperatur im Belüftungsspalt einer hinterlüfteten Fassade wird primär von folgenden Faktoren bestimmt [7]:

- Strahlungsabsorption (Farbe) der Außenfläche
- Querschnitt des Belüftungsspalts
- Luftströmungsgeschwindigkeit im Belüftungsspalt

INFO

Prinzip Wärmeabfuhr im Hinterlüftungsspalt:

Hinterlüftete Holzfassaden bieten gegenüber Putzfassaden unter anderem den Vorteil, dass ein Teil der solar eingebrachten Wärme durch den natürlichen Luftaustausch in der Fassade (Windwirkung, thermischer Auftrieb) abgeführt werden kann.



Die Abbildung (geändert nach [8]) verdeutlicht die Wärmeübertragungsvorgänge an Außenwänden. Durch gezielte Beeinflussung des Wärmemanagements einer hinterlüfteten Holzfassade (z.B. des konvektiven Wärmeabtransports) kann somit der Wärmestrom in den Innenraum im Vergleich zu WDVS-Putzfassaden reduziert werden.

3.1.2 Varianten und Messungen

Im Projekt „Coole Hülle“ wurde der Einfluss der oben genannten Faktoren auf die Temperatur im Hinterlüftungsspalt – genauer gesagt auf die Oberflächentemperatur der Fassadenbahn im Hinterlüftungsspalt – messtechnisch untersucht.

Hierfür wurden am Forschungshaus der Holzforschung Austria verschiedene Fassadenvarianten auf einem einheitlichen Wandbildner (Holzrahmenbauweise, $U \approx 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) aufgebracht und konstruktiv wie auch farblich variiert (siehe Abbildung 9).

Die beiden Standardfassaden bestanden zum einen aus einer unbehandelten, vertikalen Nut- und Feder-Lärchenschalung mit 3 cm Traglattung und 3 cm Konterlattung (d. h. 3 cm ungestörter Hinterlüftungsspalt) und zum anderen aus einer horizontalen Rhombusleistenschalung aus Lärche mit 3 cm Traglattung und einer dunklen Fassadenbahn. Im Zentrum der Untersuchungen standen die Fassadenvariationen entsprechend Tabelle 3.



Abbildung 9: Forschungshaus der Holzforschung Austria mit den untersuchten Holzfassaden: Westfassade (giebelseitig; konstruktive Varianten) und Südfassade (Farbvariationen).

Tabelle 3: Wesentliche Variationen an den Fassaden.

Schalung	Hinterlüftungsspalt
- Orientierung (horizontal/ vertikal)	-Tiefe
- Spalt zwischen Schalungsbrettern	- Öffnung (hinter-/belüftete/ stehende Luftschicht)
- Farbe	

Zusätzlich zu den Temperaturen an verschiedenen Positionen im Bauteil und im Innenraum wurden relative Luftfeuchten und Luftströmungsgeschwindigkeiten im Hinterlüftungsspalt sowie diverse Wetterdaten am Forschungshaus erfasst. Nachfolgend wird primär die Temperatur an der Fassadenbahn diskutiert. Abbildung 10 zeigt die unterschiedlichen Messpositionen im Hinterlüftungsspalt von verschiedenen untersuchten Varianten.

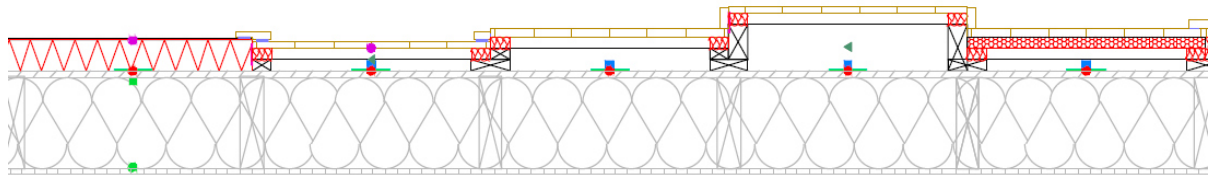


Abbildung 10: Horizontalschnitt durch Varianten mit Markierung der Messstellen (Farben und Formen sind Messstellencodes für Position und Sensortyp). Von links nach rechts: WDV, hinterlüftete Fassaden mit je 3 cm Traglattung sowie 3 cm, 6 cm und 12 cm Konterlattung. Rechts: Zusatzdämmung auf Fassadenschalung.

3.1.3 Auswirkungen auf Oberflächentemperaturen

INFO

Definition offene, geschlossene, hinterlüftete und belüftete Fassade sowie „stehende Luftschicht“:

Eine hinterlüftete Fassade besitzt einen oben und unten geöffneten Hinterlüftungsspalt. Bei einer belüfteten Fassade hingegen ist die obere Öffnung verschlossen. Beide Öffnungen sind bei einer Fassade mit stehender Luftschicht verschlossen.

Als geschlossene Fassade wird eine hinterlüftete Fassade bezeichnet, deren Schalungsbretter (oder Plattenmaterialien) keinen Spalt zwischen den einzelnen Brettern aufweisen. Entsprechend wird als offene Fassade eine hinterlüftete Fassade bezeichnet, deren Schalungsbretter auf Spalt verlegt sind (in unserem Fall eine Rhombusschalung).

Die folgenden Grafiken zeigen die Temperaturen an der Fassadenbahn an drei exemplarischen Sommertagen im August (wolkenlos, hohe Außentemperatur und Sonneneinstrahlung). Anhand von Abbildung 11 wird der Einfluss der Tiefe des Hinterlüftungsspalts bei geschlossenen Fassaden ersichtlich. Wie sich zeigt, führt ein aus versuchstechnischen Vergleichsgründen untersuchter dünner Spalt (1 cm Konterlattung → 1 cm Hinterlüftungsspalt) zu deutlich höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn als die Standardvariante mit einer 3 cm dicken Konterlattung. Eine weitere Erhöhung der Konterlattungsdicke auf 6 cm führt nur zu leicht geringeren Temperaturen. Eine weitere Verdopplung der Konterlattungsdicke auf 12 cm zeigt quasi keinen nennenswerten Effekt mehr. Ein Hinterlüftungsspalt mit 3 cm scheint demnach ein guter Kompromiss zwischen Platzbedarf und sommerlicher Wärmeabfuhr zu sein.

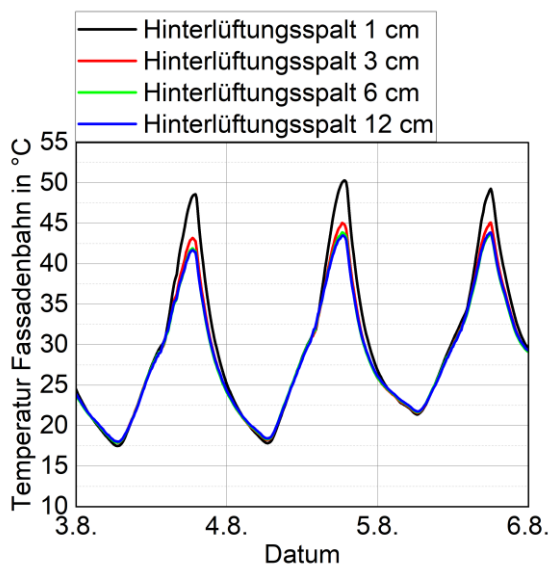


Abbildung 11: Einfluss der Tiefe des Hinterlüftungsspalts bei geschlossener Fassade.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass ein Lüftungsgitter mit einem geringen Lochanteil (nur 10 % anstelle von 50 %) an den Zu- und Abluftöffnungen zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt (+ 3,3 K). Ein Lochanteil von 50 % des Lüftungsgitters sollte deshalb nicht unterschritten werden. Zudem wurde deutlich, dass sowohl eine stehende Luftschicht als auch eine lediglich belüftete Fassade zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt als eine hinterlüftete Fassade (Abbildung 12). Neben der höheren feuchteschutztechnischen Robustheit sollte somit auch aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes wenn möglich eine hinterlüftete Fassade ausgeführt werden.

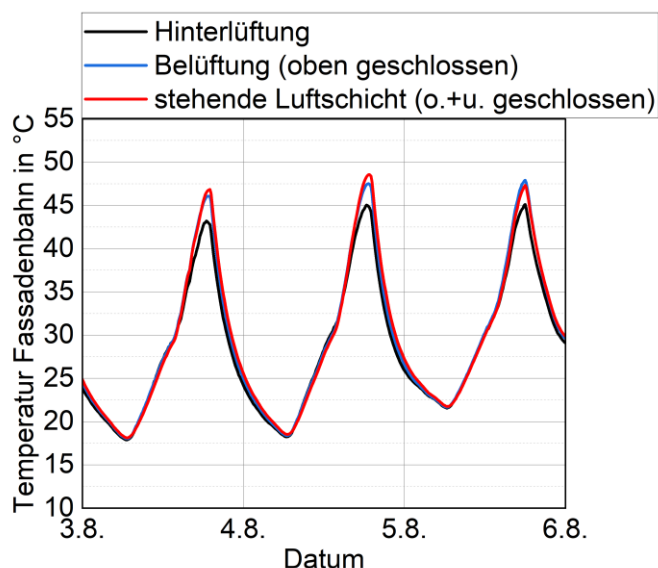


Abbildung 12: Einfluss der Ausführung der Hinterlüftungsebene (hinterlüftet/ belüftet/ stehende Luftschicht)

Wird die geschlossene Fassade in heller Farbgebung gehalten, werden reduzierte Temperaturen an der Fassadenbahn erreicht, während dunkle Farben zu deutlich erhöhten Temperaturen führen (Abbildung 13 links). Die Grafik zeigt ebenfalls, dass IR-reflektierende „coole Pigmente“ bei einem schwarzen Fassadenanstrich nur eine geringfügige Wirkung haben. Abbildung 13 rechts verdeutlicht den Einfluss der Farbgestaltung bei einer offenen Fassade. Auch hier ist zu erkennen, dass eine dunkle Farbgebung zu erhöhten Temperaturen führt, während helle Farben in etwas niedrigeren Temperaturen an der Fassadenbahn resultieren. Wird bei einer offenen Fassade eine weiße Fassadenbahn eingesetzt, beeinflusst diese die Temperaturen geringfügig positiv.

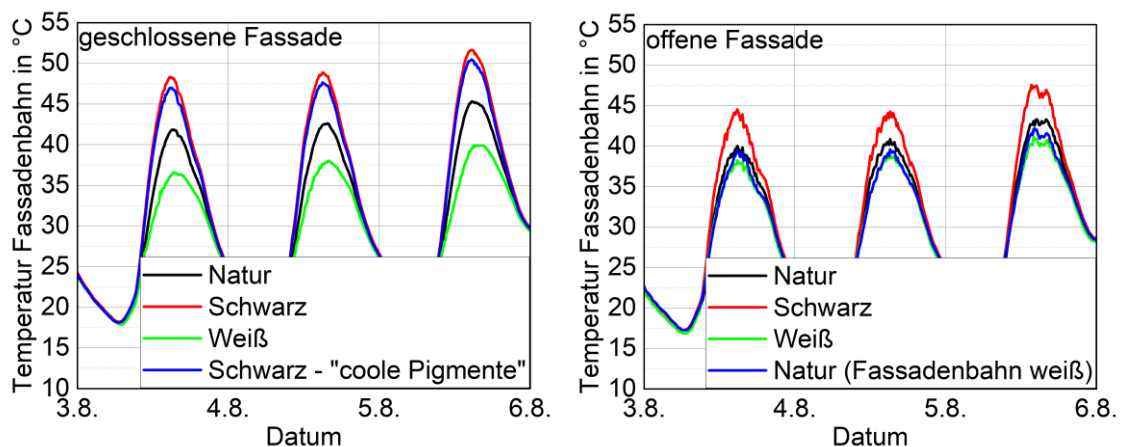


Abbildung 13 Einfluss der Fassadenfarbe, links: bei einer geschlossenen Lärchenfassade aus N+F-Bretter, rechts: bei einer offenen Lärchenfassade aus horizontalen Rhombusleisten (Spaltbreite 14 mm)

Vergleicht man beide Fassadenarten mit weißer Beschichtung miteinander (Abbildung 13 links + rechts), wird deutlich, dass bei einer geschlossenen Fassade geringere Temperaturen auf der Fassadenbahn erreicht werden als bei einer offenen, horizontalen Fassade. Dies resultiert aus der solaren Diffusstrahlung, welche bei einer offenen Fassade auf die (schwarze!) Fassadenbahn trifft.

Bei beiden Fassadenausführungen wird außerdem deutlich, dass eine schwarze Fassadenfarbe, im Vergleich zur naturfarbenen oder weißen Farbe, zu erhöhten Temperaturen an der Fassadenbahn führt. Bei einer geschlossenen Fassade ist dieser Effekt aufgrund des geringeren Luftaustauschs deutlich stärker ausgeprägt als bei einer offenen Fassade mit entsprechend höherem Luftaustausch. Daher sind vor allem bei dunklen Fassadenfarben aus Sicht des sommerlichen Wärmeschutzes offene horizontale Fassaden den geschlossenen Fassaden vorzuziehen.

Werden helle Fassadenbeschichtungen eingesetzt, macht es hingegen kaum einen Unterschied, ob eine geschlossene Fassade oder eine offene horizontale Fassade umgesetzt wird. Eine helle Fassadenfarbe hat stets einen positiven Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz.

Abbildung 14 verdeutlicht den Einfluss der Spaltbreite zwischen den horizontalen Rhombusleisten bei einer offenen Fassade. Die Temperaturspitzen im Tagesverlauf fallen umso höher aus, je größer der Spalt zwischen den Schalungsbrettern ausgeführt wurde. Der Grund dafür ist wiederum die Bilanz der auf die dunkle Fassadenbahn auftreffenden Diffusstrahlung, welche sich mit zunehmender Spaltbreite erhöht.

Die Grafik zeigt auch, dass eine senkrechte Ausführung der Rhombusleisten zu deutlich erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn führen kann. Unter einem bestimmten Sonnenwinkel trifft die Direktstrahlung im Tagesverlauf unmittelbar auf die dunkle Fassadenbahn auf, wodurch diese Temperaturspitzen hervorgerufen werden.

Wenn möglich sollten Rhombusprofile daher mit nach vorne und unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung und einer Spaltbreite zwischen den Brettern von ~7 mm (bei ~10 % Fugenanteil an der Gesamtfläche) umgesetzt werden. Zur Reduktion des sommerlichen Wärmeeintrags ist eine waagerechte Ausführung der offenen Fassaden günstiger als eine senkrechte Ausführung.

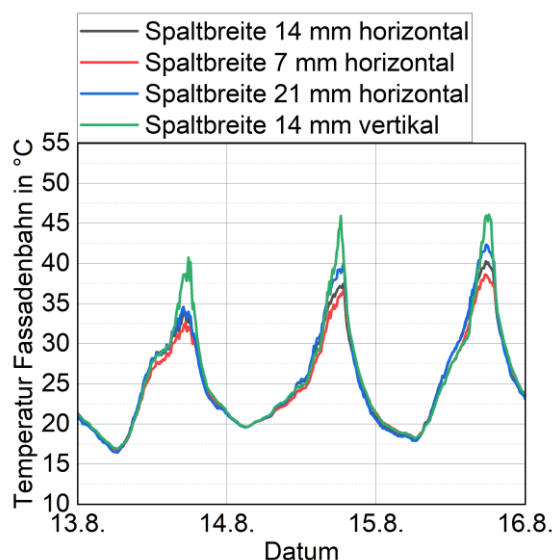


Abbildung 14: Einfluss der Spaltbreite zwischen den horizontalen Rhombusleisten und der Spaltorientierung

3.1.4 Einfluss Zusatzdämmung auf Fassadenschirm

Entsprechend den Schalluntersuchungen oben wurde auch bei den Untersuchungen im Forschungshaus ein Dämmstoff (Mineralfaser) im Hinterlüftungsspalt eingebracht. In diesem Fall direkt auf der Fassadenschalung. In Ergänzung dazu wurde auch der Effekt von Gipsplatten mit PCM (Phase Changing Materials) direkt auf der Fassadenschalung untersucht. Abbildung 15 zeigt, dass sowohl der Dämmstoff wie auch die Gipsplatten mit PCM auf der Schalung zu deutlich geringeren Temperaturspitzen auf der Fassadenbahn führen. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass der Dämmstoff sogar noch etwas effektiver ist, wenn dieser nicht auf der Fassadenschalung, sondern unter der

Fassadenbahn (auf der Außenbeplankung) angebracht wird. Aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Außenbeplankung wirkt der Dämmstoff unter der Fassadenbahn besser als eine Erhöhung der Dämmstoffdicke im Gefach. Die Variante mit PCM-Platten zeigt eine noch deutlichere Reduktion der Temperatur auf der Fassadenbahn. Derartige Platten sind derzeit für einen Einsatz im Freien nicht freigegeben und wohl auch noch etwas zu kostspielig.

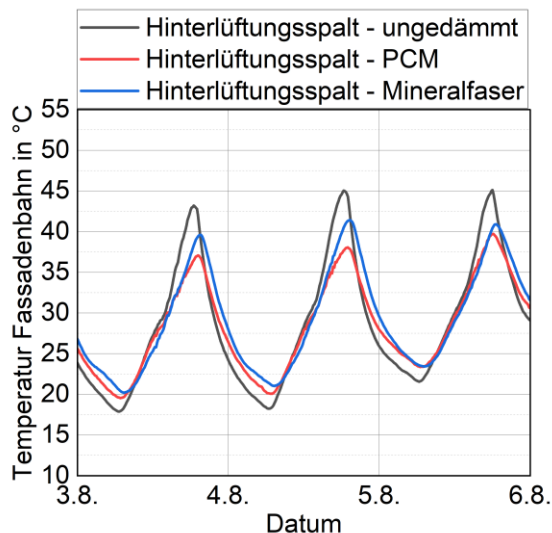


Abbildung 15: Einfluss von Dämmstoff (Mineralfaser) und Gipsplatten mit PCM (Phase Changing Materials) auf der Fassadenschalung im Hinterlüftungsspalt (3 cm Traglattung, 3 cm Konterlattung)

3.1.5 Untersuchungen zur Alterung von Holzoberflächen

Ergänzend zu den Temperaturmessungen wurden Untersuchungen zur Alterung (durch Freilandlagerung und Schnellbewitterung) unterschiedlicher Holzarten durchgeführt. Dabei ist bei allen untersuchten natürlichen Holzoberflächen ein deutlicher Anstieg der solaren Absorption festzustellen (Abbildung 16). Die Alterung von unbehandeltem Holz führt zu einem solaren Absorptionsgrad der im Bereich einer dunklen Oberfläche liegt (Messwert schwarze Fassadenbeschichtung: $a = 0,92$).

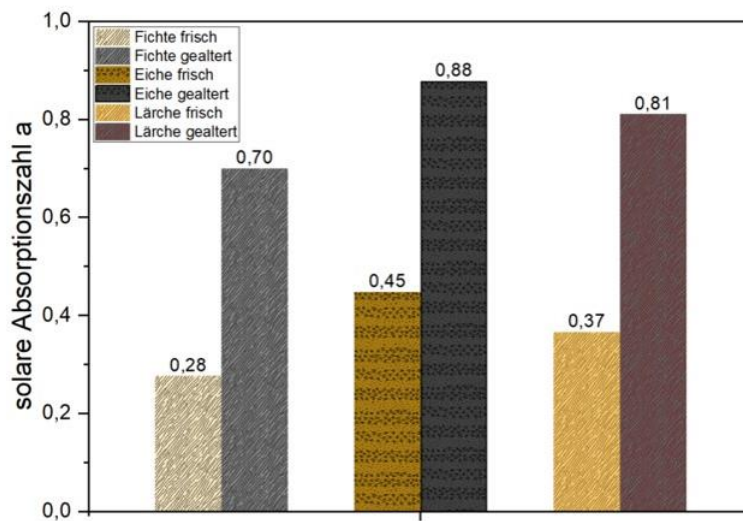


Abbildung 16: Solare Absorptionszahl a von frischen und gealterten Hölzern

3.1.6 Auswirkungen auf Wärmeströme

Mit Hilfe von vorab validierten hygrothermischen Simulationen wurde im Projekt ebenfalls untersucht, wie sich die Wärmeströme durch Außenwände mit unterschiedlichen Fassaden bei aktuellem Außenklima und bei einem für 2050 prognostizierten Außenklima (Klimaszenario gemäß RCP 8.5) für Wien entwickeln.

Abbildung 17 zeigt die sommerlichen und winterlichen Wärmeströme sowie die Gesamtbilanz über ein Jahr durch 1 m² einer Westwand (U-Wert = 0,15 W/m²K) mit einer geschlossenen hinterlüfteten Fassade und unterschiedlichen Außenbeschichtungen, jeweils für das Jahr 2023 und 2050. Zur Berechnung der Wärmeströme wurden die jeweiligen positiven Effekte (Winter: tagsüber Aufheizen; Sommer: nächtliche Abkühlung) mitberücksichtigt. Wie für das Jahr 2023 zu erkennen ist, kommt es durch eine weiße Fassadenbeschichtung im Sommer zu einem negativen Wärmeeintrag in den Raum. Das bedeutet, dass der Wärmeeintrag tagsüber geringer ausfällt als die Wärmeabgabe über Nacht. Die weiße Fassadenbeschichtung weist im Winter aufgrund der reduzierten solaren Erwärmung jedoch auch den höchsten Wärmeverlust auf. Bei einer schwarzen Fassade ist der sommerliche Wärmeeintrag hingegen ausgeprägter, dafür aber auch die winterlichen Wärmeverluste geringfügiger.

Werden nun die Gesamtbilanzen der weißen und schwarzen Fassade betrachtet, so zeigt sich, dass der Nettoenergiebedarf durch die schwarze Fassade etwas über jenem der weißen Fassade liegt. Die geringer ausfallenden Wärmeverluste der schwarzen Fassade während der Heizphase werden durch erhöhte Wärmeeinträge während der Kühlphase weitgehend aufgehoben. Die Daten verdeutlichen, dass bei einer schwarzen Fassade im Winter zwar etwas weniger geheizt werden muss, im Sommer dafür aber eher eine aktive Klimatisierung notwendig werden kann. Aufgrund der Klimaentwicklung wird 2050 die Wirksamkeit der nächtlichen Kühlung insbesondere in Städten deutlich abnehmen, sodass

die sommerlichen Nachteile einer schwarzen Fassade noch stärker und die winterlichen Vorteile in Summe noch weniger zum Tragen kommen.

Die Wärmeströme durch eine Fassade mit naturfarbener, ungealteter Lärche liegen in etwa zwischen jenen einer weißen und einer schwarzen Fassade. Bei einer vergrauten bzw. gealterten Holzoberfläche werden sich die Wärmeströme jedoch aufgrund des dadurch zunehmenden solaren Absorptionsgrades in Richtung der schwarzen Fassade orientieren.

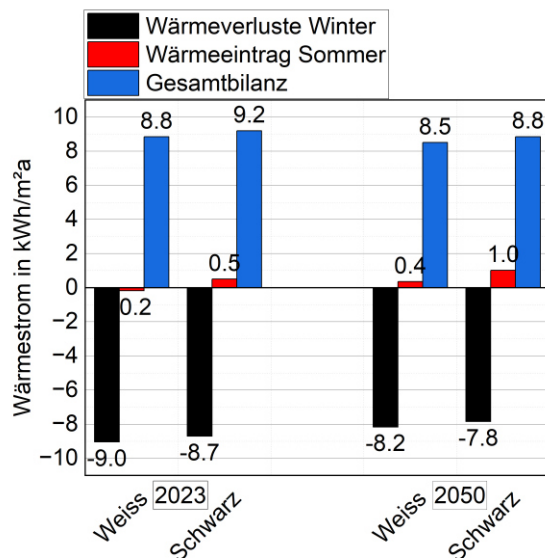


Abbildung 17: Wärmeströme durch eine 1 m²-Westwand (U-Wert = 0,15 W/m².K) mit weißer und schwarzer geschlossener, hinterlüfteter Fassade in den Jahren 2023 und 2050 in Wien.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der thermischen Fassadensimulation ist, dass bei ausreichendem Luftaustausch im Hinterlüftungsspalt die Wärmeübertragung von der Fassadenschalung auf die Fassadenbahn primär durch langwellige Wärmestrahlung stattfindet. Orientierende Simulationen haben aufgezeigt, dass durch eine Unterbindung dieses Wärmetransportvorgangs die sommerlichen Wärmeeinträge unabhängig von der Holzfassadenfarbe auf das Niveau einer weiß beschichteten Holzfassade reduziert werden könnten. Ein innovativer und praktisch umsetzbarer Einsatz von Materialien oder Oberflächenbeschichtungen mit sehr geringer langwelliger Wärmeemission auf der Schalungsinseite bzw. mit geringer langwelliger Strahlungsabsorption auf der Fassadenbahnseite könnte daher in Bezug auf den sommerlichen Wärmeeintrag zu optimalen Ergebnissen führen.

3.1.7 Handlungsempfehlungen - Wärmeschutz

Aus den thermischen Untersuchungen können entsprechend den gezeigten Ergebnissen folgende praxisrelevante Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Geschlossene Fassaden mit einer Hinterlüftung, nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausführen

- Hinterlüftungsspalt von mind. 3 cm an der engsten Stelle einplanen
- Zu- und Abluftöffnungen mit freiem Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm – ggf. anpassen an Lochanteil des Lüftungsgitters (mind. 50 % Lochanteil)
- Helle Beschichtungen erwärmen die Fassaden weniger
- Unbehandeltes vergrautes Holz erwärmt sich ähnlich stark wie eine dunkel beschichtete Oberfläche. Wenn möglich, sollte bei unbehandeltem Holz eine offene Fassade gewählt werden
- Fassadenbahn bei offenen Fassaden möglichst beschatten, z.B. durch horizontale Rhombusprofile mit einer maximalen Fugenbreite von 7 mm -10 mm

3.2 Schallschutz

Die nachfolgender Diskussionen zum Schallschutz mit Holzfassaden wurde in [93] (Messungen) und in [94] (Simulationen) publiziert. Für detaillierte Diskussionen und weitere Ergebnisse wird auf Anhang 3 und 4 verwiesen.

3.2.1 Messungen

3.2.1.1 Im Versuchsstand untersuchte Bauteile

Zur Ermittlung des bauakustischen Einflusses von Holzfassaden wurden primär folgende zwei Fassadenarten untersucht:

- Geschlossene Fassade
(19 mm Lärche, Nut + Feder, vertikal, 30 mm Traglattung, 30 mm Konterlattung
→ 30 mm freier Hinterlüftungsspalt)
- Offene Fassade
(21 mm Lärche Rhombusleisten, horizontal, 14 mm Fugen, 30 mm Traglattung)

Die verschiedenen Fassaden wurden jeweils auf eine Holzrahmenwand und eine BSP-Wand aufgebracht. Tabelle 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Grundwände ohne Fassade. Da der Fokus auf den Fassadensystemen lag, wurden auf der Innenseite der Grundwände keine weiteren Schichten wie Gipskartonbeplankungen, Installationsebenen oder Vorsatzschalen aufgebracht. Die Schalldämm-Maße der untersuchten Wandvarianten werden beim Anbringen weiterer innenseitiger Schichten – vor allem bei den Holzrahmenwänden – somit höher ausfallen als nachfolgend gezeigt. In [95] und [53] kann nachgelesen werden, wie sich die einzelnen Schichten bei Außenwänden bauakustisch auswirken.

Tabelle 4: Eingesetzte Grundwände zur bauakustischen Untersuchung der Fassadenvarianten

	A
	B
	C
	D
A: 16 mm MDF (außen)	A: Fassadenbahn
B: (240 x 60) mm ² Steher (e = 625 mm)	B: (200 x 60) mm ² Steher (e = 625 mm)
C: 240 mm Mineralwolle	C: 200 mm Mineralwolle
D: 15 mm OSB	D: 100 mm BSP 3-lagig

3.2.1.2 Einfluss der Fassadenart

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Schalldämm-Maße der verschiedenen Wandvarianten. In den Legenden sind jeweils auch die zugehörigen Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ dargestellt. Alle Messungen wurden in den beiden Wandprüfständen des Akustik Center Austria entsprechend EN ISO 10140-2 [96] durchgeführt. Bei allen nachfolgenden Varianten waren die Zu- und Abluftöffnung des Hinterlüftungsspalts offen.

Anmerkung: Vergleichsmessungen zwischen den beiden Wandprüfständen im Akustik Center Austria zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Dennoch kann es vorkommen, dass sich die nachfolgend aufgeführten Einzahlkennwerte der nominell selben Wände geringfügig unterscheiden.

Anhand von Abbildung 18 wird der Einfluss der Fassadenart auf die Schalldämmung einer Holzrahmen- bzw. einer BSP-Wand ersichtlich. Wie sich zeigt, führt eine geschlossene Fassade im Frequenzbereich > 500 Hz bei beiden Wänden zu höheren Schalldämm-Maßen als eine offene Fassade. Dabei sind die Unterschiede bei der Holzrahmenwand deutlich stärker ausgeprägt als bei der BSP-Wand. Im Frequenzbereich unter 500 Hz werden mit der offenen Fassade in einigen Terzen hingegen bessere Schalldämm-Maße erreicht als mit der geschlossenen Fassade. Der Grund hierfür dürfte in den unterschiedlichen Eigenfrequenzen der Fassaden liegen, worauf Schwingungsmessungen mittels Laser-Doppler-Vibrometer hindeuten.

Wie die Legende der linken Grafik in Abbildung 18 zeigt, wurde mit der offenen Fassade auf einer Holzrahmenwand ein R_w -Wert von lediglich 38 dB erreicht. Um damit beispielsweise die österreichische Mindestanforderung von $R_w = 43$ dB zu erreichen sind innenseitig jedenfalls Zusatzmaßnahmen notwendig (z. B. eine 60 mm Lattung mit 2 x 12,5 mm GKF

oder besser Federschienen mit 2 x 18 mm GKF, vgl. [95]). Auch bei der geschlossenen Fassade auf der Holzrahmenwand sollte innenseitig zumindest noch eine, besser zwei Lagen GKF aufgebracht werden. Die BSP-Wände schneiden bei beiden Fassadenarten deutlich besser ab, wobei die offene Fassade tieffrequent Vorteile mit sich bringt, was auch die $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ Werte in der Legende der rechten Grafik verdeutlichen. Anzumerken ist hierbei, dass bei den BSP-Wänden auf der Dämmebene lediglich eine Fassadenbahn aufgebracht war. Wird auf der Dämmebene eine MDF oder ein anderer Plattenwerkstoff aufgebracht, ändert sich auch das bauakustische Verhalten der Wand. Die Daten der BSP-Wände sind somit nicht 1:1 auf Varianten mit Plattenwerkstoffen im Hinterlüftungsspalt übertragbar.

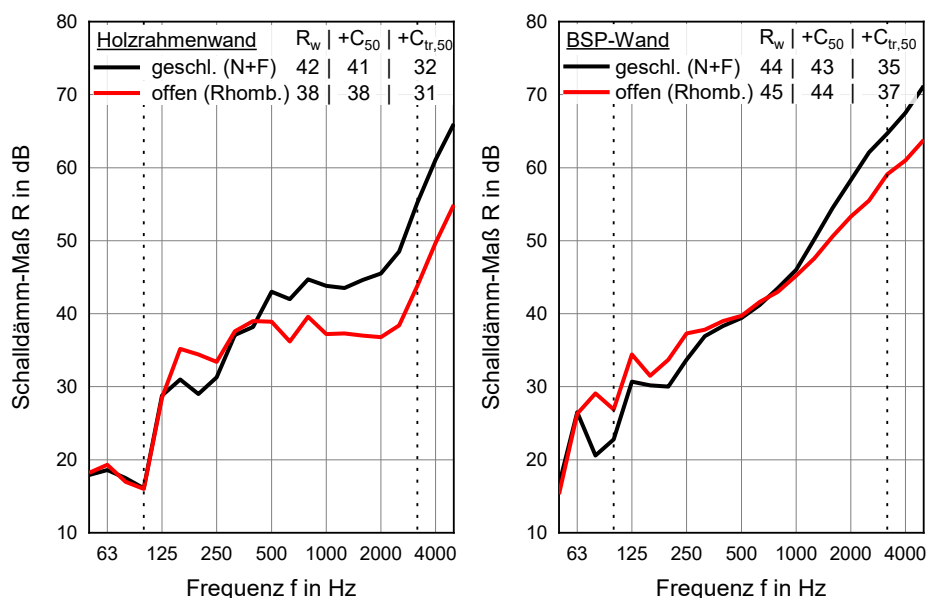


Abbildung 18: Einfluss der Fassadenart, geschl. (N+F): geschlossene Fassade mit Nut+Feder-Bretter; offen (Rhomb.): offene Fassade mit Rhombusleisten Links: Holzrahmenwand, Rechts: BSP-Wand; Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in den Legenden

3.2.1.3 Einfluss Verschraubung

Wird die Unterkonstruktion der Fassade stark an die Grundwand gepresst, so führt dies zu einer deutlichen Körperschallübertragung im mittel- und hochfrequenten Bereich und somit zu einer reduzierten Schalldämmung der Wand. Durch die Verwendung von Vollgewindeschrauben anstelle von Teilgewindeschrauben wird ein zu hoher Anpressdruck an die Grundwand verhindert, was der Schalldämmung zugutekommt. Vor allem bei der offenen horizontalen Fassade mit direkt auf der Grundwand verschraubter Traglattung haben sich hier Vorteile gezeigt, wie Abbildung 19 am Beispiel der BSP-Wand verdeutlicht. Bei der geschlossenen vertikalen Fassade mit besser entkoppelter Kreuzlattung war der Einfluss der Verschraubung geringer ausgeprägt.

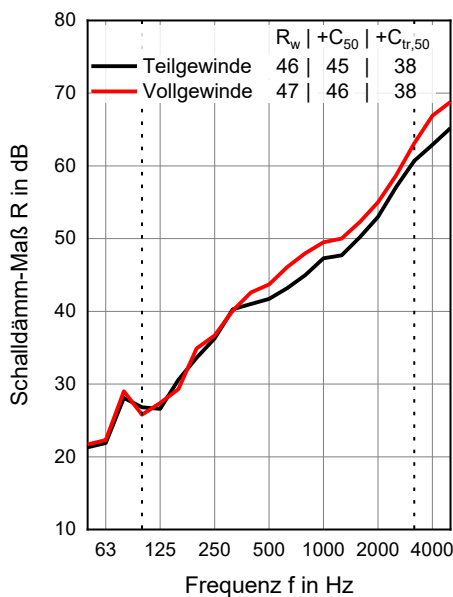


Abbildung 19: Einfluss der Verschraubung der Traglattung bei der offenen vertikalen Fassade auf der BSP-Wand, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in der Legende

Neben der Verschraubung mit der Grundwand hat bei einer Kreuzlattung auch die Lage und Verschraubung der Traglattung einen Einfluss auf die Schalldämmung der Außenwand. Wird die Traglattung nicht neben, sondern zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung angebracht, so erhöht sich die Schalldämmung der Außenwand im mittleren Frequenzbereich um bis zu 4 dB, der R_w -Wert verbesserte sich dadurch um 1 dB. Wichtig (!) ist hierbei jedoch, dass die Traglattung nur mit der Konterlattung verschraubt wird und nicht mit der Grundwand, da sich ansonsten die Anzahl der Schallbrücken zur Grundwand erhöht. Abbildung 20 zeigt, wie solche zusätzlichen Schallbrücken die Schalldämmung der Wand zwischen 250 Hz und 2000 Hz deutlich verschlechtern. Kann nicht sichergestellt werden, dass die Traglattung lediglich in der Konterlattung verankert wird (und diese Verschraubung statisch ausreicht → ggf. dickere Konterlattung wählen), sollte die Traglattung möglichst direkt neben den Verschraubungspunkten der Konterlattung platziert werden. Generell gilt aus bauakustischer Sicht, je weniger Verschraubungen der Fassade mit der Grundwand desto besser.

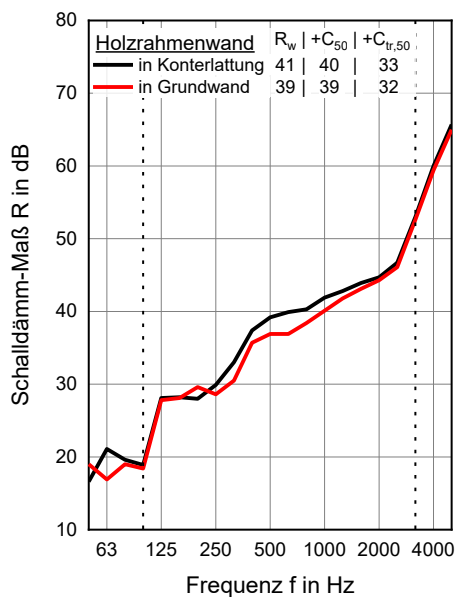


Abbildung 20: Einfluss der Verschraubungstiefe der horizontalen Traglattung (Traglattung zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung) bei geschlossener Fassade (vgl. Abbildung 22 rechts)

3.2.1.4 Einfluss Lattungsebene

Die Orientierung der Fassadenschalung bestimmt im Allgemeinen ob die Unterkonstruktion aus einer einfachen (nur Traglattung) oder einer doppelten Lattungsebene (Kreuzlattung) besteht. Eine Kreuzlattung hat dabei – ähnlich zum oben gezeigten Einfluss der Schraubenart – den bauakustischen Vorteil, dass die Kopplung zwischen der Fassadenschalung und der Grundwand verringert wird. Abbildung 21 zeigt, wie sich die Schalldämmung ändert, wenn eine geschlossene Fassade mit einer Kreuzlattung anstelle einer reinen – auf die Steher geschraubten – Traglattung ausgeführt wird. Sowohl bei der Holzrahmen- wie auch bei der BSP-Wand zeigen sich durch die verbesserte Entkopplung mit der Kreuzlattung höhere Schalldämm-Maße im mittel- und hochfrequenten Bereich. Während bei der BSP-Wand eine Kreuzlattung auch im tiefen Frequenzbereich zu höheren Schalldämm-Maßen führt, zeigen sich bei der Holzrahmenwand mit einer Kreuzlattung geringere Schalldämm-Maße im tiefen Frequenzbereich (vgl. auch Abbildung 33 in Anhang 3). Der Grund hierfür kann noch nicht eindeutig benannt werden.

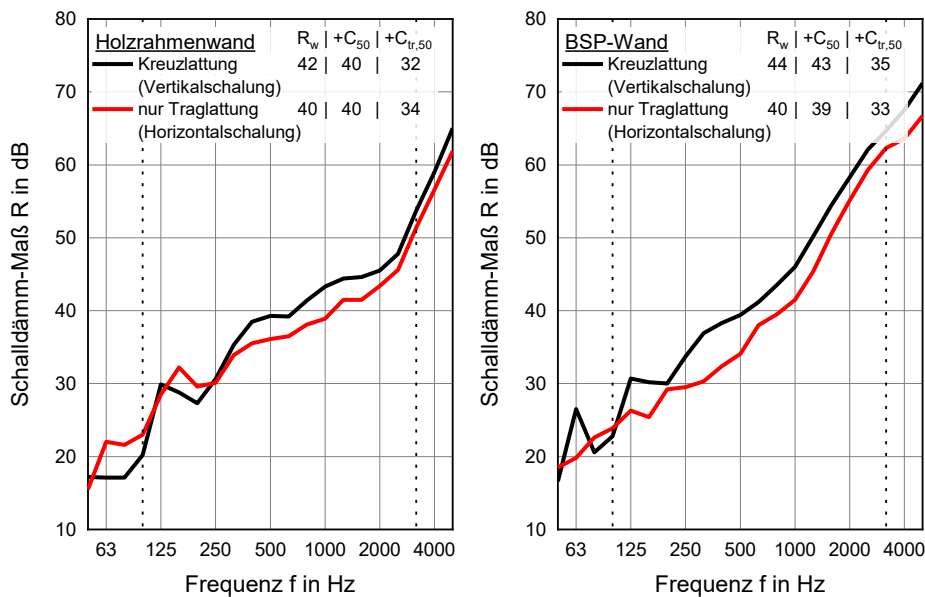


Abbildung 21: Einfluss der Variation der Unterkonstruktion bei geschlossener Fassade, links: Holzrahmenwand, rechts: BSP-Wand, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in der Legende

3.2.1.5 Resümee Unterkonstruktion

Wie sich gezeigt hat, wird die Schalldämmung einer Wand mit Holzfassade deutlich von der Ausführung der Fassadenunterkonstruktion beeinflusst. Um die Körperschallübertragung zwischen Fassade und Grundwand vor allem im mittel- und hochfrequenten Bereich zu reduzieren, kann eine Kreuzlattung ausgeführt werden, wobei die Traglattung jeweils zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung anzuordnen ist. Bei der Holzrahmenwand wurde die tieffrequente Schalldämmung durch die Kreuzlattung jedoch teils deutlich geduziert. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden. Generell ist auf die Verwendung der richtigen Schrauben(längen) bei der Befestigung der Unterkonstruktion zu achten. Abbildung 22 verdeutlicht nochmals zusammenfassend die genannten Konstruktionsempfehlungen.

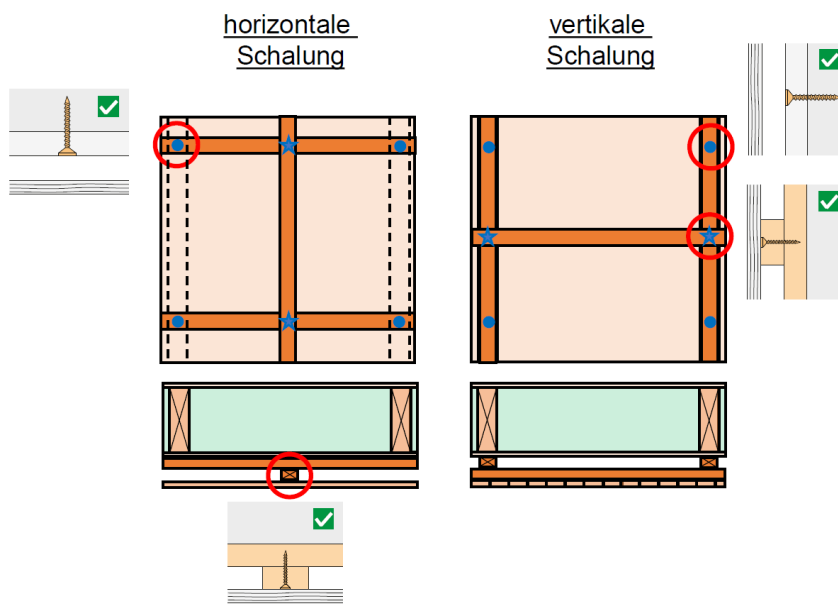


Abbildung 22: Konstruktionsempfehlungen zur Reduktion der Körperschallübertragung von der Fassade zur Grundwand • ggf. Kreuzlattung ausführen • Vollgewindeschrauben zur Verankerung der Konterlattung verwenden • Traglattung stets zwischen Verschraubungspunkten der Konterlattung anordnen • Traglattung nur in Konterlattung verankern (auf Statik achten, ggf. dickere Konterlattung wählen)

3.2.1.6 Optimierungsmaßnahmen

Im Forschungsprojekt wurden auch verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Schalldämmung von Holzfassaden untersucht. Eine Methode, welche sowohl akustisch wie auch thermisch zu einer Verbesserung der Fassaden führte, war die Teildämmung der Trag- bzw. Konterlattungsebene. Hierfür wurde Mineralwolle so zwischen den Latten der Unterkonstruktion eingebracht, dass ein freier Lüftungsspalt von 30 mm Höhe erhalten blieb. Abbildung 23 zeigt eine schematische Darstellung der mit Mineralwolle teildämmten Konterlattungsebene.

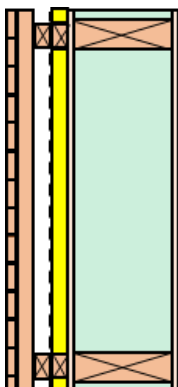


Abbildung 23: Darstellung der teildämmten Konterlattungsebene mit zweigeteilter Konterlattung und durchgehender Fassadenbahn (vgl. Abbildung 22 rechts)

Sowohl bei einer offenen als auch einer geschlossenen Fassade wurde durch eine Teildämmung der Lattungsebene die Schalldämmung erhöht. Dabei war die Verbesserung

bei der offenen Fassade deutlicher ausgeprägt als bei der geschlossenen Fassade. Abbildung 24 zeigt die Schalldämm-Maße der beiden Fassadenvarianten auf einer Holzrahmenwand, zum einen mit ungedämmter 60 mm tiefer Trag- bzw. Konterlattungsebene und zum anderen mit 30 mm dicker Mineralwolle zwischen den Trag- bzw. Konterlatten. Wie zu erkennen ist, führt die Dämmung in der Unterkonstruktion bei der offenen Fassade im Frequenzbereich ≥ 500 Hz zu einem deutlichen Anstieg der Schalldämmung. Das zeigt sich ebenfalls in der Zunahme des R_w -Wertes um 4 dB. Bei der geschlossenen Fassade ist die Zunahme der Schalldämmung weniger deutlich, wobei hier eine Verbesserung bereits ab 125 Hz festzustellen ist. Nachdem die Trag- bzw. Konterlattung mit 120 mm ausgeführt und mit 90 mm Mineralwolle gedämmt wurde, konnte die Schalldämmung der offenen Fassade von $R_w = 40$ dB sogar auf $R_w = 45$ dB gesteigert werden. Bei der geschlossenen Fassade trat mit dieser Maßnahme eine Verbesserung von $R_w = 43$ dB auf $R_w = 46$ dB ein.

Soll eine teilgedämmte Lattungsebene umgesetzt werden, so ist eine Fassadenbahn auf dem Dämmstoff anzuordnen. Hier kann es sinnvoll sein, die Lattung über die Dicke zweiteilig auszuführen und so eine vollflächige Verlegung der Fassadenbahn auf der Teildämmung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 23).

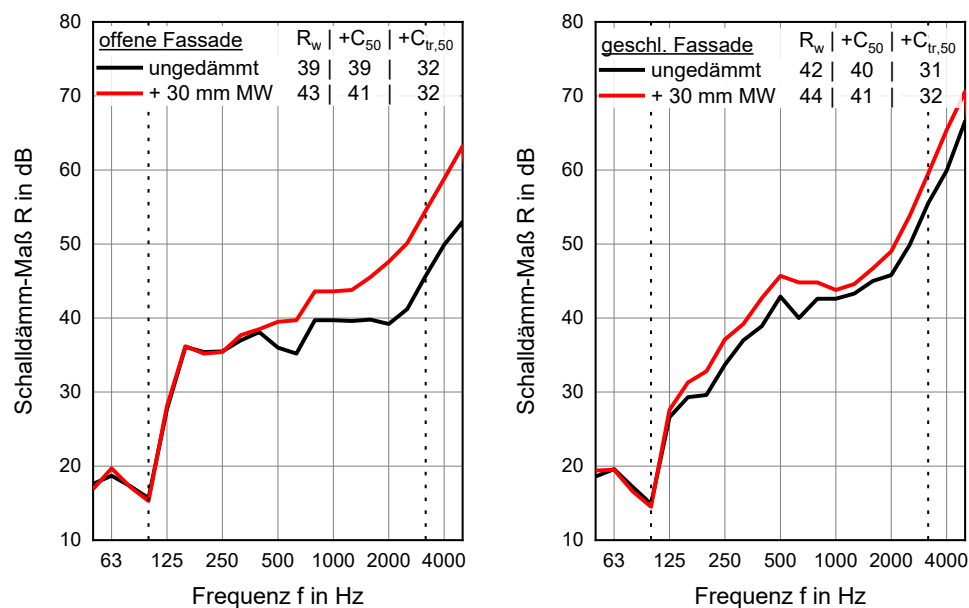


Abbildung 24: Einfluss einer 30 mm dicken Mineralwollendämmung (MW) zwischen den 60 mm tiefen Trag- bzw. Konterlatten (offene horizontale bzw. geschlossene vertikale Fassade) jeweils auf einer Holzrahmenwand, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in den Legenden

3.2.1.7 Handlungsempfehlungen - Schallschutz

Aus den bauakustischen Untersuchungen können entsprechend den gezeigten Daten folgende praxisrelevante Erkenntnisse bzgl. Schallschutz abgeleitet werden:

- Geschlossene hinterlüftete Fassaden zeigen bei Holzrahmenwänden höhere Schalldämm-Maße als offene Fassaden.
- Fassaden zur Erhöhung der mittel- und hochfrequenten Schalldämmung mit Kreuzlattung anstelle einer reinen Traglattung ausgeführt werden. Achtung bei Anforderungen im tiefen Frequenzbereich, hier sind vor allem bei Holzrahmenwänden Verschlechterungen durch die Kreuzlattung möglich.
- Traglattung besser zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung platzieren und nur in die Konterlattung schrauben (d. h. nicht bis in die Beplankung/den Steher schrauben, auf Statik achten, ggf. ist eine dickere Konterlattung notwendig).
- (Konter-)Lattungen sollten mit Vollgewindeschrauben anstelle von Teilgewindeschrauben am tragenden Wandbildner befestigt werden.
- Eine Teildämmung der Unterkonstruktion kann die Schalldämmung der Wand deutlich erhöhen (Achtung, ausreichender Belüftungsspalt muss verbleiben).

3.2.2 Simulationen

Nachfolgend werden die Arbeiten zum Simulationsmodell für Bauteile in Fenstergröße (1,8 m²) aufgeführt, für jene in Wandgröße (10,8 m²) wird auf Anhang 4 verwiesen.

3.2.2.1 Einleitung

Die frequenzabhängige Prognose der Schalldämmung von komplexen und inhomogenen Bauteilkonstruktionen ist ein häufiges Forschungsthema in der Bauphysik. Aus planerischer Sicht können Holzrahmenwände derzeit nur aufgrund erfolgter Schallmessungen oder Abschätzungen mit hohen Unsicherheiten bauakustisch geplant werden. Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es bereits, für die Planungspraxis allerdings zu aufwendige, Methoden, um frequenzabhängige Prognosen des Schalldämm-Maßes solcher Bauteile zu erstellen. Eine davon ist die Finite Elemente Methode (FEM) (z. B.: [62]).

Unterschiedliche Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass mittels FEM valide Prognosen der Luftschalldämmung von Wänden in Holzbauweise möglich sind (vgl. [72]). In [73] wird für reine Wandbildner eine Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen von $\Delta R \leq \pm 3$ dB erreicht. Wichtige Einflussfaktoren bei der Modellierung der Schalltransmission durch Holzleichtbauwände sind nach [72] beispielsweise:

- Materialeigenschaften (dynamisches E-Modul, Innerer Verlustfaktor, Querkontraktionszahl, Dichte, Strömungswiderstand, Porosität)
- Geometrie (Bauteilabmessungen, Schichtdicken, Verbindungsmittelabstände)
- Verbindungsmittel (Steifigkeiten, Position, Anzugsmoment)
- Verbindung zwischen Bauteil und Prüfstand

Die Erkenntnisse von [73] dienten als Grundlage für die Modellierung des in dieser Arbeit vorgestellten Modells. Der Fokus des Modells lag auf der Ermittlung der Materialeigenschaften, um ein bestmögliches Simulationsergebnis zu erzielen. Die untersuchte Wand hatte eine Größe von 1230 × 1480 mm und war wie in Tabelle 5 angeführt, aufgebaut:

Tabelle 5: Aufbau der untersuchten Holzrahmenwand in der Fensteröffnung (Prüffläche = 1,8 m²). a...Schraubenabstand; e...Achsabstand

Dicke	Material
16,0 mm	MDF, geschraubt mit a = 50 mm
240,0 mm	Steher (60 × 240) mm², e = 600 mm
240,0 mm	Dämmung (MW)
15,0 mm	OSB, geschraubt mit a = 50 mm
271,0 mm	Gesamtdicke

Neben der Modellierung wurde die beschriebene Wand auch messtechnisch untersucht. Das Schalldämm-Maß wurde im Prüfstand des Akustik Center Austria nach ÖNORM EN ISO 10140-2:2021 gemessen. Die dazugehörigen Einzahlwerte wurden nach EN ISO 717-1:2020 bestimmt.

Anhand des Simulationsmodells werden nachfolgend Parameterstudien zur Netzauflösung, zum Strömungswiderstand der Gefachdämmung, zu dynamischen E-Moduli und flächenbezogenen Massen der Beplankungen diskutiert. Abschließend wird das prognostizierte Schalldämm-Maß des validierten Simulationsmodells der Messung gegenübergestellt.

3.2.2.2 Simulationsmodell

Die Grundlagen des Simulationsmodells, insbesondere die zu [72] abweichenden Modellierungsansätze, werden nachfolgend beschrieben. Die Modellierung und Simulation erfolgte mit der Software „COMSOL Multiphysics 6.1“. Für weitere, hier nicht näher behandelte, Details zu den Modellierungsansätzen wird auf [72] verwiesen. Die Geometrie des Modells ist in Abbildung 25 zu sehen.

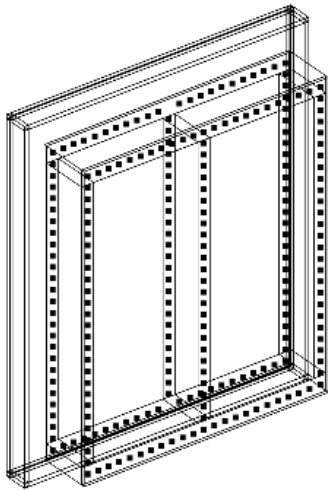


Abbildung 25: Geometrie der simulierten Holzrahmenwand innerhalb der Simulationsumgebung von „COMSOL Multiphysics 6.1“.

3.2.2.3 Schalldämm-Maß

Das Schalldämm-Maß R (oder Schalltransmissionsverlust) einer Wand ist wie folgt definiert:

$$R = \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (1)$$

Der Schalltransmissionsgrad τ ist das Verhältnis aus der durch das Schallfeld in einem Senderaum resultierenden auf die Wand einfallenden Schallintensität I_i und der von der Wand in einen Empfangsraum abgestrahlten Schallintensität I_e .

$$\tau = \frac{Re(I_i)}{Re(I_e)} \quad (2)$$

Diese Definition stellt insbesondere die numerische Simulation vor größere Herausforderungen, da neben der eigentlichen Struktur des zu untersuchenden Bauteils, auch Sende- und Empfangsraum und deren akustischen Oberflächeneigenschaften zu berücksichtigen sind. Ebenso ist in der Regel das gemessene Schalldämmmaß nach ÖNORM EN ISO 10140-2:2021 gerade bei tiefen Frequenzen von der Lautsprecherposition und des resultierenden modalen Schallfeldes abhängig. Die Grenzfrequenz für den ca. 50 m³ großen Empfangsraum liegt nach [97] bei ca. 270 Hz. Für eine möglichst fehlerfreie Abbildung der Messsituation sind daher der Senderaum und dessen Eigenschaften ganzheitlich innerhalb der Simulation abzubilden. Dadurch sind in Relation zu den interessierenden BiegeWellenlängen sehr große Domänen zu diskretisieren, wodurch ein hoher Berechnungsaufwand entsteht.

In dieser Arbeit werden das nicht diffuse Schallfeld im tiefen Frequenzbereich sowie der Einfluss des Raumes und der Lautsprecherposition nicht berücksichtigt. Das auf das Bauteil einfallende Schallfeld im Senderaum wird als homogenes, isotropes und diffuses Schallfeld beschrieben. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, dass das diffuse Schallfeld auf der Senderaumseite des Bauteils als Summe von N unkorrelierten ebenen Wellen mit gleichförmig zufällig verteilten Einfallswinkeln φ_n , θ_n beschrieben werden kann. Die

Druckverteilung $p_{Raum}(x, y, z)$, als Grundbedingung in der FEM Simulation, kann also wie folgt berechnet werden:

$$p_{Bauteil} = p_{Raum} + p_{Reflexion} \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass das Bauteil selbst schallhart ist, kann die reflektierende Komponente des Schalldruckfeldes am Bauteil wie folgt berechnet werden:

$$p_{Reflexion} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{-i(k_{n,x}x + k_{n,y}y + k_{n,z}z)} e^{i\phi_n} \quad (4)$$

mit

$$k_{n,x} = \cos(\theta_n) \quad (5)$$

$$k_{n,y} = \sin(\theta_n) \cos(\varphi_n) \quad (6)$$

$$k_{n,z} = \sin(\theta_n) \sin(\varphi_n) \quad (7)$$

Die Oberflächen des Empfangsraums werden dabei absorbierend modelliert, was bedeutet, dass keine Rückkopplung zwischen Bauteil und dem sich ausbildenden Schallfeld im Empfangsraum besteht. Damit wird der Empfangsraum als unendlicher Halbraum modelliert. Innerhalb der FEM-Umgebung erfolgt dies als Luftvolumen, das mittels PML („Perfect Matched Layer“) eingefasst ist. Dieser Rand kann als absorbierende Randbedingung für die Luftdomäne angesehen werden. Es findet somit keine Reflexion des vom Bauteil abgestrahlten Schallfeldes an dem Rand des Luftvolumens statt. Zur Implementierung in die FEM und der mathematischen Beschreibung der Eigenschaften des PML wird auf [98] verwiesen.

Die Diskretisierung der Raumvolumina auf der Sende- und der Empfangsraumseite wird somit fast bis zur Gänze eingespart. Abbildung 26 zeigt eine schematische Darstellung der Situation, die innerhalb der FEM-Umgebung abgebildet wurde.

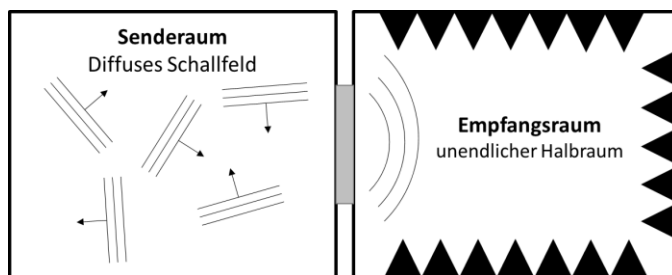


Abbildung 26: Schematische Darstellung der innerhalb der FEM-Umgebung modellierten Schallfelder in Sende- und Empfangsraum.

3.2.2.4 Struktur

Für das strukturelle System wird die Struktur durch die Differentialgleichung der Bewegung für einen Kontinuumskörper beschrieben, wobei kleine Deformationen angenommen werden. Ausgehend von der Navier-Gleichung im Equilibrium kann nach [98] die

Bewegungsgleichung mithilfe des Differenzialoperators B wie folgt in Matrizen Schreibweise dargestellt werden.

$$f_V + B^T \sigma = \rho a \quad (8)$$

mit

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Wobei σ den Spannungstensor nach Cauchy, a die Beschleunigung des Festkörpers und f_V die Summe der äußeren Kräfte darstellt. Die Modellierung des strukturellen Materialverhaltens beruht auf der Annahme, dass die Werkstoffe sich linear elastisch und isotrop verhalten. Für solche Materialien lässt sich der Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen über das Hooksche Gesetz definieren. Die berücksichtigte innere Dämpfung des Materials wird über ein komplexes E-Modul beschrieben. Dieses Modell entspricht einer Strukturdämpfung mittels isotropen Verlustfaktors η . Dabei kann das komplexe E-Modul E des Materials wie folgt beschrieben werden:

$$E = E(1 + i\eta) \quad (13)$$

3.2.2.5 Kopplung Fluid – Struktur

Grundlegend erfolgt die Kopplung von Struktur und Fluid an der gemeinsamen Grenze ihrer beiden Domänen durch ein vorausgesetztes Kräftegleichgewicht und einer Kontinuitätsbedingung. Die erste Bedingung zur Kopplung von Fluid und Struktur folgt aus dem bedingten Gleichgewicht zwischen Schalldruck p_f des Fluids und der Normalkomponente σ_n der mechanischen Spannungen der Wand an der Grenzfläche.

$$\sigma_n = -np_f \quad (14)$$

Die zweite Bedingung folgt aus der Anforderung der Kontinuität an der Grenze zwischen Struktur und Fluid und bedingt, dass die Normalkomponenten der Geschwindigkeiten der Strukturoberfläche v und die der des Fluids v_f an der Grenzschicht gleich groß sind und kann wie folgt dargestellt werden (vgl. [98]):

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} v_f = -\nabla \psi \quad (15)$$

$$n \cdot (v - v') = 0 \quad (16)$$

$$n \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -n \cdot \nabla \psi \quad (17)$$

3.2.2.6 Dämmstoff

In [72] wurden unterschiedliche Modelle zur Modellierung der Schallübertragung im Ständerzwischenraum untersucht. Eine Modellierung der Schallübertragung über den Hohlraum dieser Konstruktion bedarf somit einer geeigneten Modellierung der Schalltransmission und des akustischen Verhaltens solcher Dämmstoffe. Aufgrund der feingliedrigen Struktur dieser Materialien ist es in der Regel nicht möglich, diese Strukturen und die Wechselwirkung zwischen Luft und Fasern in der FEM aufzulösen. Eine Möglichkeit das Verhalten solcher Materialien in Simulationsmodellen abzubilden, ist die Darstellung als äquivalentes Fluid dessen Eigenschaften durch das Fluid in der porösen Struktur und durch die der porösen Struktur selbst bestimmt werden. Die Implementierung des äquivalenten Fluids mit dessen Eigenschaften der komplexen Schallgeschwindigkeit c_c , der äquivalenten Dichte ρ_c und des effektiven Kompressionsmoduls K_{eff} erfolgt analog zu [72].

$$\rho_c = \rho_{rig} \quad (18)$$

$$c_c = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{rig}}} \quad (19)$$

Das hier verwendete Modell Johnson-Champoux-Allard (JCA) geht von einer starren porösen Struktur aus (vgl. [99]), die durch die komplexen Kenngrößen der Dichte ρ_{rig} und des Kompressionsmoduls K_{eff} beschrieben wird.

$$\rho_{rig} = \frac{\tau_\infty \rho_f}{\varepsilon_p} \left[1 + \frac{R_f \varepsilon_p}{i \omega \rho_f \tau_\infty} \sqrt{1 + \frac{4 i \omega \tau_\infty^2 \mu \rho_f}{R_f^2 L_v^2 \varepsilon_p^2}} \right] \quad (20)$$

$$K_{eff} = \frac{\gamma p_A}{\varepsilon_p} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8 \mu}{i \omega L_{th}^2 Pr \rho_f} \sqrt{1 + \frac{i \omega L_{th}^2 Pr \rho_f}{16 \mu}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (21)$$

$$L_v = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8 \mu \tau_\infty}{\varepsilon_p R_f}} \quad (22)$$

τ ist der Porositätskrümmungsfaktor, L_v ist die viskose charakteristische Länge, L_{th} ist die thermisch-charakteristische Länge.

3.2.2.7 Dynamische Materialkennwerte

Als Eingangsdaten für die Simulation wurden im Zuge von Schwingungsversuchen die dynamischen Eigenschaften

- Verlustfaktoren (frequenzabhängig)
- Dynamische Biege-E-Moduli von stabförmigen Werkstoffen (frequenzabhängig)
- Dynamische Biege-E-Moduli von Plattenwerkstoffen

bestimmt.

Die hierfür verwendeten stabförmigen Probekörper (Steher) hatten eine Länge von 1800 mm. Die Plattenwerkstoffe OSB bzw. MDF hatten die Abmessungen 1500 × 1250 mm bzw. 1500 × 625 mm. Die eingesetzten Materialien wurden in einer dafür angefertigten Konstruktion elastisch gelagert (Abbildung 27).



Abbildung 27: Bei der Modalanalyse der Werkstoffe wurden diese elastisch aufgehangen (hier: OSB).

Verlustfaktor

Die Verlustfaktoren wurden in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 10848-1:2017 [16] ermittelt. Die gemessene Körperschallnachhallzeit T_s pro Terzband wurde anschließend wie folgt in Verlustfaktoren η umgerechnet.

$$\eta = \frac{2,2}{f T_s} \quad (23)$$

Die frequenzabhängigen Verlustfaktoren der Materialien wurden im Simulationsmodell übernommen.

Dynamischer Biege-E-Modul

Für die Ermittlung der dynamischen E-Moduli wurden die Bauteile mittels elektrodynamischem Schwingungserreger und weißem Rauschen angeregt. Die Oberflächenschnelle wurde mittels Laservibrometrie bestimmt. Die dynamischen E-Moduli wurden anhand der Eigenmoden nach [100] berechnet. Bei der OSB mit einer Dimension von 1500 × 1250 mm waren die Eigenmoden (2, 2), (1, 3) und (3, 1) einer quadratischen, orthotropen Platte gut erkennbar. In Abbildung 28 sind die gemessenen den simulierten Eigenmoden der untersuchten OSB gegenübergestellt. Im Gegensatz dazu konnte bei der MDF-Platte mit einer Dimension von 1500 × 625 mm lediglich die Mode (2, 2) eindeutig gefunden werden, anhand dessen die Steifigkeit ermittelt wurde.

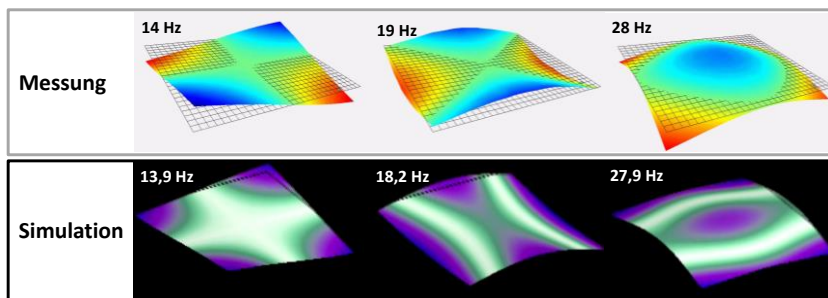


Abbildung 28: Mittels Laservibrometrie (oben) und FEM (unten) ermittelte Eigenmoden der OSB.

Trotz der aufgrund des Herstellungsprozesses möglichen Anisotropie der Plattenwerkstoffe (vgl. [101]), war diese aus den Eigenmoden nicht ersichtlich. Erste Modalanalysen anhand von Streifen quer und längs zur Plattenrichtung ergaben besonders tieffrequent (< 100 Hz) eine starke Richtungsabhängigkeit. Diese verringert sich mit steigender Frequenz.

Die Frequenzabhängigkeit des E-Moduls wurde anhand der Streifen ebenfalls ersichtlich. Sowohl die Modalanalyse der OSB Streifen als auch der MDF Streifen zeigten wie in [102] tendenziell sinkende E-Moduli mit steigender Frequenz.

Es war eine starke Streuung unter den Probekörpern zu erkennen, weshalb keine schlüssige Frequenzabhängigkeit ermittelt werden konnte. Die E-Moduli der Plattenwerkstoffe (OSB und MDF) wurden deshalb als nicht frequenzabhängig im Modell angenommen.

Die Modalanalyse der stabförmigen Bauteile (Steher) ergab eine starke Frequenzabhängigkeit des dynamischen E-Moduls nach [100]. Die frequenzabhängigen E-Moduli der Steher wurden im Simulationsmodell übernommen.

3.2.2.8 Schraubenmodell & Lagerung

Die Schraubverbindungen zwischen Bauteilen werden durch starre punktuelle Verbindungen an ihrer tatsächlichen Lage im Modell repräsentiert (vgl. schwarze Punkte in Abbildung 25). In [72] wurde gezeigt, dass die Modellierung der Schraubverbindung als starre punktuelle Verbindung zu einem übermäßig steifen Verhalten führt. Aufgrund der Anzahl der Schraubverbindungen im Grundbauteil, stellt die Verwendung dieses Schraubenmodells jedoch einen notwendigen Kompromiss dar, um die allgemeine Reduktion der Komplexität des Simulationsmodells zu erreichen.

Die Lagerung des Probekörpers wurde an 4 Punkten als starr angenommen. Es wurden keine Untersuchungen zum Einfluss und zur genauen Einspannsituation des Bauteils im Prüfraumen durchgeführt. Diese Randbedingung kann insbesondere im tiefen Frequenzbereich zu erheblichen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Schalldämm-Maßen führen (vgl. [72]).

3.2.2.9 Netzauflösung

Die notwendige Netzauflösung des Modells der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße wurde parametrisch untersucht. Die Auflösung wurde mit den in der verwendeten Software „COMSOL Multiphysics 6.1“ vorliegenden Einstellungen von „coarse“ bis „extremely fine“

stufenweise erhöht. In Tabelle 6 sind die minimalen und maximalen Elementgrößen der Einstellungen dargestellt.

Tabelle 6: Minimale und maximale Elementgrößen bei unterschiedlicher Netzauflösung in „COMSOL Multiphysics 6.1“.

Netzauflösung	Elementgröße in mm	
	minimal	maximal
coarse	47,6	255,0
normal	30,6	170,0
fine	17,0	136,0
finer	6,8	93,5
extra fine	2,6	59,5
extremely fine	0,3	34,0

Probleme, die sich durch zu geringe bzw. zu hohe Diskretisierung ergeben, werden in [72] geschildert. In den folgenden Simulationsergebnissen wird anschaulich, wie sich die Netzauflösung auf das prognostizierte Schalldämm-Maß auswirkt.

3.2.2.10 Ergebnis und Diskussion

Parametervariation

Netzauflösung

In der nachstehenden Abbildung 29 ist das im hochfrequenten Bereich abfallende Schalldämm-Maß aufgrund einer zu geringen Netzauflösung dargestellt.

Die Dichte des Netzes ist bei geringer Auflösung nicht ausreichend, um die kurzen Wellenlängen korrekt abzubilden. Der Vergleich der Netzauflösungen zeigt, dass durch die geringste Auflösung („coarse“) schon bei 1200 Hz von der höchsten („extremely fine“) abweicht. Im Gegensatz dazu weicht die zweithöchste Auflösung („extra fine“) erst ab 2000 Hz von dieser ab.

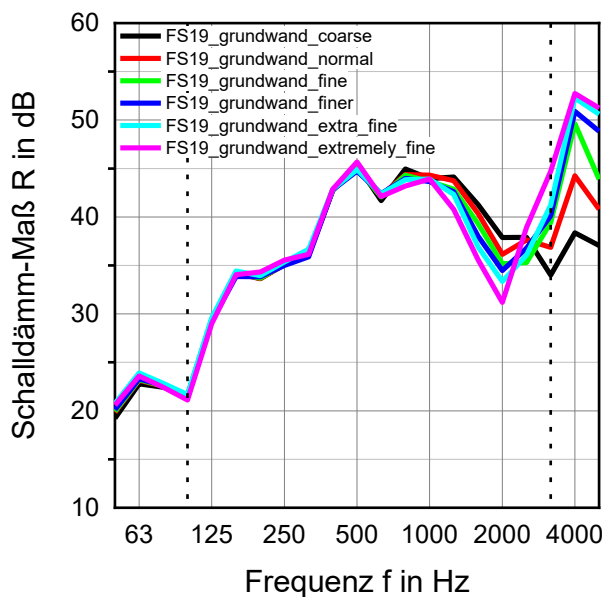


Abbildung 29: Einfluss der Netzauflösung auf das prognostizierte Schalldämm-Maß.

Die Anzahl an finiten Elementen und in Folge auch die Rechenzeiten von FEM-Modellen steigen mit höherer Netzauflösung exponentiell an. Aufgrund der vorliegenden Parameterstudie wurde für die weiteren Simulationen eine Netzauflösung von „finer“ gewählt. Die gewählte Auflösung hat sich bei Gegenüberstellung mit der Messung im Prüfstand als ausreichend erwiesen. Dieser Kompromiss ermöglicht eine effiziente Simulation unter Berücksichtigung der Rechenleistung und auch der Genauigkeit der Ergebnisse bis mindestens 1000 Hz.

Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand des Dämmstoffs im Ständerzwischenraum wurde nicht gemessen. Mithilfe von Simulationsergebnissen wurde der Einfluss dieses Parameters auf das Prognoseergebnis überprüft. Abbildung 30 zeigt das Ergebnis einer Parameterstudie, bei der der Strömungswiderstand im erwartbaren Bereich von 4 kPa s/m² bis 19 kPa s/m² variiert wurde.

Der Strömungswiderstand hat im Frequenzbereich zwischen 63 Hz und 1000 Hz einen erkennbaren Einfluss auf das berechnete Schalldämm-Maß. Mit zunehmendem Strömungswiderstand ist eine Vergrößerung des Schalldämm-Maßes zu beobachten. Für die folgenden Simulationen wurde im Abgleich mit den Messdaten ein Strömungswiderstand von 10 kPa s/m² gewählt.

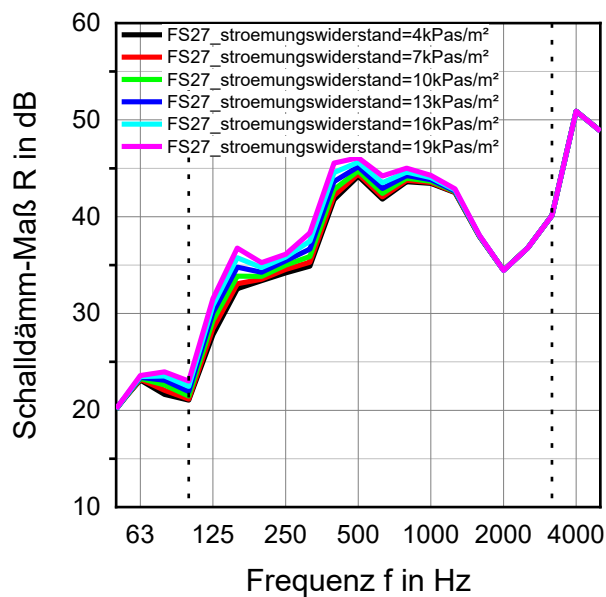


Abbildung 30: Einfluss des Strömungswiderstands des Dämmstoffs auf das prognostizierte Schalldämm-Maß.

Dynamischer Biege-E-Modul der Beplankung

Im Zuge einer Variantenstudie wurde der Biege-E-Modul der empfangsraumseitigen Beplankung (OSB) um die Faktoren 0,5 und 2 verändert. Die Auswirkung dieser Variation auf das Schalldämm-Maß des gesamten Bauteils ist in nachstehender Abbildung 31 zu sehen.

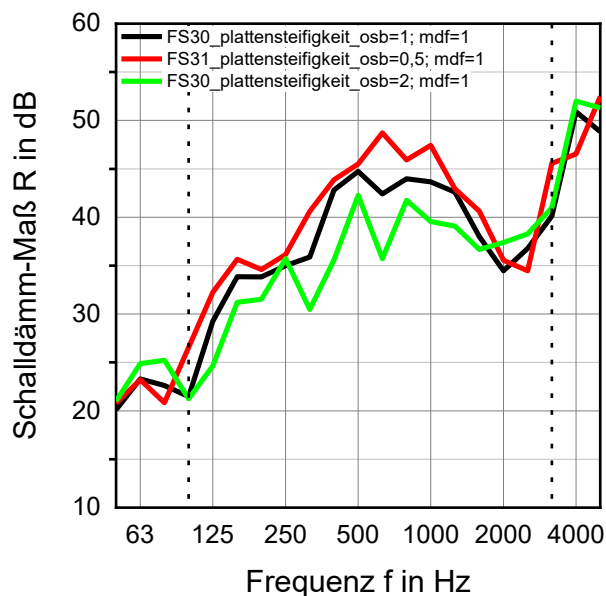


Abbildung 31: Einfluss des E-Moduls der OSB auf das prognostizierte Schalldämm-Maß.

Je biegeweicher die Beplankung ist, desto höher sind die simulierten Schalldämm-Maße der Holzrahmenwand. Dies wirkt sich vor allem mittelfrequent aus, was auf eine höhere Energieübertragung zwischen Steher und Beplankung bei höherem E-Modul zurückzuführen

sein könnte. Im Bereich der Koinzidenzfrequenz ist bei steiferer OSB eine Verschiebung zu tieferen Frequenzen zu beobachten.

Flächenbezogene Masse der Beplankung

Wie im vorangegangenen Beispiel wurde im Zuge der folgenden theoretischen Untersuchung die Masse der OSB um die Faktoren 2 und 3 erhöht. Die simulierten Schalldämm-Maße sind in Abbildung 32 dargestellt.

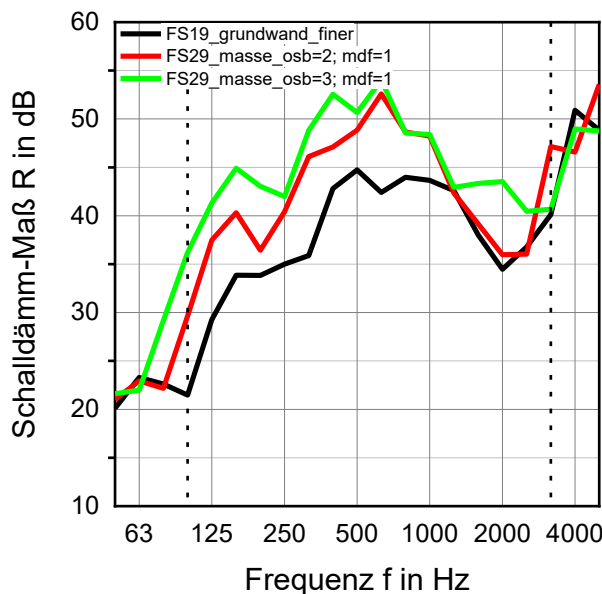


Abbildung 32: Einfluss der flächenbezogenen Masse der OSB auf das prognostizierte Schalldämm-Maß.

Wie zu erwarten, führt die höhere Masse der OSB zu einer höheren Luftschalldämmung. Diese ergibt sich zum einen nach dem Berger'schen Massegesetz, zum anderen kommt bei der Leichtbaukonstruktion vor allem die Verschiebung der Masse-Feder-Masse-Resonanz zum Tragen. Die Erhöhung der Masse einer Schale sorgt für eine Verschiebung zu tieferen Frequenzen, wodurch es jeweils um ein Terzband früher (63 Hz; 80 Hz; 100 Hz) zu einem steilen Anstieg des Schalldämm-Maßes kommt.

Simulation vs. Messung

Abbildung 33 zeigt den Vergleich der gemessenen Schalldämmung der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße (für Vergleiche in Wandgröße siehe Anhang 4) mit dem simulierten Ergebnis. Ergänzend ist zu dem Simulationsergebnis das Schalldämm-Maß mit 1/24-Oktav-Auflösung dargestellt (dünn schwarz durchgezogen). In der Legende können auch die Einzahlwerte R_w , C und C_{tr} abgelesen werden. Die Abweichungen der Simulation von der Messung sind ebenfalls frequenzabhängig dargestellt. Die mittlere Abweichung sowie die Standardabweichung des Vergleichs sind unten rechts eingeblendet. Abweichungen größer null bedeuten dabei eine Überschätzung des Schalldämm-Maßes in der Simulation.

Unter 100 Hz kommt es zu den insgesamt größten Abweichungen. Diese können auf durch das Modell nicht erfassbare Raummoden zurückzuführen sein. Weiters wurde die Lagerung der Bauteile, die im tieffrequenten Bereich einen Einfluss auf das Schalldämm-Maß hat, zwar berücksichtigt, aber nicht näher untersucht. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Schalldämm-Maße zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Im Bereich von 100 Hz bis 3150 Hz resultiert die größte Abweichung durch eine Überschätzung des Koinzidenzeinbruchs im Modell. Der Grund könnte in der nicht frequenzabhängig abgebildeten Steifigkeit der Beplankungen liegen.

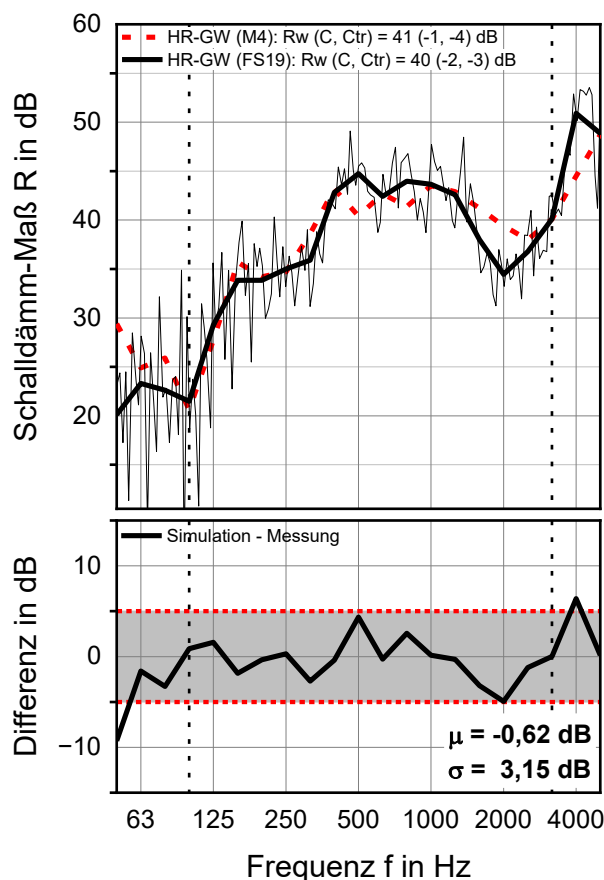


Abbildung 33: Oben: Gegenüberstellung des simulierten (schwarz) und des gemessenen (rot strichliert) Schalldämm-Maßes der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße. Das simulierte Ergebnis ist auch in 1/24-Oktavband-Auflösung dargestellt. Unten: Differenz des simulierten und gemessenen Schalldämm-Maßes der Holzrahmenwand.

3.2.2.11 Zusammenfassung Simulationen Fenstergröße

Im Zuge der Arbeit wurde ein Simulationsmodell einer Holzrahmenwand im kleinen Maßstab (1,8 m²) basierend auf den Erkenntnissen von [72] erstellt. Ergänzend dazu wurden dynamische Materialkennwerte der verwendeten Materialien durch Modalanalysen ermittelt. Einzig der Strömungswiderstand des Dämmstoffs wurde im Zuge einer Parametervariation im Abgleich mit der Messung festgelegt. Diese flossen in das finale Modell mit ein.

Die Parametervariationen zum Einfluss des dynamischen E-Moduls bzw. der Masse der empfangsraumseitigen Beplankung haben gezeigt, dass die simulierten Ergebnisse der

Erwartung laut Theorie folgen. Während die frequenzabhängige Prognose der Schalldämmung durch FEM im Planungsalltag noch nicht angewandt wird, eignet sie sich sehr gut zur Abschätzung der Auswirkungen von Parameterveränderungen.

Der Abgleich des simulierten mit dem gemessenen Schalldämm-Maß zeigt über den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz Abweichungen des simulierten Schalldämm-Maßes von maximal 5 dB pro Terzband. Unter 100 Hz kommt es zur größten Abweichung. Diese kann auf im Modell nicht erfasste Raummoden, sowie die Vereinfachung der Lagerung zurückgeführt werden. Zur Optimierung des vorliegenden Modells sollten in weiterer Folge die dynamischen Eigenschaften aller Materialien frequenzabhängig untersucht werden und in die Simulation einfließen.

3.3 Feuchteresistenz

Die nachfolgender Diskussion zur Feuchteresistenz von Holzfassaden wurde in [103] publiziert. Für detaillierte Diskussionen und weitere Ergebnisse wird auf Anhang 5 und 6 verwiesen.

3.3.1 Neue Anforderungen an Holzfassaden

In den letzten Jahren haben sich die Anforderungen an Holzfassaden deutlich verändert. Kubische Gebäudeformen sind ein wichtiges Ausdrucksmittel moderner Architektur. Dachüberstände sind bei Flachdächern mit Attika nunmehr obsolet und wurden selbst bei Satteldächern kontinuierlich reduziert oder werden heute oft gänzlich weggelassen. Gleichzeitig gewinnen bei Holzfassaden Ausführungen mit offenen Fugen zunehmend an Bedeutung (Abbildung 34). Die Abstände zwischen Brettern oder Latten werden dabei immer größer. Derartige Fassadenausführungen bieten naturgemäß weniger Schutz für die dahinterliegenden Bauteilschichten im Vergleich zu geschlossenen Holzfassaden. Zudem wird bei dieser Art von Fassaden bewusst auf den Vorteil der zweiten Ebene verzichtet, wie sie bei klassischen geschlossenen Holzfassaden durch eine dahinterliegende zweite wasserführende Ebene in Form einer Fassadenbahn oder eines geeigneten Plattenwerkstoffs gegeben ist [104].

Diese Entwicklungen haben dazu geführt, dass Fassaden nun vollständig der Witterung ausgesetzt sind, was neue Fragen aufwirft und deren Beantwortung notwendig macht. Ziel dieses Projektes war es daher, das Feuchteverhalten verschiedener Konstruktionsdetails von Holzfassaden sowie den Einfluss von Schlagregen zu untersuchen. Dazu wurden verschiedene Fassadensysteme unter periodischen Beregnungs- und Trocknungsbedingungen beobachtet. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zur Feuchteresistenz vorgestellt.



Abbildung 34: Reduzierte Vordächer und offene Fassaden führen zu geänderten Anforderungen an moderne Holzfassaden

3.3.2 Schnellbewitterungsversuche in der Klimakammer

Es wurden Schnellbewitterungsversuche in der Klimakammer der Holzforschung Austria durchgeführt. Die Klimakammer war mit einer Beregnungsanlage und einer UV-Bestrahlungseinrichtung ausgestattet. Im Rahmen eines standardisierten Prüfzyklus (siehe Infokasten) wurden die Fassadenelemente einer anspruchsvollen Bewitterung ausgesetzt. Diese Methode ermöglichte eine vergleichende Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Holzfassaden unter realistischen Bedingungen. Das Ziel dieser vergleichenden Untersuchungen war es, das Abtrocknungsverhalten verschiedener Konstruktionsvarianten zu analysieren und die Gefahr von Feuchtenestern abzuleiten. Dabei handelt es sich um eine tendenzielle Einschätzung des Schadenpotentials, jedoch ist keine direkte Übertragung auf tatsächliche Bewitterungszeiträume in natürlicher Umgebung möglich. Die untersuchten Fassadenarten umfassen vertikale, horizontale, geschlossene und offene Varianten. Dabei wurden die in Europa am häufigsten für Holzfassaden verwendeten Holzarten, Fichte und Lärche, eingesetzt. Die Konstruktionsdetails sind in den jeweiligen Ergebnisabbildungen dargestellt.

Prüfzyklus:

Auf Basis von am Forschungshaus in Stetten ermittelten realen Messdaten und nach Durchführung von Vorversuchen wurde folgender Prüfzyklus festgelegt:

- Beregnung der Fassadenelemente mit einer Wassermenge von etwa 2,4 l/min m² über einen Zeitraum von 24 Stunden
- Trocknung der Fassadenelemente bei einer Temperatur von 20°C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % und kontinuierlicher UV-Bestrahlung
- Tägliche Überprüfung der Holzfeuchtigkeit und visuelle Beurteilung der Fassaden
- Beginn eines neuen Zyklus mit insgesamt fünf Wiederholungen.
- Nach dem Abschluss des fünften Zyklus wurde eine Rücktrocknungsphase von ~16 Tagen durchgeführt.

3.3.3 Welchen Einfluss hat eine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung bei offenen Fassaden?

In einigen Fällen wird bei offenen Fassaden die Verwendung einer Fassadenbahn direkt hinter den Fassadenbrettern in Erwägung gezogen, um eine gleichmäßige, dunkle Fugenoptik zu erzielen, in der keine Unterkonstruktionshölzer sichtbar sind. Die aktuellen Ergebnisse bestätigen das, was bereits in der Praxis beobachtet wurde: Das Anbringen einer Fassadenbahn unmittelbar auf der Rückseite der Fassadenschalung (siehe Abbildung 3, Detail) führt zu Feuchteansammlungen an der Rückseite der Fassadenbretter.

Obwohl die Fassadenschalung ohne direkt dahinter angebrachter Fassadenbahn während der Beregnungsphase etwas stärker befeuchtet wird, erfolgt die Trocknung während der 72-stündigen Rücktrocknungsphase deutlich schneller (Abbildung 35, rote Kurve).

Im Gegensatz dazu trocknen die Fassadenbretter mit einer direkt auf der Rückseite anliegenden Fassadenbahn während des Bewitterungsversuchs signifikant langsamer. Dies führt dazu, dass die Holzfeuchtigkeit erst am Ende des 4-tägigen Zyklus die kritische Schwelle von 20 % unterschreitet (Abbildung 35, blaue Kurve). Das eingeschränkte Trocknungsverhalten wird besonders deutlich nach dem fünften Zyklus. In der abschließenden Abtrocknungsphase nähern sie die beiden Feuchteverläufe nur langsam an.

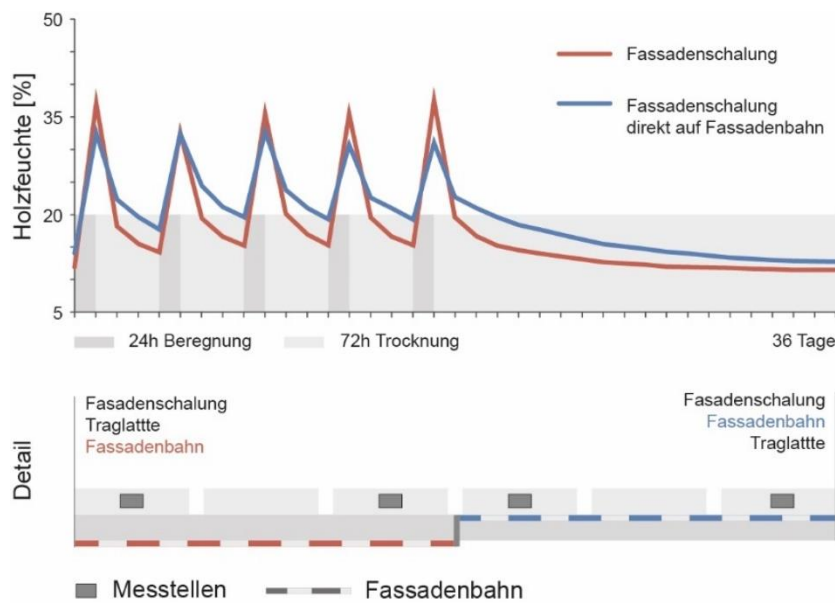


Abbildung 35: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in den Fassadenbrettern mit offenen Fugen, mit bzw. ohne direkt an der Brettrückseite anliegender Fassadenbahn

Weiters führt die länger anhaltende erhöhte Holzfeuchtigkeit an der Brettrückseite zu teils massiven Verformungen (Schüsselungen) der Fassadenbretter weg von der Fassadenbahn bis hin zum Schraubenabriss (Abbildung 36). Auch Rissbildung im Holz ist aufgrund der entstehenden Spannungen in den Fassadenbrettern möglich [105].

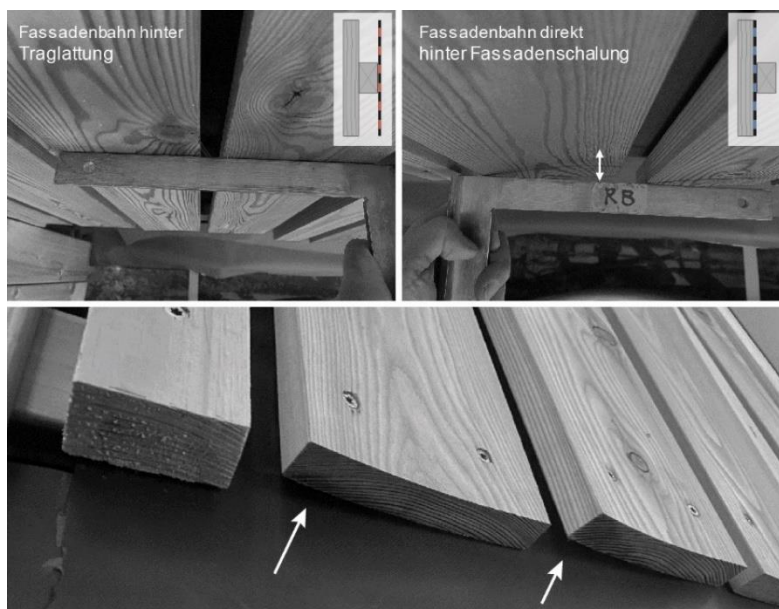


Abbildung 36: Durch die Bewitterung verformte (geschüsselte) Bretter beim Versuchsaufbau mit direkt an der Brettrückseite anliegender Fassadenbahn

Diese Feuchteansammlungen können zu Staunässe führen, welche das Wachstum von holzerstörenden Pilzen begünstigen und Fäulnisschäden verursachen können. Diese Ausführung widerspricht zudem den Prinzipien des konstruktiven Holzschutzes, welche

darauf abzielen, Kapillarfugen zu vermeiden. Weiters kann eine an dieser Stelle verlegte Fassadenbahn auch nicht die Funktion des winddichten Wandabschlusses sowie der eigentlichen wasserführenden Ebene erfüllen.

Um eine optisch ansprechende schwarze Fuge zu erzielen, können die Unterkonstruktionslatten beispielsweise mit einer geeigneten schwarzen Beschichtung versehen werden (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Fassade mit offenen Fugen mit ca. 10 mm Breite, in denen die schwarz gestrichenen Traglatten nicht erkennbar sind

3.3.4 Ist eine Nageldichtung hinter der Traglattung erforderlich?

In den letzten Jahren wurde immer wieder die Frage nach der Notwendigkeit einer Nageldichtung (Dichtband oder Dichtmasse) hinter direkt auf der Fassadenbahn liegenden Trag- oder Konterlatten bei offenen Fassaden gestellt, obwohl bisher keine Schadensfälle bekannt sind, die auf einen Wassereintritt in diesem Bereich hindeuten (Abbildung 38a). Allerdings fehlten bisher Untersuchungsergebnisse dazu.

Die nun vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der hinter der Fassadenbahn liegende Wandbildner während der Zyklen keine erhöhten Holzfeuchtwerte aufweist. Auch nach mehreren Beregnungs- und Trocknungszyklen blieb die Fassadenbahn bei üblicher Befestigung (verschraubt) ausreichend regendicht. Die Feuchteverläufe der Variante ohne Nageldichtband unterschieden sich nur geringfügig von denen der Variante mit Nageldichtband (Abbildung 38b).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Nageldichtband keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Holzfeuchte hat, da diese in einem ähnlichen Bereich von ca. 12 % liegt (Abbildung 38c).

Für eine ausreichende Schlagregendichtheit reicht es daher aus, wenn die Trag- oder Konterlatte durch Verschrauben oder Vernageln mit der Fassadenbahn am tragenden Wandbildner verpresst wird.

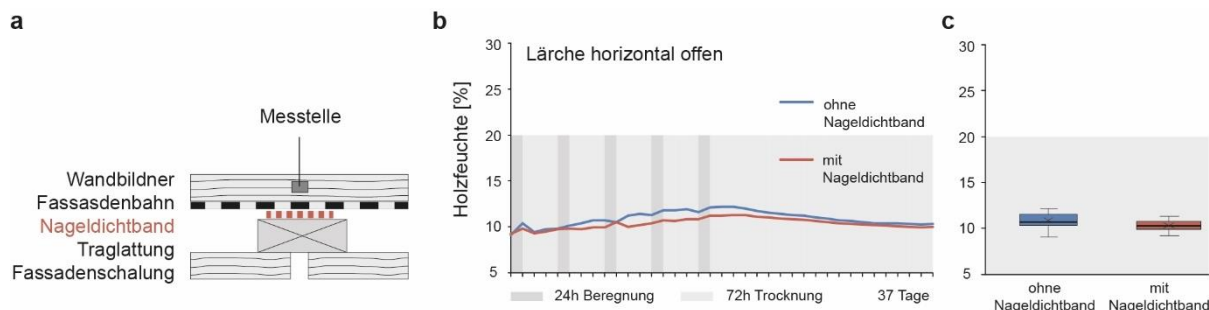


Abbildung 38: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch im Wandbildner hinter der Fassadenbahn bei offener Fassade mit/ohne Nageldichtband zwischen Traglattung und Fassadenbahn

3.3.5 Wie können Längsstöße optimal gestaltet werden?

Bisher wurde für Fassadenhöhen, die die maximale Brettlänge überschreiten, generell die Ausführung eines Generalstoßes mit Z-Blech empfohlen. Diese Methode bietet aufgrund des optimalen konstruktiven Schutzes für das Hirnholz die technisch beste und sicherste Stoßausführung. Jedoch wird dies aus architektonischen Gründen oft nicht favorisiert [106]. Daher war das Ziel der aktuellen Untersuchungen, alternative Lösungen zu entwickeln, die die Fuge optisch weniger betonen und dennoch möglichst geringe Nachteile in Bezug auf die Lebensdauer mit sich bringen.

Die Bewitterungsuntersuchungen haben gezeigt, dass eine schadensträchtige Erhöhung der Holzfeuchtigkeit in der Unterkonstruktion vor allem bei stumpfen, hinterlegten Stoßen zu befürchten ist. Offene Stoße ermöglichen sowohl auf zwei Traglatten als auch auf einer Traglatte eine ausreichend schnelle Abtrocknung.

Abbildung 39 veranschaulicht den Vergleich zwischen einem stumpfen, hinterlegten Stoß und einem offenen, hinterlegten Längsstoß bei einer geschlossenen, vertikalen Fassade. Die für die ordnungsgemäße Befestigung der Fassadenbretter erforderliche größere Breite der Traglatte im Stoßbereich hat bis zu einer Breite von 12 cm keinen nachteiligen Effekt auf das Feuchteverhalten. Der Mindestabstand der Schrauben zum Brettende beträgt 2 cm, um Rissbildung zu vermeiden; die Schrauben sollten vorgebohrt werden. Bei vertikalen Fassaden sind die Brettenden schräg zu schneiden. Die Fassadenbretter trocknen auch in unmittelbarer Nähe zum Stoßbereich im Normalfall rasch genug aus, sodass keine Staunässe entsteht und somit auch keine Gefahr von Fäulnis besteht.

Die umfangreichen Untersuchungen ermöglichen es daher neue Ausführungen für Längsstöße sowohl bei vertikalen als auch horizontalen Fassaden zu empfehlen (siehe Handlungsempfehlungen im Anhang 7). Es ist in jedem Fall erforderlich, Längsstöße

frühzeitig im Bauprozess zu thematisieren und unter Berücksichtigung von Gebäudehöhe, verfügbarer Fassadenbrettlänge und architektonischen Anforderungen zu planen [107].

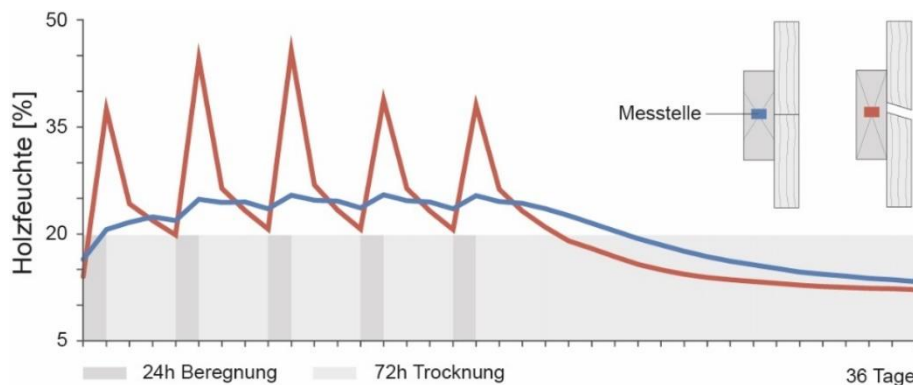


Abbildung 39: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in der Traglatte bei Ausführung von stumpfen, hinterlegten Längsstößen im Vergleich zu offenen, hinterlegten Längsstößen bei einer geschlossenen, vertikalen Fassade

3.3.6 Wie sollte die Geometrie der Traglatten gestaltet werden?

Bei Fassaden mit offenen Fugen stellt die Unterkonstruktion ebenfalls eine bewitterte Bauteilschicht dar, und der Wasserablauf muss entsprechend geplant werden. Eine möglichst schnelle und ungehinderte Wasserableitung ist entscheidend für eine zügige Rücktrocknung. Daher sollten horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung aufweisen, die in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm führt (siehe Detail in Abbildung 40).

In den Bewitterungsversuchen zeigte sich, dass eine zur Fassadenschalung hin abgeschrägte Traglatte sowohl in der Fassadenschalung als auch in der Unterkonstruktion zu vergleichsweise höheren Holzfeuchtigkeiten führt (Abbildung 40, blaue Kurve). Diese Variante birgt zudem die Praxisgefahr von Schmutzansammlungen im Bereich der Kontaktfläche, was wiederum zu lokal erhöhter Holzfeuchtigkeit und verlängerten Trocknungszeiten führt.

Im Gegensatz dazu ist bei einer von der Fassadenschalung weg geneigten Traglatte die Feuchtigkeitsaufnahme geringer und die Trocknungszeit kürzer (Abbildung 40, rote Kurve). Diese Unterschiede lassen sich auf die verbesserte Wasserableitung weg von den Knotenpunkten zurückführen. Wird die Traglattung ohne Gefälle der Oberseite ausgeführt, ist der Feuchteverlauf etwas höher als bei der von der Fassadenschalung weg fallenden Traglattung (Abbildung 40, graue Kurve). Daher ist die Traglatte mit Abschrägung von der Fassadenschalung weg die empfohlene Ausführung.

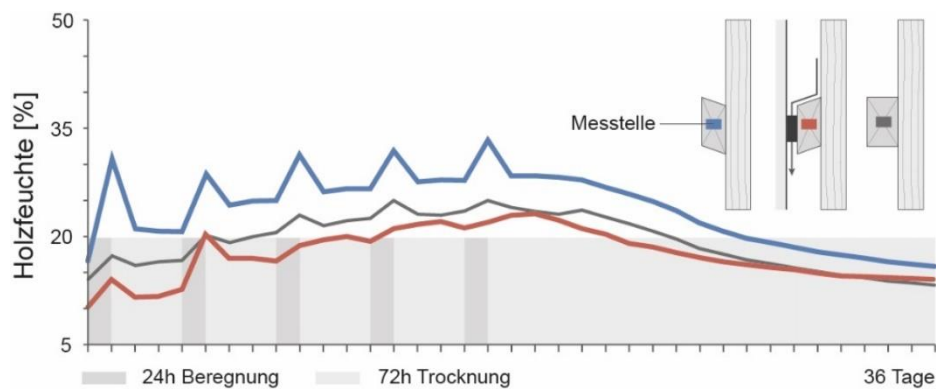


Abbildung 40: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in der horizontalen Tragplatte bei einer offenen Fassade mit unterschiedlicher Ausführung der Oberseite

3.3.7 Haben Holzfassaden einen Einfluss auf die Korrosion von Verblechungen?

In der Praxis kommt es an Verblechungen innerhalb von Fassadenelementen, so wie sie z.B. im Zusammenhang mit Brandschutzabschnitten ausgeführt werden, fallweise zu Korrosionserscheinungen. In umfangreichen Freiland- und eigens dafür entwickelten beschleunigten Laborversuchen wurde erforscht, bei welchen konkreten Holz-/Metallkombinationen es zu Korrosionseffekten am Metall kommen kann. Hierzu wurde sowohl das Beregnungswasser hinsichtlich der Freisetzung spezifischer Metallionen analysiert als auch eine kontinuierliche Inspektion von Veränderungen den Metalloberflächen vorgenommen (siehe Abbildung 41).

Die Untersuchungen zeigten, dass Kombinationen aus extraktstoffreichen Hölzern (wie beispielsweise Lärche oder Eiche) und unbeschichteten, verzinkten Blechen zum Auftreten von Korrosion führen können (Abbildung 41b). Durch die entwickelte Schnellmethode konnte darüber hinaus das Korrosionsverhalten spezifischer Materialkombinationen erfolgreich prognostiziert werden (Abbildung 41c). Auf Basis der Untersuchungen wird empfohlen, unbeschichtete, verzinkte Bleche oder Zinkbleche an Holzfassaden zu vermeiden.



Abbildung 41: (a) Freilandversuch (b-c) Korrosion an einem unbeschichteten, verzinkten Blech in Kombination mit Lärche, nach 15 Monaten in der Freilandbewitterung (b) und nach 28 Tagen im Schnellbewitterungslaborversuch (c)

3.3.8 Handlungsempfehlungen - Feuchteresistenz

Aus den Untersuchungen zur Feuchteresistenz von Holzfassaden können entsprechend den gezeigten Daten folgende praxisrelevante Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Bei offenen Fassaden keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung ausführen
- Auch bei offenen Fassaden ist keine Nageldichtung zwischen der Trag- bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner erforderlich
- Bei offenen Fassaden benötigen horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm
- Längsstöße bei Fassadenbrettern können auch als Generalstoß mit 1 cm Fuge auf einer Traglatte oder auf 2 Traglatten ausgeführt werden, vertikale Fassadenbrettenden 15° schräg geschnitten; einzelne fliegende Stöße (kein Generalstoß) sind nur bei Nut- und Feder-Schalungen zulässig
- Unbeschichtete, verzinkte Bleche oder Zinkbleche an Holzfassaden vermeiden

Diese neuen Empfehlungen ergänzen die bisherigen Konstruktionsempfehlungen, die auf Basis umfangreicher Untersuchungen in früheren Forschungsprojekten nach den Grundsätzen des konstruktiven Holzschutzes erarbeitet und veröffentlicht wurden. Als verlässliche Informationsquelle zum Stand der Technik wird auf das Fachbuch "Fassaden aus Holz" [108] verwiesen. Zusammenfassend ist anzumerken, dass Konstruktionsfehler, die zu einer langfristigen Durchfeuchtung führen, nicht durch andere Maßnahmen, wie z.B. die Verwendung von Hölzern mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit, ausgeglichen werden können. Solche Fehler können zu Fäulnis und einer verkürzten Lebensdauer führen.

4 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die Zusammenfassungen aus den detaillierten Berichten im Anhang wiedergegeben.

4.1 Sommerlicher Wärmeschutz – Freilanduntersuchungen und Simulationen (Anhang 1)

Das treibende Potential der sommerlichen Wärmeeinträge durch die opake Hülle in das Gebäude ist die Temperaturdifferenz zwischen der Außenoberfläche und der Innenoberfläche des Wandbildners. Im konkreten Fall der hinterlüfteten Fassade handelt es sich auf der Außenseite dabei um die Temperatur auf der Fassadenbahn. Diese korreliert direkt mit dem zu erwartenden Wärmestrom in das Gebäude. Um die Fassade bestmöglich

auf die Reduktion sommerlicher Wärmeeinträge zu optimieren, gilt es deshalb, die Fassadenbahntemperatur durch geeignete Maßnahmen bestmöglich zu reduzieren.

4.1.1 Freilanduntersuchungen

Aus den Freilandmessungen ließen sich einige zielführende Maßnahmen zur Reduktion der sommerlichen Überwärmung in Innenräumen ableiten:

- 1) Geschlossene Fassaden sollten im Idealfall mit einer Hinterlüftung und nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausgeführt werden. Durch eine Hinterlüftung ist ein guter Wärmeabtransport gegeben.
- 2) Der Hinterlüftungsspalt sollte an der engsten Stelle mindestens 3 cm aufweisen, um einen ausreichenden Wärmeabtransport zu gewährleisten. Je größer der Spalt ausgeführt wird, desto besser. Der deutlichste Effekt ist jedoch für die ersten 3 cm zu erwarten.
- 3) Zu- und Abluftöffnungen mit einem offenen Mindestquerschnitt von 150 cm²/lfm haben sich für den Wärmeabtransport vorteilhaft gezeigt. Dabei ist die Querschnittsreduktion durch ein Insektenschutzgitter bereits einberechnet. Für Zu- und Abluftöffnungen mit 3 cm Spaltstärke ist zum Erreichen dieses Querschnitts ein Insektenschutzgitter mit mindestens 50 % Lochanteil erforderlich.
- 4) Die Oberflächenfarbe bzw. Behandlung spielt eine zentrale Rolle für die sommerlichen Wärmeeinträge. Durch Fassaden mit hellen Beschichtungen und niedriger solarer Absorption ($\alpha \leq 0,2$) ließen sich die sommerlichen Wärmeeinträge durch die opaken Gebäudefläche in der Simulationsstudie um bis zu 1,26 kWh/m² (von 1,11 kWh/m² auf -0,15 kWh/m²) im Vergleich zu einer schwarzen bzw. gealterten Lärchenfassade reduzieren (siehe Anhang A2). Der Einfluss der Oberflächenfarbe ist bei geschlossenen Fassaden u.a. aufgrund des geringer ausfallenden Luftaustausches in der Hinterlüftungsebene größer als bei der offenen Variante. Bei unbehandelter, gealterter Holzoberfläche und anderen dunklen Oberflächenfarben verhält sich die offene Fassadenvariante im Hinblick auf die sommerliche Überwärmung vorteilhafter als die geschlossene. Bei heller Farbgebung verhält sich diesbezüglich hingegen die geschlossene Variante vorteilhafter. Der Einsatz von IR-aktiven Pigmenten auf der Außenoberfläche der Fassadenschalung zeigte nur ein sehr geringfügiges Potential.
- 5) Hinterlüftete Fassaden (offen und geschlossen) zeigten im Freilandversuch auf der Südfassade deutlich geringere Wärmeeinträge als eine Putzfassade (gleichfarbig, weiß) mit gleichem U-Wert des Wandbildners (Putzfassade: 0,31 kWh/m², offene Fassade: 0,17 kWh/m², geschlossene Fassade: 0,11 kWh/m²).
- 6) Die Dämmung des Fassadenschirms führte zu einer deutlichen Reduktion der Wärmeeinträge um bis zu 0,14 kWh/m² (ca. 0,09 kWh/m² → ca. -0,05 kWh/m²). Eine weiterführende Simulationsstudie zeigte jedoch auf, dass die Anbringung der

Dämmung auf der Außenbeplankung (unter der Fassadenbahn) zu einem noch besseren Ergebnis führt (ca. $-0,05 \text{ kWh/m}^2 \rightarrow \text{ca. } -0,15 \text{ kWh/m}^2$).

- 7) Bei der offenen Fassade zeigte jene Variante, bei der die Rhombusschalung mit nach unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung ausgeführt war, die geringsten Oberflächentemperaturen und Wärmeeinträge. Dabei zeigte sich eine Spaltbreite von 7 mm (bei $\sim 10\%$ Fugenanteil an der Gesamtfläche) von den hier untersuchten Spaltvarianten am vorteilhaftesten (Wärmeeinträge: $7\text{mm} \rightarrow 0,11 \text{ kWh/m}^2$ / $14\text{mm} \rightarrow 0,2 \text{ kWh/m}^2$ / $21\text{mm} \rightarrow 0,22 \text{ kWh/m}^2$). Bei senkrechter Ausführung der Rhombusschalung traf die Sonneneinstrahlung auf der Westfassade täglich zu einer gewissen Tageszeit direkt auf die darunterliegende, schwarze Fassadenbahn ein und erwärmte diese um bis zu 14 K. Die Wärmeströme fielen entsprechend höher aus als bei der Vergleichsvariante mit horizontaler Ausführung der Rhombusschalung ($0,29 \text{ kWh/m}^2$ anstatt $0,2 \text{ kWh/m}^2$).

4.1.2 Simulationsstudie

Das im Rahmen des Projekts gemäß Abschnitt 1.1.4.1 in Anhang 1 entwickelte thermische Fassadensimulationsmodell konnte erfolgreich validiert werden (siehe Abschnitt 2.2 in Anhang 1). Es kam für die Simulationsstudie zur Hochrechnung des Einsparungspotentials auf Gebäudeebene zum Einsatz, wo es dazu diente, die Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn der unterschiedlich ausgerichteten und modifizierten Fassaden zu simulieren. Die Berechnung der Wärmeströme in das Gebäude erfolgte mithilfe des gemäß Abschnitt 1.1.4.2 in Anhang 1 erstellten und validierten (siehe Abschnitt 2.1.1 in Anhang 1) WUFI-Simulationsmodells.

Die in Abschnitt 2.3 in Anhang 1 dargelegten und diskutierten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Die Langwellige (IR-)Strahlung ist der primäre Wärmeübertragungsmechanismus von Fassadenschalung auf die Fassadenbahn. Durch die Reduktion des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen Schalungsinnenoberfläche und Fassadenbahnoberfläche lassen sich die Temperaturen auf der Fassadenbahn minimieren. Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass sich unabhängig von der solaren Absorption bzw. Farbgebung der Außenoberfläche der Schalung das Temperatur und Wärmestromniveau an der Bahn dadurch auf jenes einer weiß beschichteten Fassade ($a \leq 0,2$) senken lässt. Es gilt nun, geeignete, in der Praxis umsetzbare Konzepte zur Umsetzung zu ermitteln. Der Einsatz von IR-aktiven Beschichtungen auf der Fassadenbahn könnte ein erster praktikabler Ansatz sein.
- 2) Auch nordseitig führen dunkel beschichtete bzw. gealterte (dunkle) Holzfassaden aufgrund der auftretenden Diffusstrahlung zu erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn.

- 3) Der Anteil der sommerlichen Wärmeeinträge ist im Vergleich zu den winterlichen Wärmeverlusten durch die opake Gebäudehülle eher gering.

Aber: Es sollte im Sommerfall nicht nur um die Einsparung von Kühlenergie gehen, sondern auch darum, den Einbau eines Kühlsystems gar nicht erst erforderlich zu machen. Die Nachrüstung bzw. Einbau (im Neubau) eines solchen würde aufgrund des Herstellungs- und Einbauprozesses ebenfalls einen negativen Umwelteintrag bedeuten. Außerdem ist davon auszugehen, dass im Falle des Vorhandenseins einer solchen Kühlung diese vom Nutzer nicht -wie für die obige Studie- auf 25 °C, sondern zur Behaglichkeitsmaximierung deutlich darunter betrieben werden würde, wodurch der zu erwartende Kühlenergiebedarf nochmals stark ansteigen würde. Heizsysteme sind hingegen zwingend notwendig und in jedem Wohngebäude bereits verbaut. Aus diesen Gründen ist es wohl sinnvoll, bei der diesbezüglichen Fassadenplanung diese eher auf den Sommerfall hin zu optimieren.

- 4) Die sommerlichen Wärmeeinträge werden sich in Zukunft (2050) deutlich erhöhen, während die winterlichen Wärmeverluste sich etwas reduzieren. Der relative Anteil des Kühlbedarfs am Gesamtenergiebedarf wird also dementsprechend stark zunehmen.
- 5) Es zeigt sich eine geringfügig bessere Energiebilanz, wenn der größere opake Fassadenanteil des Gebäudes in Ost-West Richtung ausgerichtet ist.

Allgemein gilt es der Notwendigkeit des Einbaus aktiver Kühlsysteme entgegenzuwirken und - wenn doch erforderlich – den Energiebedarf dieser auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Optimierte Fassadenkonzepte sind dabei nur ein Teil des Gesamtbilds. Nur gemeinsam mit optimierten Beschattungs-, Verglasungs- und Lüftungskonzepten lässt sich der sommerliche Wärmeeintrag möglicherweise auch in Zukunft so weit reduzieren, dass eine aktive Kühlung nicht erforderlich wird.

4.2 Sommerlicher Wärmeschutz – Alterung von Fassadenoberflächen (Anhang 2)

An Proben wurde vor und nach einer 3-monatigen beschleunigten Bewitterung der Total Solar Reflectance (TSR) Wert und begleitend vor und in Intervallen während einer QUV-Schnellbewitterung die Farbänderung nach CIE Lab bestimmt. Es sollte untersucht werden ob über die Farbmessung nach CIE Lab näherungsweise der TSR Wert bestimmt werden kann, welcher für die Simulation der Oberflächentemperatur eine wesentliche Kenngröße ist. Es sollte die Änderung der Farbmesswerte durch eine Alterung ermittelt werden.

Untersucht wurden Lärchenholz, Fichtenholz und Eichenholz im unbeschichteten Zustand und mit Beschichtungen ohne IR-Pigmenten (nIR), mit reflektierenden IR-Pigmenten (rIR) und transparenten IR-Pigmenten (tIR). Auf gehobeltem Lärchenholz erfolgte die Untersuchung an unbeschichteten Proben, an Proben mit einer deckend schwarzen Beschichtung (nIR, rIR und tIR), einer lasierend braunen Beschichtung (nIR und rIR), einer

deckend weißen Beschichtung (nIR) und einer deckend metallic Beschichtung (nIR). Auf sägerauem Lärchenholz erfolgte die Untersuchung mit einer deckend schwarzen Beschichtung (nIR und rIR). Auf gehobeltem Fichtenholz und gehobeltem Eichenholz erfolgte die Untersuchung an unbeschichteten Proben und an Proben mit einer lasierend braunen Beschichtung (rIR).

Die Alterung der beschichteten Proben erfolgte durch eine 2016 Stunden lange QUV-Schnellbewitterung. Die Alterung der unbeschichteten Fichtenholz, Lärchenholz und Eichenholzproben erfolgte durch eine horizontale Freilandbewitterung auf Versuchsterrassen in Tulln.

4.3 Schallschutz – Bauakustische Messungen (Anhang 3)

4.3.1 Einfluss Fassadenart

In Abhängigkeit des Aufbaus der Grundwand wirken sich die unterschiedlichen Fassaden-Varianten mehr oder weniger positiv auf die Schalldämmung der Wand aus. Bei Holzmassiv- sowie Betongrundwänden wird das Schalldämm-Maß sowohl durch eine offene Rhombusleisten-Fassade als auch durch die untersuchte Nut-Feder-Lärchenschalung deutlich verbessert. Tieffrequent gehen die Verbesserungen über den überwiegenden Frequenzbereich mit einer Verschlechterung einher. Diese ist vor allem bei der Nut-Feder-Fassade im Bereich von 63 Hz aufgrund der Resonanzfrequenz der Konstruktion sehr deutlich ausgeprägt. Für Holzrahmenwände ergeben sich mit der Nut-Feder-Fassade nur hochfrequente Verbesserungen über 1250 Hz, die nur einen geringen Einfluss auf den Einzahlwert R_w haben. Mit der offenen Rhombusleisten-Fassade wird mit einer Ausnahme keine Verbesserungen in der Schalldämmung messbar, vielmehr kommt es mittelfrequent zu starken Einbußen, die eine Verringerung des Einzahlwertes R_w um 3 dB zur Folge haben.

Im Vergleich zu einem üblichen EPS-WDVS schneidet die hinterlüftete Nut-Feder-Fassade unabhängig von der Grundwand besser ab. Auf der Holzmassiv- und Betongrundwand wird auch mit der Rhombusleisten-Fassade eine bessere Schalldämmung erzielt als mit dem EPS-WDVS, für die Holzrahmengrundwand gilt das hingegen nicht. Der Grund für die höhere Verbesserung des Fassadeschirms auf den massiven Grundwänden (Holzmassiv-, Beton) liegt aus Sicht der Autoren an der dahinterliegenden, bauphysikalisch notwendigen Dämmebene, die einen hohen Absorptionsgrad vorweist.

Die Holzart hat wie erwartet keinen merkbaren Einfluss auf die Schalldämmung der Holzfassaden. Trotz unterschiedlicher Dichten und auch unterschiedlicher Steifigkeiten der untersuchten Holzarten, sind diese zu ähnlich, als, dass sie innerhalb des mehrschaligen Aufbaus einen signifikanten Einfluss aufweisen. Weiters ist der Einfluss des Abstands der Rhombusleisten ebenfalls als geringfügig anzusehen, wobei bei Vergrößerung des Abstands tief- und hochfrequent Verschlechterungen sichtbar wurden, die auf die niedrigere

flächenbezogene Masse und die Durchlässigkeit für hohe Frequenzen zurückzuführen sind. Mittelfrequent kommt es sogar zu Verbesserungen der Schalldämmung, die ggf. auf geringere Steifigkeiten der Fassadenelemente mit größerem Leistenabstand zurückzuführen sind.

Während der Unterschied von stehender Luftschicht zu hinterlüfteter Fassade bei einer Nut-Feder-Fassade bei der Holzmassiv- und Betonwand nur eine geringe Verbesserung in der hochfrequenten Luftschalldämmung bringt, wirkt sich die geschlossene Hinterlüftungsöffnung bei der Holzrahmenwand deutlich stärker auf die Schalldämmung aus. Im Einzahlwert R_w kommt es zu einer Verbesserung um 3 dB.

4.3.2 Einfluss Verschraubung

Die Untersuchungen zur Verschraubung der Fassaden haben gezeigt, dass sowohl die Art der Verschraubung als auch die Reichweite der Verbindungsmittel ins Bauteil hinein von Relevanz sind. Diese Ausführungsdetails sind jedenfalls in der Schalldämmung sichtbar. Das Verwenden von Vollgewindeschrauben sorgt für einen geringeren Anpressdruck verglichen mit Teilgewindeschrauben, wodurch die Schallübertragung der Fassade über die Lattung aufs Grundbauteil gedämmt wird. Der Einzahlwert R_w steigt dabei um rund 1 dB an.

Neben dem Anpressdruck der Unterkonstruktion hat auch die Länge der Körperschallbrücken in Form der Verschraubung einen großen Einfluss auf das Schalldämm-Maß. Dies wurde anhand einer Holzrahmenwand mit Nut-Feder-Fassade anschaulich gezeigt, wobei es besonders mittelfrequent zu einer Verbesserung der Schalldämmung kommt, wenn die Schrauben zur Montage der Traglattung nicht in die Grundwand, sondern nur in die Konterlattung ragen. Im Einzahlwert kann dieses Ausführungsdetail das bewertete Schalldämm-Maß um bis zu 2 dB verschlechtern bzw. verbessern.

4.3.3 Einfluss Lattungsebene

Eine vertikale Fassade mit Kreuzlattung zeigte mittel- und hochfrequent eine höhere Schalldämmung gegenüber einer horizontalen Fassade mit einfacher Traglattung. Damit waren je nach verwendeter Grundwand größere Verbesserungen möglich. Bei der Holzrahmenwand wurde die tieffrequente Schalldämmung durch die Kreuzlattung jedoch teils deutlich geduziert. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden. Bei der Holzmassivwand betrug die Verbesserung im bewerteten Schalldämm-Maß 4 dB. Mit der Anpassung C_{50} und $C_{tr,50}$ liegt die Verbesserung bei 4 dB und 2 dB.

Geringe Verbesserungen konnten auch erreicht werden, wenn die Tiefe der Konterlattung vergrößert wurde. Diese zeigen sich vorrangig in den Frequenzverläufen der Schalldämm-Maße. In den Einzahlwerten sind diese nicht ersichtlich. Die günstigsten Schalldämmungen in den einzelnen Frequenzbändern wurden dabei mit der größten Konterlattungstiefe von 120 mm bei den beiden Fassadensystemen (Nut und Feder und Rhombusleisten) erzielt.

Die Montage der Konter- oder Traglatten in Alu-Konsolen, die auf einer Wand befestigt werden, zeigt keinen Vorteil gegenüber der üblichen direkten Montage der Lattung. Selbst beim Verringern der Anzahl der Konsolen von fünf auf drei ergaben sich keine Vorteile in der Schalldämmung.

4.3.4 Optimierungsansätze

Im Zuge der Messreihe wurde eine Reihe an potenziellen Optimierungen untersucht. Diese sind nachfolgend nochmals zusammenfassend aufgelistet:

- Beschwerung der Fassade,
- Entkoppelung der Unterkonstruktion für die Fassade,
- Beschwerung der Fassade und Entkoppelung der Unterkonstruktion für die Fassade,
- Alternatives Befestigungssystem für die Unterkonstruktion.

Die Maßnahmen zeigten unterschiedliche Ergebnisse. Prinzipiell zeigte das Beschweren der Fassade gute Verbesserungen, die auch die tieffrequente Schalldämmung nur wenig beeinflussten. Mit der Entkoppelung der Unterkonstruktion konnten ebenfalls Verbesserungen erzielt werden, wobei diese unter jenen der Beschwerung lagen und die tieffrequente Schalldämmung ebenfalls nachteilig beeinflusst haben. Wurden beide Ansätze kombiniert, konnten die höchsten Verbesserungen erzielt werden, wobei teilweise trotzdem die tieffrequente Schalldämmung verringert wurde. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten bei der hinterlüfteten Fassade waren im Einzahlwert im Bereich von 1 dB bis 2 dB. Deutlich effektiver waren die Maßnahmen bei der Fassade mit stehender Luftschicht mit Verbesserungen im Bereich von 2 dB bis 6 dB. Die Fassade mit stehender Luftschicht ist aus hygrothermischer Sicht nur bedingt zu empfehlen (vgl. Anhang 1). Dort ist es ratsam die hinterlüftete Variante zu wählen.

Das alternative Befestigungssystem für die Unterkonstruktion erzielte leichte Verbesserungen im Einzahlwert gegenüber einer direkt befestigten Konter- bzw. Traglattung, im tiefen Frequenzbereich kam es wiederum zu verringerten Schalldämmungen. Das System kann somit an Massivwänden (Holz oder mineralisch) eingesetzt werden vor allem wenn eine außen liegende Dämmebene verwendet wird. Es sollte aber darauf geachtet werden, die tieffrequente Schalldämmung nicht gravierend zu verschlechtern.

4.3.5 Einfluss Bauteilgröße/Prüfraumvolumen

Im Allgemeinen stimmen die durchgeführten Messungen im M-Prüfstand ($A = 10,8 \text{ m}^2$, $V_{\text{ER}} = 60 \text{ m}^3$) und XL-Prüfstand ($A = 10,8 \text{ m}^2/20,7 \text{ m}^2$, $V_{\text{ER}} = 153 \text{ m}^3$), sowohl für die beiden Grundwandtypen (Holzmassiv und Holzrahmen), als auch für die Wände mit Fassade gut überein. Die Abweichungen liegen in den meisten Fällen innerhalb der Vorgaben nach ÖNORM EN ISO 12999-1:2020 für die Einzahl- und Spektrum-Anpassungswerte. Somit können die Messdaten aus den beiden Prüfständen gut verglichen werden.

Neben der Einzahlangaben zeigen auch die Frequenzverläufe zumeist eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der unterschiedlichen Größenverhältnisse der Prüfstände und auch der Bauteile, sind jedoch tieffrequent teils größere Unterschiede ersichtlich. Weitere systematische Messungen sind notwendig, um die noch offenen Fragestellungen zu klären.

4.4 Schallschutz – Bauakustische Simulationen (Anhang 4)

Im Zuge der Modellierung wurden im ersten Schritt diverse Materialeigenschaften gemessen. Weitere unbekannte Parameter wurden bei ersten Simulationen anhand der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße variiert und untersucht. Speziell die Modellierung der Fassade war aufgrund der Nut-Feder-Verbindung herausfordernd. Es wurde jedoch gezeigt, wie die Modellierung einer Fassade als Plattenwerkstoff gelingt. Sowohl für die Grundwände ohne Fassade als auch jene mit Fassade wurde über den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz mit Ausnahmen lag die Abweichung des simulierten Schalldämm-Maßes im Bereich ± 5 dB pro Terzband. Tieffrequent kommt es insgesamt zu größeren Abweichungen. Diese können auf im Modell nicht erfasste Raumeigenschaften sowie die Vereinfachung der Einspannung zurückgeführt werden. Die gemessenen und simulierten Einzahlwerte R_w inkl. der Spektrumanpassungswerte C und C_{tr} sind in Tabelle 7 ergänzend zu der Gegenüberstellung der Frequenzverläufe in Abschnitt 2.3 in Anhang 4 zusammenfassend dargestellt. In den Spalten „Differenz“ wird jeweils die Differenz des simulierten zu dem gemessenen Wert dargestellt.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Einzahlwerte R_w inkl. der Spektrumanpassungswerte C und C_{tr} .**Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung (Fensteröffnung)**Ohne FassadeMit Fassade

	gemessen	simuliert	Differenz		gemessen	simuliert	Differenz
R_w =	41 dB	40 dB	-1 dB	R_w =	47 dB	47 dB	0 dB
C =	-1 dB	-2 dB	-1 dB	C =	-2 dB	-3 dB	-1 dB
C_{tr} =	-4 dB	-3 dB	-1 dB	C_{tr} =	-8 dB	-8 dB	0 dB

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-LärchenschalungOhne FassadeMit Fassade

	gemessen	simuliert	Differenz		gemessen	simuliert	Differenz
R_w =	39 dB	39 dB	0 dB	R_w =	45 dB	46 dB	1 dB
C =	-2 dB	-2 dB	0 dB	C =	-3 dB	-3 dB	0 dB
C_{tr} =	-7 dB	-5 dB	2 dB	C_{tr} =	-9 dB	-7 dB	2 dB

Betongrundwand mit vertikaler Nut-Feder-LärchenschalungOhne FassadeMit Fassade

	gemessen	simuliert	Differenz		gemessen	simuliert	Differenz
R_w =	57 dB	56 dB	-1 dB	R_w =	64 dB	59 dB	-5 dB
C =	-1 dB	-1 dB	0 dB	C =	-3 dB	-3 dB	0 dB
C_{tr} =	-4 dB	-5 dB	-1 dB	C_{tr} =	-8 dB	-10 dB	-2 dB

Es ist erkennbar, dass die simulierten Einzahlwerte, die den Frequenzbereich 100 Hz bis 3150 Hz abdecken, sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Die maximale Abweichung beträgt mit Ausnahme der Betonwand mit Fassade 2 dB. Der Grund für die große Unterschätzung der Betonwand mit Fassade liegt mutmaßlich an den Absorptionseigenschaften des Dämmstoffs, die im Modell aufgrund einer Vereinfachung nicht korrekt abgebildet werden.

Es wurde gezeigt, dass mithilfe der FEM Holzrahmen- und Betongrundwände gut prognostiziert werden können. Auch die Modellierung der Fassade mit stehender Luftschicht konnte mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. In weiteren Forschungsarbeiten sollte jedenfalls die Frequenzabhängigkeit der Plattenwerkstoffe untersucht und im Modell berücksichtigt werden. Besonders gilt das für die Nut-Feder-Verbindung der Fassade, die wie sich in Abschnitt 2.2.3 in Anhang 4 gezeigt hat, eine hohe Frequenzabhängigkeit aufweist. Weiters sollte bei Modellierung einer Dämmebene angrenzend an die Hinterlüftungsebene jedenfalls die Absorption des Dämmstoffs modelliert werden. Diese bietet Potential zur Verbesserung des Modells der Betonwand mit Fassade. In einer weiterführenden Arbeit sollte in jedem Fall auch die offene Frage beantwortet werden, wie eine hinterlüftete Fassade (vgl. Abschnitt 2.2.4 in Anhang 4) in der Simulationsumgebung abgebildet werden kann.

4.5 Feuchteresistenz - Konstruktiver Holzschutz (Anhang 5)

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Untersuchung des Feuchteverhaltens verschiedener Holzfassadensysteme unter simulierten Witterungsbedingungen in einer Klimakammer. Untersucht wurden sowohl offene als auch geschlossene Fassaden aus Fichten- und Lärchenholz, wobei unterschiedliche Konstruktionsdetails, Beschichtungen und Positionierungen der Fassadenbahn berücksichtigt wurden. Die Untersuchungen erfolgten unter zyklischen Beregnungs- und Trocknungsphasen, während die Holzfeuchte kontinuierlich durch elektrische Widerstandsmessungen erfasst wurde. Ein besonderes Augenmerk lag auf den Holzfeuchteverläufen in kritischen Konstruktionsdetails.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Positionierung der Fassadenbahn, die Abschrägung der Traglattung, die Gestaltung der Fugen sowie, in einigen Fällen, die Art der Beschichtung einen erheblichen Einfluss auf das Feuchtigkeits- und Trocknungsverhalten der Fassaden haben.

Bei offenen Fassaden zeigte sich, dass die Platzierung der Fassadenbahn einen erheblichen Einfluss auf die Trocknung der Fassadenschalung und deren Verformung hat. Insbesondere führte die direkte Platzierung der Fassadenbahn unmittelbar hinter der Fassadenschalung zu verlängerten Trocknungszeiten und ausgeprägten Verformungen, die bis zum Abriss der Verbindungsmittel reichten.

Die Abschrägung der Traglattung beeinflusste sowohl die Wasserableitung als auch die Holzfeuchte. Traglatten, die auf der Oberseite zur Fassadenschalung hin abgeschrägt waren, resultierten in höheren Holzfeuchtwerten und verlängerten Trocknungszeiten im Knotenpunkt. Daher wird für offene Fassaden die Verwendung horizontaler Traglatten empfohlen, die an der Oberseite von der Fassadenschalung weg in eine mindestens 1 cm tiefe Entwässerungsebene abgeschrägt sind.

Die Breite der Traglattung sowie die Nageldichtung zwischen Traglattung und Wandbildner zeigten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte. Daher ist zwischen Traglattung bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner keine zusätzliche Nageldichtung, wie Dichtbänder oder Dichtmittel, erforderlich.

Für geschlossene Fassaden ergab die Untersuchung, dass die Fugenbreite (offen oder geschlossen) und die Art der Hinterlegung der Fuge einen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte in der Fassadenschalung und der Traglattung haben. Eine geschlossene Fuge, die direkt auf einer Traglatte aufliegt, führte zu verlängerten Trocknungszeiten und zur Bildung von Feuchtenestern. Im Gegensatz dazu ermöglichte eine offene Fuge, die auf einer oder zwei Traglatten aufliegt, eine schnellere Trocknung. Daher können Fugenbreiten von 1 cm auf einer Traglatte (8–12 cm breit) oder auf zwei Traglatten (4–8 cm breit) empfohlen werden. Es wird zudem empfohlen, die vertikalen Enden der Fassadenbretter in einem Winkel von 15° abzuschrägen. Einzelne fliegende Stöße (kein durchgehender Stoß) können nur bei horizontalen Nut- und Feder-Schalungen empfohlen werden.

Des Weiteren zeigte sich, dass das Beschichtungssystem nur einen geringen Einfluss auf die Holzfeuchte hatte. Allerdings erwies sich eine Beschichtung des Hirnholzes als vorteilhaft.

Hinsichtlich des innovativen Fassadensystems, bei dem eine Dämmung direkt an der Rückseite der Fassadenschalung angebracht wird, zeigen erste Ergebnisse, dass die Dämmung keinen nachteiligen Einfluss auf das Feuchteverhalten hat. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich hierbei um eine wissenschaftliche Voruntersuchung handelt, weshalb weitere Langzeit- und Freilandversuche notwendig sind.

Zusammenfassend leisten die gewonnenen Erkenntnisse einen wichtigen Beitrag zur optimalen Gestaltung von Holzfassaden im Hinblick auf den Feuchteschutz. Die Ergebnisse sollen die bestehende Literatur, wie das Buch "Fassaden aus Holz", ergänzen und erweitern. Ein detailliertes Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Fassadendesign, Regen, Wind und anderen klimatischen Faktoren, die die Wasserpenetration von Gebäuden beeinflussen, ist entscheidend für die Planung moderner, widerstandsfähiger und umweltfreundlicher Gebäude. Die neuen Erkenntnisse wurden bereits als Merkblatt und einem erläuternden Dokument zu den Hintergründen von der Holzforschung Austria veröffentlicht und sind somit der Praxis zugänglich gemacht worden.

4.6 Feuchteresistenz - Umweltverhalten und Korrosion (Anhang 6)

4.6.1 Beschleunigte Leaching-Verfahren

Im small-scale Leaching Test können kleindimensionierte Materialproben vergleichend untersucht werden. In diesem Zusammenhang erwies sich das Verfahren nach EN 16105, das im Testansatz in Bezug auf mögliche Bewitterungsszenarien die größte Praxisnähe aufweist, am praktikabelsten. Zur Beurteilung der Umweltrelevanz von Fassadenelementen ist diese Methode dennoch nur bedingt geeignet, da der geringe Maßstab nicht ausreicht, um Fassadenkomplettsysteme abzubilden. Umwelteinträge können jedoch aus verschiedenen Komponenten der Elemente erfolgen. So wurden in den durchgeführten Untersuchungen nicht nur Biozidemissionen aus beschichteten Holzoberflächen detektiert, sondern auch umweltrelevante Abwaschungen von Zink aus unbeschichteten verzinkten Brandschutzblechabschnitten nachgewiesen.

Im Sinne einer holistischen Betrachtung möglicher Umwelteinträge ist daher das gesamte Bauteil zu berücksichtigen. Dies ist ausschließlich im large-scale Maßstab durchführbar.

Der Vergleich der Ergebnisse aus dem large-scale Maßstab zeigt eine gute Übereinstimmung mit den im Freiland generierten Daten. Die wesentlichen Unterschiede im Emissionsverhalten der einzelnen Varianten, welche im large-scale Versuch bereits nach 28 Tagen festgestellt werden konnten, bestätigten sich im Freiland innerhalb der

18-monatigen Expositionszeit. Insbesondere trifft dies auf die Detektion umweltrelevanter Substanzen wie Zink oder Biozide zu. Auch Säureemissionen, welche den pH-Wert der Abwaschwässer beeinflussen, werden bereits im large-scale Schnellverfahren erkannt.

Der entwickelte Test ist demnach nicht nur dazu geeignet, Unterschiede im Umweltverhalten verschiedener Varianten relativ zueinander aufzuzeigen, sondern lässt sich auch auf die Praxis übertragen.

4.6.2 Beschleunigte Korrosionsverfahren

Korrosionsanfällige Blecharten zeigten durch die verschärften Bedingungen im small-scale Versuch bereits nach wenigen Tagen/Wochen erste Korrosionsschäden. Die beobachteten Effekte stimmten mit den für diese Bleche im Freilandversuch über längere Zeiträume beobachteten Korrosionseffekten (Auswaschung von Zink, Verfärbung der Oberfläche und Auftreten von sichtbaren Schäden) überein. Bei den im Freilandversuch unbeschädigt gebliebenen Blechen wurden auch im beschleunigten Korrosionsversuch keine sichtbaren Effekte an den Blechoberflächen beobachtet. Die einzige Ausnahme dazu bildete die im small-scale Versuch bei stark sauren Extrakten auftretende Passivierung der unbeschichteten Aluminiumblechoberflächen, welche jedoch lediglich zu einer leichten weißlichen Verfärbung, aber nicht zum Auftreten von Korrosionsschäden führte.

Der Aufbau des entwickelten beschleunigten Korrosionsversuchs ermöglicht es somit, in kurzer Zeit einzuschätzen ob bei der Kombination einer Brandschutzblechart mit einer ausgewählten Holzart Korrosionseffekte auftreten können.

4.6.3 Praxisrelevanten Erkenntnisse

Zusammenfassend können die folgenden praxisrelevanten Erkenntnisse aus den Ergebnissen abgeleitet werden.

- Beschleunigte small-scale Leaching Laborverfahren liefern variable Ergebnisse und eignen sich nur bedingt zur Beurteilung von Fassadenelementen
- Beschleunigte large-scale Leaching Tests lassen sich auf die Praxis übertragen
- Aus unbeschichteten verzinkten Blechen wird in der Nutzungsphase durch Bewitterung Zink freigesetzt
- Zinkeinträge in die Umwelt haben ökotoxikologische Relevanz
- Bei unbeschichteten verzinkten Blechen kommt es in Kombination mit extraktstoffreichen Hölzern zu Korrosionseffekten (Lärche, Eiche)
- Beschleunigte small-scale-Korrosionstests lassen sich auf die Praxis übertragen

4.7 Handlungsempfehlungen (Anhang 7)

Um den Know-how-Transfer in die Branche zu erleichtern wurden die Projektergebnisse als Merkblatt und Hintergrunddokument entsprechend Abbildung 42 und Abbildung 43 publiziert.

MERKBLATT: NEUE ERKENNTNISSE ZU HOLZFASSADEN

Dieser Publikation liegt das im Herbst 2023 abgeschlossene zweijährige FFG-Forschungsprojekt „Coole Hülle - Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik“ zugrunde. Das übergeordnete Ziel des Projekts war es, mithilfe von optimierten Holzfassaden den Einfluss des Klimawandels auf das Raumklima im Sommer zu reduzieren. Zusätzlich wurden Aspekte zur Verbesserung des Schallschutzes sowie zur Verbesserung der Feuchteresistenz der Holzfassaden untersucht. Daraus ergeben sich ergänzend zum Stand der Technik folgende neue Erkenntnisse:

1 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER FEUCHTERESISTENZ

- 1.1 Bei offener Fassade keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung**
Eine direkt auf der Rückseite der Fassadenschalung anliegende Fassadenbahn führt zu Feuchteansammlungen und Verformungen (Schüsselungen) der Fassadenbretter bis hin zum Schraubenabriss.
- 1.2 Keine Nageldichtung hinter der Lattung erforderlich**
Zwischen Traglattung bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner ist keine Nageldichtung (Dichtbänder oder Dichtmittel) erforderlich.
- 1.3 Wasserableitung in und aus der Fassade beachten**
Bei offenen Fassaden benötigen horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm.
- 1.4 Längsstöße bei Fassadenbrettern exakt planen und ausführen**
Neben dem Generalstoß mit Z-Blech kann auch ein Generalstoß mit 1 cm Fuge auf einer Traglatte (8 – 12 cm breit) [1.4a] oder auf 2 Traglatten (4 – 8 cm breit) [1.4b] ausgeführt werden; vertikale Fassadenbrettenden ca. 15° schräg geschnitten. Einzelne fliegende Stöße (kein Generalstoß) sind nur bei Nut- und Feder-Schalungen empfohlen.
- 1.5 Unbeschichtete verzinkte Bleche oder Zinkbleche bei Holzfassaden vermeiden**
Unbeschichtete verzinkte Bleche sind aufgrund ihres Korrosionspotentials nicht für extraktstoffreiche Holzarten geeignet, wenn über das Holz ablaufendes Wasser in Kontakt mit dem Blech kommen kann. Aus ökologischen Gründen wird generell von unbeschichteten verzinkten Blechen oder Zinkblechen abgeraten, da Zink freigesetzt wird.

2 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DES SCHALLSCHUTZES

- 2.1 Geschlossene hinterlüftete Fassaden meist günstiger hinsichtlich Schallschutz**
Geschlossene Fassaden erreichen bei Holzrahmenwänden ein bis zu 4 dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß als offene Fassaden.
- 2.2 Bei Kreuzlattung die Traglattung nicht durchschrauben**
Wird die Traglattung nur in die Konterlattung und nicht bis in die Grundwand geschraubt, sind Verbesserungen im bewerteten Schalldämm-Maß von bis zu 2 dB möglich (aus statischen Gründen ist ggf. eine dickere Konterlattung notwendig). Die Traglattung dabei möglichst zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung anordnen.
- 2.3 Lattung mit Vollgewindeschrauben am tragenden Wandbildner befestigen**
Vollgewindeschrauben bewirken einen geringeren Anpressdruck und damit eine geringere Schallbrücke, Verbesserungen im bewerteten Schalldämm-Maß von bis zu 1 dB sind möglich.

Version 1 2024

Abbildung 42: Seite 1 des publiziertes Merkblatt über die praxisrelevanten Projektergebnisse



NEUE ERKENNTNISSE ZU HOLZFASSADEN – HINTERGRÜNDE

Feuchteresistenz – Schallschutz – Sommerlicher Wärmeschutz



Abbildung 43: Publiziertes Hintergrunddokument über die praxisrelevanten Projektergebnisse

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Förderung und folgenden Projektpartnern für die Unterstützung des Projekts Coole Hülle: Bundesgremium Baustoff-, Eisen und Holzhandel, Bundesinnung Holzbau, Fachverband der Holzindustrie Österreichs - Fachgruppe Bau und Fachgruppe Laubholz, Österreichischer Fertighausverband, Verband der Europäischen Hobelindustrie, ARWAG Wohnpark Errichtungs-, Vermietungs- und Beteiligungsgesellschaft m.b.H., Getzner Werkstoffe GmbH, J. u. A. Frischeis GmbH, MIGRA Gemeinnützige Wohnungsges.m.b.H., Osmo Holz und Color GmbH & Co KG, Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH, SHIGA GmbH, Stora Enso WP Bad St. Leonhard GmbH, Weiss GmbH, Weissenseer Holz-System-Bau GmbH

6 Literatur

- [1] Umweltbundesamt Deutschland: Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100, 2013, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/zu-erwartende-klimaaenderungen-bis-2100> [Zugriff am: 11.01.2021].
- [2] Austrian Panel on Climate Change: Österreichischer Special Report (ASR18) – Gesundheit, Demographie und Klimawandel. Final Report, Wien Ausgabe 2018.
- [3] Voss, K.; Künz, C.: Klimadaten und Klimawandel - Untersuchungen zum Einfluss auf den Energiebedarf, den Leistungsbedarf und den thermischen Komfort von Gebäuden. In: Bauphysik 34 (2012), Heft 5, S. 189-196.
- [4] Churkina, G.; Organschi, A.; Reyer, C.P.O. et al.: Buildings as a global carbon sink. In: Nature Sustainability 3 (2020), Heft 4, S. 269-276.
- [5] Teischinger, A.; Stingl, R.; Praxmarer, G.O.: Holzbauanteil in Österreich – Statistische Erhebung aller Holzbauvorhaben in den Jahren 1998-2008-2018. Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe - BOKU, Wien, Österreich Ausgabe 2019.
- [6] Saxa, K.: Die Fassade der Zukunft – Ein Positionspapier der ÖGNI Arbeitsgruppe Fassade, Wien Ausgabe 2021.
- [7] Liersch, K.W.: Vorhangfassaden – Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes, Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen Heft 1, Bauverlag, Wiesbaden, 1981.
- [8] Treberspurg, M.; Österreicher, D.; Inigo, C.V.: Hitze! vermeiden - Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Wohnbau – Technologieleitfaden Sommerliche Überwärmung. Universität für Bodenkultur Wien - Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für konstruktiven Ingenieursbau, Wien Ausgabe 2018.

- [9] *Künzel, H.; Mayer, E.*: Einfluß der Hinterlüftung leichter Außenwände auf den sommerlichen Wärmeschutz. Fraunhofer Institut für Bauphysik Ausgabe 1979.
- [10] *Girma, G.M.; Tariku, F.*: Experimental investigation of cavity air gap depth for enhanced thermal performance of ventilated rain-screen walls. *In: Building and Environment* 194 (2021), S. 107710.
- [11] *Lercher, P.*: Von der Evidenzgrundlage zu den neuen WHO-Leitlinien für Umgebungslärm – Entstehung und die Konsequenz für die Mitgliedsländer der EU. *In: Akustik Journal* (2019), Heft 2, S. 12-20.
- [12] World Health Organization: Environmental Noise Guidelines for the European Region, Copenhagen (Denmark) Ausgabe 2018.
- [13] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates Text von Bedeutung für den EWR. Europäische Union, 2011.
- [14] *Ferk, H.; Rüdiger, D.; Riederer, G. et al.*: Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel – Einfluss der Bauweise und weiterer Faktoren. *In: Zuschnitt* (2016), Juni, S. 1-24.
- [15] *Grussa, A. de; Andrews, D.; Chalk, A. et al. (Hrsg.)*: A Case Study assessing the impact of Shading Systems combined with Night-Time Ventilation strategies on Overheating within a Residential Property, 2017.
- [16] *Mrak, J.; Štrancar, J.*: Overheating in residential passive house – Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. *In: Energy and Buildings* 43 (2011), Heft 6, S. 1443-1451.
- [17] *Capon, R.; Hacker, J. (Hrsg.)*: Modelling climate change adaptation measures to reduce overheating risk in existing dwellings, 2009.
- [18] *Porritt, S.M.; Cropper, P.C.; Shao, L. et al.*: Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *In: Energy and Buildings* 55 (2012), S. 16-27.
- [19] *Rijal, H.B.; Tuohy, P.G.; Nicol, J.F. et al.*: Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort – energy use and overheating in buildings. *In: Journal of Building Performance Simulation (Journal of Building Performance Simulation)* 1 (2008), Heft 1, S. 17-30.
- [20] *Bachinger, J.; Wolffhardt, R.; Nusser, B.*: Sommer, Sonne, Hitze – Wohin geht die Reise? – Klimawandel und sommerliche Überwärmung im Wohnbau. *In: Holzbau - die neue Quadriga* (2021), Heft 1, S. 45-48.
- [21] *Bachinger, J.; Wolffhardt, R.*: Das Fenster im (Klima-)Wandel – Große Fensterflächen sind möglich, wenn. *In: Glaswelt* 71 (2020), Heft 8, S. 62-63.
- [22] *Teibinger, M.; Ehrlich, F.*: Energy efficiency Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden. Holzforschung Austria Ausgabe 2014.
- [23] *Hauser, G.*: Bauphysikalische Grundlagen Wärmelehre, 2003.

- [24] *Bachinger, J.; Tieben, J.; Wolffhardt, R. et al.*: PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen – Endbericht, Wien Ausgabe 2022.
- [25] *Forsthuber, B.*: Lebensdauervorhersage von Holzbeschichtungen – Ausgewählte Ergebnisse des dreijährigen Europäischen Forschungsprojektes SERVOWOOD. Holzforschung Austria Ausgabe 2018.
- [26] *Truskaller, M.*: Schwarz ist das neue Weiss – Wie Beschichtungen mit "Cool Pigments" die Oberfläche weniger aufheizen. *In: HFA-Magazin* (2018), Heft 4, S. 6-7.
- [27] *Thiele, A.M.; Sant, G.; Pilon, L.*: Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls. *In: Energy Conversion and Management* 93 (2015), Heft 9, S. 215-227.
- [28] *Evola, G.; Marletta, L.; Sicurella, F.*: A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *In: Building and Environment* 59 (2013), S. 517-527.
- [29] *Bentz, D.P.; Turpin, R.*: Potential applications of phase change materials in concrete technology. *In: Cement and Concrete Composites* 29 (2007), Heft 7, S. 527-532.
- [30] *Castellón, C.; Medrano, M.; Roca, J. et al.*: Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels. *In: Renewable Energy* 35 (2010), Heft 10, S. 2370-2374.
- [31] *Zhang, H.; Xu, Q.; Zhao, Z. et al.*: Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation. *In: Solar Energy Materials and Solar Cells* 102 (2012), S. 93-102.
- [32] *Kalnæs, S.E.; Jelle, B.P.*: Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *In: Energy and Buildings* 94 (2015), S. 150-176.
- [33] *Künzel, H.M.*: Bedeutung von Klimabedingungen für die Feuchtesicherheit voll gedämmter Altbaudächer. Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Karl Gertis, 1998.
- [34] *Kehl, D.; Hauswirth, S.; Weber, H.*: Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss? *In: Bauphysik* 32 (2010), Heft 3, S. 144-148.
- [35] *Kalnins, M.A.; Bayer, R.*: Photochemical degradation of wood. US Forest Service, Forest Products Laboratory, 1966.
- [36] *Bulian, F.; Collavini, F.; Matellon, A.*: Investigating the Effects of Weathering on Wood Coatings. *In: FME Transactions* 45 (2017), Heft 3, 405-411.
- [37] *Bulian, F.; Matellon, A.; Melchior, A. et al.*: Using DMA and UV-Vis spectroscopy to predict the performance of wood coatings in outdoor use. *In: Surface Coatings International* 94 (2011), Heft 5, S. 177.
- [38] *Heinskill, J.*: Möglichkeiten der UV-Stabilisierung farbloser Holz-Außenanstriche. *In: Farbe & Lack* 100 (1994), Heft 12, S. 1011-1015.

- [39] *Guo, H.; Fuchs, P.; Cabane, E. et al.*: UV-protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures. *In: Holzforschung* 70 (2016), Heft 8, S. 253.
- [40] *Kehl, D.; Müller, A.*: Parameteruntersuchung des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden – Sommerliches Komfortklima. Jahreszwischenbericht 2010. Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau, Bern Ausgabe Dezember 2010.
- [41] *Neusser, M.; Roozen, N.B.; Müllner, H. et al.*: Messung des Einflusses von Dübeln zur Befestigung von Wärmedämmverbundsystemen auf das Luftschalldämmmaß von Außenwänden in Massivbauweise. *In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hrsg.): 45. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2019)*, Rostock (Deutschland), 2019.
- [42] *Santoni, A.; Bonfiglio, P.; Davy, J.L. et al.*: Sound transmission loss of ETICS cladding systems considering the structure-borne transmission via the mechanical fixings: Numerical prediction model and experimental evaluation. *In: Applied Acoustics* (2017), Heft 122, S. 88-97.
- [43] *Miskinis, K.; Dikavicius, V.; Buska, A. et al.*: Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study. *In: Applied Acoustics* 137 (2018), S. 62-68.
- [44] *Weber, L.; Müller, S.*: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen. F 2949, Stuttgart Ausgabe 2015.
- [45] *Weber, L.; Kaltbeitzel, B.*: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen im Holz- und Leichtbau, Stuttgart Ausgabe 2018.
- [46] *Weber, L.; Kaltbeitzel, B.; Maysenhölder, W.*: Verbesserung der Schalldämmung von leichten Ständerwänden bei tiefen Frequenzen. Fraunhofer Institut für Bauphysik Ausgabe 2018.
- [47] *Holtz, F.; Rabold, A.; Hessinger, J. et al.*: Hochschalldämmende Außenbauteile aus Holz. Labor für Schall- und Wärmemesstechnik, Rosenheim Ausgabe 2004.
- [48] *Nusser, B.; Lux, C.; Ferk, H.*: ETICS and Exterior Wooden Cladding on timber frame walls – influence of facade system and construction details on the airborne sound insulation. *In: e-Forum Acusticum 2020, Proceedings, virtual, 2020*, S. 1241-1248.
- [49] *Müllner, H.*: Robuste Bauteile – Damit die erzielten Schalldämmeigenschaften nicht an eine Ziehung von Lottozahlen erinnern. *In: Holzbau - die neue Quadriga* (2020), Heft 1, S. 25-29.
- [50] *Pirch, P.; Nusser, B.*: Schallschutz von WDVS auf Brettsper Holz wänden – Einflussfaktoren und Verbesserungspotentiale. *In: AKÖH (Hrsg.): 9. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress. AKÖH, Leipzig, 2018*, S. 40-44.
- [51] *Nusser, B.; Lux, C.*: Schalldämmung von Holzmassivbauteilen – BSP-Außenwände mit WDVS aus EPS und Mineralwolle. *In: Holzbau - die neue Quadriga* (2018), Heft 5, S. 40-44.
- [52] *Rabold, A.; Bacher, S.*: Wärmedämmverbundsysteme und Außendämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz in der Altbausanierung – Prognose und

- Optimierung der schalltechnischen Eigenschaften – Abschlussbericht. F 2898. Fraunhofer IRB Verlag Ausgabe Januar 2014.
- [53] *Ferk, H.; Leh, C.; Mosing, M. et al.*: Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau - Teil 2: Holzmassivbauweise. *In: Holzbau - die neue Quadriga* (2020), Heft 5, S. 46-51.
- [54] *Niampira Daza, A.; Zamora I Mestre, J.L.*: Lightweight ventilated facade prototype: acoustic performance evaluation when the ventilation surface of the air chamber varies. *In: : Acoustics 2012, Proceedings, Nantes (France), 2012.*
- [55] *Niampira Daza, A.; Zamora, J.L.*: Acoustic performance in a lightweight ventilated façade for building refurbishment. *In: Revista de la Construcción. Journal of Construction, Vol. 18 (2019), Iss. 2, pp. 247-257.*
- [56] *Zamora I Mestre, J.L.; Niampira Daza, A.*: Lightweight ventilated façade: Acoustic performance in laboratory conditions, analysing the impact of controlled ventilation variations on airborne sound insulation. *In: Building Acoustics* (2020).
- [57] *Schumacher, R.; Mechel, F.P.*: Schallschutz von Hinterlüfteten Fassaden Ausgabe 1981.
- [58] *Nurzyński, J.*: Is Thermal Resistance Correlated With Sound Insulation? *In: Energy Procedia* 78 (2015), S. 152-157.
- [59] *Semprini, G.; Cocchi, A.; Marinosci, C.*: Possible correlation between acoustic and thermal performances of building structures. *In: , Paris, 2008, S. 4527-4532.*
- [60] *Di Bella, A.; Granzotto, N.; Pavarin, C.*: Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements. *In: European Acoustics Association (Hrsg.): 7th Forum Acusticum. Polish Acoustical Society, Krakau, 2014.*
- [61] *Di Bella, A.; Semprini, G.*: Balancing of thermal and acoustic insulation performances in building envelope design. *In: : InterNoise 2015, San Francisco, 2015.*
- [62] *Bard, D.; Negreira, J.; Guigou-Carter, C. et al.*: Modelling prerequisites – FEM/SEA – Impact and Airborne Sound. Report no STB01 WG1. RISE Research Institutes of Sweden AB, Göteborg (Sweden) Ausgabe 2017.
- [63] *Kouyoumji, J.-L.; Bard, D.; Borello, C. et al.*: Challenges for acoustic calculation models in "Silent Timber Build" – Part 2. *In: Magill North S.A, Australian Acoustical Society (Hrsg.): 43rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2014) – Improving the World through Noise Control. Australian Acoustical Society, Melbourne, 2014.*
- [64] *Bolmsvik, A.; Ekevid, T.*: FE Modeling of wooden building assemblies. *In: : Inter-Noise 2010, Lisbon, 2010.*
- [65] *Poblet-Puig, J.; Rodríguez Ferran, A.; Guigou-Carter, C. et al.*: The Role of Studs in the Sound Transmission of Double Walls. *In: Acta Acustica united with Acustica* 95 (2009), Heft 3, S. 555-567.
- [66] Sophie P. S. Maluski; Barry M. Gibbs: Application of a finite-element model to low-frequency sound insulation in dwellings. *In: The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 108 (2000), Iss. 4, pp. 1741-1751.*

- [67] *Sandberg, G.*: Finite Element modelling of fluid-structure interaction. Lund (Schweden), Technical University of Lund, PHD Thesis, 1989.
- [68] *Cummings, A.; Mulholland, K.A.*: The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field. *In: Journal of Sound and Vibration* 8 (1968), Heft 1, S. 126-133.
- [69] *Donato, R.J.*: Sound Transmission through a Double-Leaf Wall. *In: The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51 (2005), 3A, p. 807.
- [70] *Davy, J.L.*: Predicting the Sound Insulation of Walls. *In: Building Acoustics* 16 (2009), Heft 1, S. 1-20.
- [71] *Blödt, A.; Rabold, A.; Halstenberg, M.*: Schallschutz im Holzbau - Grundlagen und Vorbemessung, Berlin Ausgabe 2019.
- [72] *Neusser, M.*: Analyse des Einflusses von Verbindungsmitteln auf das Schalldämm-Maß von leichten Trennwandkonstruktionen durch realitätsnahe Modellierung von Schraub- und Klebeverbindungen. Wien, Technische Universität Wien, Dissertation, 2017.
- [73] *Neusser, M.; Bednar, T.*: Modifikation eines Modells von Verbindungsmitteln zur Prognose des Schalldämmmaßes von Leichtbaukonstruktionen mittels Finiten Elemente Methode in dem erweiterten Frequenzbereich. *In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* accepted (2021).
- [74] *Caterino, N.; Zoppo, M.D.; Maddaloni, G. et al.*: Seismic assessment and finite element modelling of glazed curtain walls. *In: Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 61 (2017), Iss. 1, pp. 77-90.
- [75] ÖNORM EN 16637-2 Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung. ENTWURF, Ausgabe April 2021.
- [76] ONR CEN/TS 15119-1:2018 04 15 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Abschätzung von Emissionen von mit Holzschutzmitteln behandeltem Holz an die Umwelt - Teil 1: Holz auf dem Lagerplatz nach der Behandlung und Holzprodukte in Gebrauchsklasse 3 (nicht abgedeckt, ohne Erdkontakt) - Laborverfahren. ONR, Ausgabe April 2018.
- [77] DIN EN 16105:2011 12 Beschichtungsstoffe - Laborverfahren zur Bestimmung der Freisetzung von Substanzen aus Beschichtungen in intermittierenden Kontakt mit Wasser. NORM, Ausgabe Dezember 2011.
- [78] *Schoknecht, U.; Gruycheva, J.; Mathies, H. et al.*: Leaching of biocides used in façade coatings under laboratory test conditions. *In: Environmental science & technology*, Vol. 43 (2009), Iss. 24, pp. 9321-9328.
- [79] *Fürhapper, C.*: Abwaschung von Bioziden aus unterschiedlichen Fassadenwerkstoffen. *In: Holzforschung Austria* (Hrsg.): Holzoberflächentag 2019, Wien, 2019, S. 73-80.

- [80] *Fürhapper, C.; Weigl, M.*: Fassade im [Ab]Fluss - Umwelteinträge der Gebäudehülle im Kontext von Norm und Praxis. *In: Holzforschung Austria* (Hrsg.): Holz_Haus Tage 2019. Holzforschung Austria, Bad Ischl, 2019, S. 76-84.
- [81] *Wicke, D., Matzinger, M.; Sonnenberg, H.; Caradot, N. et al.*: Biozide im Regenwasserabfluss Berlins. *In: Mitt Umweltchem Ökotox* 23 (2017), Heft 3, S. 81-85.
- [82] *Charng, T.; Lansing, F.*: Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility. *In: NASA Technical Report, TDA Progress Report* (1982), S. 42-69.
- [83] *Gerengi, H.; Tascioglu, C.; Akcay, C. et al.*: Impact of Copper Chrome Boron (CCB) Wood Preservative on the Corrosion of St37 Steel. *In: Industrial & Engineering Chemistry Research* 53 (2014), Heft 49, S. 19192-19198.
- [84] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 2: Brandschutz (OIB-330.2-012/19). Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien.
- [85] *Schober, P.*: Holzfassaden im Langzeittest – Ergebnisse einer achtjährigen Untersuchung zum Abwitterungsverhalten Ausgabe 2013.
- [86] *Zelinka, S.L.; Passarini, L.*: Corrosion of metal fasteners embedded in acetylated and untreated wood at different moisture contents. *In: Wood Material Science & Engineering* 15 (2020), Heft 4, S. 182-189.
- [87] *A. Noor, E.*: The Corrosion Behavior of C-steel, Al-alloy and Pure-Cu in Red Oak Wood Extract – A Comparative Study. *In: International Journal of Electrochemical Science* (2019), S. 2539-2559.
- [88] *Zelinka, S.L.; Glass, S.V.; Boardman, C.R. et al.*: Comparison of the corrosion of fasteners embedded in wood measured in outdoor exposure with the predictions from a combined hygrothermal-corrosion model. *In: Corrosion Science* 102 (2016), S. 178-185.
- [89] *Gauvent, M.; Rocca, E.; Meausoone, P.J. et al.*: Corrosion of materials used as cutting tools of wood. *In: Wear* 261 (2006), Heft 9, S. 1051-1055.
- [90] *Weigl, M.; Kandelbauer, A.; Hansmann, C. et al.*: Application of Natural Dyes in the Coloration of Wood. *In: Bechtold, T.; Mussak, R.* (Hrsg.): Handbook of Natural Colorants. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2009, S. 277-313.
- [91] Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. iVTH; Fraunhofer-Institut für Holzforschung - Wilhelm-Klauditz-Institut WKI: Korrosion metallischer Verbindungsmittel in Holz und Holzwerkstoffen Ausgabe 2013.
- [92] *Schumacher, M.; Tieben, J.; Nusser, B.*: Holzfassaden im Fokus – Teil 2: Wärmeschutz. *In: Holzbau - die neue quadriga*, Heft Heft 6. Kastner, Wolnzach (D), 2023, S. 43-46.
- [93] *Nusser, B.; Lux, C.; Stenitzer, A.*: Holzfassaden im Fokus – Teil 1: Schallschutz. *In: Holzbau - die neue quadriga*, Heft Heft 5. Kastner, Wolnzach (D), 2023, S. 46-49.
- [94] *Stenitzer, A.; Neusser, M.; Nusser, B.*: Bauakustische Simulation einer Holzrahmenwand. *In: TU Wien* (Hrsg.): Tagungsband der BauSim 2024 – 10te Konferenz von IBPSA-DACH. TU Wien, Wien, 2024, S. 384-391.

- [95] *Nusser, B.; Lux, C.; Ferk, H.*: Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau – Teil 1: Holzrahmenbauweise. *In*: Holzbau - die neue Quadriga (2020), Heft 4, S. 43-47.
- [96] 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung. ÖNORM EN ISO, Ausgabe 2021.
- [97] *Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.*: Technische Akustik – Grundlagen und Anwendungen. Springer Bln, Berlin, 2009.
- [98] *Kaltenbacher, M.*: Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators – Finite elements for computational multiphysics, third edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [99] *Allard, J.F.; Atalla, N. (Hrsg.)*: Propagation of sound in porous media - modelling sound absorbing materials. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (United Kingdom), 2009.
- [100] *Blevins, R.D.*: Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing, Malabar, Florida, 2001.
- [101] *Niemz, P.; Sonderegger, W.*: Holzphysik – Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017.
- [102] *Villasante, A.; Fernández-Serrano, Á.*: Dynamic modulus of elasticity in flexural vibration tests of *Pinus sylvestris* sawn timber obtained with fundamental resonant frequency and overtones. *In*: Holzforschung 76 (2022), Heft 6, S. 485-492.
- [103] *Koch, C.; Felhofer, M.; Fürhapper, C.*: Holzfassaden im Fokus – Teil 3: Feuchteresistenz. *In*: : Holzbau - die neue quadriga, Heft Heft 1. Kastner, Wolnzach (D), 2024, S. 50-53.
- [104] *Hill, C.; Kymäläinen, M.; Rautkari, L.*: Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment. *In*: Journal of Materials Science 109 (2022), Heft 1, S. 54.
- [105] *Jakiela, S.; Bratasz, Ł.; Kozłowski, R.*: Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. *In*: Wood Science and Technology 42 (2008), Heft 1, S. 21-37.
- [106] *Rüther, P.; Time, B.*: External wood claddings – performance criteria, driving rain and large-scale water penetration methods. *In*: Wood Material Science & Engineering 10 (2015), Heft 3, S. 287-299.
- [107] *Stover, E.A.; Sundsoy, M.H.; Andenæs, E. et al.*: Rain Intrusion through Horizontal Joints in Facade Panel Systems: Experimental Investigation. *In*: Buildings 12 (2022), Heft 10, S. 1497.
- [108] *Schober, P.; Koch, C.; Maximilian, N. et al.*: Fassaden aus Holz: proHolz-Information, ProHolz Information, proHolz Austria, Wien, 2018.

**Cooler Hülle -
Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen
Klimawandel und Technik**

AP3: Kühle Fassade -
Freilanduntersuchungen und Simulationen

Anhang 1 zum Endbericht

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: F51810

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor:innen

DI Johannes Tieben-Köttl

Mara Schumacher M.Sc.

Dr. Bernd Nusser

Weitere Projektmitarbeiter/innen

Johannes Reiter, Elias Uiblein, Gregor Wurlitzer

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Material und Methoden.....	5
1.1	Freilanduntersuchungen.....	5
1.1.1	Standort.....	5
1.1.2	Aufbau und Varianten	6
1.1.3	Messtechnik und Messpositionen.....	15
1.1.4	Simulationsmodelle.....	19
1.1.5	Thermische Nachsimulation des Freilandversuchs zur Ermittlung der Wärmestrombilanz	21
1.1.6	Berechnung des Kühlenergieeinsparungspotenzials optimierter hinterlüfteter Fassadenvarianten	22
2	Ergebnisse und Diskussion.....	24
2.1	Freilandversuch.....	24
2.1.1	Validierung des Modells zur thermischen Simulation des Wandbildners.....	24
2.1.2	Oberflächentemperaturen und Wärmeeintrag durch den Wandbildner.....	27
2.2	Validierung des thermischen Fassadenmodells	43
2.3	Simulationsstudie zum Kühlenergieeinsparungspotenzial im Wohnbau durch optimierte Fassadenkonzepte.....	47
2.3.1	Simulation der Fassadenbahntemperaturen mittels thermischer Vorhangfassadensimulation.....	47
2.3.2	Berechnung des Wärmeeintrags durch die opake Fläche eines fiktiven Gebäudes.....	51
3	Zusammenfassung.....	58

3.1	Freilanduntersuchungen	58
3.2	Simulationsstudie	60
4	Literatur	61

1 Material und Methoden

1.1 Freilanduntersuchungen

Das Rückgrat der im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen bildete ein im Realmaßstab angelegter Freilandversuch. Dieser wurde am Forschungshaus der Holzforschung Austria in Stetten (AT) durchgeführt. Der Kern des Versuchs war es, die realen Klimabedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) in verschiedenen ausgeführten Versuchsfassaden für mindestens einen Sommer und einen Winter unter realen, instationären Klimarandbedingungen aufzuzeichnen. Diese Aufzeichnungen sollten...

- 1.) ... eine erste Abschätzung des Energieeinsparungspotenzials der verschiedenen Ausführungsvarianten ermöglichen.
- 2.) ... zur Validierung eines thermischen FEM-Simulationsmodells herangezogen werden.

1.1.1 Standort

Das Forschungshaus der Holzforschung Austria (Abbildung 1) befindet sich direkt am HFA-Standort, Gewerbegebiet 6, AT-2100 Stetten (48°21'57.6"N 16°21'33.0"E, 169 m ü. Adria).

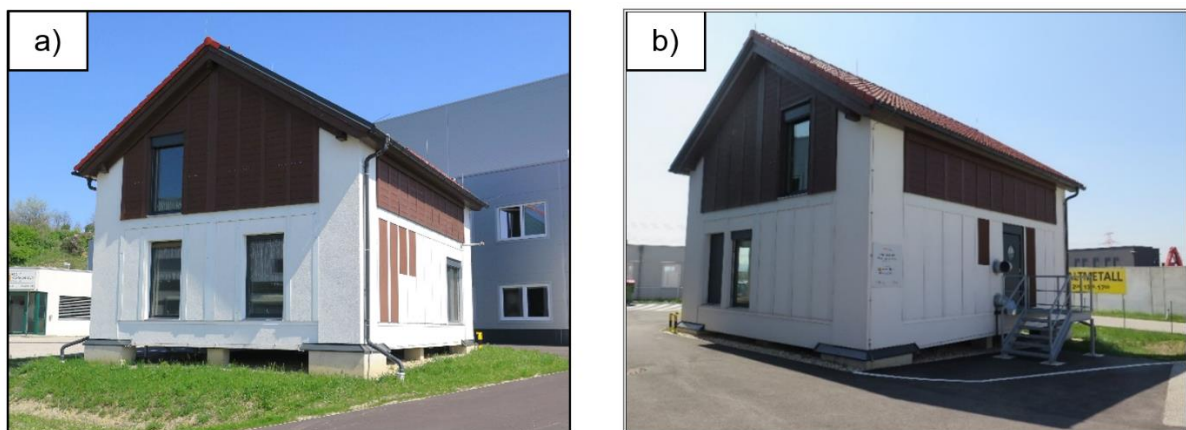


Abbildung 1: Forschungshaus der Holzforschung Austria in AT-2100 Stetten. a) Süd-West Ansicht. b) Nord-Ost Ansicht.

Die Außentemperatur liegt hier im Jahresmittel bei ca. 10,8 °C und die durchschnittliche relative Luftfeuchte bei 70 % bis 75 % bei überwiegenden Nordwest- und Südostwinden. Das Gelände ist eher flach, weshalb häufig Windgeschwindigkeiten bis 16 m/s auftreten können. Die Globalstrahlung (direkt + diffus) liegt im Jahresdurchschnitt bei 136,5 W/m² mit einem durchschnittlichen täglichen Maximum von 350 W/m² im Juni und 63 W/m² im Dezember [16]. Die Außenwände sind exakt in Nord-, Ost-, Süd- und Westrichtung ausgerichtet. Auf der Ostseite befindet sich in unmittelbarer Nähe des Forschungshauses die Halle des Akustik

Center Austria (ACA). In alle anderen Himmelsrichtungen sind die Fassaden des Hauses nahezu freistehend (Abbildung 2).

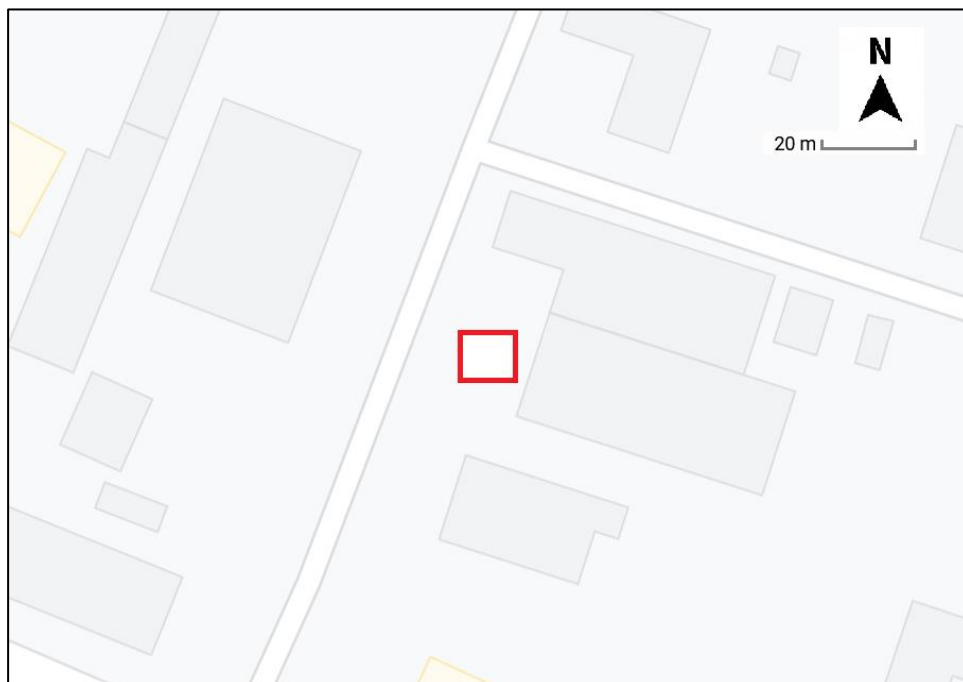


Abbildung 2: Lage und Umgebung des Forschungshauses (Quelle: maps.google.com).

1.1.2 Aufbau und Varianten

Für den Versuch wurden an der Süd- und Westfassade des Forschungshauses insgesamt 24 unterschiedliche Holzfassadenvarianten und 2 Putzreferenzfassaden mit WDVS auf einen Wandbildner in Holzleichtbauweise aufgebracht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Schichtaufbau und U-Wert des im Freilandversuch eingesetzten Wandbildners.

Schicht-Nr.	Aufbau (von außen nach innen)	Stärke in mm
1	diffusionsoffene Fassadenbahn (Farbe: schwarz) (nur bei Vorhangfassadenvarianten)	-
2	MDF	16
3	Mineralwolle ($\lambda = 0,038 \text{ W/mK}$)	240
4	OSB 3	15
U-Wert des Wandbildners: $0,152 \text{ W/m}^2\text{K}$		

Bei den Variationen handelte es sich zum einen um Oberflächenfarbvariationen (Südfassade) und zum anderen um konstruktive Variationen (Westfassade).



Abbildung 3: Süd-West Ansicht des Forschungshauses nach dem Umbau mit den Farbvariationen auf der Südseite und den konstruktiven Variationen auf der Westseite.

Es wurden Referenzvarianten definiert, die der üblichen Ausführung in der Praxis entsprechen. In Abbildung 4 ist die Referenzvariante der geschlossenen Vorhangfassaden dargestellt. Diese Variante hatte die folgenden Spezifikationen:

- Schalung:
 - Sibirische Lärche, 19 mm, Nut + Feder
 - Senkrechte Ausrichtung
 - Unbehandelte Oberfläche (gehobelt)
- Unterkonstruktion
 - 3 cm starke Hinterlüftungslattung + 3 cm starke Traglattung
 - 2,5 m Luftspaltlänge
 - Zu- und Abluftgitter (ca. 50 % Lochanteil)



Abbildung 4: Referenzvariante der geschlossenen, hinterlüfteten Fassade. Links: Vertikalschnitt. Mitte: Auf Wandbildner aufgebrachte Hinterlüftungs- und Traglattung. Rechts: Unbeschichtete, vertikale Fassadenschalung (sibirische Lärche).

In Abbildung 5 ist die Referenzvariante der offenen Vorhangfassaden dargestellt. Diese Variante hatte die folgenden Spezifikationen:

- Schalung
 - Sibirische Lärche, 24 x 68 mm, Rhombusprofil
 - waagerechte Ausrichtung
 - unbehandelte Oberfläche (gehobelt)
 - 14 mm Spalt zwischen Schalungsbrettern
- Unterkonstruktion
 - 3 cm Hinterlüftungslattung
 - schwarze Fassadenbahn



Abbildung 5: Referenzvariante der offenen, hinterlüfteten Fassade. Links: Horizontalschnitt. Rechts: Unbeschichtete, horizontale Rhombusschalung (sibirische Lärche).

Zusätzlich wurden zwei Vergleichsvarianten mit WDVS festgelegt (Abbildung 6). Das 80 mm starke EPS-WDVS ($\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$) wurde auf den gleichen Wandbildner aufgebracht, wie die Vorhangfassaden (Tabelle 1). Es wurde jedoch die Fassadenbahn entfernt (Schicht-Nr. 1). Es wurden zwei unterschiedliche WDVS Fassaden untersucht:

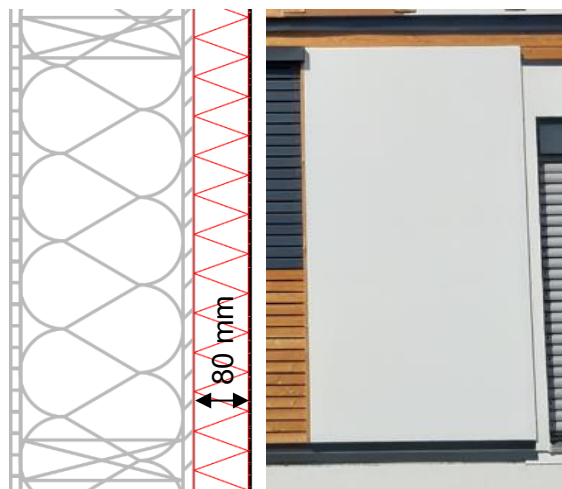


Abbildung 6: Verputzte Referenzvariante mit WDVS. Links: Horizontalschnitt. Fertig verputzte Fassade (Silikatputz).

1.1.2.1 Beschichtungsvariationen

Je nach Farbe der Fassadenoberfläche fällt die Absorption der kurzwelligen solaren Einstrahlung unterschiedlich stark aus, wodurch die Oberflächentemperatur und somit die Temperatur im Hinterlüftungsspalt stark beeinflusst wird. Um diesen Einfluss zu quantifizieren und im Simulationsmodell korrekt abbilden zu können, wurden die Freilandaufzeichnungen an Fassadenvarianten mit unterschiedlichem solaren Absorptionsgrad durchgeführt. Die Farbvariationen wurden an der Südseite des Forschungshauses aufgebracht. Die solaren Absorptionseigenschaften der verwendeten Beschichtungen wurden im Labor quantifiziert

(siehe Anhang A2) Abbildung 7 gibt eine Übersicht der unterschiedlich beschichteten Untersuchungsvarianten.



Abbildung 7: Übersicht und Codierung der unterschiedlich beschichteten Varianten auf der Südseite des Forschungshauses.

Folgende Beschichtungsvarianten sind dargestellt:

Geschlossene Fassade:

- A_2: Referenzvariante
- A_3: schwarz deckende Beschichtung (~RAL 7016)
- A_4: weiß deckende Beschichtung (~RAL 9010)
- A_5: schwarz deckende Beschichtung mit IR-reflektierenden Pigmenten (~RAL 7016)
- A_6: grau deckende Beschichtung mit im sichtbaren Bereich spiegelnden Aluminiumpartikeln

Offene Fassade:

- A_7.1: Referenzvariante
- A_7.2: schwarz deckende Beschichtung (~RAL 7016)
- A_1.1: weiß deckende Beschichtung (~RAL 9010)

- A_1.2: unbeschichtet mit weißer Fassadenbahn.

Putzfassade:

- A_8.1 und A_8.2: Weißer Silikatputz.

1.1.2.2 Konstruktive Variation

Auf der Westseite des Forschungshauses wurden verschiedenartige konstruktive Variationen an offenen und geschlossenen Vorhangfassaden untersucht (Abbildung 8).



Abbildung 8: Übersicht und Codierung der konstruktiven Varianten auf der Westseite des Forschungshauses.

In Bezug zur oben beschriebenen Referenzvariante wurde immer nur ein konstruktiver Parameter pro Variante geändert, um mögliche Abweichungen zu jener eindeutig auf den einzig variierten Parameter zurückführen zu können. Folgende konstruktive Maßnahmen wurden untersucht:

Geschlossene Fassade:

- Lattung bzw. Hinterlüftungsquerschnitt (Abbildung 9)
 - B_2: 3 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung (Referenzvariante)
 - B_3: 6 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung
 - B_4: 12 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung
 - C_6: 6 cm Hinterlüftungslattung ohne Traglattung (Horizontal ausgerichtete Schalungsbretter)
 - B_8: 1 cm Hinterlüftungslattung ohne Traglattung (Horizontal ausgerichtete Schalungsbretter)

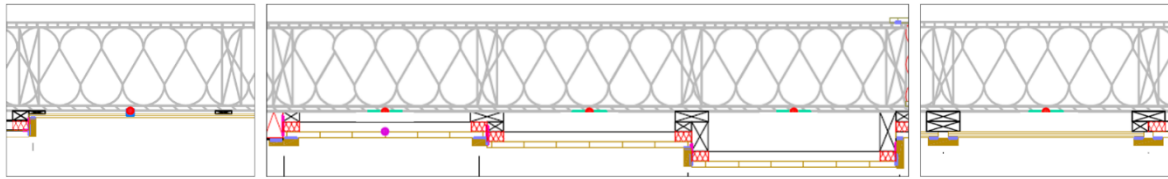


Abbildung 9: Horizontalschnitte durch die unterschiedlichen Lattungsvierungen. Von links nach rechts: 1 cm Hinterlüftungslattung ohne Traglattung (Horizontal ausgerichtete Schalungsbretter). 3 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung, 6 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung, 12 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung, 6 cm Hinterlüftungslattung ohne Traglattung (Horizontal ausgerichtete Schalungsbretter).

- Länge des Hinterlüftungsspalts (Abbildung 10)
 - B_2: ~ 2,5 m (Referenzvariante)
 - C_4: ~ 3,5 m (Mittelwert), Lüftungsöffnung unterm Giebel, 33 ° geneigt



Abbildung 10: Unterschiedliche Hinterlüftungsspaltlängen auf der Westfassade.

- Fassadenschalung (Abbildung 11, Abbildung 12)
 - B_2: Lärchenschalung, Nut + Feder (Referenzvariante)
 - B_7: Lärchenschalung, Boden/Deckel
 - C_2: Gedämmte Fassadenschalung, 25 mm Vollgipsplatten mit Latentwärmespeicher (Phase Change Material, kurz: PCM, Umschalttemperatur ~25 °C)
 - C_3: Gedämmte Fassadenschalung, 30 mm Mineralwolle ($\lambda = 0,031 \text{ W/mK}$)

Wichtiger Hinweis: Die gedämmten Varianten wurden mit 6 cm Traglattung ausgeführt, um auch mit der am Schirm aufgetragenen

Dämmschicht (~3 cm) die gleiche Luftraumgeometrie wie bei der Referenzvariante zu gewährleisten.

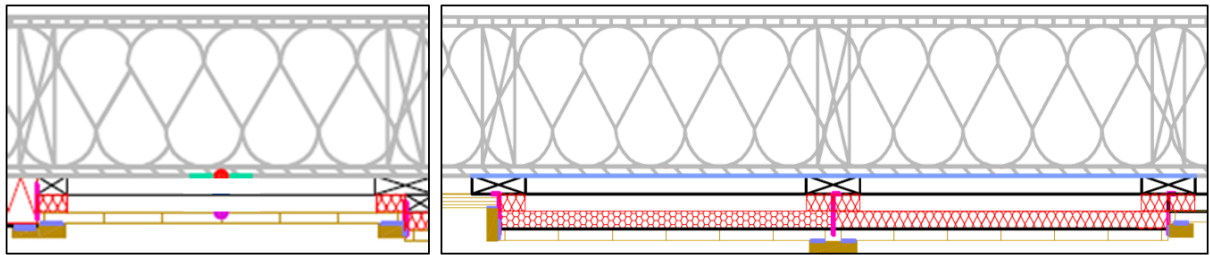


Abbildung 11: Horizontalschnitte unterschiedlicher Schalungsausführungen. Von links nach rechts: Lärchenschalung, Nut + Feder (Referenzvariante) / gedämmte Fassadenschalung, 25 mm Vollgipsplatten mit Latentwärmespeicher / gedämmte Fassadenschalung, 30 mm Mineralwolle. Wichtiger Hinweis: Die gedämmten Varianten wurden mit 6 cm Traglattung ausgeführt, um mit ~3 cm aufgebrachter Dämmung die gleiche Luftraumgeometrie wie bei der Referenzvariante zu gewährleisten.



Abbildung 12: Variante mit Boden-Deckel Schalung (sibirische Lärche).

- Be- und Entlüftungsquerschnitt
 - B_2: Hinterlüftet mit Zu- und Abluftgitter, 50 % Querschnittreduktion bzw. Lochanteil (Referenzvariante)
 - B_6: Stehende Luftschicht, Zu- und Abluftöffnung luftdicht abgeklebt
 - B_5: Belüftet mit Zuluftöffnung, Abluftöffnung abgeklebt

- C_7: Reduzierte Hinterlüftung, 90 % Querschnittsreduktion

Um die gewünschten Zu- und Abluftquerschnitte zu erhalten, wurde luftdichtes Klebeband auf den betreffenden Lochgitterbereich zwischen den beiden Konterlattungen der jeweiligen Ausführungsvariante aufgebracht (Abbildung 13).



Abbildung 13: Beispielhafte, abgeklebte Öffnungen. Oben links: Verschlossene Zuluftöffnung. Oben rechts: Verschlossene Abluftöffnung. Unten: 90 % verschlossene Zuluftöffnung.

Offene Fassade:

- Spaltgröße zwischen den Schalungsbrettern
 - C_1.2: 7 mm
 - C_1.1: 14 mm (Referenzvariante)
 - C_8.1: 21 mm
- Leistenorientierung
 - C_1.1: horizontal, 3 cm Hinterlüftungslattung (Referenz)
 - C_8.2: vertikal, 3 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung



Abbildung 14: Konstruktive Variationen der offenen Fassade. Oben links: 7 mm Spalt und 3 cm Hinterlüftungslattung. Unten links: 14 mm Spalt und 3 cm Hinterlüftungslattung (Referenzvariante). Unten rechts: 21 mm Spalt und 3 cm Hinterlüftungslattung. Oben rechts: vertikal, 3 cm Hinterlüftungslattung + 3 cm Traglattung.

1.1.3 Messtechnik und Messpositionen

1.1.3.1 Außenklima

Die Aufzeichnung des Außenklimas am Standort des Forschungshauses in Stetten erfolgte mittels Ahlborn FMD 770 Multisensor Wetterstation. Folgende Parameter wurden aufgezeichnet:

- Temperatur [°C]
- Luftfeuchte [% r.F.]
- Luftdruck [mbar]
- Regenmenge [mm] und – intensität [mm/h]
- Schneehöhe [mm]
- Windrichtung [°] und -geschwindigkeit [m/s]
- Globalstrahlung auf horizontale Fläche [W/m²]

Die Wetterstation war auf dem freistehenden Flachdach des Akustik Center Austria (ACA) am Standort des Forschungshauses angebracht (Abbildung 15).



Abbildung 15: Wetterstation Ahlborn FMD 770 am freistehenden Flachdach des ACA.

In Ergänzung dazu, wurde an der Süd- (Ahlborn FLA633-GS) und Westfassade (Ahlborn FLA613-GS) jeweils ein zusätzlicher Globalstrahlungssensor angebracht, mit denen die Globale Einstrahlung auf die beiden unterschiedlich ausgerichteten vertikalen Flächen explizit aufgezeichnet wurden. Diese Aufzeichnung war für die Validierung des zu entwickelnden Simulationsmodells notwendig (siehe Kapitel 1.1.4).



Abbildung 16: Vertikal ausgerichtete Globalstrahlungssensoren auf der Süd- (Ahlborn FLA633-GS) und Westfassade (Ahlborn FLA613-GS) des Forschungshauses.

Die gemessenen Umgebungsklimadaten wurden im 10-Minuten-Intervall aufgezeichnet. Der in der Auswertung und Validierung des Simulationsmodells betrachtete Aufzeichnungszeitraum zieht sich von Mai 2022 bis Februar 2023.

1.1.3.2 Bauteil- und Innenklimabedingungen

Parallel zu den Außenklimabedingungen wurden die Temperaturen sowie die relative Luftfeuchtigkeit an relevanten Positionen im und am Bauteil, sowie im Innenraum aufgezeichnet.

Bei allen geschlossenen Varianten gab es je nach Variante bis zu drei Messpositionen entlang der Variantenhöhe h ($h/6$ [Positionskürzel „u“], $h/2$ [Positionskürzel „m“], $(5 \cdot h)/6$ [Positionskürzel „o“]). Auf Breite (b) waren diese allesamt auf $b/2$ der Hinterlüftung positioniert (vgl. Abbildung 17 links).

Bei allen offenen Fassadenvarianten, gab es auf Höhe und Breite jeweils eine zentrierte Messposition (Positionskürzel „m“) auf $h/2$ und $b/2$ (vgl. Abbildung 17 rechts). Auch bei den Putzvarianten gab es auf Breite und Höhe nur eine zentrierte Messposition.

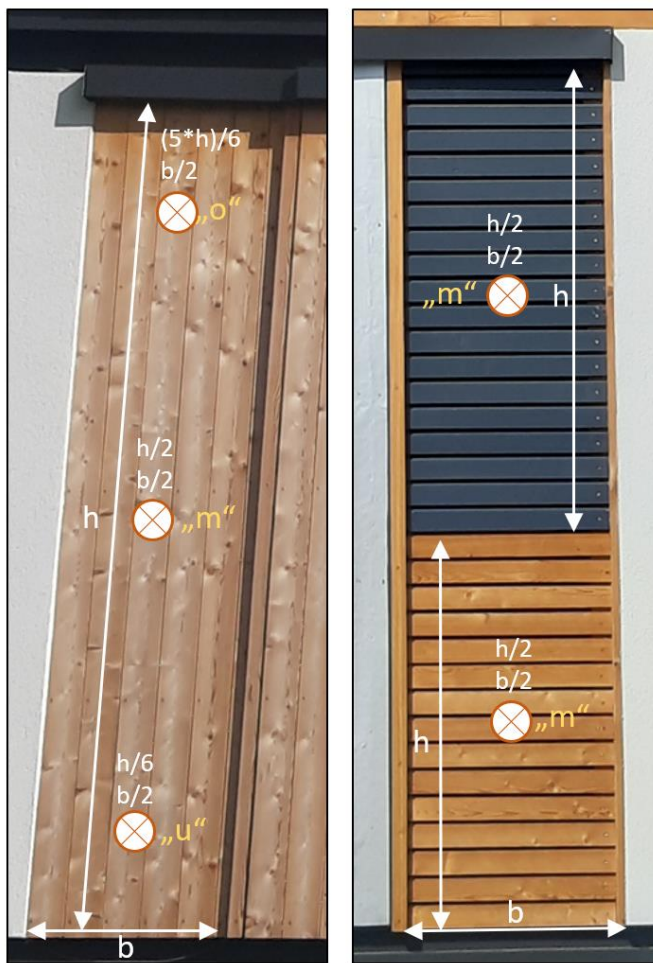


Abbildung 17: Höhen- und Breitenpositionen der unterschiedlichen Messstellen inkl. Positionskürzel („u“, „m“, „o“). Links: Geschlossene Fassadenvarianten. Rechts: Offene Fassadenvarianten.

Entlang der Fassaden- bzw. Wanddicke gab es je nach Variante bis zu fünf Messpositionen (vgl. Abbildung 18) an denen Temperatur (Sensor: Ahlborn NTC Fühler) und zum Teil die relative Luftfeuchtigkeit (Sensor: Ahlborn FHAD 46 C2) aufgezeichnet wurde.

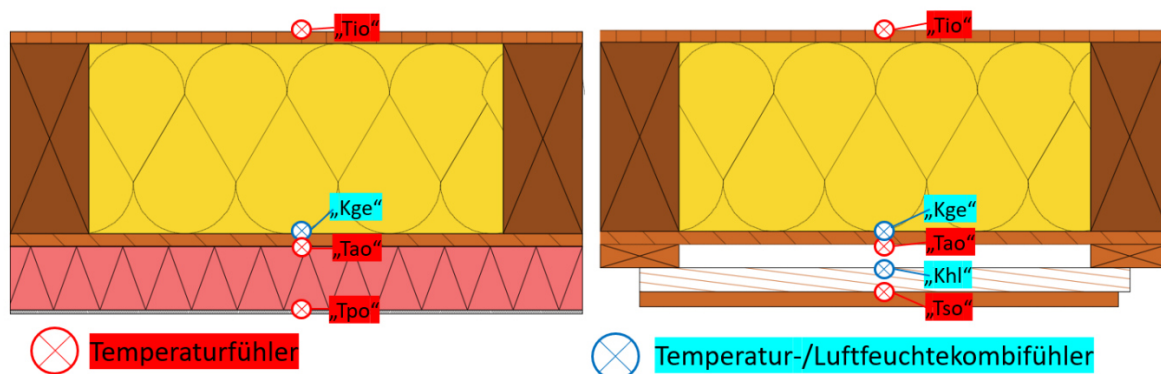


Abbildung 18: Sensorpositionen entlang der Fassaden- bzw. Wanddicke bei verputzten (links) und hinterlüfteten (rechts) Fassadenvarianten.

1.1.4 Simulationsmodelle

1.1.4.1 Modell zur thermischen Simulation von Vorhangfassaden

Um die thermischen Vorgänge in hinterlüfteten Fassaden mit fugenloser Schalung am digitalen Zwilling simulieren zu können, wurde ein entsprechendes Simulationsmodell in der kommerziellen Simulationssoftware Comsol Multiphysics® [1] entwickelt, welches die hier relevanten physikalischen Vorgänge weitestgehend berücksichtigt. Beginnend mit einem rein thermischen 1D Modell der konstruktiven Variante C_6 (siehe Kapitel 1.1.2.2) ohne explizite Berücksichtigung von thermischem Auftrieb in der Luftschicht und Wärmeübertragung von der Schalungsinnenseite und Wandaußenfläche durch langwelligen Strahlungsaustausch, wurde die Komplexität des Modells nach zunächst stichprobenartiger Schnellvalidierung (Definition siehe unten) bei Bedarf sukzessive erhöht. Um Konvergenzprobleme aufgrund sprunghafter Randbedingungen zu vermeiden, wurden für den Einsatz als Randbedingung im Simulationsmodell sämtliche Aufzeichnungsdaten geglättet (6-Stunden gleitende Mittelwerte). Nach erfolgreicher Langzeitvalidierung (Definition siehe unten) des Simulationsmodells der Variante C_6 wurde das Modell entsprechend der farblichen und konstruktiven Gegebenheiten anderer Varianten adaptiert. Die adaptierten Modelle wurden ebenfalls einer Langzeitvalidierung unterzogen.

Validierung des thermischen Fassadenmodells

Die stichprobenartige Schnellvalidierung wurde anhand geglätteter Messdaten (6-Stunden gleitende Mittelwerte) aus dem Freilandversuch von drei aufeinanderfolgenden, wolkenarmen Tagen durchgeführt (03.08. – 05.08.2023). Dazu wurden die Temperaturverläufe an den Dickenpositionen „Tso“, „Khl“ und „Kge“ (jeweils der Mittelwert der Höhenpositionen „u“, „m“, und „o“) der betreffenden Variante mit den simulierten Verläufen abgeglichen.

Zur Langzeitvalidierung wurden analog dazu die Mess- und Simulationsdaten (6-h-Mittelwerte) des Zeitraums zwischen dem 12.05.2022 und dem 12.02.2023 abgeglichen.

1.1.4.2 Modell zur thermischen Simulation des Wandbildners

Um die Wärmeströme durch den Wandbildner im Freilandversuch unter instationären Oberflächentemperaturen quantifizieren zu können, wurde im hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI Pro [2] ein Simulationsmodell des im Freilandversuch verwendeten Wandbildners erstellt. Der Schichtaufbau, die Temperaturrandbedingungen und die verwendeten Oberflächenkoeffizienten sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

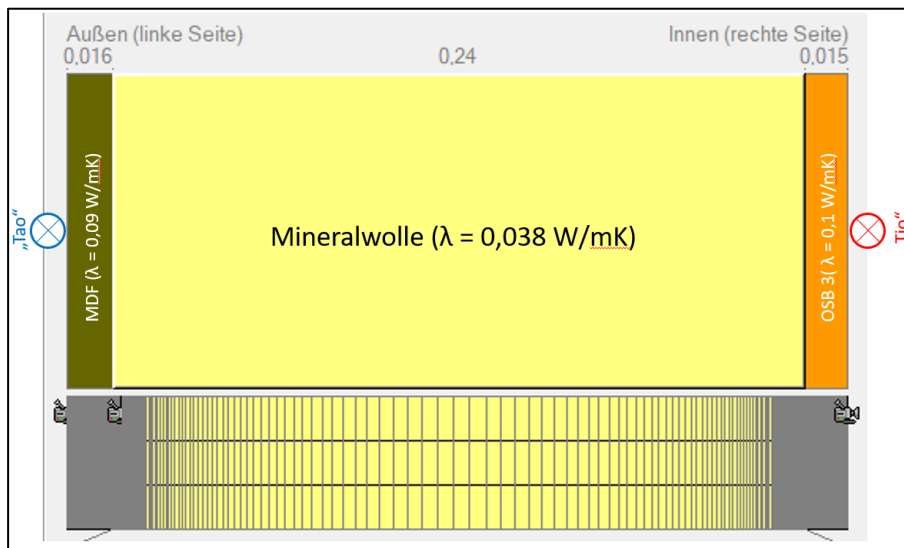


Abbildung 19: Schichtaufbau im Simulationsmodell des Wandbildners (WUFI Screenshot [2]).

Das Screenshot zeigt die Konfiguration der Oberflächenübergangskoeffizienten im WUFI-Modell:

- Außenoberfläche (linke Seite):**
 - Wärmeübergangswiderstand $[(\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}]$: 0.000001 (Benutzerdefiniert). Ein roter Pfeil weist auf diesen Wert mit der Beschriftung „Oberflächentemperaturen!“.
 - beinhaltet langwellige Strahlungsanteile $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$: 6.5
 - Windabhängig: ☐ (unaktiviert)
 - sd-Wert [m]: 0.3 (Benutzerdefiniert). Ein roter Pfeil weist auf diesen Wert mit der Beschriftung „Fassadenbahn“.
 - Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]: ---- (Keine Absorption/Emission)
 - Langwellige Strahlungsemissionszahl [-]: ----
 - Abminderungsfaktoren wegen Verschattung:
 - auf Absorptionszahl [-]: ---- (Keine Verschattung)
 - auf Emissionszahl [-]: ----
 - Explizite Strahlungsbilanz: ☐ (Hinweis: diese Option dient u.a. zur Berücksichtigung der Unterkühlung infolge langwelliger Abstrahlung. In sensiblen Fällen sind hinreichend genaue Gegenstrahlungsdaten erforderlich.)
 - Terrestr. kurzw. Reflexionsgrad [-]: ---- (Keine Reflexion)
 - Anhaftender Anteil des Regens [-]: ---- (Keine Regenwasserabsorption)
- Innenoberfläche (rechte Seite):**
 - Wärmeübergangswiderstand $[(\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}]$: 0.125 (Benutzerdefiniert)
 - sd-Wert [m]: ---- (Keine Beschichtung)

Abbildung 20: Verwendete Oberflächenübergangskoeffizienten im Simulationsmodell des Wandbildners (WUFI Screenshot [2]).

Validierung des thermischen Wandbildner-Modells

Zur Validierung des Modells wurde der gemessene Temperaturverlauf an der Position „Kge“ mit dem simulierten Verlauf an dieser Stelle abgeglichen (vgl. Abbildung 21).

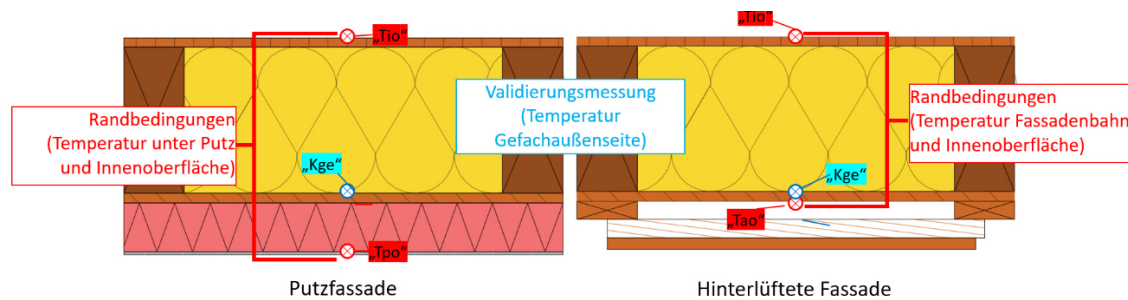


Abbildung 21: Temperaturrendbedingungen und Positionen der Validierungsmessstellen bei den unterschiedlichen Fassadentypen. Links: Putzfassade mit EPS WDVS. Rechts: Hinterlüftete Fassade.

1.1.5 Thermische Nachsimulation des Freilandversuchs zur Ermittlung der Wärmestrombilanz

Da die Wärmeströme im Freilandversuch nicht direkt gemessen wurden, wurde das nach Kapitel 1.1.4.2 erstellte und validierte Simulationsmodell herangezogen, um die Wärmestrombilanzen der unterschiedlichen Fassadenvarianten simulationsbasiert zu berechnen. Das Konzept und die verwendeten Randbedingungen sind in Abbildung 22 dargestellt. Als äußere Randbedingung wurden die Messwerte der Fassadenbahntemperatur („ T_{ao} “) herangezogen. Als innere Randbedingung wurde die gemessene Raumtemperatur im Forschungshaus herangezogen. Da im Forschungshaus keine aktive Kühlung eingesetzt wurde, wurden alle Zeiträume in denen die Innentemperatur $> 25\text{ °C}$ war in der Simulation konstant mit 25 °C angenommen. Der Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite wurde mit $0,125\text{ m}^2\text{K/W}$ angesetzt.

Ausgewertet wurden jeweils die Wärmestrombilanzen zwischen Mineralwolledämmung und OSB-Innenbeplankung im Zeitraum zwischen 01. Juli 2022 bis 31. August 2022 täglich von 06:00 Uhr bis 23:00 Uhr. Im Zeitraum zwischen 23:00 Uhr und 06:00 Uhr wurde eine Kühlung durch nächtliche Lüftung angenommen. Auftretende Wärmeströme durch die opaken Bauteile sind in diesem Fall als irrelevant klassifiziert und aus diesem Grund nicht in der Bilanz betrachtet.

Ziel der Studie war es, die Varianten direkt miteinander vergleichen zu können und eine erste Abschätzung des sommerlichen Einsparungspotenzials in kWh/m^2 Fassadenfläche machen zu können.

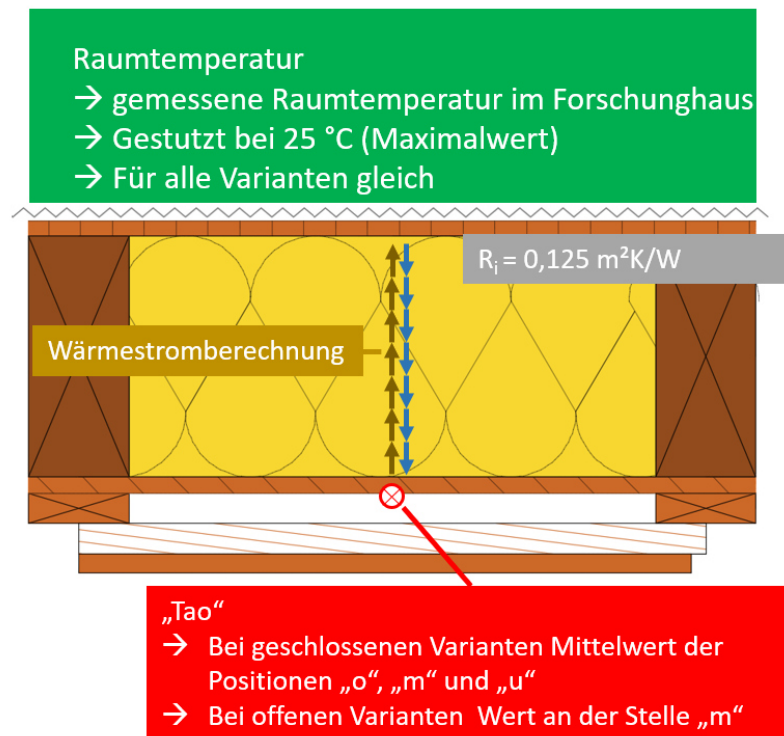


Abbildung 22: Konzept und Randbedingungen bei der thermischen Nachsimulation zur Ermittlung der Wärmestrombilanzen der unterschiedlichen Fassadenvarianten im Freilandversuch.

1.1.6 Berechnung des Kühlenergieeinsparungspotenzials optimierter hinterlüfteter Fassadenvarianten

Um einen Eindruck davon zu bekommen, welche Rolle die Fassadenausführung bei ganzheitlicher Betrachtung von Kühl- und Heizphase innerhalb eines Jahres zu bekommen, wurde ein einfaches fiktives, 8-geschössiges Wohngebäude mit 48 Wohneinheiten am Standort Wien konzipiert (Abbildung 23).

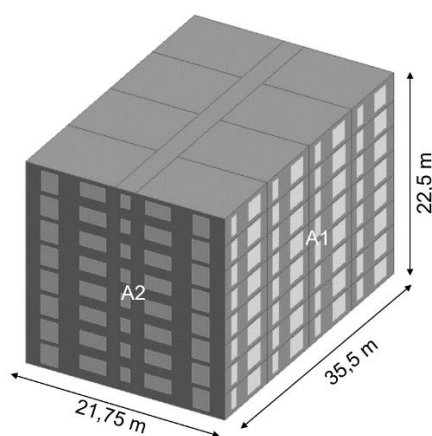


Abbildung 23: Skizze des fiktiven Wohngebäudes für die Variantenstudie.

Die Fassadenflächen dieses Gebäudes betrugen $\sim 800 \text{ m}^2$ (A1) und $\sim 490 \text{ m}^2$ (A2) bei 30 % Fensteranteil. Für den opaken Anteil der Fassade (560 m^2 bei A1 bzw. 343 m^2 bei A2) wurde eine geschlossene, hinterlüftete Fassade angenommen. Anhand dieses fiktiven Gebäudes wurde eine Variantenstudie zum Einfluss der Fassaden- und Wandausführung auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf durchgeführt. Folgende Parameter wurden variiert:

- Ausrichtung der Fassadenflächen
 - A1 $\rightarrow$ Nord/Süd, A2 $\rightarrow$ Ost/West
 - A2 $\rightarrow$ Nord/Süd, A1 $\rightarrow$ Ost/West
- Farbe der Fassadenschalung
 - Unbehandelte Lärchenfassade (frisch) ($a = 0,37$)
 - Unbehandelte Lärchenfassade (gealtert) ($a = 0,92$)
 - anthrazit beschichtete Holzfassade ($a = 0,92$)
 - weiß beschichtete Holzfassade ($a = 0,2$)
- U-Wert des Wandbildners
 - $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Klimabedingungen
 - Wien (Jahresstundendurchschnittswerte von 2000 – 2019, Messstation Hohe Warte)
 - Wien, Hohe Warte 2050 (RCP 8.5 Prognosemodell [3])
- Sonstiges
 - Stark reduzierte langwellige Strahlungsemission der Schalungsinnenfläche (von $\varepsilon = 0,95$ auf $\varepsilon = 0,05$).

Zur Ermittlung der Wärmeströme durch die opake Fläche des fiktiven Gebäudes unter Annahme der oben gegebenen Variationen wurde ein mehrstufiges Berechnungskonzept angewendet.

Im ersten Schritt wurden die thermischen Vorgänge in der hinterlüfteten Fassade unter Annahme der oben gelisteten, unterschiedlichen Fassadenfarben und Klimabedingungen für jede Himmelsrichtung (N/S/O/W) separat simuliert. Dazu wurde das nach Kapitel 1.1.4.1 erstellte und validierte Simulationsmodell verwendet. Output aus diesen Simulationen war der jeweilige Jahresverlauf der Oberflächentemperaturen an der Fassadenbahn bzw. an der Außenbeplankung.

Im nächsten Schritt wurden die ermittelten Oberflächentemperaturen in dem nach 1.1.4.2 erstellten und validierten Simulationsmodell als äußere Randbedingung angesetzt. Die Innenraumtemperatur wurde dabei gemäß EN 15026 [4] von der Außentemperatur abgeleitet und als Innere Randbedingung mit $R_i = 0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$ angesetzt. In diesem Simulationsschritt

wurde der U-Wert des Wandbildners variiert. Auch hier wurde für jede Himmelsrichtung (N/S/O/W) eine separate thermische Simulation durchgeführt. Output aus der Simulation war der Jahresverlauf der Wärmeströme durch die Außenwand in W/m^2 der verschiedenen Varianten. Diese wurden auf die opake Gebäudeflächen des fiktiven Gebäudes hochgerechnet, um die Wärmestrombilanzen (durch die opake Gebäudefläche) für das ganze Gebäude zu erhalten. Der dadurch zustande kommende Heiz- und Kühlenergiebedarf wurde unter folgenden Annahmen berechnet:

- Heizphase vom 01.11. bis 28.02. (00:00 Uhr bis 24:00 Uhr)
 - Summe der Wärmeströme in diesem Zeitraum ergibt winterliche Energiebilanz
 - Solare Gewinne relevant (positive Wärmeströme bei hohen Oberflächentemperaturen)
- Kühlphase vom 01.07. bis 31.08. (06:00 Uhr bis 23:00 Uhr)
 - Summe der Wärmeströme in diesem Zeitraum ergibt sommerliche Energiebilanz
 - In der Zeit zwischen 23:00 Uhr und 06:00 Uhr Wärmeströme nicht betrachtet (nächtliche Lüftung angenommen)

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Freilandversuch

2.1.1 Validierung des Modells zur thermischen Simulation des Wandbildners

In Abbildung 24 bis Abbildung 29 ist der Abgleich zwischen simulierter und gemessener Bauteiltemperatur an der Außenseite des Gefachs zur Validierung des nach Abschnitt 1.1.4.2 erstellten Simulationsmodells dargestellt (Abbildung 24/Abbildung 25: schwarz beschichtete, hinterlüftete Fassade, Abbildung 26/Abbildung 27: weiß beschichtete, hinterlüftete Fassade, Abbildung 28/Abbildung 29: weiß verputzte EPS WDVS Fassade). In allen Fällen zeigt sich im Jahresverlauf eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Auch im Hinblick auf den winterlichen und sommerlichen Detailverlauf (Abbildung 25, Abbildung 27, Abbildung 29) zeigen sich nur vernachlässigbar geringfügige Abweichungen. Das Modell ist damit validiert und kann im weiteren Verlauf zur Berechnung der auftretenden Wärmeströme im Freilandversuch herangezogen werden (siehe Abschnitt 2.1.2).

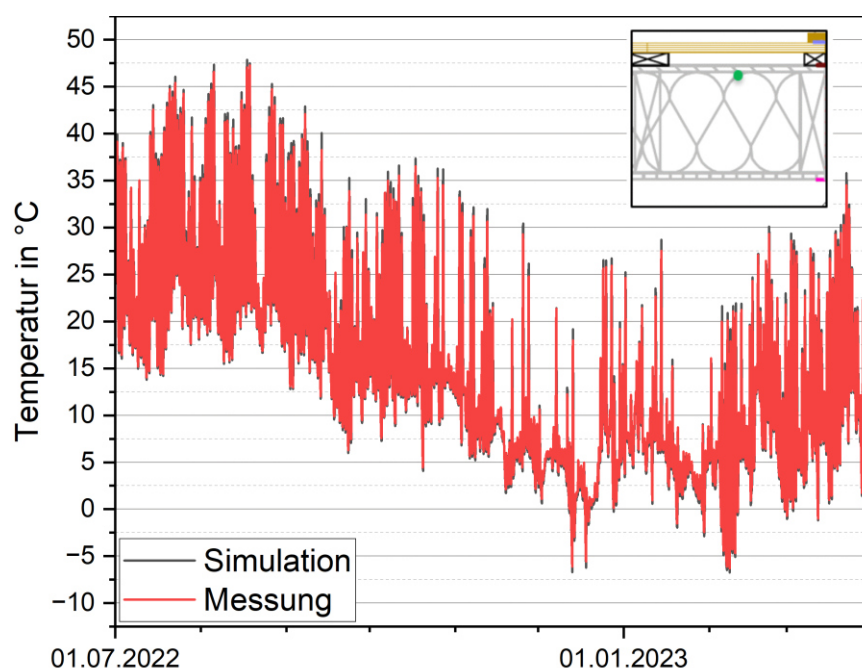


Abbildung 24: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der Variante „A_3: schwarz deckende Beschichtung (~RAL 7016)“ zwischen dem 01.07.2022 und dem 01.04.2023.

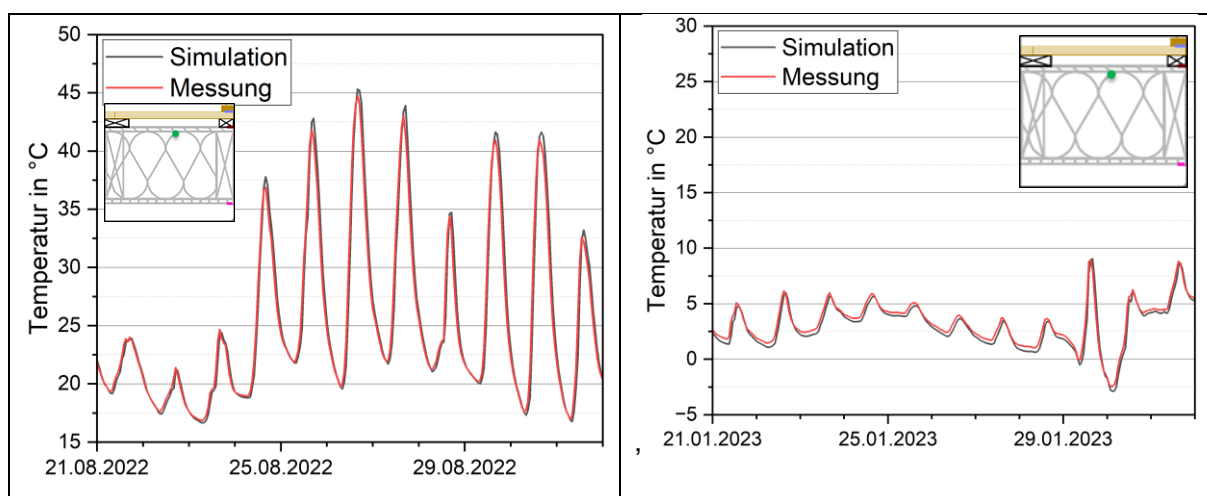


Abbildung 25: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der Variante „A_3: schwarz deckende Beschichtung (~RAL 7016)“. Detailverlauf: Links: Sommer. Rechts: Winter.

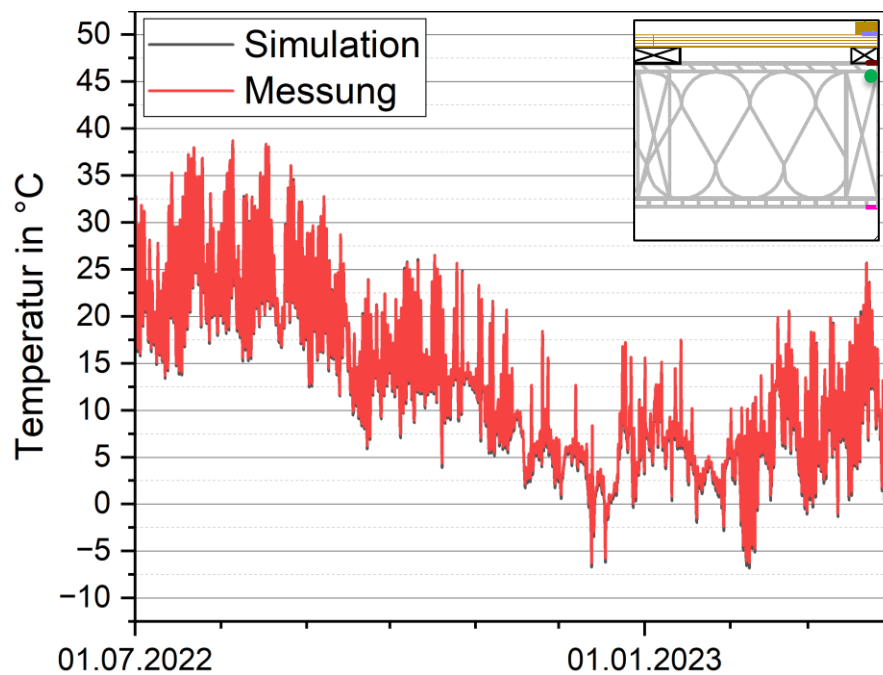


Abbildung 26: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der Variante „A_4: weiß deckende Beschichtung (~RAL 9010)“ zwischen dem 01.07.2022 und dem 01.04.2023.

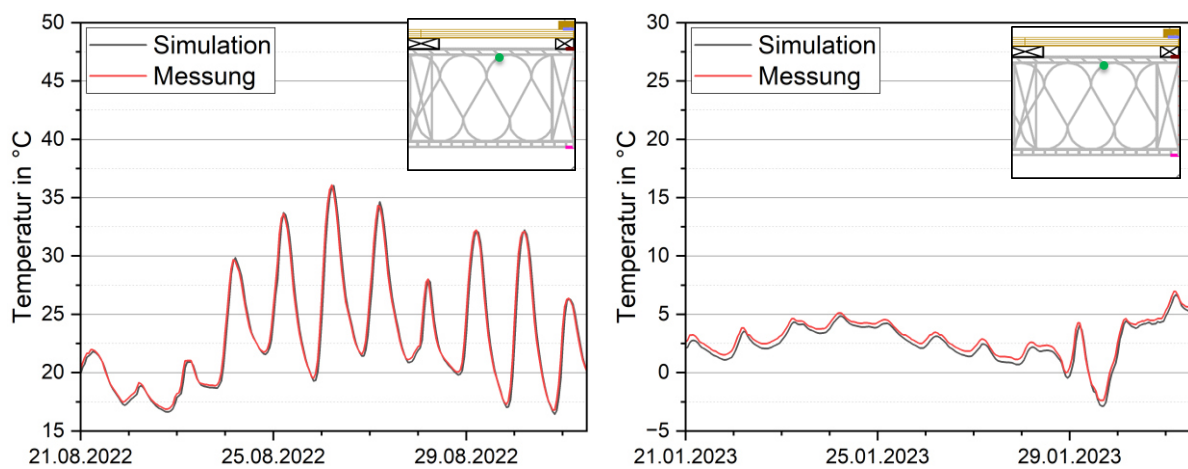


Abbildung 27: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der Variante „A_4: weiß deckende Beschichtung (~RAL 9010)“. Detailverlauf: Links: Sommer. Rechts: Winter.

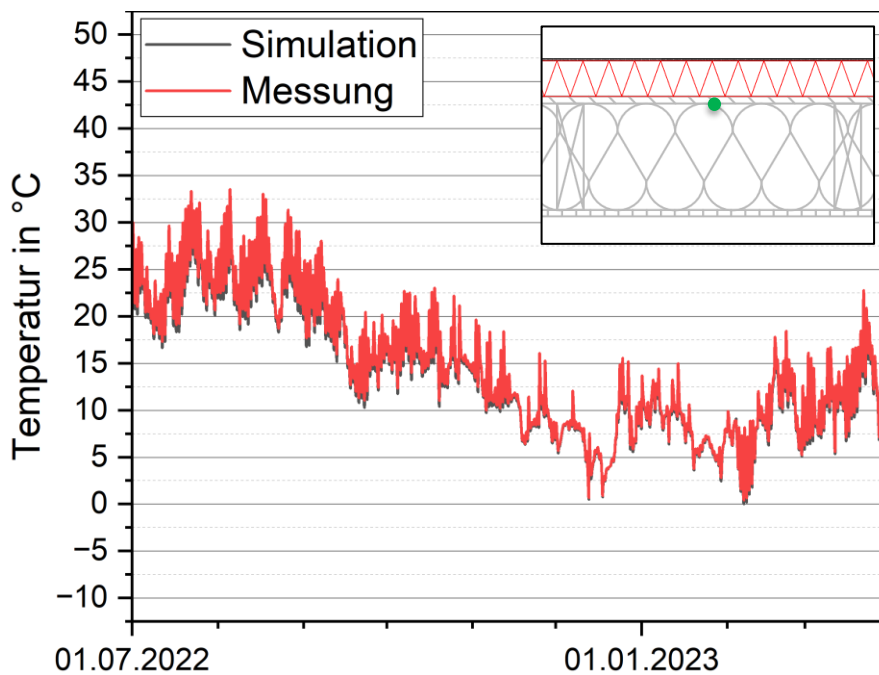


Abbildung 28: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der WDVS-Variante „A_8.1: Weißer Silikatputz“ (80 mm EPS, $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$) zwischen dem 01.07.2022 und dem 01.04.2023.

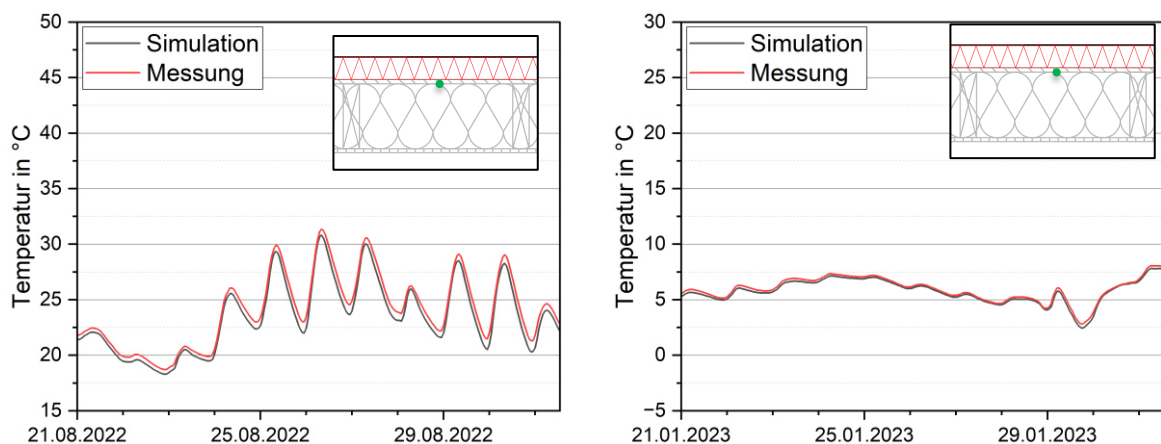


Abbildung 29: Abgleich des simulierten Temperaturverlaufs an der Außenseite des Gefachs mit dem gemessenen Temperaturverlauf der WDVS-Variante „A_8.1: Weißer Silikatputz“ (80 mm EPS, $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$). Detailverlauf: Links: Sommer. Rechts: Winter.

2.1.2 Oberflächentemperaturen und Wärmeeintrag durch den Wandbildner

Im Folgenden sind die Ergebnisse aus der Nachsimulation des Freilandversuchs gemäß Abschnitt 1.1.5, sowie der gemessene Verlauf der Oberflächentemperaturen verschiedener Varianten an drei aufeinanderfolgenden, wolkenarmen Tagen mit hohen Außentemperaturen (Abbildung 30) dargelegt. In Abbildung 30 ist zu erkennen, wann an den jeweiligen Fassaden die Sonneneinstrahlung ihr Maximum erreicht. Während auf der Südfassade das Maximum

(ca. 600 W/m^2) jeweils um ca. 13:00 Uhr erreicht wird, verschiebt sich der Peak auf der Westfassade auf ca. 18 Uhr. Mit ca. 800 W/m^2 fällt das Maximum hier aufgrund des niedrigeren abendlichen Sonnenstands deutlich höher aus. Die Direktstrahlung trifft annähernd senkrecht auf die Fassadenoberfläche auf, während sie mittags in einem sehr steilen Winkel auf die Südfassade auftrifft. Die Außentemperatur steigt im Verlauf der drei betrachteten Tage tendenziell an und erreicht jeweils um etwa 16:00 Uhr ihr Maximum (Tag 1: $\sim 30^\circ\text{C}$, Tag 2: $\sim 33^\circ\text{C}$, Tag 3: $\sim 34^\circ\text{C}$.)

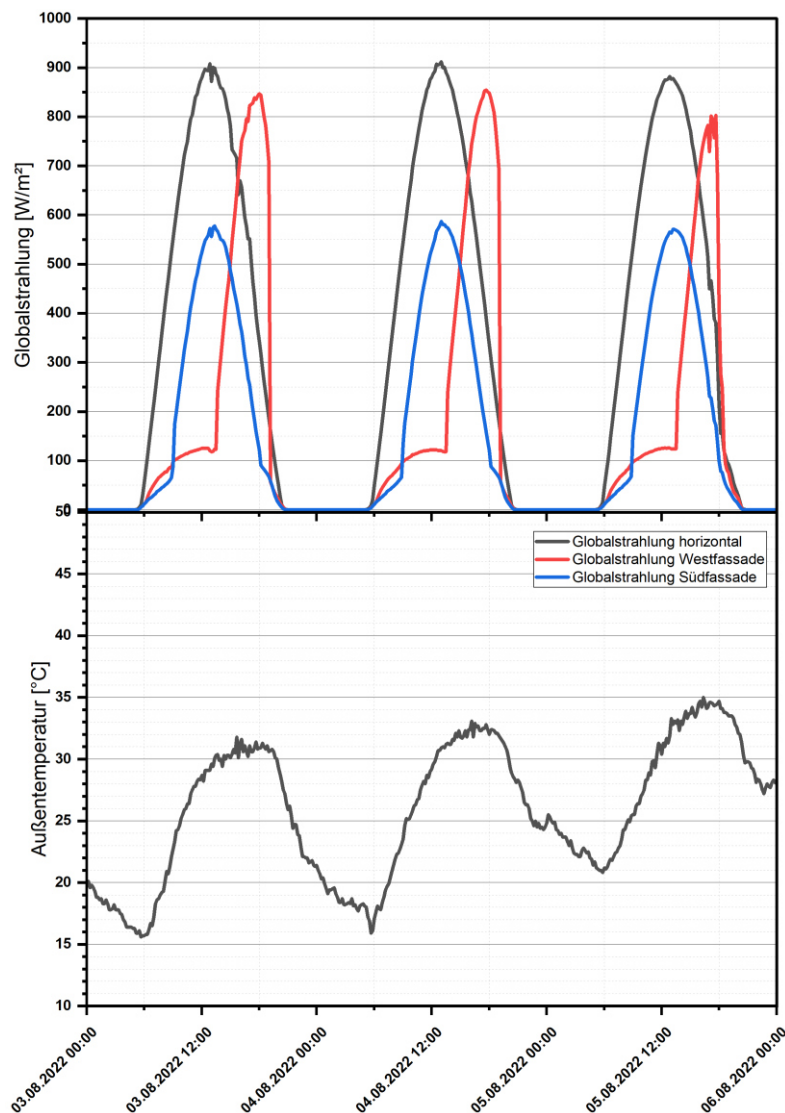


Abbildung 30: Verlauf der Globalstrahlung und Außentemperatur im betrachteten Auswertungszeitraum von 03. - 05.08.2022 (72 h).

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 31 bis Abbildung 46) sind die Verläufe der Oberflächentemperatur auf der Fassadenbahn (vgl. Abschnitt 1.1.3.2: Messposition „Tao“) der unterschiedlichen Fassadenvarianten an diesen drei Hochsommertagen, sowie die entsprechenden Summen der nach Abschnitt 1.1.5 simulierten Wärmeströme im Juli/August 2022 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Temperaturmaximum an der

Fassadenbahn bei allen West-Varianten jeweils mit einer Stunde Verzögerung in Bezug auf den Zeitpunkt des maximalen Strahlungseintrags um etwa 19:00 Uhr einstellt, bei allen Süd-Varianten hingegen in etwa um 13 Uhr. Abbildung 31 zeigt den Temperaturverlauf für die geschlossenen Fassaden mit verschiedenen ausgeführten Hinterlüftungsquerschnitten auf der Westseite. Die mit Abstand höchsten Temperaturspitzen (bis zu 50 °C) weist dabei die Variante mit nur 1 cm Hinterlüftungsspalt (B_8). Diese fällt bei der Variante mit 3 cm durchgehenden Hinterlüftungsspalt (+ 3 cm Traglattung, B_2) um bis zu 5,4 K geringer aus. Bei einer Erhöhung des durchgehenden Luftspalts von 3 cm auf 6 cm (+ 3 cm Traglattung, B_3) reduziert sich das Maximum nur noch um etwa 1 K. Ein Unterschied zwischen 6 cm und 12 cm Hinterlüftungsquerschnitt (+ 3 cm Traglattung, B_4) ist nicht erkennbar. Die Gesamtdifferenz zwischen der Variante mit dem höchsten und dem niedrigsten Wert der Temperaturspitze liegt bei ca. 6,2 K.

Abbildung 32 zeigt die Summe der gemäß Abschnitt 1.1.5 simulierten Wärmeströme für die geschlossenen Fassaden mit verschiedenen ausgeführten Hinterlüftungsquerschnitten. Diese zeigen, welchen Einfluss die im Hinblick auf Abbildung 31 beschriebenen Temperaturdifferenzen auf den tatsächlichen Wärmeeintrag in das Gebäude haben. So ließ sich in diesem konkreten Fall der Wärmeeintrag in das Gebäude im betrachteten Zeitraum durch Erhöhung des Hinterlüftungsquerschnitts um ca. 85 % von ca. 0,27 kWh/m² (B_8) auf ca. 0,04 kWh (B_4) reduzieren.

Die Ergebnisse in Abbildung 31 und Abbildung 32 deuten darauf hin, dass sich ein Hinterlüftungsspalt bei geschlossenen Fassaden von mindestens 3 cm günstig auf den sommerlichen Wärmeeintrag auswirkt. Hochgerechnet läge das Einsparungspotenzial demnach bei entsprechend optimierter Westfassade (50 m² Fläche) in diesem konkreten Fall im Juli/August bei 11,3 kWh bzw. 24 kWh bei Annahme eines U-Werts der Grundwand von 0,15 W/m²K bzw. 0,3 W/m²K.

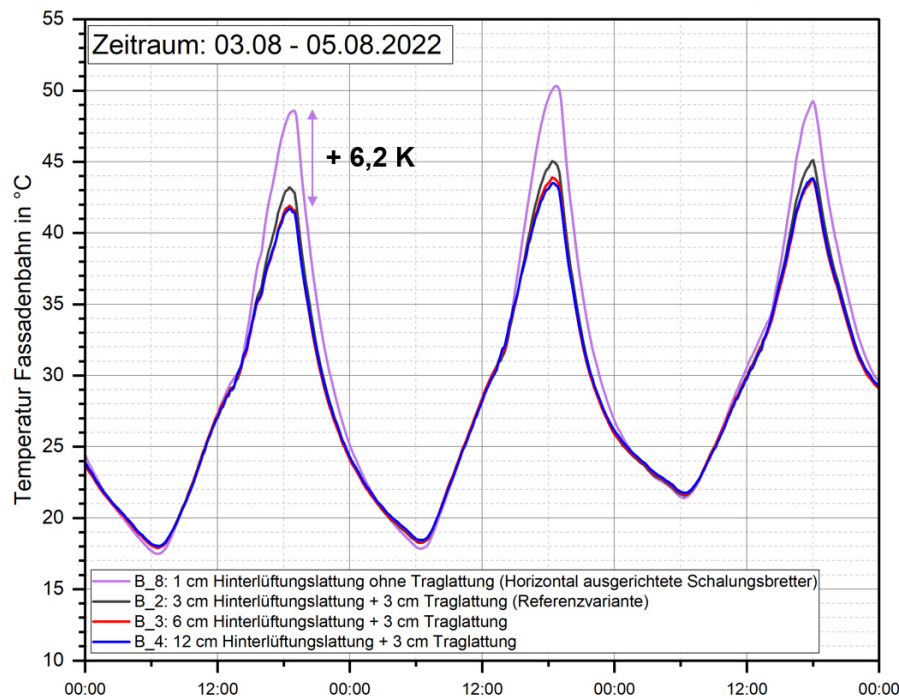


Abbildung 31: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten einer geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschieden ausgeführten Hinterlüftungsquerschnitten im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

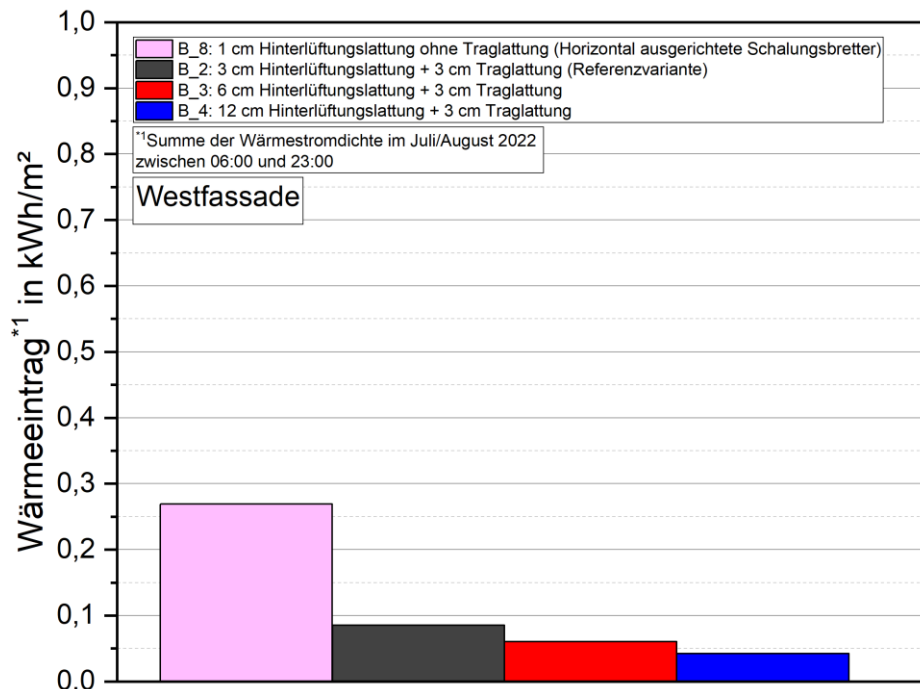


Abbildung 32: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der geschlossenen Fassaden auf der Westfassade mit verschieden ausgeführten Hinterlüftungsquerschnitten.

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind die entsprechenden Oberflächentemperaturen und Wärmeströme für jene Varianten mit unterschiedlich ausgeführten Zu- und Abluftöffnungen dargestellt. Es zeigt sich eine Gesamtdifferenz von ca. 4,4 K zwischen niedrigster und höchster Tagestemperaturspitze. Die höchsten Temperaturen zeigten sich dabei i.d.R. bei den Varianten mit stehender Luftschicht (B_6) und geschlossener Abluftöffnung (B_5, belüftete Fassade). Auch die Variante mit um 90 % reduziertem Zu- und Abluftquerschnitt zeigte noch klar höhere Temperaturspitzen als die Referenzvariante mit 50 % Querschnittsreduktion (B_2, 50% Lochanteil des Lüftungsgitters).

Im Hinblick auf die Wärmeströme dieser Varianten (Abbildung 34) zeigen sich die energetischen Auswirkungen der unterschiedlichen Oberflächentemperaturen. So steigt der Wärmeeintrag bei Ausführung einer unbelüfteten Fassade mit stehender Luftschicht (B_6) anstatt einer hinterlüfteten Fassade mit 50 % Lochanteil (B_2) von ca. 0,09 kWh/m² auf 0,24 kWh/m² an (+170 %). Auch bereits bei einer Reduktion des Zu- und Abluftquerschnitts von 90% (C_7) anstatt 50% (B_2) nimmt der Wärmeeintrag um 112 % auf 0,19 kWh/m² zu.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss des Luftaustauschs in der Hinterlüftungsebene auf den sommerlichen Wärmeeintrag in das Gebäude. Je mehr Luftaustausch ermöglicht wird, desto besser. Lüftungsgitter sollten daher mindestens einen Lochanteil von 50 % aufweisen. Stehende Luftschichten und einseitig belüftete Fassadenkonstruktionen verhalten sich im Hinblick auf die sommerliche Überwärmung unvorteilhaft. Hochgerechnet läge das Einsparungspotenzial demnach bei entsprechend optimierter Westfassade (50 m² Fläche) in diesem konkreten Fall im Juli/August bei 7 kWh bzw. 14 kWh bei Annahme eines U-Werts der Grundwand von 0,15 W/m²K bzw. 0,3 W/m²K.

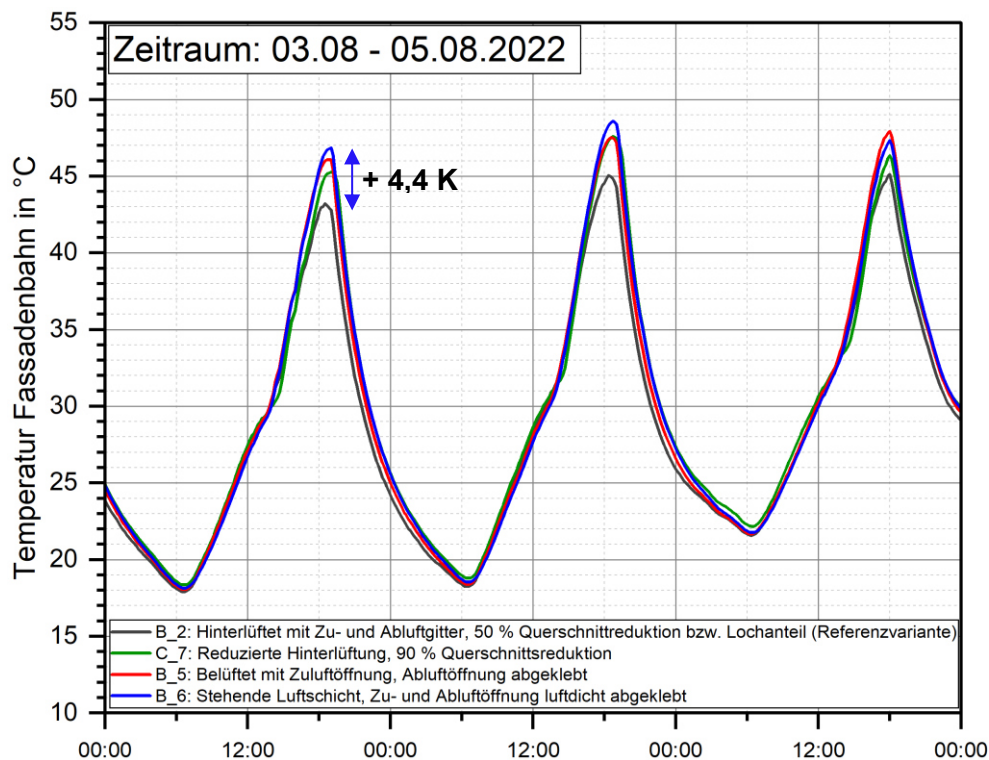


Abbildung 33: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten einer geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschiedenen ausgeführten Be- und Entlüftungsöffnungen im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

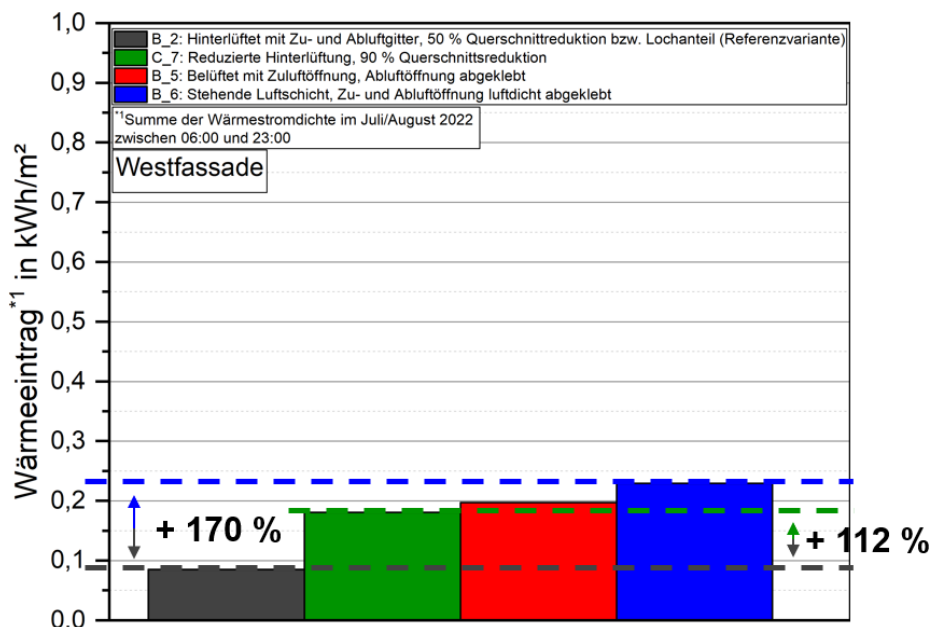


Abbildung 34: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschiedenen ausgeführten Be- und Entlüftungsöffnungen.

Die dargestellten Temperaturverläufe in Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen einen deutlichen Einfluss der Oberflächenbeschichtung bzw. -farbgebung auf den täglichen Temperaturverlauf an der Fassadenbahn. Dieser fällt je nach Ausführung der Hinterlüftung (offen/geschlossen) unterschiedlich aus. Wird die geschlossene Fassade in heller Farbgebung gehalten (A_4), werden reduzierte Temperaturen an der Fassadenbahn erreicht, während dunkle Farben (A_3) zu deutlich erhöhten Temperaturen führen (Abbildung 35). Die Grafik zeigt ebenfalls, dass IR-reflektierende „coole Pigmente“ bei einem schwarzen Fassadenanstrich nur eine geringfügige Wirkung haben (A_5). Die Beschichtungsvariante mit spiegelnden Aluminiumpartikeln (A_6) verhält sich ähnlich wie die unbeschichtete Referenzvariante (A_2), wobei die täglichen Temperaturen etwas höher ausfallen. Die erzeugte Strahlungsreflexion durch die Partikel ist lediglich marginal. Die gesteigerte Absorption durch die dunklere Oberflächenfarbe zeigt sich hier als maßgeblicher Effekt und führt zu leicht erhöhten Oberflächentemperaturen. Insgesamt zeigt sich eine Differenz der täglichen Temperaturspitzen von bis zu 12,8 K. Die Oberflächenfarbe spielt somit eine zentrale Rolle bei der Optimierung der geschlossenen, hinterlüfteten Fassade im Hinblick auf die sommerliche Überwärmung.

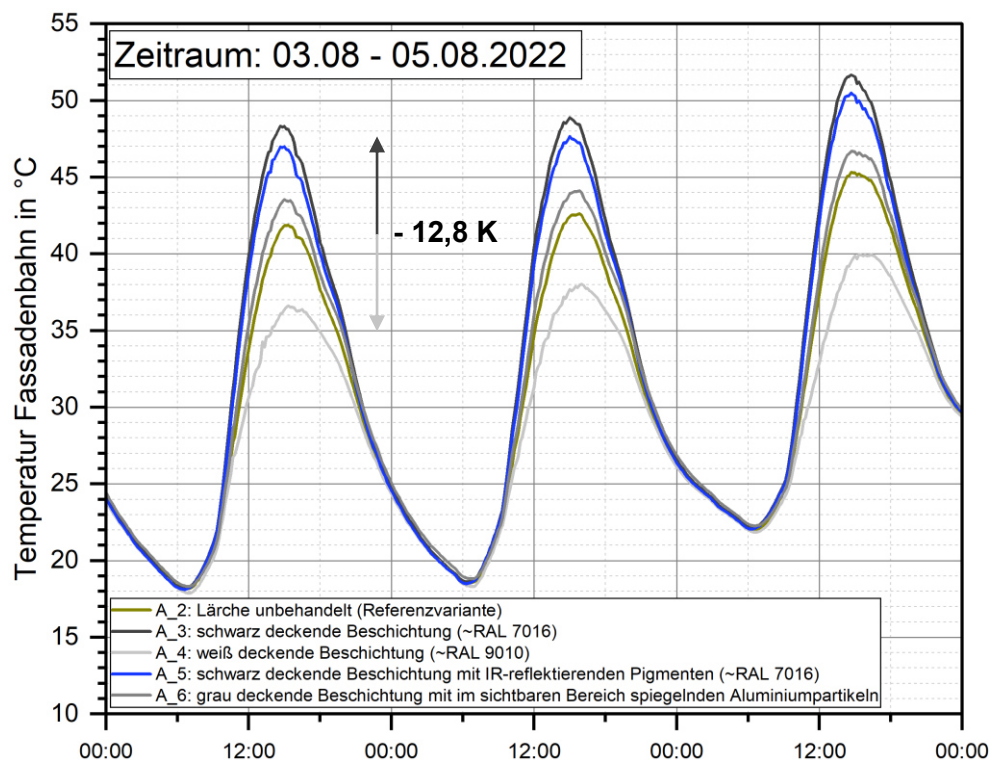


Abbildung 35: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn der Beschichtungsvariationen der geschlossenen Fassaden auf der Südfassade mit unterschiedlicher Farbgebung im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

Abbildung 36 verdeutlicht den Einfluss der Oberflächenbeschichtung bei den offenen Fassadenvarianten. Auch hier ist zu erkennen, dass eine dunkle Farbgebung zu erhöhten Temperaturen führt (A_7.2), während helle Farben in etwas niedrigeren Temperaturen an der

Fassadenbahn resultieren (A_1.1). Wird bei einer offenen Fassade eine weiße Fassadenbahn eingesetzt, fallen die täglichen Temperaturspitzen etwas geringer aus (A_1.2). Im Allgemeinen zeigt sich, dass die Farbgebung bei der geschlossenen Fassade aus unterschiedlichen Gründen einen größeren Effekt hat als bei den offenen Fassaden. Die maximale Schwankungsbreite der täglichen Temperaturspitzen beträgt bis zu 12,8 K bei den geschlossenen und bis zu 7,1 K bei den offenen Fassadenvarianten.

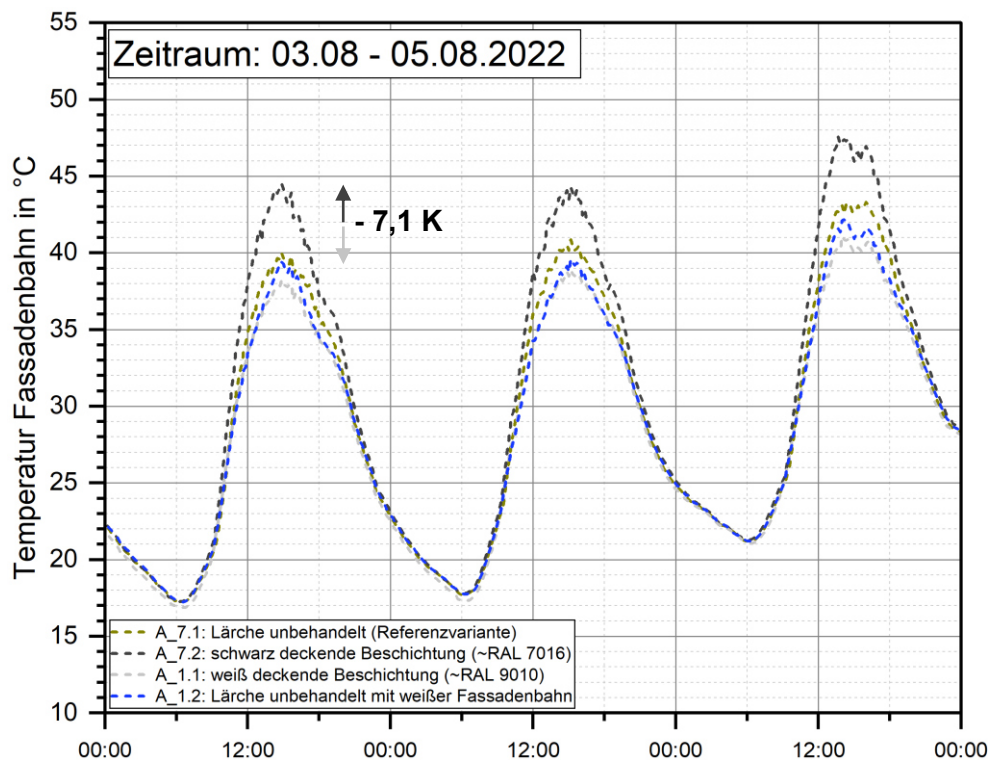


Abbildung 36: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn der Beschichtungsvariationen der offenen Fassaden auf der Südfassade mit unterschiedlicher Farbgebung im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

Stellt man beide Fassadenarten vergleichsweise gegenüber, so zeigt sich zum Einen, dass bei der hellen Varianten der geschlossenen Fassade (A_4) geringere Temperaturen auf der Fassadenbahn erreicht werden als bei der offenen, horizontalen Fassade (A_1.1). Eine Erklärung dafür findet sich im Hinblick auf die Strahlungsbilanz der Fassadenbahnoberfläche. Bei der offenen Fassade wird ein Teil der durch die Fugen auftreffenden solaren Diffusstrahlung von der (schwarzen) Fassadenbahn absorbiert. Bei der geschlossenen Varianten ist die Fassadenbahn gänzlich vor eintreffender Diffusstrahlung geschützt. Bei den unbeschichteten und dunkel beschichteten Varianten (A_2, A_3 / A_7.1, A_7.2) fallen die Temperaturen im Tagesverlauf bei den geschlossenen Varianten höher aus als bei den offenen. In diesem Fall lässt sich dieser Unterschied durch den höheren Luftaustausch in den offenen Fassadenvarianten erklären, wodurch ein größerer Teil der solar eingebrachten Wärme aus der Hinterlüftung abtransportiert werden kann.

Die gemäß Abschnitt 1.1.5 simulierten Wärmeströme der unterschiedlichen Beschichtungsvarianten sind in Abbildung 37 dargestellt und zeigen den gleichen oben beschriebenen qualitativen Trend der unterschiedlichen Varianten zueinander. Demnach steigt der Wärmeeintrag bei Ausführung einer dunklen, geschlossenen Fassade (A_3) anstatt einer weißen, geschlossenen Fassade von ca. 0,11 kWh/m² um 629 % auf ca. 0,69 kWh/m². Parallel dazu zeigt sich bei den entsprechenden offenen Fassadenvarianten ein Anstieg des Wärmeeintrags um 277 % von ca. 0,17 kWh/m² auf ca. 0,47 kWh/m².

Ergänzend ist in Abbildung 38 ein Vergleich des Wärmeeintrags der beiden weiß beschichteten hinterlüfteten Fassadenvarianten (offen/geschlossen) mit einer hellen Putzfassade gleichen U-Werts dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Wärmeeintrag bei Ausführung einer hell beschichteten, hinterlüfteten Holzfassade im betrachteten Zeitraum um bis zu 65,1 % geringer ausfällt als bei der betrachteten Putzfassade. Dieser reduziert sich von ca. 0,31 kWh/m² auf ca. 0,11 kWh/m² bei der geschlossenen Variante und auf ca. 0,17 kWh/m² bei der offenen Variante.

Hochgerechnet auf eine Südfassade mit 50 m² Fläche ergibt sich für diesen konkreten Fall ein Einsparungspotenzial durch die Farbgebung der Fassadenoberfläche von 29 kWh bzw. 56 kWh für die geschlossene Fassade und von 18 kWh bzw. 30 kWh für die offene Variante bei jeweiliger Annahme eines U-Werts der Grundwand von 0,15 W/m²K bzw. 0,3 W/m²K. Eine hell beschichtete, hinterlüftete Fassade birgt gegenüber einer Putzfassade mit ähnlicher Oberflächenfarbe je nach U-Wert ein Einsparungspotenzial von 10 kWh bzw. 18 kWh.

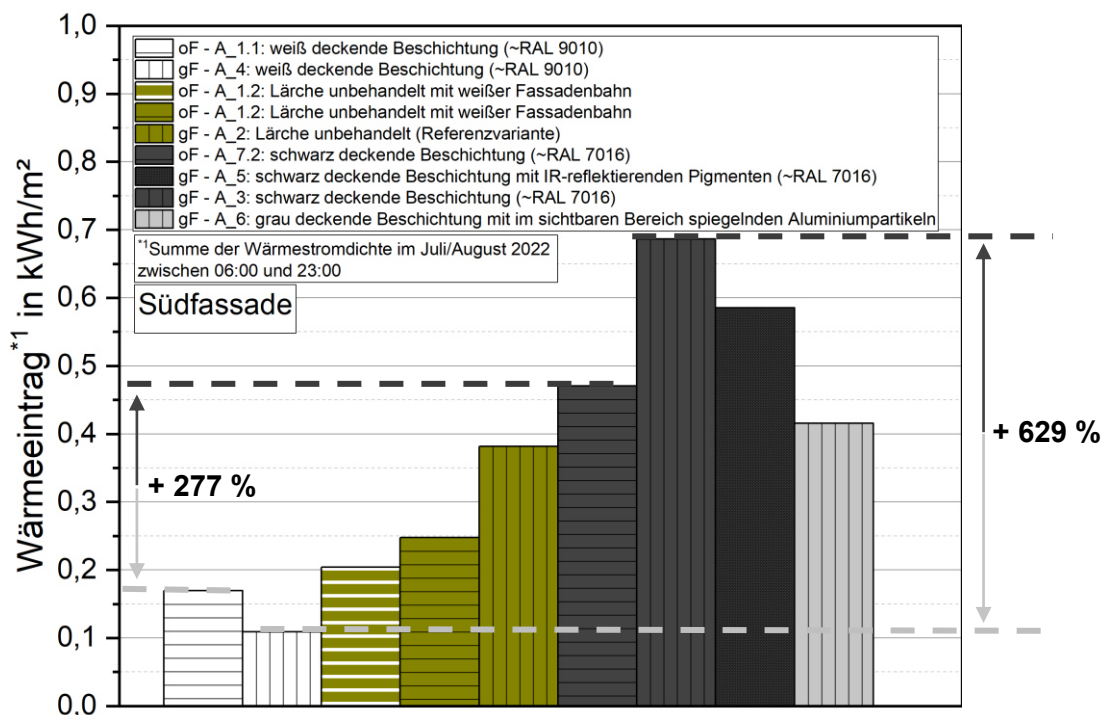


Abbildung 37: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der Beschichtungsvariationen der offenen (oF) und geschlossenen (gF) Fassaden auf der Südfassade mit unterschiedlicher Oberflächenfarbe bzw. Farbgebung der Fassadenbahn.

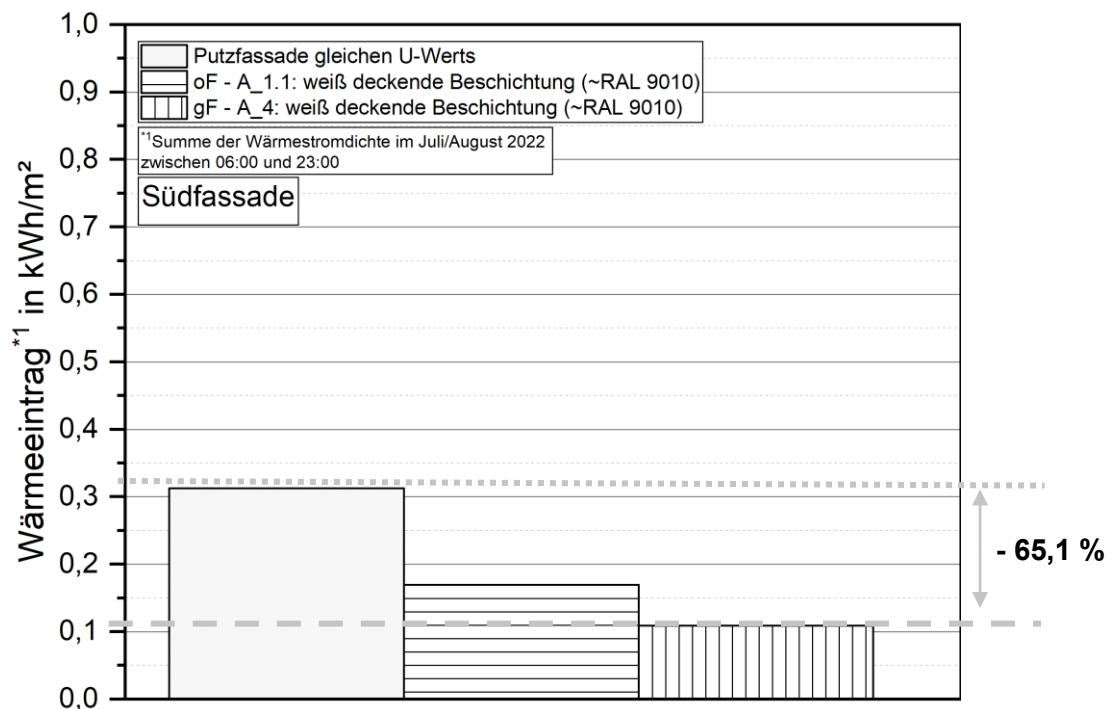


Abbildung 38: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der weiß beschichteten Varianten der offenen (oF) und geschlossenen (gF) Fassade auf der Südfassade mit einer weißen Putzfassade mit gleichen U-Wert (0,15 W/m²K).

Diese Ergebnisse zeigen zusammengefasst auf, dass sich helle Beschichtungen im Hinblick auf die Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Innenraum allenfalls sehr vorteilhaft verhalten. Außerdem zeigt sich, dass sich bei dunklen Oberflächen und unbehandeltem Holz diesbezüglich die offene Variante der Hinterlüftung aufgrund des erhöhten Luftaustausches vorteilhafter verhält, als die geschlossene Variante. IR-aktive Beschichtungen haben einen geringfügigen, aber erkennbaren Einfluss auf den Wärmeeintrag.

Abbildung 39 und Abbildung 41 verdeutlichen den Einfluss der Spaltbreite zwischen den Rhombusleisten der offenen Fassadenvarianten, wobei erstere den bisher betrachteten Zeitraum zwischen dem 03.08. und 05.08.2022 darstellt. In diesem Zeitraum war der Unterschied zwischen den Varianten noch nicht eindeutig erkennbar, was vermutlich auf die Sonnenbahn und den daraus resultierenden Winkelbeziehungen zwischen Sonne und Fassadenoberfläche zurückzuführen ist, unter denen Diffus- und Direktstrahlung nur beschränkt auf die Fassadenbahnoberfläche auftreten konnten. Erst eine Betrachtung von drei wolkenlosen Tagen etwas später im August (14.08. – 16.08.2022, Abbildung 40) macht eine klare Differenzierung möglich (Abbildung 41). Die Temperaturspitzen im Tagesverlauf fallen hier umso höher aus, je größer der Spalt zwischen den Schalungsbrettern ausgeführt wurde. Die Differenz der Temperaturspitzen zwischen den Varianten mit 7 mm (C_1.2) und 21 mm (C_8.1) Spalt beträgt bis zu 3,7 K. Der Grund dafür ist wiederum die Bilanz der auf die

dunkle Fassadenbahn auftreffenden Sonneneinstrahlung (v.a. Diffusstrahlung), welche sich mit zunehmender Spaltbreite erhöht.

Abbildung 42 zeigt zusätzlich, dass eine senkrechte Ausführung der Rhombusleisten (C_8.2) im Vergleich zur waagerechten Ausführung (C_1.1) zu stark erhöhten Temperaturspitzen auf der Fassadenbahn führen kann (Differenz: Bis zu 14,1 K). Unter einem bestimmten Sonnenwinkel trifft die Direktstrahlung im Tagesverlauf unmittelbar auf die dunkle Fassadenbahn auf, wodurch diese Temperaturspitzen hervorgerufen werden.

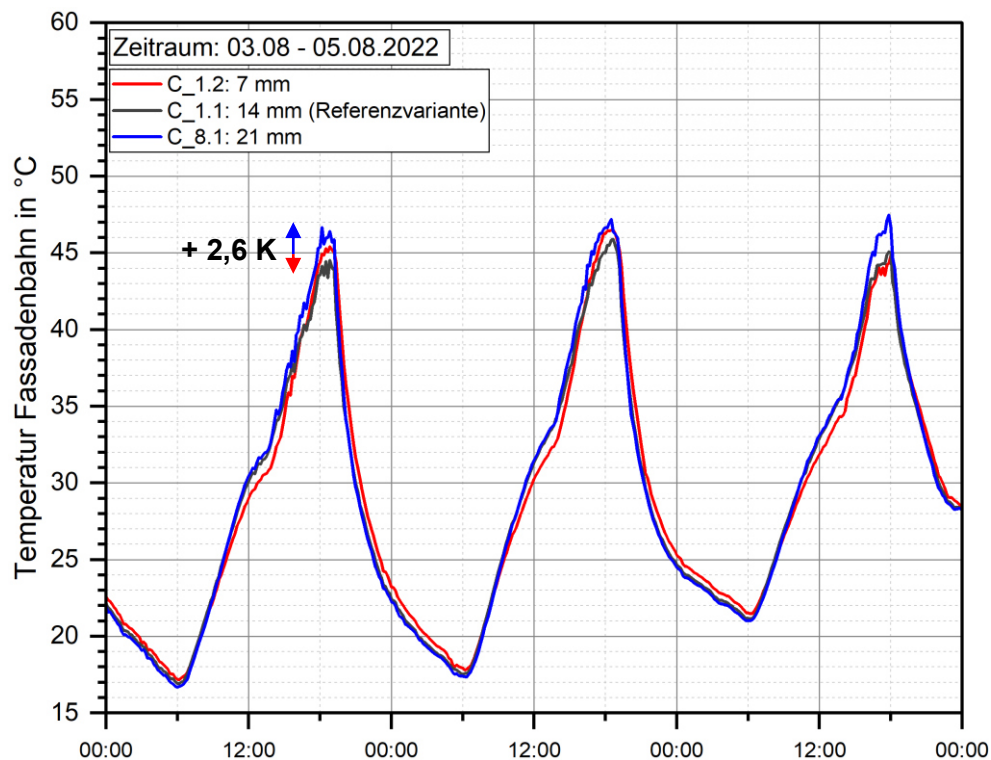


Abbildung 39: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlich großen Öffnungsspalt zwischen den Schalungsbrettern im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

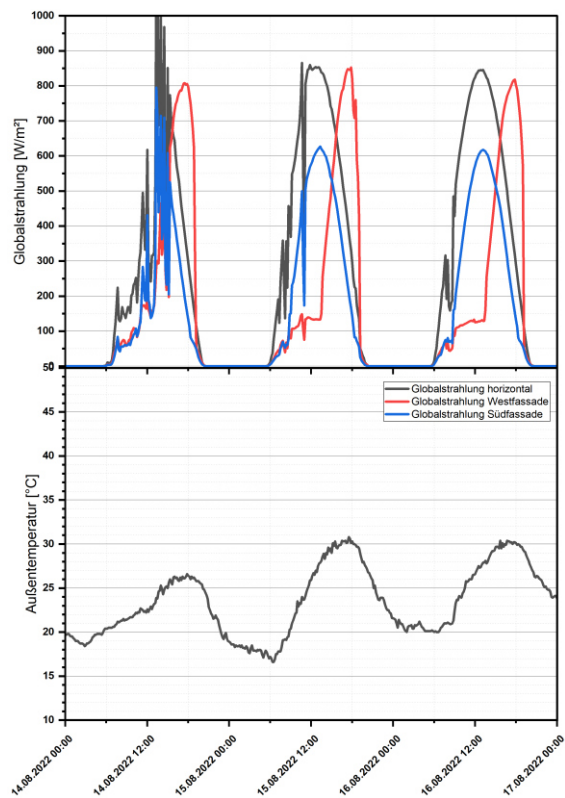


Abbildung 40: Verlauf der Globalstrahlung und Außentemperatur im alternativ betrachteten Zeitraum von 14. - 16.08.2022 (72 h).

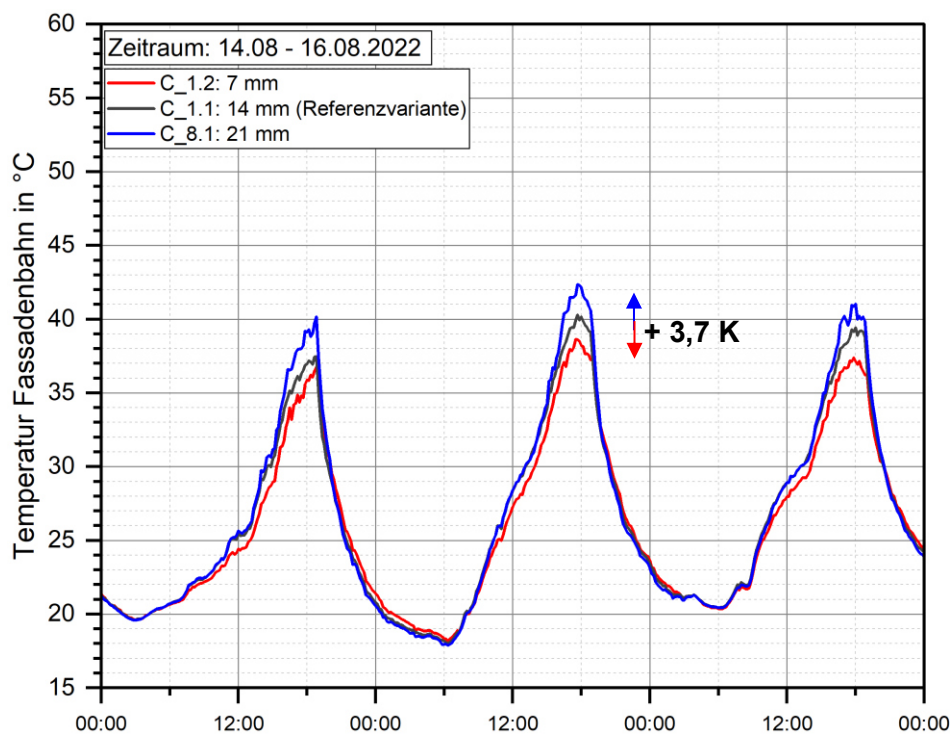


Abbildung 41: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlich großen Öffnungsspalt zwischen den Schalungsbrettern in einem alternativen Zeitraum zwischen dem 14. und 16.08.2022 (72 h).

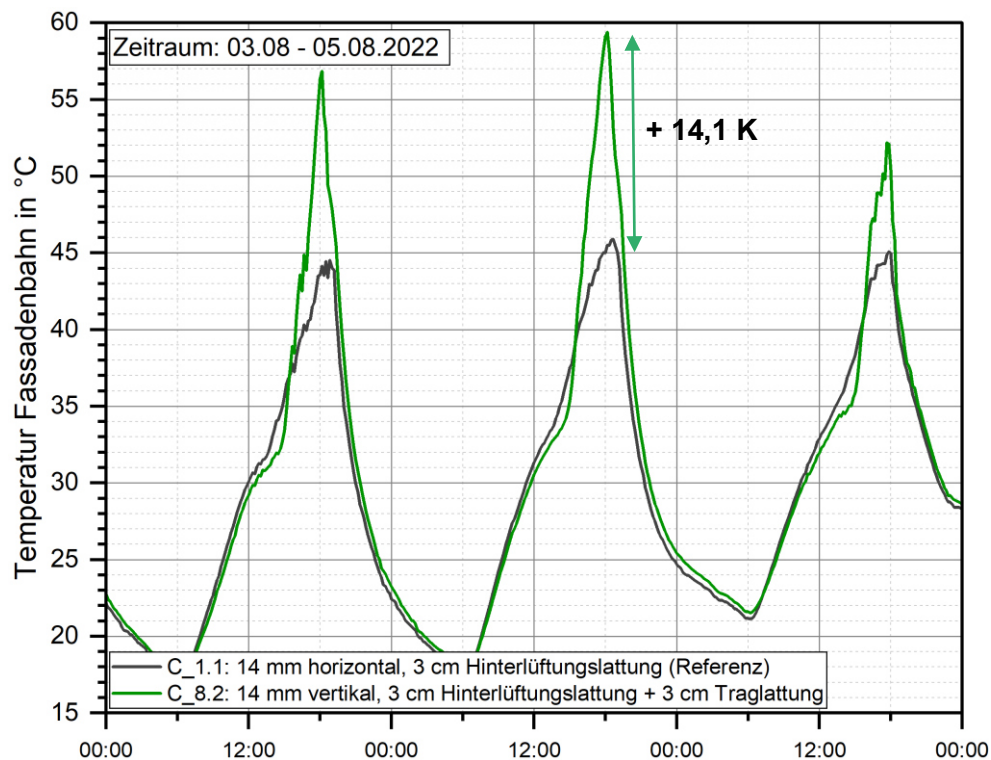


Abbildung 42: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlicher Ausrichtung des 14 mm breiten Öffnungsspalts zwischen den Schalungsbrettern im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen wiederum den nach Abschnitt 1.1.5 simulierten Wärmeeintrag der konstruktiv unterschiedlich ausgeführten, offenen Fassadenvarianten. Aufgrund der oben beschriebenen Temperaturdifferenzen (Abbildung 41) auf der Fassadenbahn zeigt sich eine Zunahme des Wärmeeintrags um 99,6 % von ca. 0,11 kWh/m² auf ca. 0,22 kWh/m² von der 7 mm Spaltvariante auf die 21 mm Spaltvariante (Abbildung 43). Dies entspräche bei Betrachtung der Wärmeeinträge durch eine Westfassade mit 50 m² opaker Fläche einer Zunahme des Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit des U-Werts des Wandbildners um 6 kWh ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) bzw. 11 kWh ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Bei einer vertikalen, statt einer horizontalen Ausführung der Rhombusschalung steigt der Wärmeeintrag um 46 % von ca. 0,2 kWh/m² auf ca. 0,29 kWh/m² (Abbildung 44), was für die oben beschriebene Beispielfassade eine Zunahme des Kühlenergiebedarfs um 5 kWh ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) bzw. 9 kWh ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) bedeutet.

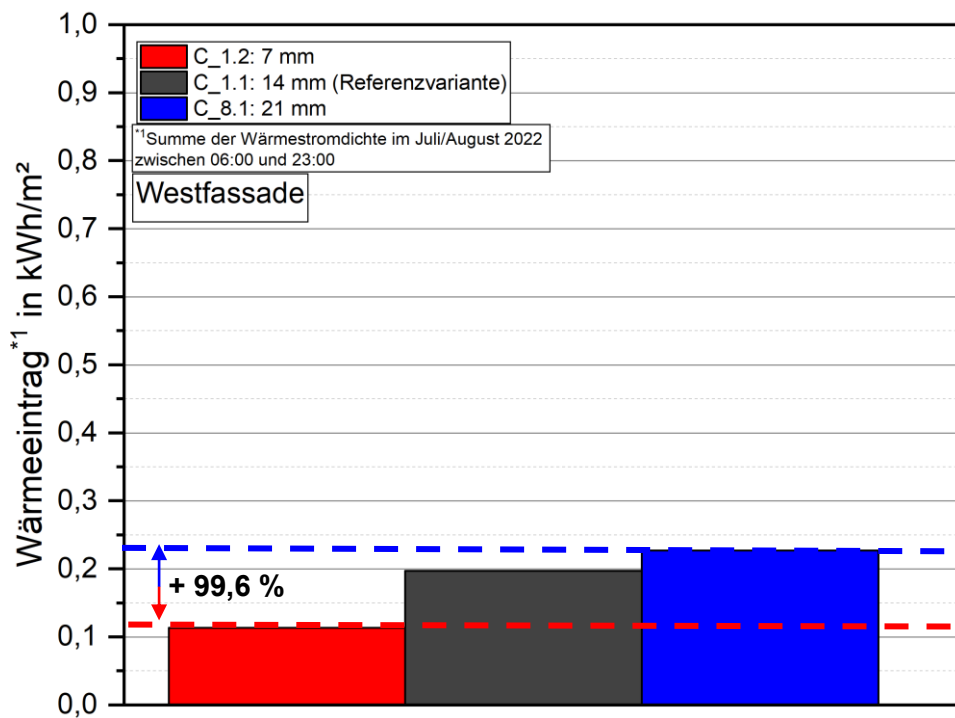


Abbildung 43: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlich großem Öffnungsspalt zwischen den Schalungsbrettern.

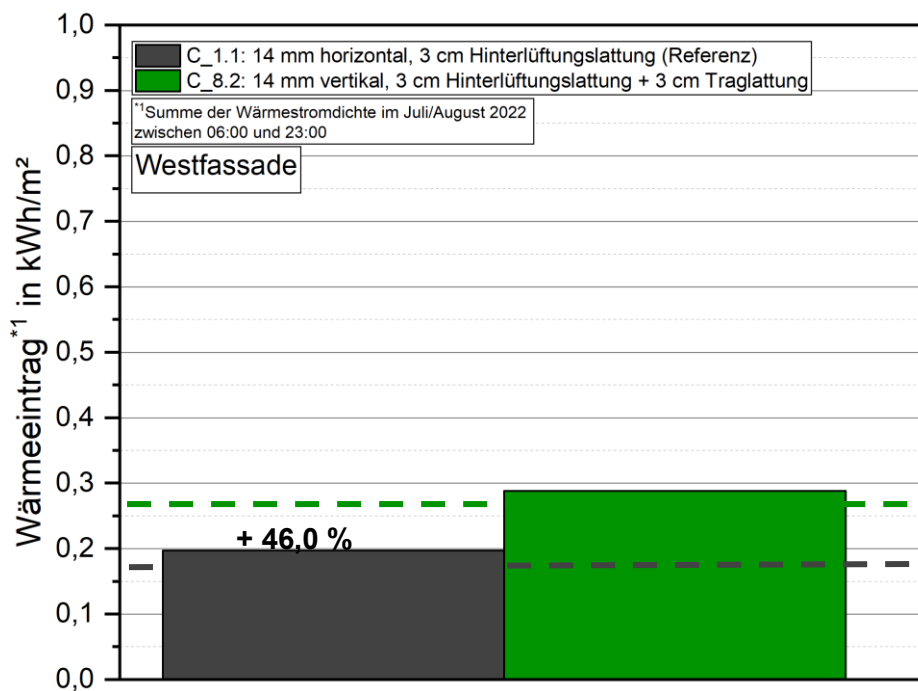


Abbildung 44: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlicher Ausrichtung des 14 mm breiten Öffnungspalts zwischen den Schalungsbrettern.

Die Ergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass sich bei einer offenen Fassade die Ausführung der Rhombusschalung mit nach unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung im Hinblick auf die sommerlichen Wärmeeinträge durch die Fassade vorteilhaft verhält. Eine Spaltbreite von ca. 7 mm (bei ~10 % Fugenanteil an der Gesamtfläche) zeigte dabei die geringsten Wärmeeinträge. Bei senkrechter Ausführung der offenen Schalung ist mit erhöhten Wärmeeinträgen zu rechnen.

Abbildung 45 zeigt die Temperaturverläufe der ungedämmten Referenzvariante (B_2) im Vergleich zu jenen Varianten mit unterschiedlich gedämmten Fassadenschalungen (C_2, C_3), sowie der ungedämmten Variante mit Boden/Deckel-Schalung (B_7). Es ist klar zu erkennen, dass die Temperaturen sich bei beiden ungedämmten Varianten (B_2 und B_7) nahezu identisch verhalten. Bei den gedämmten Varianten ist eine geringfügige Phasenverschiebung erkennbar. Die täglichen Temperaturspitzen treten in etwa 2 Stunden später auf und fallen niedriger aus als bei den ungedämmten Varianten (bis zu -7 K), während die nächtlichen Oberflächentemperaturen aufgrund der Dämmwirkung i.A. höher ausfallen.

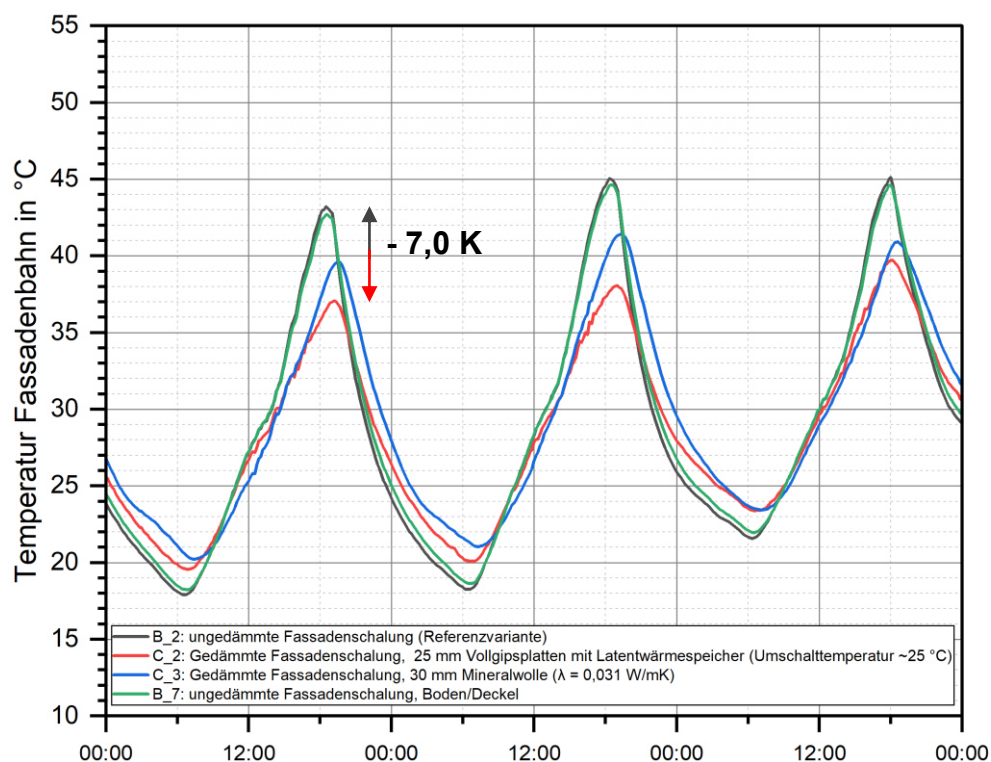


Abbildung 45: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten der geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlich ausgeführter Fassadenschalung im betrachteten Zeitraum zwischen dem 03. und 05.08.2022 (72 h).

Der simulierte Wärmeeintrag (Abbildung 46) gibt Aufschluss darüber, was diese Oberflächentemperaturen nun aus energetischer Sicht bedeuten. Es ist kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden ungedämmten Varianten erkennbar. Die gedämmten Varianten weisen hingegen einen negativen Wärmeeintrag auf. In Summe gelangt somit im

betrachteten Zeitraum mehr Wärme durch die Außenwand aus dem Innenraum hinaus als hinein, wobei beide Varianten (C_2 und C_3) eine sehr ähnliche Bilanz aufweisen. Die Wärmeeinträge fielen um bis zu 166 % geringer aus als bei der ungedämmten Referenzvariante (ca. 0,09 kWh/m² → ca. -0,05 kWh/m²). Im Hinblick auf die oben beschriebene Beispielfassade (Westfassade) bedeutet dies für den konkret betrachteten Fall ein Kühlenergieeinsparungspotenzial je nach U-Wert des Wandbildners von bis zu 7 kWh (U = 0,15 W/m²K) bzw. 13 kWh (U = 0,3 W/m²K).

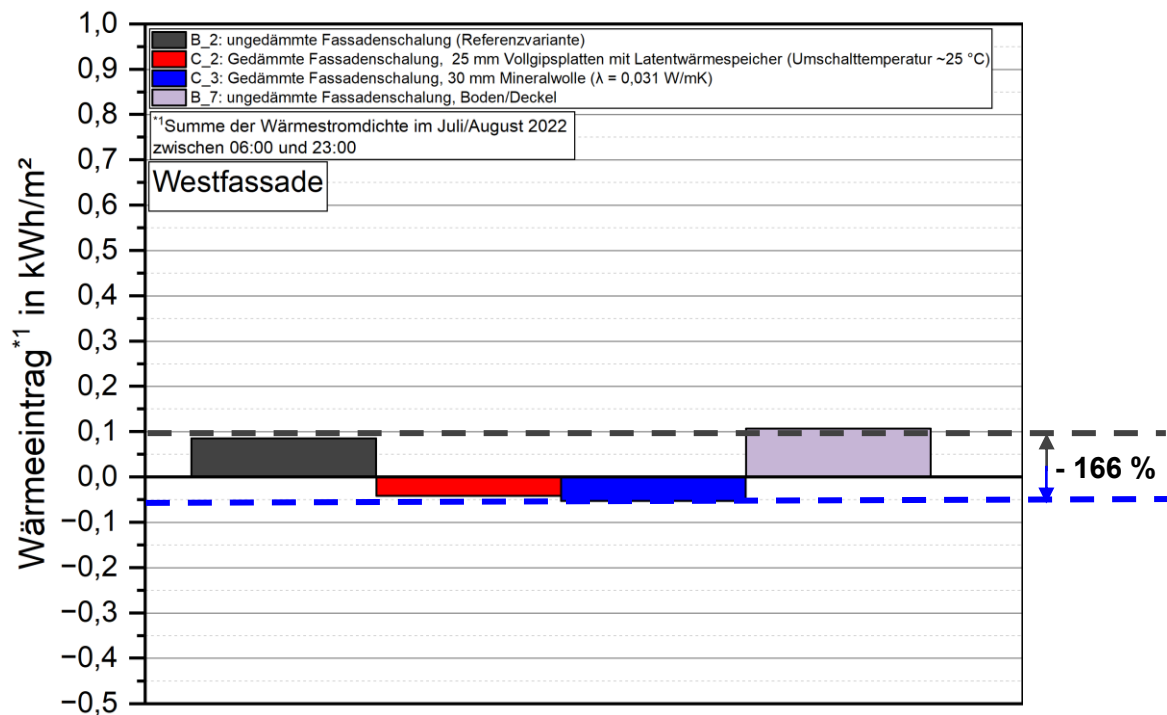


Abbildung 46: Mittels thermischer Simulation berechneter Gesamtwärmeeintrag in den Innenraum in kWh/m² Fassadenfläche zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlich ausgeführter Fassadenschalung.

Weiterführende Simulationen haben gezeigt, dass der Dämmstoff sogar noch etwas effektiver ist, wenn dieser nicht auf der Fassadenschalung, sondern unter der Fassadenbahn (auf der Außenbeplankung) angebracht wird. Es hat sich herausgestellt, dass aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Außenbeplankung der Dämmstoff unter der Fassadenbahn besser wirkt als eine einfache Erhöhung der Dämmstoffdicke im Gefach. Je höher dabei die Wärmespeicherkapazität der Außenbeplankung ist, desto stärker fällt dieser Effekt aus. Abbildung 47 zeigt die Wärmeströme aus den weiterführenden Simulationen im betrachteten Zeitraum. Durch die Aufbringung des Dämmstoffs auf der gegenüberliegenden Seite unterhalb der Fassadenbahn (Variante Z_Wand) kann der Wärmeeintrag in den Innenraum bezogen auf jene Variante mit gedämmter Fassadenschalung (C_3 bzw. Z_Schalung) um weitere 0,1 kWh/m² reduziert werden.

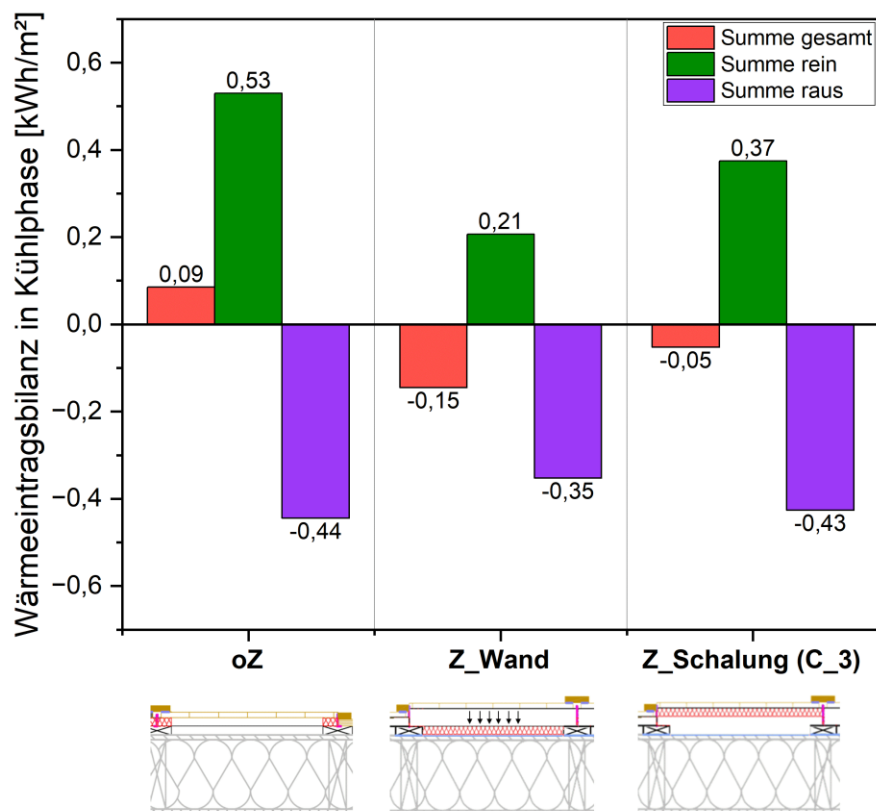


Abbildung 47: Vergleich der simulationsbasiert berechneten Wärmeeintragsbilanzen unterschiedlich ausgeführter, geschlossener Hinterlüftungsvarianten auf der Westfassade (oZ: ohne Zusatzdämmung, Z_Wand: Zusatzdämmung auf Wandseite, Z_Schalung: Zusatzdämmung auf Schalungsseite). Zur Berechnung der Wärmeströme der „digitalen“ Varianten „Z_Wand“ wurde die empirisch gemessene Oberflächentemperatur auf der Fassadenbahn der am Forschungshaus gemessenen Variante „oZ“ als äußere Randbedingung angesetzt.

Allgemein lässt sich zusammenfassen, dass eine zusätzliche Dämmung der Fassade sich vorteilhaft auf den sommerlichen Wärmeeintrag auswirkt. Dabei ist der zu erwartende Effekt am größten, wenn die Zusatzdämmung auf der Außenbeplankung (unter der Fassadenbahn) aufgebracht wird. Der Effekt ist aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Beplankung deutlich größer als eine einfache Erhöhung der Gefachdämmstärke.

2.2 Validierung des thermischen Fassadenmodells

In Abbildung 48 bis Abbildung 51 sind die Validierungsergebnisse zum thermischen Fassadensimulationsmodell dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die simulierten Temperaturen auf der Fassadenbahn sowohl im Tages- (Abbildung 48) als auch im Jahresverlauf (Abbildung 49) hinreichend genau mit den gemessenen Daten übereinstimmen. An einigen Tagen kommt es zwar zu einer geringfügigen über- bzw. Unterschätzung der Temperaturen, im Hinblick auf den Jahresverlauf zeigt sich jedoch v.a. im gleitenden Monatsmittel eine zufriedenstellende Beschreibung der realen Verhältnisse.

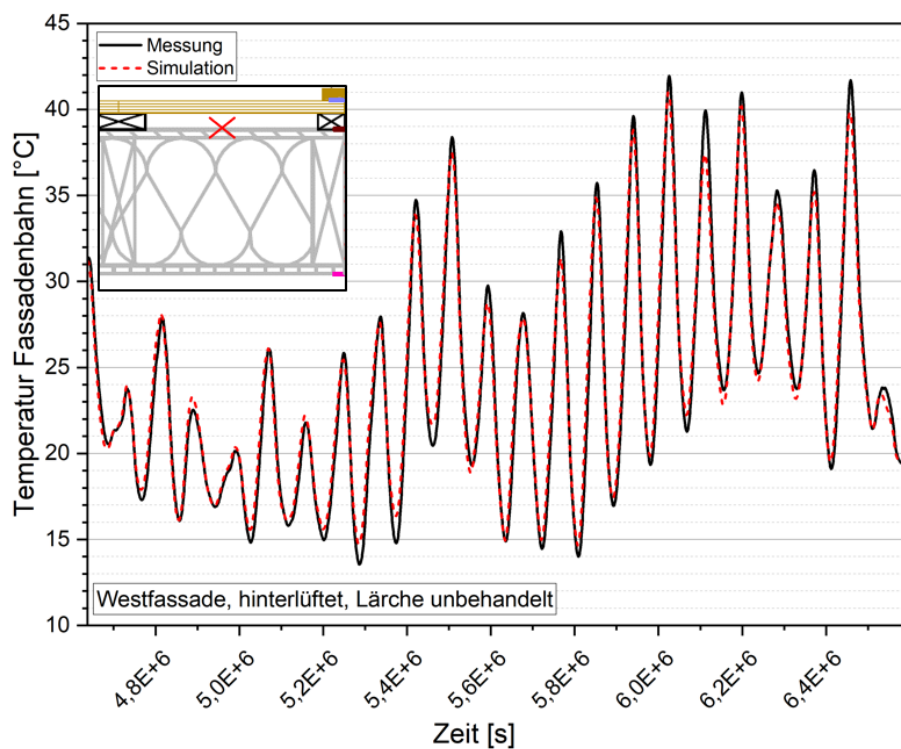


Abbildung 48: Detailverlauf der gemessenen und simulierten 6h-Mittelwerte der Oberflächentemperatur auf der Fassadenbahn der Variante C_6.

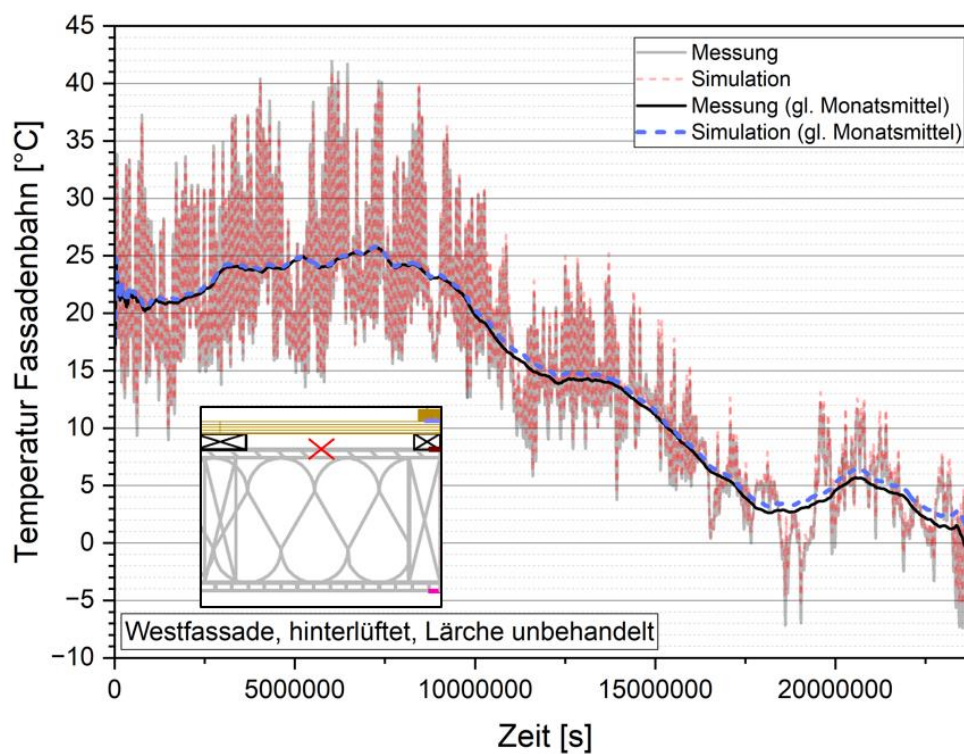


Abbildung 49: Gesamtverlauf der gemessenen und simulierten 6h-Mittelwerte und Monatsmittelwerte der Oberflächentemperatur auf der Fassadenbahn der Variante C_6.

Auch mit Blick auf den Temperaturabgleich zwischen Simulation und Messung an der Schalungsinneseite zeigt sich eine hinreichend genaue Übereinstimmung (Abbildung 50 und Abbildung 51), wobei das Niveau des gleitenden Monatsmittel im Schnitt um etwa 1 K höher ausfällt. Diese geringfügige Ungenauigkeit wurde für die weiterführenden Simulationen akzeptiert, da die tatsächlich relevante Größe (Temperatur auf der Fassadenbahn) vom Modell richtig erfasst wird.

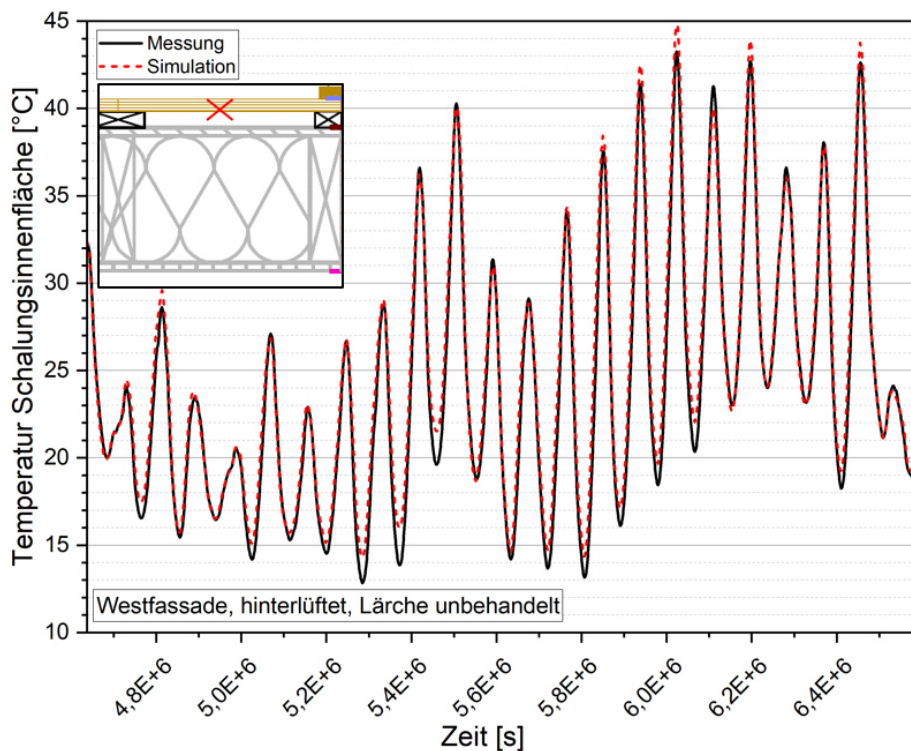


Abbildung 50: Detailverlauf der gemessenen und simulierten 6h-Mittelwerte der Oberflächentemperatur auf der Schalungsinneseite der Variante C_6.

Auch die südseitigen Farbvarianten A_3 (schwarze Beschichtung) und A_4 (weiße Beschichtung) wurden auf die gleiche Weise zur Validierung herangezogen und zeigten eine vergleichbare Genauigkeit (hier nicht dargestellt). Das Modell wurde somit auch für unterschiedliche Fassadenausrichtungen und Oberflächenfarben validiert.

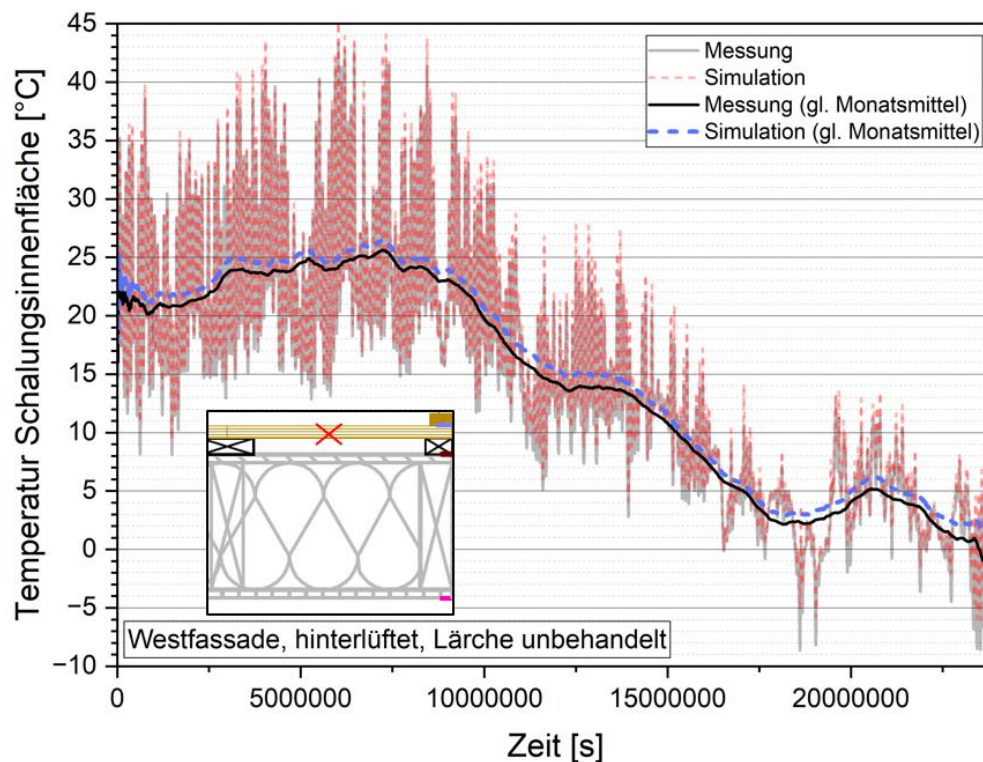


Abbildung 51: Gesamtverlauf der gemessenen und simulierten 6h-Mittelwerte und Monatsmittelwerte der Oberflächentemperatur auf der Schalungsinnenseite der Variante C_6.

Beim erstellten Modell handelt es sich um ein geometrisch gesehen 2-dimensionales Modell, in welchem der seitliche Schnitt durch die Mitte der Hinterlüftungsebene betrachtet wird (vgl. Abbildung 54). Das Modell berücksichtigt explizit die solare Strahlungsabsorption an der Schalungsaußenoberfläche, den Wärmetransport durch Fluide und Feststoffe sowie durch langwelligen Strahlungsaustausch der gegenüberliegenden Oberflächen (Schalungsinnenseite und Fassadenbahn). Beim Luftaustausch wurde lediglich die durch thermischen Auftrieb erzeugte Luftbewegung im Hinterlüftungsspalt berücksichtigt. Windeffekte wurden vernachlässigt. Letztere beeinflussen im Modell jedoch den Wärmeübergangswiderstand an der Schalungsaußenseite. Die nächtliche Abstrahlung wurde nicht explizit berücksichtigt, sondern vereinfacht über die Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten implementiert. Der Aufbau des Wandbildners wurde vereinfacht über das Ansetzen eines Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend des U-Werts von Dämmung und Innenbeplankung ($U = 0,143 \text{ W/m}^2\text{K}$) auf der Innenseite der Außenbeplankung berücksichtigt. Feuchtetransportprozesse wurden nicht in das Modell implementiert.

2.3 Simulationsstudie zum Kühlenergieeinsparungspotenzial im Wohnbau durch optimierte Fassadenkonzepte

Das in Abschnitt 5.2 vorgestellte und validierte Fassadensimulationsmodell wurde im weiteren Verlauf in Kombination mit dem in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten und validierten thermischen Simulationsmodell des Wandbildners zur Berechnung des Kühlenergieeinsparungspotenzials optimierter hinterlüfteter Fassadenvarianten gemäß Abschnitt 4.1.6 herangezogen. Die Ergebnisse dieser Studie werden in den folgenden Abschnitten (2.3.1 und 2.3.2) beschrieben.

2.3.1 Simulation der Fassadenbahntemperaturen mittels thermischer Vorhangfassadensimulation

Abbildung 52 zeigt einen Auszug aus dem simulierten Oberflächentemperaturverlauf auf der Fassadenbahn der Westseite der fiktiven, geschlossenen Fassade. Wie auch in den Freilandmessungen zeigt sich in der Simulation eine Differenz der Temperaturspitzen zwischen schwarz und weiß beschichteter Fassade von bis zu 11 K. Die nächtlichen Temperaturen beider Varianten sind dabei ähnlich. Die Ergebnisse stehen also insgesamt in gutem Einklang mit den durchgeführten Messungen. Im Vergleich zwischen 2023 und 2050 fällt auf, dass der Temperaturverlauf nicht gänzlich parallel verschoben ist, das zugrundeliegende Prognosemodell die Temperatur also nicht einfach hochskaliert, sondern verschiedenste Einflüsse in die Berechnung der prognostizierten Temperatur mit eingehen. Um eine Aussage zur Veränderung machen zu können, ist also die Betrachtung der Durchschnittstemperaturen an der Fassadenbahn jeweils in den Monaten Juli/August notwendig. Diese fallen wie folgt aus:

- 2023: 26,1 °C (schwarze Fassade/West) - 23,2 °C (weiße Fassade/West)
- 2050: 29,0 °C (schwarze Fassade /West) - 26,1 °C (weiße Fassade/West)

Die durchschnittliche Temperatur auf der Fassadenbahn fällt demnach bei beiden Varianten im betrachteten Zeitraum um etwa 3 K höher aus.

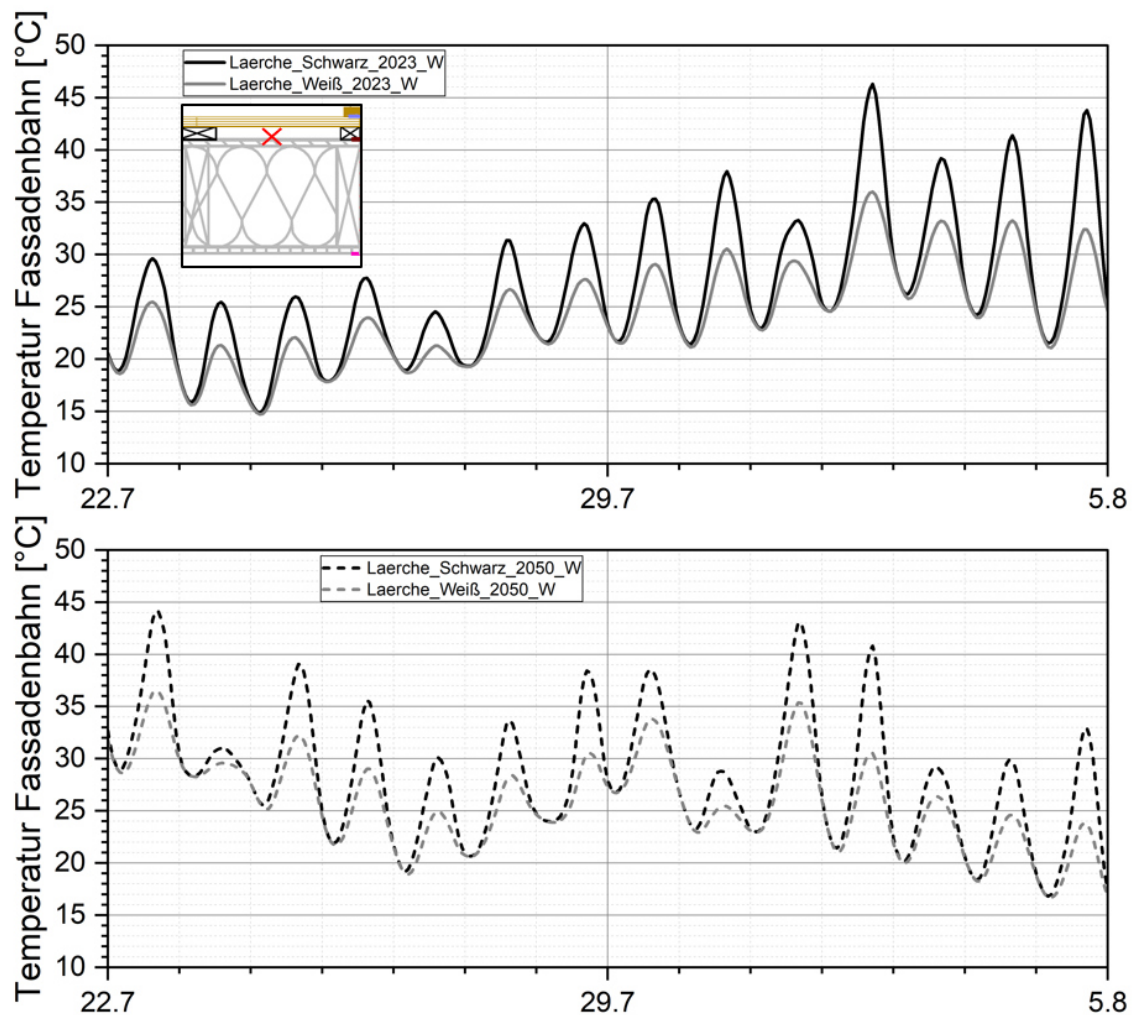


Abbildung 52: Auszug (22.7. – 05.08.20xx) aus dem simulierten Temperaturverlauf auf der Fassadenbahn einer geschlossenen Lärchenfassade mit unterschiedlicher Oberflächenbeschichtung (Absorptionszahlen – schwarz: 0,92; weiß: 0,2) unter Annahme des aktuellen (oben) und des für 2050 mittel RCP 8.5. prognostizierten Klimas (unten).

In Abbildung 53 ist zusätzlich zu den bereits in Abbildung 52 dargestellten Fassadenbahntemperaturen der schwarzen und weißen Fassadenvariante der Temperaturverlauf einer weiteren außen schwarz beschichteten Variante dargestellt, bei der die langwellige Emission der Schalungsinenseite für die Simulation auf ein Minimum reduziert wurde (von $\epsilon = 0,95$ auf $\epsilon = 0,05$, Abbildung 54). Es zeigt sich, dass dadurch die Oberflächentemperaturen trotz der dunklen Außenbeschichtung auf das Niveau einer weiß beschichteten Fassade sinken. Daraus lässt sich zunächst schließen, dass bei ausreichendem Luftaustausch in der Hinterlüftungsebene der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Schalungsinnenfläche und Fassadenbahn den primären Wärmetransportmechanismus darstellt. Aus Abbildung 54 (unten) geht die Erklärung dafür grafisch hervor. Hier sind die Temperaturen und Luftströmungen im Fassadenbereich visualisiert. Bei vollem Strahlungsaustausch zwischen den beiden Innenoberflächen (unten links) erreicht auch die Außenbeplankung eine Temperatur von $> 40^\circ\text{C}$. Die dazwischen liegende Luftschicht wird

beidseitig erwärmt und es bildet sich ein relativ gleichmäßiger Luftstrom über den kompletten Hinterlüftungsquerschnitt aus. Wird der Strahlungsaustausch auf ein Minimum reduziert (unten rechts), so erwärmt sich nur die Fassadenschalung auf $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Wärme wird auf die unmittelbar an der Schalung anliegende Luftschicht übertragen und vertikal abtransportiert. Ein innovativer und praktisch umsetzbarer Einsatz von Materialien oder Oberflächenbeschichtungen mit sehr geringer langwelliger Wärmeemission (IR-Strahlung) auf der Schalungsinenseite bzw. mit geringer langwelliger Strahlungsabsorption auf der Fassadenbahnseite könnte daher in Bezug auf den sommerlichen Wärmeeintrag zu optimalen Ergebnissen führen. Ggf. könnte es bereits zielführend sein, IR-reflektierenden Pigmente wie auch für die Beschichtung der Oberflächenvariante A_5 auf die Fassadenbahnoberfläche aufzubringen, um die Absorption in diesem Wellenbereich zu reduzieren.

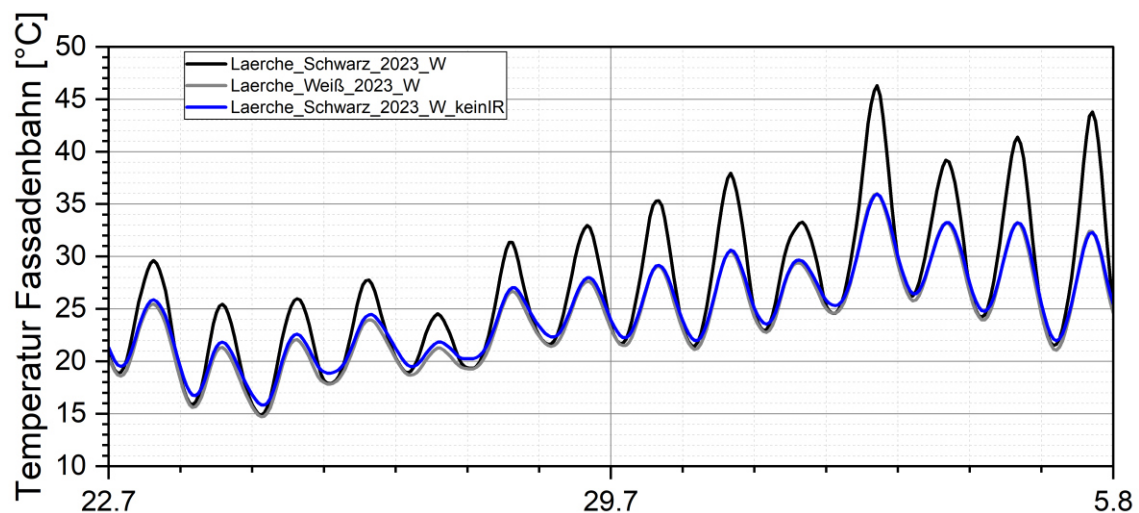


Abbildung 53: Auszug (22.7. – 05.08.20xx) aus dem simulierten Temperaturverlauf (aktuelles Klima) auf der Fassadenbahn einer geschlossenen Lärchenfassade mit unterschiedlicher Oberflächenbeschichtung (Absorptionszahlen – schwarz: 0,92; weiß: 0,2), sowie auf der Bahn einer hypothetischen Variante mit stark reduziertem Strahlungsaustausch zwischen Schalung und Fassadenbahn.

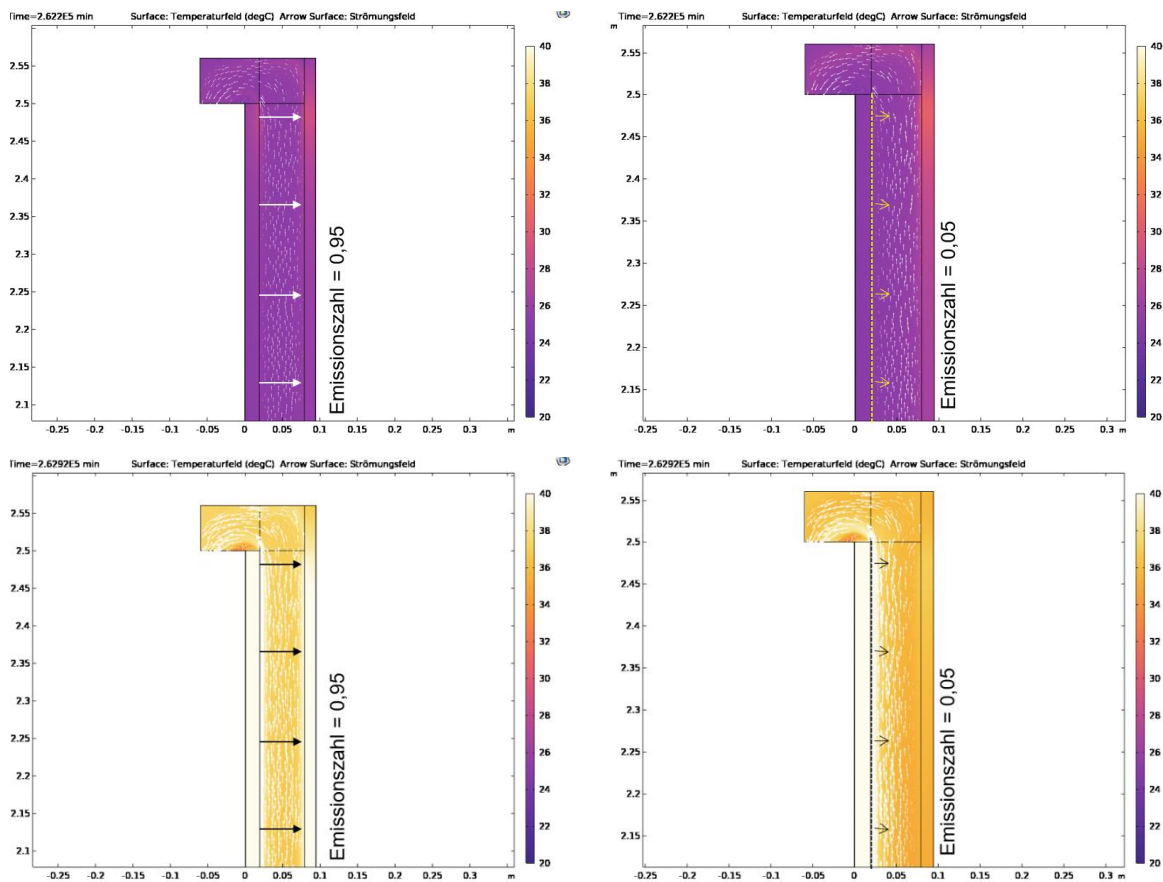


Abbildung 54: Temperatur- und Strömungsverteilung einer schwarz beschichteten Lärchenfassade nachts (oben) und tagsüber (unten) mit normalem (links) und stark reduziertem (rechts) langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Schalung und Fassadenbahn.

Abbildung 55 zeigt einen Auszug aus den simulierten Temperaturverläufen der unterschiedlich ausgerichteten Fassaden mit unterschiedlicher Oberflächenfarbe. Es zeigt sich, dass auch nordseitig die Farbgebung eine Rolle spielt. Die dunkel beschichtete Variante zeigt hier im betrachteten Zeitraum um bis zu 5 K höhere Temperaturspitzen als die hell beschichtete Variante. Südseitig fallen diese um bis zu 11 K höher aus, ostseitig um bis zu 13 K und westseitig um bis zu 10 K. Allgemein zeigt sich für die hell beschichtete Variante eine deutlich geringere Ausrichtungsabhängigkeit. In den Nächten hat weder die Ausrichtung noch die Oberflächenfarbe einen Einfluss auf die Fassadenbahntemperatur.

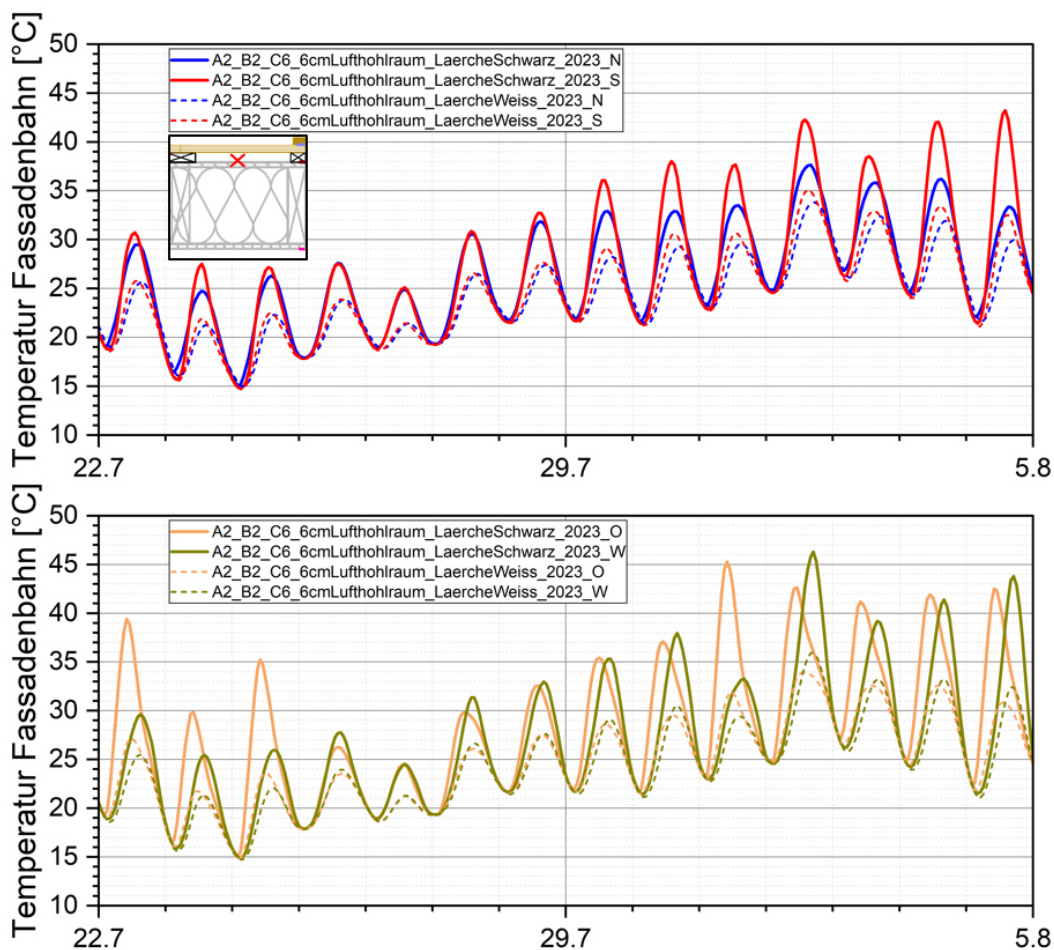


Abbildung 55: Auszug (22.7. – 05.08.20xx) aus dem simulierten Temperaturverlauf auf der Fassadenbahn einer geschlossenen Lärchenfassade mit unterschiedlicher Oberflächenbeschichtung (Absorptionszahlen – schwarz: 0,92; weiß: 0,2) unter Annahme des aktuellen Klimas. Vergleich der unterschiedlichen Ausrichtungen (Oben: N/S, Unten: O/W).

2.3.2 Berechnung des Wärmeeintrags durch die opake Fläche eines fiktiven Gebäudes

Im Folgenden sind die Ergebnisse der gemäß Abschnitt 1.1.6 durchgeführten Simulationsstudie zur Berechnung des Kühlenergieeinsparungspotenzials durch optimierte hinterlüftete Fassadenvarianten dargestellt. In Abbildung 56 und Abbildung 57 (unterschiedliche Gebäudeausrichtungen V1 und V2) sind jeweils die sommerlichen Wärmeeintragsbilanzen der unterschiedlichen Varianten gegenübergestellt. Daraus geht hervor, dass sich der U-Wert des Wandbildners selbst umso stärker auf den Wärmeeintrag auswirkt, je dunkler die Fassadenfarbe bzw. je höher der solare Absorptionsgrad der Fassadenoberfläche. Während sich die Einträge bei dunkler Farbgebung um 1152 kWh von 1991 kWh auf 839 kWh (V1) bzw. um 1236 kWh von 2165 kWh auf 929 kWh (V2) reduzieren, fallen jene bei heller Farbgebung um lediglich 50 kWh von -278 kWh auf -328 kWh (V1) bzw. um 73 kWh von -231 kWh auf -304 kWh. Bei der unbeschichteten und nicht gealterten

Lärchenvariante reduziert sich der Wärmeeintrag um 362 kWh (392 kWh → 30 kWh, V1) bzw. um 395 kWh (459 kWh → 60 kWh, V2). Bei den hell beschichteten Varianten fallen die Wärmestrombilanzen des Weiteren negativ aus. Es überwiegt im betrachteten Zeitraum demnach der Anteil der nach außen gerichteten Ströme. Insgesamt zeigt sich für das fiktive Wohngebäude im betrachteten Fall bei Ausführung einer weißen, anstatt einer schwarzen Fassade ein Kühleinsparungspotenzial je nach U-Wert des Wandbildners von bis zu 2269 kWh bzw. 1167 kWh bei Ausrichtung V1 und von bis zu 2396 kWh bzw. 1233 kWh bei Ausrichtung V2. Der Einfluss der Ausrichtung fällt demnach insgesamt eher gering aus.

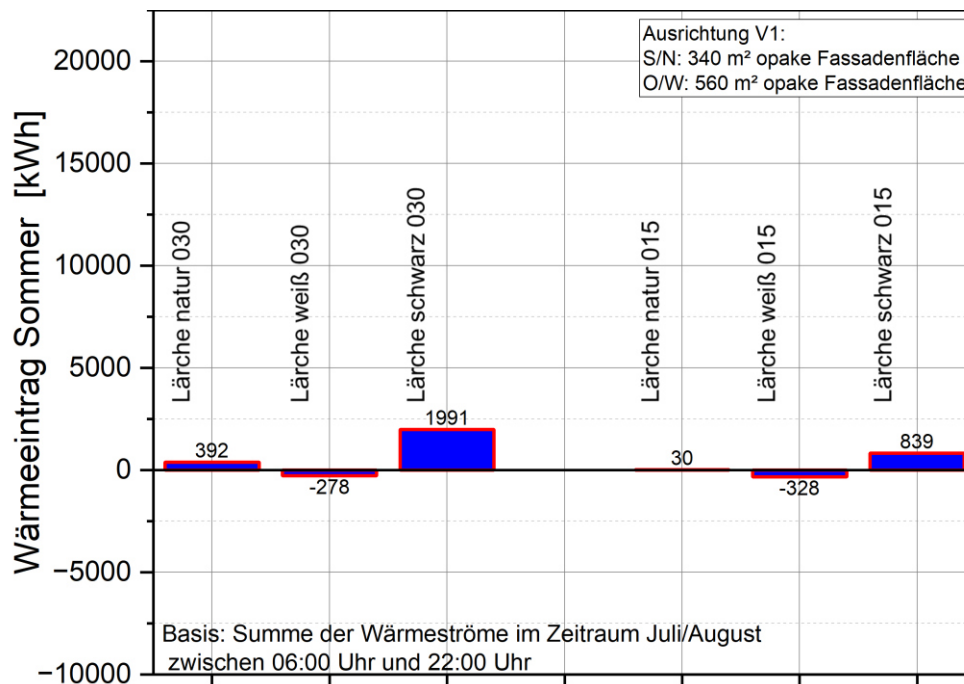


Abbildung 56: Simulierter sommerlicher Wärmeeintrag (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes unter Annahme der Ausrichtung V1 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

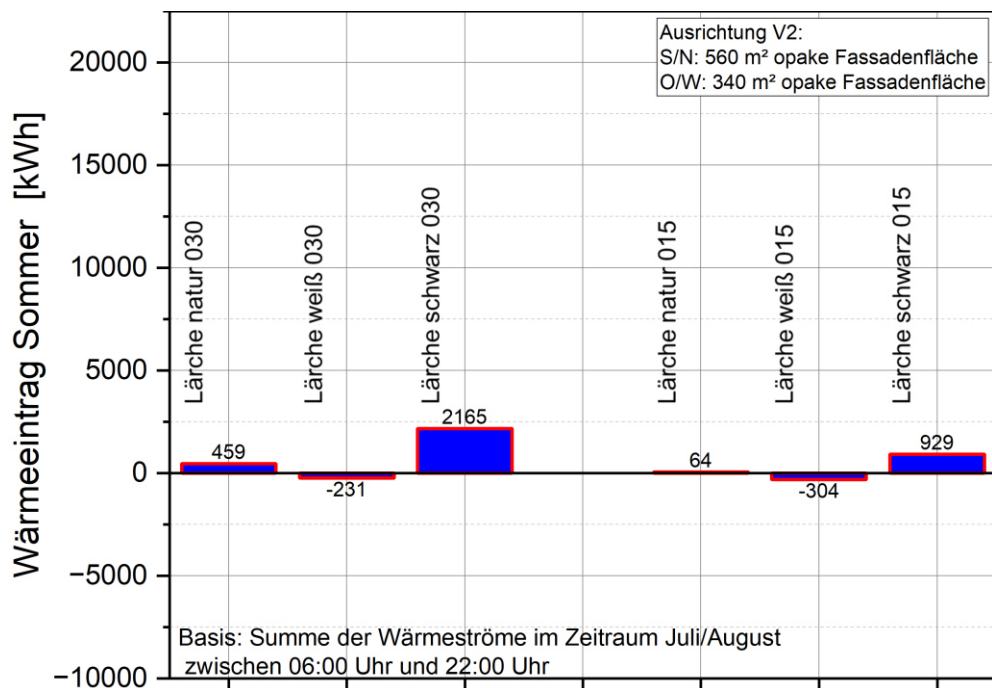


Abbildung 57: Simulierter sommerlicher Wärmeeintrag (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes unter Annahme der Ausrichtung V2 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind für die beiden Ausrichtungen V1 und V2 jeweils die winterlichen Wärmeverlustbilanzen gegenübergestellt. Es ist direkt ersichtlich, dass die winterlichen Wärmeverluste in allen Fällen in Summe deutlich größer ausfallen als die sommerlichen Wärmeeinträge. Außerdem zeigt sich das Einsparungspotenzial gegenläufig zum Sommerfall. Die dunklen Varianten zeigen die geringsten Wärmeverluste. Je nach U-Wert und Ausrichtung ergeben sich Differenzen zwischen schwarzer und weißer Variante von 1319 kWh (V1, U=0,30 W/m²K), 666 kWh (V1, U=0,15 W/m²K), 1267 kWh (V2, U=0,30 W/m²K) und 641 kWh (V2, U=0,15 W/m²K). Die Wärmeverluste der unbehandelten und ungealterten Lärchenfassade fallen in allen Fällen etwas geringer aus, als jene der weiß beschichteten Varianten.

Um eine endgültige Aussage darüber machen zu können, bei welchen Fassadenvarianten das größte Energieeinsparungspotenzial vorhanden ist, müssen sommerliche Wärmeeinträge und winterliche Wärmeverluste gegenübergestellt werden.

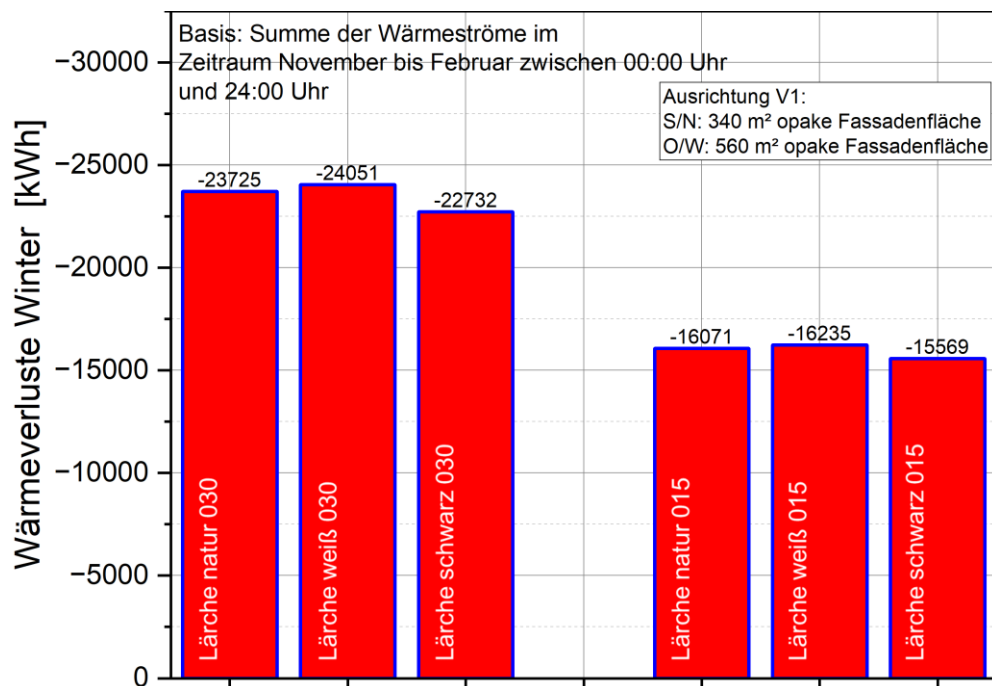


Abbildung 58: Simulierte winterliche Wärmeverluste (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes unter Annahme der Ausrichtung V1 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

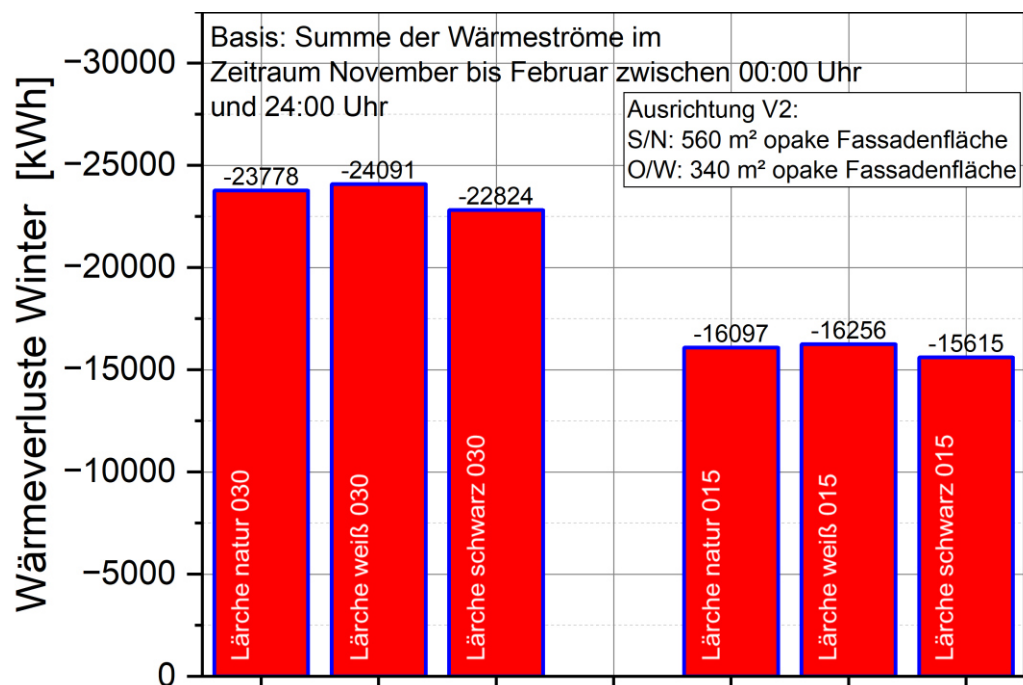


Abbildung 59: Simulierte winterliche Wärmeverluste (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes unter Annahme der Ausrichtung V2 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

Diese Gegenüberstellung ist für die beiden Ausrichtungsvarianten in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargelegt. Insgesamt zeigt sich bei Gegenrechnung der Wärmeeinträge und -verluste eine geringfügig vorteilhaftere Energiebilanz bei den hellen Fassadenvarianten. Je nach Ausrichtung und U-Wert zeigen sich geringfügige Einsparungspotenziale bei Ausführung einer hellen, anstatt einer dunklen Fassadenoberfläche von 951 kWh (V1, $U=0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$), 501 kWh (V1, $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$), 1127 kWh (V2, $U=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) und 592 kWh (V2, $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$).

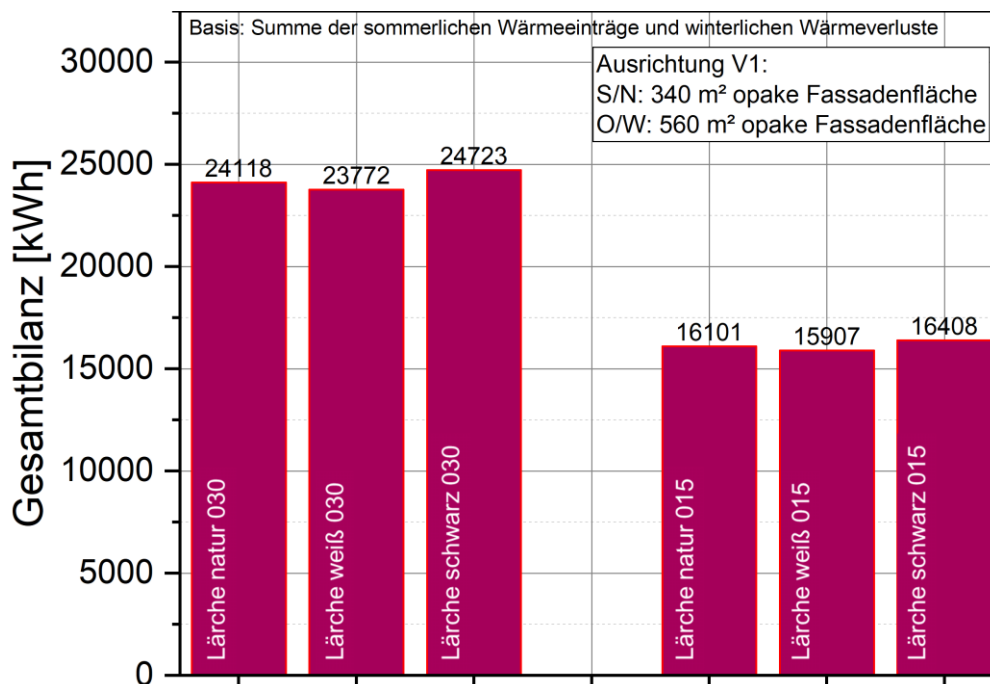


Abbildung 60: Simulierte Gesamtenergiebilanz (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes während der festgelegten Kühl- und Heizphasen unter Annahme der Ausrichtung V1 und verschiedener U-Werte ($0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

Zusammenfassend zeigt sich das Gesamtenergieeinsparungspotenzial demnach eher gering. Es ist hier allerdings zu erwähnen, dass es im Sommerfall nicht nur um die Einsparung von Kühlenergie geht, sondern auch darum, den Einbau eines Kühlsystems gar nicht erst erforderlich zu machen. Die Nachrüstung bzw. Einbau (im Neubau) eines solchen würde aufgrund des Herstellungs- und Einbauprozesses ebenfalls einen negativen Umwelteintrag bedeuten. Außerdem ist davon auszugehen, dass im Falle des Vorhandenseins einer solchen Kühlung diese vom Nutzer nicht -wie für die obige Studie- auf 25°C , sondern zur Behaglichkeitsmaximierung deutlich darunter betrieben werden würde, wodurch der zu erwartende Kühlenergiebedarf nochmals stark ansteigen würde. Heizsysteme sind hingegen zwingend notwendig und in jedem Wohngebäude bereits verbaut. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, bei der diesbezüglichen Fassadenplanung diese eher auf den Sommerfall hin zu optimieren.

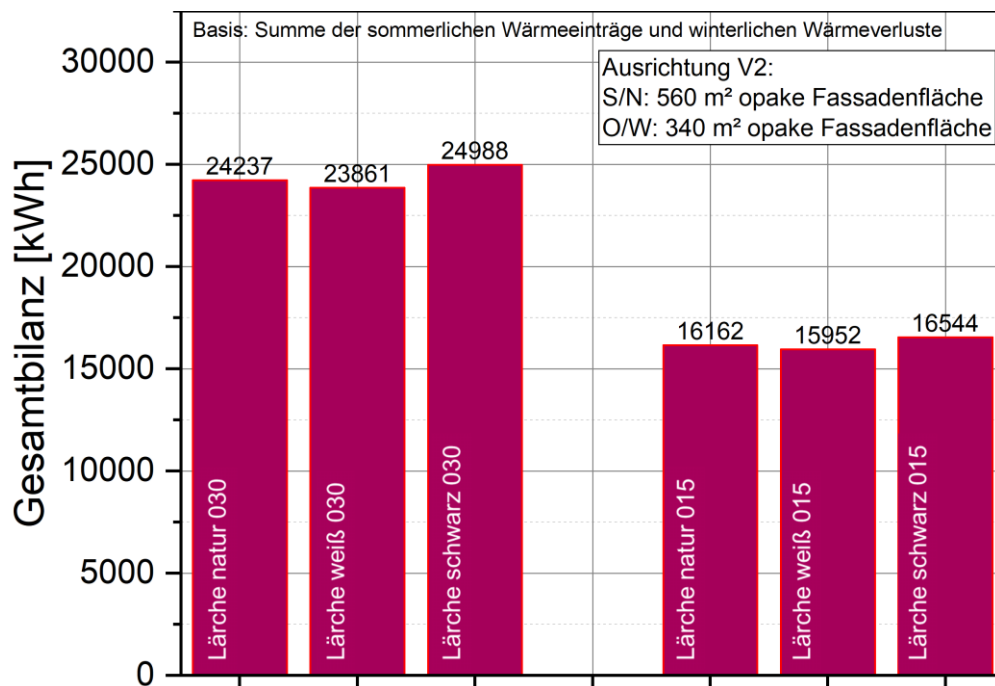


Abbildung 61: Simulierte Gesamtenergiebilanz (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Gebäudehülle des fiktiven Gebäudes während der festgelegten Kühl- und Heizphasen unter Annahme der Ausrichtung V2 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz).

Betrachtet man die zu erwartende zukünftige Entwicklung der Eintrags- und Verlustbilanzen (Abbildung 62) am Beispiel der Westfassade des fiktiven Gebäudes, so bestätigt sich diese Empfehlung nochmals deutlicher. Die sommerlichen Wärmeeinträge werden sich in Zukunft nochmals stark erhöhen, während die winterlichen Wärmeverluste gleichzeitig etwas sinken. Der relative Anteil des Sommerfalls an der Gesamtenergiebilanz nimmt somit zu. Es gilt also auch in Zukunft der Notwendigkeit des Einbaus aktiver Kühlsysteme entgegenzuwirken und - wenn doch erforderlich – den Energiebedarf dieser auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Optimierte Fassadenkonzepte sind dabei nur ein Teil des Gesamtbilds. Nur gemeinsam mit optimierten Beschattungs-, Verglasungs- und Lüftungskonzepten lässt sich der sommerliche Wärmeeintrag möglicherweise auch in Zukunft soweit reduzieren, dass eine aktive Kühlung nicht erforderlich wird.

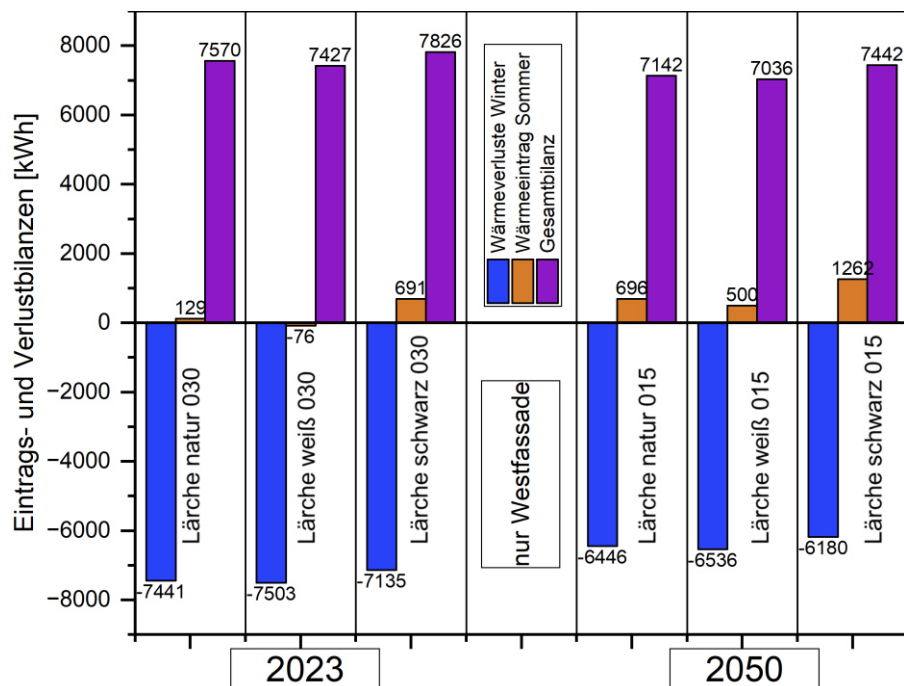


Abbildung 62: Simulierte Wärmeeintrags- und Verlustbilanzen (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Westfassade des fiktiven Gebäudes während der festgelegten Kühl- und Heizphasen unter Annahme der Ausrichtung V2 und verschiedener U-Werte (0,30 W/m²K, 0,15 W/m²K) des Wandbildners sowie unterschiedlichen Farbbeschichtungen der hinterlüfteten Lärchenfassade (unbehandelt, weiß, schwarz). Vergleich zwischen aktuellem (2023, links) und prognostiziertem Klima für 2050 (rechts).

Abschließend ist in Abbildung 63 der Einfluss des bereits in Abschnitt 2.3.1 (vgl. Abbildung 53, Abbildung 54) beschriebenen Fassadenansatzes mit minimiertem langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Schalung und Fassadenbahn dargestellt. Wie der Blick auf die simulierten Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bereits vermuten ließ, birgt dieser Ansatz im Idealfall das Potenzial, das Niveau des sommerlichen Wärmeeintragsverhaltens einer schwarz beschichteten Fassade auf jenes einer weißen Fassade zu reduzieren. Dadurch könnte die Farbgebung der Fassade nahezu unabhängig vom Einfluss auf die sommerliche Überwärmung des Innenraums geplant und umgesetzt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, müsste noch ermittelt werden, wie man sich diese Tatsache in der Praxis umsetzbar zunutze machen könnte. Der Idealfall wäre ein „umschaltbares System“, welches den Strahlungsaustausch in der Sommerphase unterbindet und im Winterfall ermöglicht.

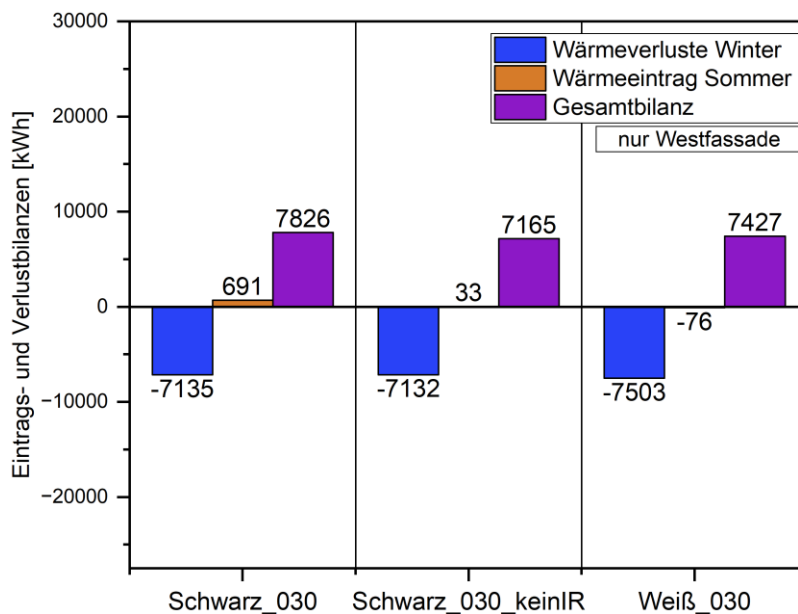


Abbildung 63: Simulierte Wärmeeintrags- und Verlustbilanzen (Summe der Wärmeströme durch die Innenoberfläche) durch die opake Westfassade des fiktiven Gebäudes während der festgelegten Kühl- und Heizphasen unter Annahme der Ausrichtung V2. Links: Schwarze Fassadenbeschichtung. Rechts: Weiße Fassadenbeschichtung. Mitte: Schwarze Fassadenbeschichtung mit reduziertem Strahlungsaustausch zwischen Schalungsinnenoberfläche und Fassadenbahn.

3 Zusammenfassung

Das treibende Potential der sommerlichen Wärmeeinträge durch die opake Hülle in das Gebäude ist die Temperaturdifferenz zwischen der Außenoberfläche und der Innenoberfläche des Wandbildners. Im konkreten Fall der hinterlüfteten Fassade handelt es sich auf der Außenseite dabei um die Temperatur auf der Fassadenbahn. Diese korreliert direkt mit dem zu erwartenden Wärmestrom in das Gebäude. Um die Fassade bestmöglich auf die Reduktion sommerlicher Wärmeeinträge zu optimieren, gilt es deshalb, die Fassadenbahntemperatur durch geeignete Maßnahmen bestmöglich zu reduzieren.

3.1 Freilanduntersuchungen

Aus den Freilandmessungen ließen sich einige zielführende Maßnahmen zur Reduktion der sommerlichen Überwärmung in Innenräumen ableiten:

- 1) Geschlossene Fassaden sollten im Idealfall mit einer Hinterlüftung und nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausgeführt werden. Durch eine Hinterlüftung ist ein guter Wärmeabtransport gegeben.
- 2) Der Hinterlüftungsspalt sollte an der engsten Stelle mindestens 3 cm aufweisen, um einen ausreichenden Wärmeabtransport zu gewährleisten. Je größer der Spalt

- ausgeführt wird, desto besser. Der deutlichste Effekt ist jedoch in für die ersten 3 cm zu erwarten.
- 3) Zu- und Abluftöffnungen mit einem offenen Mindestquerschnitt von 150 cm²/lfm haben sich für den Wärmeabtransport vorteilhaft gezeigt. Dabei ist die Querschnittsreduktion durch ein Insektenschutzgitter bereits einberechnet. Für Zu- und Abluftöffnungen mit 3 cm Spaltstärke ist zum Erreichen dieses Querschnitts ein Insektenschutzgitter mit mindestens 50 % Lochanteil erforderlich.
 - 4) Die Oberflächenfarbe bzw. Behandlung spielt eine zentrale Rolle für die sommerlichen Wärmeeinträge. Durch Fassaden mit hellen Beschichtungen und niedriger solarer Absorption ($\alpha \leq 0,2$) ließen sich die sommerliche Wärmeeinträge durch die opake Gebäudefläche in der Simulationsstudie um bis zu 1,26 kWh/m² (von 1,11 kWh/m² auf -0,15 kWh/m²) im Vergleich zu einer schwarzen bzw. gealterten Lärchenfassade reduzieren (siehe Anhang A2). Der Einfluss der Oberflächenfarbe ist bei geschlossenen Fassaden u.a. aufgrund des geringer ausfallenden Luftaustausches in der Hinterlüftungsebene größer als bei der offenen Variante. Bei unbehandelter, gealterter Holzoberfläche und anderen dunklen Oberflächenfarben verhält sich die offene Fassadenvariante im Hinblick auf die sommerliche Überwärmung vorteilhafter als die geschlossene. Bei heller Farbgebung verhält sich diesbezüglich hingegen die geschlossene Variante vorteilhafter. Der Einsatz von IR-aktiven Pigmenten auf der Außenoberfläche der Fassadenschalung zeigte nur ein sehr geringfügiges Potenzial.
 - 5) Hinterlüftete Fassaden (offen und geschlossen) zeigten im Freilandversuch auf der Südfassade deutlich geringere Wärmeeinträge als eine Putzfassade (gleichfarbig, weiß) mit gleichem U-Wert des Wandbildners (Putzfassade: 0,31 kWh/m², offene Fassade: 0,17 kWh/m², geschlossene Fassade: 0,11 kWh/m²).
 - 6) Die Dämmung des Fassadenschirms führte zu einer deutlichen Reduktion der Wärmeeinträge um bis zu 0,14 kWh/m² (ca. 0,09 kWh/m² → ca. -0,05 kWh/m²). Eine weiterführende Simulationsstudie zeigte jedoch auf, dass die Anbringung der Dämmung auf der Außenbeplankung (unter der Fassadenbahn) zu einem noch besseren Ergebnis führt (ca. -0,05 kWh/m² → ca. -0,15 kWh/m²).
 - 7) Bei der offenen Fassade zeigte jene Variante, bei der die Rhombusschalung mit nach unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung ausgeführt war die geringsten Oberflächentemperaturen und Wärmeeinträge. Dabei zeigte sich eine Spaltbreite von 7 mm (bei ~10 % Fugenanteil an der Gesamtfläche) von den hier untersuchten Spaltvarianten am vorteilhaftesten (Wärmeeinträge: 7mm → 0,11 kWh/m² / 14mm → 0,2 kWh/m² / 21mm → 0,22 kWh/m²). Bei senkrechter Ausführung der Rhombusschalung traf die Sonneneinstrahlung auf der Westfassade täglich zu einer gewissen Tageszeit direkt auf die darunterliegende, schwarze Fassadenbahn ein und erwärmte diese um bis zu 14 K. Die Wärmeströme fielen entsprechend höher aus als bei der Vergleichsvariante mit horizontaler Ausführung der Rhombusschalung (0,29 kWh/m² anstatt 0,2 kWh/m²).

3.2 Simulationsstudie

Das im Rahmen des Projekts gemäß Abschnitt 1.1.4.1 entwickelte thermische Fassadensimulationsmodell konnte erfolgreich validiert werden (siehe Abschnitt 2.2). Es kam für die Simulationsstudie zur Hochrechnung des Einsparungspotenzials auf Gebäudeebene zum Einsatz, wo es dazu diente, die Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn der unterschiedlich ausgerichteten und modifizierten Fassaden zu simulieren. Die Berechnung der Wärmeströme in das Gebäude erfolgte mithilfe des gemäß Abschnitt 1.1.4.2 erstellten und validierten (siehe Abschnitt 2.1.1) WUFI-Simulationsmodells.

Die in Abschnitt 2.3 dargelegten und diskutierten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Die Langwellige (IR-)Strahlung ist der primäre Wärmeübertragungsmechanismus von Fassadenschalung auf die Fassadenbahn. Durch die Reduktion des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen Schalungsinnenoberfläche und Fassadenbahnoberfläche lassen sich die Temperaturen auf der Fassadenbahn minimieren. Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass sich unabhängig von der solaren Absorption bzw. Farbgebung der Außenoberfläche der Schalung das Temperatur und Wärmestromniveau an der Bahn dadurch auf jenes einer weiß beschichteten Fassade ($a \leq 0,2$) senken lässt. Es gilt nun, geeignete, in der Praxis umsetzbare Konzepte zur Umsetzung zu ermitteln. Der Einsatz von IR-aktiven Beschichtungen auf der Fassadenbahn könnte ein erster praktikabler Ansatz sein.
- 2) Auch nordseitig führen dunkel beschichtete bzw. gealterte (dunkle) Holzfassaden aufgrund der auftretenden Diffusstrahlung zu erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn.
- 3) Der Anteil der sommerlichen Wärmeeinträge ist im Vergleich zu den winterlichen Wärmeverlusten durch die opake Gebäudehülle eher gering.

Aber: Es sollte im Sommerfall nicht nur um die Einsparung von Kühlenergie gehen, sondern auch darum, den Einbau eines Kühlsystems gar nicht erst erforderlich zu machen. Die Nachrüstung bzw. Einbau (im Neubau) eines solchen würde aufgrund des Herstellungs- und Einbauprozesses ebenfalls einen negativen Umwelteintrag bedeuten. Außerdem ist davon auszugehen, dass im Falle des Vorhandenseins einer solchen Kühlung diese vom Nutzer nicht -wie für die obige Studie- auf 25 °C, sondern zur Behaglichkeitsmaximierung deutlich darunter betrieben werden würde, wodurch der zu erwartende Kühlenergiebedarf nochmals stark ansteigen würde. Heizsysteme sind hingegen zwingend notwendig und in jedem Wohngebäude bereits verbaut. Aus diesen Gründen ist es wohl sinnvoll, bei der diesbezüglichen Fassadenplanung diese eher auf den Sommerfall hin zu optimieren.

- 4) Die sommerlichen Wärmeeinträge werden sich in Zukunft (2050) deutlich erhöhen, während die winterlichen Wärmeverluste sich etwas reduzieren. Der relative Anteil des Kühlbedarfs am Gesamtenergiebedarf wird also dementsprechend stark zunehmen.

- 5) Es zeigt sich eine geringfügig bessere Energiebilanz, wenn der größere opake Fassadenanteil des Gebäudes in Ost-West Richtung ausgerichtet ist.

Allgemein gilt es der Notwendigkeit des Einbaus aktiver Kühlsysteme entgegenzuwirken und - wenn doch erforderlich – den Energiebedarf dieser auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Optimierte Fassadenkonzepte sind dabei nur ein Teil des Gesamtbilds. Nur gemeinsam mit optimierten Beschattungs-, Verglasungs- und Lüftungskonzepten lässt sich der sommerliche Wärmeeintrag möglicherweise auch in Zukunft so weit reduzieren, dass eine aktive Kühlung nicht erforderlich wird.

4 Literatur

- [1] COMSOL Multiphysics® Version 6.1 [Software], www.comsol.com.
- [2] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: WUFI Pro, <https://wufi.de/de/> [Zugriff am: 23.10.2023].
- [3] IPCC (ed.): Climate change 2014 – Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2015.
- [4] ÖNORM EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Ausgabe Juni 2007.

**Cooler Hülle -
Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen
Klimawandel und Technik**

AP3: Kühle Fassade -
Alterung von Fassadenoberflächen

Anhang 2 zum Endbericht

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: f51810

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL-Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor

Dipl.-HTL-Ing. Michael Truskaller

Weiter Projektmitarbeiter:innen

Stephanie Hofman, BSc

Michael Svoboda

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Material und Methoden.....	4
1.1	Probenmaterial	5
1.2	Total Solar Reflectance in Anlehnung an ASTM G 173 250 nm bis 2500 nm	6
1.3	CIE-Lab-Farbmessung	6
1.4	Beschleunigte Bewitterung.....	7
1.5	Freilandbewitterung	8
2	Ergebnisse und Diskussion	8
3	Zusammenfassung	32
4	Literatur	33

1 Material und Methoden

An Holzproben wurde der Einfluss des Holzuntergrundes, der Beschichtung und der Alterung der Oberfläche im Zuge einer beschleunigten Bewitterung auf den Total Solar Reflectance (TSR) und die Farbmesswerte nach dem CIE Lab untersucht. Der TSR ist ein wichtiger Parameter, um die Oberflächentemperatur bei Sonneneinstrahlung zu bestimmen.

An Proben wurde vor und nach einer 3-monatigen beschleunigten Bewitterung der Total Solar Reflectance (TSR) Wert vom Polymer Competence Center Leoben GmbH ermittelt. Begleitend wurde von Holzforschung Austria vor und in Intervallen während der beschleunigten Bewitterung die Farbänderung nach CIE Lab bestimmt. Es sollte untersucht werden ob über die Farbmessung nach CIE Lab der TSR Wert und daraus die Oberflächentemperatur näherungsweise bestimmt werden kann.

Das untersuchte Probenmaterial und die Untersuchungsmethoden sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Welche Messungen nach welchen Zeiten der beschleunigten Bewitterung durchgeführt wurden ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Messzeitpunkte im Zuge der beschleunigten Bewitterung

Messung	Bewitterungszeit beschleunigte Bewitterung					
	0h	168h	335h	672h	1344h	2016h
CIE Lab BYK_Schablone_n=6	x	x	x	x		
CIE Lab BYK_willkürlich_n=12	x					
CIE Lab Minolta_Schablone_n=6				x	x	x
CIE Lab Minolta_willkürlich_n=12	x					x
Probenscan	x	x	x	x	x	x
Total Solar Reflectance (TSR) n=3	x					x

1.1 Probenmaterial

An folgenden Oberflächenvarianten wurden die Untersuchungen durchgeführt:

Tabelle 2: Probenmaterial und Varianten (0 bis 15)

Holzart/ Oberflächenvorbehandlung	BS	LA gehobelt	LA sägerau	FI gehobelt	EI gehobelt
Unbeschichtet	UN	1 ^a		2 ^a	3 ^a
Deckend dunkel ohne reflektierenden IR-P	B+B	4	6		
Deckend dunkel mit reflektierenden IR-P	C+C	5	7		
Deckend dunkel ohne transparenten IR-P	A+D+D	8			
Deckend dunkel mit transparenten IR-P	A+E+E	9			
Lasierend Nussbaum ohne reflektierenden IR-P	F+F	10			
Lasierend Nussbaum mit reflektierenden IR-P	G+G	11		12	13
Deckend weiß ohne IR-Pigmente	A+A	14			
Deckend metallic ohne IR-Pigmente	H+H	15			
BS: applizierte Beschichtungsprodukte nach Tabelle 3; LA: sibirische Lärche Kernholz; FI: Fichte; EI: Eiche Kernholz					

^{a)} ... es wurde ein bereits bewittertes Brett für den Zustand „gealtert“ gemessen, für den Zustand „frisch“ wurde die Oberfläche dieses Fassadenbrettes abgehobelt

Das unbeschichtete Eichenholzbrett wurde im Jahr 2010, das unbeschichtete Lärchenholzbrett wurde im Jahr 2017 und das unbeschichtete Fichtenholzbrett wurde im Jahr 2018 auf der Forschungsterrasse Tulln horizontal der im Freiland exponiert und im April 2022 entnommen. Das Eichenholz war somit ca. 12 Jahre, das Lärchenholz ca. 5 Jahre und das Fichtenholz ca. 4 Jahre alt.

Die gehobelten Proben hatten im gelieferten Zustand eine gehobelte Oberfläche auf die direkt das Beschichtungssystem appliziert wurde. Für die Herstellung der sägerauen Oberfläche wurden die Proben bei Holzforschung Austria auf der Kreissäge vor der Applikation des Beschichtungssystems mit einem Kreissägeschnitt versehen.

Die Beschichtungsprodukte (Tabelle 3) wurden auf den gehobelten Oberflächen mit einer Ziel Auftragsmenge von 40 g/m² und auf den sägerauen Oberflächen von 80 g/m² appliziert. Das Beschichtungsprodukt „H“ (Deckend graue metallic Beschichtung) wurde mittels Spritzapplikation verarbeitet, alle anderen Beschichtungsprodukte wurden mittels Streichapplikation mit einem Pinsel verarbeitet. Es erfolge kein Zwischenschliff.

In Tabelle 3 sind die Beschichtungssysteme beschrieben, die Beschichtungsprodukte hatten keinen Bläueschutz.

Tabelle 3: Beschreibung der Beschichtungsprodukte

BS	Beschreibung	IR-Pigmente	Farbton
UN	Unbeschichtet	--	--
A	Weiß (ca. RAL 9010), deckend Landhausfarbe 2101 ohne IR Pigmente	Ohne IR	Weiß deckend
B	Anthrazitgrau (ca. RAL 7016), deckend mit Standardpigmenten Landhausfarbe 2716 ohne reflektierenden IR-Pigmenten	Ohne IR	Dunkelgrau deckend
C	Anthrazitgrau (ca. RAL 7016), deckend mit NIR reflektierenden Pigmenten - Laborprodukt mit reflektierenden IR-Pigmenten	IR-reflektierend	Dunkelgrau deckend
D	Anthrazitgrau (ca. RAL 7016), deckend mit Standardpigmenten Landhausfarbe 2716 ohne transparenten IR-Pigmente	Ohne IR	Dunkelgrau deckend
E	Anthrazitgrau (ca. RAL 7016), deckend mit NIR transparenten Pigmenten - Laborprodukt mit transparenten IR-Pigmenten	IR transparent	Dunkelgrau deckend
F	Nussbaum mit Standardpigmenten Holzschutz-Öl Lasur 707 ohne reflektierende IR-Pigmente	Ohne IR	Dunkelbraun lasierend
G	Nussbaum mit NIR reflektierenden Pigmenten - Laborprodukt mit reflektierenden IR-Pigmenten	IR reflektierend	Dunkelbraun lasierend
H	Spiegelnde Oberfläche, metallic Effekt, deckend – Laborprodukt ohne IR-Pigmente	Ohne IR	Hellgrau metallic

1.2 Total Solar Reflectance in Anlehnung an ASTM G 173 250 nm bis 2500 nm

Proben mit einer Größe von ca. 50 mm x 50 mm x ca. 20 mm wurden an das Polymer Competence Center Leoben GmbH zur Messung gesendet. Ein Probenset wurde vor Beginn der Bewitterung (nach Fertigstellung der Oberflächenbehandlung) versendet, ein zweites Set an Proben wurde nach dem Ende der beschleunigten Bewitterung versendet.

Die Messung der hemisphärischen Reflexion erfolgte mit reflektierender Kugel (Ulbrichtkugel) zwischen 250 und 2500 nm in 5 nm Schritten. Es wurden je Probe 3 Wiederholungsmessungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt.

Die Ermittlung des solar gewichteten Reflexionsgrades erfolgte zwischen 250 und 2500 nm, gewichtet mit dem hemisphärischen AM1.5 Spektrum aus ASTM G173 03 (2012) [1].

1.3 CIE-Lab-Farbmessung

Die Farbmessungen erfolgten in Anlehnung an ISO 18314-1 [2] mittels Spektralphotometer (BYK Gardner „Colour Guide Gloss“) mit der Messgeometrie d/8 bei Normlichtart D65 und einem 10° Normalbeobachter. Der Messfleck dieses Gerätes wies einen Durchmesser von 11 mm auf. Es wurde die Messskala nach CIEL*a*b* angewendet. An den Proben wurde eine Mischfarbe aus den Bereichen Früh- und Spätholz ermittelt. Vom Gerät BYK Gardner „Colour

Guide Gloss“ standen die Remissionskurven von 400 nm bis 700 nm in 10 nm Schritten zur Verfügung.

Darüber hinaus wurde die Farbmessung zusätzlich mit einem Minolta Spectrophotometer CM-2600d mit der Messgeometrie d/8 bei Normlichtart D65 und einem 10° Normalbeobachter durchgeführt. Der Messfleck dieses Gerätes wies einen Durchmesser von 8 mm auf. Vom Gerät Minolta Spectrophotometer CM-2600d standen die Remissionskurven von 400 nm bis 700 nm in 10 nm Schritten zur Verfügung.

Die Messung wurden mittels einer Schablone immer an den möglichst gleichen Positionen durchgeführt mit 6 Messpunkten je Probe. Darüber hinaus wurde vor Beginn der Schnellbewitterung und nach Abschluss der Schnellbewitterung an 12 willkürlich gewählten Stellen die Messung wiederholt.

1.4 Beschleunigte Bewitterung

Beschleunigte Bewitterungsversuche von beschichteten Holzproben wurden in einem QUV-Schnellbewitterungsgerät mit Spray-Option der Firma Q-Panel durchgeführt. Darin wurden UV-Belastung (UV-Lampen), Beregnung (Spraydüsen) und Taubelastung (Kondensation an der Oberfläche) simuliert. Für diese Arbeit wurde ein Bewitterungszyklus entsprechend ÖNORM EN 927-6 [3] angewandt. Dabei wechselten 2,5 Stunden UV-Belastung mit 0,5 Stunden Spraybelastung ab. Einmal pro Woche wurde 24 Stunden lang eine Kondensationsphase durchlaufen. Der verwendete Lampentyp war UVA 340, die Bestrahlungsstärke betrug bei 340 nm 0,89 W/m²/nm. Während der Spraybelastung wurde eine konstante Sprühleistung zwischen 6 und 7 l/min. erreicht. Die Proben wurden in den Rahmen so eingebaut, dass nur ein Teil der Oberfläche der Bewitterung ausgesetzt war.

Die eingebauten Proben wurden zu folgenden Zeitpunkten kontrolliert, die Oberflächen in einem A4 Scanner gescannt, die CIE-Lab-Farbmessung durchgeführt und das Abwitterungsverhalten protokolliert:

- Ausgangszustand
- Nach 1 Woche Bewitterung
- Nach 2 Wochen Bewitterung
- Nach 4 Wochen Bewitterung
- Nach 8 Wochen Bewitterung
- Nach 12 Wochen Bewitterung

1.5 Freilandbewitterung

Auf der West- und Südfassade des in Anhang 1 beschriebenen Forschungshauses wurde nach 9 Monaten und 13 Monaten Freilandbewitterung an den in Tabelle 4 aufgelisteten Varianten, alle ohne IR-Pigmenten, Farbmessungen mit dem Minolta Spectrophotometer CM-2600d, wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, durchgeführt. Je Probe und Messzeitpunkt wurden an zuvor definierten Bereichen ohne besondere Holzmerkmale, sechs Messungen verteilt über die Brettbreite durchgeführt.

Tabelle 4: Varianten mit Farbmessung nach 9 und 13 Monaten Freilandbewitterung

Variante ^a	Expositions- richtung	Ausrichtung	Holzart	Proben- anzahl
1. Unbeschichtet	Süden	Senkrecht	Lärche	3
1. Unbeschichtet	Süden	Waagrecht	Lärche	3
4. Deckend dunkel ohne reflektierenden IR-P	Süden	Senkrecht	Lärche	3
4. Deckend dunkel ohne reflektierenden IR-P	Süden	Waagrecht	Lärche	3
14. Deckend weiß ohne IR-Pigmente	Süden	Waagrecht	Lärche	3
14. Deckend weiß ohne IR-Pigmente	Süden	Senkrecht	Lärche	3
15. Deckend metallic ohne IR-Pigmente	Süden	Senkrecht	Lärche	3
0. Deckend weiß Putzfassade	Süden	n.a.	Putz	3
1. Unbeschichtet	Westen	Senkrecht	Lärche	14
1. Unbeschichtet	Westen	Waagrecht	Lärche	6
^a)... Varianten wie in Tabelle 2 beschrieben				

2 Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 1 sind die Proben abgebildet, an denen im unbewitterten frischen Zustand die TSR und Farbmessungen nach CIE Lab durchgeführt wurden. In Abbildung 2 sind die Proben abgebildet, an denen im alten bzw. nach 2016 Stunden beschleunigter Bewitterung die TSR und Farbmessungen nach CIE Lab durchgeführt wurden. Die unbeschichteten Proben wurden im Zuge der Freilandbewitterung als Terrassendiele (Versuchsterrasse Tulln) deutlich dunkler, bei den beschichteten Proben war die Farbänderung gering.

In Tabelle 6 ist der Total Solar Reflectance (TSR) der unbewitterten Proben (TSR_u) und der gealterten (horizontale Freilandbewitterung bei den unbeschichteten Proben und 2016 h QUV-Schnellbewitterung bei den beschichteten Proben) Proben (TSR_g) und die Änderung des TSR (ΔTSR_{g-u}) zwischen dem frischen und gealterten Zustand aufgelistet.

Helle Oberflächen zeigten einen hohen TSR, dunkle Oberflächen hatten einen niedrigen TSR. Ein niedriger TSR bedeutet, dass von der Oberfläche ein geringer Anteil der einfallenden

Strahlung reflektiert und ein großer Anteil absorbiert wird. Eine hohe Absorption von Strahlung führt zur starken Erwärmung der Oberfläche.

Im unbewitterten Zustand hatte die weiße deckende Beschichtung (Variante 14) mit 0,82 den höchsten TSR, die deckend schwarzen Beschichtungen ohne IR Pigmenten (Variante 4, 6 und 8) hatten mit 0,07 bis 0,09 den niedrigsten TSR. Von den unbeschichteten unbewitterten Oberflächen zeigte das Fichtenholz (Variante 2) mit 0,72 den höchsten TSR und das Eichenholz (Variante 3) mit 0,55 den Niedrigsten, das Lärchenholz (Variante 1) lag mit 0,63 dazwischen. Bei der deckend schwarzen Beschichtung, mit und ohne IR-Pigmenten, hatte der Holzuntergrund, gehobelt oder sägerau, keinen signifikanten Einfluss auf den TSR. Der TSR der braun lasierten Oberflächen, mit und ohne IR-Pigmenten, lag um ca. 0,2 höher als jener der deckend schwarz beschichteten Oberflächen.

Der Einfluss der Alterung auf den TSR (ΔTSR_{g-u}) war bei den unbeschichteten Oberflächen am höchsten, bei den untersuchten Holzarten reduzierte sich der TSR um 0,42 bis 0,44 und lag nach der Alterung im Bereich der braun lasierten Oberflächen. Die Änderung des TSR der beschichteten Oberflächen durch die 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung war bei den deckend schwarzen Beschichtungen und den braun lasierenden Oberflächen mit 0,01 bis 0,02 (Aufhellung) vernachlässigbar gering. Einzig auf der braunen Lasur auf gehobeltem Eichenholz kam es zur Reduktion des TSR um -0,04, was auf eine Dunkelfärbung der Oberfläche in den abgewitterten Poren (Gerbstoffreaktion) zurückzuführen war. Von den Beschichtungen zeigte die deckend weiße Beschichtung mit -0,11 die größte Reduktion des TSR (dunkler werden) was auf das Auftreten von großen Holzrissen und kleinflächige Abblätterungen zurückzuführen war. Die metallic Beschichtung (Variante 15) hatte im unbewitterten Zustand mit 0,62 einen hohen TSR, ähnlich unbeschichtetem unbewitterten Lärchenholz (Variante 1). Durch die 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung erhöhte sich der TSR auf 0,77 und lag somit höher als die bewitterte deckend weiße Oberfläche mit 0,71.

Der Einfluss der IR-Pigmente ist in Tabelle 7 ersichtlich, in der für den unbewitterten und gealterten Zustand die Differenz des TSR zwischen Oberflächen mit IR-Pigmenten und ohne IR-Pigmenten aufgelistet sind. Durch reflektierende IR-Pigmente (rIR) in den Varianten 5, 7 und 11, wurde der TSR um ca. 0,17 erhöht, wobei dieser Effekt bei den deckend schwarzen Beschichtungen (Varianten 5 und 7) und den braun lasierenden Beschichtungen (Variante 11) gleich war und der Holzuntergrund, ob gehobelt (Variante 5) oder sägerau (Variante 7), ebenfalls keinen Einfluss zeigte. Die transparenten IR-Pigmente (tIR), welche ausschließlich mit deckend schwarzer Beschichtung auf gehobeltem Lärchenholz in Variante 9 untersucht wurden, zeigte mit einer Erhöhung des TSR um 0,29 einen deutlich größeren Effekt als die rIR-Pigmente. Bei den gealterten Oberflächen, in dem Fall 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung, blieb die Wirkung der rIR-Pigmente und tIR-Pigmente im gleichen Maß aufrecht.

In Abbildung 7 ist der TSR der unbewitterten Proben (TSR_u) dem TSR der gealterten Proben (TSR_g) grafisch gegenübergestellt. Jene Punkte die unter der diagonal gezogenen Linie liegen

wurden durch die Alterung dunkler, jene die oberhalb der Linie liegen erfuhren ein heller werden. Jene Messpunkte, die nahe der Linie liegen erfuhren durch die Alterung keine Änderung des TSR.

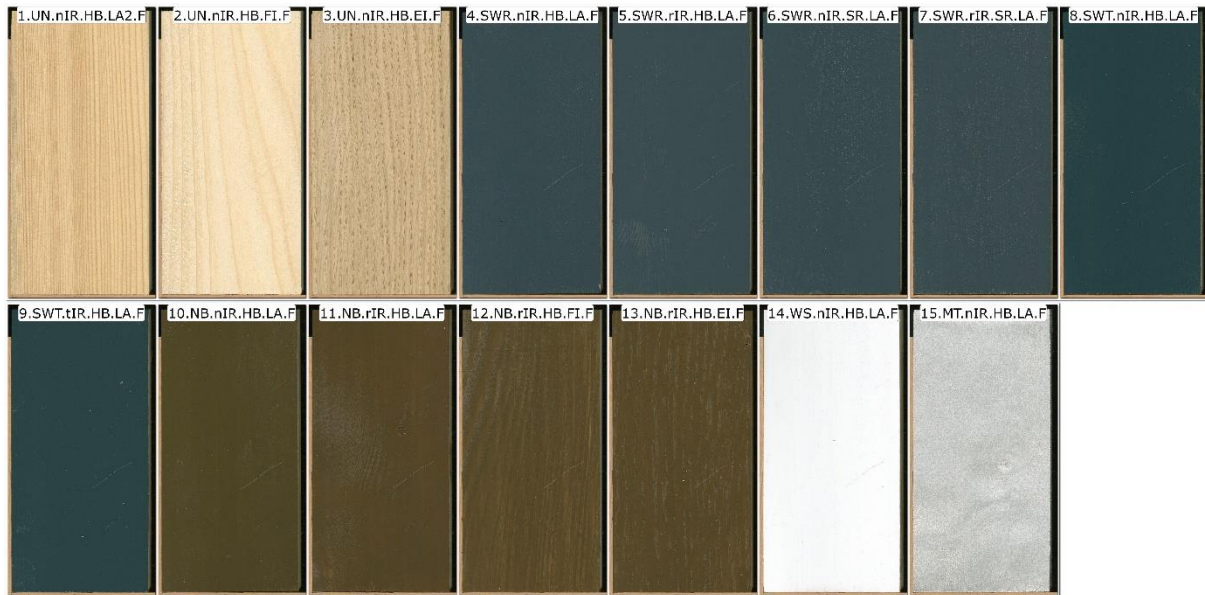


Abbildung 1: Scan der Proben an denen im frischen, nicht bewitterten Zustand die TSR- und CIE Lab Farbmessungen erfolgten

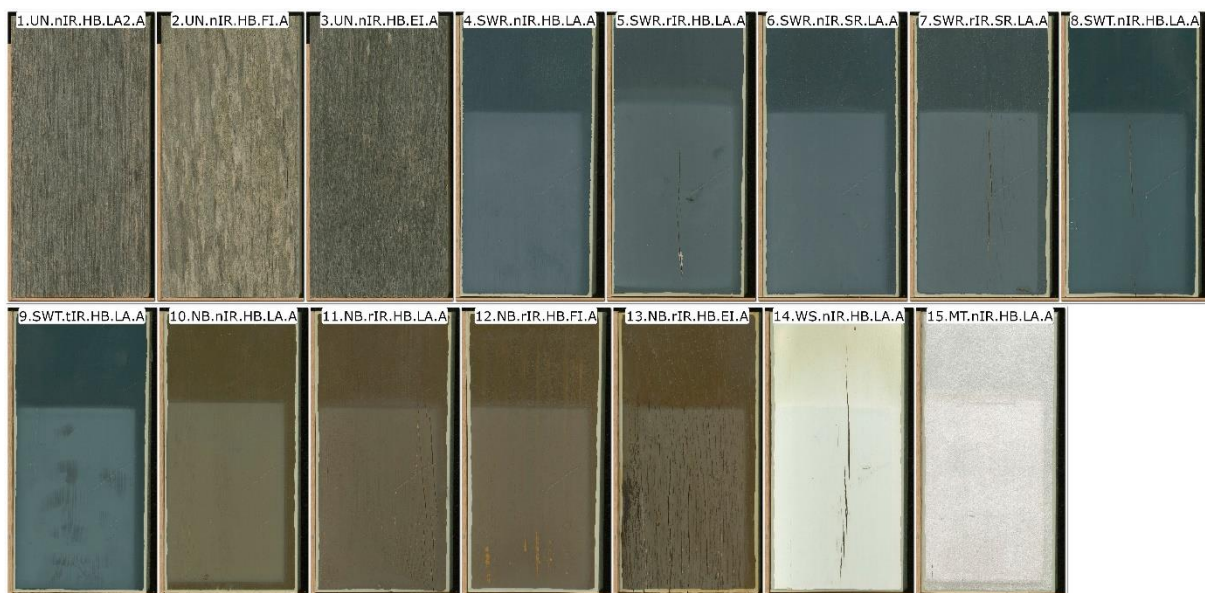


Abbildung 2: Scan der Proben an denen im gealterten (unbehandelte Proben) bzw. nach 2016 Stunden beschleunigter Bewitterung (beschichtete Proben) die TSR- und CIE Lab Farbmessungen erfolgten

In Abbildung 3 bis Abbildung 6 ist die hemisphärische Reflexion über den Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm, aus denen der TSR ermittelt wurde, für die untersuchten Varianten dargestellt. Darin lässt sich die Änderung der Reflexion in den einzelnen Wellenlängenbereichen wie sie in Tabelle 5 exemplarisch angeführt sind, ablesen.

Tabelle 5: Beispielhafte Einteilung der Wellenlängenbereiche

Bereich	Wellenlänge (nm)	Typische Bezeichnung
UV Rand	250–320	nahes UV / UVA Rand
Vis	320–780	sichtbares Licht
Vis–NIR	700–1100	Übergang Vis–NIR
NIR kurz	1100–1700	kurzwelliges NIR
NIR lang	1700–2500	langwelliges NIR

Die unbeschichteten Proben in Abbildung 3 zeigen große Unterschiede zwischen den unbewitterten Proben und den gealterten Proben (Eiche ca. 12 Jahre, Lärche ca. 5 Jahre und Fichte ca. 4 Jahre horizontale Bewitterung auf einer Versuchsterrasse). Eine Reduktion der Reflexion wurde vor allem im Bereich zwischen sichtbarem Licht und kurzwelligem NIR Bereich festgestellt, im UV-Bereich und langwelligem NIR Bereich waren die Unterschiede gering.

In den Spektren für die deckend schwarzen Beschichtungen in Abbildung 4 ist durch die Alterung durch eine 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung kaum zu erkennen. Klar erkennt man die Unterschiede zwischen den Beschichtungen ohne IR-Pigmente, die über den gesamten Wellenlängenbereich eine sehr geringe Reflexion zeigen, und Beschichtungen mit IR-Pigmenten, die im Übergang Vis-NIR und im NIR Bereich die Wirkung der IR-Pigmente veranschaulichen. Nochmals stärker ist die reflektierende Wirkung im Übergang Vis-NIR der IR-transparenten Pigmente im Vergleich zu den IR-reflektierenden Pigmenten.

Die Wirkung der reflektierenden IR-Pigmente war in Abbildung 5 auch auf der lasierend braunen Beschichtung auf allen Holzarten, Fichte, Eiche und Lärche, zu erkennen, mit geringen Unterschieden zwischen den Holzarten und zwischen unbewittert und 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung. Einzig die Eichenholzprobe zeigte nach der QUV-Schnellbewitterung eine Reduktion der Reflexion im Übergang zwischen Vis-NIR.

Die deckend weiße Beschichtung in Abbildung 6 zeigt im sichtbaren Bereich und Übergang zwischen Vis-NIR aufgrund der Alterung eine deutliche Reduktion der Reflexion. Ursache dafür sind unter anderem Risse, die im Zuge der QUV-Schnellbewitterung entstanden sind. Die graue Metallic Beschichtung zeigte im Neuzustand bereits im UV-Bereich und weiters im NIR Bereich höhere Reflexionen als die übrigen Beschichtungssysteme. Durch die QUV-Schnellbewitterung erhöhte sich die Reflexion im Vergleich zur unbewitterten Probe über das gesamte Wellenlängen Spektrum.

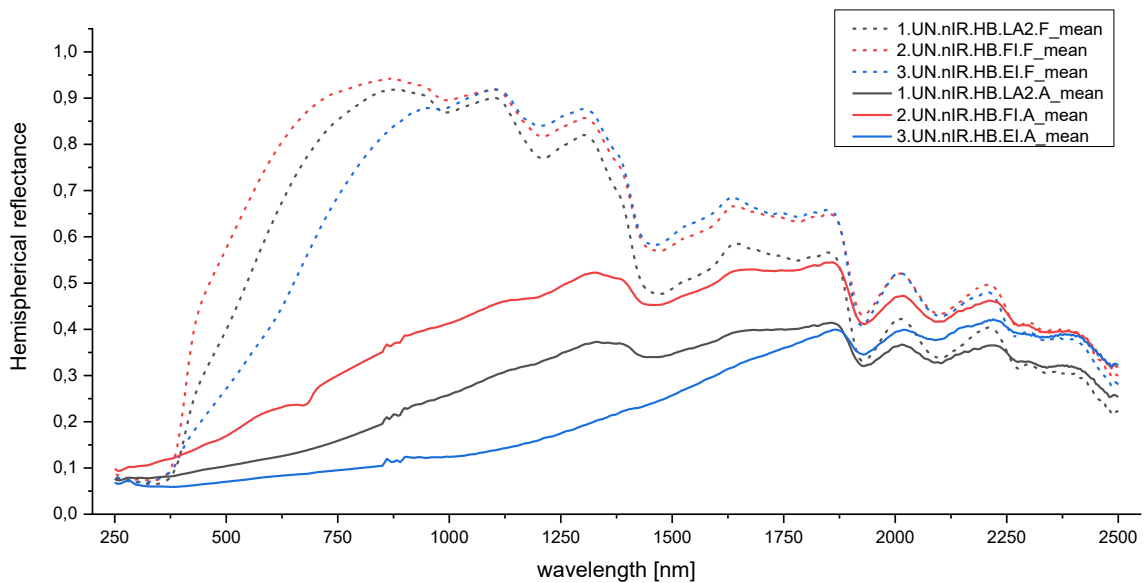


Abbildung 3: Hemisphärische Reflexion über den Wellenlängenbereich von 250 bis 2500 nm von unbeschichteten Lärchenholz- (LA), Fichtenholz- (FI) und Eichenholzproben (EI) im Neuzustand (F) und im gealterten Zustand (A) – Mittelwerte $n=3$

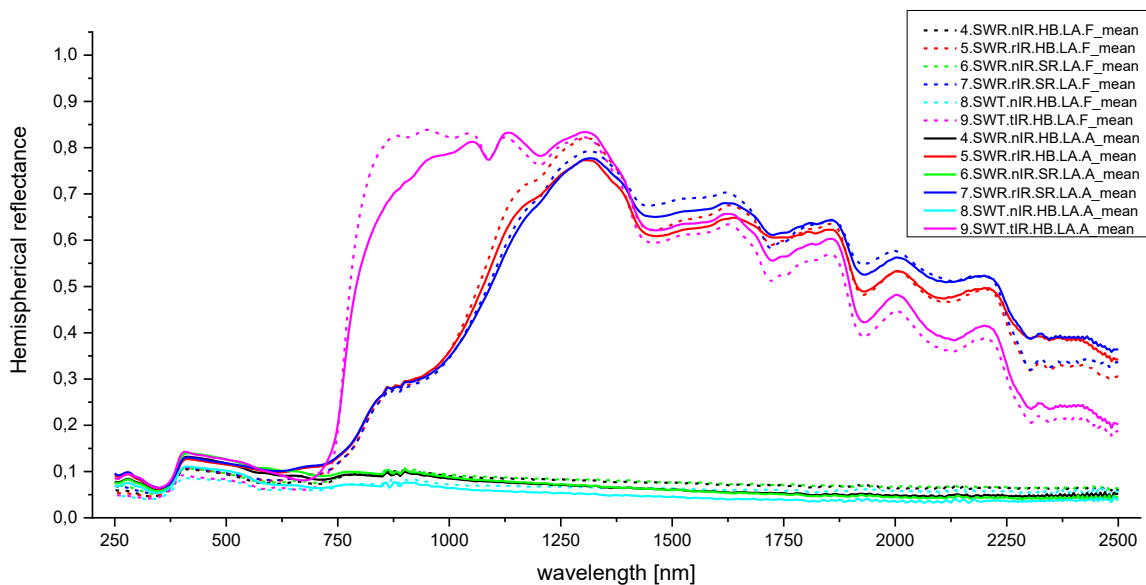


Abbildung 4: Hemisphärische Reflexion über den Wellenlängenbereich von 250 bis 2500 nm von schwarz deckender Beschichtung (SWR) mit/ohne (mIR/nIR) reflektierenden IR-Pigmenten und schwarz deckender Beschichtung (SWT) mit/ohne (mIR/nIR) transparenten IR-Pigmenten auf gehobelten (HB) und sägerauen (SR) Lärchenholzproben (LA) im Neuzustand (F) und im gealterten Zustand (A) – Mittelwerte $n=3$

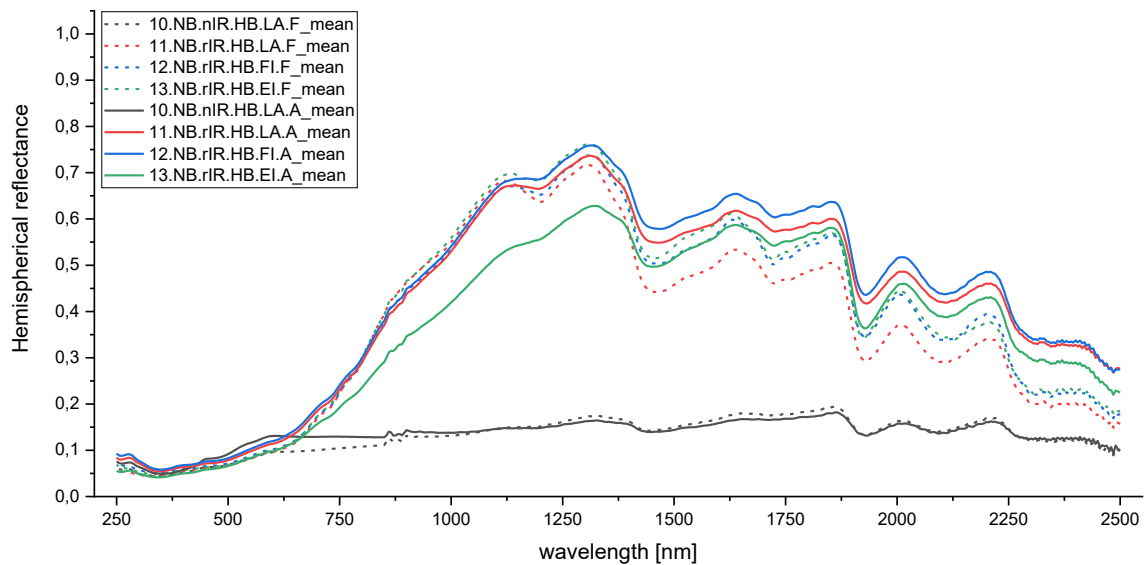


Abbildung 5: Hemisphärische Reflexion über den Wellenlängenbereich von 250 bis 2500 nm von lasierend brauner Beschichtung (NB) mit/ohne (mlR/nlR) reflektierenden IR-Pigmenten auf gehobelten (HB) Lärchenholz- (LA), Fichtenholz- (FI) und Eichenholzproben (EI) und schwarz deckender Beschichtung (SWT) mit/ohne (mlR/nlR) transparenten IR-Pigmenten im Neuzustand (F) und im gealterten Zustand (A) – Mittelwerte n=3

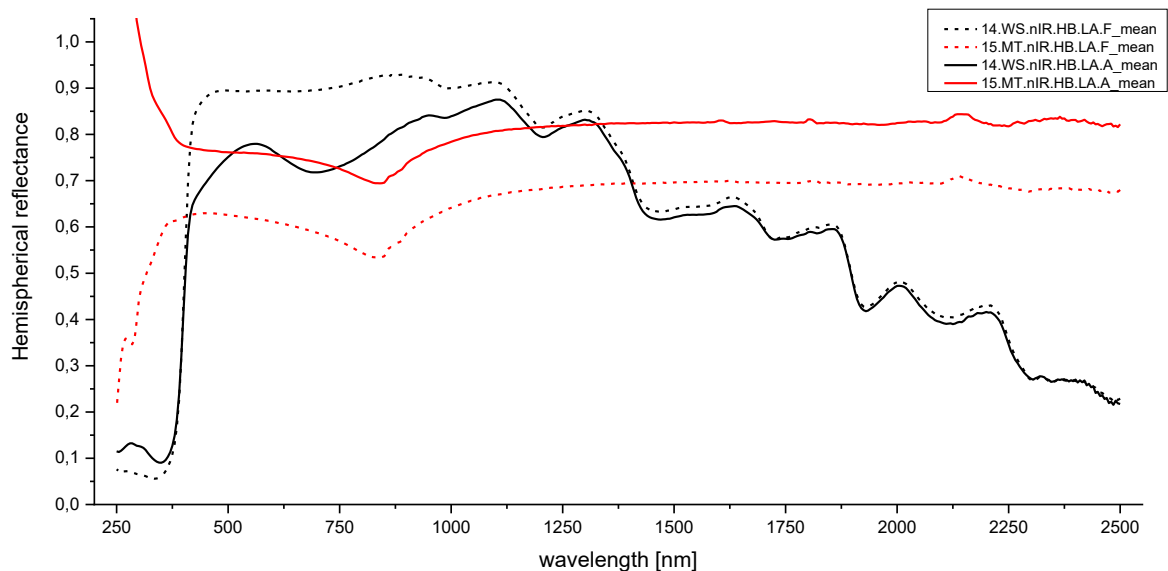


Abbildung 6: Hemisphärische Reflexion über den Wellenlängenbereich von 250 bis 2500 nm von deckend weißer Beschichtung (WS) und grau deckender Metallic Beschichtung ohne IR-Pigmenten (nlR) auf gehobelten (HB) Lärchenholzproben (LA) im Neuzustand (F) und im gealterten Zustand (A) – Mittelwerte n=3

Tabelle 6: Total Solar Reflectance (TSR) unbewittert (TSR_u), gealtert (TSR_g) und Änderung durch die Alterung (ΔTSR_{g-u})

Variante	TSR_u	TSR_g	ΔTSR_{g-u}^c
1.UN.nIR.HB.LA	0,634	0,189 ^a	-0,444
2.UN.nIR.HB.FI	0,723	0,300 ^a	-0,423
3.UN.nIR.HB.EI	0,552	0,122 ^a	-0,430
4.SWR.nIR.HB.LA	0,084	0,091 ^b	0,007
5.SWR.rIR.HB.LA	0,254	0,260 ^b	0,006
6.SWR.nIR.SR.LA	0,087	0,096 ^b	0,010
7.SWR.rIR.SR.LA	0,251	0,262 ^b	0,010
8.SWT.nIR.HB.LA	0,069	0,072 ^b	0,003
9.SWT.tIR.HB.LA	0,362	0,365 ^b	0,003
10.NB.nIR.HB.LA	0,107	0,122 ^b	0,016
11.NB.rIR.HB.LA	0,274	0,290 ^b	0,016
12.NB.rIR.HB.FI	0,280	0,300 ^b	0,021
13.NB.rIR.HB.EI	0,287	0,243 ^b	-0,044
14.WS.nIR.HB.LA	0,818	0,712 ^b	-0,105
15.MT.nIR.HB.LA	0,620	0,768 ^b	0,148

^a) ... Alterung durch horizontale Freilandbewitterung auf der Versuchsterrasse in Tulln

^b) ... Alterung durch 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung

^c) ... Differenz zwischen dem TSR der gealterten Oberfläche (TSR_g) und der unbewitterten Oberfläche (TSR_u)

Tabelle 7: Unterschied des TSR zwischen Beschichtungen mit IR-Pigmenten und ohne IR-Pigmenten – unbewittert und gealtert durch 2016 h QUV-Schnellbewitterung

Variante	ΔTSR_u^a	ΔTSR_g^b	ΔTSR_{g-u}^c
5.SWR.rIR.HB.LA-4.SWR.nIR.HB.LA	0,170	0,169	-0,001
7.SWR.rIR.SR.LA-6.SWR.nIR.SR.LA	0,165	0,165	0,000
9.SWT.tIR.HB.LA-8.SWT.nIR.HB.LA	0,293	0,292	-0,001
11.NB.rIR.HB.LA-10.NB.nIR.HB.LA	0,167	0,168	0,001

^a) ... Differenz zwischen dem TSR mit IR-Pigmenten und ohne IR-Pigmenten unbewitterter Oberflächen

^b) ... Differenz zwischen mit IR-Pigmenten und ohne IR-Pigmenten gealterter Oberfläche

^c) ... Differenz zwischen gealtert und unbewittert ($\Delta TSR_g - \Delta TSR_u$)

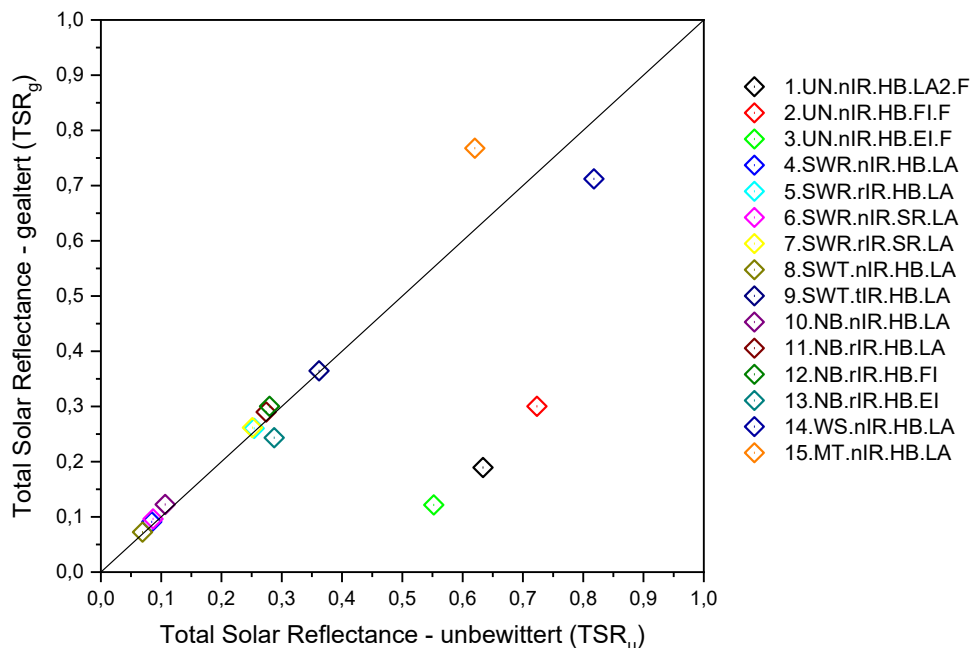
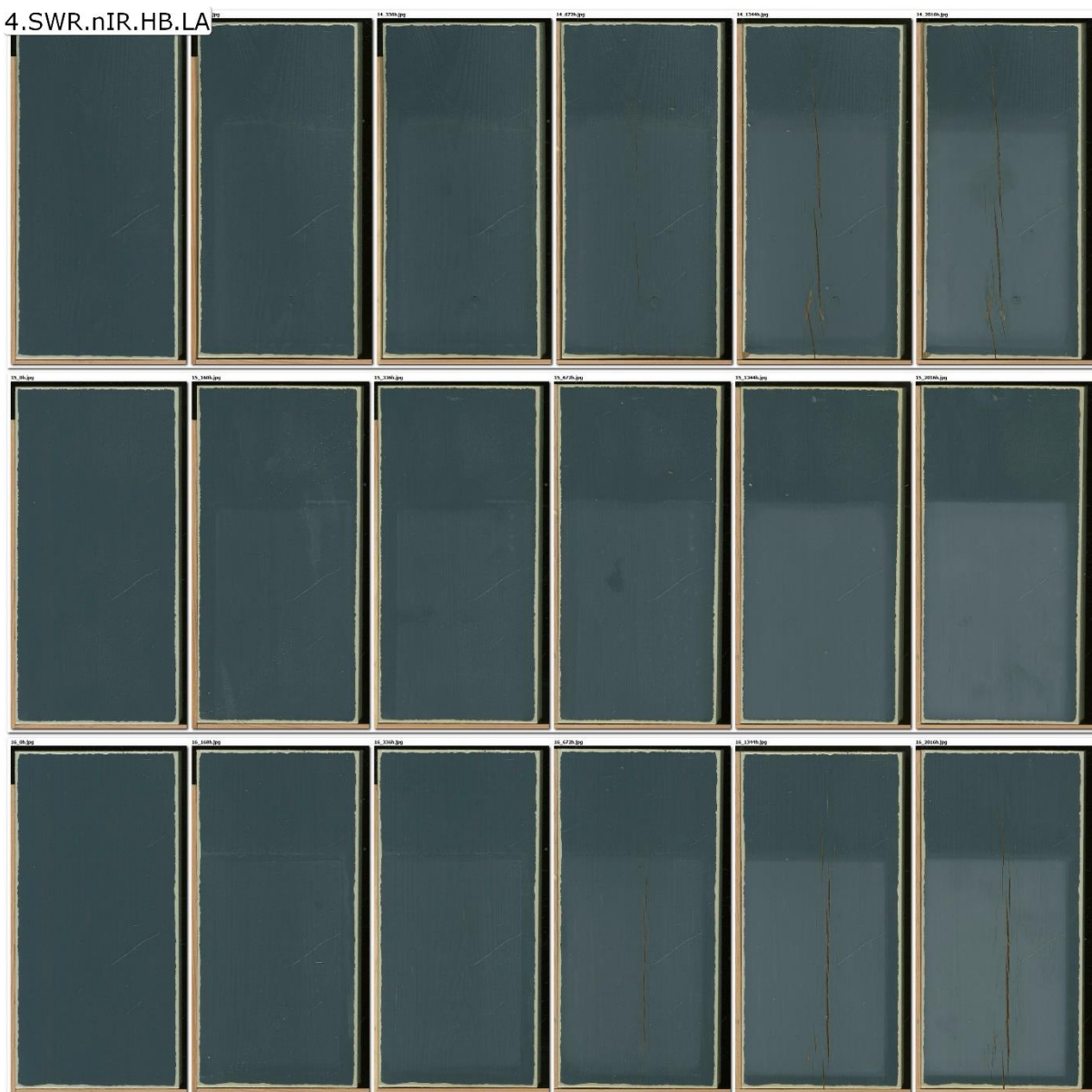


Abbildung 7: Zusammenhang Total Solar Reflectance von unbewitterten Proben (TSR_u) und gealterten Proben (TSR_g)

In den Abbildung 8 bis Abbildung 19 sind die Scans der drei Einzelproben der untersuchten Varianten und die Änderung der CIE Lab Farbmesswerte (L^* : Helligkeit und R 400 nm bis R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm) als Mittelwert der drei Probe, im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0, 168, 336, 672, 1344 und 2016 Stunden Bewitterungszeit, dargestellt.

Es ist die Änderung der Oberfläche im Zuge der beschleunigten Bewitterung ersichtlich. Einerseits kam es zu Farbänderungen, die dunklen Oberflächen wurden tendenziell heller die deckend weiße Beschichtung wurde etwas dunkler. Die Proben mit der nussbraunen Lasur auf Eichenholz (Variante 13 in Abbildung 17) zeigten mit Fortdauer der Bewitterung eine Schwarzfärbung in den Poren, was auf eine Reaktion des Gerbstoffhaltigen Eichenholzes mit Metall zurückzuführen ist. Die Proben mit metallic Beschichtung (Variante 15 in Abbildung 19) wurden durch die beschleunigte Bewitterung tendenziell heller. Die Rissbildung der Proben und Abblätterungen der Beschichtung beeinflussen die Ergebnisse der Farbmessung.

4.SWR.nIR.HB.LA



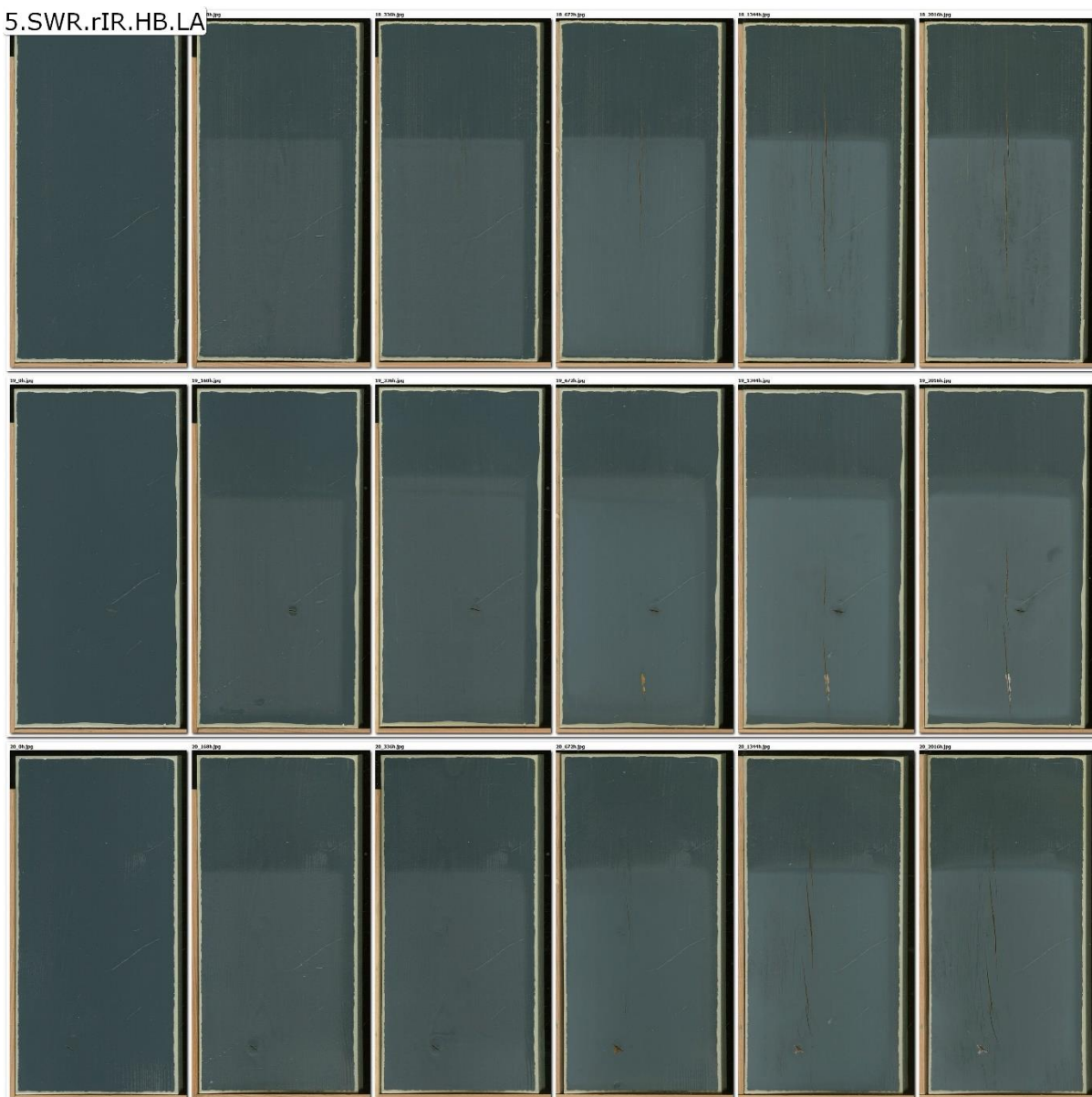
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	33,85	33,66	33,44	33,31	35,36	38,58
R 400 nm	10,03	9,91	9,87	9,63	10,46	11,49
R 450 nm	9,72	9,56	9,52	9,47	10,78	12,50
R 500 nm	8,93	8,78	8,73	8,72	9,85	11,65
R 550 nm	7,76	7,71	7,63	7,49	8,46	10,28
R 600 nm	7,15	7,08	6,89	6,87	7,83	9,51
R 650 nm	7,40	6,99	6,88	7,07	7,66	9,08
R 700 nm	6,93	6,43	6,38	6,68	7,03	8,24

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 8: Variante 4 – dunkle deckende Beschichtung ohne reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

5.SWR.rIR.HB.LA



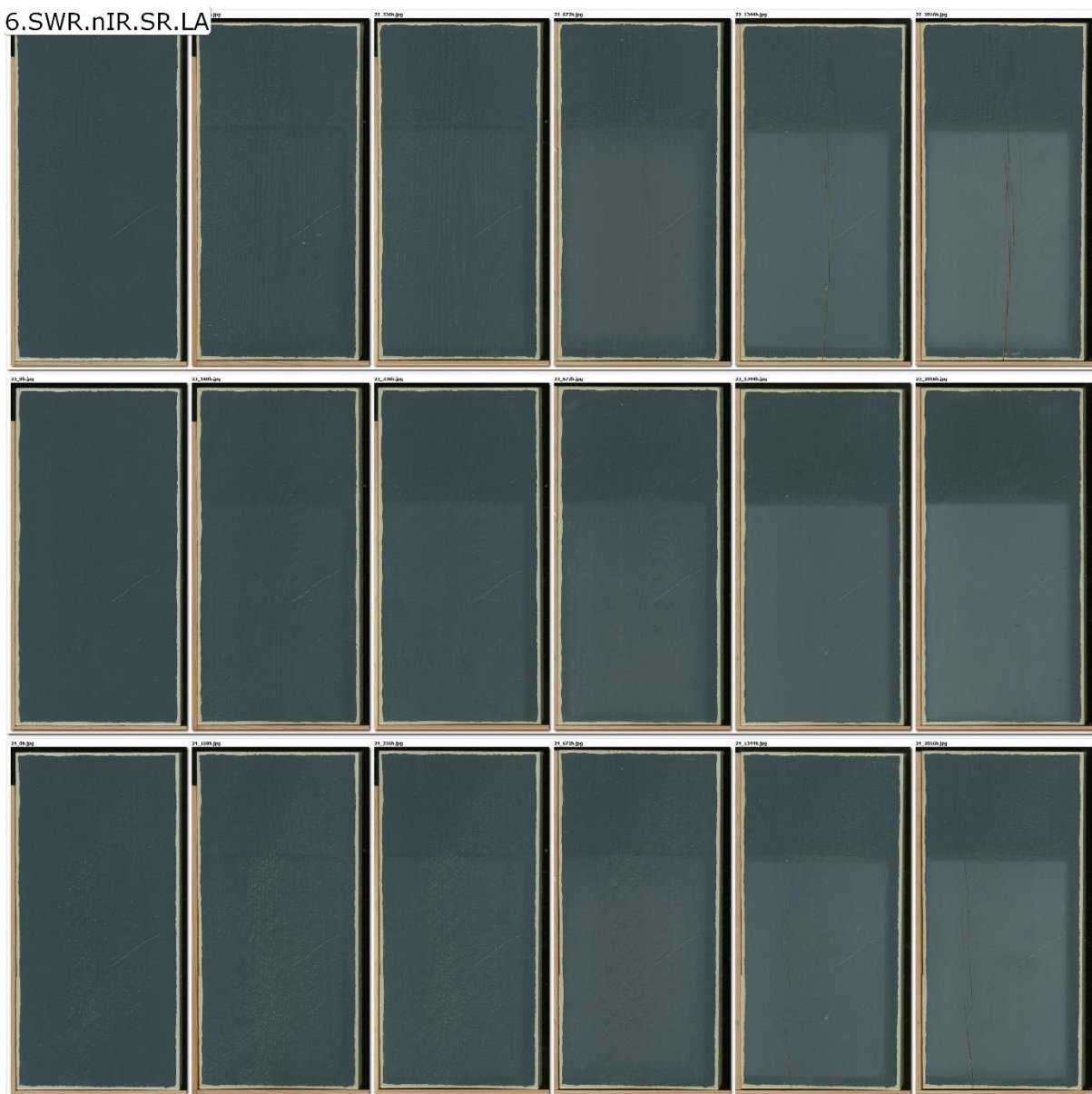
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	34,48	34,35	34,39	36,57	39,20	38,10
R 400 nm	10,28	10,06	9,98	11,03	11,50	10,55
R 450 nm	9,77	9,66	9,61	10,95	12,22	11,36
R 500 nm	8,91	8,88	8,85	10,13	11,61	10,82
R 550 nm	8,24	8,09	8,13	9,27	10,80	10,19
R 600 nm	7,55	7,51	7,57	8,48	9,87	9,43
R 650 nm	8,05	7,92	7,97	8,85	10,16	9,76
R 700 nm	8,87	8,76	8,80	9,60	10,88	10,53

L*: Wert für die Helligkeit;

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 9: Variante 5 – dunkle deckende Beschichtung mit reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

6.SWR.nIR.SR.LA



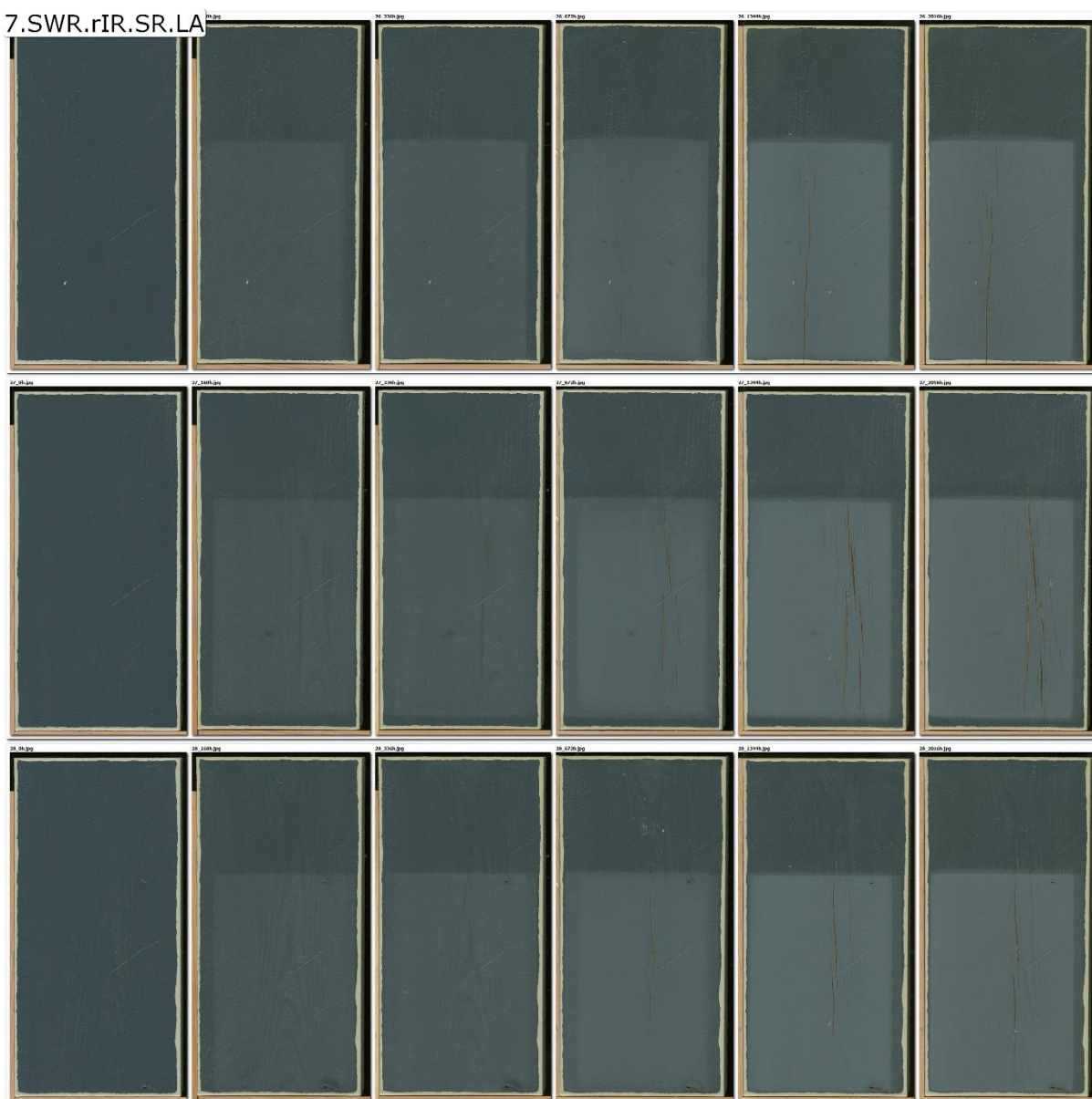
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	335h	672h	1344h	2016h
L*	33,93	33,68	33,57	34,07	33,89	36,45
R 400 nm	10,02	9,83	9,81	9,83	9,26	10,05
R 450 nm	9,69	9,49	9,51	9,72	9,75	10,99
R 500 nm	8,93	8,75	8,77	8,95	8,94	10,26
R 550 nm	7,78	7,71	7,63	7,75	7,78	9,15
R 600 nm	7,23	7,13	7,01	7,46	7,31	8,66
R 650 nm	7,46	7,07	7,10	7,72	7,12	8,24
R 700 nm	6,94	6,51	6,58	7,36	6,53	7,44

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 10: Variante 6 – dunkle deckende Beschichtung ohne reflektierenden IR Pigmenten auf sägerauer Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

7.SWR.rIR.SR.LA



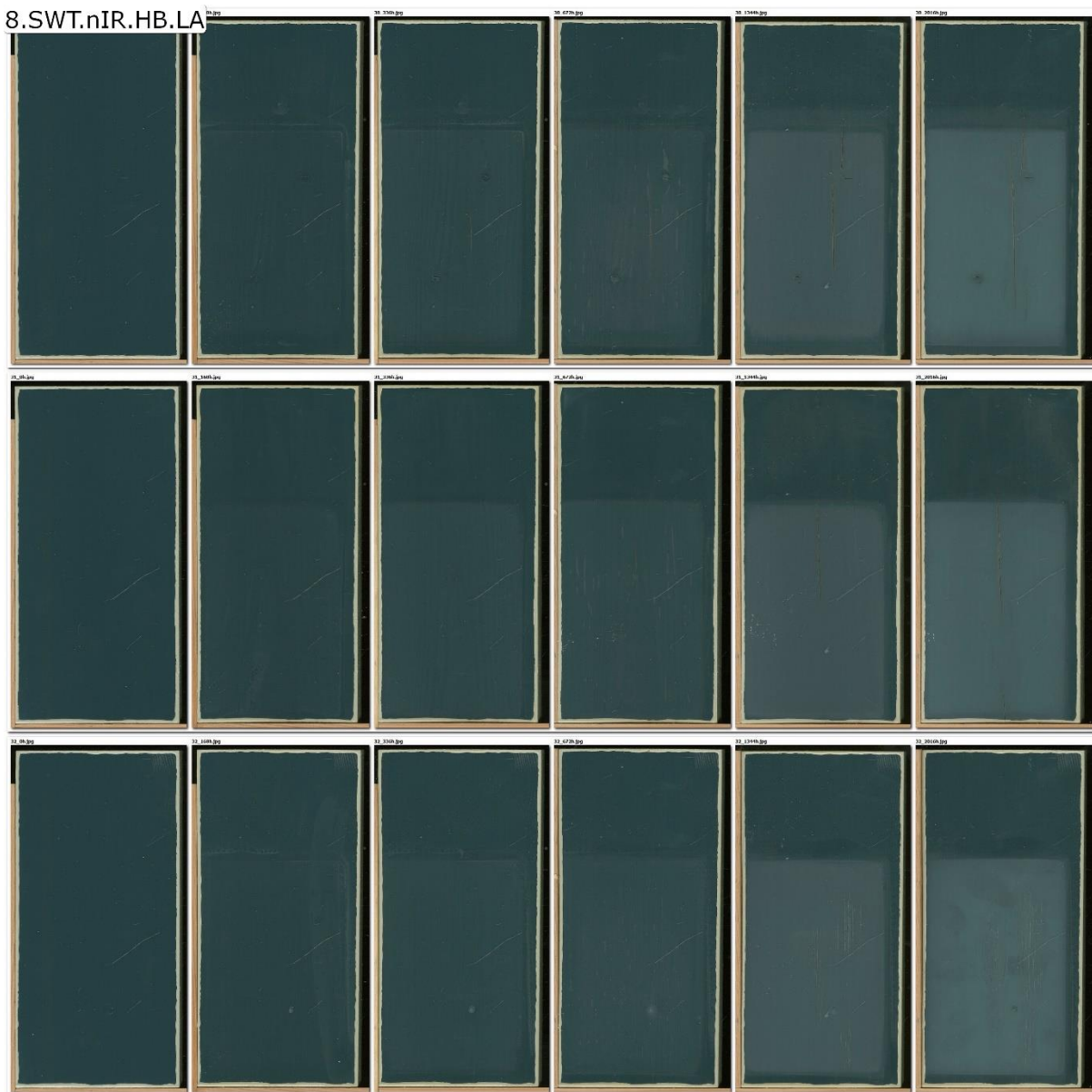
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	34,37	34,32	34,67	36,60	37,19	39,37
R 400 nm	10,20	10,07	10,16	10,94	10,39	11,48
R 450 nm	9,69	9,65	9,76	10,87	11,07	12,21
R 500 nm	8,85	8,86	9,00	10,10	10,45	11,61
R 550 nm	8,13	8,05	8,23	9,27	9,68	10,91
R 600 nm	7,52	7,51	7,71	8,55	8,83	10,09
R 650 nm	8,02	7,94	8,14	8,94	9,03	10,38
R 700 nm	8,87	8,79	8,95	9,71	9,61	11,14

L*: Wert für die Helligkeit;

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 11: Variante 7 – dunkle deckende Beschichtung mit reflektierenden IR Pigmenten auf sägerauer Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

8.SWT.nIR.HB.LA



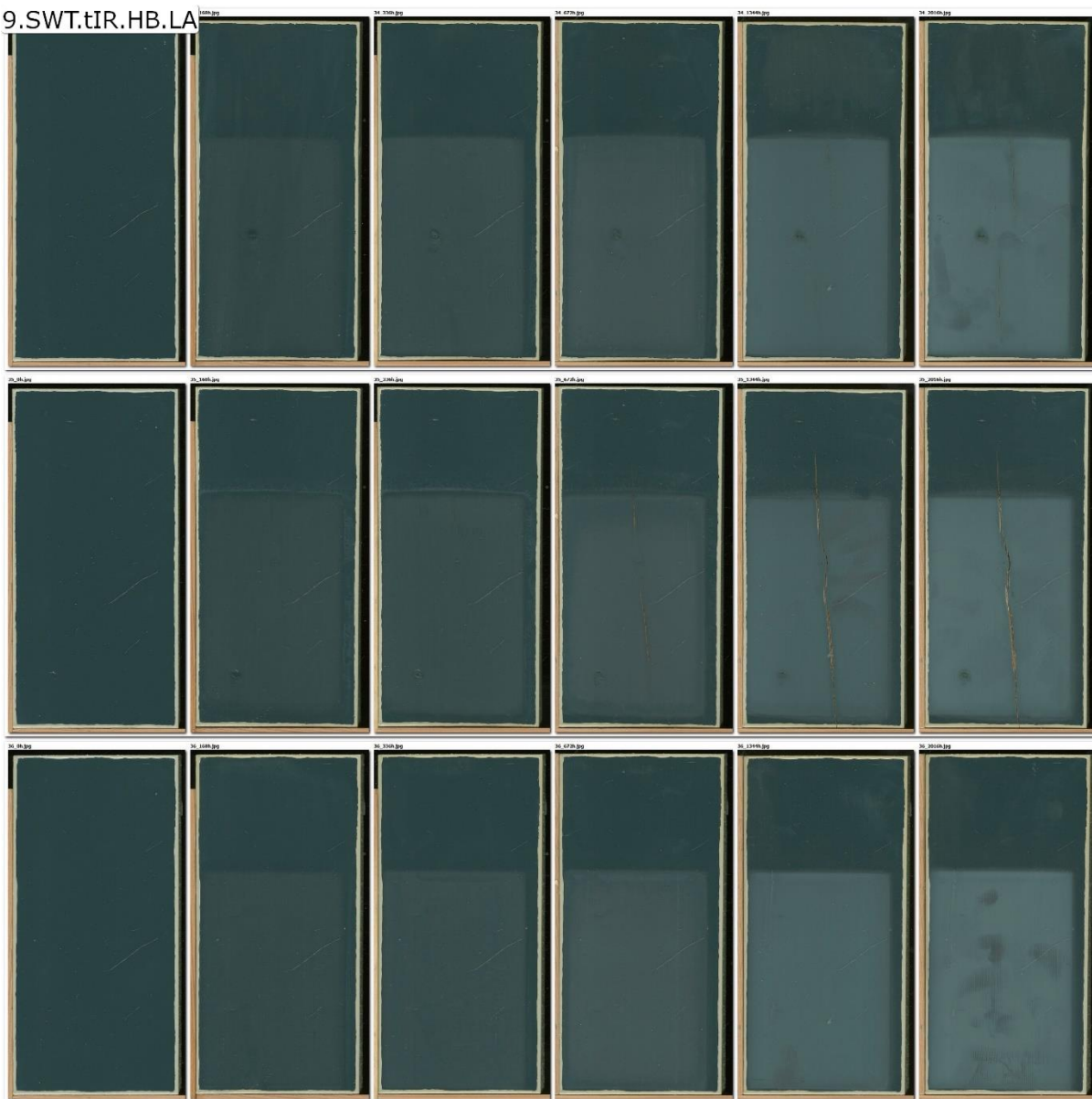
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	30,76	30,92	30,47	30,52	31,65	35,36
R 400 nm	8,32	8,31	8,28	8,09	8,62	9,86
R 450 nm	7,95	7,95	7,86	7,83	8,65	10,47
R 500 nm	7,54	7,55	7,44	7,46	8,11	10,05
R 550 nm	6,57	6,63	6,48	6,47	6,91	8,84
R 600 nm	5,66	5,76	5,43	5,53	5,92	7,31
R 650 nm	5,86	5,72	5,42	5,76	5,90	7,08
R 700 nm	5,45	5,30	5,04	5,49	5,48	6,51

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 12: Variante 8 – dunkle deckende Beschichtung ohne transparenten IR Pigmente auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

9.SWT.tIR.HB.LA



CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	335h	672h	1344h	2016h
L*	31,71	31,67	31,38	32,01	35,52	39,56
R 400 nm	9,20	8,98	8,99	9,22	10,80	12,73
R 450 nm	8,38	8,31	8,21	8,52	10,55	12,97
R 500 nm	8,00	7,96	7,82	8,11	10,01	12,26
R 550 nm	7,08	7,02	6,92	7,17	9,03	11,28
R 600 nm	6,17	6,16	6,01	6,31	7,57	9,67
R 650 nm	5,83	5,81	5,67	5,95	6,66	8,24
R 700 nm	6,14	6,06	5,91	6,82	7,47	8,87

L*: Wert für die Helligkeit;

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 13: Variante 9 – dunkle deckende Beschichtung mit transparenten IR Pigmente auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

10.NB.nIR.HB.LA



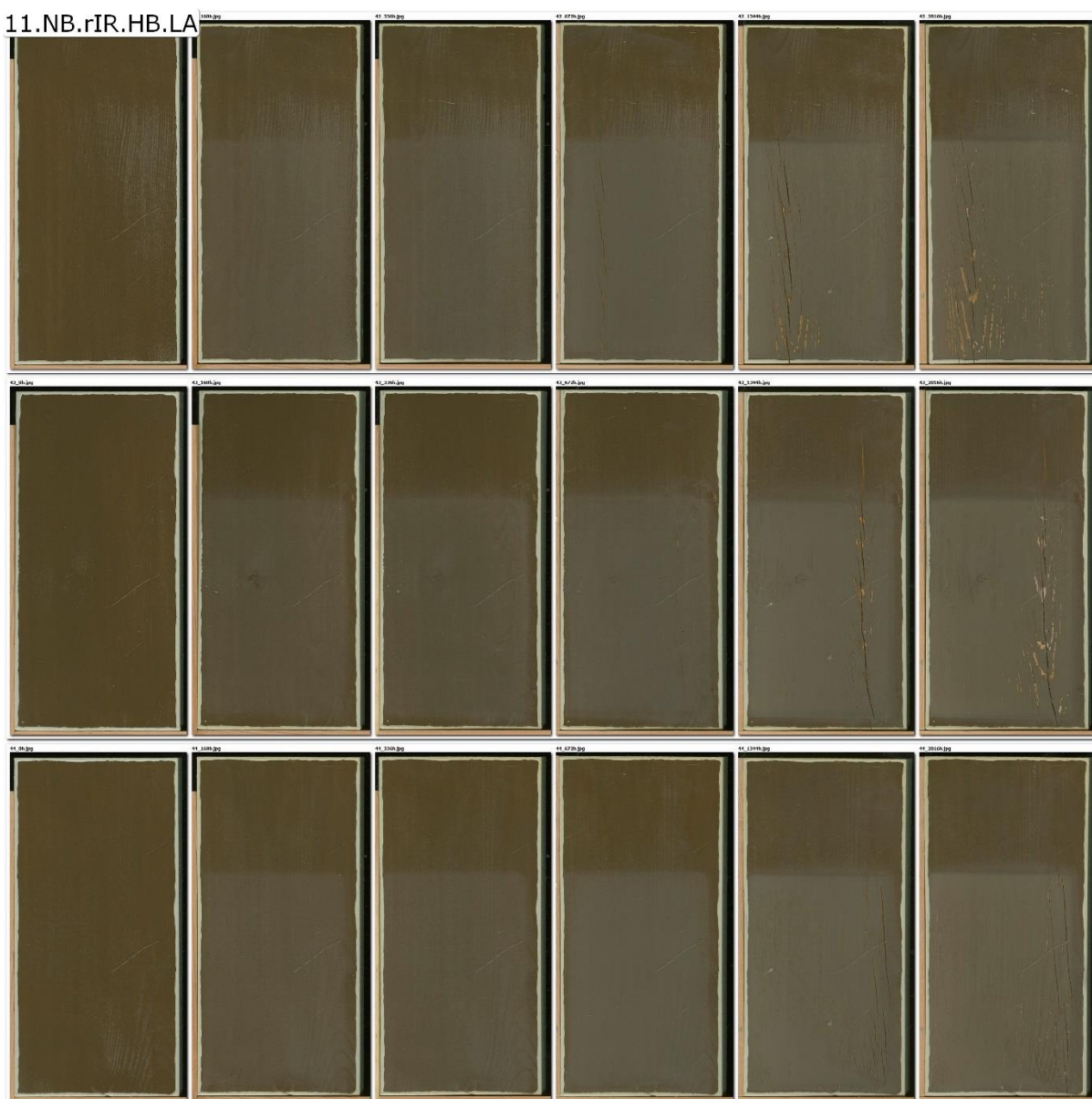
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	33,54	33,28	33,88	34,80	37,80	38,81
R 400 nm	5,06	4,90	5,29	5,66	5,47	5,16
R 450 nm	6,00	5,87	6,23	6,68	7,44	7,45
R 500 nm	6,45	6,37	6,69	7,13	8,25	8,47
R 550 nm	7,74	7,61	7,89	8,37	10,13	10,80
R 600 nm	9,04	8,94	9,17	9,60	11,41	12,24
R 650 nm	9,21	9,08	9,35	9,66	11,36	12,21
R 700 nm	9,64	9,54	9,75	9,95	11,37	12,23

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 14: Variante 10 – nussbraune lasierende Beschichtung ohne reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

11.NB.rIR.HB.LA

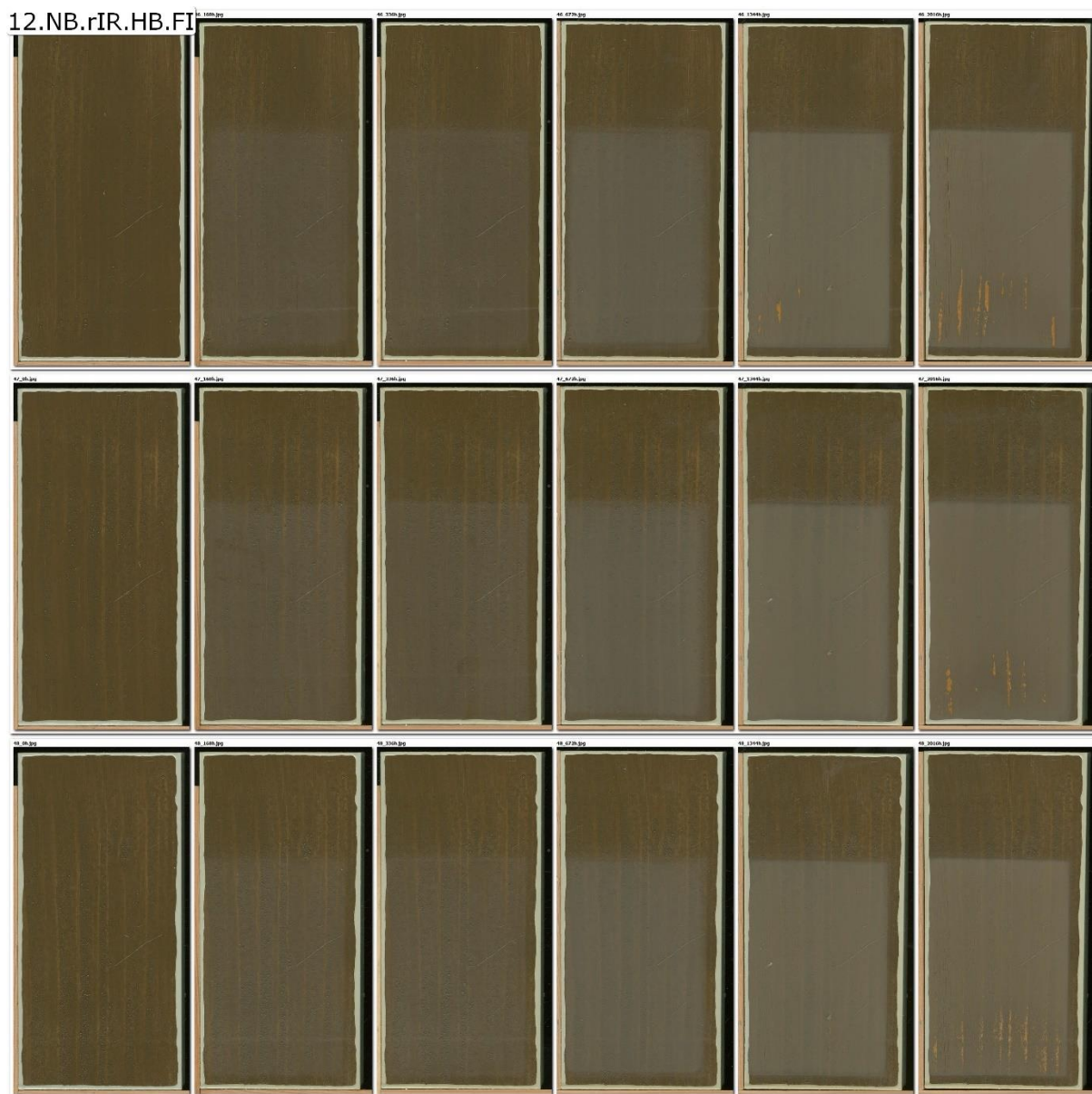


CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	33,86	33,66	34,27	34,89	36,82	37,33
R 400 nm	5,49	5,34	5,79	6,10	5,97	5,89
R 450 nm	6,00	5,88	6,29	6,59	6,91	6,89
R 500 nm	6,45	6,35	6,70	6,99	7,59	7,70
R 550 nm	7,84	7,70	7,98	8,32	9,39	9,68
R 600 nm	9,25	9,18	9,42	9,70	10,95	11,48
R 650 nm	11,07	10,98	11,11	11,45	13,11	13,95
R 700 nm	16,10	15,88	15,72	15,98	17,70	18,76

L*: Wert für die Helligkeit;

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 15: Variante 11 – nussbraune lasierende Beschichtung mit reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit



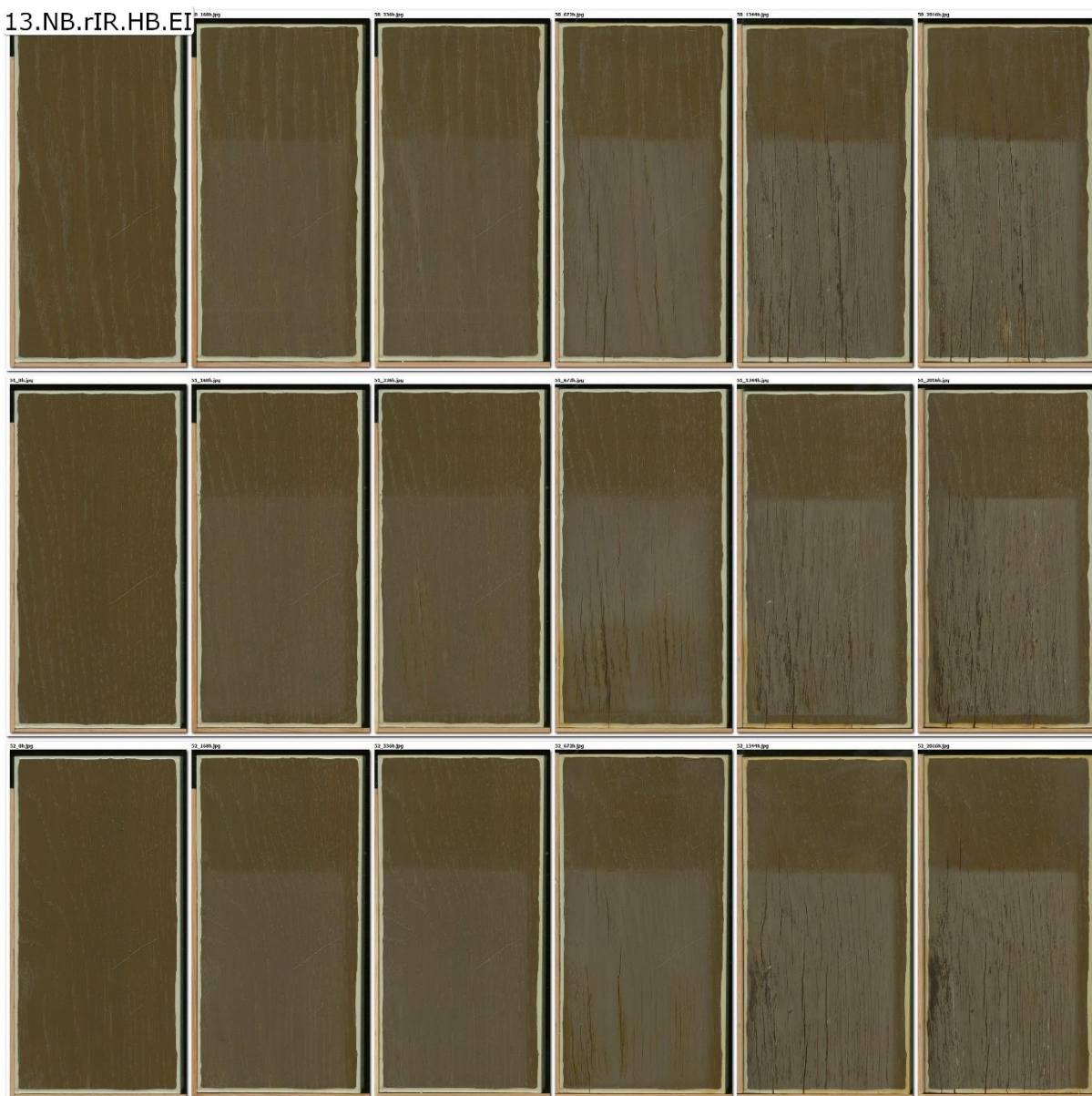
CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	335h	672h	1344h	2016h
L*	34,49	34,05	34,91	35,41	37,85	37,69
R 400 nm	5,53	5,40	6,02	6,31	6,42	5,92
R 450 nm	6,12	5,96	6,52	6,79	7,39	6,94
R 500 nm	6,64	6,46	6,95	7,21	8,08	7,77
R 550 nm	8,16	7,88	8,28	8,60	9,95	9,86
R 600 nm	9,64	9,42	9,79	10,00	11,57	11,72
R 650 nm	11,59	11,29	11,56	11,79	13,81	14,33
R 700 nm	17,04	16,45	16,39	16,45	18,57	19,37

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 16: Variante 12 – nussbraune lasierende Beschichtung mit reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Fichte – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

13.NB.rIR.HB.EI



CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	34,16	34,06	34,07	33,56	33,32	33,74
R 400 nm	5,49	5,32	5,40	4,84	4,80	4,78
R 450 nm	6,02	5,90	5,95	5,59	5,56	5,60
R 500 nm	6,51	6,43	6,48	6,25	6,16	6,27
R 550 nm	7,96	7,87	7,86	7,71	7,60	7,84
R 600 nm	9,48	9,48	9,47	9,21	9,01	9,26
R 650 nm	11,46	11,49	11,40	11,09	10,85	11,17
R 700 nm	16,87	16,80	16,34	15,58	14,77	14,93

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 17: Variante 13 – nussbraune lasierende Beschichtung mit reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Eiche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

14.WS.nIR.HB.LA



CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	94,54	92,44	92,18	91,50	89,18	87,64
R 400 nm	58,43	50,61	49,45	42,98	35,95	36,01
R 450 nm	85,69	75,76	75,31	72,78	66,86	63,95
R 500 nm	85,75	80,07	79,07	78,06	73,29	69,78
R 550 nm	86,18	82,33	81,54	80,44	75,89	72,71
R 600 nm	86,67	82,01	81,87	80,28	75,20	72,18
R 650 nm	86,68	80,47	81,25	79,23	73,43	70,31
R 700 nm	87,36	80,59	81,70	79,30	72,79	69,53

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 18: Variante 14 – weiße deckende Beschichtung ohne reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

15.MT.nIR.HB.LA



CIE Lab Farbmesswert	QUV-Schnellbewitterung					
	0h	168h	336h	672h	1344h	2016h
L*	82,40	85,49	86,51	88,00	89,94	88,97
R 400 nm	60,49	64,68	65,13	68,97	75,83	73,38
R 450 nm	61,75	67,00	68,27	70,99	75,87	73,68
R 500 nm	61,64	67,56	69,41	72,17	76,29	74,12
R 550 nm	60,70	66,35	68,34	71,67	76,29	74,26
R 600 nm	60,85	67,01	69,31	72,42	76,06	74,10
R 650 nm	59,63	65,48	67,89	71,62	75,79	73,83
R 700 nm	59,09	64,91	67,50	71,11	74,85	72,95

L: Wert für die Helligkeit;*

R 400 nm ... R 700 nm: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm

Abbildung 19: Variante 15 – graue deckende metallic Beschichtung ohne reflektierenden IR Pigmenten auf gehobelter Lärche – Scan drei Einzelproben (oben-mitte-unten) im Verlauf der beschleunigten Bewitterung nach 0 (links), 168, 336, 672, 1344 und 2016 (rechts) Stunden Bewitterungszeit

Ein Vergleich der CIE Lab Farbmessdaten mit den TSR Messungen der Proben ohne IR Pigmente ergab, dass die Werte für die rot (a^+) grün (a^-) Achse und die Werte für die gelb (b^+) blau (b^-) Achse nicht korrelierten. Die höchsten Korrelationen wurden mit dem Helligkeitswert L^* und bei Reflexionswerten im höheren Wellenlängenbereich (R600 bis R700) gefunden.

Tabelle 8: Pearson Korrelationskoeffizient zwischen TSR und CIE Lab Farbmesswerten von Beschichtungen ohne IR Pigmenten

Methode	L^*	b^*	a^*	R400	R450	R500	R550	R600	R650	R700
Pearson Korrelationskoeffizient	0,99	0,24	0,51	0,75	0,90	0,94	0,97	0,99	0,99	0,99
Signifikanz (0,05)	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Ja

L: Wert für die Helligkeit; b*: Farbwert auf gelb-blau Achse; a*: Farbwert auf der rot-grün Achse; R400 ... R700: Reflexionswerte bei den jeweiligen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm*

In Abbildung 20 ist der Zusammenhang zwischen dem TSR und dem Reflexionswert bei 700 nm (R700) und in Abbildung 21 mit dem Helligkeitswert L^* der CIE Lab Farbmessung gegenübergestellt. Den dargestellten linearen Anpassungen liegen die Messdaten von Varianten ohne IR Pigmenten zugrunde (frische und alte unbeschichtete Oberflächen; unbewitterte und bewitterte beschichtete Oberflächen ohne IR Pigmente). Die Varianten mit IR Pigmenten sind in den Abbildungen andersfarbig dargestellt und weichen vom Trend jener ohne IR Pigmente ab. Die Varianten mit transparenten IR Pigmenten weichen stärker als jene mit reflektierenden IR Pigmenten ab.

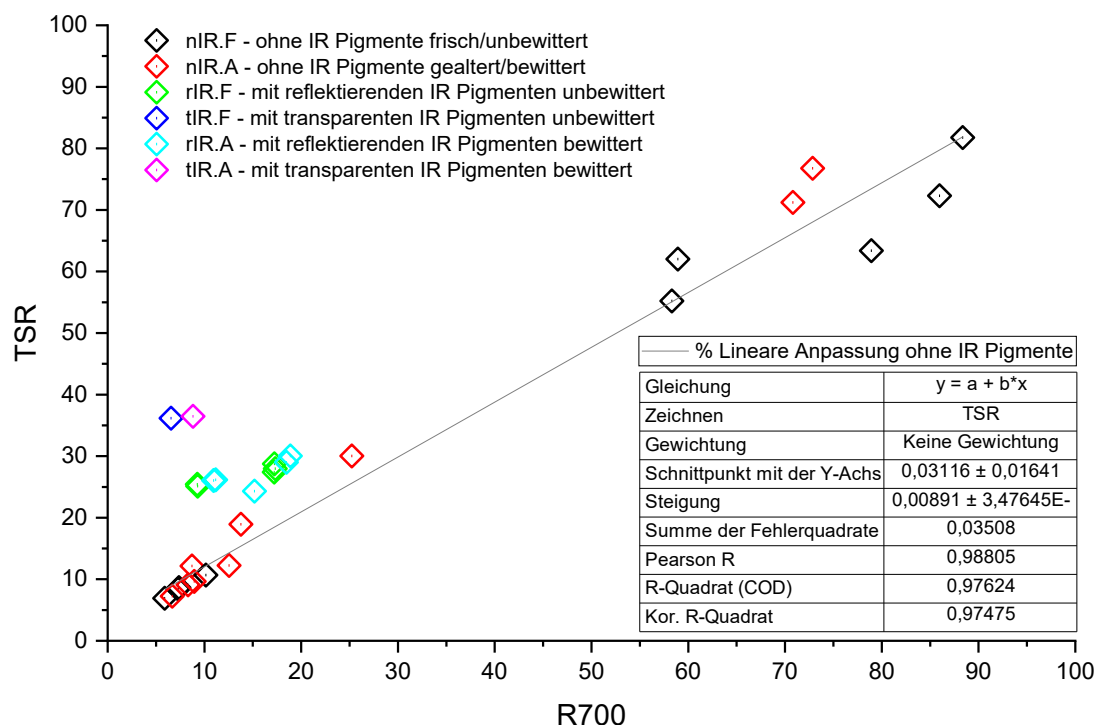


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen dem TSR und dem Reflexionswert bei 700 nm der CIE Lab Farbmessung – Lineare Anpassung von Varianten ohne IR Pigmenten

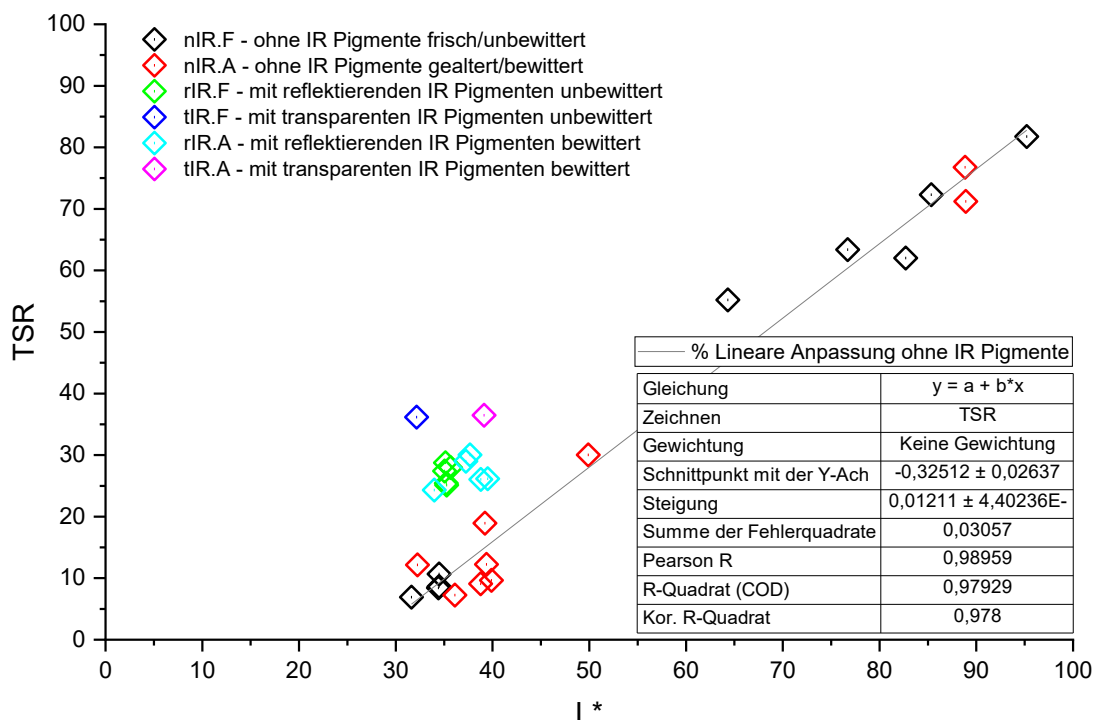


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem TSR und dem Helligkeitswert L* der CIE Lab Farbmessung – Lineare Anpassung von Varianten ohne IR Pigmenten

In Tabelle 9 und Abbildung 22 sind die CIE Lab Farbmesswerte für die Helligkeit (L*) und in Tabelle 10 und Abbildung 23 für die Reflexionswerte bei 700 nm Wellenlänge auf gehobeltem Lärchenholz von unbeschichteten und beschichteten (ohne IR Pigmente) im unbewitterten und gealterten Zustand (Freilandbewitterung und QUV-Schnellbewitterung gegenübergestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Werte für den unbewitterten Zustand einen eher informativen Charakter haben, da diese an den QUV-Proben gemessen wurden. Der tatsächliche Farbwert der unbewitterten Freilandprobe kann vom Wert der QUV-Probe abweichen.

Auf der Westseite zeigen die unbeschichteten Lärchenholzproben einen leichten Trend der Verringerung der Helligkeit, der Wert der gealterten Probe (ca. 5 Jahre horizontale Bewitterung Forschungsterrasse Tulln) ist jedoch noch deutlich nicht erreicht. Die unbeschichteten Lärchenholzproben auf der Südseite waren bereits deutlich dunkler als auf der Westseite. Die Farbänderung der deckend schwarzen Beschichtung und der grauen Metallic Beschichtung war gering, es kam zu einer leichten Erhöhung der Helligkeit und hatten noch nicht die Aufhellung der 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung erreicht. Die deckend weiße Beschichtung zeigte eine geringe Reduktion der Helligkeit im Freiland, noch deutlich geringer als in der QUV-Schnellbewitterung.

Tabelle 9: CIE Lab Farbmesswerte für die Helligkeit (L^*) auf gehobeltem Lärchenholz unbeschichtet und mit Beschichtungen ohne IR Pigmente unbewittert und gealtert im Freiland oder im QUV gealtert

Variante	L^*_u ^a	$L^*_{g-9M_FL}$ ^b	$L^*_{g-13M_FL}$ ^c	$L^*_{g-2016h_QUV}$ ^d
1.UN.nIR.HB.LA Westen	76,6	73,3	72,5	37,8 ^e
1.UN.nIR.HB.LA Süden	76,6	62,0	60,6	37,8 ^e
4.SWR.nIR.HB.LA	33,8	35,4	35,5	38,6
14.WS.nIR.HB.LA	94,5	94,4	94,1	87,6
15.MT.nIR.HB.LA	82,4	85,8	86,2	89,0
0.Weißer Putzfassade	--	89,4	90,4	--

^a) ... unbewitterte QUV Proben

^b) ... Alterung durch 9 Monate Freilandbewitterung am Forschungshaus in Stetten – Mittelwert waagrechte und senkrechte Fassadenbretter

^c) ... Alterung durch 13 Monate Freilandbewitterung am Forschungshaus in Stetten – Mittelwert waagrechte und senkrechte Fassadenbretter

^d) ... Alterung durch 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung

^e) ... Alterung durch horizontale Freilandbewitterung auf der Versuchsterrasse in Tulln

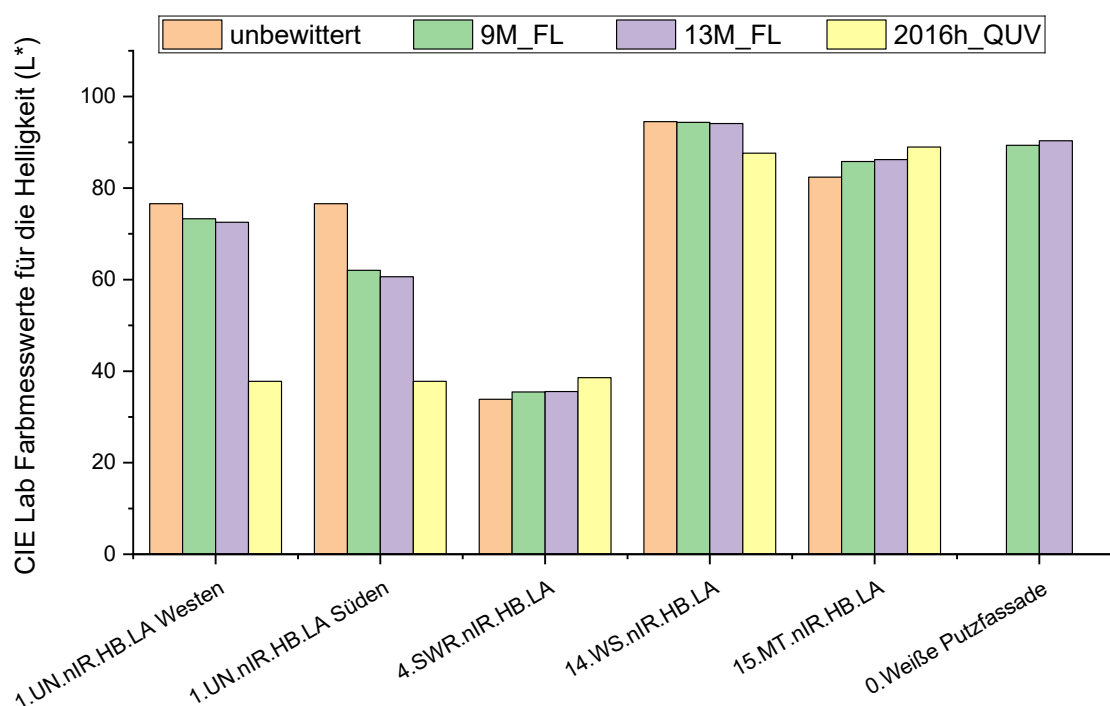


Abbildung 22: CIE Lab Farbmesswerte für die Helligkeit (L^*) auf gehobeltem Lärchenholz unbeschichtet und mit Beschichtungen ohne IR Pigmente unbewittert und gealtert im Freiland oder im QUV gealtert

Tabelle 10: CIE Lab Farbmesswerte für Reflexionswerte bei 700 nm Wellenlänge auf gehobeltem Lärchenholz unbeschichtet und mit Beschichtungen ohne IR Pigmente unbewittert und gealtert im Freiland oder im QUV gealtert

Variante	L^*_u ^a	$L^*_{g-9M_FL}$ ^b	$L^*_{g-13M_FL}$ ^c	$L^*_{g-2016h_QUV}$ ^d
1.UN.nIR.HB.LA Westen	77,8	71,0	68,2	13,1
1.UN.nIR.HB.LA Süden	77,8	61,5	60,2	13,1
4.SWR.nIR.HB.LA	6,9	7,8	7,9	8,2
14.WS.nIR.HB.LA	87,4	86,6	86,3	69,5
15.MT.nIR.HB.LA	59,1	65,0	66,2	73,0
0.Weiße Putzfassade	--	78,3	78,4	--

^{a)} ... unbewitterte QUV Proben

^{b)} ... Alterung durch 9 Monate Freilandbewitterung am Forschungshaus in Stetten – Mittelwert waagrechte und senkrechte Fassadenbretter

^{c)} ... Alterung durch 13 Monate Freilandbewitterung am Forschungshaus in Stetten – Mittelwert waagrechte und senkrechte Fassadenbretter

^{d)} ... Alterung durch 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung

^{e)} ... Alterung durch horizontale Freilandbewitterung auf der Versuchsterrasse in Tulln

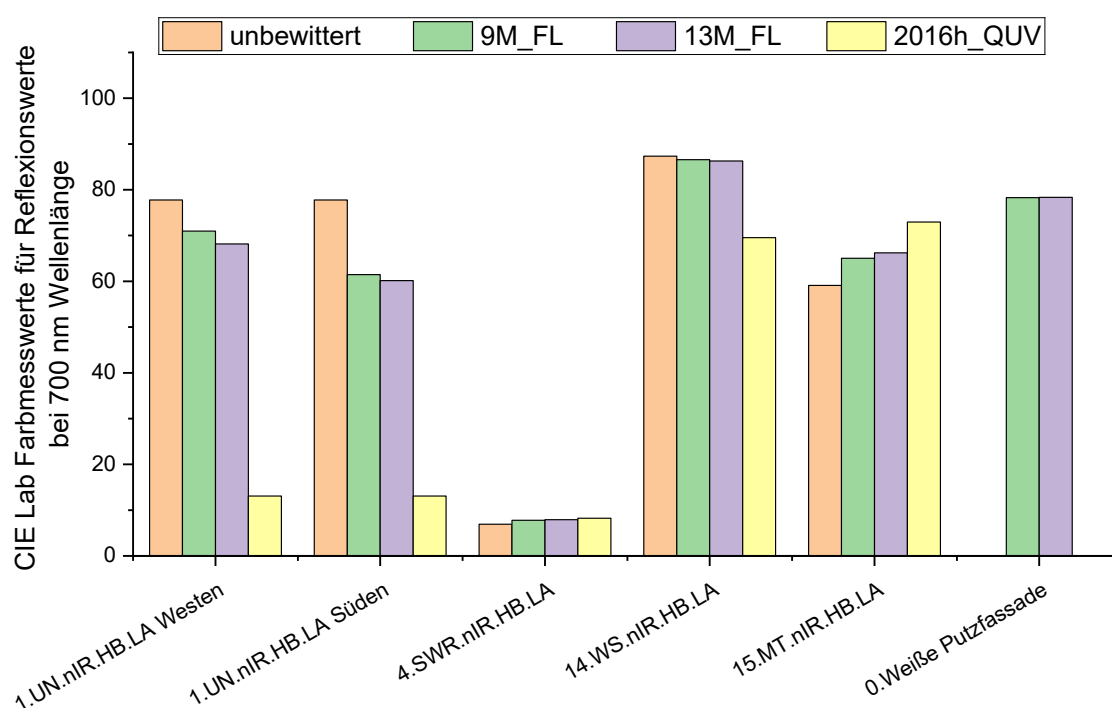


Abbildung 23: CIE Lab Farbmesswerte für Reflexionswerte bei 700 nm Wellenlänge auf gehobeltem Lärchenholz unbeschichtet und mit Beschichtungen ohne IR Pigmente unbewittert und gealtert im Freiland oder im QUV gealtert

In Abbildung 24 sind zur Veranschaulichung die Oberflächentemperaturen und eine QUV-Probe der untersuchten Varianten im unbewitterten und gealterten Zustand dargestellt. Die Oberflächentemperatur wurde näherungsweise aus den TSR-Messwerten ermittelt für Proben

mit einer Exposition gemäß ÖNORM EN 927-3 Richtung Süden bei 28 °C Lufttemperatur und 1000 W/m² Globalstrahlung. Die Oberflächentemperatur für die Oberflächen nach 13 Monaten Freilandbewitterung am Forschungshaus in Stetten, für die vorhin erwähnte Exposition wurde, erfolgte über die Regression von Beschichtungen ohne IR-Pigmenten zwischen dem Reflexionswert bei 700 nm Wellenlänge (CIE Lab Farbmesswert R700) und TSR. Der Einfluss der Farbe der Beschichtung, der IR-Pigmente und der Alterung wird darin veranschaulicht.

Lärche	Fichte	Eiche	LA nIR	LA rIR	LA nIR	LA tIR	LA nIR	LA rIR	FI rIR	EI rIR	Weiß	Metallic
35 °C	32 °C	39 °C	57 °C	50 °C	57 °C	46 °C	56 °C	49 °C	49 °C	49 °C	28 °C	36 °C
Oberflächen unbewittert												
52 °C	48 °C	55 °C	56 °C	50 °C	57 °C	46 °C	55 °C	49 °C	48 °C	50 °C	32 °C	30 °C
Oberfläche gealtert (unbeschichtete Proben) oder 2016 Stunden QUV-Schnellbewitterung												
13 Monate Freilandbewitterung – Forschungshaus Stetten												
40 °C			56 °C								28 °C	32 °C

Abbildung 24: Oberflächentemperatur in °C näherungsweise berechnet aus Farbmesswerten EN 927-3 Proben Richtung Süden bei 28 °C Lufttemperatur und 1000 W/m² Globalstrahlung mit Darstellung einer QUV-Probe

3 Zusammenfassung

Die Studie untersucht den Einfluss von Holzuntergrund, Beschichtung und Alterung auf die Oberflächeneigenschaften hinterlüfteter Holzfassaden. Im Fokus steht der Total Solar Reflectance (TSR), ein kritischer Parameter zur Bestimmung der Oberflächentemperatur bei Sonneneinstrahlung. Ziel war es zu prüfen, ob mittels CIE-Lab-Farbmessungen der TSR-Wert und damit die Oberflächentemperatur näherungsweise bestimmt werden kann.

Untersucht wurden 15 Varianten aus drei Holzarten (Lärche, Fichte, Eiche) mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen: unbeschichtet, deckend dunkel/weiß/metallic und lasierend braun. Die Beschichtungen wurden mit und ohne IR-Pigmente (reflektierend und transparent) getestet. Die Alterung erfolgte durch 2016 Stunden beschleunigte QUV-Bewitterung für beschichtete Proben und mehrjährige Freilandbewitterung für unbeschichtete Proben. Messungen umfassten den Total Solar Reflectance (TSR) nach ASTM G 173 (250-2500 nm) und CIE-Lab-Farbwerte in definierten Intervallen. Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen nach 9 und 13 Monaten Freilandbewitterung am Forschungshaus durchgeführt.

Der TSR korreliert stark mit der Oberflächenfarbe: Weiße deckende Beschichtungen erreichten TSR-Werte von 0,82 (unbewittert) und 0,71 (gealtert), während deckend schwarze Beschichtungen ohne IR-Pigmente nur 0,07-0,09 aufwiesen. Unbeschichtetes Fichtenholz zeigte den höchsten TSR mit 0,72, Eichenholz den niedrigsten mit 0,55. Die Alterung reduzierte den TSR unbeschichteter Oberflächen drastisch um 0,42-0,44, bei beschichteten Varianten blieb die Änderung mit 0,01-0,02 vernachlässigbar gering.

IR-Pigmente zeigten signifikante Effekte: Reflektierende IR-Pigmente (rIR) erhöhten den TSR um ca. 0,17, transparente IR-Pigmente (tIR) sogar um 0,29. Diese Wirkung blieb auch nach 2016 Stunden Bewitterung erhalten, unabhängig von Holzart und Oberflächenstruktur. Die metallic Beschichtung entwickelte sich besonders vorteilhaft: Der TSR stieg von 0,62 (unbewittert) auf 0,77 (gealtert) und übertraf damit die gealterte weiße Oberfläche.

Die Korrelationsanalyse ergab einen Pearson-Koeffizienten von 0,99 zwischen TSR und dem Helligkeitswert L^* sowie den Reflexionswerten R600-R700 nm für Beschichtungen ohne IR-Pigmente. Varianten mit IR-Pigmenten wichen vom linearen Zusammenhang ab, wobei tIR-Pigmente stärkere Abweichungen zeigten als rIR-Pigmente. Die Freilandbewitterung bestätigte die Laborergebnisse: Unbeschichtete Oberflächen dunkeln deutlich nach, während beschichtete Varianten weitgehend stabil bleiben.

Oberflächentemperaturen (bei 28°C Lufttemperatur, 1000 W/m² Strahlung, Südausrichtung) unterschieden sich erheblich: Während weiße Oberflächen moderate Temperaturen aufwiesen, erreichten schwarze Beschichtungen ohne IR-Pigmente deutlich höhere Werte. Die Integration von IR-Pigmenten reduzierte die Oberflächentemperatur merklich, was für die Praxis der Fassadengestaltung in Zeiten des Klimawandels von hoher Relevanz ist.

Die Studie belegt, dass CIE-Lab-Farbmessungen eine praktikable Methode zur näherungsweisen Bestimmung des TSR-Wertes für Beschichtungen ohne IR-Pigmente darstellen. Für Oberflächen mit IR-Pigmenten ist eine direkte TSR-Messung erforderlich. IR-Pigmente, insbesondere transparente Varianten, bieten erhebliches Potenzial zur Reduktion der Oberflächentemperatur bei dunklen Fassaden, ohne das ästhetische Erscheinungsbild zu beeinträchtigen. Die Ergebnisse liefern wichtige Grundlagen für die Planung klimaangepasster Holzfassaden und ermöglichen eine fundierte Materialauswahl zur Minimierung thermischer Belastungen.

4 Literatur

- [1] G173-03: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. ASTM, Ausgabe November 2021.
- [2] 18314-1: Analytische Farbmessung - Teil 1: Praktische Farbmessung. ÖNORM EN ISO, Ausgabe November 2018.

- [3] EN 927-6: EN 927-6: Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 6: Künstliche Bewitterung von Holzbeschichtungen mit fluoreszierenden UV-Lampen und Wasser. NORM, Ausgabe November 2018.

Cooler Hülle - Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik

**AP4: Leise Fassade -
Bauakustische Messungen**

Anhang 3 zum Endbericht - Onlineversion

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: F518

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor:innen

Dr. Christian Lux

DI Alexander Stenitzer

Dr. Bernd Nusser

Weitere Projektmitarbeiter:innen

Johannes Reiter, Gregor Soukup, Elias Uiblein

Wien, Juli 2026

Inhaltsverzeichnis

1	Stand des Wissens	6
1.1	Schallschutz mit Fassaden (Teil 1 und Teil 2) [1, 2]	6
1.2	Schalldämmung mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden – VHF [3].....	12
1.3	Zusammenfassung zum Stand des Wissens und daraus resultierende Optimierungsansätze für Holzfassaden	16
2	Material und Methoden.....	18
2.1	Holzrahmenwand in der Fensteröffnung.....	18
2.2	Verwendete Grundwände und Fassaden	20
2.3	Messung und Auswertung	26
2.3.1	Prüfstände.....	26
2.3.2	Einbausituation.....	26
2.3.3	Auswertung.....	32
3	Ergebnisse & Diskussion.....	35
3.1	Luftschallmessungen Fensteröffnung	36
3.2	Grundwände und Standardfassaden in Normgröße	42
3.2.1	Grundwände mit hinterlüfteten Standardfassaden	42
3.2.2	Einfluss der Holzart von Nut-Feder Fassaden	46
3.2.3	Einfluss des Leistenabstandes bei einer offenen Leistenfassade ..	47
3.2.4	Grundwände mit nicht hinterlüfteten Standardfassaden	48
3.2.5	Zusammenfassung Standardfassaden	51

3.3	Unterkonstruktion	52
3.3.1	Einfluss der Ausführung der Lattungsebene	52
3.3.2	Einfluss der Lattungstiefe	54
3.3.3	Einfluss von Konsolen zur Befestigung der Konter- bzw. Traglattung	56
3.3.4	Zusammenfassung Unterkonstruktion	57
3.4	Verschraubung der Fassaden	58
3.4.1	Befestigung der Fassade mit Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben	58
3.4.2	Schraubenlänge zur Befestigung der Fassaden	60
3.4.3	Zusammenfassung Verschraubung	60
3.5	Optimierungsansätze	61
3.5.1	Absorption in der Belüftungsebene	61
3.5.2	Beschwerung der Fassade und Entkoppelung der Unterkonstruktion	64
3.5.3	Alternatives Befestigungssystem zur Montage der Unterkonstruktion	68
3.5.4	Zusammenfassung der Optimierungsschritte	70
3.6	Vergleich von Messungen aus den zwei Prüfständen im Akustik Center Austria	71
3.6.1	Holzrahmenwand mit Fassaden	71
3.6.2	Holzmassivwand mit Fassaden	74
3.6.3	25 Hz – Messungen im XL-PS Rahmen vs. Adapterwand mit einer Holzrahmenwand	77
3.6.4	25 Hz – Messungen im XL-PS Rahmen vs. Adapterwand mit einer Holzmassivwand	81
3.6.5	Zusammenfassung der Gegenüberstellung der beiden Prüfstände des Akustik Center Austria	85
4	Ausblick	88

5	Literatur.....	89
6	Messprotokolle	90

1 Stand des Wissens

Im Projekt „Coole Hülle“ wurden neben den wesentlichen Einflussmerkmalen von Holzfassaden auch Verbesserungsansätze in Hinblick auf deren Schalldämmung untersucht. Um das Potential von Optimierungsansätzen abzuschätzen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf der Schalldämmung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF). Diese wurden in den 1990er Jahren an Massivwänden (Kalksandstein-Wand und Porenbeton-Wand) untersucht (siehe [1, 2]). 2022 wurde dann auf diese Untersuchung aufgebaut und eine erweiterte Messserie mit VHF-Aufbauten durchgeführt [3].

1.1 Schallschutz mit Fassaden (Teil 1 und Teil 2) [1, 2]

In dieser Untersuchung wurden zwei Grundwände verwendet. Zum einen eine Kalksandsteinwand (KS-Wand) und zum anderen eine Porenbetonwand (PB-Wand). An beiden Wänden wurde einseitig (empfangsraumseitig) eine 10 mm dicke Putzschicht angebracht. Dies entspricht der gängigen Praxis. Die vorgehängte Fassade wird dann außenseitig auf die nicht verputzte Seite aufgebracht. Die Schalldämm-Maße (R) der verwendeten Grundwände ist in Abbildung 1 auf der linken Seite dargestellt. Das bewertete Schalldämm-Maß (R_w) der KS-Wand liegt bei 54 dB und das der PB-Wand bei 44 dB. Um den Einfluss der Alterung der beiden Wände auf deren Schalldämmung über den Testzeitraum zu betrachten, wurden beide zu Projektbeginn und -ende gemessen. Es ist ersichtlich, dass sich die beiden Grundwände während des Versuchszeitraumes nicht verändern.

In Abbildung 1 auf der rechten Seite ist die PB-Wand mit zwei Dämmsystemen einer 120 mm und einer 60 mm dicken Mineralwolle-Dämmung dargestellt. Der Verlauf der Kurven zeigt, dass die Schalldämmung der Grundwand durch Aufbringen einer Mineralwolle-Dämmebene verbessert werden kann. Des Weiteren hat die Dicke der Dämmschicht einen Einfluss, denn mit steigender Dicke kann das R_w deutlich gesteigert werden. Die Verbesserungen zeigen sich im Frequenzverlauf hauptsächlich im tief- und mittelfrequenten Bereich. Daraus ergeben sich Zunahmen im Einzahlwert um 2 dB bei der 60 mm und um 6 dB bei der 120 mm Dämmebene. Diese Messungen wurden alle ohne vorgehängte VHF ausgeführt.

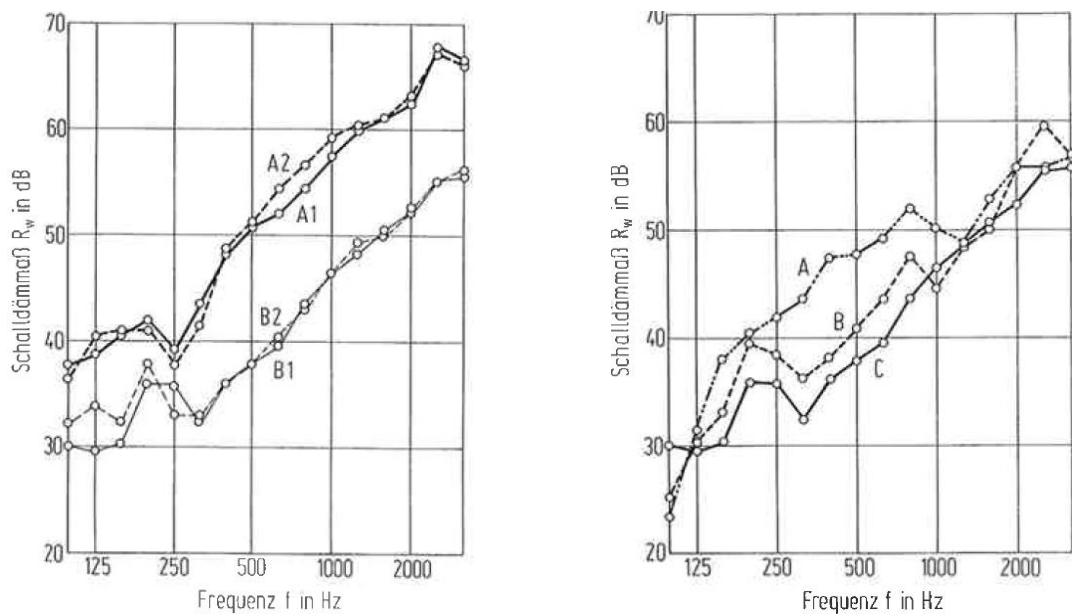


Abbildung 1: Links: Bild 3 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen der untersuchten Wände (A) Kalksandstein-Wand mit einseitig 10 mm Putzschicht, $R_w = 54$ dB (vor A1 und nach A2 Untersuchung) und (B) Porenbeton-Wand mit einseitig 10 mm Putzschicht, $R_w = 44$ dB (vor B1 und nach B2 Untersuchung)

Rechts: Bild 5 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von (A) 120 mm Mineralwolle-Dämmung auf Porenbeton $R_w = 50$ dB, (B) 60 mm Mineralwolle-Dämmung auf Porenbeton $R_w = 46$ dB und (C) Porenbeton-Wand Grundwand, $R_w = 44$ dB.

In Abbildung 2 wird die KS-Grundwand auch mit zwei Dämmsystemen untersucht. Auf der linken Seite mit einer 120 mm Schaumglas-Dämmung und auf der rechten Seite mit einer 120 mm Polystyrol-Dämmung (PS). Bei Betrachtung der beiden Diagramme wird ersichtlich, dass sich bei beiden Dämmsystemen, hauptsächlich im mittelfrequenten Bereich, eine Verringerung der Schalldämmung einstellt. Diese liegt, in diesem Bereich, teilweise deutlich unter der Grundwand. Das hat eine Verminderung des Einzahlwertes zur Folge. Im Fall der Schaumglas-Dämmung liegt diese bei -2 dB. Für die PS-Dämmung wurde kein Einzahlwert angegeben. Die Verbesserungen, die sich im hochfrequenten Bereich durch die Dämmsysteme einstellen, haben dann wenig bis keinen Einfluss mehr auf das R_w . Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Wahl des Dämmstoffes auch einen großen Einfluss auf die schalltechnische Wirkung der VHF hat. Die Effektivität ist mit einer Mineralwolle-Dämmung somit deutlich größer.

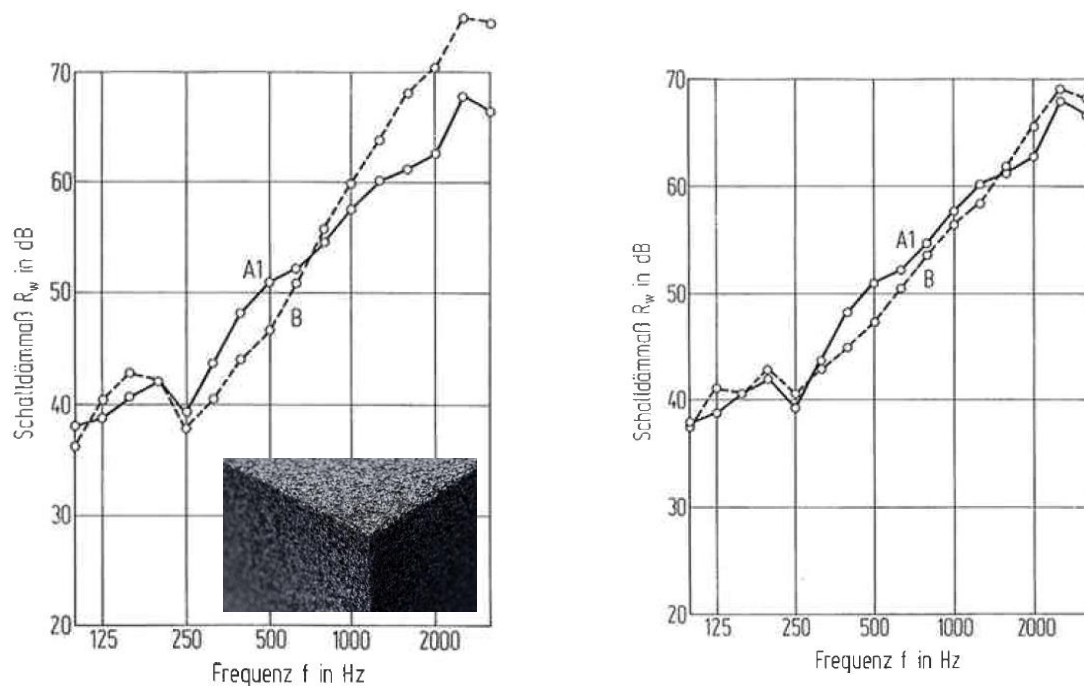


Abbildung 2: Links: Bild 6 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von
 (A1) Kalksandstein-Wand Grundwand, $R_w = 54$ dB und
 (B) 120 mm Schaumglas-Dämmung auf der Kalksandstein-Wand, $R_w = 52$ dB.

Rechts: Bild 7 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von
 (A1) Kalksandstein-Wand Grundwand, $R_w = 54$ dB und
 (B) 120 mm Polystyrol-Dämmung auf der Kalksandstein-Wand.

Die Abhängigkeit vom Verhältnis der flächenbezogenen Masse (m') einer schweren Grundwand zu jener einer leichten VHF bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß wird in Abbildung 3 aufgetragen. Es sind nur die Ergebnisse für die Fassaden mit Mineralwolle-Dämmung angeführt. Es lässt sich ablesen, dass der Einfluss der flächenbezogenen Masse (beim Verhältnis schwere Grundwand und leichte Fassade) gering ist und dieser vernachlässigt werden kann.

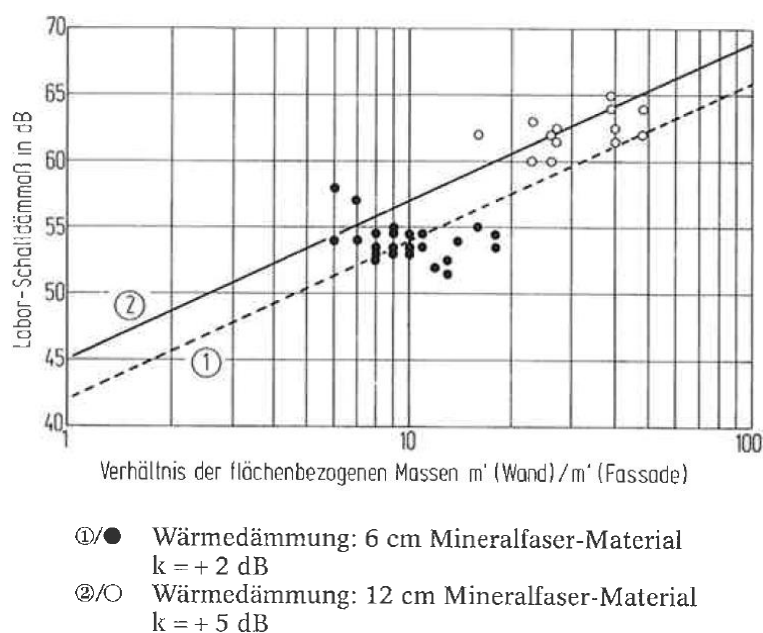


Abbildung 3: Bild 5 aus [1, 2] mit der Abhängigkeit des bewerteten Schalldämm-Maßes von Massivwänden mit vorgehängten Fassaden vom Masseverhältnis Wandmasse/Fassade (nur für Mineralfaserdämmschichten)

Welche Rolle die Fugen bei den VHF spielen, ist in Abbildung 4 dargestellt. In der linken Grafik wird der Fugenteil einer Fassade über Rand- und Flächenfugen variiert. In diesem Fall wird die Fassade aber nicht näher beschrieben. Gegenüber der Grundmessung mit offenen Rand- und Flächenfugen (Fugenteil 1,2 %) verbessert sich das R_w um 1 dB wenn die Randfugen (Fugenteil dann nur noch 0,3 %) geschlossen werden. Werden die Flächenfugen dann zusätzlich noch geschlossen, wird eine Verbesserung im Einzahlwert um 1 dB erreicht. Im Frequenzverlauf sind die höheren Schalldämm-Maße im tief- und hochfrequenten Bereich ersichtlich.

Im rechten Diagramm in Abbildung 4 wird die gleiche Systematik zur Bestimmung des Fugeneinflusses verwendet. In diesem Fall ist die Fassade beschrieben. Zuerst ist die Grundwand mit einem R_w von 54 dB eingetragen. Danach kommt die Variante, in der die 120 mm Schaumglas-Dämmung angebracht wurde und die Schalldämmung der Wand um 2 dB gefallen ist. Wird auf diese Wand eine VHF (alle Fugen offen) angebracht kann das bewertete Schalldämm-Maß wieder um 1 dB angehoben werden. Für eine Diagnosemessung wurden dann alle Fugen geschlossen und eine Verbesserung um 5 dB erzielt. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe ist ersichtlich, dass die Schalldämmung der Grundwand durch die Schaumglas-Dämmung im mittelfrequenten Bereich herabgesetzt und im hochfrequenten Bereich erhöht wird. Durch die VHF wird die tieffrequente Schalldämmung verringert und mittel- und hochfrequent erhöht. Im Einzahlwert sind diese Veränderungen kaum erkennbar. Bei der Variante mit den geschlossenen Fugen ist nahezu über den gesamten Frequenzbereich eine Verbesserung, die sich dann auch deutlich im bewerteten Schalldämm-Maß zeigt, zu sehen.

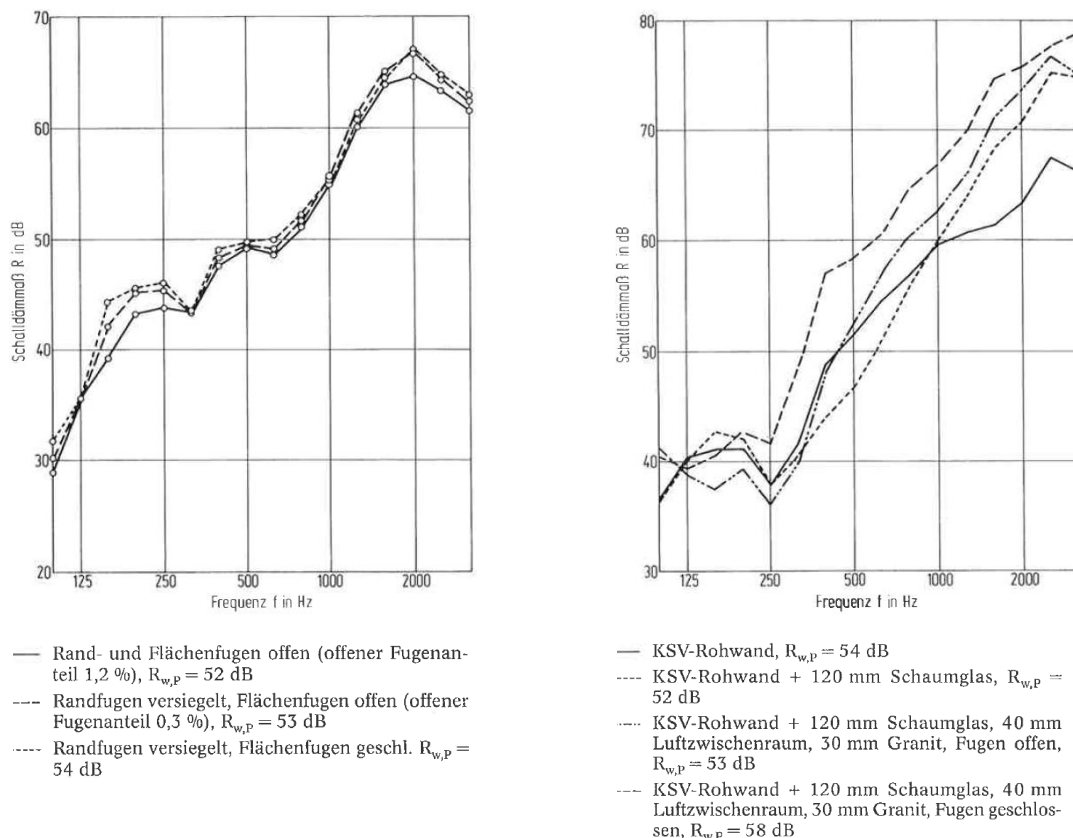


Abbildung 4: Links: Bild 6 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von Rand- und Flächenfugen (offener Fugenteil 1,2%) $R_w = 52$ dB; Randfugenversiegelt versiegelt und Flächenfugen offen (offener Fugenteil 0,3%) $R_w = 53$ dB; Rand- und Flächenfugen versiegelt $R_w = 54$ dB.

Rechts: Bild 7 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von Kalksandstein-Wand Grundwand, $R_w = 54$ dB; 120 mm Schaumglas auf der Kalksandstein-Wand, $R_w = 52$ dB; Fassade + 120 mm Schaumglas auf der Kalksandstein-Wand (Fugen offen), $R_w = 53$ dB und Fassade + 120 mm Schaumglas auf der Kalksandstein-Wand (Fugen geschlossen), $R_w = 58$ dB.

Die Art der Unterkonstruktion hatte in dieser Untersuchung eine große Auswirkung. Die ist in Abbildung 5 dargestellt. Es wurde eine VHF einmal auf einer Holz-Unterkonstruktion und auf Alu-Profilen auf der gleichen Grundwand mit gleicher Dämmung montiert. Zwischen beiden Varianten stellt sich ein Unterschied von 6 dB im Einzahlwert ein. Die VHF hat auf der Holz-Unterkonstruktion die deutlich schlechtere Performance. Diese ist bei Betrachtung der Frequenzverläufe deutlich sichtbar, da die Fassade auf den Alu-Profilen nahezu über den gesamten Frequenzbereich höhere Schalldämmungen erreicht.

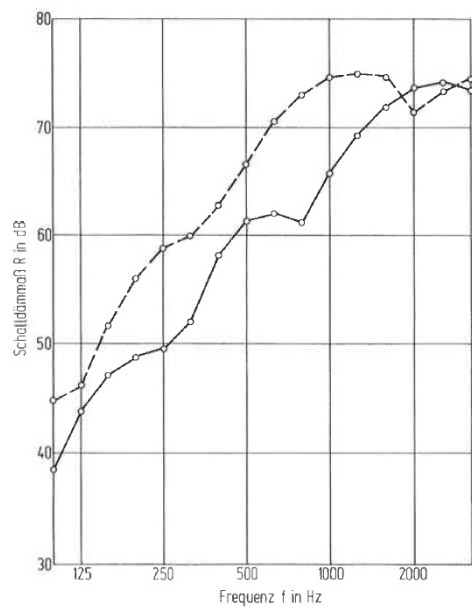


Abbildung 5: Links: Bild 8 aus [1, 2] mit den Frequenzverläufen von
 (B) Unterkonstruktion Holz, $R_w = 62$ dB und
 (W) Unterkonstruktion Alu-Profil, $R_w = 68$ dB.

1.2 Schalldämmung mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden – VHF [3]

Im Jahr 2022 erfolgte eine weitere Untersuchung zur Schalldämmung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (siehe [3]). Diese stützten sich auf die Messungen von [1, 2] aus den Jahren 1994 – 1995 als Ausgangspunkt. In dieser Zeit hat sich viel verändert, wie zum Beispiel die thermischen Anforderungen sowie die technischen Gegebenheiten, die eine neuerliche Betrachtung erfordern. Für die Messungen wurde wiederum eine einseitig verputzte KS-Wand verwendet.

In Abbildung 6 in der linken Grafik wurde analog zur vorherigen Untersuchung die KS-Wand vor und nach der Messserie geprüft. Das bewertete Schalldämm-Maß von 54 dB hat sich aufgrund möglicher Alterungs- oder Aushärteprozesse in diesem Zeitraum nicht verändert. Diese Werte passen gut zu den Ergebnissen aus [1, 2]. Im Schalldämm-Maß zeigen sich im tieffrequenten Bereich Abweichungen, die sich im R_w nicht niederschlagen. Woher diese kommen, wird nicht weiter diskutiert. Auf der rechten Seite in Abbildung 6 wurden drei Mineralwolle-Dämmungen auf der Grundwand angebracht. Zwei mit einer Dicke von 180 mm und unterschiedlicher Dichte. Die Dritte hatte eine Dicke von 100 mm mit einer vergleichbaren Dichte wie eine der 180 mm Varianten. Wie sich aus den Frequenzverläufen entnehmen lässt verändert sich der Einzahlwert R_w nicht, wenn bei gleicher Dämmstoffdicke die Dichte verdoppelt wird. Einen größeren Einfluss auf die Schalldämmung hat vielmehr die Dicke des Dämmstoffes. Wird diese bei gleicher Dichte um 80 mm vergrößert, kann das bewertete Schalldämm-Maß um 2 dB erhöht werden. Im Verlauf des Schalldämm-Maßes zeigen sich die Veränderungen hauptsächlich zwischen 100 Hz bis 250 Hz. Auch dieses Ergebnis passt gut zu den Erkenntnissen aus der vorangegangenen Untersuchung, wo gezeigt wurde, dass mit steigender Dicke einer Mineralwolle-Dämmung das Schalldämm-Maß verbessert werden kann.

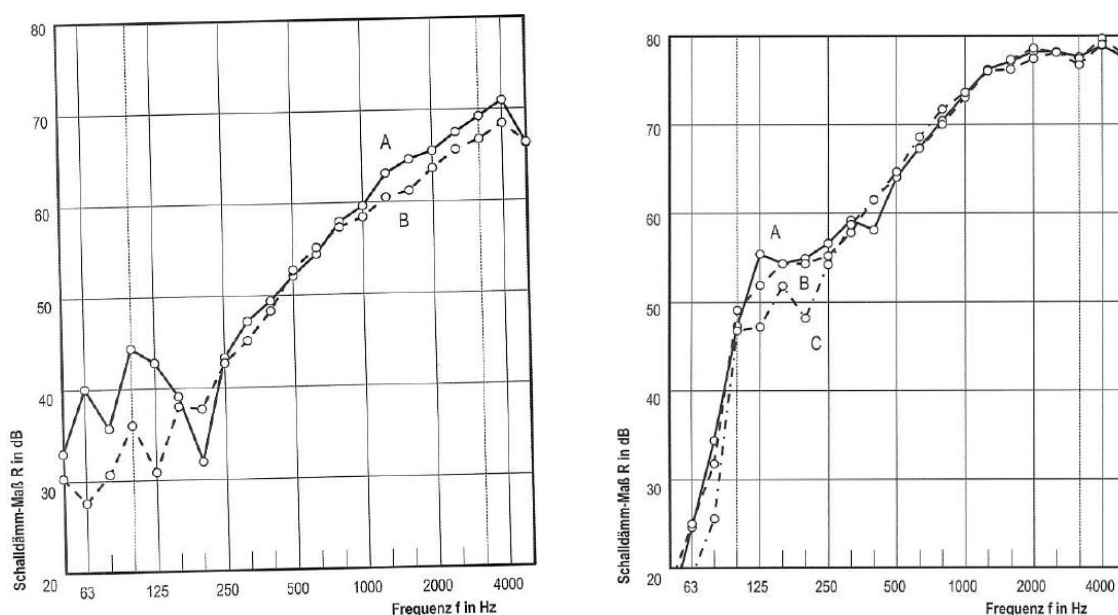


Abbildung 6: Links: Bild 1 aus [3] mit dem Frequenzverläufen der untersuchten Wand
(A) Kalksandstein-Wand einseitig verputzt 10 mm (9 Tage nach dem Verputzen), $R_w = 54,7$ dB und
(B) Kalksandstein-Wand einseitig verputzt 10 mm (50 Tage nach dem Verputzen), $R_w = 54,0$ dB.

Rechts: Bild 3 aus [3] mit den Frequenzverläufen von
(A) 180 mm Mineralwolle-Dämmung ($\delta = 24,9$ kg/m³) auf Kalksandstein-Wand $R_w = 68,3$ dB;
(B) 180 mm Mineralwolle-Dämmung ($\delta = 46,7$ kg/m³) auf Kalksandstein-Wand $R_w = 68,4$ dB und
(C) 100 mm Mineralwolle-Dämmung ($\delta = 47,4$ kg/m³) auf Kalksandstein-Wand $R_w = 66,8$ dB

In Abbildung 7 auf der linken Seite wurde eine VHF auf einer Holz- und einer Alu-Unterkonstruktion gemessen. In diesem Fall zeigt sich ein Unterschied von zwei 2 dB im R_w . In den Verläufen der Schalldämm-Maße sind die größten Unterschiede im Bereich von 63 Hz – 100 Hz. Ansonsten sind die Unterschiede eher gering. Bei anderen VHF-Aufbauten mit einer Unterkonstruktion aus Holz oder Alu wurden Differenzen von bis zu 5 dB gemessen [1, 2], wobei die Holz-Varianten immer ungünstiger waren. In der Veröffentlichung [3] wurde aber exemplarisch nur die beschreiben gezeigt.

Auf die Entkoppelung von VHF-Systemen wird in Abbildung 7 auf der rechten Seite eingegangen. Es wird eine Fassade mit Standardbefestigung mit Nieten gezeigt und die gleiche Fassade mit entkoppelter Nietung und PE-Anschlussdichtung an der Unterkonstruktion. Durch die Entkoppelung der Fassade ergibt sich eine Verbesserung um 1 dB im bewerteten Schalldämm-Maß. Im Frequenzverlauf sind nur geringe Unterschiede in einzelnen Terzbändern zu erkennen, die den günstigeren Einzahlwert verursachen. Die entkoppelte Variante hat einen Einbruch zwischen 1250 Hz und 4000 Hz, der aber für den Einzahlwert keine Rolle mehr spielt. Es wurden weitere entkoppelnde Nietsysteme untersucht, wobei sich der Einzahlwert im Bereich von 1 dB bis 3 dB veränderte.

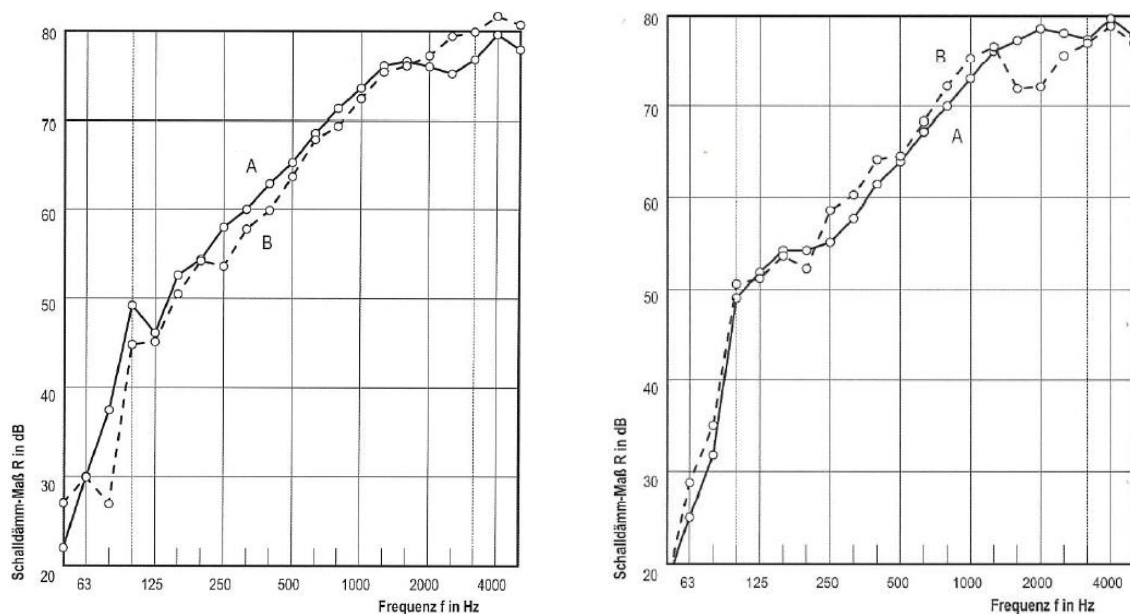


Abbildung 7: Links: Bild 8 aus [3] mit dem Frequenzverläufen von
(A) Metall-Unterkonstruktion, $R_w = 68,6$ dB und
(B) Holz-Unterkonstruktion, $R_w = 66,4$ dB.

Rechts: Bild 19 aus [3] mit den Frequenzverläufen von
(A) Fassadenplatten genietet $R_w = 68,4$ dB;
(B) Fassadenplatten entkoppelt genietet und Unterkonstruktion mit PE-Anschlussdichtung
 $R_w = 69,1$ dB.

Der Einfluss der flächenbezogene Masse m' (in kg/m^2) einer VHF auf die Schalldämmung ist in Abbildung 8 dargestellt. Auf der linken Seite ist eine verputzte Fassade mit einer Masse von $m' = 25,0 \text{ kg/m}^2$ (A) eingezeichnet. Im Vergleich dazu dieselbe Fassade mit einer zusätzlichen Putzschicht, wodurch die Masse auf $m' = 55,7 \text{ kg/m}^2$ (B) ansteigt. Das Mit der VHF mit größerer flächenbezogener Masse m' wird ein um 3 dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß erzielt. Im Verlauf des Schalldämm-Maßes zeigt die Variante B nahezu über den gesamten Frequenzbereich günstigere Werte. Aufgrund der veränderten Eigenschaften der Variante B verschiebt sich die Koinzidenzfrequenz zu niedrigeren Frequenzen. Das verursacht den Einbruch bei 1000 Hz. Diese Koinzidenzverschiebung kann sich auch deutlich ausgeprägter zeigen. Abbildung 8 in der rechten Grafik ist eine VHF aus 10 mm Faserzement-Paneelen auf Holz-Unterkonstruktion mit (A) $m' = 14,6 \text{ kg/m}^2$ und eine VHF aus 12 mm Faserzement-Paneelen auf Holz-Unterkonstruktion mit (B) $m' = 16,0 \text{ kg/m}^2$ eingetragen. In diesem Fall zeigt sich im Frequenzverlauf ein deutlicher Einbruch von 500 Hz bis 5000 Hz aufgrund der Koinzidenz. Im Einzahlwert ist diese Koinzidenz nicht ersichtlich.

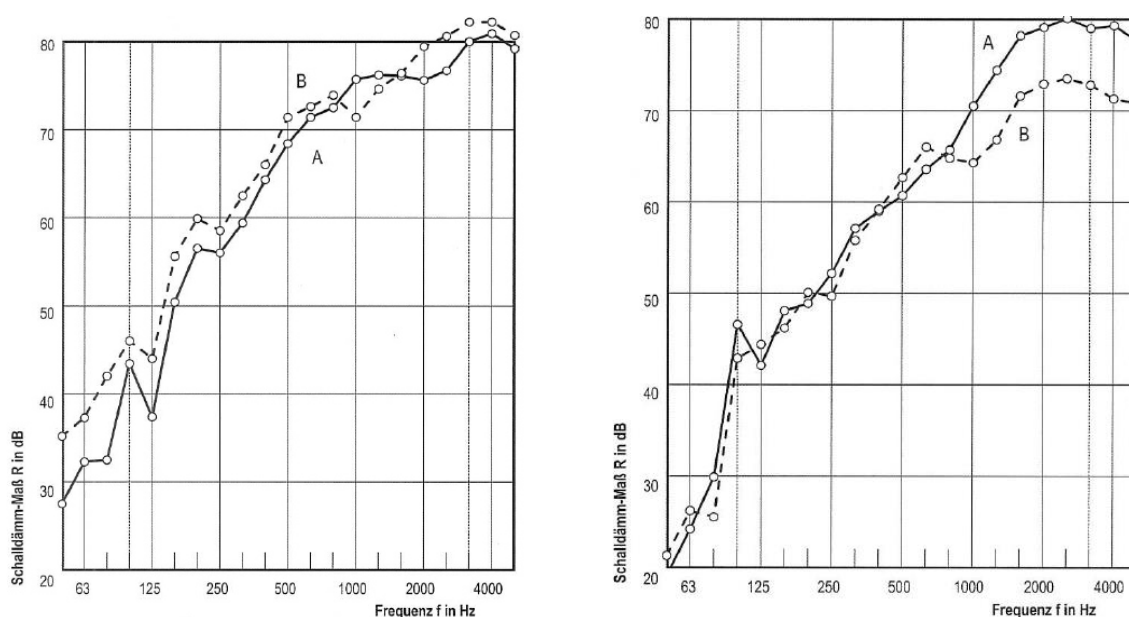


Abbildung 8: Links: Bild 21 aus [3] mit dem Frequenzverläufen von
 (A) Fassade verputzt ($m'_F = 25,0 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 67,0 \text{ dB}$ und
 (B) Fassade zusätzlich verputzt ($m'_F = 55,7 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 70,3 \text{ dB}$.

Rechts: Bild 22 aus [3] mit den Frequenzverläufen von
 (A) 10 mm Faserzement-Paneele auf Holz-Unterkonstruktion ($m'_F = 14,6 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 64,1 \text{ dB}$ und
 (B) 12 mm Faserzement-Paneele auf Holz-Unterkonstruktion ($m'_F = 16,0 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 63,6 \text{ dB}$.

Bei diesen VHF wurde auch die Veränderung des Fugenanteils untersucht. Abbildung 9, auf der linken Seite zeigt zwei Kurven, wobei der Fugenanteil bei 3,9% (A) und 1,8% (B) lag. Durch den verringerten Anteil konnte der Einzahlwert um 2 dB gesteigert werden. Beim Schalldämm-Maß sind die größten Unterschiede im mittel- und hochfrequenten Bereich erkennbar. Sowie bei einzelnen Frequenzbändern im tieffrequenten Bereich. Auch hier zeigt sich wieder, analog zur vorangegangenen Untersuchung (vgl. [1, 2]), dass der Fugenanteil einen Einfluss auf die Schalldämmung hat.

Ein weiterer Punkt, der betrachtet wurde, war die Form der Platten. Dazu kamen einerseits ebene Faserzementplatten mit einer Dicke von 8 mm und einer Masse von $m' = 16,2 \text{ kg/m}^2$ (A) zum Einsatz. Zum anderen Faserzementwellplatten mit einer Dicke von 6 mm und der zugehörigen $m' = 13,1 \text{ kg/m}^2$ (B). Bei diesem Vergleich (siehe Abbildung 9, auf der rechten Seite) wurde mit den ebenen Faserzementplatten ein um 4 dB höherer R_w -Wert gemessen. Diese deutliche Verbesserung aufgrund der geringfügig höheren Masse ist unwahrscheinlich. Dies haben die Messungen bei geringfügiger Änderung der flächenbezogenen Masse gezeigt (vgl. Abbildung 8). Deutlich wahrscheinlicher ist der Einfluss aufgrund der Plattenform. Zum einen ändert sich in diesem Fall das Abstrahlverhalten und zum anderen wird die Platte aufgrund der Form steifer, wodurch das schalltechnische Verhalten beeinflusst wird. Bei Betrachtung des Frequenzverlaufs zeigen sich die Unterschiede im tief- und mittelfrequenten Bereich. Von 50 Hz bis 100 Hz zeigen die Faserzementwellplatten den günstigeren Verlauf.

Von 100 Hz bis 1600 Hz haben die ebenen Faserzementplatten die höhere Schalldämmung. Dieser Bereich ist ausschlaggebend für das bewertete Schalldämm-Maß, weshalb der deutlich höhere Einzahlwert erzielt wird.

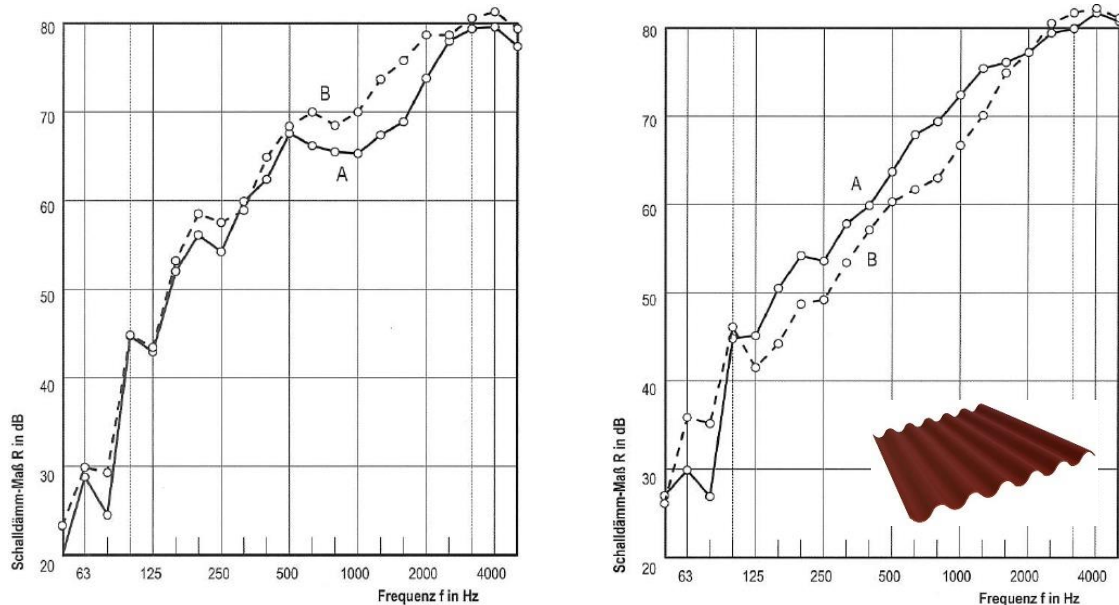


Abbildung 9: Links: Bild 25 aus [3] mit dem Frequenzverläufen von

(A) „Fugenanteil 3,9%, $R_w = 66,1$ dB und

(B) Fugenanteil 1,8%, $R_w = 68,1$ dB.

Rechts: Bild 26 aus [3] mit den Frequenzverläufen von

(A) ebene Faserzementplatten mit $d = 8$ mm und $m'_F = 16,2$ kg/m², $R_w = 66,4$ dB und

(B) Faserzementwellplatten mit $d = 6$ mm und $m'_F = 13,1$ kg/m², $R_w = 62,1$ dB.

1.3 Zusammenfassung zum Stand des Wissens und daraus resultierende Optimierungsansätze für Holzfassaden

In den beiden diskutierten Untersuchungen werden verschiedene mineralische Massivwände mit verschiedenen Dämmebenen:

- Mineralwolle-Dämmung in verschiedenen Dicken und Dichten,
- Schaumglas-Dämmung und
- Polystyrol-Dämmung

untersucht. Dabei zeigte sich, dass mit Mineralwolle-Dämmungen die höchsten Verbesserungen erreichbar sind. Wobei mit dickerer Dämmebene eine größere Verbesserung erreicht wird. Die Dichte der Mineralwolle spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Bei den beiden anderen Dämmungen wurde die Schalldämmung, bezogen auf den Einzahlwert, verringert. Im Bereich der tieffrequenten Schalldämmung ergaben sich bei diesen Systemen keine Änderung. Die Verringerung der Schalldämmung findet hauptsächlich im mittelfrequenten Bereich statt. Dort fällt sie unter die des Grundbauteils, was eine Reduktion

des Einzahlwertes zur Folge hat. Im hochfrequenten Bereich kann die Schalldämmung mit dem Schaumglas gesteigert werden. Das macht sich im bewerteten Schalldämm-Maß aber nicht mehr bemerkbar. Anhand dieser Ergebnisse soll auch bei den Holzfassaden eine zusätzliche Dämmebene hinter der Fassade untersucht werden, die aus Mineralwolle besteht.

Diese Untersuchungen zeigen auch, dass der Fugenteil einen signifikanten Einfluss hat. Mit den eingeplanten Fassaden kann dieser Aspekt nur bedingt untersucht werden. Prinzipiell sollen die Fassaden mit offener Hinterlüftungsebene, also als hinterlüftete Fassade und zum anderen mit geschlossener Hinterlüftungsebene, also stehender Luftschicht gemessen werden. Anhand einer Rhombusleisten-Schalung soll jedoch der Einfluss des Leistenabstands auf die Schalldämmung untersucht werden. Die Form der Fassade soll in dieser Untersuchung nicht betrachtet werden, da nur Holzschalungen im Fokus stehen.

Aufgrund der Ergebnisse aus dem Vergleich der Unterkonstruktionen aus Holz und Aluminium soll auch versucht werden die Unterkonstruktion für Holzfassaden zu optimieren. Es werden keine Aluleisten für die Aufbauten eingesetzt, aber es soll ausgelotet werden welches Potential in den Holzunterkonstruktionen steckt. Zum Beispiel:

- Unterschied einer Kreuzlattung (bestehend aus Konter- und Traglattung) zu einer reinen Traglattung.
- Tiefe der Konterlattung, wobei auch Tiefen, die nicht gebräuchlich sind, mit und ohne zusätzliche Dämmebene, untersucht werden sollen.
- Eine alternative Tragkonstruktion soll untersucht werden.
- Ebenfalls soll der Einfluss der Verschraubung der Unterkonstruktion mit der Grundwand getestet werden.

Durch die Erhöhung der flächenbezogenen Masse der Fassaden wurde bei den gemessenen Fassaden kein großes Verbesserungspotential festgestellt. Dies gilt ebenfalls für die Entkoppelung der Unterkonstruktion für die Fassaden. Diese beiden Parameter sollen für die Holzfassadensysteme aufgrund der geringeren Ausgangsmasse trotz allem systematisch untersucht werden. Zum einen soll die flächenbezogene Masse der Fassaden erhöht werden und zum anderen soll auch die Unterkonstruktion entkoppelt werden. Aus diesem Grund muss die alternative Tragkonstruktion so ausgelegt werden, dass eine Entkoppelung möglich ist. Um beide Potentiale voll ausschöpfen zu können sollen beide Ansätze miteinander gekoppelt werden. Aufgrund der geringen Datenlage zu Holzfassaden sollen die genannten Optimierungsansätze in diesem Projekt an Holzfassaden untersucht werden.

2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden zunächst die untersuchten Wandaufbauten beschrieben und dargestellt. In weiterer Folge wird auf das Wechselfassadensystem eingegangen, dass für diese Messserie entwickelt wurde. Damit konnten die Fassadenelemente schnell auf den unterschiedlichen Grundwänden montiert und getauscht werden, ohne die einzelnen Varianten immer neu aufbauen zu müssen. Weiters werden die Schallprüfstände und die Messmethode beschrieben. Die Messung der Schalldämmung der Bauteile erfolgte in Anlehnung an EN ISO 10140-2:2021, wobei zum frequenzabhängigen Schalldämm-Maß R in dB auch die Einzahlkennwerte, das bewertete Schalldämm-Maß R_w in dB und die Spektrum-Anpassungswerte in dB, bestimmt wurden. Da bei Außenbauteilen, z.B. aufgrund von Verkehrsbelastung, auch unter 50 Hz Lärmbelastung auftreten kann, wurde bei verschiedenen Außenbauteilen die Schalldämmung bis 25 Hz gemessen.

2.1 Holzrahmenwand in der Fensteröffnung

Vor den Schallmessungen nach EN ISO 10140-2:2021 mit einer geforderten Prüffläche von 10 m² bis 20 m² (vgl. Abschnitt 2.2) wurden Wandmessungen in der Fensteröffnung mit den Abmessungen 1500 × 1250 mm durchgeführt. Diese wurden zum einen für die Validierung des Simulationsmodells (vgl. Anhang 4) benötigt, zum anderen diente die durchgeführte Parameterstudie (vgl. unten bzw. Abschnitt 3.1) als Basis für zu prüfende Optimierungen mit den Norm-Abmessungen. Der Aufbau der im Projekt als Standardvariante definierten Holzrahmenwand mit Nut-Feder-Lärchenschalung ist in Tabelle 1 angeführt.

Im Zuge des sukzessiven Aufbaus des Prüfkörpers wurden Diagnosemessungen durchgeführt (z. B. ohne empfangsraumseitige Beplankung und Gefachdämmung), auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

Tabelle 1: Aufbau der untersuchten Holzrahmenwand in der Fensteröffnung (Prüffläche = 1,8 m²).

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung (Fensteröffnung)

19,0 mm	Nut-Feder Lärchenschalung (vertikal)
30,0 mm	Traglattung (30 × 50) mm ² , e = 700 mm
30,0 mm	Konterlattung (30 × 50) mm ² , a = 700 mm
16,0 mm	MDF, geschraubt mit a = 50 mm
240,0 mm	Holzrahmen (60 × 240) mm ² , e = 600 mm, mit
240,0 mm	Dämmung (MW)
15,0 mm	OSB, geschraubt mit a = 50 mm
345,3 mm	Gesamtdicke
59,3 kg/m²	flächenbezogene Masse
1,8 m²	Prüffläche

Im Zuge einer Parameterstudie wurden folgende Faktoren untersucht:

- „Belüftete Fassade“ und „stehende Luftschicht“: Jede untersuchte Fassade wurde neben der hinterlüfteten Standardvariante auch belüftet und mit stehender Luftschicht, d.h. obere bzw. obere und untere Belüftungsöffnung wurden mit Leinölkitt abgedichtet, gemessen. Die Belüftungsöffnung betrug oben und unten jeweils rund 10 mm.
- Konterlattungstiefe: Im Rahmen der Vorstudie wurde anhand der Holzrahmenwand in der Fensteröffnung der Unterschied einer 30 mm (Grundvariante) zu der 60 mm Konterlattungstiefe untersucht.
- Einfluss der Fugen der Nut-Feder-Verbindungen: Bei einer Vergleichsmessung wurden alle Fugen der Nut-Feder-Schalung mittels Klebebandes abgeklebt, um deren Einfluss zu quantifizieren.
- Absorber im Belüftungsspalt: Als erste Modifikation wurden hinter dem Fassadenschirm des Aufbaus mit 60 mm Konterlattungstiefe weiche Mineralwolleplatten in 30 mm Stärke abgebracht, sodass weiterhin mindestens 30 mm Hinterlüftungsspalt verbleiben. Die Dämmung wurde einmal an der äußeren Beplankung zwischen die Konterlatten und einmal direkt an den Fassadenschirm zwischen die Traglatten geklemmt.
- Vollgewindeschrauben: Um weniger Anpressdruck und damit geringere Körperschallübertragung über die Unterkonstruktion zu erreichen, wurde die Fassade inkl. Traglattung in der Studie mittels Vollgewindeschrauben statt den üblichen Teilgewindeschrauben im Prüfkörperbefestigt. Der Einfluss des Anpressdrucks resultierend aus der Verwendung von Teilgewindeschrauben wurde für Dächer schon in [4] und [5] gezeigt. In einem weitergehenden Versuch, wurde ergänzend dazu ein Abstand von 1 mm zwischen Konter- und Traglattung untersucht. In diesem Versuch erfolgt die gesamte Körperschallübertragung über die Vollgewindeschrauben.
- Entkopplung: Ein weiterer Ansatz die Körperschallübertragung über die Lattung zu unterbinden war der Einsatz von Elastomerlagern anstelle der Konterlattung. Diese wurden mit Klebeband an der äußeren Beplankung (MDF) an den späteren Befestigungspunkten der Fassade befestigt. Anschließend wurde die Fassade mittels Vollgewindeschrauben im Prüfkörper montiert, wobei die elastischen Lager als Abstandhalter dienten. Weiters wurden die untersten sechs Schrauben des 3 × 3 Rasters entfernt, sodass die Fassade lediglich an der obersten Reihe hing und ansonsten an den elastischen Lagern frei schwingen kann.

2.2 Verwendete Grundwände und Fassaden

Grundwände:

Prinzipiell wurden für die Untersuchung drei Wandtypen verwendet:

- Holzrahmen (auf diesem Wandsystem lag der Fokus der Untersuchung)
- Holzmassiv (Brettsper Holz) und
- Stahlbeton.

Die ausgewählten Holzrahmen- (HRW) und Holzmassivwände (HMW) repräsentieren den Holzbau, während mit der Stahlbetonwand (BTW) inkl. der notwendigen Dämmebene und den Holzfassaden der Holzhybridbau abgebildet werden soll. Dieser nimmt im mehrgeschossigen Wohnbau an Bedeutung zu. In Tabelle 2 sind die verwendeten Grundwände detailliert angeführt. Im ersten Schritt wurden die Grundwände ohne Fassadensysteme gemessen, um z.B. Luftschallverbesserungsmaße berechnen zu können. Des Weiteren ist es vorteilhaft den Frequenzverlauf des Grundbauteils zu kennen, um die Veränderungen durch die Fassade darstellen und interpretieren zu können.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Grundwandaufbauten

Grundwand	Kurzbe- zeichnung	Prüfstand	Länge	Höhe	Dicke	Flächenbez. Masse
			in mm	in mm	in mm	in kg/m²
Holzrahmenwand						
Ständerabstand e = 625 mm	HR	M-PS	3970	2670	270	42,5
Ständerabstand e = 312 mm	HR-312	M-PS	3970	2670	270	52,2
Ständerabstand e = 625 mm	HR-XL	XL-PS	5260	3860	270	39,7
Brettsper Holz wand						
5-lagig	HM-5	M-PS	3970	2670	100	49,0
3-lagig	HM-3	M-PS	3970	2670	100	49,0
3-lagig, geteilt	HM-3-2	M-PS	3970	2670	100	48,5
3-lagig, geteilt	HM-3-2-XL	XL-PS	5260	3860	100	46,4
Betonwand						
150 mm	BT-150	M-PS	3970	2670	150	387,3

Holzfassaden:

Auf den zuvor angeführten Wandtypen wurden verschiedene Holzfassaden montiert und gemessen. Prinzipiell wurden zwei Fassadensysteme auf allen Wänden untersucht:

- Lärche Nut+Feder (N+F) Bretter, Stärke 19 mm, vertikal ausgeführt mit Kreuzlattung (Konter- und Traglattung) → Standardvariante 1 (SV1)
- Lärche Rhombusleisten (RH) (Breite × Stärke) (55 × 21) mm², horizontal ausgeführt mit Traglattung, Leistenabstand 14 mm → Standardvariante 2 (SV2)

Diese beiden Fassadensysteme wurden als jeweils ein Element aufgebaut (Wechselfassade), um eine kurze Umbauzeit zu gewährleisten. Die Fassadenelemente sind in Abbildung 10 dargestellt. In Tabelle 3 ist eine Übersicht der aufgebauten Fassaden. Im Allgemeinen wurden die Modifikationen an den beiden Standard-Fassaden getestet. Der Einbau der Fassadenelemente wird in Abschnitt 2.3.2 gezeigt.

Die Fassadenelemente hatten eine Dimension (Breite × Höhe) von (3970 × 2630) mm². Die Höhe war somit 40 mm kleiner als die Grundwände. Mit diesem Abstand wurde sichergestellt, dass oben und unten ein Hinterlüftungsspalt von 20 mm zwischen Prüfraumen und Fassade vorhanden war. Als Unterkonstruktion der Holzfassaden kamen zwei Lattungssysteme zum Einsatz; zum einen eine Kreuzlattung bei vertikalen Fassaden, bestehend aus einer vertikalen Konter- und einer horizontalen Traglattung mit jeweils (30 × 50) mm², zum anderen eine reine vertikale Traglattung (30 × 50) mm² für horizontale Fassadensysteme.

Die Hinterlüftungsebene wurde bei der Kreuzlattung in der Konterlattungsebene umgesetzt und betrug immer mindestens 30 mm. Im Fall der alleinigen Traglattung wurde die Hinterlüftung in der Traglattungsebene umgesetzt und betrug auch immer mindestens 30 mm.



Abbildung 10: Linke Seite: Lärche Nut+Feder Fassade vertikal ausgeführt mit Kreuzlattung (SV1). Rechte Seite: Lärche Rhombusleisten horizontal ausgeführt nur mit Traglattung (SV2).

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Wechselfassaden

Fassaden-Typ	Lattung	Holzart	Länge	Höhe	Flächenbez. Masse
			mm	mm	in kg/m ²
geschlossen, N+F vertikal, SV1	Kreuzlattung	Lärche	3970	2630	13,2
geschlossen, N+F vertikal, SV1-XL	Kreuzlattung	Lärche	5260	3820	13,6
geschlossen, N+F horizontal	Traglattung	Lärche	3970	2630	14,1
geschlossen, N+F vertikal	Kreuzlattung	Fichte	3970	2630	9,6
geschlossen, N+F vertikal	Kreuzlattung	Thermo fichte	3970	2630	9,5
offen, Rhombusleisten horizontal, Abstand 7 mm	Traglattung	Lärche	3970	2630	13,6
offen, Rhombusleisten horizontal, Abstand 14 mm, SV2	Traglattung	Lärche	3970	2630	11,9
offen, Rhombusleisten horizontal, Abstand 14 mm, SV2-XL	Traglattung	Lärche	5260	3820	12,0
offen, Rhombusleisten horizontal, Abstand 21 mm	Traglattung	Lärche	3970	2630	10,8

Prinzipiell sind für Fassaden folgende Ausführungen möglich (siehe Abbildung 11):

- Hinterlüftete Fassade (bewegliche Luftschicht mit Belüftungsöffnung unten und oben)
- Belüftete Fassade (bewegliche Luftschicht mit einer Belüftungsöffnung unten)
- Nicht hinterlüftete Fassade (stehende Luftschicht, d.h. es gibt keine Belüftungsöffnungen)
- Nicht hinterlüftete Fassade ohne Luftschicht (in diesem Fall ist die Fassade direkt auf der Grundwand oder auf der Dämmebene angebracht)

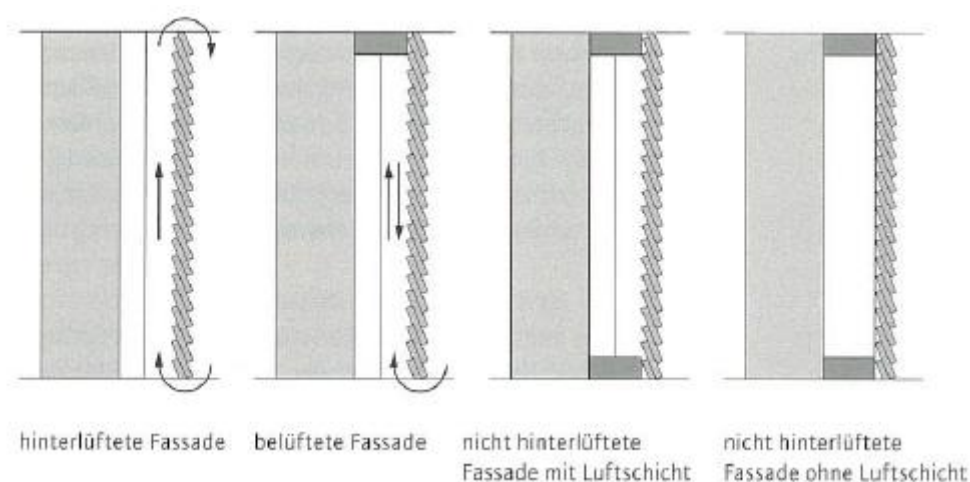


Abbildung 11: Typologie der Fassadensysteme aus Fassaden aus Holz gemäß [6] von links nach rechts: hinterlüftet, belüftet, nicht hinterlüftet und nicht hinterlüftet ohne Luftschicht

Die geschlossenen Holzschalungen wurden zum einen so gemessen, dass eine hinterlüftete Fassade vorlag. Das heißt eine bewegliche Luftschicht war bei den Aufbauten vorhanden und demzufolge die Belüftungsöffnungen unten und oben offen. Zum Vergleich wurde eine nicht hinterlüftete Fassade (stehende Luftschicht) ausgeführt in dem die Öffnungen mit Fensterkitt (Ramsauer, 830 Leinölkitt) abgedichtet wurden.

Die weiteren an den Fassaden ausgeführten Modifikationen sind in Abbildung 12 dargestellt. Beispielsweise wurde die Tiefe der Belüftungsebene gegenüber der Standardvariante mit 60 mm und 120 mm verändert. Des Weiteren wurde eine zusätzliche Dämmschicht unterhalb der Fassade angebracht. Die Entkoppelung oder die Beschwerung der Fassadenelemente wurde ebenfalls untersucht.

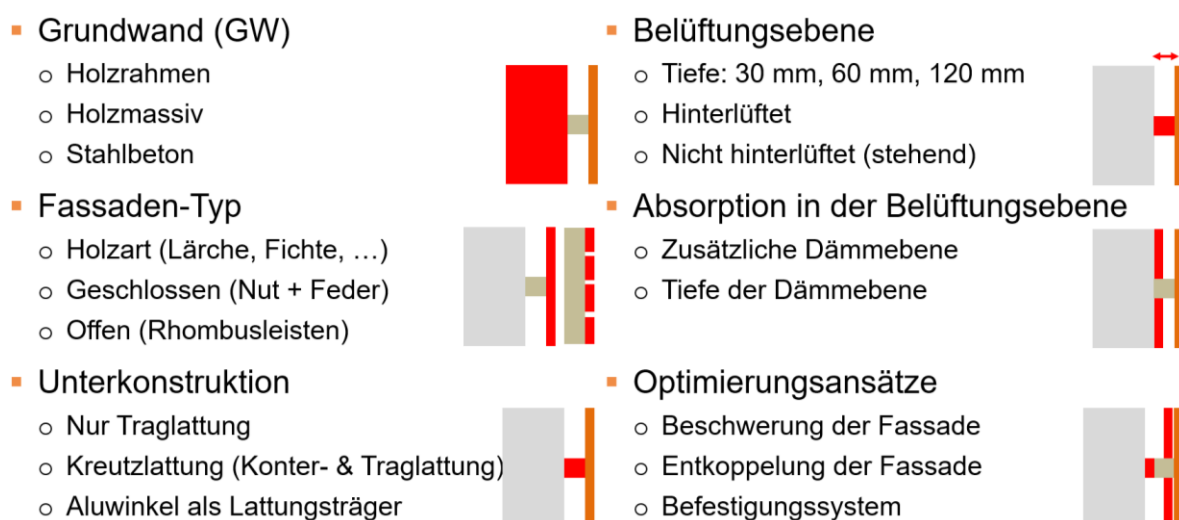


Abbildung 12: Übersicht der an den Holzfassaden ausgeführten Modifikationen.

Während die mit Mineralwolle ausgedämmte HRW selbst schon als Dämmebene dient, mussten auf den beiden massiven Wandtypen HMW und BTW Dämmebenen montiert werden. Hierfür wurden auf der jeweiligen Grundwand Holzriegel (60×200) mm² mit einem Sprungmaß $e = 625$ mm angeschraubt. Die Gefache wurden mit 200 mm Mineralwolle (SAINT-GOBAIN ISOVER, ULTIMATE HBF-031) gedämmt. Darauf war eine Fassadenbahn (SAINT-GOBAIN ISOVER, Unterdeck- und Windschutzbahn) angebracht (siehe Abbildung 13). Die Tiefe der Dämmebene wurde so gewählt, dass die thermischen Anforderungen für die beiden Wandtypen erfüllt waren. Zum besseren Verständnis der untersuchten Bauteile und der Wirkung der einzelnen Schichten auf die Schalldämmung, wurden die beiden Grundwände mit den außen liegenden Dämmebenen auch ohne Fassaden gemessen. Im Anschluss wurden die Fassadenelemente angebracht. Dies erfolgte im Allgemeinen unabhängig vom Grundwandtyp immer gleich.

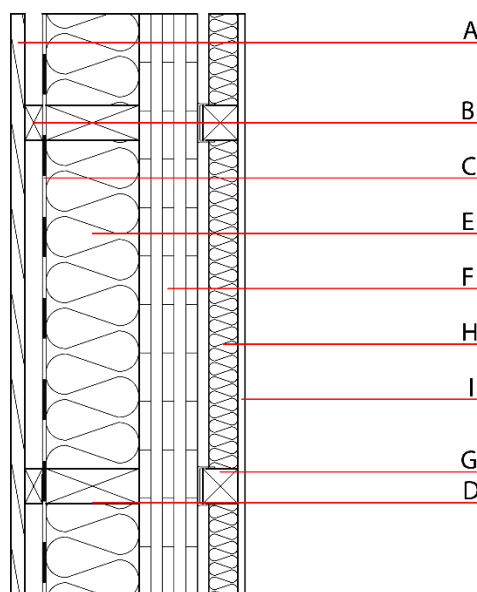


Abbildung 13: Beispielhafter Aufbau einer Holzmassivwand mit außenseitiger Dämmebene und Holzschalung mit A = Holz-Fassade, B = Traglattung, C = Fassadenbahn, D = Konstruktionsholz (60×200) mm² mit $e = 625$ mm, E = Dämmung (Mineralwolle) 200 mm, F = Bettsper Holz 100 mm entnommen von dataholz.eu (Außenwand awmhh03a-00)

Vergleichsfassade:

Zum Vergleich zu den Holzfassaden-Systemen diente ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS), da diese in der Praxis weit verbreitet sind. Als Dämmung wurde dabei expandiertes Polystyrol (EPS) eingesetzt. Eine genaue Beschreibung der Aufbauten findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten WDVS-Aufbauten

Grundwand	Putz	EPS	Kleberschicht	Dübel
HR	5 mm, webertherm family GROB BlueComfort	80 mm Wärmedämmplatte EPS-F, Brucha	4 mm, webertherm family GROB BlueComfort	72 Stück Dämmplattendübel STR H, 120 mm
HM	5 mm, webertherm family GROB BlueComfort	180 mm Wärmedämmplatte EPS-F, austyrol Dämmstoffe	4 mm, webertherm family GROB BlueComfort	72 Stück Dämmplattendübel STR H, 220 mm
BT	5 mm, webertherm family GROB BlueComfort	180 mm Wärmedämmplatte EPS-F, austyrol Dämmstoffe	10 mm, webertherm family GROB BlueComfort	72 Stück Schaubdübel SRD-5, 215 mm

2.3 Messung und Auswertung

In folgendem Abschnitt wird zunächst auf die Prüfstände, die für die bauakustischen Messungen verwendet wurden, eingegangen. Die Luftschallmessungen erfolgten alle nach ÖNORM EN ISO 10140-2:2021 [7]. Dabei wurde jeweils von 50 Hz bis 5000 Hz gemessen, wobei für Messungen im XL-Prüfstand des Akustik Centers Austria (vgl. Abschnitt 2.3.1) Messungen in dem erweiterten Frequenzbereich von 25 Hz bis 5000 Hz durchgeführt wurden. Weiters wird die Einbausituation der unterschiedlichen Grundwände sowie der Fassadenelemente geschildert. Abschließend ist die Auswertung der Messungen angeführt, wobei für die Messungen im erweiterten Frequenzbereich Spektrum-Anpassungswerte gebildet wurden, die nicht normativ sind.

2.3.1 Prüfstände

Die Messungen erfolgten im M-Prüfstand bzw. im XL-Prüfstand des Akustik Center Austria am HFA-Standort Stetten (Gewerbegebiet 6, 2100 Stetten) [8]. Diese wurden gemäß den Anforderungen an Prüfstände, festgelegt in ÖNORM EN ISO 10140-1:2021 und ÖNORM EN ISO 10140-5:2021, ohne Schallnebenwege errichtet.

Bei den Prüfräumen handelt es sich um jeweils zwei Rechteckräume, ausgestattet mit den erforderlichen Absorbern und Diffusoren. Die Senderäume bestehen aus 100 mm bzw. 140 mm dicken Brettspertholzplatten mit einer innenseitigen, tief abgestimmten Vorsatzschale. Die Empfangsräume wurden aus 200 mm dicken Stahlbetonfertigteilen, ebenfalls mit innenseitiger, tief abgestimmter Vorsatzschale ausgeführt. Die Räume sind über entsprechend dimensionierte elastische Zwischenschichten vom Hallenboden entkoppelt, um Störsignale von außen zu unterbinden. Nachfolgend sind die Eckdaten der beiden Prüfstände bei der Messung der Schalldämmung von Wänden angeführt:

- M-Prüfstand (M-PS) mit Senderaum (SR) = 54 m³, Empfangsraum (ER) = 60 m³ und Prüfwand = 10,8 m²
- XL-Prüfstand (XL-PS) mit Senderaum (SR) = 138 m³, Empfangsraum (ER) = 153 m³, Prüfwand (Standard) = 20,7 m² und Prüfwand in Adapterrahmen (A) = 10,8 m²

Für die Messungen werden die Prüfkörper umlaufend entkoppelt in einen Prüfraum aus Stahlbeton montiert und zwischen dem Sende- und Empfangsraum platziert. Die Prüfraum sind durch elastische Zwischenschichten wiederum von den Prüfräumen entkoppelt, um eine Nebenwegübertragung zu unterdrücken.

2.3.2 Einbausituation

Im Zuge der bauakustischen Messungen wurden drei unterschiedliche Wandgrößen untersucht. Zum einen wurde eine Parameterstudie anhand einer Holzrahmenwand in Fenstergröße durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.1). Zum anderen wurden unterschiedliche

Wandtypen (Holzrahmen-, Holzmassiv-, Betonwand; vgl. Abschnitt 2.2) mit 10,8 m² bzw. 20,7 m² untersucht. Die Einbausituationen der unterschiedlich großen Wände, aber auch der Wandtypen wiesen dabei grundlegende Unterschiede auf und werden nachfolgend beschrieben.

Holzrahmenwand in der Fensteröffnung (M-Prüfstand)

An die Schwelle der Grundwand in der Fensteröffnung wurden zwei Hartgummi-Plättchen mit den Abmessungen $50 \times 50 \times 10$ mm geschraubt. Die Wand wurde anschließend in die senderaumseitige Wandschale des Betonrahmens mit Fensteröffnung gestellt und das Rähm an zwei Positionen im Betonrahmen mit Holzkeilen fixiert, wie in Abbildung 14 (links) zu sehen ist. Der umlaufend vorliegende Spalt wurde mit weicher Trittschalldämmung ausgefüllt und beidseitig mit Fensterkitt abgedichtet. Empfangsraumseitig ist die Prüföffnung größer, der Raum zwischen Betonrahmen und Prüfkörper wurde mit Trittschalldämmung ausgefüllt und mit Fensterkitt abgedichtet (Abbildung 14, rechts). Die Holzrahmengrundwand wurde so in die Öffnung eingebaut, dass der Fassadenschirm bei einer Konterlattungsstärke von 60 mm bündig mit dem Prüfrahmen ist.



Abbildung 14: In der Fensteröffnung eingebaute Holzrahmenwand. Links: Verkeilung des Prüfkörpers; Die umlaufende Fuge wurde anschließend mit Mineralwolle ausgestopft und mit Fensterkitt abgedichtet; Ansicht aus dem Senderaum. Rechts: Der Luftraum zwischen Prüfkörper und empfangsraumseitig größerer Laibung der Fensteröffnung wurde mit Trittschalldämmung ausgefüllt und mit Fensterkitt abgedichtet.

Die Fassade wurde einmalig als Element inkl. Traglattung gefertigt und jeweils als einzelnes Element auf die entsprechende Unterkonstruktion geschraubt. Dadurch konnte Zeit eingespart werden, die eine größere Anzahl an geprüften Varianten ermöglichte.

Holzrahmenwand (HRW) & Holzmassivwand (HMW) mit 10,8 m² / 20,7 m² (M-Prüfstand/XL-Prüfstand)

Die jeweiligen Grundwände wurden in den Stahlbetonrahmen eingebaut. Die Wände waren dabei umlaufend durch Trittschalldämmung vom Prüfraumen entkoppelt. Die umlaufenden Fugen wurden vor der Prüfung sende- und empfangsraumseitig mit Fensterkitt abgedichtet.

Die Prüfkörper wurden so im Prüfraumen eingebaut, dass jene Fassadenvariante mit der tiefsten Unterkonstruktion bündig mit dem Prüfraumen abschloss.



Abbildung 15: Links: Empfangsraumseitige Ansicht der Holzrahmenwand im Prüfraumen. Rechts: Senderraumseitige Ansicht der im Prüfstand eingebauten Grundwand mit Nut-Feder Lärchenschalung.

Im XL-Prüfstand wurden neben den Wänden mit einer Fläche von 10,8 m², die auch im M-Prüfstand untersucht wurden, auch Wände mit 20,7 m² gemessen. Für die Messung der großflächigen Elemente passierte der Einbau analog zum M-Prüfstand in einem umlaufenden Rahmen. Für die Messungen der Wände mit derselben Fläche von 10,8 m² wie im M-Prüfstand wurden diese in eine dafür angeschaffte, zweischalige Adapterwand aus Stahlbeton eingebaut (Abbildung 16). Mit dieser konnte der Einfluss des Raumvolumens auf das Schalldämm-Maß analysiert werden. Der Einbau der Prüfkörper erfolgte wiederum analog zu den anderen Stahlbetonrahmen.



Abbildung 16: Ansicht der in der Adapterwand eingebauten Holzrahmenwand vertikaler mit Nut-Feder-Lärchenschalung im Senderaum des XL-Prüfstands.

Betonwand (BWT) im M-Prüfstand:

Die 140 mm starke Stahlbetonwand (Abbildung 17) ist anders als die Leichtbauwände bereits starr in einem Prüfraum eingebaut. Empfangsraumseitig schließt die Wandaußenseite bündig mit dem Prüfraum ab. Um eine ähnliche bauliche Kopplung wie im eingebauten Zustand zu erreichen (vgl. [7]), wird der Rahmen mit der eingebauten Betonwand starr an die Betonwände des Empfangsraumes des Prüfstands angebunden. Dies erfolgt mittels Baugips und Gipsfaserplatten, sodass die ansonsten wirksamen Elastomere überbrückt werden. Jeweils drei von diesen Koppelungen wurden auf der Höhe auf der linken und rechten Seite der Wand angebracht. 450 mm von der Ober- und Unterkante des Rahmens wurde eine Anbindung hergestellt und dann noch eine in der Mitte zwischen der Oberen und der Unteren. Die Koppelungen hatten Längen zwischen 450 mm und 500 mm.



Abbildung 17: Senderaumseitige Ansicht der geprüften Stahlbetonwand mit 140 mm Stärke.

Die unterschiedlichen Fassaden wurden einmalig als Element inkl. Traglattung gefertigt und jeweils als einzelnes Element auf die entsprechende Unterkonstruktion geschraubt. Dadurch konnte Zeit eingespart werden, die eine größere Anzahl an geprüften Varianten ermöglichte. Der Vorgang des Fassadeneinbaus einer horizontalen Rhombusschalung ist in Abbildung 18 dargestellt.

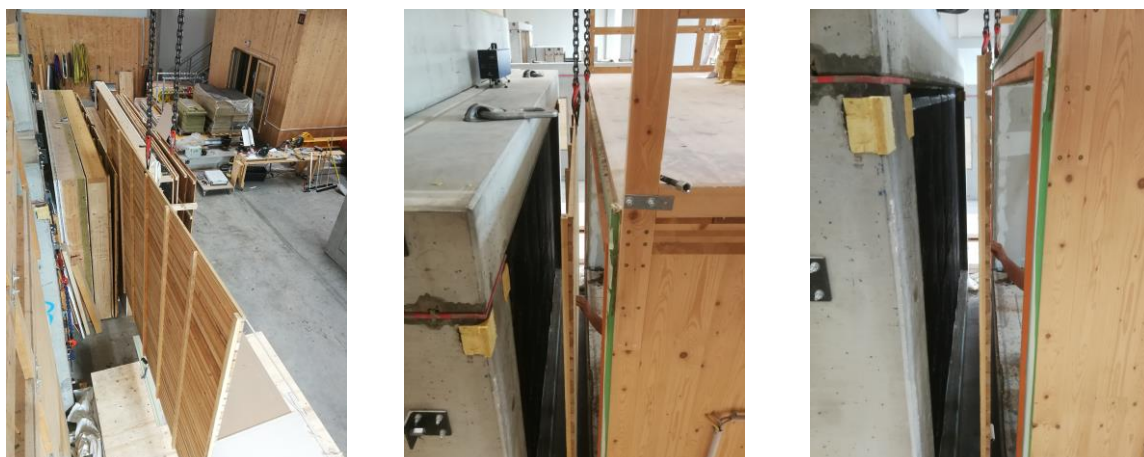


Abbildung 18: Das jeweilige Fassadenelement (hier: horizontale Rhombusleisten) wurde zur Messung angehoben (links) und auf die zu messende Grundwand, die im Prüfstand eingebaut war, geschraubt (Mitte und rechts).

2.3.3 Auswertung

Normative Auswertung nach EN ISO 717-1:2020 [9]:

Die Auswertung des Frequenzbereichs von 50 Hz bis 5000 Hz erfolgte nach ÖNORM EN ISO 717-1:2020 [9]. Eine Übersicht der dabei gebildeten Einzahlwerte und deren Bedeutung für die Praxis sind in Tabelle 5 dargestellt. Fokus der Betrachtung in dieser Untersuchung lag aber auf den tieffrequenten Anpassungswerten C_{50} und $C_{tr,50}$ da es sich um Außenbauteile handelt. Zur Gegenüberstellung der Einzahlwerte mit Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte muss jeweils die Summe des bew. Schalldämm-Maßes R_w und des jeweiligen Spektrum-Anpassungswertes gebildet (z.B. $R_w + C_{tr,50}$). Diese Summenwerte aus bewertetem Schalldämm-Maß und tieffrequenten Anpassungswerten (C_{50} und $C_{tr,50}$) werden in den Diagrammen in Abschnitt 3 Ergebnisse und Diskussion angegeben, um das tieffrequente Verhalten der untersuchten Außenwandaufbauten einordnen zu können.

Tabelle 5: Übersicht der gebildeten Einzahlwerte

Einzahlwert Kurzbezeichnung	Name	Praxisrelevanz
R_w	Bewertetes Schalldämm-Maß in dB	Das bewertete Schalldämm-Maß wird im bauakustischen Bereich von 100 Hz bis 3150 Hz über 16 Terzmittelfrequenzen bestimmt.
C	Spektrum-Anpassungswert C in dB	Zuordnung von Geräuschquellen: Wohnaktivitäten (Reden, Musik, Radio, TV)

		• Kinderspielen • Schienenverkehr mit mittleren und hohen Geschwindigkeiten • Autoverkehr > 80 km/h • Düsenflugzeuge in kleinem Abstand • Betriebe, die überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm abstrahlen • Bereich 100 Hz bis 3150 Hz
C_{ts}	Spektrum-Anpassungswert C_{ts} (traffic) in dB	Zuordnung von Geräuschquellen: • Städtischer Straßenverkehr • Schienenverkehr mit geringer Geschwindigkeit • Propellerflugzeug und Düsenflugzeug in großem Abstand • Discomusik • Betriebe, die überwiegend tief- und mittelfrequenten Lärm abstrahlen • Bereich 100 Hz bis 3150 Hz
C_{50}	Spektrum-Anpassungswert $C_{50-5000}$ in dB	Abbildung von Wohngeräuschen; Wirksamkeit der Bauteile gegen wohnübliche Geräusche unter Berücksichtigung der tiefen Frequenzen (des erweiterten bauakustischen Bereiches von 50 Hz bis 5000 Hz)
$C_{tr,50}$	Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ in dB	Anpassung der Schalldämmung an Verkehrsgeräusche; Beurteilung der Wirksamkeit eines Bauteils gegen Verkehrslärmgeräusche unter Berücksichtigung der tiefen Frequenzen (des erweiterten bauakustischen Bereiches von 50 Hz bis 5000 Hz).

Auswertung des zusätzlich erweiterten Frequenzbereichs:

Bei den Messungen im XL-Prüfstand wurde der tieffrequente Bereich zusätzlich um weitere 3 Terzen erweitert. Das heißt es wurde im Frequenzbereich von 25 Hz bis 5000 Hz gemessen. Um auch diesen Bereich mithilfe eines Einzahlwertes einordnen zu können wurden die Spektrum-Anpassungswerte C_{25} und $C_{tr,25}$ gebildet. Hierfür wurde die Systematik aus [10] gewählt um die zusätzlich erweiterten Anpassungswerte zu berechnen, da diese laut Norm nicht vorgesehen ist.

3 Ergebnisse & Diskussion

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Fassadenmessungen präsentiert und diskutiert. Dazu werden zum einen die Frequenzverläufe der Schalldämm-Maße (das Schalldämm-Maß ist über der Frequenz aufgetragen) aus den Messserien verwendet. Diese werden in Diagrammen dargestellt. Zum anderen wird das bewertete Schalldämm-Maß R_w (Einzahlwert) in dB mit den Spektrum-Anpassungswerten $C_{50-5000}$ (C_{50}) und $C_{tr,50-5000}$ ($C_{tr,50}$) einbezogen. Diese sind als Summen $R_w + C_{50}$ und $R_w + C_{tr,50}$ in den Legenden der Graphen angegeben.

Mit Ausnahme der Messungen in der Fensteröffnung (Abschnitt 3.1) sind alle dargestellten Messungen im Abschnitt 6 als einzelne Messung in Form von Messprotokollen zu finden. In den Graphen in den Abschnitten 3.2 bis 3.6 werden die jeweiligen relevanten Messnummern mitangeführt, die eine Zuordnung der verglichenen Messkurven zu den Protokollen ermöglichen.

3.1 Luftschallmessungen Fensteröffnung

Folgend werden die Messergebnisse der Parameterstudie anhand der Holzrahmenwand in Fensterlochgröße (vgl. Abschnitt 2.1) gezeigt und diskutiert. Dabei werden Schalldämm-Maße in Abhängigkeit des Terzbandes dargestellt.

- „hinterlüftete Fassade“ und „stehende Luftschicht“

In Abbildung 19 ist auf der linken Seite das Schalldämm-Maß der MDF Beplankung auf der Holzrahmenkonstruktion (schwarz) als Referenz abgebildet. Auf der rechten Seite bildet das Schalldämm-Maß der Holzrahmenwand ohne Fassade die Referenz (schwarz). In Rot ist jeweils derselbe Aufbau mit hinterlüfteter Fassade, und in rot strichliert derselbe Aufbau mit Fassade mit stehender Luftschicht dargestellt. Wenig überraschend sinkt der quantitative Einfluss der Fassade auf das Schalldämm-Maß bei höherer Schalldämmung der Referenz. Insgesamt kann bei stehender Luftschicht das Schalldämm-Maß über einen breiteren Frequenzbereich verbessert werden als mit hinterlüfteter Fassade. Die Verbesserung ist zudem stärker ausgeprägt. Die Schalldämmung durch die Fassade auf einer Holzrahmenwand (rechts) wird ab einer Frequenz von rund 400 Hz verbessert.

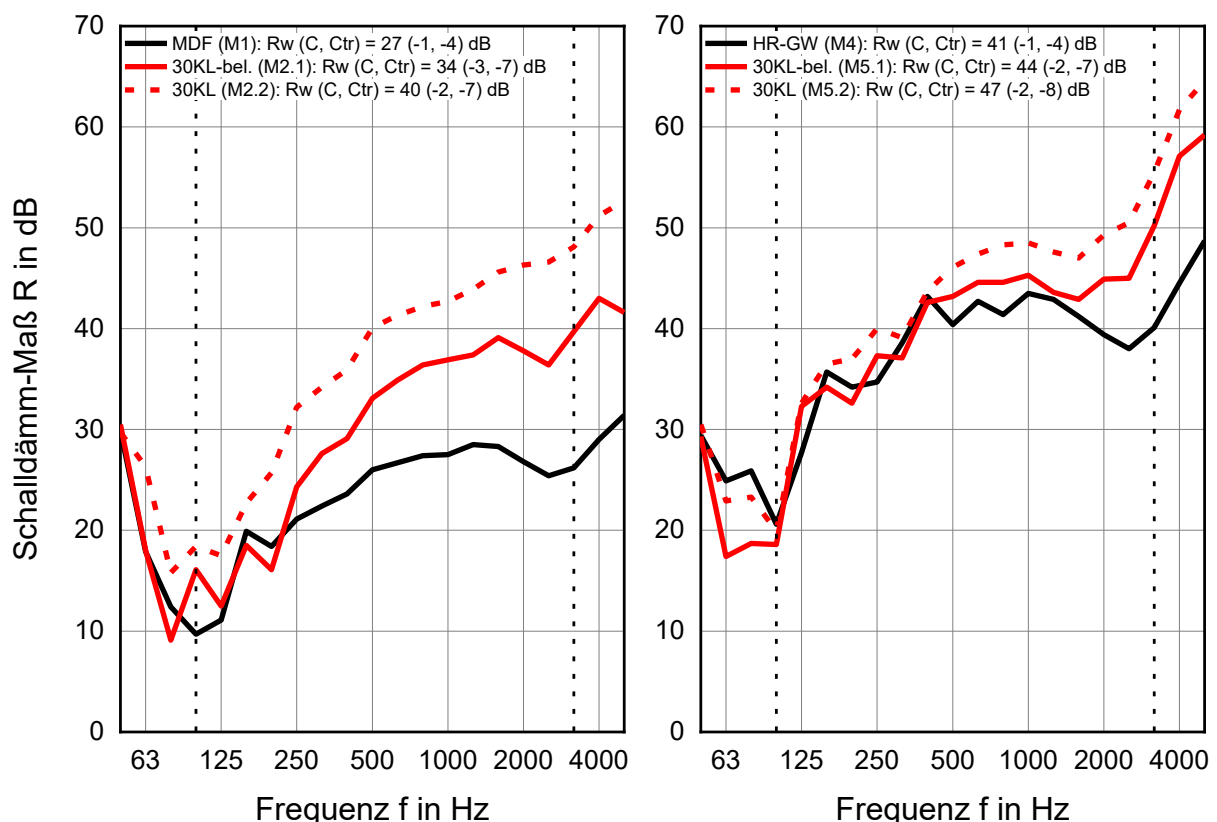


Abbildung 19: Schalldämm-Maß der MDF-Beplankung auf der Holzrahmenkonstruktion (links: schwarz) und der Holzrahmenwand (rechts: schwarz). Rot durchgezogen: Schalldämm-Maß der hinterlüfteten Fassade auf der jeweiligen Unterkonstruktion. Rot strichliert: Fassade mit stehender Luftschicht auf der jeweiligen Unterkonstruktion.

- Konterlattungstiefe

In Abbildung 20 ist der Einfluss der Konterlattungstiefe anhand der Fassaden auf der MDF Beplankung auf der Holzrahmenkonstruktion (links) und auf der Holzrahmenwand (rechts) zu sehen. Dabei sind in schwarz jeweils die Konterlattungstiefen von 30 mm und in rot jeweils die Konterlattungstiefen von 60 mm dargestellt. Strichliert dargestellt sind jene Messungen mit stehender Luftschicht hinter dem Fassadenschirm. Es ist zu sehen, dass durch die Verdoppelung der Konterlattungstiefe ein minimal höheres Schalldämm-Maß erzielt wird, was sich im Einzahlwert R_w jeweils mit 1 dB widerspiegelt. Die Verbesserungen sind zum einen auf geringere Resonanzfrequenzen, zum anderen aber auch durch geringere Körperschallübertragung aufgrund der zusätzlichen Fuge bei Aufdopplung der Konterlattung, zurückzuführen. Weiters ist erkennbar, dass mit stehender Luftschicht höhere Schalldämm-Maße erzielt werden. Dies äußert sich mit steigenden Frequenzen stärker, da kleine Wellenlängen eher für eine Anregung der Grundwand durch die Hinterlüftungsöffnungen sorgen.

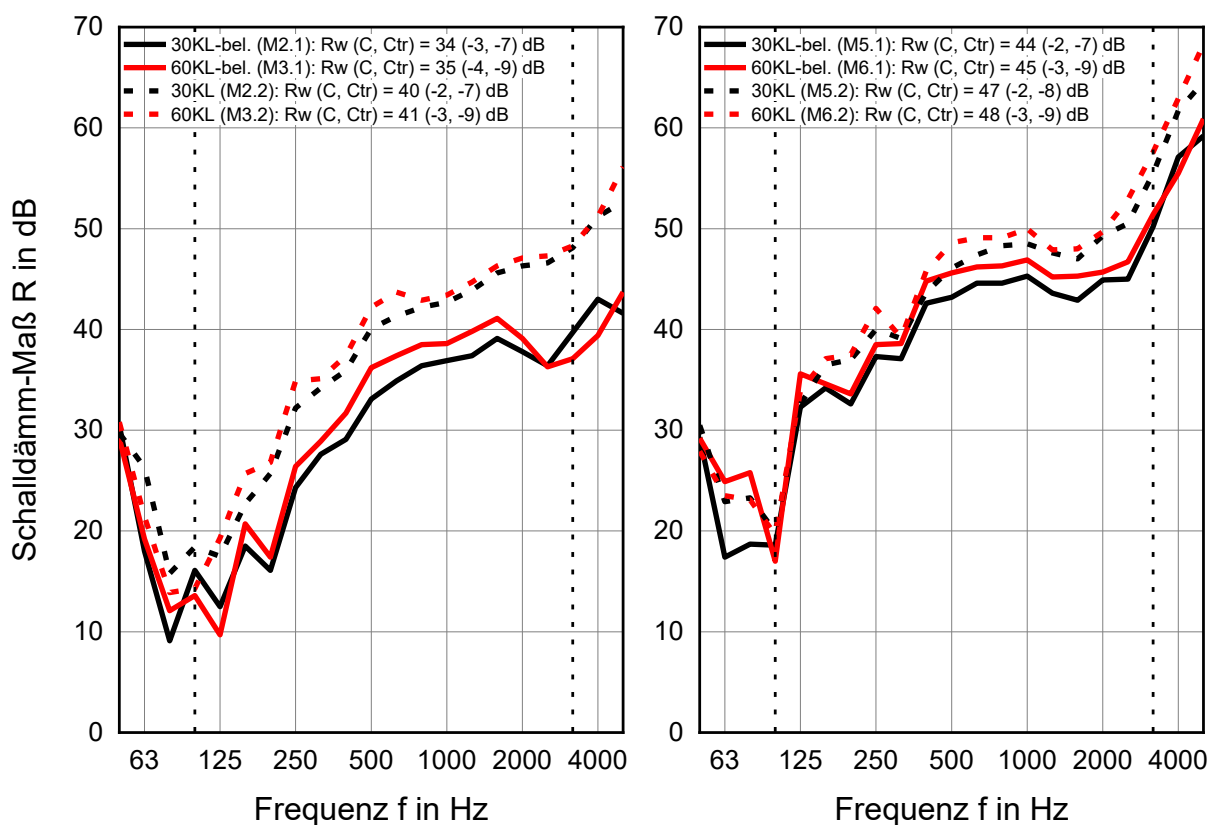


Abbildung 20: Einfluss der Konterlattungstiefe auf das Schalldämm-Maß anhand der Fassade auf der MDF Beplankung auf der Holzrahmenkonstruktion (links) und auf der Holzrahmenwand (rechts). Schwarz Konterlattungstiefe von 30 mm; Rot: Konterlattungstiefe von 60 mm; Durchgezogen: hinterlüftete Fassade; Strichliert: stehende Luftschicht.

- Einfluss der Fugen der Nut-Feder-Verbindungen

In Abbildung 21 ist der Einfluss der Fugen der Nut-Feder-Verbindung der vertikalen Lärchenschalung zu sehen. Dabei wurden alle Fugen mit Klebeband zugeklebt, um mögliche Undichtigkeiten, die das Schalldämm-Maß beeinflussen auszuschließen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei der Konterlattungstiefe von 30 mm (links), als auch 60 mm (rechts) bei stehender Luftschicht kein großer Einfluss gegeben ist. Als Grundelement diente die MDF Beplankung an der Holzrahmenkonstruktion, d.h. hier sollten Einflüsse jeglicher Art besonders gut zum Vorschein kommen. Minimale Verbesserungen der abgeklebten Fassade sind im mittelfrequenten Bereich zu erkennen. Aufgrund des geringen Einflusses wird diese Beobachtung hier nicht weiterverfolgt.

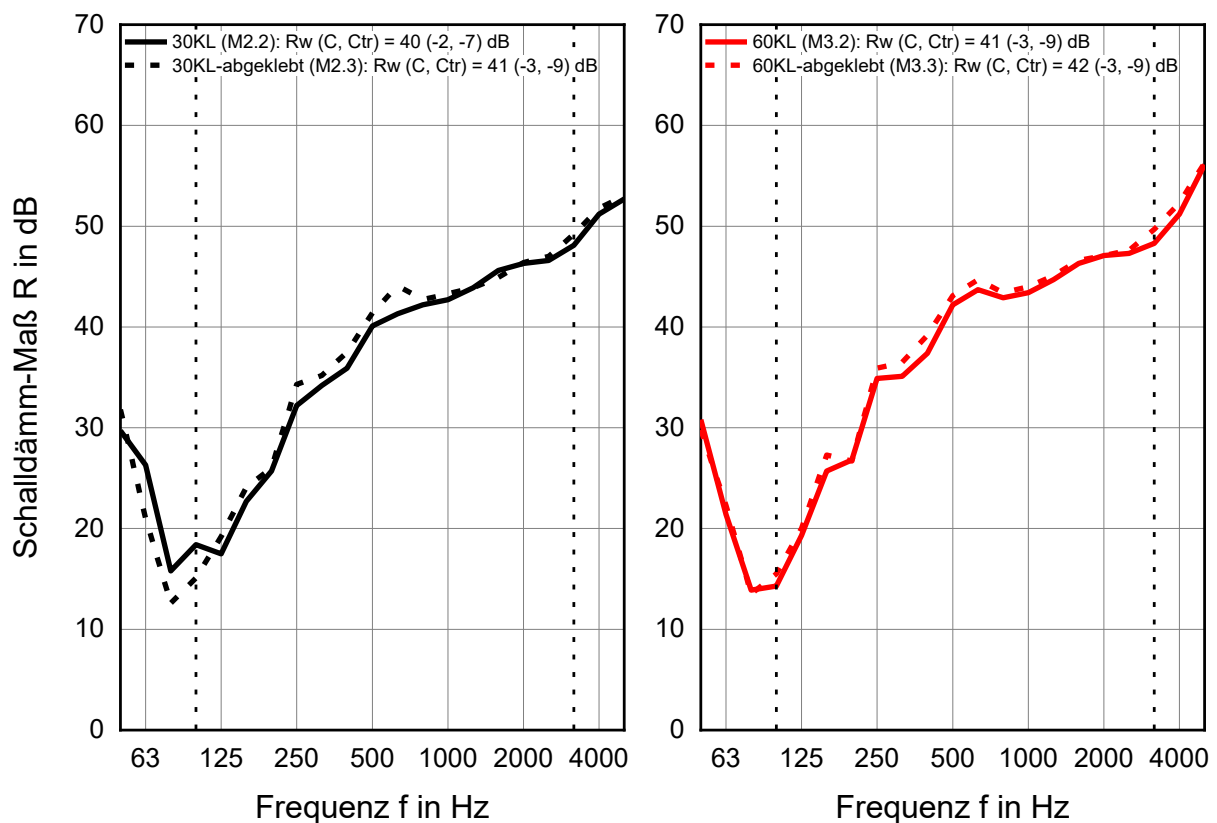


Abbildung 21: Einfluss der Fugen der Nut-Feder-Verbindungen bei 30 mm (links) und 60 mm (rechts) Konterlattungstiefe. Die Fassade war dabei jeweils an der MDF Beplankung an der Holzrahmenkonstruktion befestigt. Die abgeklebten Varianten sind strichliert dargestellt.

- Absorber im Belüftungsspalt

Um die Schalldämmung der Holzfassade zu verbessern, wurde im Luftraum hinter dem Fassadenschirm absorbierendes Material in Form von weichen Dämmplatten angebracht. Der Einfluss solcher Absorber wird in Abbildung 22 dargestellt. Um weiterhin eine Belüftung zu gewährleisten, wurden die 30 mm tiefen Absorber bei einer Konterlattungstiefe von 60 mm eingesetzt. Die Variante ohne Absorber ist in den Abbildungen schwarz dargestellt, wobei links die Varianten mit hinterlüfteter Fassade und rechts jene mit stehender Luftschicht dargestellt sind. Die Absorber wurden dabei einmal direkt innenseitig an den Fassadenschirm zwischen

die Traglattung geklemmt (rot), und einmal an die Außenseite der MDF Beplankung zwischen die Konterlattung geklemmt (grün). Bei einer hinterlüfteten Fassade kann der Absorber, unabhängig von der Position mittel- und hochfrequent das Schalldämm-Maß verbessern. Bei stehender Luftschicht bringt der Absorber keine signifikanten Verbesserungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der geschlossene Hohlraum zu einem zu geringen Anteil ausgedämmt ist und deshalb keinen Einfluss auf die Steifigkeit der Luftschicht hat [Quelle?].

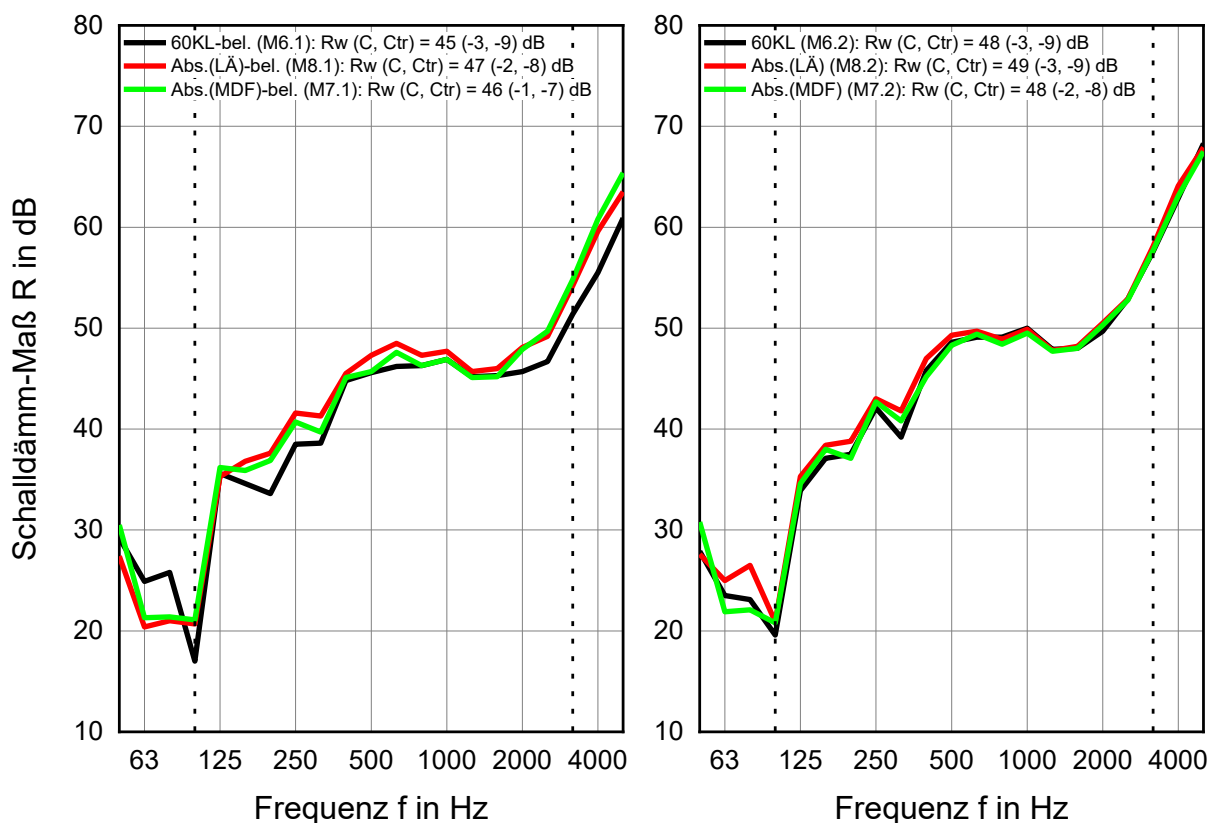


Abbildung 22: Einfluss eines Absorbers im Luftraum hinter dem Fassadenschirm bei hinterlüfteter Fassade (links) und bei stehender Luftschicht (rechts). Schwarz: Referenzvariante mit 60 mm Konterlattungstiefe; Rot: Absorber innenseitig auf Fassadenschirm; Grün: Absorber außenseitig auf MDF Beplankung

- Vollgewindeschrauben

Wie in Abschnitt 2.1 angeführt, kann die Körperschallübertragung durch Vollgewindeschrauben verringert und dadurch das Schalldämm-Maß verbessert werden. Im Zuge der Messungen in der Fensteröffnung wurden die 9 Teilgewindeschrauben, mit welchen das Fassadenelement auf den Konterlatten montiert war, durch Vollgewindeschrauben ersetzt. In einem weiteren Schritt wurden auch die Konterlatten mit Vollgewindeschrauben so befestigt, dass zwischen MDF Beplankung und Konterlattung ein Spalt von 1 mm entstand. Als Kontaktpunkte verblieben dann lediglich die Schraubenschäfte. In Abbildung 23 sind auf der linken Seite alle dazugehörigen Messungen bei hinterlüfteter Fassade dargestellt. Rechts sind wiederum die Messungen bei stehender Luftschicht abgebildet. In schwarz sind die Referenzmessungen mit Teilgewindeschrauben dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der

Einsatz von Vollgewindeschrauben (rot) mittel- bis hochfrequent zu Verbesserungen des Schalldämm-Maßes führt. Diese sind auf die angesprochenen geringeren Anpressdrücke zurückzuführen. Eine weitere Reduktion der Kontaktflächen der Konterlattung (rot) führt hingegen zu keiner weiteren Verbesserung.

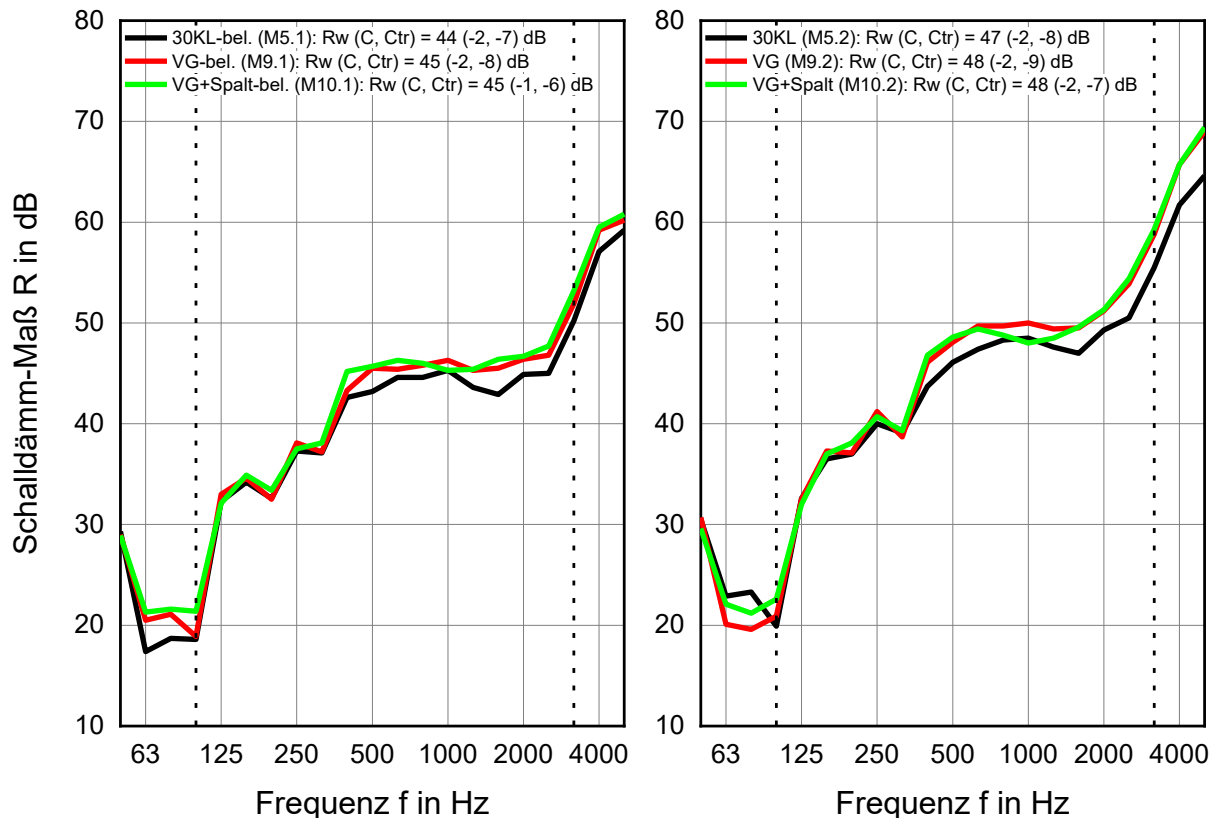


Abbildung 23: Einfluss des Einsatzes von Vollgewindeschrauben statt Teilgewindeschrauben für die Montage der Fassade auf das Schalldämm-Maß. Links: hinterlüftete Fassade; Rechts: stehende Luftschicht; Schwarz: Referenzvariante mit Teilgewindeschrauben; Rot: Vollgewindeschrauben statt Teilgewindeschrauben; Grün: Vollgewindeschrauben und Spalt zwischen Konterlatten und MDF

- Entkopplung

Um die verbliebenen Kontaktpunkte bei Montage der Fassade mittels Vollgewindeschrauben schalltechnisch weiter zu modifizieren, wurde die Konterlattungsebene durch Elastomere ersetzt. Der Einfluss dieser Modifikation im Vergleich zur Standardvariante mit Teilgewindeschrauben ist in Abbildung 24 zu sehen. Auf der linken Seite sind alle dazugehörigen Messungen bei hinterlüfteter Fassade dargestellt. Rechts sind wiederum die Messungen mit stehender Luftschicht abgebildet. Wie beim Einsatz von Vollgewindeschrauben (siehe oben) ist die Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch zusätzliche Elastomere (statt Konterlatten) erkennbar (rot). Die Verbesserung ist dabei aber insgesamt nicht signifikant höher als mit Konterlatten (vgl. Abbildung 23). Eine weitere Verbesserung kann aber durch die Reduktion der Vollgewindeschrauben erzielt werden (grün), wodurch die Fassade nur an den obersten 3 Schrauben befestigt war. Somit ist die Fassade

nur „linear“ eingespannt und kann freier schwingen. Dies sorgt für eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung.

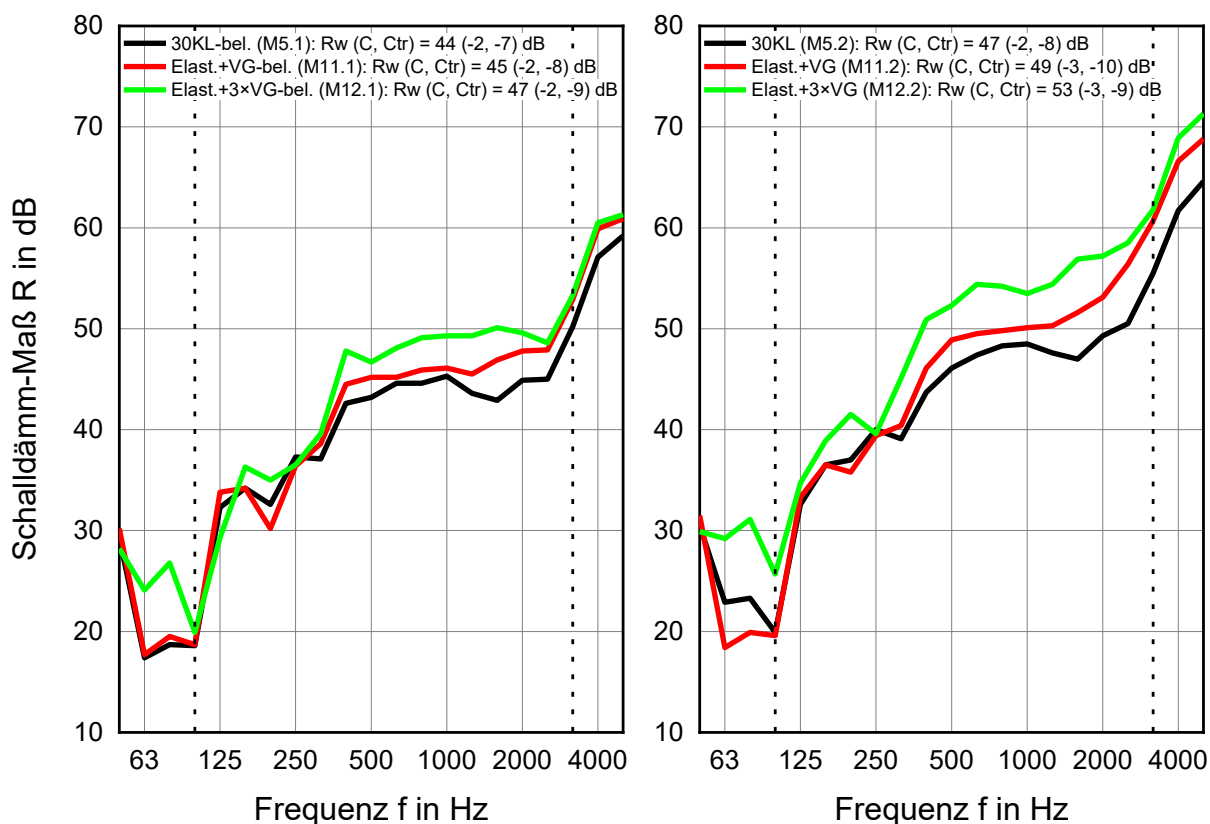


Abbildung 24: Einfluss des Einsatzes von Elastomeren statt der Konterlattung als Abstandhalter auf das Schalldämm-Maß. Die Fassade ist bei den Varianten mit Elastomeren mit Vollgewindeschrauben befestigt, sodass es zu keiner Überpressung der Elastomere kommt. Links: hinterlüftete Fassade; Rechts: stehende Luftschicht; Schwarz: Referenzvariante mit Teilgewindeschrauben und Konterlattung; Rot: Elastomere und Montage mit neun Vollgewindeschrauben; Grün: Elastomere und Montage mit drei Vollgewindeschrauben

Fazit

In der Parameterstudie anhand der Holzrahmenwand in der Fensteröffnung wurde aufgezeigt, wie das Schalldämm-Maß der Nut-Feder-Lärchenfassade (hinterlüftet und stehende Luftschicht) durch Konstruktionsdetails verbessert werden könnte. Dabei wirken die Maßnahmen bei hinterlüfteten Fassaden und Fassaden mit stehender Luftschicht unterschiedlich gut. Für die Messungen an den großen Wänden im Wandrahmen (Prüffläche von 10,8 m²) werden die angeführten Modifikationen nochmals in adaptierter Form untersucht, da alle Maßnahmen Potential zur Verbesserung des Schalldämm-Maßes aufweisen. Eine weitere Untersuchung zu möglichen Fugen(un)dichtigkeiten wurde in diesem Projekt nicht durchgeführt.

Zur Vergleichbarkeit der Holzrahmenwand in Fensterlochgröße zu jener in Normgröße (> 10 m²) sei an dieser Stelle auf Anhang 4 verwiesen, wobei alle Unterschiede auf die

Geometrie zurückzuführen sind. D.h. relative Abschätzungen zur Verbesserung der Schalldämmung durch die genannten Maßnahmen können jedenfalls helfen die Wirksamkeit dieser auch für große Wände abzuschätzen.

3.2 Grundwände und Standardfassaden in Normgröße

In den nächsten Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Messungen der Standardfassaden auf den verschiedenen Grundwänden dargestellt. Zum einen wurden diese in der hinterlüfteten Variante und in einer nicht hinterlüfteten Variante mit stehender Luftschicht untersucht. Verglichen werden diese mit einer herkömmlichen WDVS-Fassade, bei der die Dämmschicht mit EPS ausgeführt wurde. Des Weiteren werden Fassaden aus verschiedenen Holzarten verglichen und Leistenfassaden mit unterschiedlichen Leistenabständen angeführt.

3.2.1 Grundwände mit hinterlüfteten Standardfassaden

In Abbildung 25 sind auf der linken Seite die Betonwand ohne und mit Vergleichsfassade (EPS-WDVS Aufbau) dargestellt. Bei Betrachtung der Einzahlwerte ohne und mit tieffrequenter Anpassung, wird ersichtlich, dass das aufgebrachte WDVS die Schalldämmung der Grundwand verringert. Dies liegt hauptsächlich an der Resonanzfrequenz des Systems, die sich bei 315 Hz zeigt und ein deutlicher Einbruch in der Schalldämmung gegenüber dem Grundbauteil zu beobachten ist. Ab 500 Hz aufwärts kommt die Zweischaligkeit dann zum Tragen und das WDVS kann die Schalldämmung wesentlich verbessern. Auf der rechten Seite des Diagramms ist die Beton-Grundwand mit den beiden Standard-Holzfassaden dargestellt. In beiden Fällen lässt sich durch das Aufbringen der Fassaden inklusive der Dämmebene eine Steigerung der Schalldämmung im bewerteten Bereich erzielen. Das zeigen zum einen die Einzahlwerte, zum anderen auch die Frequenzverläufe der Schalldämm-Maße. Ab 125 Hz liegen die Schalldämm-Maße der beiden Standard-Fassaden über dem der Grundwand. Wobei die RH-Fassade im mittelfrequenten Bereich und die N+F-Fassade im hochfrequenten Bereich eine günstigere Performance zeigt. Bei Betrachtung des tieffrequenten Bereichs unter 100 Hz wird ersichtlich, dass das N+F System einen starken Einbruch aufweist. Dieser Einbruch liegt deutlich unter der Schalldämmung des Grundbauteils. Bei einem Blick auf den tieffrequenten Anpassungswert wird dies auch ersichtlich. Mit 44 dB ist dieser Wert um 7 dB bzw. 8 dB kleiner als die anderen.

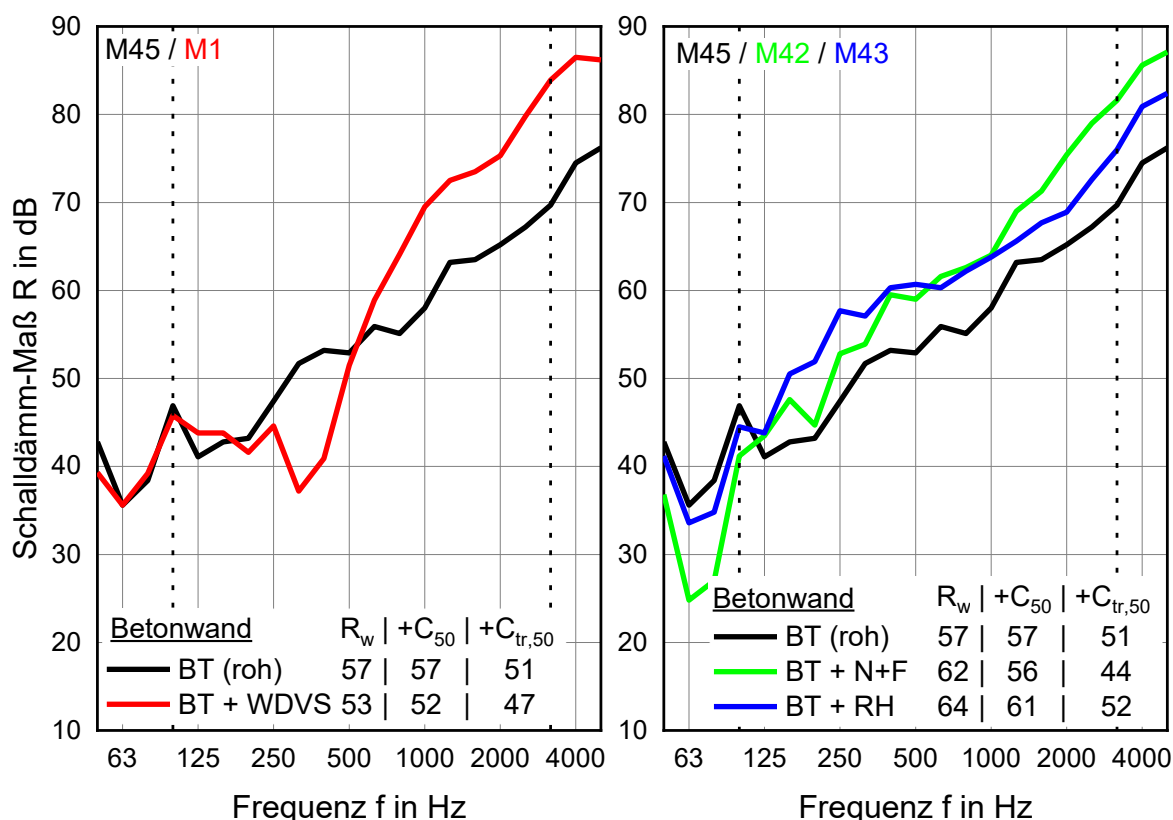


Abbildung 25: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Beton-Grundwand ohne und mit Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Beton-Grundwand ohne und mit Standard-Holzfassaden. Nut und Feder (N+F) und Rhombusleisten (RH)

Im Fall der Holzmassivwand konnte der Einzahlwert mit der EPS-Vergleichsfassade nur um 1 dB (siehe Abbildung 26 linke Seite) gesteigert werden. Die höhere Schalldämmung durch den zweischaligen Aufbau kommt erst ab 500 Hz zu tragen. Unterhalb des 500 Hz Terzbandes liegt die Schalldämmung in einen sehr ähnlichen Bereich. Nur in den Frequenzbändern 63 Hz und 80 Hz kann mit dem WDVS-Aufbau eine günstigere Schalldämmung erreicht werden, was auch bei Berücksichtigung der tieffrequenten Spektrum-Anpassungswerte C_{50} und $C_{tr,50}$ sichtbar ist. Im Gegensatz dazu werden deutlich höhere Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes von 11 dB bzw. 12 dB bei der Holzmassivwand mit den Standard-Holzfassaden erreicht (vgl. Abbildung 26 rechte Seite). Mit der N+F Fassade kann die Verbesserung der Schalldämmung ab 100 Hz und mit der RH-Fassade ab 63 Hz über den gesamten Bereich erzielt werden. Dies spiegelt sich auch in den Einzahlwerten wider. Ähnlich zur BT-Wand zeigt die RH-Fassade im tieffrequenten Bereich und die N+F-Fassade im hochfrequenten Bereich eine günstigere Performance. Im tieffrequenten Bereich erzeugt der N+F Aufbau auch einen Einbruch, der aber nicht unter die Schalldämmung der Grundwand fällt.

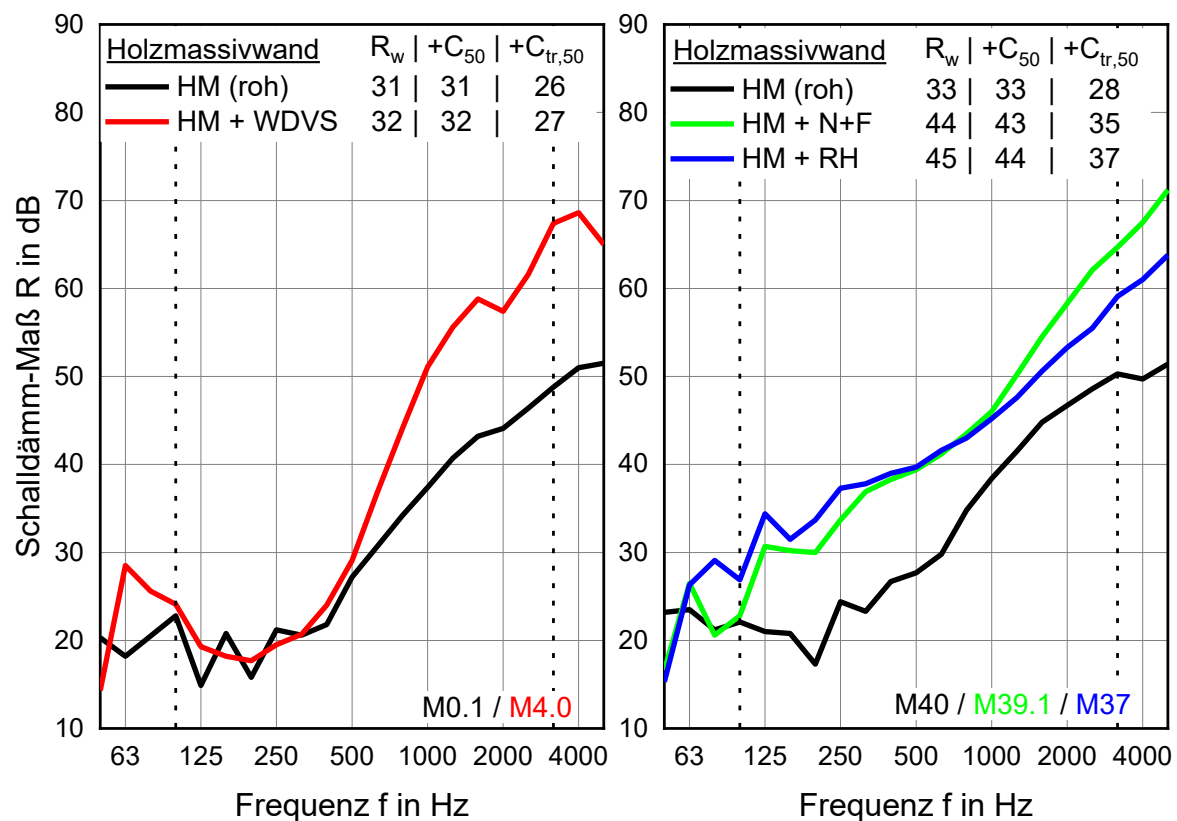


Abbildung 26: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Holzmassiv-Grundwand ohne und mit Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Holzmassiv -Grundwand ohne und mit Standard-Holzfassaden. Nut und Feder (N+F) und Rhombusleisten (RH)

Bei der Holzrahmenwand mit der EPS-Vergleichsfassade ergibt sich keine Änderung des bewerteten Schalldämm-Maßes bezogen auf die Grundwand. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe der beiden Messungen (siehe Abbildung 27 linke Seite) wird ersichtlich, dass mit dem WDVS-Aufbau im oberen tief- und mittelfrequenten Bereich eine ungünstigere Schalldämmung hervorgerufen wird. Eine deutliche Verbesserung aufgrund des zweischaligen Aufbaus kann erst ab 1000 Hz erzielt werden. Im unteren tieffrequenten Bereich zeigt sich noch eine günstigere Schalldämmung, was auch anhand der tieffrequenten Spektrum-Anpassungswerte zu sehen ist. In Abbildung 27 auf der rechten Seite sind die zwei Standardholzfassaden dargestellt. Anhand der Einzahlwerte ist erkennbar, dass der N+F Aufbau einen um 1 dB gesteigerten Wert gegenüber der Grundwand erreicht. Mit der RH-Fassade fällt der Einzahlwert um 3 dB unter jenen der Grundwand. Beim Blick auf die Frequenzverläufe wird durch diese Fassade ein günstigerer Verlauf zwischen 125 Hz und 250 Hz erzielt. Allerdings fällt die Schalldämmung mit der RH-Fassade zwischen 500 Hz und 2500 Hz deutlich unter jene der Grundwand. Bei der N+F Fassade wird eine Verbesserung des Schalldämm-Maßes, über das der Grundwand ab 1250 Hz erreicht. Im Gegensatz zur RH-Fassade kommt es zu einer Reduktion der Schalldämmung im Bereich der Resonanzfrequenz der N+F Fassade bei rund 200 Hz.

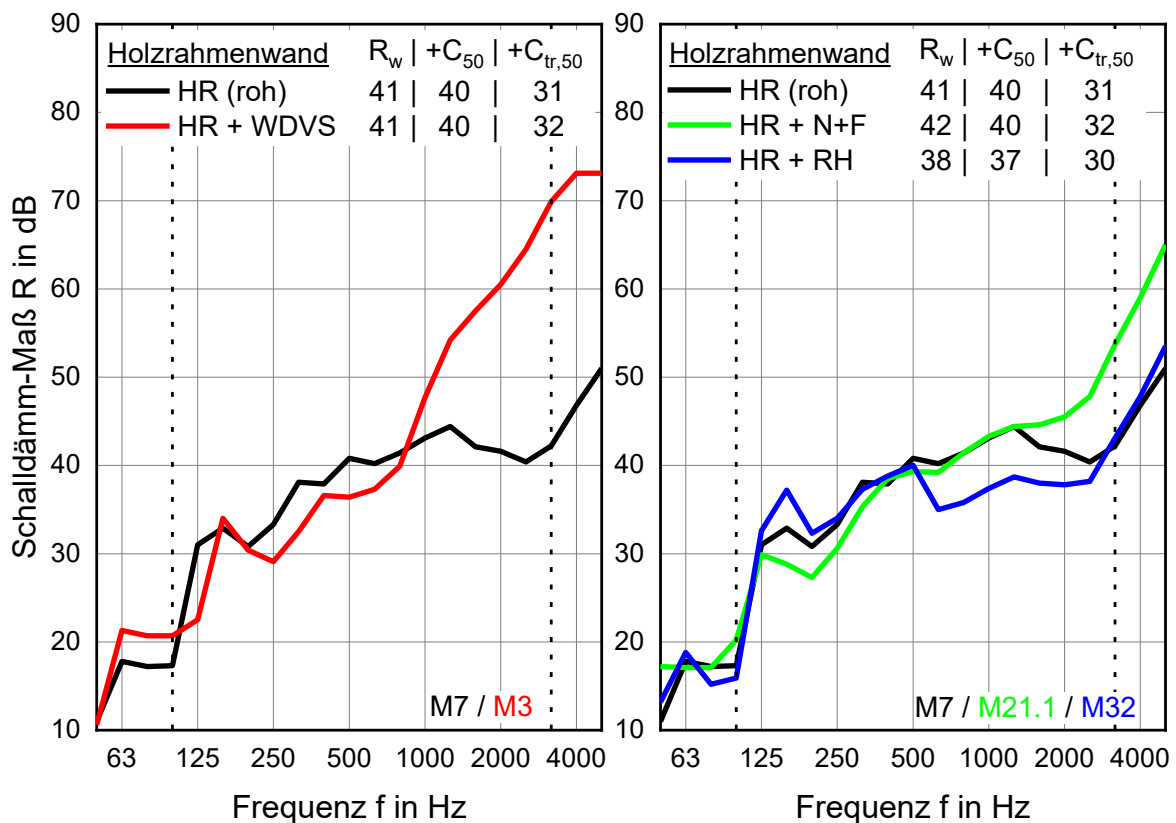


Abbildung 27: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Holzrahmen-Grundwand ohne und mit Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Holzrahmen -Grundwand ohne und mit Standard-Holzfassaden. Nut und Feder (N+F) und Rhombusleisten (RH)

Fazit

Mit dem EPS-WDVS werden die deutlichen Verbesserungen aufgrund der Zweischaligkeit des Wandaufbaus für die Massivwände (Beton und Holzmassiv) ab 630 Hz erreicht. Bei der Holzrahmenwand tritt dieser Effekt erst ab 1000 Hz auf. Dies liegt zum einen daran, dass die dyn. Steifigkeit der 80 mm EPS-Dämmung ($s' = 71 \text{ MN/m}^3$) größer ist als die der 180 mm Dämmung ($s' = 42 \text{ MN/m}^3$). Zum anderen ist die zweite Masse (des Masse-Feder-Masse-Systems) bei der HR viel kleiner ($m'_{2,HR} = 9,0 \text{ kg/m}^2$, Flächenmasse der MDF-Platte) als bei den beiden Massivsystemen ($m'_{2,BT} = 387,3 \text{ kg/m}^2$; $m'_{2,HM} = 49,0 \text{ kg/m}^2$). Diese Faktoren bedingen eine Verschiebung der Resonanz zu höheren Frequenzen und somit kommt der Effekt der Verbesserung deutlich später zum Tragen.

Die Holzfassaden konnten in den meisten Fällen die Schalldämmung der Grundwand im mittel- und hochfrequenten Bereich verbessern. Die deutliche Verbesserung bei den beiden Massivsystemen (BT und HM) liegt an der angebrachten Dämmschicht aus Mineralwolle mit einer Dicke von 180 mm. Mit Verbesserungen im Bereich von 5 dB bis 12 dB weisen die Holzfassaden damit deutlich größere Verbesserungen auf als die untersuchten WDVS. Im Fall der Holzrahmenwand sind die Verbesserungen geringer und liegen bei 1 dB bzw. 4 dB. Bei diesen Aufbauten ist die Fassade direkt auf der Grundwand aufgebracht und kann somit keine

so deutlichen Verbesserungen erzielen. Hier ist noch Verbesserungspotential gegeben, das bei späteren Versuchen abgeschätzt werden soll.

3.2.2 Einfluss der Holzart von Nut-Feder Fassaden

Neben anderen Konstruktionsdetails und Einflüssen wurde auch der Einfluss der Holzart bei N+F Fassaden (Fichte, Lärche, Thermofichte) auf die Schalldämmung untersucht (siehe Tabelle 3). Die Frequenzverläufe dieser Messungen sind in Abbildung 28 eingetragen. Sowohl die Kurven als auch die Einzahlwerte zeigen nur geringe Unterschiede. Somit sind die hier untersuchten Holzarten als akustisch gleichwertig zu betrachten. Dies deckt sich auch mit den mit dem Stand des Wissens bei den VHF. Es ist auch davon auszugehen, dass Fassaden aus Holzarten mit höheren Dichten keine deutlichen Verbesserungen erzielen.

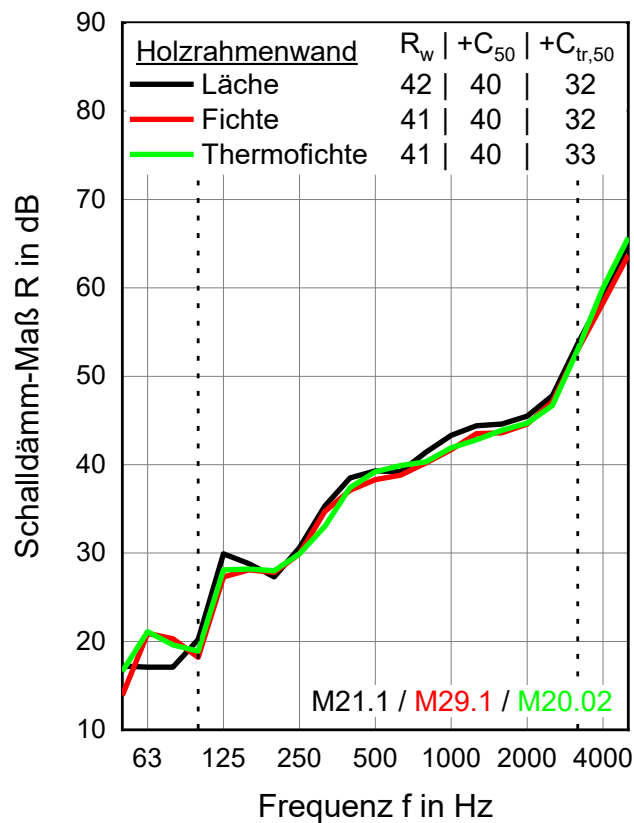


Abbildung 28: Frequenzverläufe von einer geschlossenen Nut und Feder Fassade (N+F Fassade) die mit verschiedenen Holzarten (Lärche, Fichte, Thermofichte) ausgeführt wurde.

3.2.3 Einfluss des Leistenabstandes bei einer offenen Leistenfassade

In diesem Abschnitt wird auf den Einfluss der Fugenbreite zwischen den einzelnen Leisten der Die Rhombusleistenfassade eingegangen. Die gemessenen Schalldämmungen über den Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz sind in Abbildung 29 dargestellt. Bei den Frequenzverläufen zeigen sich Unterschiede im mittel- und hochfrequenten Bereich. Die Fassade mit dem kleinsten Leistenabstand (7 mm) und damit größten flächenbezogenen Masse, zeigt im mittelfrequenten Bereich die geringste Schalldämmung. Dies ändert sich im hochfrequenten Bereich, denn dort erreicht diese Fassade die höchste Schalldämmung. Genau umgedreht ist es für die Fassade mit dem größten Leistenabstand (21 mm). Diese Fassade hat die geringste flächenbezogene Masse. Mittelfrequent zeigt sich die höchste und hochfrequent die niedrigste Schalldämmung. Diese Veränderungen sind aber so gering, dass sie nicht im Einzahlwert ersichtlich sind. Die hier untersuchten Leistenabstände für diesen Fassadentyp sind gemäß dem bewertetem Schalldämm-Maß als gleichwertig zu betrachten.

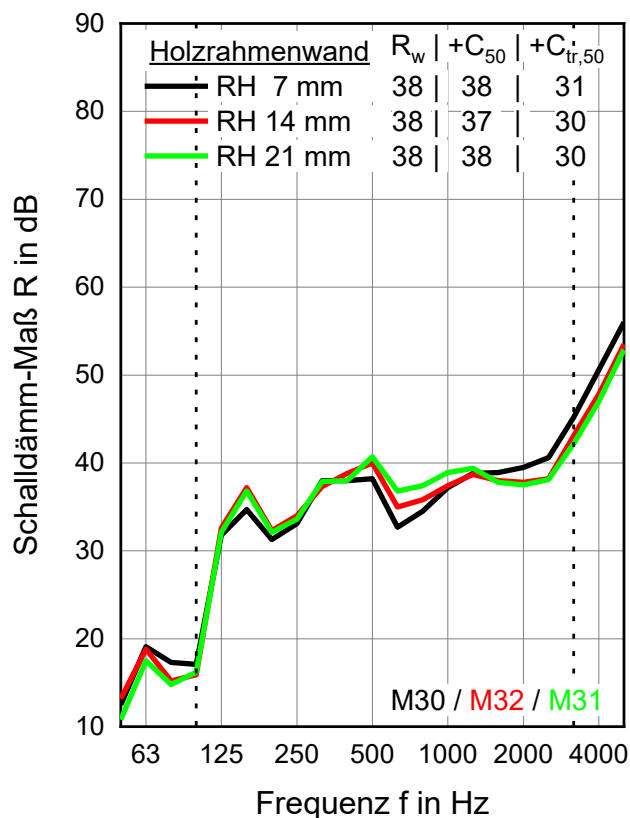


Abbildung 29: Frequenzverläufe von einer offenen Leistenfassade mit verschiedenen Leistenabständen (7 mm, 14 mm, 21 mm).

3.2.4 Grundwände mit nicht hinterlüfteten Standardfassaden

Die Standardfassade wurden auf den Grundwänden zum einen als hinterlüftete Fassade (hl) und nicht hinterlüftete Fassade (also stehender Luftschicht; Abk.: st) gemessen. Dabei ist die tiefe der Luftebene immer gleich. Dies wurde so umgesetzt, dass die Öffnungen, die zur Belüftung dienen mit Fensterkitt (Ramsauer, 830 Leinölkitt) verschlossen wurden. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe der beiden Fassaden (hl) und (st) in Abbildung 30 wird ersichtlich, dass die Variante mit stehender Luftschicht ab 400 Hz eine höhere Schalldämmung aufweist. Im tieffrequenten Bereich ergeben sich keine Veränderungen. Der Einzahlwert der Variante (st) zeigt eine um 2 dB größere Schalldämmung.

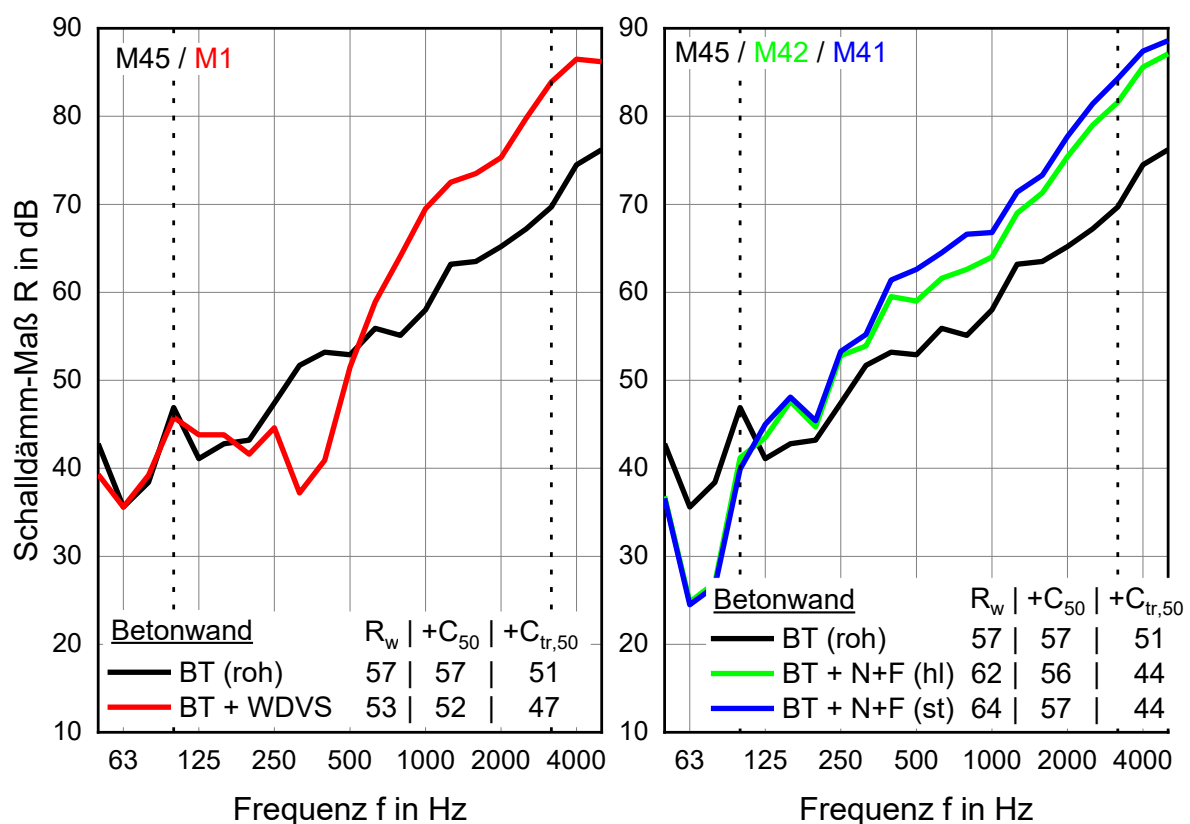


Abbildung 30: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Beton-Grundwand ohne und mit WDVS-Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Beton-Grundwand mit der N+F Standardfassade zum einen mit Hinterlüftung (hl) und zum anderen mit stehender Luftschicht (st).

Bei der Holzmassivwand mit diesen Varianten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Beton-Grundwand. Ab 400 Hz aufwärts ist die Varianten mit stehender Luftschicht günstiger (siehe Abbildung 31). Im tieffrequenten Bereich gibt es Abweichungen in einzelnen Frequenzbändern. In diesem Fall verändert sich der Einzahlwert nur um 1 dB.

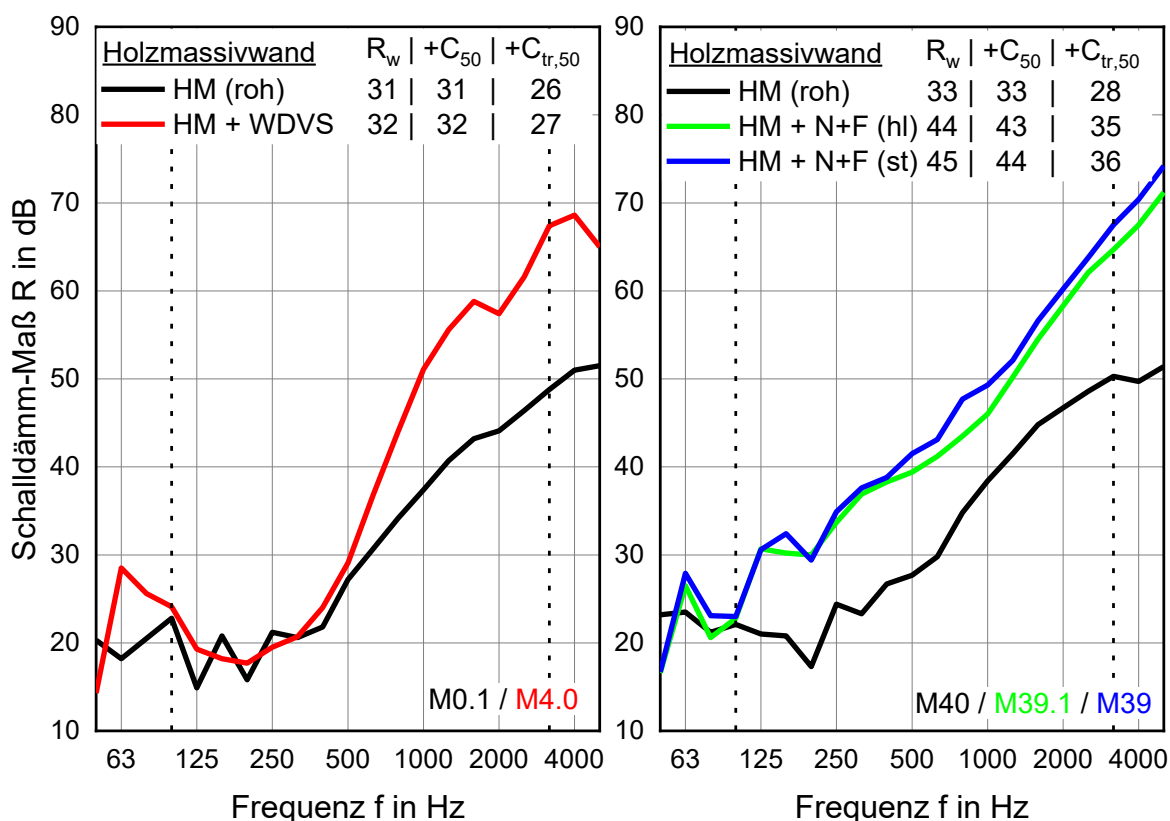


Abbildung 31: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Holzmassiv-Grundwand ohne und mit WDVS-Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Holzmassiv-Grundwand mit der N+F Standardfassade zum einen mit Hinterlüftung (hl) und zum anderen mit stehender Luftschicht (st).

Im Fall der Holzrahmenwand ist der Unterschied in den Frequenzverläufen zwischen der hinterlüfteten Variante und der Variante mit stehender Luftschicht deutlich größer. Ab 160 Hz aufwärts wird schon eine höhere Schalldämmung mit der st-Variante erreicht (siehe Abbildung 32). Das ist deutlich ausgeprägter gegenüber den Verläufen auf den Massiv-Grundwänden. Das kann daran liegen, dass sich hinter diesem Fassadenaufbau keine Dämmebene, wie bei den Massiv-Grundwänden, befindet, die einfallende Schallwellen absorbiert. Der Einzahlwert und der $C_{tr,50}$ -angepasste Einzahlwert zeigen eine Erhöhung um 3 dB und 2 dB.

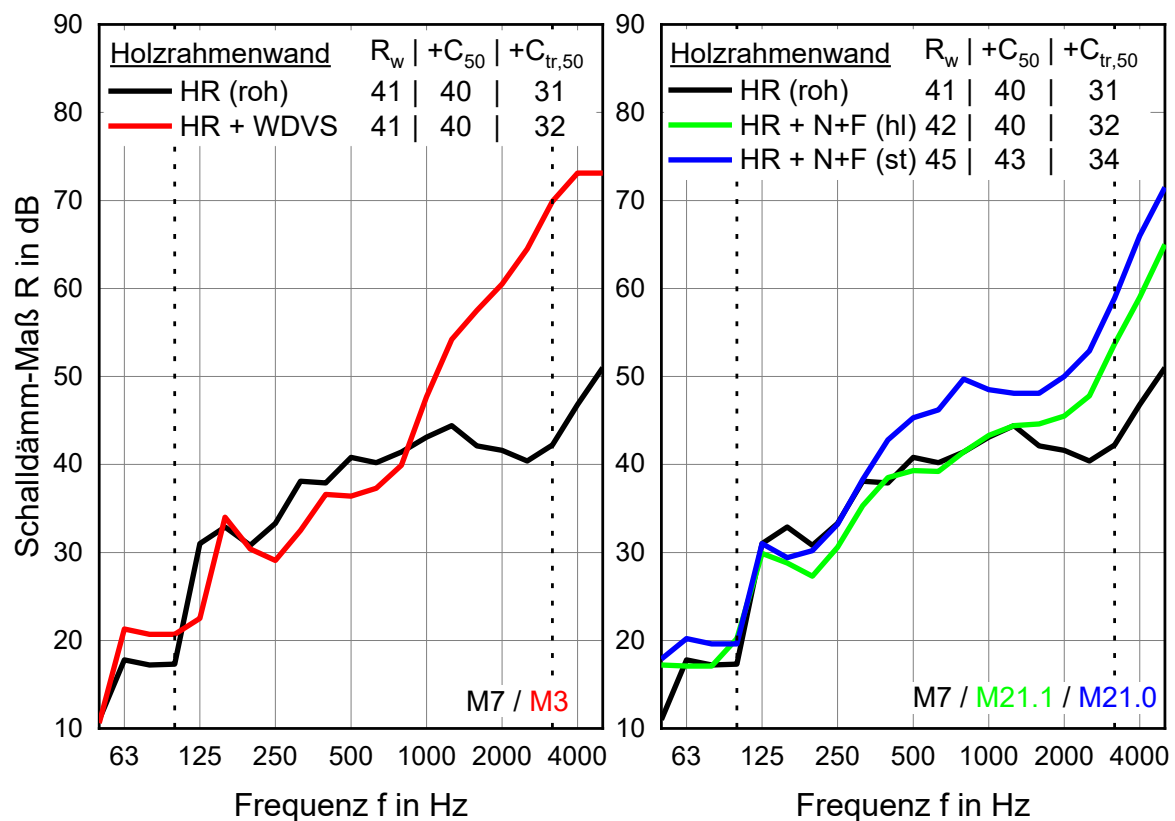


Abbildung 32: Auf der linken Seite ist der Frequenzverlauf der Holzrahmen-Grundwand ohne und mit WDVS-Vergleichsfassade dargestellt. Auf der rechten Seite die Holzrahmen-Grundwand mit der N+F Standardfassade zum einen mit Hinterlüftung (hl) und zum anderen mit stehender Luftschicht (st).

Fazit

Die nicht hinterlüfteten Fassaden zeigen bei allen Grundwänden eine höhere Performance gegenüber den gleichen hinterlüfteten Fassaden. Bei den Massiv-Grundwänden (Beton- und Holzmassivwand) fiel die Verbesserung kleiner aus als bei der Holzrahmenwand. Das die nicht hinterlüftete Fassade bei der Holzrahmenwand die größte Verbesserung bei der Schalldämmung zeigt liegt vermutlich an der nicht vorhandenen Dämmschicht. Diese Dämmebene ist bei den Massiv-Grundwänden essenziell, da diese hinter der Fassade benötigt wird, um eine geeignete Wärmedämmung zu erzielen. Damit liegt die nicht hinterlüftete Fassadenvariante auch immer über der jeweiligen Vergleichsfassade mit WDVS-Aufbau.

3.2.5 Zusammenfassung Standardfassaden

In Abhängigkeit des Aufbaus der Grundwand wirken sich die unterschiedlichen Fassaden-Varianten mehr oder weniger positiv auf die Schalldämmung der Wand aus. Bei Holzmassiv- sowie Betongrundwänden wird das Schalldämm-Maß sowohl durch eine offene Rhombusleisten-Fassade als auch durch die untersuchte Nut-Feder-Lärchenschalung deutlich verbessert. Tieffrequent gehen die Verbesserungen über den überwiegenden Frequenzbereich mit einer Verschlechterung einher. Diese ist vor allem bei der Nut-Feder-Fassade im Bereich von 63 Hz aufgrund der Resonanzfrequenz der Konstruktion sehr deutlich ausgeprägt. Für Holzrahmenwände ergeben sich mit der Nut-Feder-Fassade nur hochfrequente Verbesserungen über 1250 Hz, die nur einen geringen Einfluss auf den Einzahlwert R_w haben. Mit der offenen Rhombusleisten-Fassade wird mit einer Ausnahme keine Verbesserungen in der Schalldämmung messbar, vielmehr kommt es mittelfrequent zu starken Einbußen, die eine Verringerung des Einzahlwertes R_w um 3 dB zur Folge haben.

Im Vergleich zu einem üblichen EPS-WDVS schneidet die hinterlüftete Nut-Feder-Fassade unabhängig von der Grundwand besser ab. Auf der Holzmassiv- und Betongrundwand wird auch mit der Rhombusleisten-Fassade eine bessere Schalldämmung erzielt als mit dem EPS-WDVS, für die Holzrahmengrundwand gilt das hingegen nicht. Der Grund für die höhere Verbesserung des Fassadeschirms auf den massiven Grundwänden (Holzmassiv-, Beton) liegt aus Sicht der Autoren an der dahinterliegenden, bauphysikalisch notwendigen Dämmebene, die einen hohen Absorptionsgrad vorweist.

Die Holzart hat wie erwartet keinen merkbaren Einfluss auf die Schalldämmung der Holzfassaden. Trotz unterschiedlicher Dichten und auch unterschiedlicher Steifigkeiten der untersuchten Holzarten, sind diese zu ähnlich, als, dass sie innerhalb des mehrschaligen Aufbaus einen signifikanten Einfluss aufweisen. Weiters ist der Einfluss des Abstands der Rhombusleisten ebenfalls als geringfügig anzusehen, wobei bei Vergrößerung des Abstands tief- und hochfrequent Verschlechterungen sichtbar wurden, die auf die niedrigere flächenbezogene Masse und die Durchlässigkeit für hohe Frequenzen zurückzuführen sind. Mittelfrequent kommt es sogar zu Verbesserungen der Schalldämmung, die ggf. auf geringere Steifigkeiten der Fassadenelemente mit größerem Leistenabstand zurückzuführen sind.

Während der Unterschied von stehender Luftschicht zu hinterlüfteter Fassade bei einer Nut-Feder-Fassade bei der Holzmassiv- und Betonwand nur eine geringe Verbesserung in der hochfrequenten Luftschalldämmung bringt, wirkt sich die geschlossene Hinterlüftungsöffnung bei der Holzrahmenwand deutlich stärker auf die Schalldämmung aus. Im Einzahlwert R_w kommt es zu einer Verbesserung um 3 dB.

3.3 Unterkonstruktion

In diesem Abschnitt werden verschiedene Einflüsse der Unterkonstruktion auf den Schallschutz dargestellt. Dies ist teilweise eine relevante Größe, da die Unterkonstruktion die Verbindung zwischen Fassade und der jeweiligen Grundwand darstellt.

3.3.1 Einfluss der Ausführung der Lattungsebene

Die Unterkonstruktion von Holzfassaden hängt zwangsläufig mit dem Fassadenaufbau an sich zusammen. Im Allgemeinen wird bei vertikalen Schalungen eine Kreuzlattung (Trag- und Konterlattung) und bei horizontalen Schalungen eine Traglattung verwendet. Somit wurde eine vertikale N+F-Fassade mit Kreuzlattung, eine horizontale N+F-Fassade mit reiner Traglattung und eine horizontale N+F-Fassade mit Kreuzlattung (Traglattung vertikal und Konterlattung horizontal) gemessen (siehe Abbildung 33).

Im Fall der Holzrahmenwand zeigen sich im tieffrequenten Bereich deutliche Unterschiede von 50 Hz bis 100 Hz. Die horizontale N+F-Fassade mit der reinen Traglattung zeigt hier die günstigste Performance. Im mittelfrequenten Bereich zeigen die N+F-Fassaden mit Kreuzlattung ab 315 Hz die höhere Schalldämmung. Wobei die horizontale Ausrichtung der Fassade mit der Kreuzlattung die günstigste Schalldämmung aufweist. Die Variante mit der horizontalen Schalung und nur Traglattung zeigt in diesem Bereich die ungünstigste Schalldämmung, im Gegensatz zum tieffrequenten Bereich. Das zeigt sich dann auch in den R_w -Werten, der für die Fassaden mit Kreuzlattung 2 dB größer ist als die mit der reinen Traglattung. Die Verschlechterung durch die Kreuzlattung im Frequenzbereich < 100 Hz kann jedoch bei sehr tieffrequenten Geräuschen wie durch LKW-Verkehr o.ä. zu Problemen führen und muss bei der Planung bedacht werden.

Auf der Holzmassivwand erreicht die Fassade mit Kreuzlattung fast über den gesamten Bereich eine höhere Schalldämmung. Daraus ergibt sich dann auch ein um 4 dB höherer R_w -Wert. Mit der vertikalen Nut und Feder Fassade auf einer Kreuzlattung konnte bei beiden Grundwänden eine höhere Schalldämmung gegenüber der horizontalen Fassade auf der Traglattung erreicht werden.

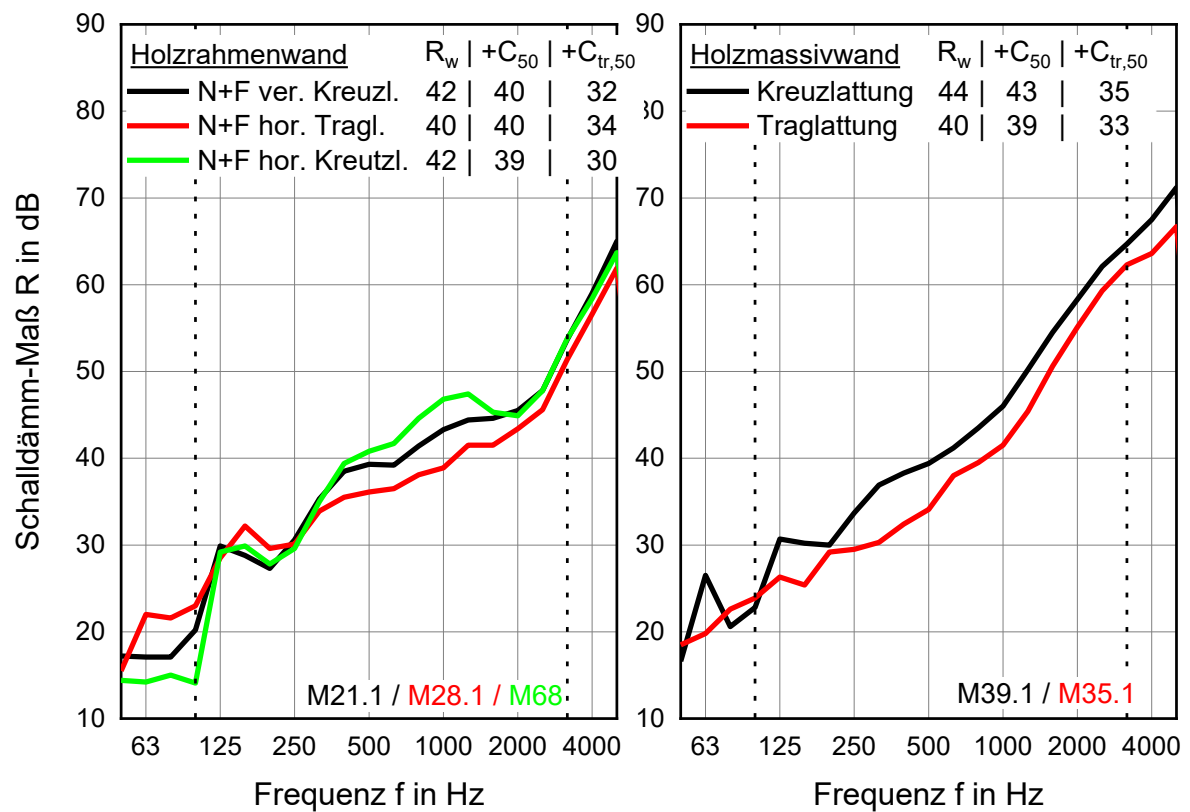


Abbildung 33: Frequenzverläufe von einer vertikalen Nut und Feder Fassade mit Kreuzlattung und einer horizontalen Nut und Feder Fassade mit Traglattung auf einer Holzrahmen- und Holzmassivwand.

3.3.2 Einfluss der Lattungstiefe

Um den Einfluss der Konter- bzw. Traglattungstiefe abschätzen zu können wurden die nachfolgend beschriebenen Messungen durchgeführt. Bei der N+F-Standardfassade wurde die Konterlattung mit einer Dicke von 30 mm, 60 mm und 120 mm unter der Traglattung variiert. Damit wurde die Belüftungsebene hinter der Fassade um 30 mm bzw. 90 mm erhöht. Diese Aufbauten wurden zum einen in der hinterlüfteten Variante (siehe Abbildung 34, linke Seite) und zum anderen mit stehender Luftschicht (siehe Abbildung 34, rechte Seite) gemessen. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe der Variante (hl) sieht man, dass die Kurven sehr ähnlich sind. Es ergeben sich Unterschiede im tieffrequenten Bereich von 100 Hz bis 200 Hz und im Bereich von 800 Hz bis 2500 Hz. Wobei die Konterlattung mit der Tiefe von 120 mm in vielen Bereichen die höchste Schalldämmung zeigt. Die Abweichungen sind aber so gering, dass sie sich nicht bzw. mit einer geringfügigen Verbesserung von 1 dB im Einzahlwert zeigen. Ähnlich ist es bei der Variante (st) bei Variation der Konterlattungstiefe. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zu (hl) ausgeprägter sind und die einzelnen Aufbauten grundsätzlich eine höhere Schalldämmung haben, allerdings ist in den Einzahlwerten keine Verbesserung aufgrund der Konterlattungstiefe erkennbar. Mit der Variante (st) kann die Schalldämmung im mittel- und hochfrequenten Bereich deutlich verbessert werden. Im Einzahlwert ergeben sich damit um 2 dB bzw. 3 dB höhere Werte.

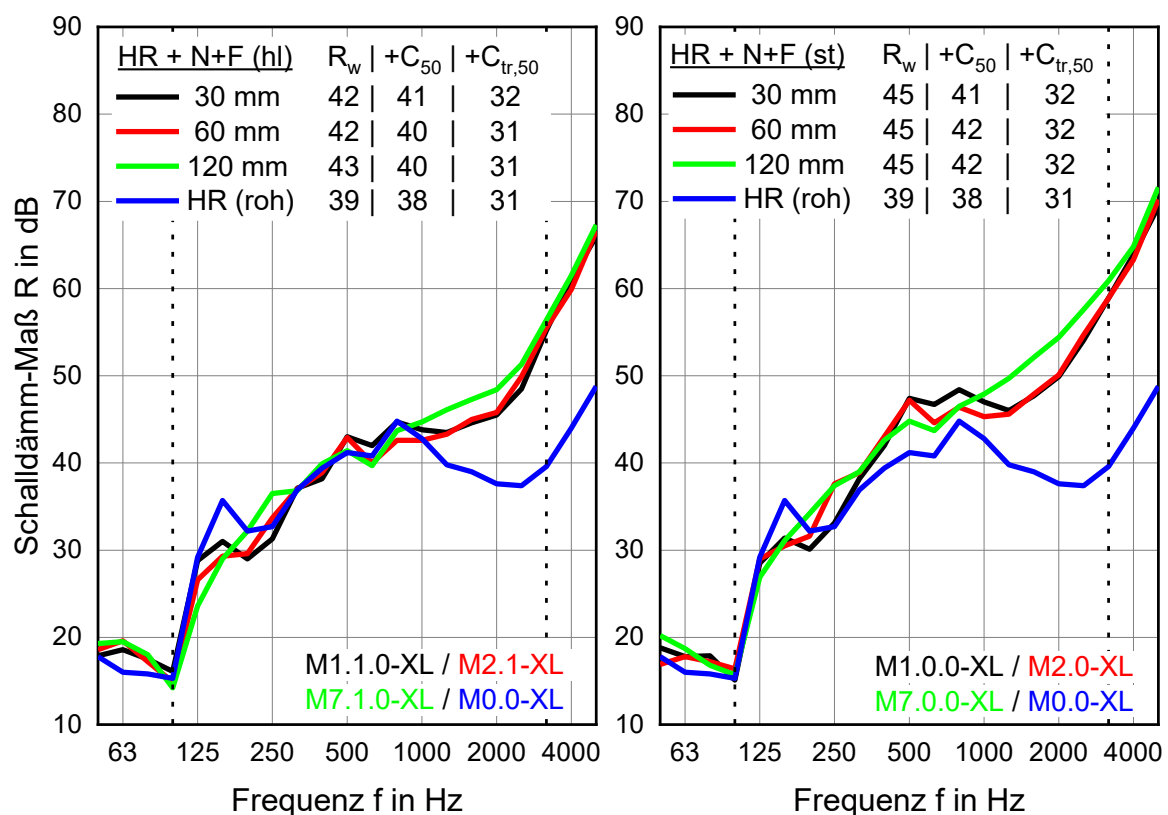


Abbildung 34: Frequenzverläufe von einer vertikalen Nut und Feder Fassade mit Kreuzlattung bei der die Tiefe der Konterlattung verändert wurde (30 mm, 60 mm und 120 mm). Auf der linken Seite in der Variante hinterlüftet und auf der rechten Seite ohne Hinterlüftung (mit stehender Luftschicht).

Die Traglattung bei der RH-Fassade wurde auch mit den Tiefen von 30 mm, 60 mm und 120 mm untersucht. In diesem Fall stellt die Traglattung gleichzeitig die Hinterlüftungsebene dar. Wie zuvor weist auch hier die Traglattung mit der Tiefe 120 mm in vielen Bereichen die beste Performance auf, wobei die Schalldämmung der Grundwand im Bereich von 315 Hz bis 1000 Hz trotzdem noch unterschritten wird. Bei der Betrachtung des bewerteten Schalldämm-Maßes zeigt sich bezogen auf die Grundwand eine Verringerung um 1 dB mit der 30 mm Lattung und eine Verbesserung um 1 dB mit der 120 mm Lattung. Währenddessen ist der Einzahlwert gleichbleibend bei einer Traglattung mit 60 mm.

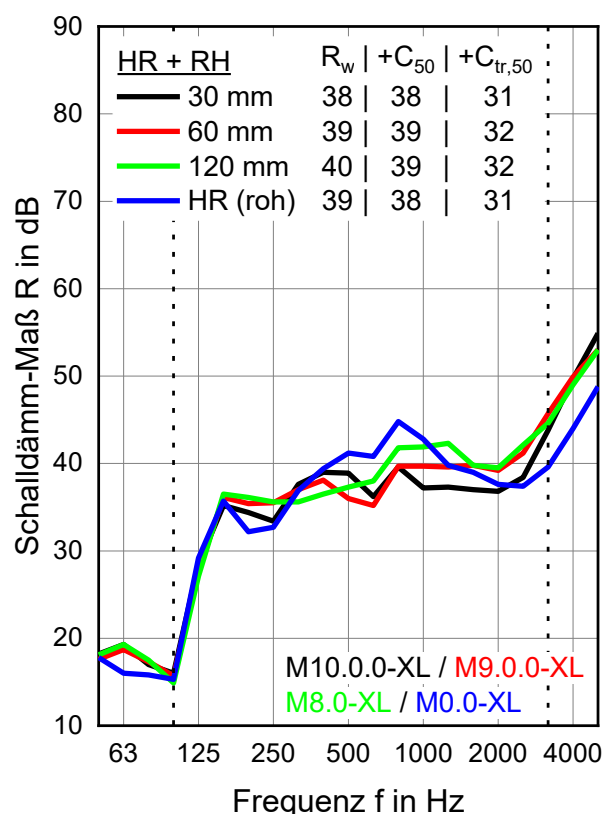


Abbildung 35: Frequenzverläufe von einer Rhombusleisten Fassade mit Traglattung bei der die Tiefe der Traglattung verändert wurde (30 mm, 60 mm und 120 mm).

Fazit

Prinzipiell ergeben sich schalltechnisch keine Nachteile bei Vergrößerung der Belüftungsebene, egal ob mit Konter- oder Traglattung, ergeben. Im Fall der hinterlüfteten Fassade bzw. der offenen RH-Fassade konnten durch die Vergrößerung dieser Ebene leichte Verbesserungen beim bewerteten Schalldämm-Maß erzielt werden.

3.3.3 Einfluss von Konsolen zur Befestigung der Konter- bzw. Traglattung

Bei einer Lattungstiefe von 120 mm wurden zum Vergleich Konsolen (Hilti, Konsole MFT-S2S UI 100 M) benutzt, um diese Tiefe einzustellen. Diese Konsolen hatten eine Tiefe von 95 mm bei Verwendung ohne Polypropylen Unterlage. Die Alu-Konsolen wurden jeweils mit einer Schraube im mittleren Loch der Konsole auf der Grundwand befestigt. Als Konter- bzw. Traglatten wurden keine Aluschienen, sondern Holzlatten mit dem Querschnitt von (60×60) mm² verwendet. Die Tiefe von 120 mm konnte eingestellt werden, indem die Lattung ca. 25 mm über die Konsolen hinausragte. Auf der Konterlattung wurde dann die jeweilige Holzschalung (inkl. Traglattung) angebracht. Des Weiteren wurde die Anzahl der verwendeten Alu-Konsolen je Konterlatte von fünf auf drei reduziert, um zu sehen ob sich weniger Befestigungspunkte positiv auf die Schalldämmung auswirken. Die sich ergebenden Schalldämm-Maße sind in Abbildung 36 dargestellt. Auf der linken Seite wird die vertikale Nut und Feder Schalung mit einer Konterlattung ohne Konsolen den Varianten mit Konsolen gegenübergestellt. Die Verläufe der Schalldämmung sind gut vergleichbar. Im tieffrequenten Bereich fällt die Konterlattung mit Konsolen teilweise etwas günstiger aus. Im mittelfrequenten Bereich ist die reine Konterlattung von 160 Hz bis 500 Hz günstiger genauso wie im hochfrequenten Bereich. Ein Unterschied zwischen der Anzahl der Alu-Konsolen 3 und 5 Stück ist nur in den tieffrequenten Frequenzbändern ersichtlich. Beim Blick auf die Einzahlwerte mit und ohne Anpassungswerte ergaben sich Differenzen von 1 dB bis 2 dB.

Auf der rechten Seite von Abbildung 36 ist die Schalldämmung dieses Systems mit der offenen Rhombusleisten-Schalung dargestellt. Ähnlich wie bei der Nut und Feder Fassade ergeben sich nur geringe Unterschiede zur Variante ohne Konsolen. Der Einzahlwert ohne und mit Anpassungswerten differiert um maximal 1 dB. Der Frequenzverlauf mit den Konsolen unterscheidet sich auch nur in wenigen Bändern von der reinen Konterlatten-Variante.

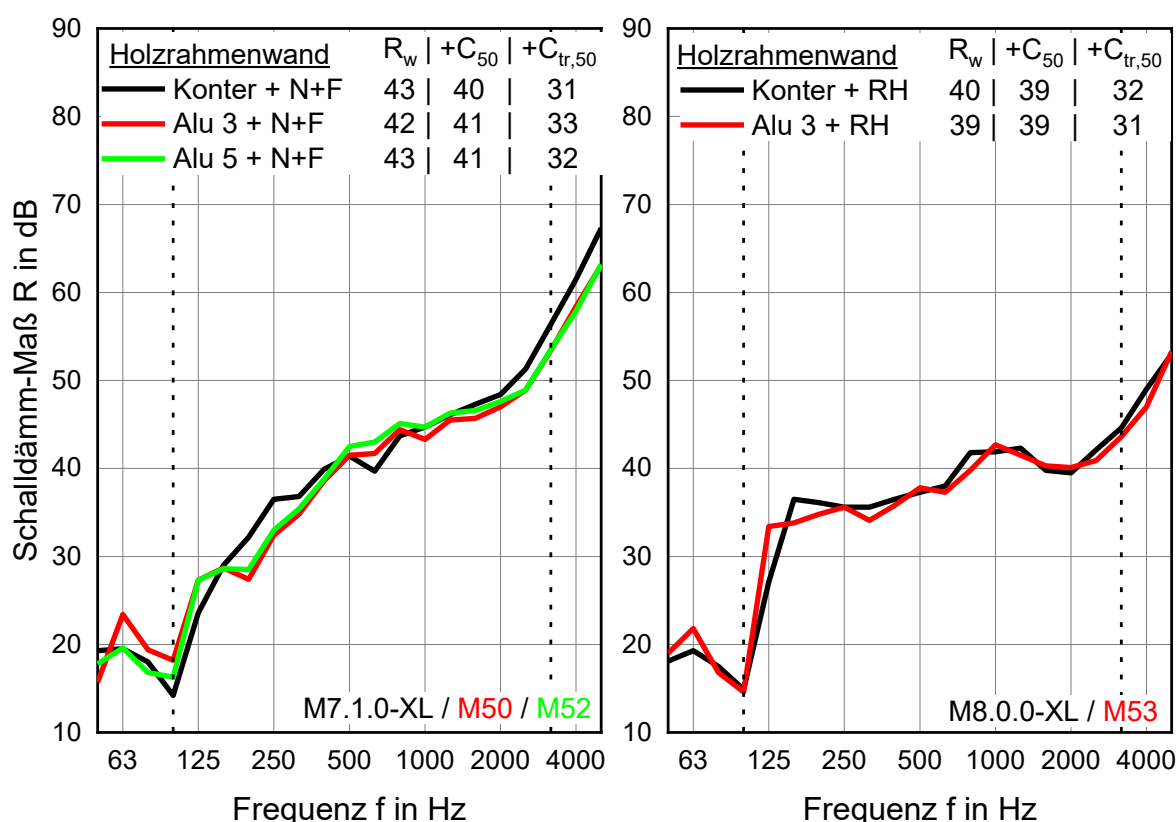


Abbildung 36: Linke Seite: Frequenzverläufe von einer vertikalen Nut und Feder Fassade mit Kreuzlattung bei der die Konterlattung zum einen direkt und zum anderen mit Konsolen (Alu 3 und Alu 5) auf der Grundwand befestigt wurden. Bei Alu 3 wurden drei und bei Alu 5 fünf Konsolen zum Befestigen der Konterlattung verwendet. Auf der rechten Seite wurde die Rhombusleisten-Fassade zum Vergleich der beiden Varianten (reine Konterlattung und drei Konsolen mit Konterlattung verwendet). Die Konterlattungstiefe war bei allen Aufbauten 120 mm.

3.3.4 Zusammenfassung Unterkonstruktion

Eine vertikale Fassade mit Kreuzlattung zeigte mittel und hochfrequent eine höhere Schalldämmung gegenüber einer horizontalen Fassade mit einfacher Traglattung. Damit waren je nach verwendeter Grundwand größere Verbesserungen möglich. Bei der Holzrahmenwand wurde die tieffrequente Schalldämmung durch die Kreuzlattung jedoch teils deutlich geduziert. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden. Bei der Holzmassivwand betrug die Verbesserung im bewerteten Schalldämm-Maß 4 dB. Mit der Anpassung C_{50} und $C_{tr,50}$ liegt die Verbesserung bei 4 dB und 2 dB.

Geringe Verbesserungen konnten auch erreicht werden, wenn die Tiefe der Konterlattung vergrößert wurde. Diese zeigen sich vorrangig in den Frequenzverläufen der Schalldämm-Maße. In den Einzahlwerten sind diese nicht ersichtlich. Die günstigsten Schalldämmungen in den einzelnen Frequenzbändern wurden dabei mit der größten Konterlattungstiefe von 120 mm bei den beiden Fassadensystemen (Nut und Feder und Rhombusleisten) erzielt.

Die Montage der Konter- oder Traglatten in Alu-Konsolen, die auf einer Wand befestigt werden, zeigt keinen Vorteil gegenüber der üblichen direkten Montage der Lattung. Selbst beim Verringern der Anzahl der Konsolen von fünf auf drei ergaben sich keine Vorteile in der Schalldämmung.

3.4 Verschraubung der Fassaden

Auch die Verschraubung der Fassaden hat einen Einfluss auf die Schalldämmung der Bauteile. Wie groß dieser Einfluss ist, zeigen die Ergebnisse in den folgenden Abschnitten.

3.4.1 Befestigung der Fassade mit Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben

Es wurde auch untersucht welchen Einfluss die zur Befestigung verwendeten Schrauben haben. Dazu wurden die Standardfassaden zum einen mit Teilgewindeschrauben mit Schaft und Vollgewindeschrauben auf den Grundwänden befestigt. In Abbildung 37 ist das Beispiel mit der Standard RH-Fassade auf der Holzrahmen- und der Holzmassivwand angeführt. In der linken Grafik war die Fassade einmal mit Teil- und einmal mit Vollgewindeschrauben auf einer Holzrahmenwand befestigt. Bei Betrachtung der beiden Frequenzverläufe zeigen sich nur geringe Unterschiede im Bereich von 500 Hz bis 1250 Hz. Dort zeigt die Variante mit den Vollgewindeschrauben die günstigere Schalldämmung. Dies wird auch im bewerteten Schalldämm-Maß ersichtlich, dass um 1 dB größer ausfällt. Ähnlich ist dies auch in der Grafik auf der rechten Seite. Dort war die RH-Fassade auf der Holzmassivwand angebracht. Ab 400 Hz aufwärts tritt hier eine höhere Schalldämmung mit den Vollgewindeschrauben auf. Im Einzahlwert wird dies auch mit 1 dB Verbesserung ersichtlich. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei Verwendung von Vollgewindeschrauben zur Befestigung der untersuchten Holzfassaden keine Nachteile entstanden. Bei einzelnen Fassaden waren sogar leichte Verbesserungen gegenüber den Teilgewindeschrauben mit Schaft ersichtlich.

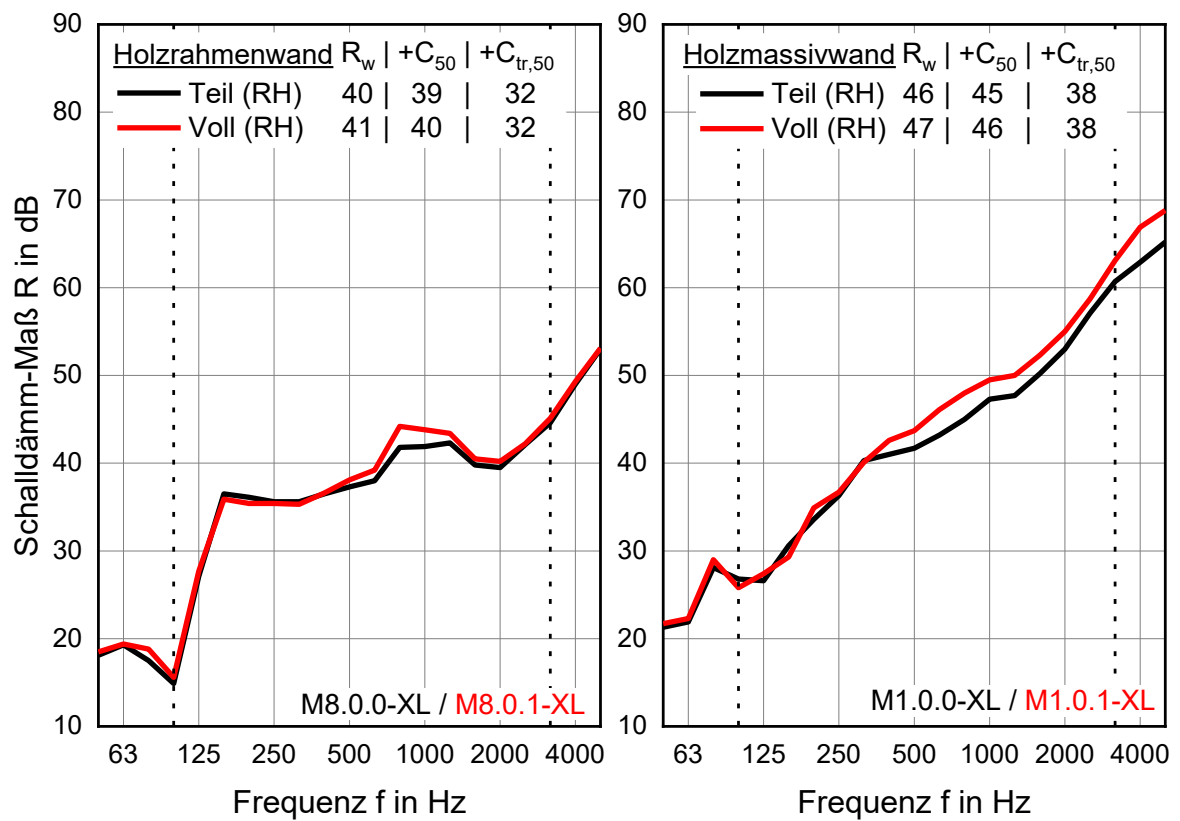


Abbildung 37: Frequenzverläufe der Schalldämmung einer horizontalen Rhombusleisten-Fassade mit Traglattung auf einer Holzrahmen- (links) und Holzmassivwand (rechts), ausgeführt mit Teil- und Vollgewindeschrauben.

3.4.2 Schraubenlänge zur Befestigung der Fassaden

Bei der Kreuzlattung wird die Traglattung auf die Konterlattung geschraubt. Wenn die Tiefe der Konterlattung groß genug ist, können die Schrauben so gewählt werden, dass sie nicht bis in die Grundwand reichen. Bei einer Konterlattungstiefe von 30 mm wurde dies getestet. In Abbildung 38 sind die beiden Messungen gegenübergestellt. Zum einen wurden die Schrauben zur Befestigung der Traglattung so gewählt, dass sie nur in der Konterlattung verankert waren. Dem gegenüber steht der gleiche Aufbau mit dem Unterschied, dass die Schrauben für die Traglattung bis in die Grundwand reichten. Bei Betrachtung der Einzahlwerte ist ein Unterschied von 2 dB erreichbar. An den Frequenzverläufen ist ersichtlich, dass die Verbesserung im mittelfrequenten Bereich liegt.

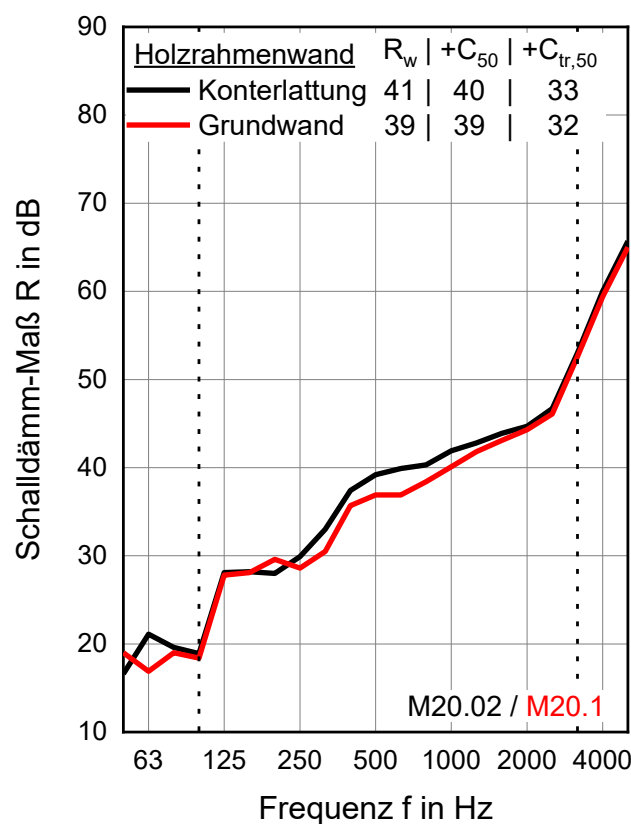


Abbildung 38: Frequenzverläufe von einer Nut und Feder Fassade mit Kreuzlattung auf einer Holzrahmenwand ausgeführt mit unterschiedlich langen Schrauben. Diese reichten einmal nur bis in die Konterlattung und zum anderen bis in die MDF-Platte der Grundwand.

3.4.3 Zusammenfassung Verschraubung

Die Untersuchungen zur Verschraubung der Fassaden haben gezeigt, dass sowohl die Art der Verschraubung als auch die Reichweite der Verbindungsmittel ins Bauteil hinein von Relevanz sind. Diese Ausführungsdetails sind jedenfalls in der Schalldämmung sichtbar. Das

Verwenden von Vollgewindeschrauben sorgt für einen geringeren Anpressdruck verglichen mit Teilgewindeschrauben, wodurch die Schallübertragung der Fassade über die Lattung aufs Grundbauteil gedämmt wird. Der Einzahlwert R_w steigt dabei um rund 1 dB an.

Neben dem Anpressdruck der Unterkonstruktion hat auch die Länge der Körperschallbrücken in Form der Verschraubung einen großen Einfluss auf das Schalldämm-Maß. Dies wurde anhand einer Holzrahmenwand mit Nut-Feder-Fassade anschaulich gezeigt, wobei es besonders mittelfrequent zu einer Verbesserung der Schalldämmung kommt, wenn die Schrauben zur Montage der Traglattung nicht in die Grundwand, sondern nur in die Konterlattung ragen. Im Einzahlwert kann dieses Ausführungsdetail das bewertete Schalldämm-Maß um bis zu 2 dB verschlechtern bzw. verbessern.

3.5 Optimierungsansätze

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 1.3 aufgezählten Optimierungsansätze vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Die umgesetzten Maßnahmen wurden an verschiedenen vorgesetzten hinterlüfteten Fassaden auf mineralischen Massivwänden getestet. Das Potential dieser wurde in diesem Projekt auch für Holzfassaden auf Holzrahmen- und Holzmassivwänden überprüft.

3.5.1 Absorption in der Belüftungsebene

Im ersten Schritt wurde eine zusätzliche Dämmebene im Bereich der Konterlattung eingebracht. Dafür wurde ein leichter Mineralwolle Klemmfilz benutzt. Zum einen mit einer Dicke von 30 mm und zum anderen mit 90 mm. Der 30 mm Klemmfilz wurde bei einer Konterlattungstiefe von 60 mm so eingelegt, dass weiterhin eine Hinterlüftungsebene 30 mm gewährleistet war. Analog dazu wurde die 90 mm Dämmung bei einer Konterlattungstiefe von 120 mm verwendet. Dies wurde nur auf einer Holzrahmenwand umgesetzt, da auf den beiden Massivwandsystemen ohnehin eine äußere absorbierende Dämmebene für das Erfüllen der thermischen Anforderungen auf der Wand vorhanden ist. In Abbildung 39 sind die Verläufe der Schalldämmungen ersichtlich. Auf der linken Seite sind die Varianten mit 30 mm Zusatzdämmung in der hinterlüfteten Variante und in der Variante mit stehender Luftschicht eingetragen. Gegenüber der Grundvariante (gleicher Aufbau nur ohne Dämmung) ergibt sich im Einzahlwert eine Steigerung um 2 dB bzw. 3 dB. Beim Einzahlwert mit tieffrequenter Anpassung zeigt sich ein um 1 dB günstigerer Wert. Die Verläufe der Schalldämmungen zeigen ab 125 Hz aufwärts eine Verbesserung der Schalldämmung über den gesamten Bereich. Analog ist dies auf der rechten Seite bei der Dämmebene mit 90 mm. Hier beginnt die Verbesserung der Schalldämmung schon ab 80 Hz aufwärts über den gesamten Frequenzbereich. Dieser Aufbau fängt auch den starken Einbruch bei 100 Hz etwas ab, während bei der 30 mm Variante keine Verbesserung zu sehen ist. Die dickere Dämmschicht wirkt auch im tiefen Frequenzbereich besser. Dies macht sich im Einzahlwert ohne und mit

tieffrequenter Anpassung mit einer Steigerung um 3 dB bemerkbar. Der Vergleich der beiden Varianten miteinander – die Varianten finden sich hierzu in den beiden nebeneinander liegenden Diagrammen – dann zeigt sich, dass die 90 mm Varianten im tieffrequenten und hochfrequenten Bereich eine höhere Wirkung haben. Im mittelfrequenten Bereich ergeben zwischen den beiden Dämmstärken keine Unterschiede. Offensichtlich wird das Schalldämm-Maß in diesem Bereich durch einen anderen Faktor limitiert, der noch nicht eindeutig bestimmt werden konnte.

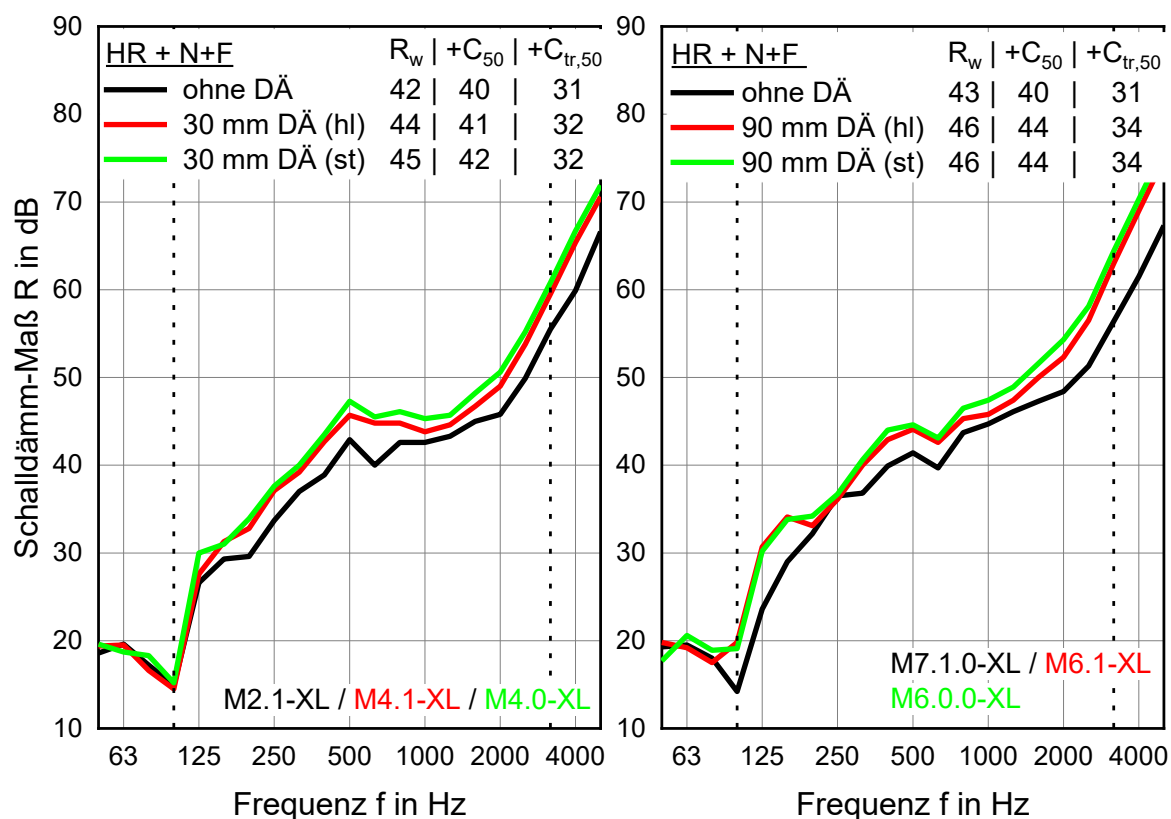


Abbildung 39: Frequenzverläufe von einer Nut und Feder Fassade mit Kreuzlattung auf einer Holzrahmenwand ausgeführt mit unterschiedlich tiefen Dämmebenen. Auf der linken Seite eine 30 mm Dämmebene mit Hinterlüftung und stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Dämmung. Auf der rechten Seite eine 90 mm Dämmebene mit Hinterlüftung und stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Dämmung.

In Abbildung 40 sind die beiden Dämmungen auch in eine 60 mm und 120 mm dicke Traglattung eingebracht, sodass jeweils eine 30 mm tiefe Hinterlüftungsebene entsteht. Als Fassade kamen hier die horizontalen Rhombusleisten (offene Fassade) zum Einsatz. Mit der 30 mm Dämmung, auf der linken Seite, wird ein um 4 dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß erreicht. Dies zeigt sich im Schalldämm-Maß ab 400 Hz aufwärts über den gesamten Frequenzbereich; im tieffrequenten Bereich ist der Verlauf unverändert. Mit 90 mm Dämmstärke wird der Einzahlwert um 5 dB erhöht. Die Steigerung findet in diesem Fall schon ab 160 Hz und bis 5000 Hz statt. Im tieffrequenten Bereich sind auch hier keine Veränderungen ersichtlich. Das zeigt sich auch in den Einzahlwerten mit tieffrequenter

Anpassung. Beim Vergleich der beiden Dämmebenen untereinander, weist die dickere Dämmung ab 160 Hz aufwärts über den gesamten Frequenzbereich deutlich günstigere Schalldämm-Maße auf. Hier ist gegenüber dem anderen Fassadentyp eine Verbesserung auch mittelfrequent ausgebildet, während der limitierende Faktor im tieffrequenten Bereich liegt.

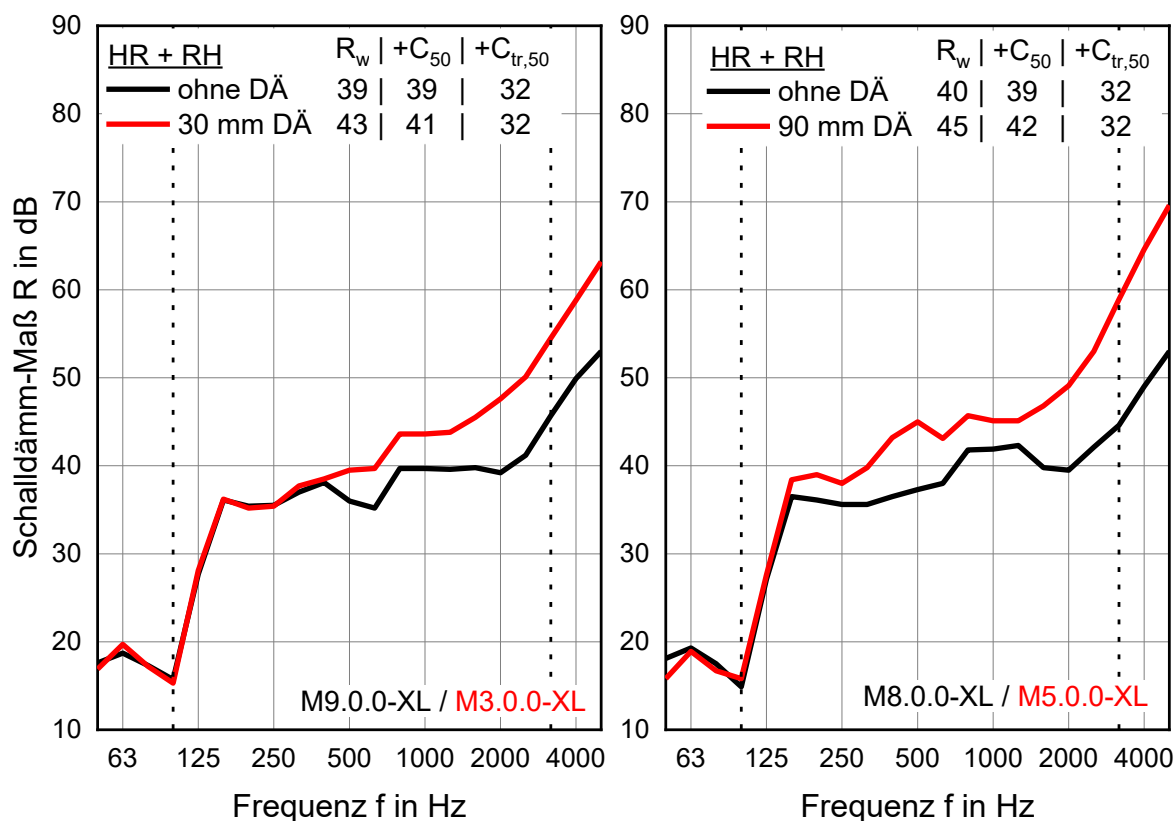


Abbildung 40: Frequenzverläufe von einer Rhombusleisten-Fassade mit Traglattung auf einer Holzrahmenwand ausgeführt mit unterschiedlich tiefen Dämmebenen. Auf der linken Seite eine 30 mm Dämmebene mit Hinterlüftung und stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Dämmung. Auf der rechten Seite eine 90 mm Dämmebene mit Hinterlüftung und stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Dämmung.

3.5.2 Beschwerung der Fassade und Entkoppelung der Unterkonstruktion

Die Beschwerung der Fassade war auch ein Ansatz, der betrachtet wurde. Hierfür wurde der Fassadenaufbau wie in Absatz 3.3.3 beschrieben verwendet. Aluminium-Konsolen dienen zur Befestigung der Konterlattung, wobei eine Konterlattungstiefe von 120 mm eingestellt wurde. Für diese Messungen wurde die vertikale Nut+Feder-Fassade mit Kreuzlattung verwendet. Zur Beschwerung wurden 12,5 mm dicke Glasroc X Platten verwendet. Diese wurden zwischen der horizontalen Traglattung hinter dem Fassadenschirm angebracht (siehe Abbildung 41). Damit ergab sich eine flächenbezogene Masse der beschwerten Fassade von $m' = 33,0 \text{ kg/m}^2$. Die flächenbezogene Masse der unbeschwerten Fassade war $m' = 13,6 \text{ kg/m}^2$, d.h. die Fassade mit der Platten-Beschwerung war mehr als doppelt so schwer. In Abbildung 42 sind die Frequenzverläufe dieser Messungen jenen ohne Beschwerung gegenübergestellt. In den Graphen ist die beschwerte Fassade mit * markiert. Auf der rechten Seite ist die optimierte Fassade in der hinterlüfteten Variante dargestellt. Beim Blick auf den Einzahlwert ist eine Verbesserung um 4 dB ersichtlich. Mit der tieffrequenten Anpassung $C_{tr,50}$ ergibt sich eine Verringerung um 1 dB gegenüber der Referenz. Im Bereich von 125 Hz bis 2500 Hz weist die beschwerte Fassade aufgrund der höheren flächenbezogenen Masse deutlich höhere Schalldämm-Maße auf. Im tieffrequenten Bereich wird mit diesem Aufbau die Schalldämmung herabgesetzt, was somit die ungünstigere tieffrequente Anpassung bedingt.

Auf der rechten Seite ist dieser Vergleich mit der Variante stehende Luftschicht angegeben. Hier zeigt sich beim Einzahlwert ohne und mit tieffrequenter Anpassung eine Verbesserung um 6 dB bzw. 3 dB. In diesem Fall wird die höhere Schalldämmung von 80 Hz bis 5000 Hz erreicht. In den tieffrequenten Frequenzbändern verursacht diese Variante auch keine Verringerung der Schalldämmung gegenüber der Variante mit Hinterlüftung.

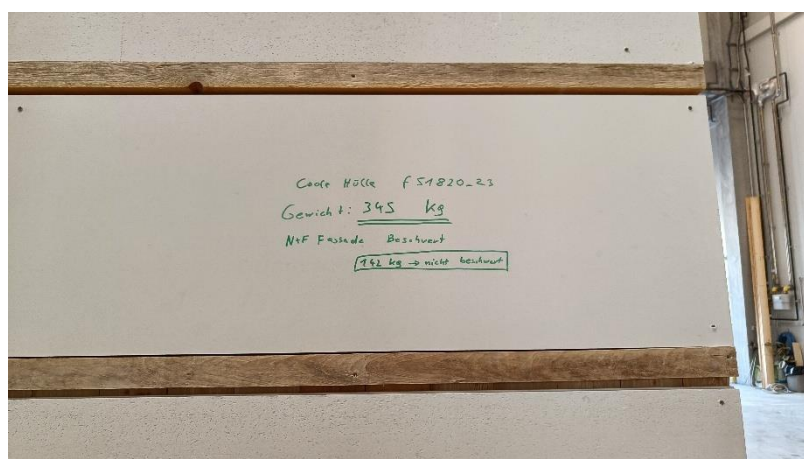


Abbildung 41: Eingebrachte Glasroc X Platten zwischen der Traglattung zur zusätzlichen Beschwerung der Nut+Feder Fassade

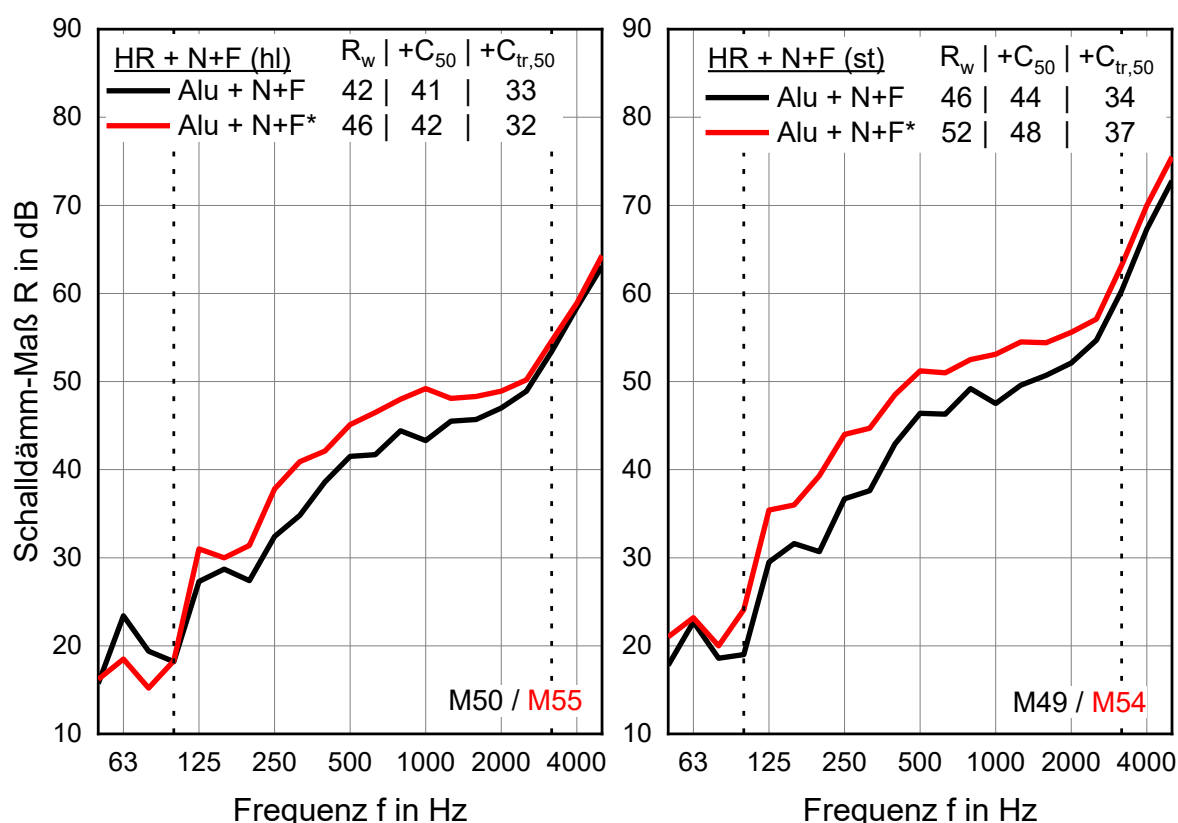


Abbildung 42: Frequenzverläufe von einer Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung auf einer Holzrahmenwand ausgeführt mit zusätzlicher Beschwerung. Auf der linken Seite mit Beschwerung und hinterlüftet im Vergleich mit einem Aufbau ohne Beschwerung. Auf der rechten Seite mit Beschwerung und stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Beschwerung.

Im zweiten Schritt wurde eine zusätzliche Optimierung vorgenommen. Die Aluminium-Konsolen wurden mit Elastomer vollständig von der Grundwand entkoppelt. Dafür wurde zwischen Wand und Konsole eine 12,5 mm dicke Lage Sylodyn NC eingelegt. In die Konsole kam eine weitere Lage Sylodyn NC und eine Metallplatte (in der Größe der Elastomerschicht), sodass der Winkel vollständig entkoppelt wurde (siehe Abbildung 43, links). Der Arbeitsbereich des Sylodyn NC wurde über die Befestigung eingestellt. Die Schraube wurde so lange eingedreht, bis die beiden Elastomerschichten auf jeweils 10 mm komprimiert waren. Dies wurde über Abstandhalter realisiert die dann nach dem Erreichen des richtigen Abstandes wieder entfernt wurden. Damit war die Vorderkante um 10 mm tiefer gegenüber den direkt fixierten Konsolen (siehe Abbildung 43, rechts).

Die Schalldämmungen sind in Abbildung 44 angegeben und auch in diesem Fall werden die optimierten Varianten mit einem * angegeben. In dieser Abbildung werden alle in diesem Abschnitt gemessenen Ausführungen zusammen dargestellt.

Die hinterlüfteten Aufbauten sind auf der linken Seite eingetragen. Zum einen ist die Ausführung mit den entkoppelten Konsolen dargestellt und zum anderen die Ausführung in der beide Optimierungsschritte (entkoppelte Konsolen plus beschwerte Fassade) gesetzt wurden.

Die Entkoppelung zeigt beim bewerteten Schalldämm-Maß ohne und mit Anpassung eine Verbesserung um 3 dB und eine Verringerung um 3 dB. Damit ist das Verhalten zum Vergleich mit der beschwerten Variante (aus Abbildung 42) ungünstiger, vor allem im tieffrequenten Bereich. Wird zusätzlich noch eine beschwerte Fassade eingesetzt kann der Einzahlwert um weitere 2 dB vergrößert werden. Bei Berücksichtigung der tieffrequenten Anpassung $C_{tr,50}$ kommt eine Verringerung um 2 dB zum Tragen. Beide Verläufe haben eine höhere Schalldämmung im Bereich von 125 Hz bis 2500 Hz, genauso wie bei der Beschwerung allein. Die Ausführung, bei der beide Optimierungsschritte kombiniert wurden, zeigt in den meisten Frequenzbändern die etwas höhere Schalldämmung. Im tieffrequenten Bereich bildet sich bei beiden Aufbauten gegenüber der Grundvariante ein tieferer Einbruch bei 100 Hz bzw. 80 Hz aus. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass alle Optimierungsschritte ähnliche Auswirkungen haben, im Einzahlwert ohne und mit Anpassung und in den Frequenzverläufen. Die Verbesserung befindet sich in den gleichen Frequenzbereichen und tieffrequent wird die Schalldämmung immer verringert.

Anders ist dies bei den gleichen Varianten mit der stehenden Luftschicht hinter der Fassade, die auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt sind. In diesem Fall zeigen sich mit den entkoppelten Konsolen beim bewerteten Schalldämm-Maß ohne und mit tieffrequenter Anpassung eine Erhöhung um 4 dB bzw. Verminderung um 1 dB. Werden beide Optimierungsansätze kombiniert, kann der Einzelwert um 10 dB gesteigert werden. Inklusive des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50}$ ist eine Erhöhung um 3 dB möglich. Der Aufbau mit beiden Optimierungen ist bei beiden Fassadensystemen (hinterlüftet und stehende Luftschicht) der mit dem größten Verbesserungspotential, wobei er bei der stehenden Fassade deutlich effektiver ist. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe sind diese deutlich unterschiedlicher gegenüber der hinterlüfteten Variante. Die Entkoppelung der Konsolen zeigt hier ab 125 Hz aufwärts eine Verbesserung der Schalldämmung über den gesamten Bereich. Tieffrequent wird sie ab 100 Hz abwärts wieder verringert. Wird dies aber mit einer beschwerten Fassade kombiniert, so ergibt sich eine deutliche Verbesserung ab 80 Hz aufwärts über den gesamten Bereich. Zum Vergleich mit der reinen Beschwerung ist zu erkennen, dass die beiden Verläufe tieffrequent sehr ähnlich sind und über jener mit Entkoppelung liegen. Bis 400 Hz ist die Fassade mit der erhöhten Masse günstiger und fällt dann unter die entkoppelte Variante.

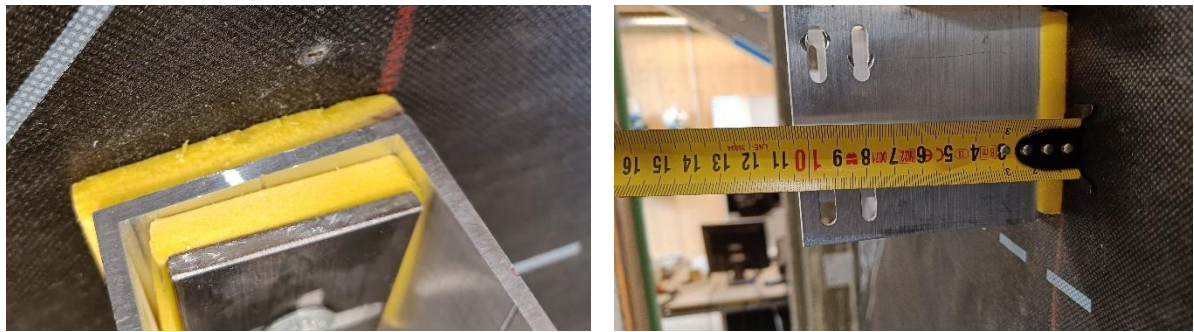


Abbildung 43: Eingebaute Elastomerschichten unter und über der Konsole zur vollständigen Entkoppelung.

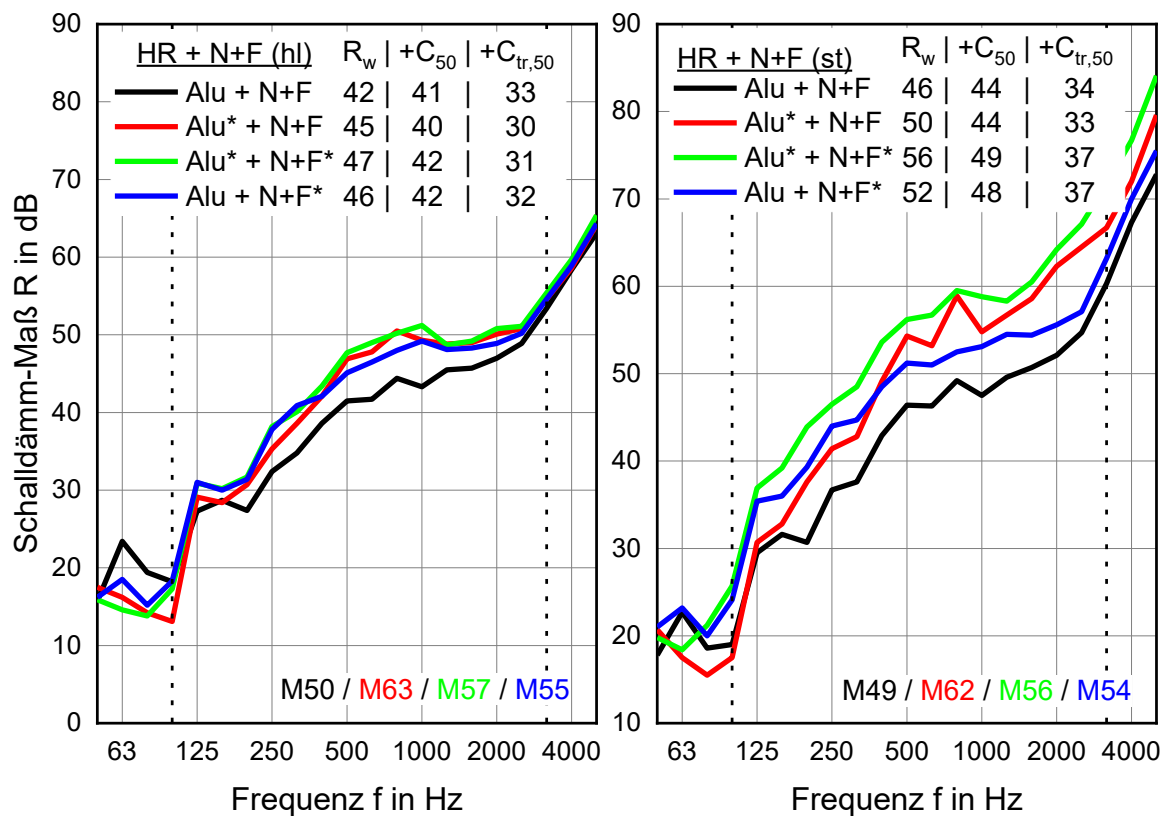


Abbildung 44: Frequenzverläufe von einer Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung auf einer Holzrahmenwand ausgeführt mit entkoppelter Unterkonstruktion und zusätzlicher Beschwerung. Auf der linken Seite mit entkoppelter Unterkonstruktion, Beschwerung und einer Kombination von beidem mit Hinterlüftung im Vergleich mit einem Aufbau ohne Optimierung. Auf der rechten Seite mit entkoppelter Unterkonstruktion, Beschwerung und einer Kombination von beidem mit stehender Luftschicht im Vergleich mit einem Aufbau ohne Optimierung.

3.5.3 Alternatives Befestigungssystem B1 zur Montage der Unterkonstruktion

Zu den schon beschriebenen Varianten der Unterkonstruktion, wurde ein alternatives System (B1) zur Befestigung der Unterkonstruktion auf der Holzmassivwand getestet. Es handelt sich um thermisch entkoppelte Doppelgewindeschrauben, wobei der Großteil des Schafts in der Dämmebene liegt. Über dem Schraubenkopf sitzt eine drehbare Hülse mit einem Gewinde. Die Schraube wird in Wand geschraubt und die drehbare Hülse dann in die Konter- bzw. Traglattung geschraubt, sodass die darunter liegende Dämmung nicht zusammengedrückt wird. Die jeweilige Lattung muss zur richtigen Montage vorgebohrt werden. Je Befestigungspunkt werden zwei Schrauben verwendet. Eine wird senkrecht zur Wand eingebracht und die andere unter einen Winkel von 15° in der Nähe der ersten Schraube. Das System ist in Abbildung 45 schematisch skizziert.

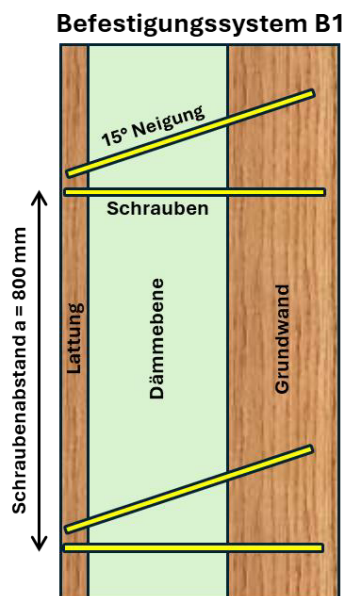


Abbildung 45: Schematische Darstellung des alternativen Befestigungssystems B1 zur Montage der Lattung.

In Abbildung 46 werden die Schalldämm-Maße des Befestigungssystems B1 mit der jeweiligen Standardlattung verglichen. Links sind die Ergebnisse der Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung und rechts die der Rhombusleisten-Fassade mit Traglattung dargestellt. Mit dem Befestigungssystem B1 ergeben sich in beiden Fällen eine Verbesserung des Einzahlwertes um 1 dB. Die tieffrequenten Anpassungen bleiben gleich oder ändern sich um 1 dB. Im tief- und hochfrequenten fällt die Schalldämmung des Befestigungssystems B1 etwas ungünstiger aus als die Standardlattung. Mittelfrequent von 315 Hz bis etwa 1000 Hz ist die Schalldämmung mit der alternativen Befestigung höher.

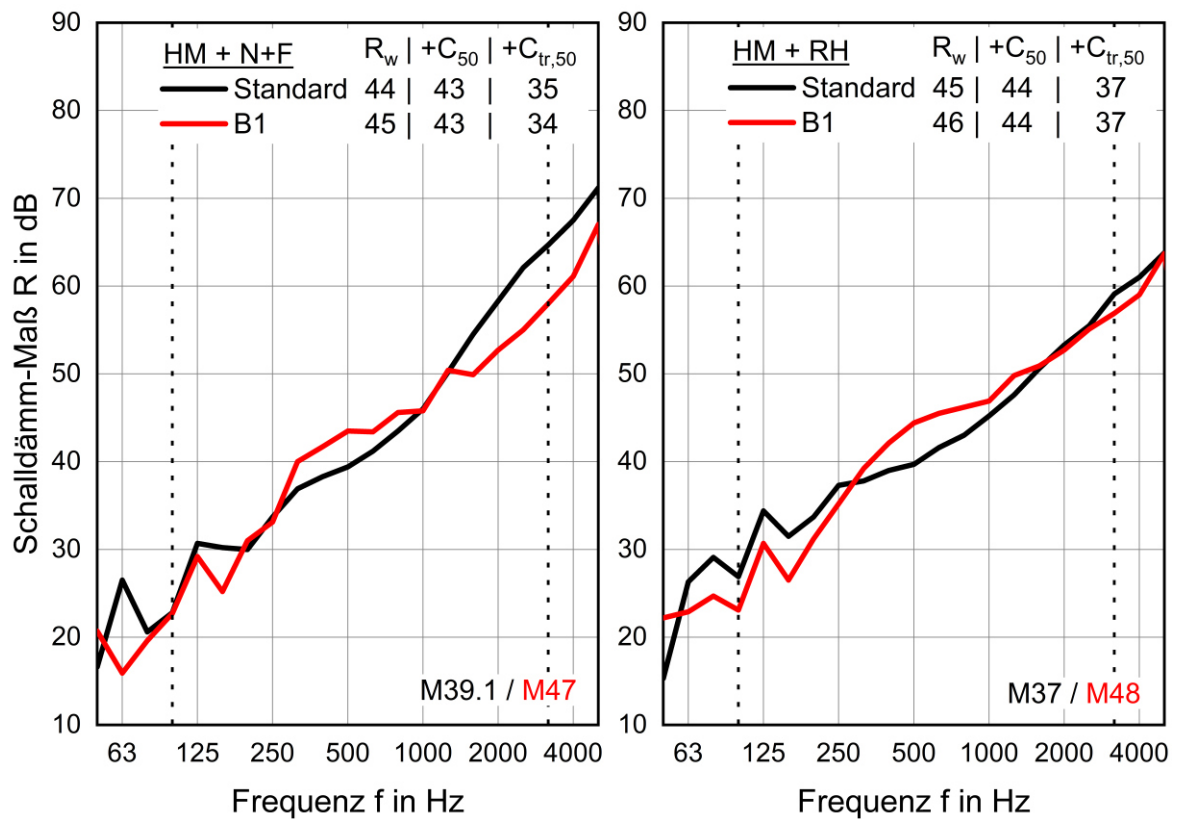


Abbildung 46: Frequenzverläufe von Fassaden auf einer Holzmassivwand mit außen liegender Dämmebene ausgeführt mit einem alternativen Befestigungssystem (B1). Auf der linken Seite eine Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung im Vergleich mit einem Standardaufbau. Auf der rechten Seite eine Rhombusleisten-Fassade mit Traglattung im Vergleich mit einem Standardaufbau.

3.5.4 Zusammenfassung der Optimierungsschritte

Im Zuge der Messreihe wurde eine Reihe an potenziellen Optimierungen untersucht. Diese sind nachfolgend nochmals zusammenfassend aufgelistet:

- Beschwerung der Fassade,
- Entkoppelung der Unterkonstruktion für die Fassade,
- Beschwerung der Fassade und Entkoppelung der Unterkonstruktion für die Fassade,
- Alternatives Befestigungssystem für die Unterkonstruktion.

Die Maßnahmen zeigten unterschiedliche Ergebnisse. Prinzipiell zeigte das Beschweren der Fassade gute Verbesserungen, die auch die tieffrequente Schalldämmung nur wenig beeinflussten. Mit der Entkoppelung der Unterkonstruktion konnten ebenfalls Verbesserungen erzielt werden, wobei diese unter jenen der Beschwerung lagen und die tieffrequente Schalldämmung ebenfalls nachteilig beeinflusst haben. Wurden beide Ansätze kombiniert, konnten die höchsten Verbesserungen erzielt werden, wobei teilweise trotzdem die tieffrequente Schalldämmung verringert wurde. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten bei der hinterlüfteten Fassade waren im Einzahlwert im Bereich von 1 dB bis 2 dB. Deutlich effektiver waren die Maßnahmen bei der Fassade mit stehender Luftschicht mit Verbesserungen im Bereich von 2 dB bis 6 dB. Die Fassade mit stehender Luftschicht ist aus hygrothermischer Sicht nur bedingt zu empfehlen (vgl. Anhang 1). Dort ist es ratsam die hinterlüftete Variante zu wählen.

Das alternative Befestigungssystem B1 für die Unterkonstruktion erzielte leichte Verbesserungen im Einzahlwert gegenüber einer direkt befestigten Konter- bzw. Traglattung, im tiefen Frequenzbereich kam es wiederum zu verringerten Schalldämmungen. Das System kann somit an Massivwänden (Holz oder mineralisch) eingesetzt werden vor allem wenn eine außen liegende Dämmebene verwendet wird. Es sollte aber darauf geachtet werden, die tieffrequente Schalldämmung nicht gravierend zu verschlechtern.

3.6 Vergleich von Messungen aus den zwei Prüfständen im Akustik Center Austria

Das Akustik Center Austria besitzt zwei modulare Prüfstände, wobei in jedem der beiden Wand- und Deckenmessungen durchgeführt werden können. In diesem Projekt kamen beide Prüfstände zum Einsatz mit dem Ziel, den Einfluss der Fassaden- bzw. der Wandfläche auf die Schalldämmung zu eruieren. Weiters steigt mit größerem Raumvolumen die Messgenauigkeit von tiefen Frequenzen (> 100 Hz). Folgend sind die Eckdaten der beiden Prüfstände bei der Messung der Schalldämmung von Wänden angeführt:

- M-Prüfstand (M-PS) mit Senderaum (SR) = 54 m^3 , Empfangsraum (ER) = 60 m^3 und Prüfwand = $10,8 \text{ m}^2$
- XL-Prüfstand (XL-PS) mit Senderaum (SR) = 138 m^3 , Empfangsraum (ER) = 153 m^3 , Prüfwand (Standard) = $20,7 \text{ m}^2$ und Prüfwand in Adapterrahmen (A) = $10,8 \text{ m}^2$

Für den Vergleich wurden zwei Ansätze gewählt; zum einen wurden Wände und Fassaden für die jeweilige Standardöffnung mit unterschiedlicher Dimension in beiden Prüfständen baugleich angefertigt, wodurch der Einfluss der Wandfläche auf das Schalldämm-Maß ermittelt werden konnte. Zum anderen wurden in einem hierfür angefertigten Adapterrahmen für den XL-PS ausgewählte Wände, die im M-PS schon gemessen wurden, noch mal im größeren Prüfstand eingebaut und untersucht. Diese Vergleiche werden in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt, wobei folgende Farb- und Schriftcodierung für die drei Varianten verwendet wird:

- M-PS ($10,8 \text{ m}^2$) in schwarz
- XL-PS ($20,7 \text{ m}^2$) in rot
- XL-PS, A ($10,8 \text{ m}^2$) in grün

3.6.1 Holzrahmenwand mit Fassaden

In Abbildung 47 und Abbildung 48 wird die Holzrahmenwand roh und mit verschiedenen Fassaden verglichen. Die reine Holzrahmenwand ist in Abbildung 47 auf der linken Seite eingetragen. Die Einzahlwerte dieser Wand differieren um 2 dB bis 3 dB. Wird die tieffrequente Anpassung betrachtet sind keine Unterschiede zu erkennen. Die Frequenzverläufe der drei Messungen sind im prinzipiellen Verlauf sehr ähnlich und unterscheiden sich in einzelnen Frequenzbändern. Ein etwas größerer Unterschied ergibt sich im hochfrequenten Bereich zwischen den beiden Prüfständen. Die Messung der kleineren Wand fällt im M-PS günstiger aus als die Messungen der beiden Wände im XL-PS. Woran dies liegen könnte ist momentan noch nicht geklärt.

In Abbildung 47 auf der rechten Seite und in Abbildung 48 wurden zwei Fassaden auf diesen Grundwänden zum Vergleich montiert. Bei der offenen Rhombusleisten-Schalung in Abbildung 47 zeigt der Einzahlwert ohne und mit Anpassung maximal eine Abweichung von

1 dB. Das sind Abweichungen, die innerhalb der Vorgaben für Abweichungen zwischen unterschiedlichen Prüfständen nach ÖNORM EN ISO 12999-1:2020 liegen. Bei Betrachtung der Frequenzverläufe ist erkennbar, dass die qualitativen Verläufe gut übereinstimmen und es nur einzelne Unterschiede in den Frequenzbändern gibt. Die Messungen mit Nut+Feder-Fassade, hinterlüftet und mit stehender Luftschicht, zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung in den beiden Prüfständen, wie in Abbildung 48 zu sehen ist. Die Einzahlwerte verändern sich maximal um 1 dB. Mit der tieffrequenten Anpassung ist die Übereinstimmung ähnlich gut, abgesehen von einer Ausnahme mit einer Abweichung von 2 dB. Die Schalldämmungen liegen hier auch gut übereinander und haben einzelne Unterschiede in den Frequenzbändern.

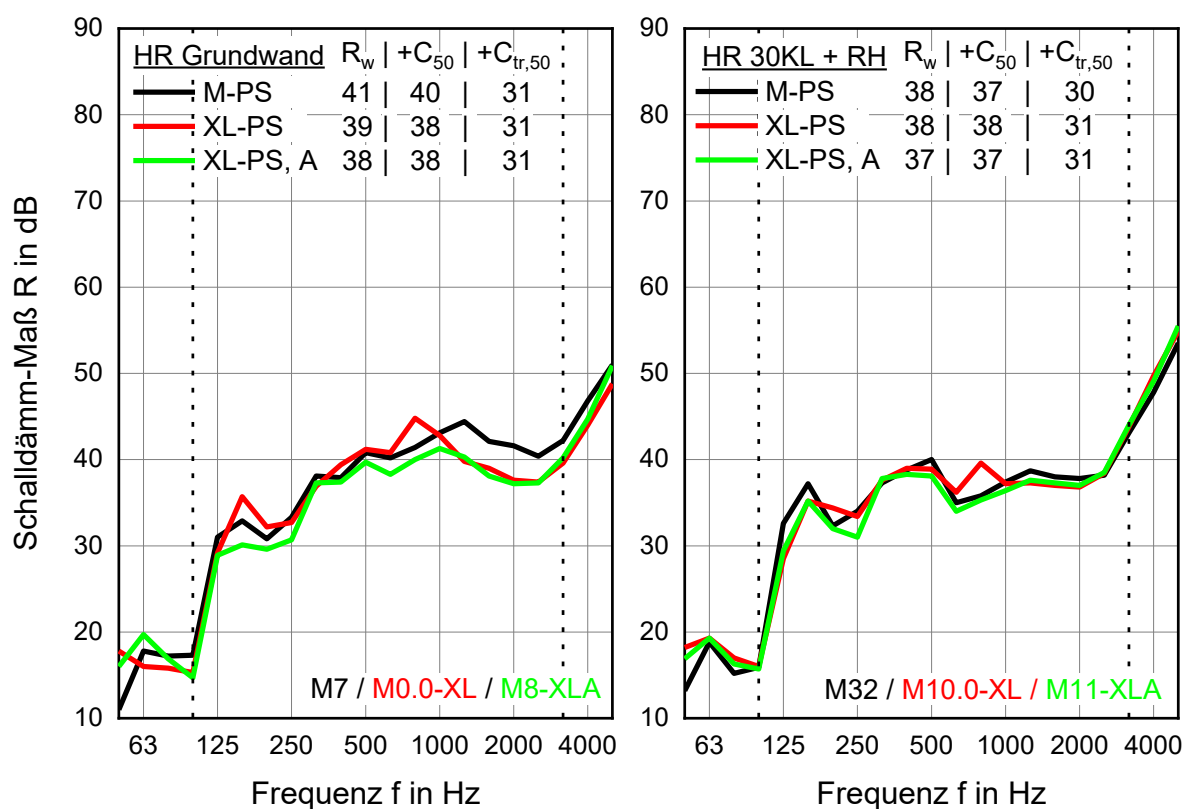


Abbildung 47: Frequenzverläufe von einer Holzrahmenwand ohne und mit Fassade in verschiedenen Größen und Prüfständen. Auf der linken Seite die Holzrahmengrundwand ohne Fassade im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite die Holzrahmengrundwand mit Rhombusleisten-Fassade im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

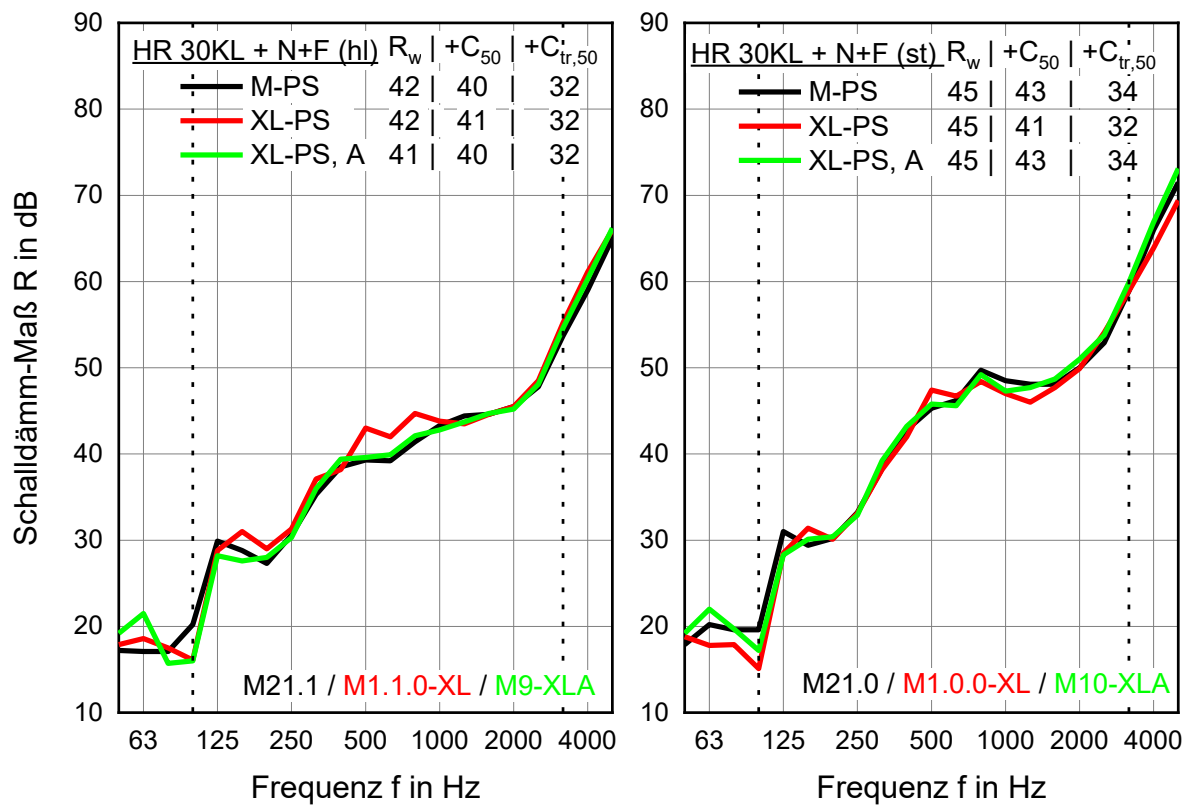


Abbildung 48: Frequenzverläufe von einer Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung auf einer Holzrahmenwand in verschiedenen Größen und Prüfständen. Auf der linken Seite mit Hinterlüftung im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite mit stehender Luftschicht im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

3.6.2 Holzmassivwand mit Fassaden

Analog zu dem vorangegangenen Absatz 3.6.1 wird auch hier zuerst die Holzmassiv-Grundwand roh und im Anschluss mit verschiedenen Fassaden miteinander verglichen. Im Abbildung 49 auf der linken Seite ist die Grundwand eingetragen. Die bewerteten Schalldämm-Maße ohne und mit Anpassung zeigen hier eine Differenz von 1 dB. Die Verläufe der Grundwand stimmen ab 125 Hz aufwärts gut überein. Unterhalb von 125 Hz gibt es im tieffrequenten Bereich teilweise größere Unterschiede in einzelnen Bändern. Dies kann eventuell durch die unterschiedliche Eigen- bzw. Raummoden erklärt werden, die zum einen größen- und zum anderen prüfstandsabhängig sind. Des Weiteren ist die Koinzidenz-Grenzfrequenz ein Thema, die bei Brettsper Holz in üblichen Konstruktionsstärken im Bereich von 250 Hz bis 500 Hz liegt. Auf der rechten Seite in Abbildung 49 ist die Grundwand mit äußerer Dämmebene ohne Fassade dargestellt. Dies ist kein praktikabler umsetzbarer Wandaufbau und die Messung wurde nur aus Diagnosegründen ausgeführt und kann als Vergleich der Wandfläche bzw. der Prüfstände herangezogen werden. Im bewerteten Schalldämm-Maß ohne und mit tieffrequenter Anpassung liegt der größte Unterschied bei 2 dB. Die Verläufe der Schalldämmung sind ähnlich, wobei sich unterschiedliche Schalldämmungen in den mittel- und hochfrequenten Terzbändern ergeben. Dies kann aber daraus resultieren, dass das Verhältnis von Messfläche zu Raumvolumen stark unterschiedlich ist und die starke Absorption der Dämmebene das Messergebnis beeinflusst.

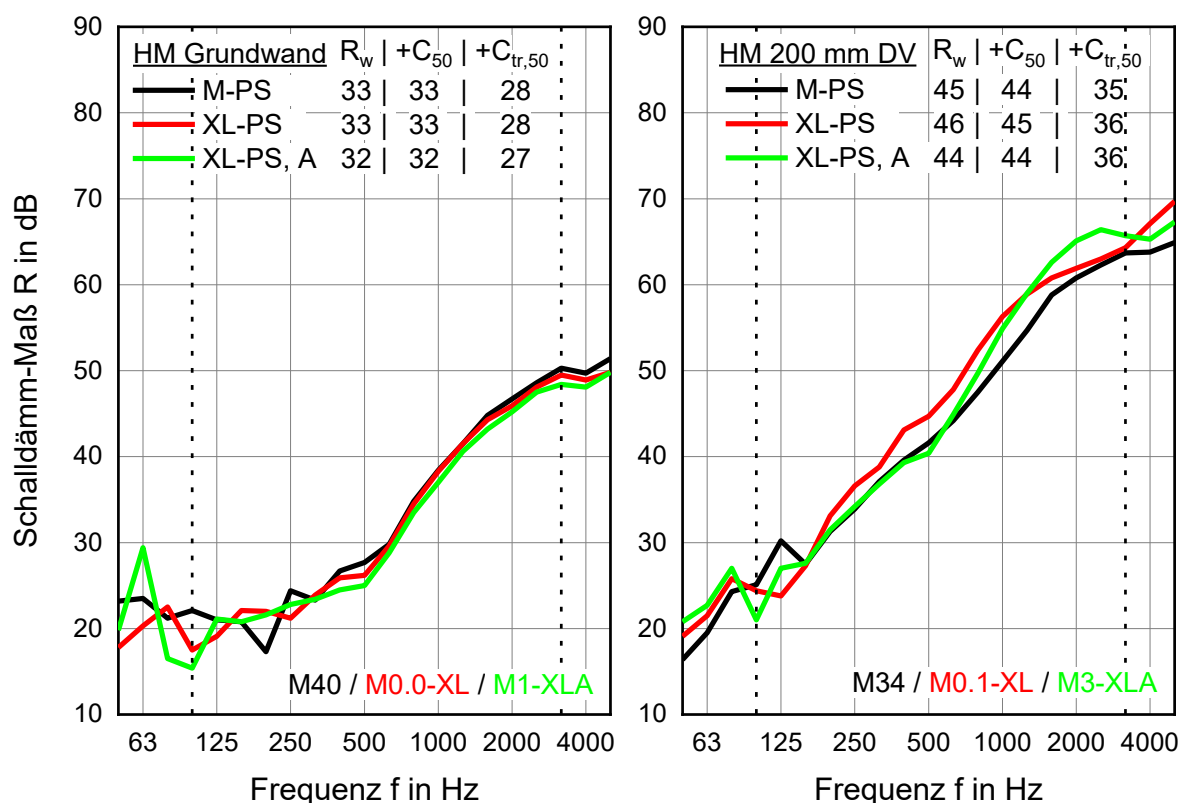


Abbildung 49: Frequenzverläufe von einer Holzmassivwand ohne und mit Dämmebene (ohne Fassade) in verschiedenen Größen und Prüfständen. Auf der linken Seite die Holzmassivgrundwand ohne Dämmebene im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite die Holzmassivgrundwand mit Dämmebene (ohne Fassade) im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

In Abbildung 50 und Abbildung 51 wird die Holzmassivwand mit einer offenen Rhombusleisten- und der Nut+Feder-Fassade dargestellt. Dabei wird die Verschraubung zwischen der jeweiligen Fassade und der Unterkonstruktion variiert. Auf der jeweils linken Seite wurden Schrauben mit Teilgewinde und auf der rechten Seite wurden Vollgewindeschrauben eingesetzt. Die Einzahlwerte ohne und mit Anpassungen in Abbildung 50 zeigen eine maximale Differenz von 2 dB. Alle Verläufe der gemessenen Fassaden sind gut vergleichbar. Die hauptsächlichen Unterschiede liegen im mittel- und hochfrequenten Bereich. Mittelfrequent ist die große Wand im XL-PS günstiger und im hochfrequenten die kleine Wand im XL-PS. Prinzipiell ist es aber so, dass die Schalldämmung der Aufbauten, die mit den Vollgewindeschrauben fixiert waren, etwas günstiger aus.

Die Unterschiede im Einzahlwert ohne und mit Anpassung bei der Nut+Feder-Fassade (siehe Abbildung 51) sind deutlich größer gegenüber jenen der Rhombusleisten-Fassade, da hier Differenzen von bis zu 5 dB auftreten. Diese großen Abweichungen treten hauptsächlich bei der großen Wand im XL-PS auf. Die kleine Wand in beiden Prüfständen bietet eine deutlich bessere Übereinstimmung. Beim Blick auf die Frequenzverläufe zeigt sich eine höhere Schalldämmung bei der großen Fassade im Bereich von 160 Hz bis 630 Hz unabhängig von

der Schraubenart. Womit dies zusammenhängt, ist noch nicht eindeutig geklärt. Es wird vermutet, dass die unterschiedlichen Bauteilflächen das Abstrahlungsverhalten beeinflussen und auch das Zusammenspiel der Nut-Feder-Fassade und der Holzmassivwand einen Einfluss haben. Diese beiden Platten beeinflussen sich gegenseitig und haben ein anderes Schwingungsverhalten aufgrund ihrer Größe.

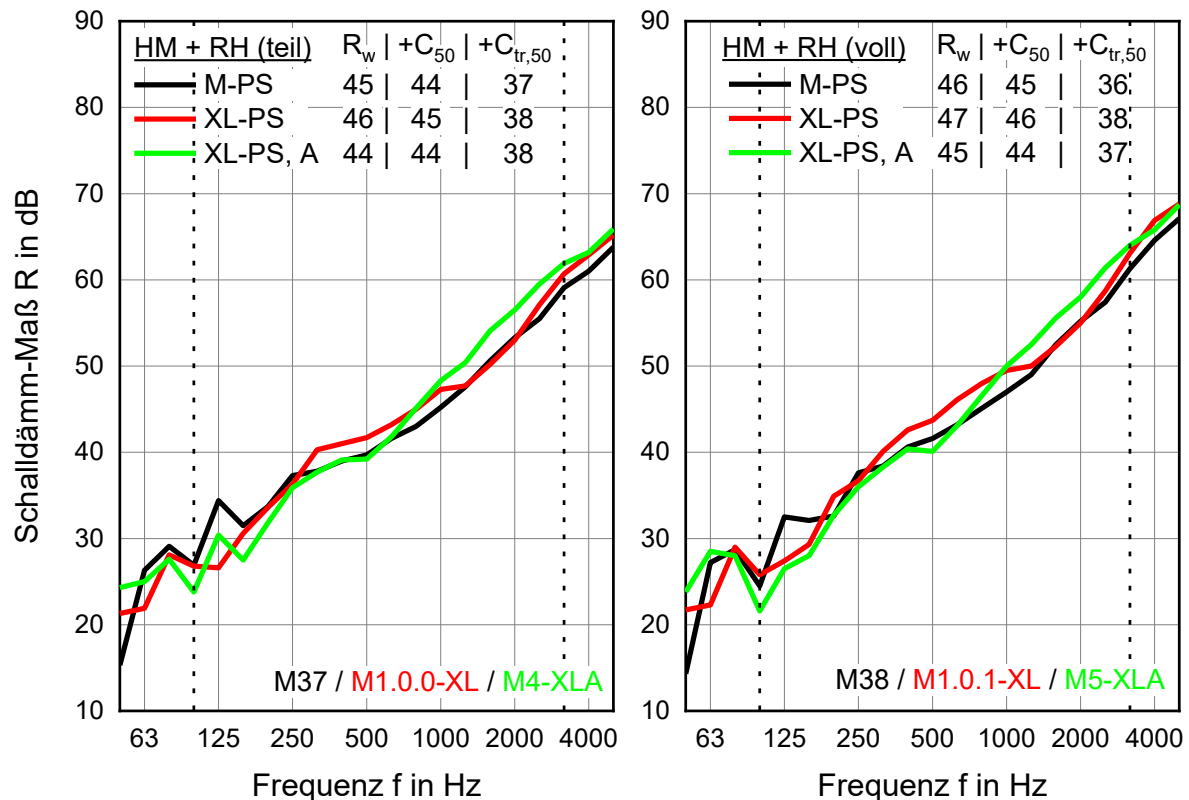


Abbildung 50: Frequenzverläufe von einer Holzmassivwand mit Rhombusleisten-Fassade (und außen liegender Dämmebene) mit unterschiedlicher Verschraubung in verschiedenen Größen und Prüfständen. Auf der linken Seite die Holzmassivgrundwand mit Rhombusleisten-Fassade ausgeführt mit Teilgewindeschrauben im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite die Holzmassivgrundwand mit Rhombusleisten-Fassade ausgeführt mit Vollgewindeschrauben im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

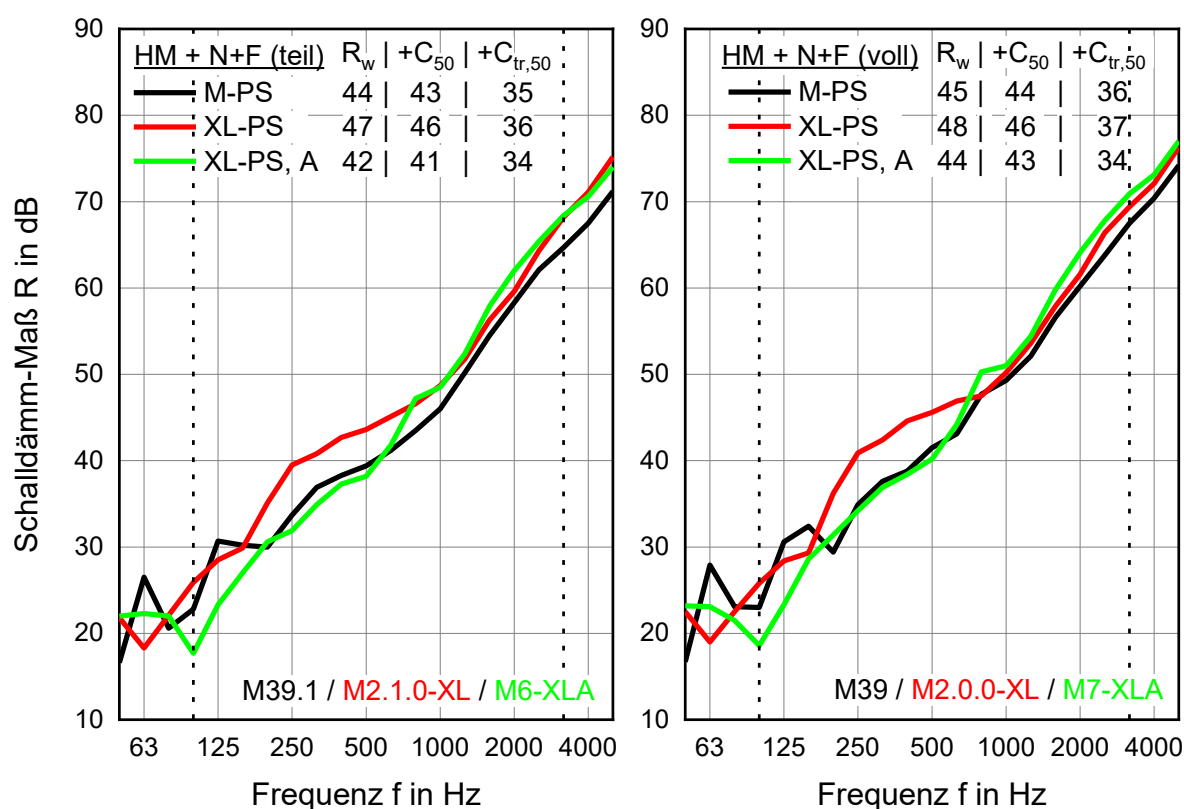


Abbildung 51: Frequenzverläufe von einer Holzmassivwand mit Nut+Feder Fassade (und außen liegender Dämmebene) mit unterschiedlicher Verschraubung in verschiedenen Größen und Prüfständen. Auf der linken Seite die Holzmassivgrundwand mit Nut+Feder Fassade ausgeführt mit Teilgewindeschrauben im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite die Holzmassivgrundwand mit Nut+Feder Fassade ausgeführt mit Vollgewindeschrauben im M-PS ($A = 10,8 \text{ m}^2$), XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

3.6.3 25 Hz – Messungen im XL-PS Rahmen vs. Adapterwand mit einer Holzrahmenwand

In diesem Abschnitt Luftschallmessungen vorgestellt, bei welchen untere Frequenzbereich um drei Terzbänder erweitert wurde. Das heißt es wurde bis 25 Hz im tieffrequenten Bereich gemessen. Prinzipiell wurden die Messungen nach dem Standardverfahren gemäß ÖNORM EN ISO 10140-4:2021 ausgeführt.

Nach EN ISO 10140-4:2021 Anhang A werden unter anderem sehr große Randabstände bei Messungen im tiefen Frequenzbereich gefordert. Diese Anforderungen der Abstände wurden nicht vollständig eingehalten, aufgrund der großen Raumabmessungen des XL-Prüfstands wird aber davon ausgegangen, dass sich auch für große Wellenlängen ein diffuses Schallfeld im Raum einstellt. Weiters wurde nicht nur das Schalldämm-Maß bis 25 Hz bestimmt, sondern auch die Anpassungswerte C_{25} und $C_{tr,25}$ für diesen erweiterten Bereich. Hierzu wurde der Ansatz nach [10] verwendet. Dort wurde die Bewertungskurve für den $C_{50-3150}$ in den tieffrequenten Bereich bis auf 20 Hz erweitert. Dies wurde für die vorliegenden

Messergebnisse analog dazu bis 25 Hz durchgeführt. Auf selbe Art und Weise wurde der Anpassungswert $C_{tr,50-3150}$ bis 25 Hz erweitert. Folgende Abkürzungen für die unterschiedlichen Spektrum-Anpassungswerte finden sich in den anschließenden Grafiken wieder:

- $C_{50-3150} \rightarrow C_{50}$
- $C_{tr,50-3150} \rightarrow C_{tr,50}$
- $C_{25-3150} \rightarrow C_{25}$
- $C_{tr,25-3150} \rightarrow C_{tr,25}$

In den nachfolgenden Diagrammen ist der Bereich unter 50 Hz mit einer vertikalen, schwarz gestrichelten Linie markiert. Der bewertete Bereich zwischen 100 Hz und 3150 Hz ist weiterhin mit vertikalen, schwarz gepunkteten Linien markiert. In Abbildung 52 wird zuerst die rohe Holzrahmenwand im XL-PS im normalen Prüfraum mit der gleichen Wand in unterschiedlicher Dimension im Adaptierraum verglichen. Unter 100 Hz fallen die Unterschiede zwischen den beiden Grundwänden teilweise hoch aus. In diesem Bereich zeigt die kleinere Wand die günstigere Schalldämmung. Bei 25 Hz ergibt sich ein Unterschied von ca. 20 dB. Ab 31,5 Hz aufwärts werden die Unterschiede zwischen den beiden Wänden bis 100 Hz kleiner. Bei Betrachtung dieser Wand mit einer vertikalen Nut+Feder Fassade hinterlüftet und mit stehender Luftschicht (siehe Abbildung 53) zeigt sich ein ähnliches Bild. In beiden Fällen treten im tieffrequenten Bereich teilweise recht deutliche Unterschiede zwischen den beiden Wandgrößen auf. Auch hier sind Differenzen von ca. 20 dB im 25 Hz Frequenzband ersichtlich. Danach sind teilweise noch recht deutliche Unterschiede bis ca. 100 Hz ersichtlich. Im Quervergleich der hinterlüfteten Fassade mit der stehenden Luftschicht (das heißt schwarze Kurve links mit schwarzer Kurve rechts, und das analog mit den roten Verläufen) zeigen sich bei der großen Wand Unterschiede im Bereich von 40 Hz bis 80 Hz. Im Fall der kleinen Wand sind im tieffrequenten Bereich keine Unterschiede vorhanden.

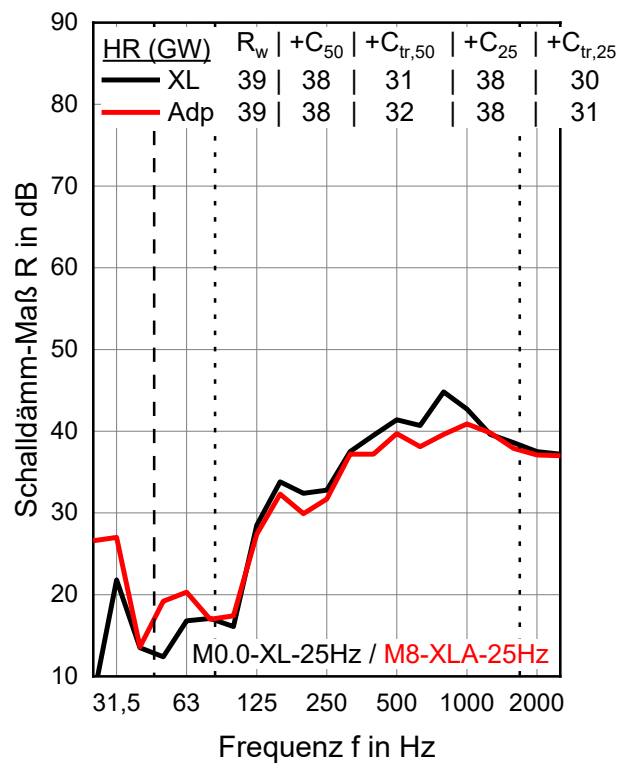


Abbildung 52: Frequenzverläufe mit erweitertem tieffrequentem Bereich bis 25 Hz von einer Holzrahmenwand ohne Fassade in verschiedenen Größen im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

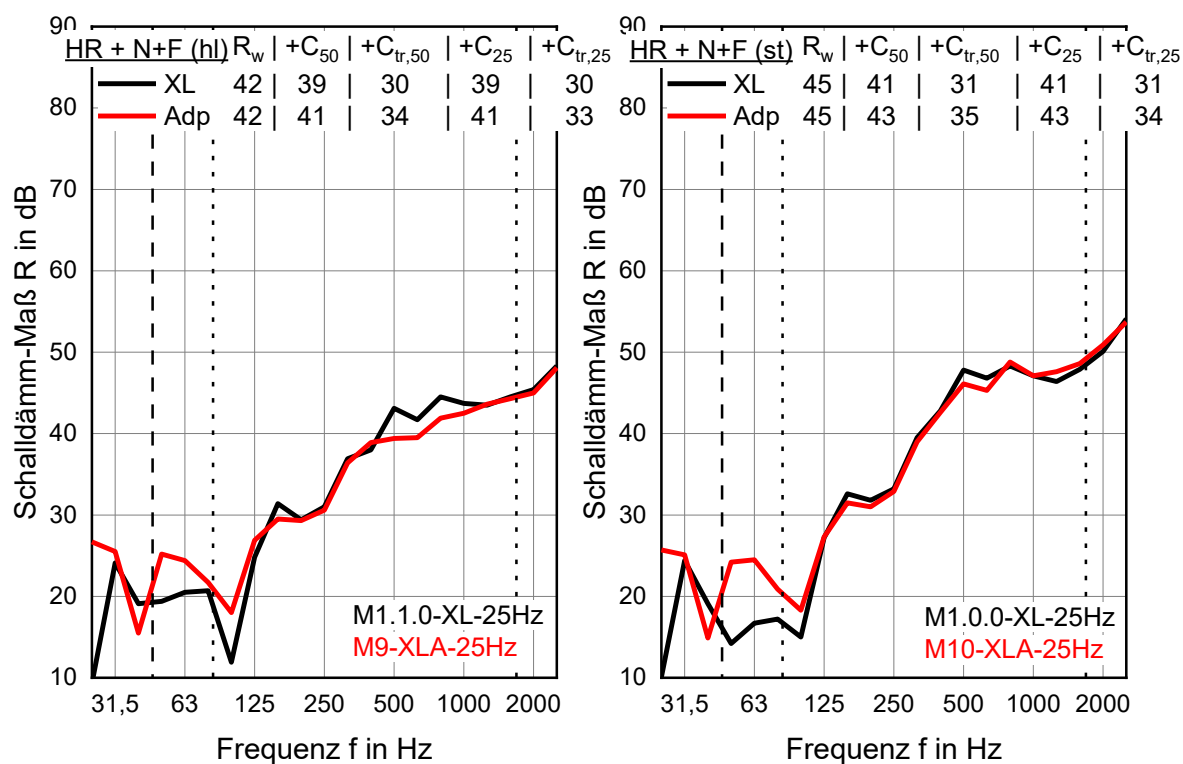


Abbildung 53: Frequenzverläufe mit erweitertem tieffrequentem Bereich bis 25 Hz von einer Holzrahmenwand mit einer Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung in verschiedenen Größen. Auf der linken Seite mit Hinterlüftung im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite mit stehender Luftschicht im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

3.6.4 25 Hz – Messungen im XL-PS Rahmen vs. Adapterwand mit einer Holzmassivwand

Genauso wie bei der Holzrahmenwand im Abschnitt zuvor wird hier zuerst die rohe Holzmassivwand betrachtet. Die Frequenzverläufe sind in Abbildung 54 dargestellt. Im Fall der Holzmassivgrundwand sind recht deutliche Unterschiede im tieffrequenten ersichtlich. Dies liegt mutmaßlich an den unterschiedlichen Eigenmoden der Holzmassivwände, die sich aufgrund der unterschiedlichen Größe ausbilden.

Wird eine Rhombusleisten-Fassade (inklusive der nötigen äußeren Dämmebene) auf der Grundwand angebracht ergeben sich die folgenden Frequenzverläufe (siehe Abbildung 55). Hier wurde die Befestigung der Fassade variiert, indem zum einen Teilgewinde- und zum anderen Vollgewindeschrauben verwendet wurden (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die größte Differenz ergibt sich bei 25 Hz, darüber werden die Unterschiede bis 100 Hz kleiner. Beim Quervergleich ist ersichtlich, dass die Verläufe der beiden Varianten der gleichen Größe gut übereinander liegen. Damit ergeben sich vorrangig Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Größen der Wände. Bei einer Nut+Feder Fassade mit Hinterlüftung und stehender Luftschicht ergeben sich im tiefen Frequenzbereich ebenfalls große Unterschiede. Auch über den tieffrequenten Bereich hinaus im mittelfrequenten Bereich kommt es bei dieser Variante zu großen Unterschieden der Schalldämmung in Abhängigkeit der Bauteilgröße. Dies hat sich schon in Absatz 3.6.2 gezeigt. Im Quervergleich der Kurven ist eine gute Übereinstimmung der Frequenzverläufe mit Teilgewindeschrauben oder Vollgewindeschrauben erkennbar. Das heißt die wesentlichen Unterschiede sind auf die Bauteilfläche zurückzuführen.

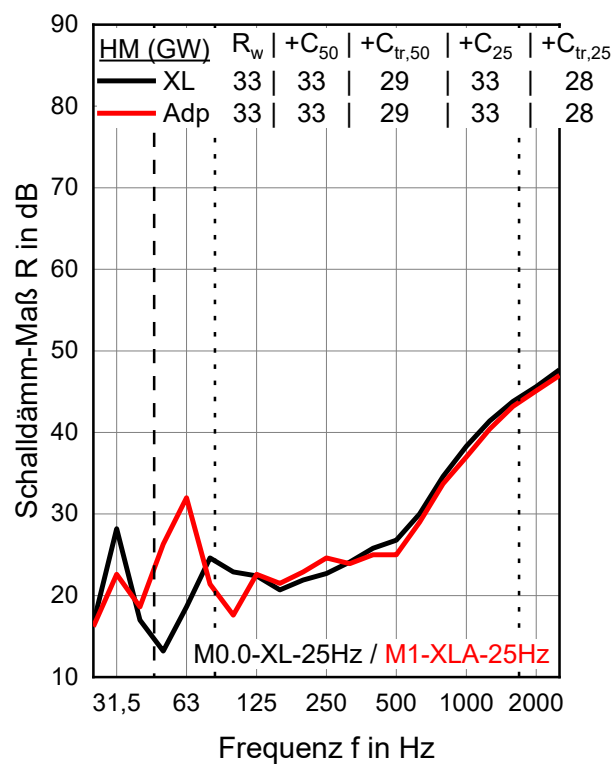


Abbildung 54: Frequenzverläufe mit erweitertem tieffrequentem Bereich bis 25 Hz von einer Holzmassivwand ohne Fassade in verschiedenen Größen im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

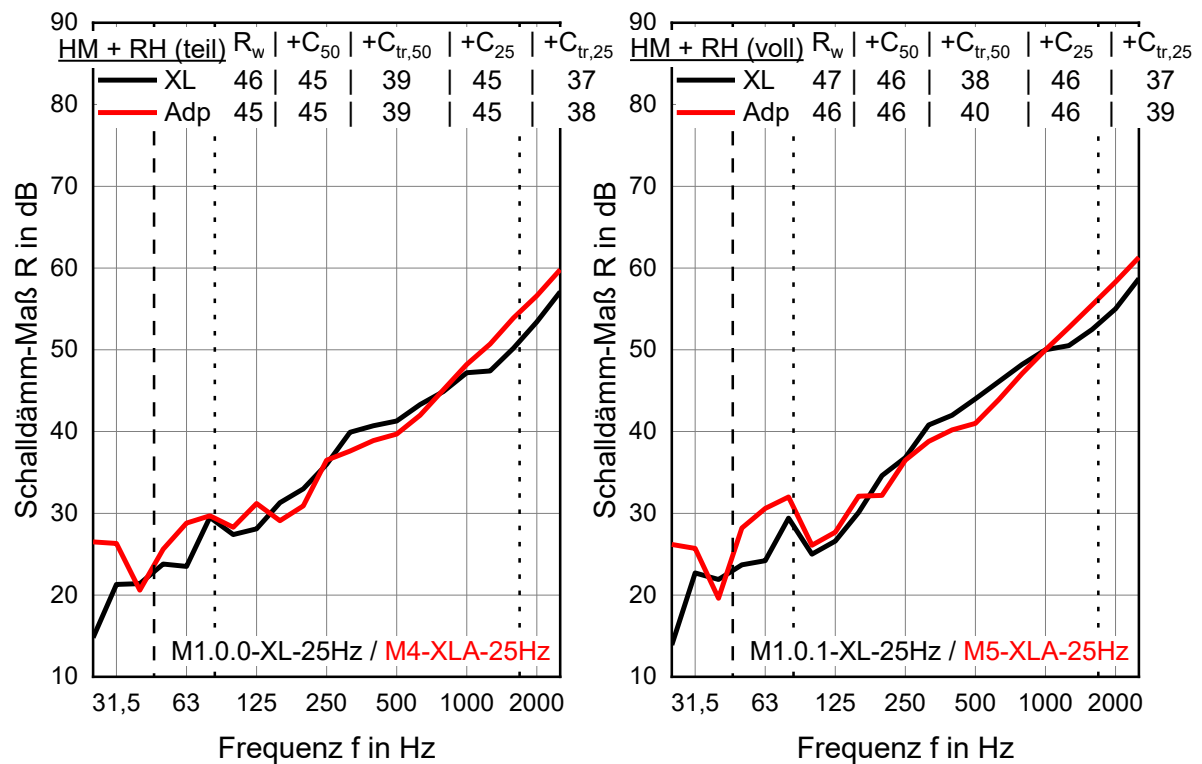


Abbildung 55: Frequenzverläufe mit erweitertem tieffrequentem Bereich bis 25 Hz von einer Holzmassivwand mit einer Rhombusleisten-Fassade mit Traglattung in verschiedenen Größen. Auf der linken Seite mit Teilgewindeschrauben fixiert im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite mit Vollgewindeschrauben fixiert im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

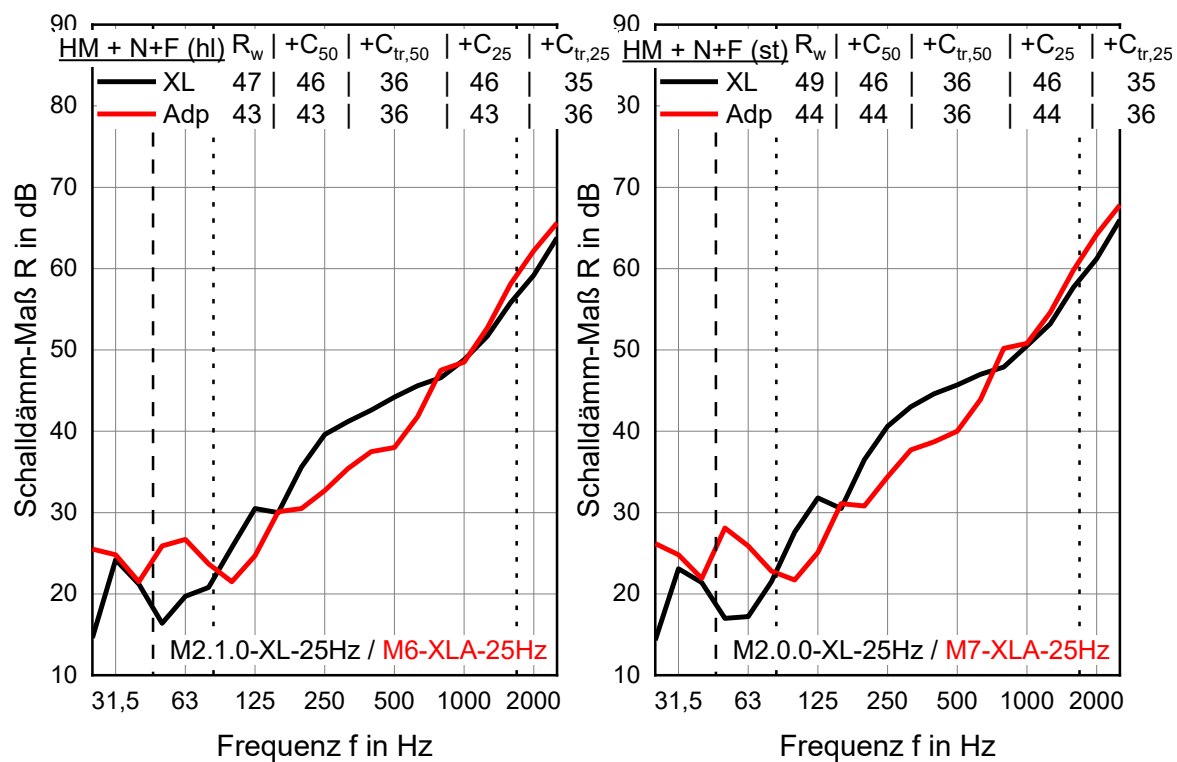


Abbildung 56: Frequenzverläufe mit erweitertem tieffrequentem Bereich bis 25 Hz von einer Holzmassivwand mit einer Nut+Feder Fassade mit Kreuzlattung in verschiedenen Größen. Auf der linken Seite mit Hinterlüftung im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$). Auf der rechten Seite mit stehender Luftschicht im XL-PS ($A = 20,7 \text{ m}^2$) und XL-PS, A ($A = 10,8 \text{ m}^2$).

3.6.5 Zusammenfassung der Gegenüberstellung der beiden Prüfstände des Akustik Center Austria

Im Allgemeinen stimmen die durchgeführten Messungen im M-Prüfstand und XL-Prüfstand, sowohl für die beiden Grundwandtypen (Holzmassiv und Holzrahmen), als auch für die Wände mit Fassade gut überein. Die Abweichungen liegen in den meisten Fällen innerhalb der Vorgaben nach ÖNORM EN ISO 12999-1:2020 für die Einzah- und Spektrum-Anpassungswerte. Somit können die Messdaten aus den beiden Prüfständen gut verglichen werden.

Neben der Einzahangaben zeigen auch die Frequenzverläufe zumeist eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der unterschiedlichen Größenverhältnisse der Prüfstände und auch der Bauteile, sind jedoch tieffrequent teils größere Unterschiede ersichtlich. Weitere systematische Messungen sind notwendig, um die noch offenen Fragestellungen zu klären. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Messungen, die bis 25 Hz ausgeführt wurden. Diese wurden nur im XL-PS an unterschiedlichen Wandgrößen durchgeführt. Im tieffrequenten Bereich waren auch hier große Differenzen ersichtlich. In den meisten Fällen zeigen die kleineren Bauteile bei 25 Hz eine deutlich höhere Schalldämmung gegenüber den größeren. Der Fokus dieser Untersuchungen lag auf dem tieffrequenten Bereich, deshalb wurden die anderen Bereiche nicht weiter diskutiert. Bei allen Fassaden zeigt sich tieffrequent eine eher geringe Luftschalldämmung, was zum einen auf die geringen Massen der Leichtbauteile und zum anderen auf die Resonanzfrequenzen im Bereich zwischen 50 Hz und 100 Hz zurückzuführen ist. Das heißt für eine bessere tieffrequente Schalldämmung sollten die Bauteile noch weiter optimiert werden.

In Tabelle 6 sind die diskutierten Einzahwerte mit den normativen und den zusätzlich berechneten Anpassungswerten für den erweiterten Frequenzbereich zusammengefasst. Bei Betrachtung der Summen von $R_w + C_{50}$ bzw. $R_w + C_{25}$ zeigen sich keine Unterschiede in den jeweiligen Varianten. Das bedeutet, dass C_{50} und C_{25} in den untersuchten Varianten gleich groß ist. Die Schalldämmung wird auf das bewertete Schalldämm-Maß (ohne Anpassung) bezogen. Mit den beiden Anpassungswerten C_{50} und C_{25} verringert sich die tieffrequente Schalldämmung im Bereich von 0 dB bis 4 dB je nach Aufbau. Werden die auf den Verkehr bezogenen Anpassungswerte $C_{tr,50}$ und $C_{tr,25}$ betrachtet, ergeben sich deutlich höhere Minderungen im Bereich von 4 dB bis 14 dB. Das heißt bei Anwendung des Spektrums für die C_{tr} -Werte werden die tieffrequenten Schalldämmungen deutlich stärker herabgesetzt.

Der Vergleich der Rahmen- mit der Adaptergröße (ca. 10 m² zu ca. 20 m²) ergibt für die Holzrahmengrundwandaufbauten keine Unterschiede. Bei den beiden Aufbauten mit Nut+Feder-Fassade fällt die tieffrequente Schalldämmung der kleineren Wand im Adapterrahmen (Adp.) gegenüber der großen Wand (XL) um 2 dB günstiger aus. Im Fall der HR-Wand ist das eindeutig auf den Bereich unter 100 Hz zurückzuführen, da das bewertete Schalldämmmaß beider Messungen gleich ist. Im Fall der Holzmassivwand ist das etwas anders; die Grundwände ohne und mit Rhombusleisten-Fassade im Einzahwert um 0 dB bzw.

1 dB differieren und können somit noch gut verglichen werden. Bei diesen Aufbauten ist die tieffrequente Schalldämmung unabhängig von der Wandfläche gleichwertig. Die Unterschiede von $C_{tr,50}$ zu $C_{tr,25}$ betragen 0 dB bis 1 dB abhängig vom Aufbau. Auch bei den auf den Verkehr bezogenen Spektrum-Anpassungswerte weist die kleinere Wand im Adapterrahmen (Adp.) 1 dB bzw. 3 dB günstigere Werte auf als die große Wand (XL).

Bei der Holzmassivwand mit der Nut+Feder-Fassade ergeben sich abhängig von der Bauteilgröße Unterschiede im Einzahlwert von 4 dB und 5 dB. Daher ist in diesem Fall ein Vergleich nur bedingt sinnvoll. Werden die Anpassungswerte betrachtet, ergeben sich geringere Unterschiede zwischen den beiden Größen. Das heißt bei Berücksichtigung von C_{50} und C_{25} zeigen sich kaum Abweichungen für die Varianten Grundwand ohne und mit Rhombusleisten-Fassade. Im Frequenzverlauf waren sehr wohl Unterschiede erkennbar, wobei sich diese bei der Einzahlbildung inkl. Spektrum-Anpassungswerte relativieren. Im Fall der Nut+Feder-Fassade zeigt die große Bauteilfläche (XL) die günstigere Schalldämmung, mit einem um 2 dB bzw. 3 dB höheren bewerteten Schalldämm-Maß. Bei den C_{tr} -Werten treten die höhere tieffrequente Schalldämmung bei der kleinen Wand im Adapterrahmen (Adp.) auf, wie dies auch bei der Holzrahmenwand zu beobachten war.

Tabelle 6: Vergleich der bestimmten Einzahlwerte mit und ohne Anpassungswerte mit den zusätzlich bestimmten Anpassungswerten C_{25} und $C_{tr,25}$

Lfm.	Messnr.	Variante	R_w	+ C_{50}	+ C_{25}	+ $C_{tr,50}$	+ $C_{tr,25}$
			in dB				
1	M0.0-XL-25Hz	HR (GW), XL	39	38	38	31	30
2	M8-XLA-25Hz	HR (GW), Adp	39	38	38	32	31
3	M1.1.0-XL-25Hz	HR + N+F (hl), XL	42	39	39	30	30
4	M9-XLA-25Hz	HR + N+F (hl), Adp	42	41	41	34	33
5	M1.0.0-XL-25Hz	HR + N+F (st), XL	45	41	41	31	31
6	M10-XLA-25Hz	HR + N+F (st), Adp	45	43	43	35	34
7	M0.0-XL-25Hz	HM (GW), XL	33	33	33	29	28
8	M1-XLA-25Hz	HM (GW), Adp	33	33	33	29	28
9	M1.0.0-XL-25Hz	HM + RH (teil), XL	46	45	45	39	37
10	M4-XLA-25Hz	HM + RH (teil), Adp	45	45	45	39	38
11	M1.0.1-XL-25Hz	HM + RH (voll), XL	47	46	46	38	37
12	M5-XLA-25Hz	HM + RH (voll), Adp	46	46	46	40	39
13	M2.1.0-XL-25Hz	HM + N+F (hl), XL	47	46	46	36	35
14	M6-XLA_25Hz	HM + N+F (hl), Adp	43	43	43	36	36
15	M2.0.0-XL-25Hz	HM + N+F (st), XL	49	46	46	36	35
16	M7-XLA-25Hz	HM + N+F (st), Adp	44	44	44	36	36

4 Ausblick

In diesem Forschungsprojekt wurden diverseste Konstruktionsdetails untersucht, die allesamt einen Einfluss auf die Schalldämmung von Holzfassaden haben. Es hat sich gezeigt, dass einige Parameter einen überschaubaren Einfluss ausüben, während andere eine deutliche Verbesserung hervorrufen können. Der Einfluss praxisrelevanter Konstruktionsdetails auf die Schalldämmung, wie z.B. Holzart, Belüftungsquerschnitt oder der Abstand bei Leistenfassaden, ist nicht maßgeblich. Im Gegensatz dazu wurden im Kapitel 3.5 diverse Optimierungsansätze aufgezeigt, die das Potential haben, die Schalldämmung signifikant zu verbessern. Vor allem die Beschwerung der Fassade und/oder die entkoppelte Montage zeigten großes Potential und sollten weiterführend untersucht werden. Auch der Einfluss der Unterkonstruktion aus Aluminium sollte in einem weiterführenden Projekt untersucht werden, da dies durchaus einen positiven Einfluss haben kann. Des Weiteren wirkt sich eine absorbierende Schicht in der Belüftungsebene sehr positiv auf die Luftschalldämmung aus.

Es wurden Ansätze aufgezeigt, die das Schalldämm-Maß von leichten Holzfassaden signifikant erhöhen; die praktische Umsetzbarkeit dieser muss aber jedenfalls noch untersucht werden. Weiters ergaben auch unscheinbare Konstruktionsdetails wie die Montage/Verschraubung der Fassade mit der Grundwand oder die Anordnung der Konterlattung Unterschiede im frequenzabhängigen Schalldämm-Maß, die jedenfalls bei der Konstruktion beachtet werden müssen.

5 Literatur

- [1] *Elmar, S.*: Schallschutz mit Fassaden – Teil 1: Der Einfluß hinterlüftbarer Fassaden auf die Schalldämmung von Massiv-Außenwänden zum Nachweis nach DIN 4109. *In*: Bauphysik 16 (1994), Heft 2, S. 48-52.
- [2] *Elmar, S.; Georg, E.*: Schallschutz mit Fassaden – Teil 2: Der Einfluß konstruktiver Parameter auf die Schalldämmung, Hinweise zur schalltechnischen zweckmäßigen Ausführung. *In*: Bauphysik 17 (1995), Heft 6, S. 179-184.
- [3] *Eßer, G.; Keil, M.*: Schalldämmung mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. *In*: Bauphysik 44 (2022), Heft 2, S. 73-85.
- [4] *Holtz, F.; Rabold, A.; Hessinger, J. et al.*: Hochschalldämmende Außenbauteile aus Holz. Labor für Schall- und Wärmemesstechnik, Rosenheim Ausgabe 2004.
- [5] *Nusser, B.; Stenitzer, A.; Lux, C. et al.*: Schutz.aufs.Dach - Schallschutz aufdachgedämmter Dächer in Holzbauweise, Wien Ausgabe 2023.
- [6] *Schober, P.; Koch, C.; Maximilian, N. et al.*: Fassaden aus Holz: proHolz-Information, ProHolz Information, proHolz Austria, Wien, 2018.
- [7] 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung. ÖNORM EN ISO, Ausgabe 2021.
- [8] *Dolezal, F.; Neusser, M.; Teibinger, M.*: Akustik Center Austria - neue Prüf- und Forschungskompetenz für Holzkonstruktionen in Österreich mit Fokus auf tiefe Frequenzen. *In*: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Hrsg.): DAGA 2016 – 42. Jahrestagung für Akustik, Aachen, 2016, 413-414.
- [9] 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil1: Luftschalldämmung. ÖNORM EN ISO, Ausgabe 2021.
- [10] *Ljunggren, F.; Simmons, C.; Hagberg, K.*: Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound. *In*: Applied Acoustics 85 (2014), S. 57-68.

6 Messprotokolle

----- Projektintern-----



**HOLZ
FORSCHUNG**
AUSTRIA

**Cooler Hülle -
Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen
Klimawandel und Technik**

AP4: Leise Fassade -
Bauakustische Simulationen

Anhang 4 zum Endbericht

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: F518

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autoren

DI Alexander Stenitzer (HFA)

Dr. Maximilian Neusser (TU Wien)

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Material und Methoden.....	5
1.1	Prüfkörper	5
1.2	Simulationsmodell.....	6
1.2.1	Schalldämmmaß [3].....	7
1.2.2	Struktur [3]	8
1.2.3	Kopplung Fluid – Struktur [1]	9
1.2.4	Dämmstoff [3]	9
1.2.5	Schraubenmodell.....	10
1.2.6	Dynamische Materialkennwerte.....	11
1.2.7	Fassade	12
1.2.8	Luftraum.....	13
1.2.9	Einspannung.....	15
1.2.10	Netzauflösung.....	16
2	Ergebnisse und Diskussion.....	17
2.1	Messergebnisse.....	17
2.2	Validierung des Simulationsmodells.....	19
2.2.1	Dämmstoff.....	19
2.2.2	Dynamische Materialkennwerte.....	20
2.2.3	Fassade	21
2.2.4	Luftraum.....	23
2.2.5	Einspannung.....	23
2.2.6	Netzauflösung.....	24

2.3	Gegenüberstellung von Simulation und Messung.....	27
3	Zusammenfassung.....	32
4	Literatur	34

1 Material und Methoden

Im Zuge des Arbeitspakets 4 des Forschungsprojektes wurden ergänzend zu den bauakustischen Messungen mittels FEM („Finite Elemente Methode“) Simulationen durchgeführt. Die simulierten Bauteile sowie die angewandten Modellierungsansätze werden in diesem Kapitel beschrieben.

1.1 Prüfkörper

Im Rahmen der bauakustischen Simulationen wurden zwei verschiedene Wandtypen untersucht, darunter zwei Holzrahmenwände in unterschiedlicher Größe und eine Betonwand. Von den simulierten Wänden wurde im Prüfstand das Schalldämm-Maß nach ÖNORM EN ISO 10140-2:2021 [1] inkl. Bewertung nach EN ISO 717-1 [2] bestimmt. Die Wandaufbauten sind in den nachstehenden Tabellen 1 bis 3 aufgelistet. Es wurde jeweils das Schalldämm-Maß R in Terzbandauflösung der Grundwand ohne Fassade (farblich in den Tabellen hervorgehoben) und die gesamte Außenwandkonstruktion gemessen. Somit ergeben sich sechs Messungen, die der Simulation gegenübergestellt werden. Das angewandte Messverfahren und der Prüfstand ist in Anhang A3 beschrieben.

Tabelle 1: Aufbau der untersuchten Holzrahmenwand in der Fensteröffnung (Prüffläche = 1,8 m²).

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung (Fensteröffnung)

19,0 mm	Nut-Feder Lärchenschalung (vertikal)
30,0 mm	Traglattung (30 × 50) mm ² , e = 700 mm
30,0 mm	Konterlattung (30 × 50) mm ² , a = 700 mm
16,0 mm	MDF, geschraubt mit a = 50 mm
240,0 mm	Holzrahmen (60 × 240) mm ² , e = 600 mm, mit
240,0 mm	Dämmung (MW)
15,0 mm	OSB, geschraubt mit a = 50 mm
345,3 mm	Gesamtdicke
59,3 kg/m²	flächenbezogene Masse
1,8 m²	Prüffläche

Tabelle 2: Aufbau der untersuchten Holzrahmenwand (Prüffläche = 10,8 m²).

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung	
19,0 mm	Nut-Feder Lärchenschalung (vertikal)
30,0 mm	Traglattung (30 × 50) mm², e = 500 mm
30,0 mm	Konterlattung (30 × 50) mm², a = 600 mm
0,3 mm	Fassadenbahn
16,0 mm	MDF, geschraubt mit a = 50 mm
240,0 mm	Holzrahmen (60 × 240) mm², e = 625 mm, mit
240,0 mm	Dämmung (MW)
15,0 mm	OSB, geschraubt mit a = 50 mm
345,3 mm	Gesamtdicke
56,3 kg/m²	flächenbezogene Masse
10,8 m²	Prüffläche

Tabelle 3: Aufbau der untersuchten Betonwand (Prüffläche = 10,8 m²).

Betongrundwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung	
19,0 mm	Nut-Feder Lärchenschalung (vertikal)
30,0 mm	Traglattung (30 × 50) mm², e = 500 mm
30,0 mm	Konterlattung (30 × 50) mm², a = 600 mm
0,3 mm	Fassadenbahn
200,0 mm	Holzrahmen (60 × 200) mm², e = 625 mm, mit
200,0 mm	Dämmung (MW)
150,0 mm	Betonwand
429,3 mm	Gesamtdicke
419,3 kg/m²	flächenbezogene Masse
10,8 m²	Prüffläche

Im Zentrum der Untersuchungen standen die Holzrahmenwände sowie das Modellieren des Fassadenschirms. Aufgrund deren hoher Komplexität lag der Fokus der Simulation zunächst auf der Holzrahmenwand in kleinem Maßstab (Fensteröffnung) mit den Abmessungen (1250 × 1500) mm². Die Validierung des Simulationsmodells fußte auf den ermittelten Eigenschaften der tatsächlich eingebauten Materialien. Weiters konnte die Auswirkung einzelner Parameter abgeschätzt werden und Erfahrungen für die notwendige Detailierung sowie Netzauflösung (vgl. Abschnitt 1.2.10) der großen Wandmodelle gesammelt werden.

1.2 Simulationsmodell

Die Grundlagen des Simulationsmodells, insbesondere die zu [3] abweichenden Modellierungsansätze, werden wie folgt beschrieben. Die Modellierung und Simulation

erfolgte mit der Software „COMSOL 6.1“. Für die Beschreibung weiterer Details zu den Modellierungsansätzen wird auf [3] verwiesen.

1.2.1 Schalldämmmaß [3]

Das Schalldämmmaß R (oder Schalltransmissionsverlust) einer Wand ist wie folgt definiert:

$$R = \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

Der Schalltransmissionsgrad τ ist das Verhältnis aus der durch das Schallfeld in einem Senderaum resultierenden auf die Wand einfallenden Schallintensität I_i und der von der Wand in einen Empfangsraum abgestrahlten Schallintensität I_e .

$$\tau = \frac{Re(I_i)}{Re(I_e)}$$

Diese Definition stellt insbesondere die numerische Simulation vor größere Herausforderungen, da neben der eigentlichen Struktur des zu untersuchenden Bauteils auch Sende- und Empfangsraum und deren akustischen Oberflächeneigenschaften zu berücksichtigen sind. Ebenso ist in der Regel das gemessene Schalldämmmaß nach ÖNORM EN ISO 10140-2:2021 [1] gerade bei tiefen Frequenzen von der Lautsprecherposition und des resultierenden modalen Schallfeldes abhängig. Die Grenzfrequenz für den üblicherweise ca. 50 m³ großen Empfangsraum liegt nach [4] bei ca. 270 Hz. Für eine möglichst fehlerfreie Abbildung der Messsituation ist daher der Senderaum und dessen Eigenschaften ganzheitlich innerhalb der Simulation abzubilden. Dadurch sind in Relation zu den interessierenden BiegeWellenlängen sehr große Domänen zu diskretisieren, wodurch ein hoher Berechnungsaufwand entsteht. Um dieses Problem zu lösen kennt die Literatur verschiedene Ansätze [5, 6].

In dieser Arbeit wird das nicht diffuse Schallfeld im tiefen Frequenzbereich, der Einfluss des Raumes und der Lautsprecherposition nicht berücksichtigt. Das auf das Bauteil einfallende Schallfeld im Senderaum wird als homogenes, isotropes und diffuses Schallfeld beschrieben. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, dass das diffuse Schallfeld auf der Senderaumseite des Bauteils als Summe von N unkorrelierten ebenen Wellen mit gleichförmig zufällig verteilten Einfallswinkeln φ_n , θ_n beschrieben werden kann. Die Druckverteilung $p_{Raum}(x, y, z)$, als Grundbedingung in der FEM Simulation kann also wie folgt berechnet werden:

$$p_{Bauteil} = p_{Raum} + p_{Reflexion}$$

Unter der Annahme, dass das Bauteil selbst schallhart ist, kann die reflektierende Komponente des Schalldruckfeldes am Bauteil wie folgt berechnet werden:

$$p_{Raum} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{-i(k_{n,x}x + k_{n,y}y + k_{n,z}z)} e^{i\Phi_n}$$

Mit

$$k_{n,x} = \cos(\theta_n)$$

$$k_{n,y} = \sin(\theta_n) \cos(\varphi_n)$$

$$k_{n,z} = \sin(\theta_n) \sin(\varphi_n)$$

Die Oberflächen des Empfangsraums werden dabei absorbierend modelliert, was bedeutet, dass keine Rückkopplung zwischen Bauteil und an der Empfangsraumoberfläche reflektierten Schallwellen besteht. Damit kann der Empfangsraum als unendlicher Halbraum modelliert werden. Innerhalb der FEM Umgebung erfolgt dies mittels Luftvolumen, das mittels PML („Perfect Matched Layer“) eingefasst ist. Dieser Rand kann als absorbierende Randbedingung für die Luftdomäne angesehen werden. Es findet somit keine Reflexion des vom Bauteil abgestrahlten Schallfeldes an dem Rand des Luftvolumens statt. Zur Implementierung in die FEM und der mathematischen Beschreibung der Eigenschaften des PML wird auf [7] verwiesen.

Eine volle Diskretisierung des Raumvolumens auf der Sende- und der Empfangsraumseite ist somit nicht notwendig. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Situation, die innerhalb der FEM Umgebung abgebildet wurde.

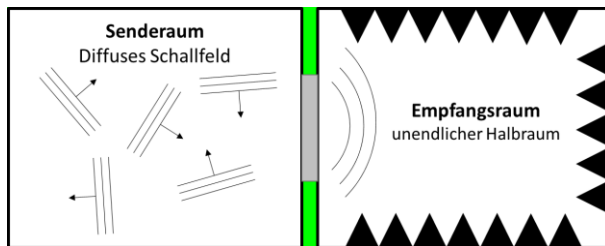


Abbildung 1: Schematische Darstellung der innerhalb der FEM Umgebung modellierten Schallfelder in Sende- und Empfangsraum

1.2.2 Struktur [3]

Für das strukturelle System wird die Struktur durch die Differentialgleichung der Bewegung für einen Kontinuumskörper beschrieben, wobei kleine Deformationen angenommen werden. Ausgehend von der Navier Gleichung im Equilibrium kann nach [7] die Bewegungsgleichung mithilfe des Differenzialoperators B wie folgt in Matrizen Schreibweise dargestellt werden.

$$f_V + B^T \sigma = \rho a$$

mit

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \end{pmatrix}^T ; \sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} ; a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} ; u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Wobei σ den Spannungstensor nach Cauchy, a die Beschleunigung des Festkörpers und f_V die Summe der äußeren Kräfte darstellt. Die Modellierung des strukturellen Materialverhaltens beruht auf der Annahme, dass die Werkstoffe sich linear elastisch und isotrop verhalten. Für solche Materialien lässt sich der Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen über das Hooksche Gesetz definieren. Die berücksichtigte innere Dämpfung des Materials wird über ein komplexes E-Modul beschrieben. Dieses Modell entspricht einer Strukturdämpfung mittels isotropen Verlustfaktors η . Dabei kann das komplexe E-Modul E des Materials wie folgt beschrieben werden:

$$E = E(1 + i\eta)$$

1.2.3 Kopplung Fluid – Struktur [1]

Grundlegend erfolgt die Kopplung von Struktur und Fluid an der gemeinsamen Grenze ihrer beiden Domänen durch ein vorausgesetztes Kräftegleichgewicht und einer Kontinuitätsbedingung. Die erste Bedingung zur Kopplung von Fluid und Struktur folgt aus dem bedingten Gleichgewicht zwischen Schalldruck p_f des Fluids und der Normalkomponente σ_n der mechanischen Spannungen der Wand an der Grenzfläche.

$$\sigma_n = -np_f$$

Die zweite Bedingung folgt aus der Anforderung der Kontinuität an der Grenze zwischen Struktur und Fluid und bedingt, dass die Normalkomponenten der Geschwindigkeiten der Strukturoberfläche v und die der des Fluids v_f an der Grenzschicht gleich groß sind und kann wie folgt dargestellt werden [7]:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} \quad v_f = -\nabla \psi$$

$$\mathbf{n} \cdot (v - v_f) = 0$$

$$\mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{n} \cdot \nabla \psi$$

1.2.4 Dämmstoff [3]

Es wurden unterschiedliche Modelle zur Modellierung der Schallübertragung im Ständerzwischenraum untersucht. Eine Modellierung der Schallübertragung über den Hohlraum dieser Konstruktion bedarf somit einer geeigneten Modellierung der Schalltransmission und des akustischen Verhaltens solcher Dämmstoffe. Aufgrund der feingliedrigen Struktur dieser Materialien ist es in der Regel nicht möglich, diese Strukturen und die Wechselwirkung zwischen Luft und Fasern in der FEM aufzulösen. Eine Möglichkeit, das Verhalten solcher Materialien in Simulationsmodellen abzubilden, ist die Darstellung als äquivalentes Fluid, dessen Eigenschaften durch das Fluid in der porösen Struktur und durch die der porösen Struktur selbst bestimmt werden. Die Implementierung des äquivalenten

Fluids mit dessen Eigenschaften der komplexen Schallgeschwindigkeit c_c , der äquivalenten Dichte ρ_c und des effektiven Kompressionsmoduls K_{eff} erfolgt analog zu Abschnitt 1.2.8.1.

$$\rho_c = \rho_{rig}$$

$$c_c = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{rig}}}$$

Die meisten, der in der Literatur präsentierten porösen Materialmodelle, stellen dabei den Strukturrahmen als starr dar [8]. Einen unterschiedlichen Ansatz bietet [9], in dem die Mikrostruktur des Materials schlaff modelliert wird. In [10] wird ein Vergleich dieser beiden Modellierungsansätze in unterschiedlichen Frequenzbereichen verfolgt. Es konnte allerdings keine klaren Vor- bzw. Nachteile der unterschiedlichen Ansätze herausgearbeitet werden. Das Modell Johnson-Champoux-Allard (JCA), das in der zugrunde liegenden Arbeit verwendet wurde, geht von einer starren porösen Struktur aus [8], die durch die komplexen Kenngrößen der Dichte ρ_{rig} und des Kompressionsmoduls K_{eff} beschrieben wird.

$$\rho_{rig} = \frac{\tau_\infty \rho_f}{\varepsilon_p} \left[1 + \frac{R_f \varepsilon_p}{i\omega \rho_f \tau_\infty} \sqrt{1 + \frac{4i\omega \tau_\infty^2 \mu \rho_f}{R_f^2 L_v^2 \varepsilon_p^2}} \right]$$

$$K_{eff} = \frac{\gamma p_A}{\varepsilon_p} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\mu}{i\omega L_{th}^2 Pr \rho_f} \sqrt{1 + \frac{i\omega L_{th}^2 Pr \rho_f}{16\mu}} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$L_v = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8\mu \tau_\infty}{\varepsilon_p R_f}}$$

τ ist der Porositätskrümmungsfaktor, L_v ist die viskose charakteristische Länge, L_{th} ist die thermisch-charakteristische Länge. Weitere Modelle zur Beschreibung der Schallausbreitung in porösen Medien werden z.B. in [10–14] dargestellt.

1.2.5 Schraubenmodell

Die Schraubverbindung zwischen Bauteilen wird durch eine starr punktuelle Verbindung an ihrer tatsächlichen Lage im Modell repräsentiert. In den Referenzen [3] wurde gezeigt, dass die Modellierung der Schraubenverbindung als fixe punktuelle Verbindung zu einem übermäßig steifen Verhalten führt. Aufgrund der Anzahl der Verbindungen in der Fassade, einschließlich der Schraubverbindungen im Grundbauteil, stellt die Verwendung dieses Schraubenmodells jedoch einen notwendigen Kompromiss dar, um die allgemeine Reduktion der Komplexität des Simulationsmodells zu erreichen. Ebenso waren die genauen Anzugsmomente der verwendeten Schrauben nicht bekannt und konnten daher nicht als Eingangsgröße für die Modellierung dienen. In Abbildung 2 ist die Position der

Schraubenverbindungen als schwarzer Punkt innerhalb der Berechnungsumgebung für das Holzrahmenbauteil mit vorgehängter Fassade dargestellt.

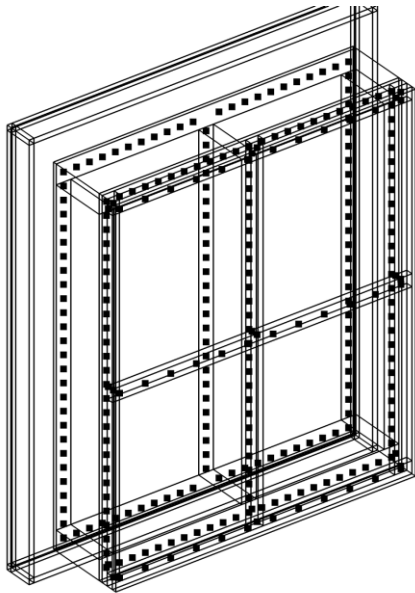


Abbildung 2: Geometrie und die als Punkte dargestellten Schraubverbindungen in der Wandkonstruktion mit vorgehängter Fassade innerhalb der Simulationsumgebung

1.2.6 Dynamische Materialkennwerte

Als Eingangsdaten für die Simulation wurden im Zuge von Schwingungsversuchen die dynamischen Eigenschaften

- Verlustfaktoren (frequenzabhängig)
- Dynamische Biege-E-Moduli von stabförmigen Werkstoffen (frequenzabhängig)
- Dynamische Biege-E-Moduli von Plattenwerkstoffen

bestimmt.

Die hierfür verwendeten stabförmigen Probekörper hatten eine Länge von 1800 mm. Die Plattenwerkstoffe OSB bzw. MDF hatten die Abmessungen 1500 × 1250 mm bzw. 1500 × 625 mm. Die ebenfalls als Plattenwerkstoff modellierte vorgehängte Fassade hatte die Abmessungen 1500 × 1250 mm.

Die eingesetzten Materialien wurden in einer dafür angefertigten Konstruktion (vgl. [3]) elastisch aufgehängt. In Abbildung 3 ist das Fassadenelement in Fenstergröße hängend in der Konstruktion zu sehen. Im Vordergrund ist der Scankopf des für die Messung Oberflächenschnelle verwendete Laservibrometer zu sehen.



Abbildung 3: Zur Ermittlung der Materialeigenschaften wurden die Bauteile elastisch aufgehängt und die Schwingungen mittels Laservibrometrie gemessen.

Für die Ermittlung der dynamischen E-Moduli wurden die Bauteile anschließend mittels elektrodynamischem Schwingungserreger und weißem Rauschen angeregt. Die Oberflächenschnelle wurde mittels Laservibrometrie bestimmt. Aus den erzeugten Schwingungsbildern konnten die Frequenzen der Eigenmoden der Werkstoffe bestimmt werden. In Abschnitt 2.2.2 sind die ermittelten Eigenmoden der untersuchten OSB dargestellt. Anhand dieser wurden die dynamischen E-Moduli nach [15] berechnet.

Die Verlustfaktoren (vgl. Abschnitt 1.2.2) wurden in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 10848-1:2017 [16] ermittelt. Die geforderten Abstände zur Quelle und zum Rand aufgrund der Dimension der Probekörper konnten nur teilweise eingehalten werden. Die gemessene Körperschallnachhallzeit T_s pro Terzband wurde anschließend wie folgt in Verlustfaktoren umgerechnet.

$$\eta = \frac{2,2}{fT_s}$$

Die Modellierung der Fassade ist in Abschnitt 1.2.7 näher beschrieben.

1.2.7 Fassade

Die Fassade wird in dem Modell als orthotrope Platte (Schalung) und isotrope Balken (Traglatten), wie in Abbildung 4 dargestellt, beschrieben. Die dynamischen Eigenschaften wurden aus Schwingungsmessungen (vgl. Abschnitt 1.2.6) bestimmt. Während die dynamischen Eigenschaften der Lattung sowie der Schalungsbretter in Längsrichtung gemessen werden konnten, war es nicht möglich, die Steifigkeit quer zur Ausrichtung der Nut-Feder-Verbindung zu messen. Die Messung des gesamten Fassadenelements wird in

diese Richtung nämlich maßgeblich durch die Steifigkeit der Traglattung beeinflusst. Die Steifigkeit der Nut-Feder-Verbindung liegt mutmaßlich deutlich darunter. Um diese im Modell abzubilden, wurde anhand des Fassadenmodells eine Parameterstudie mit unterschiedlichen Steifigkeiten der Nut-Feder-Verbindung durchgeführt. Anschließend wurde die gemessene Übertragungsfunktion zwischen einem Anregungspunkt und der mittleren Schnelle auf der Bauteilaußenseite der Simulation gegenübergestellt und parametrisch die Steifigkeit bestimmt.

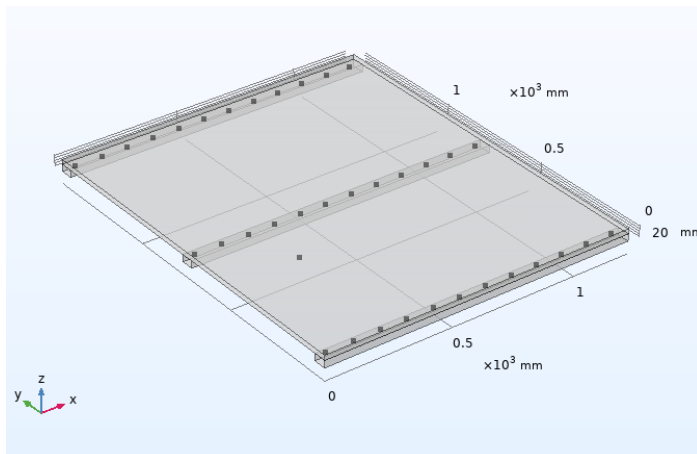


Abbildung 4: Geometrie der Fassadenkonstruktion und die als Punkte dargestellten Schraubverbindungen.

1.2.8 Luftraum

1.2.8.1 Stehende Luftschichten „geschlossen“ [3]

Die Luftschicht zwischen Fassade und Grundbauteil wird in dem Modell als Fluid Domäne abgebildet. Somit werden die Druckschwankungen und die Ausbreitung von Schallwellen in Form von Longitudinalwellen unter ruhigen Hintergrundbedingungen (keine Konvektion) berechnet. Dabei wird die Helmholtz-Gleichung gelöst, womit sich das Berechnungsmodell für alle Simulationen in der Frequenzdomäne mit harmonischen Variationen des Druckfeldes eignet. Die Differenzialgleichung des Fluids kann zur Beschreibung des mechanischen Feldes aus der Bewegungsgleichung, den kinematischen Beziehungen und dem Stoffgesetz unter folgenden Annahmen hergeleitet werden [7]:

- Das Fluid ist nicht viskos
- Das Fluid unterliegt nur kleinen Verschiebungen
- Das Fluid ist rotationsfrei
- Das Fluid ist kompressibel

Damit können die zugrundeliegenden partiellen Differentialgleichungen wie folgt angeschrieben werden:

$$\frac{\partial^2 p_f}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 p_f = c_0^2 \frac{\partial q_f}{\partial t}$$

Dabei stellen p_f den dynamischen Druck, q_f den hinzugefügte Massenfluss und c_0 die Schallgeschwindigkeit im Fluid dar.

1.2.8.2 Luftschichten „offen“ [3]

Die Luftschicht zwischen der Fassade und dem Grundbauteil ist in der Regel nicht geschlossen („stehende Luftschicht“), sondern an den oberen und unteren horizontalen Bauteilkanten geöffnet. Dies gewährleistet positive Eigenschaften im Hinblick auf den Feuchteschutz dieser Ebene (vgl. Anhang 1). Allerdings weicht die akustische Charakteristik einer solchen geöffneten Luftschicht, wie in Abbildung 5 dargestellt, von der einer geschlossenen Luftschicht ab.

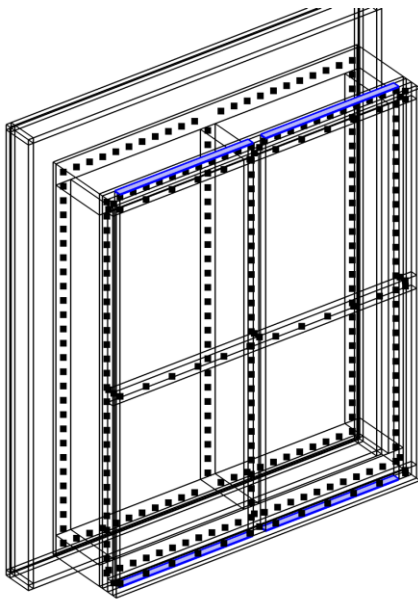


Abbildung 5: Darstellung der Randbedingungen innerhalb der Berechnungsumgebung die eine geöffnete Fassade als Randbedingung abbilden sollen (blaue Markierung)

Die Modellierung dieser Öffnung stellt aufgrund ihrer im Verhältnis zum Gesamtbauteil kleinen Geometrie eine besondere Herausforderung dar. Um die in Abbildung 13 gezeigten frequenzabhängigen Einflüsse dieser Öffnung auf das Schalldämm-Maß der Gesamtkonstruktion abzubilden, wurden verschiedene vereinfachte Ansätze an den blau dargestellten Rändern in Abbildung 5 gewählt.

- "Absorbierend": An den Öffnungen der Luftschicht wurde eine Randbedingung gewählt, die zu keinerlei Schallreflexion führt. Dadurch wird der entlang dieser Ränder von der Fassade oder dem Grundbauteil abgestrahlte Luftschall, ähnlich wie bei einer tatsächlichen Öffnung der Luftschicht, nicht reflektiert. Dieser Anteil trägt somit nicht mehr zur Schallübertragung durch das Wandbauteil bei.
- "Druck": An den Öffnungen der Luftschicht wird äquivalent zum Vorgehen für die Fassade (siehe Abschnitt 1.2.1) der aus dem "Senderraum" aufgebrachte

Schalldruck berechnet. Auf diese Weise wird die Schallübertragung über die Öffnungen der Luftschicht aus dem "Senderraum" berücksichtigt.

1.2.9 Einspannung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden keine weiteren Untersuchungen zum Einfluss und zur genauen Einspannsituation des Bauteils im Prüfraum durchgeführt. Die Verbindung des Prüfstands mit den Holzrahmenbauteilen wurde an 4 Punkten als starre, punktuelle Verbindung angenommen (siehe Abbildung 6). Abhängig von dieser Randbedingung können insbesondere im tiefen Frequenzbereich erhebliche Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Schalldämm-Maßen auftreten [3].

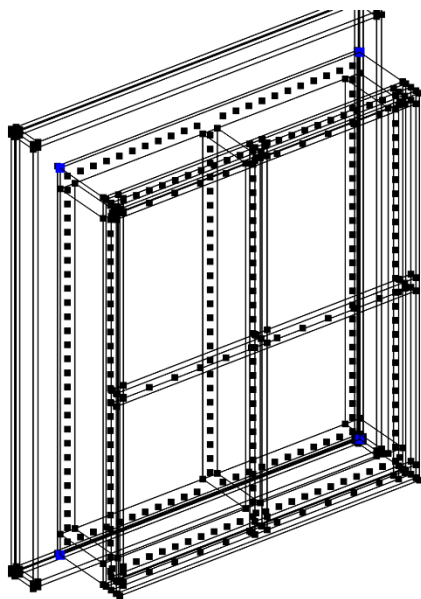


Abbildung 6: Darstellung der starren, punktuellen Verbindung zwischen Prüfraum und der Holzrahmenwand in Fenstergröße (blaue Punkte).

Die Betonwand wurde anders als die Leichtbauteile wie in Anhang 3 beschrieben und laut [1] vorgesehen am Prüfstand baulich angekoppelt. Im Modell wurde für die Betonwand deshalb angenommen, dass die vier Außenflächen der Wand starr eingespannt sind (vgl. Abbildung 7). In den Ergebnissen in Abschnitt 2.2.5 wird gezeigt, inwieweit sich bei der Betonwand diese Einspannung von der punktuellen Einspannung der Holzrahmenwände auf das Simulationsergebnis auswirkt.

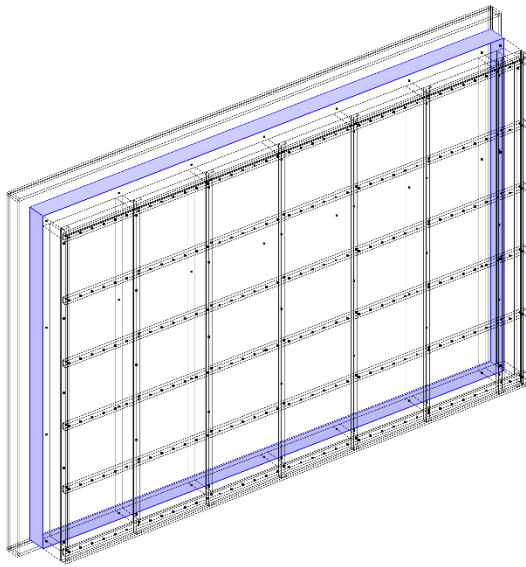


Abbildung 7: Darstellung der starren, flächigen Verbindung zwischen Prüfrahm und Betonwand (blaue Flächen).

1.2.10 Netzauflösung

Die notwendige Netzauflösung des Modells der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße wurde parametrisch untersucht. Die Auflösung wurde mit den in der verwendeten Software „COMSOL 6.1“ vorliegenden Einstellungen von „coarse“ bis „extremely fine“ stufenweise erhöht. Die minimalen Elementgrößen entsprechen dabei 47,6 mm bzw. 0,34 mm. Probleme, die sich durch zu geringe bzw. zu hohe Diskretisierung ergeben, werden in [3] geschildert. In Abschnitt 2.2.6 wird anschaulich gezeigt, wie sich die Netzauflösung auf das Schalldämm-Maß auswirkt.

2 Ergebnisse und Diskussion

In folgendem Kapitel werden zunächst die Messergebnisse der simulierten Außenwände diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulationen gezeigt und zum Abschluss den Messungen gegenübergestellt.

2.1 Messergebnisse

In nachstehender Abbildung 8 werden die Schalldämm-Maße der untersuchten Wandaufbauten (vgl. Abschnitt 1.1) pro Terzband von 50 Hz bis 5000 Hz dargestellt. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die jeweiligen Grundwände, d.h. ohne Fassade, zu sehen, während auf der rechten Seite die Ergebnisse derselben Wände mit Fassade mit stehender Luftschicht dargestellt werden. Ergänzend zu den Frequenzverläufen des Schalldämm-Maßes werden in Tabelle 4 die Einzahlwerte R_w und die Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} dargestellt.

Die Betonwand weist aufgrund der deutlich höheren flächenbezogenen Masse im Vergleich zu den Holzrahmenwänden sowohl mit als auch ohne Fassade die höchsten Schalldämm-Maße auf. Dies spiegelt sich auch im bewerteten Schalldämm-Maß R_w der Betonwand wider. Aufgrund der Zweischaligkeit der Holzrahmengrundwände kommt es zu einem Resonanzeinbruch und einem darauffolgenden steilen Anstieg im Schalldämm-Maß bei den Leichtbauwänden. Dieser Anstieg wird durch die Kopplung der Holzständer mittelfrequent limitiert. Im hochfrequenten Bereich ist bei diesen Wänden außerdem ein Einbruch zu verzeichnen, der auf die Koinzidenzgrenzfrequenz der Plattenwerkstoffe zurückzuführen ist.

Ein steiler Anstieg des Schalldämm-Maßes kann auch bei der Betonwand mit Fassade (rechts) beobachtet werden. Dieser kann wie bei den Holzrahmengrundwänden auf die Zweischaligkeit, durch die es zu einem Resonanzeinbruch und eine darauffolgende Erhöhung der Schalldämmung kommt, verursacht werden. Ein weiterer Grund für den steilen Anstieg könnte das Absorptionsverhalten des vorgesetzten Dämmstoffs vor der Betonwand sein. Die Dämmebene grenzt nämlich anders als im Gefach der Holzrahmenwände einseitig an den Luftraum der Belüftungsebene. Ergänzende Diagnosemessungen sind in Anhang A3 angeführt.

Der Vergleich der Holzrahmenwände in unterschiedlicher Größe zeigt, dass bis zu einer Frequenz von 100 Hz erhebliche Unterschiede im Schalldämm-Maß bestehen. Diese Differenzen können zum einen auf die unterschiedliche Geometrie der Bauteile und der Prüföffnungen, zum anderen auf die leicht unterschiedliche Einspannung der Wände im Prüfraum zurückgeführt werden. Ein weiterer Faktor ist, dass sich Biegewellen im tiefen Frequenzbereich auf kleinen Bauteilen nicht ausbilden können.

Ab 100 Hz ist eine gute Übereinstimmung gegeben, mit Ausnahme des Unterschieds bei 200 Hz. Dieser kann ebenfalls auf geometrische Unterschiede zurückgeführt werden. Der Unterschied der Einzahlwerte R_w lässt sich durch diesen Einbruch des Schalldämm-Maßes erklären. Sowohl mit als auch ohne Fassade liegt der Einzahlwert der Holzrahmenwand in Fenstergröße um 2 dB über jenem der großen Holzrahmenwand (vgl. Tabelle 4).

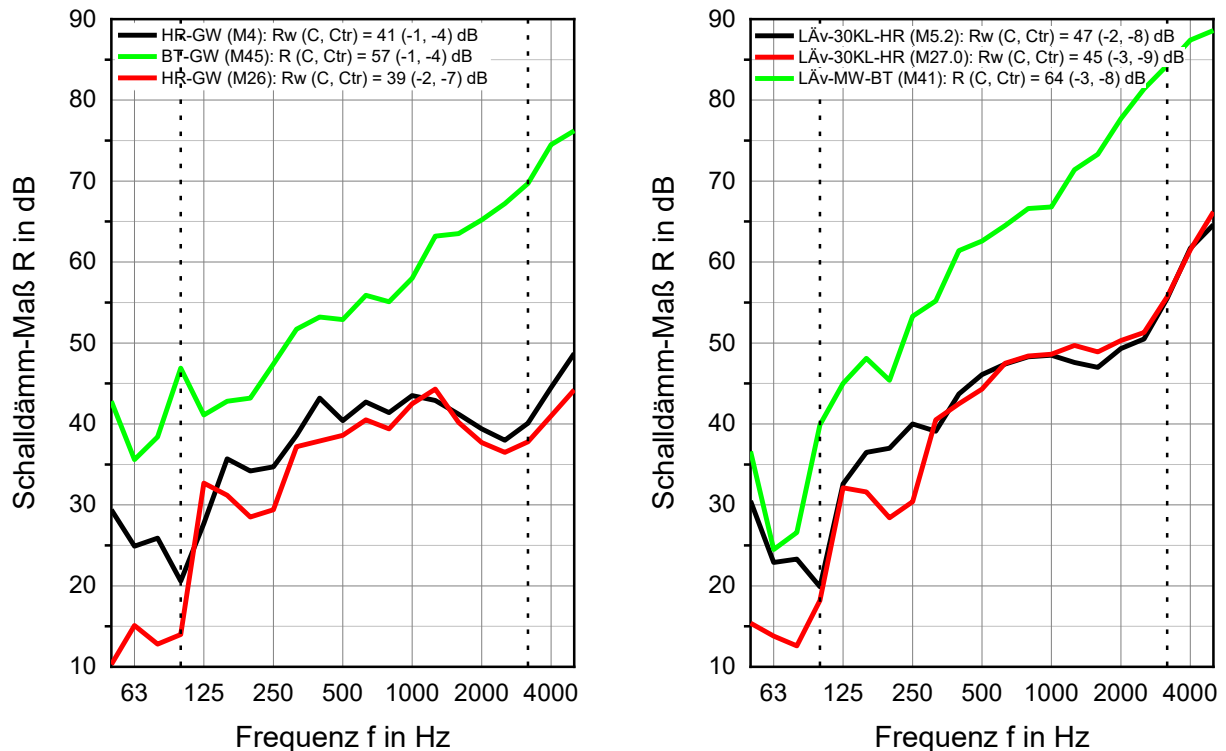


Abbildung 8: Gemessene Schalldämm-Maße der Holzrahmenwand in Fenstergröße (schwarz), der großen Holzrahmenwand (rot) und der Betonwand (grün). Links sind die Messergebnisse der jeweiligen Grundwände ohne Fassade, rechts mit Fassade dargestellt

Tabelle 4: Gemessene Einzahlwerte inkl. Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} der jeweiligen Grundwände ohne (links) und mit (rechts) Fassade.

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung (Fensteröffnung)

Ohne Fassade

R_w = **41** dB
C = **-1** dB
C_{tr} = **-4** dB

Mit Fassade

R_w = **47** dB
C = **-2** dB
C_{tr} = **-8** dB

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung

Ohne Fassade

R_w = **39** dB
C = **-2** dB
C_{tr} = **-7** dB

Mit Fassade

R_w = **45** dB
C = **-3** dB
C_{tr} = **-9** dB

Betongrundwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung

Ohne Fassade

R_w = **57** dB
C = **-1** dB
C_{tr} = **-4** dB

Mit Fassade

R_w = **64** dB
C = **-3** dB
C_{tr} = **-8** dB

2.2 Validierung des Simulationsmodells

2.2.1 Dämmstoff

Der Strömungswiderstand für den Aufbau der Grundwandkonstruktion im Ständerzwischenraum wurde nicht direkt gemessen. Daher war es erforderlich, mithilfe von Simulationsergebnissen den Einfluss dieses unbekannten Parameters auf das Prognoseergebnis zu überprüfen. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis einer Parameterstudie, bei der der Strömungswiderstand im Bereich der erwartbaren Werte von 4 kPa s/m² bis 19 kPa s/m² variiert wurde. Deutlich wird, dass der Strömungswiderstand im Frequenzbereich zwischen 63 Hz und 1000 Hz einen erkennbaren Einfluss auf das berechnete Schalldämm-Maß hat. Mit zunehmendem Strömungswiderstand ist eine Vergrößerung des Schalldämm-Maßes zu beobachten. Für die folgenden Simulationen wurde daher ein Strömungswiderstand in der Mitte des untersuchten Wertebereichs von 10 kPa s/m² gewählt.

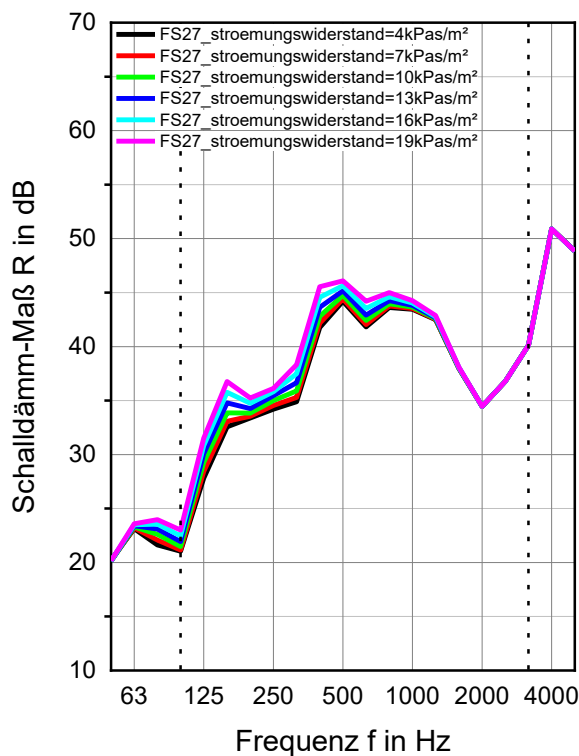


Abbildung 9: Darstellung des Einflusses des Strömungswiderstands des Dämmstoffs auf das prognostizierte frequenzabhängige Schalldämm-Maß der Holzrahmengrundwand.

2.2.2 Dynamische Materialkennwerte

Die frequenzabhängigen Verlustfaktoren der Materialien wurden wie in Abschnitt 1.2.6 beschrieben bestimmt und im Simulationsmodell übernommen. Auf die gemessenen Werte soll hier nicht näher eingegangen werden.

Für die Vollholzelemente (Ständer und Lattungen) konnten anhand der Eigenmoden stabförmiger Bauteile die dynamische Steifigkeit nach [15] frequenzabhängig errechnet werden. Für die Plattenwerkstoffe (OSB und MDF) mussten die Eigenmoden von Plattenwerkstoffen nach [15] herangezogen werden. Bei den Plattenwerkstoffen wurden die Steifigkeiten im Simulationsmodell als nicht frequenzabhängig angenommen. Bei der OSB mit einer Dimension von 1500 × 1250 mm waren die Eigenmoden (2, 2), (1, 3) und (3, 1) einer quadratischen, orthotropen Platte gut erkennbar. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist stimmten erste Simulationen der Eigenmoden einer einzelnen Platte gut mit den durch Laservibrometrie ermittelten Eigenmoden überein. Im Gegensatz dazu konnte bei der MDF-Platte mit einer Dimension von 1500 × 625 mm lediglich die Mode (2, 2) erkannt werden, anhand dessen die Steifigkeit ermittelt wurde.

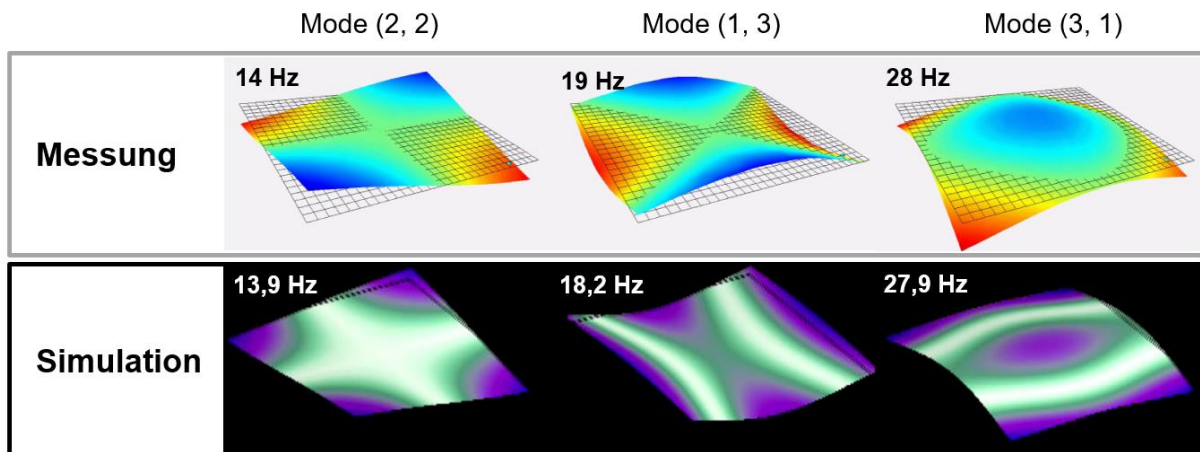


Abbildung 10: Gemessene (oben) und simulierte (unten) Eigenmoden einer OSB mit den Abmessungen 1500 × 1250 mm.

Trotz der aufgrund des Herstellungsprozesses möglichen Anisotropie der Plattenwerkstoffe [17], war diese aus den Eigenmoden nicht ersichtlich. Um mögliche Anisotropie der OSB genauer zu untersuchen, wurde anhand von Streifen mit 1500 × 100 mm (längs) und 1250 × 100 mm (quer) die Modalanalyse durchgeführt. Besonders tieffrequent (< 100 Hz) ergab sich eine Richtungsabhängigkeit. Für die Streifen quer zur Orientierung der Grobspäne konnte keine schlüssige Frequenzabhängigkeit gefunden werden. Weiters deuteten die Daten an, dass der Unterschied durch die Anisotropie bei steigender Frequenz geringer wird, weshalb die ermittelte Steifigkeit aus der Plattenmessung herangezogen wurde.

Eine weitere Modalanalyse eines MDF-Streifens mit 1500 × 100 mm ergab wie bei den Vollholzelementen und dem OSB-Streifen eine Frequenzabhängigkeit des E-Moduls. Insgesamt wurden sinkende dynamische E-Moduli bei steigender Frequenz wie in [18] beobachtet. Nachdem der Frequenzbereich nur bis < 200 Hz untersucht werden konnte, wurde in dieser Arbeit mit einer konstanten Steifigkeit, ermittelt aus der Eigenmode (2, 2) der Plattenschwingung, simuliert. In weiteren Simulationsstudien sollte die Frequenzabhängigkeit von dynamischen Eigenschaften genauer untersucht werden.

2.2.3 Fassade

Abbildung 11 veranschaulicht den Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen der durchschnittlichen Oberflächengeschwindigkeit bei Punktanregung unter Verwendung des im Abschnitt 1.2.7 für die Fassade gewählten Modells einer orthotropen Platte. Für das Elastizitätsmodul in Längsrichtung der Bretter, die die Fassade bilden, wurde der Wert aus den Messungen der dynamischen Parameter eines einzelnen Brettes mit $E = 12300 \text{ N/mm}^2$ übernommen. In Querrichtung der Bretter zeigt die Fassade aufgrund der ausschließlichen Verbindung über das Nut-Feder-System eine deutlich geringere Steifigkeit. In einer

Parameterstudie innerhalb der Simulationsumgebung wurde das Elastizitätsmodul in Querrichtung bestimmt.

Abbildung 11 zeigt, dass im Frequenzbereich zwischen 31,5 Hz und 500 Hz das Modell mit einem Elastizitätsmodul von 15000 N/mm² eine gute Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Oberflächengeschwindigkeit aufweist. Ab 500 Hz kommt es zu einer deutlichen Abweichung zwischen den beiden Oberflächengeschwindigkeiten. Ein Vergleich mit einer Berechnung, bei der das Elastizitätsmodul der Fassade quer zur Bretterrichtung mit 500 N/mm² gewählt wurde, zeigt ab 500 Hz eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

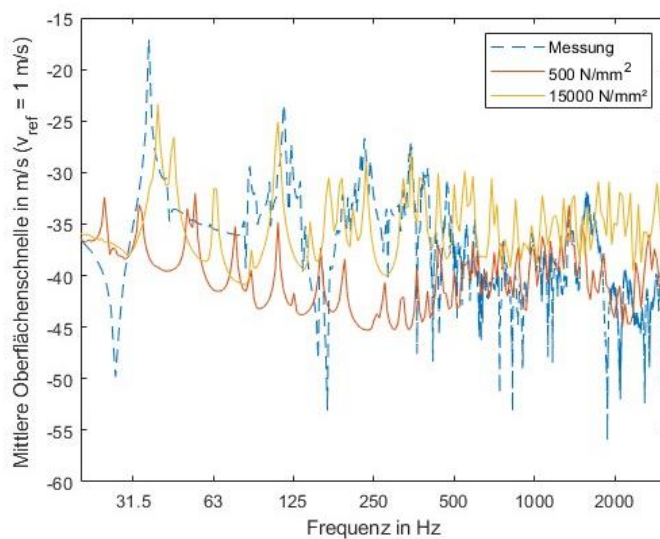


Abbildung 11 Vergleich zwischen berechneter und gemessener mittlerer Oberflächenschnelle auf der Fassade unter Punktanregung (siehe Abbildung „Messung dynamische Eigenschaften Fassade“). Dabei wurde das E-Modul quer zur Bretterrichtung variiert.

Es wird vermutet, dass die Fassade, sobald die halbe Biegewellenlänge (siehe Abbildung 12) des sich auf ihr ausbreitenden Schwingungsfeldes die Breite der Bretter unterschreitet, für diese Biegewellen spürbar "weicher" wird. Diese Annahme wird durch den oben beschriebenen Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen gestützt, wobei jeweils E-Module von 500 N/mm² und 15000 N/mm² für die orthotrope Platte quer zur Brettrichtung verwendet wurden.

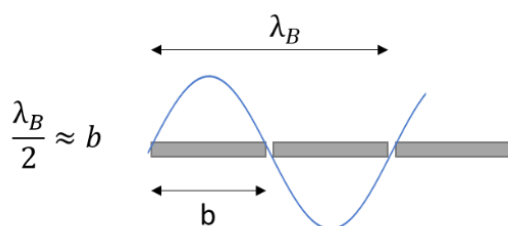


Abbildung 12: Darstellung des Vergleichs zwischen Biegewellenlänge λ_B und der Bettbreite b zur Klärung der Abnahme der Steifigkeit der Fassade ab 500Hz (siehe Abbildung 11)

2.2.4 Luftraum

Die in Abschnitt 1.2.8.2 präsentierten Variationen der Modellierungsansätze zur Berücksichtigung der Öffnung des Luftraumes zwischen Fassade und Grundbauteil wurden miteinander verglichen. Abbildung 13 zeigt im Schalldämm-Maß-Vergleich, dass beide Modelle die Einflüsse der Öffnung der Luftschicht nicht zufriedenstellend abbilden können. Insbesondere der Modellierungsansatz "Absorbierend" zeigt im tiefen Frequenzbereich eine Verschlechterung der Prognosegenauigkeit. Da keiner der beiden Ansätze eine Verbesserung der Prognosegenauigkeit im Vergleich zum ungeöffneten Simulationsmodell aufweist, wird im weiteren Verlauf auf die Modellierung der Öffnung verzichtet. Eine berechnungseffiziente Abbildung mit positiver Beeinflussung der Berechnungsqualität dieser Öffnung konnte im Projektverlauf nicht gefunden werden. Daher wird im weiteren Verlauf die Luftschicht in der Berechnung, unabhängig von der tatsächlichen Messsituation, als "geschlossen" angenommen.

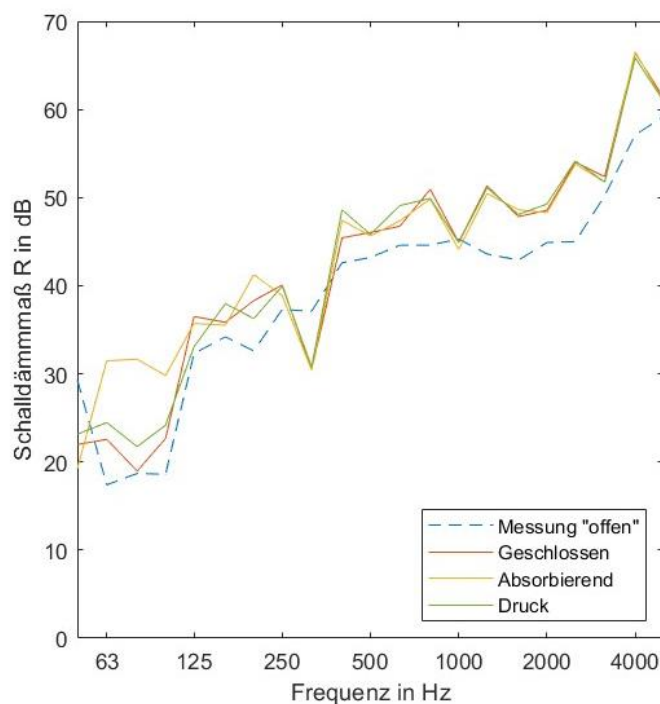


Abbildung 13: Vergleich der Prognosequalität unterschiedlicher Modelle zur Berücksichtigung einer hinterlüfteten Fassade („offen“) anhand der prognostizierten und gemessenen Schalldämm-Maße einer Holzrahmenkonstruktion mit vorgehängter Fassade.

Hinweis: Die Simulationen basierten auf dem noch nicht zu 100 % validierten Modells. „Geschlossen“ ist daher nicht mit den finalen Simulationsergebnissen vergleichbar.

2.2.5 Einspannung

Für die Holzrahmenwände wurde wie in Abschnitt 1.2.9 beschrieben eine punktuelle Einspannung des Wandmodells gewählt. Im Gegensatz dazu wurden alle vier umlaufenden Seitenflächen der Betonwand als fix eingespannt angenommen. Der Einfluss der beiden

Einspannungsvarianten auf die Betonwand ohne Fassade ist in Abbildung 14 zu sehen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Schalldämmung tief- und mittelfrequent bei der punktuellen Einspannung überwiegend schlechter ausfällt. In diesen Bereichen kommen Eigenmoden sowie der Koinzidenzeinbruch stärker zum Tragen, während die umlaufend, flächige Einspannung einen Energieabbau ermöglicht. Lediglich bei 80 Hz und 125 Hz kommt es zu stärkeren Einbrüchen im Schalldämm-Maß. Hochfrequent wirkt sich die Einspannung nicht auf das Ergebnis aus.

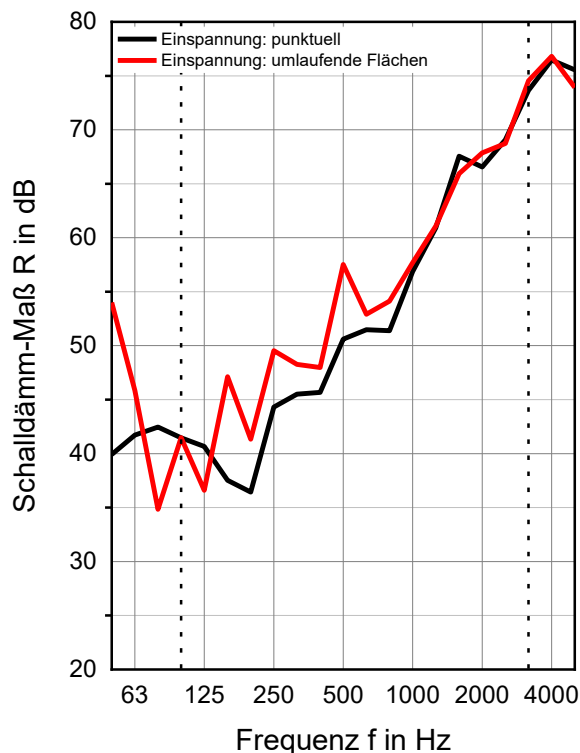


Abbildung 14: Unterschied der punktuellen (schwarz) und der flächigen (rot) Einspannung auf das simulierte Schalldämm-Maß.

Da die umlaufend, flächige Einspannung die praxisgetreuere Methode darstellt und auch die Messung besser widerspiegelt (vgl. Abschnitt 0), wurde für die Betonwand diese Einspannung gewählt.

2.2.6 Netzauflösung

In der nachstehenden Abbildung 15 wird anschaulich, wie das Schalldämm-Maß im hochfrequenten Bereich aufgrund einer zu geringen Netzauflösung abfällt. Je größer die Elemente des FEM-Modells, desto größer ist die Abweichung des Schalldämm-Maßes bei hohen Frequenzen. Die Dichte des Netzes ist bei geringer Auflösung nicht ausreichend, um die kurzen Wellenlängen korrekt abzubilden. Diese Beobachtung kann auch in den Ergebnissen dieser Parameterstudie gemacht werden und wird bei der hochaufgelösten Darstellung des Schalldämm-Maßes in Abbildung 16 deutlich. Der Vergleich der

Netzauflösungen „extremely fine“, „extra fine“ und „coarse“ von 500 Hz bis 5000 Hz auf der rechten Seite zeigt, dass die Netzauflösung „coarse“ schon bei 1200 Hz von „extremely fine“ abweicht. Im Gegensatz dazu weicht die zweithöchste Auflösung „extra fine“ erst ab 2000 Hz von der höchsten Auflösung ab.

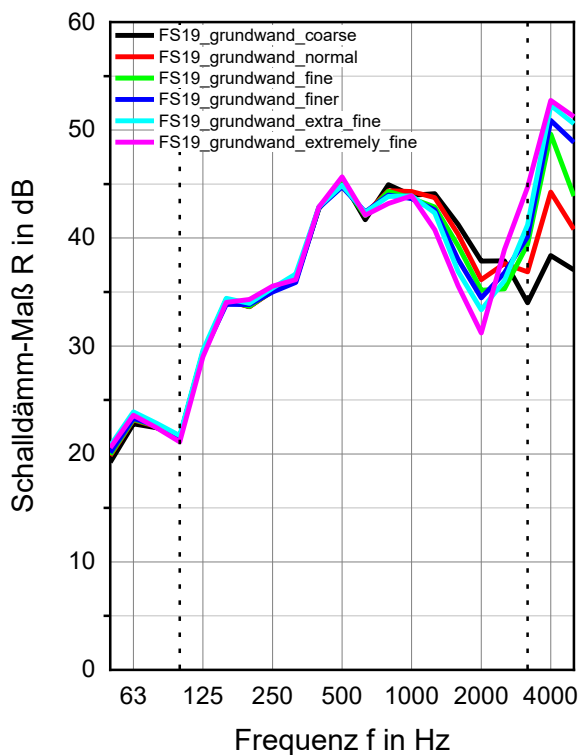


Abbildung 15: Darstellung des Einflusses der Netzauflösung des Modells auf das prognostizierte frequenzabhängige Schalldämm-Maß pro Terzband der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße.

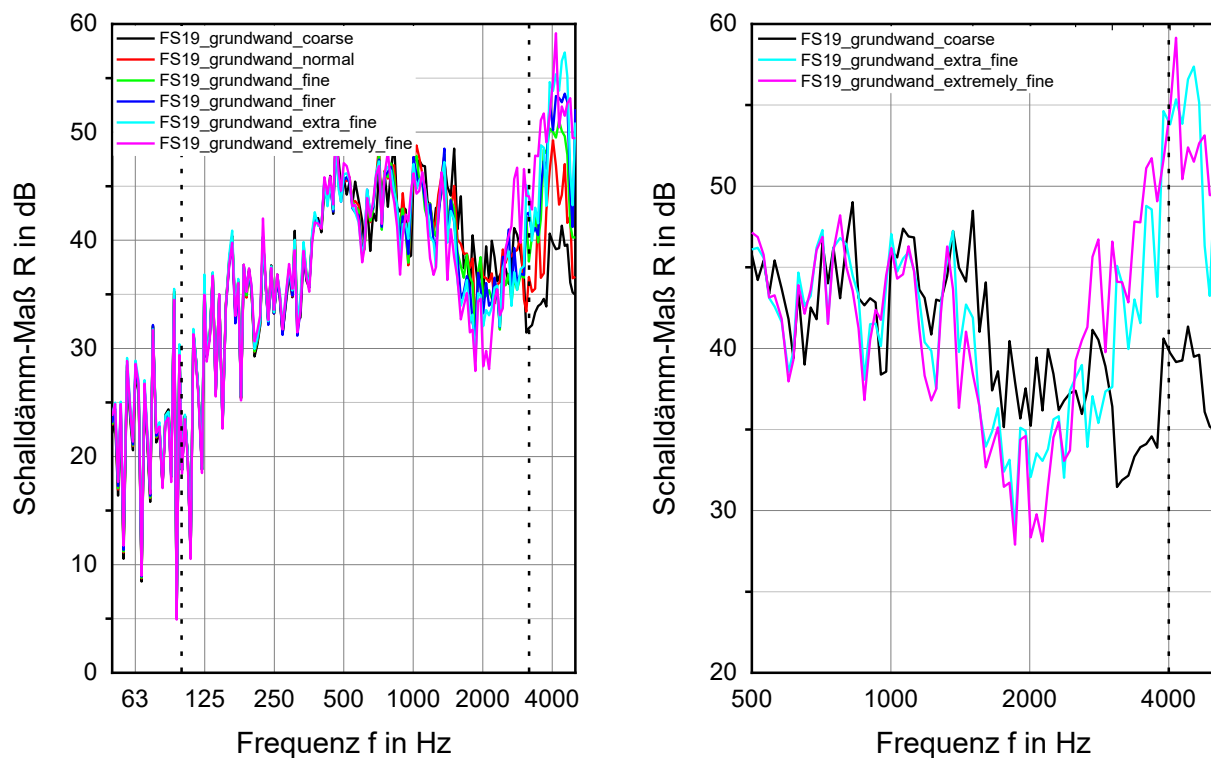


Abbildung 16: Darstellung des Einflusses der Netzauflösung des Modells auf das prognostizierte frequenzabhängige Schalldämm-Maß pro 1/24-Oktavband der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße. Links: Darstellung aller Netzauflösungen von 50 Hz bis 5000 Hz. Rechts: Darstellung der ausgewählten Auflösungen „coarse“, „extra fine“ und „extremely fine“ von 500 Hz bis 5000 Hz.

Die Anzahl an finiten Elementen und in Folge auch die Rechenzeiten von FEM-Modellen steigen mit höherer Netzauflösung exponentiell an. Aufgrund der vorliegenden Parameterstudie wurde für die weiteren Simulationen eine Netzauflösung von „finer“ gewählt. Das entspricht einer minimalen Elementgröße von 6,8 mm für die Holzrahmengrundwand in Fenstergröße bzw. 16,7 mm für die großen Wände (Holzrahmen- und Betonwand).

Die gewählten Auflösungen haben sich bei Gegenüberstellung mit den Messungen als ausreichend erwiesen (vgl. Abschnitt 1.2.10). Dieser Ansatz ermöglichte außerdem eine effiziente Simulation unter Berücksichtigung sowohl der Rechenleistung als auch der Genauigkeit der Ergebnisse bis mindestens 1000 Hz.

2.3 Gegenüberstellung von Simulation und Messung

Folgende Abbildungen zeigen jeweils den Vergleich der gemessenen frequenzabhängigen Schalldämmung (rot strichliert) mit dem simulierten Ergebnis (schwarz durchgezogen). Ergänzend ist zu dem Simulationsergebnis das Schalldämm-Maß mit 1/24-Oktav-Auflösung eingeblendet (dünn schwarz durchgezogen). Auf der linken Seite sind die Mess- und Simulationsergebnisse der jeweiligen Grundwand (ohne Fassade) dargestellt. Rechts hingegen sind die Mess- und Simulationsergebnisse der Grundwände inkl. Nut-Feder-Lärchenfassade mit stehender Luftschicht zu sehen. In den Abbildungen 18, 20 und 22 sind die Abweichungen zwischen Simulation und Messung pro Terzband dargestellt. Ergänzend ist die mittlere Abweichung aller Terzbänder sowie die Standardabweichung des Vergleichs eingeblendet. Abweichungen größer null bedeuten dabei eine Überschätzung, kleiner Null eine Unterschätzung des Schalldämm-Maßes in der Simulation. In diesem Kapitel wird in erster Linie auf die Abweichungen eingegangen. Für die bauakustischen Merkmale der gemessenen Schalldämm-Maße wird auf Abschnitt 2.1 verwiesen.

Unter 100 Hz kommt es unabhängig vom Wandtyp zu den insgesamt größten Abweichungen. Diese können auf durch das Modell nicht erfassbare Raumeigenschaften zurückzuführen sein. Weiters wurde die Einspannung der Bauteile, die im tieffrequenten Bereich einen Einfluss auf das Schalldämm-Maß hat, zwar berücksichtigt (vgl. Abschnitt 1.2.9), aber nicht näher untersucht.

In Abbildung 17 sind die gemessenen und simulierten Schalldämm-Maße der Holzrahmenwand in Fenstergröße dargestellt. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Schalldämm-Maße zeigt sowohl ohne (links) als auch mit Fassade (rechts), zufriedenstellende Übereinstimmung. Im Bereich von 100 Hz bis 3150 Hz resultiert die größte Abweichung durch eine Überschätzung des Koinzidenzeinbruchs im Modell. Der Grund könnte in der Steifigkeit der Beplankungen liegen, die anders als die stabförmigen Bauteile nicht frequenzabhängig abgebildet wurden. Beim Vergleich der Simulation der Holzrahmenwand in Fenstergröße mit Fassade mit der Messung fällt auf, dass es zu einem starken Einbruch des simulierten Schalldämm-Maßes bei 315 Hz kommt. Eine Erklärung für diese starke Abweichung in einem einzelnen Terzband konnte bislang nicht gefunden werden. Auch eine höhere Frequenzauflösung von 2 Hz bei der Simulation dieses Terzbandes lieferte keine Erklärung für diesen starken Einbruch (rot durchgezogen in Abbildung 17). Allerdings ist zu sehen, dass der Einbruch dadurch um rund 4 dB verringert werden kann.

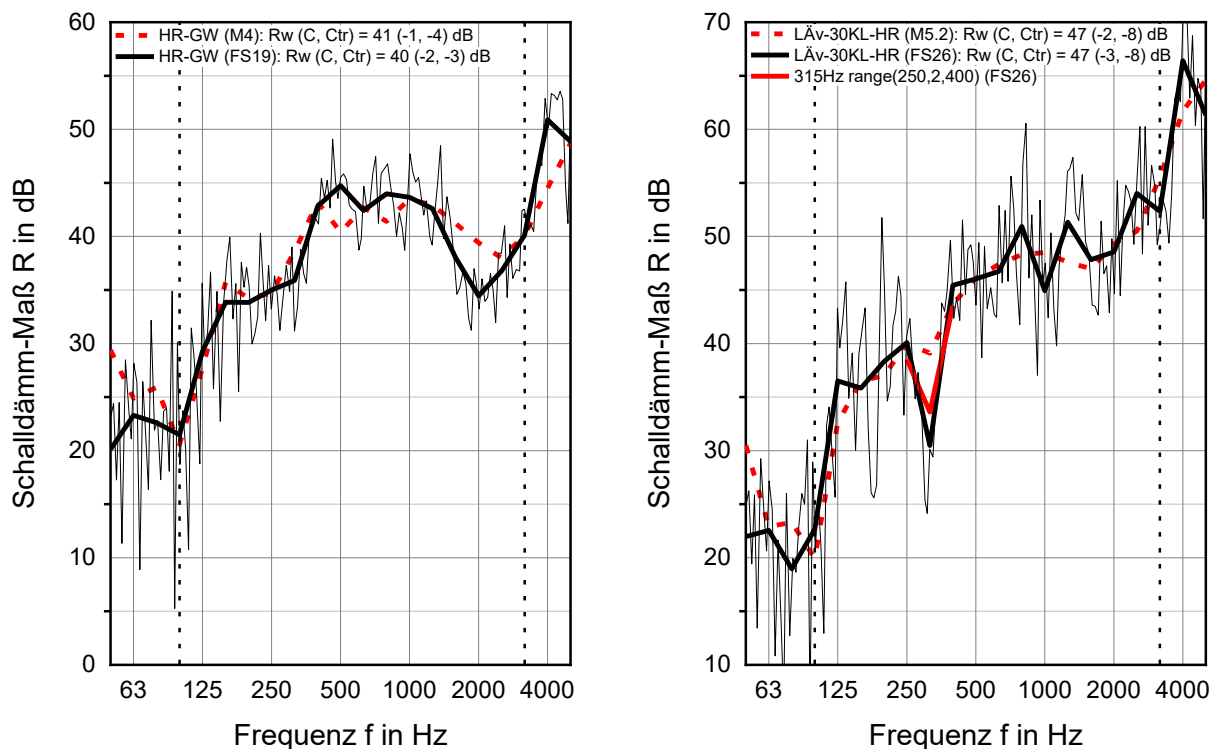


Abbildung 17: Gegenüberstellung des simulierten (schwarz) und des gemessenen (rot strichliert) Schalldämm-Maßes der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße ohne (links) und mit (rechts) Fassade. Das simulierte Ergebnis ist auch in 1/24-Oktavband-Auflösung dargestellt.

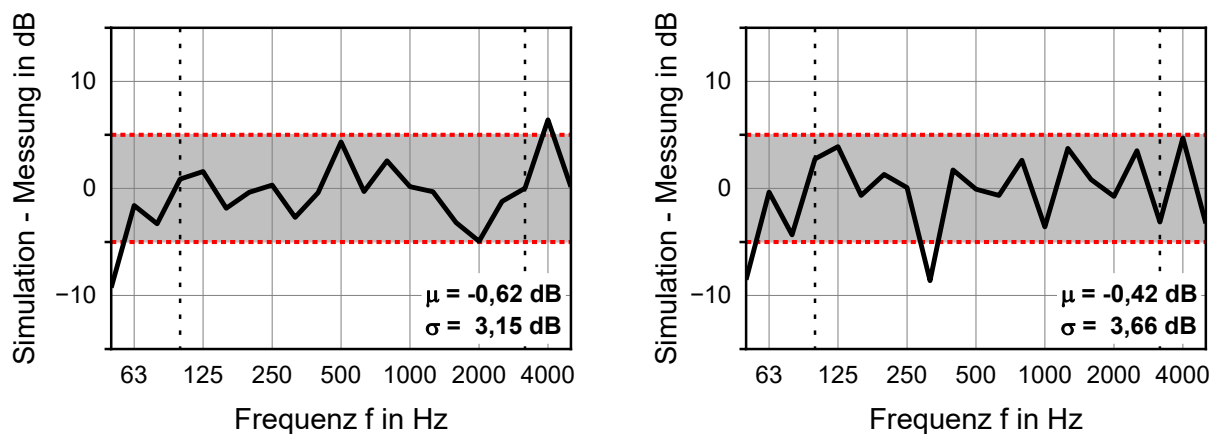


Abbildung 18: Differenz des simulierten und gemessenen Schalldämm-Maßes der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße ohne (links) und mit (rechts) Fassade.

Beim Hochskalieren des Modells für die Holzrahmenwand auf die fünffache Fläche ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erkennen (Abbildung 19). Grundsätzlich weisen die gemessenen und die simulierten Schalldämm-Maße der Grundwand (links) ähnliche Verläufe auf. Die spezifischen Einbrüche tief- und mittelfrequent wirken im Vergleich zu Abbildung 17 versetzt. Insgesamt sind die Abweichungen von 100 Hz bis 3150 Hz mit einer Ausnahme immer kleiner als 5 dB. Als

Grund für die scheinbare Verschiebung wird zum einen die Tatsache, dass das Modell in Fenstergröße validiert wurde, angesehen. Zum anderen lag die Dimension der Bauteile anhand dessen die Materialeigenschaften ermittelt wurden ebenfalls im Bereich der verbauten Materialien in der Holzrahmenwand in Fenstergröße. Die Abweichungen im tiefen Frequenzbereich bis rund 250 Hz sind auch bei der Holzrahmenwand mit Fassade (Abbildung 19, rechts) zu erkennen. Die Steigerung des Schalldämm-Maßes im mittel- und hochfrequenten Bereich durch die Fassade mit stehender Luftschicht wird durch das Simulationsmodell sehr gut abgebildet.

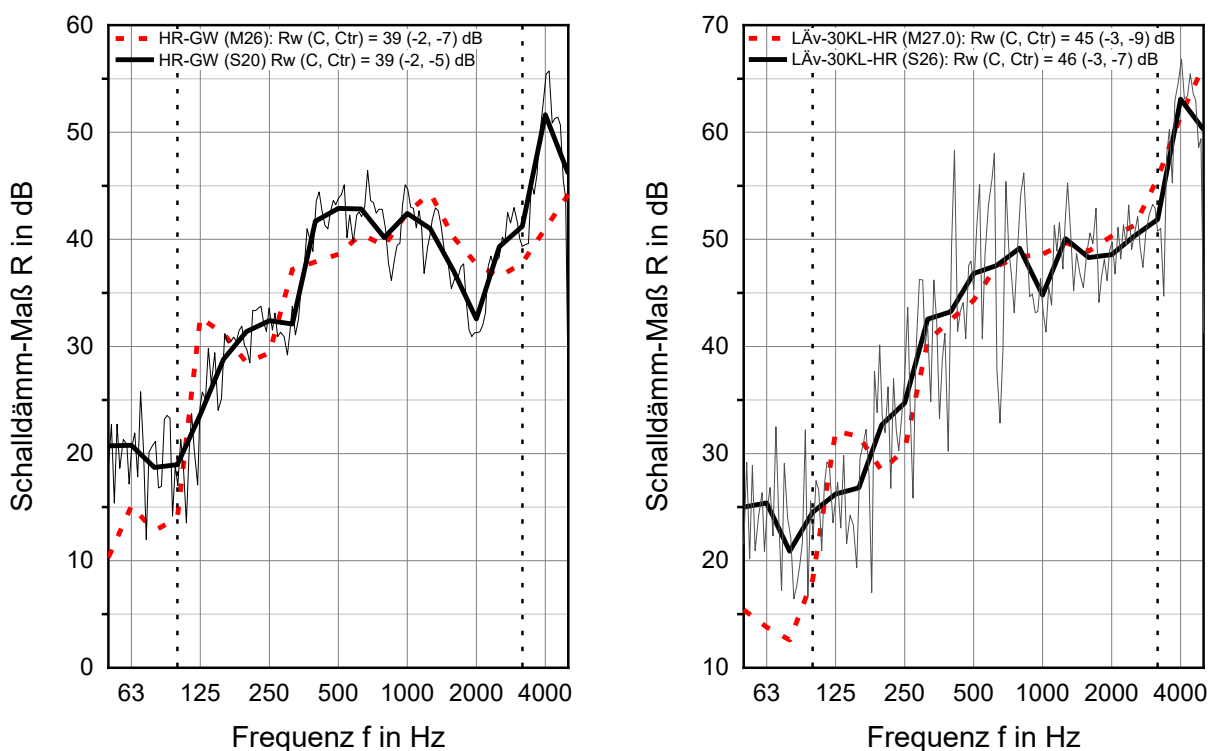


Abbildung 19: Gegenüberstellung des simulierten (schwarz) und des gemessenen (rot strichliert) Schalldämm-Maßes der Holzrahmengrundwand ohne (links) und mit (rechts) Fassade. Das simulierte Ergebnis ist auch in 1/24-Oktavband-Auflösung dargestellt.

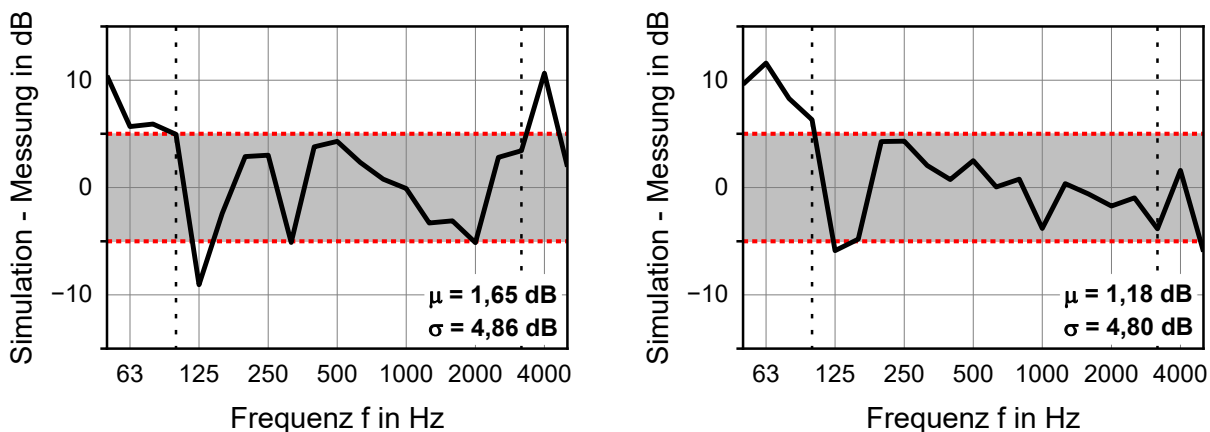


Abbildung 20: Differenz des simulierten und gemessenen Schalldämm-Maßes der Holzrahmengrundwand ohne (links) und mit (rechts) Fassade.

Das gemessene und simulierte Schalldämm-Maß der Beton-Grundwand (Abbildung 21, links) weist eine hohe Übereinstimmung auf (vgl. Abbildung 22, links). Die höchste Abweichung tritt bei 50 Hz auf und kann auf die nicht näher analysierte Einspannsituation der Betonwand zurückgeführt werden. Die Relevanz der richtigen Modellierung der Einspannung wurde in Abschnitt 2.2.5 schon gezeigt.

Bei Simulation der gesamten Beton-Außenwand inkl. Fassade (vgl. Abbildung 21, rechts) kommt es zu höheren Abweichungen in einzelnen Terzbändern (vgl. Abbildung 22, rechts). Tieffrequent wird der Resonanzeinbruch durch das Modell überschätzt, was im Vergleich zur Messung zu einem niedrigeren Schalldämm-Maß bei 80 Hz führt. Während die Grundwand hochfrequent simulationstechnisch sehr gut abgebildet wird, kommt es bei der Grundwand mit Fassade zu einem gravierenden Einbruch bei 800 Hz, der eine Unterschätzung des Schalldämm-Maßes um rund 13 dB bedeutet. Der Grund könnte in der Charakteristik der Dämmebene der Betonwand liegen. Während die Gefachdämmung der Holzrahmenwände direkt an zwei harte Schalen (OSB und MDF) grenzte, grenzte die Dämmung der Betonwand einseitig an die Hinterlüftungsebene hinter dem Fassadenschirm. Es wird davon ausgegangen, dass durch die exponiertere Lage des Dämmstoffs dessen Absorptionsverhalten stärker zum Tragen kommt (vgl. Anhang 3). Dieser Effekt wird im Modell nicht richtig abgebildet und sollte jedenfalls in weiterführenden Simulations-Studien optimiert werden.

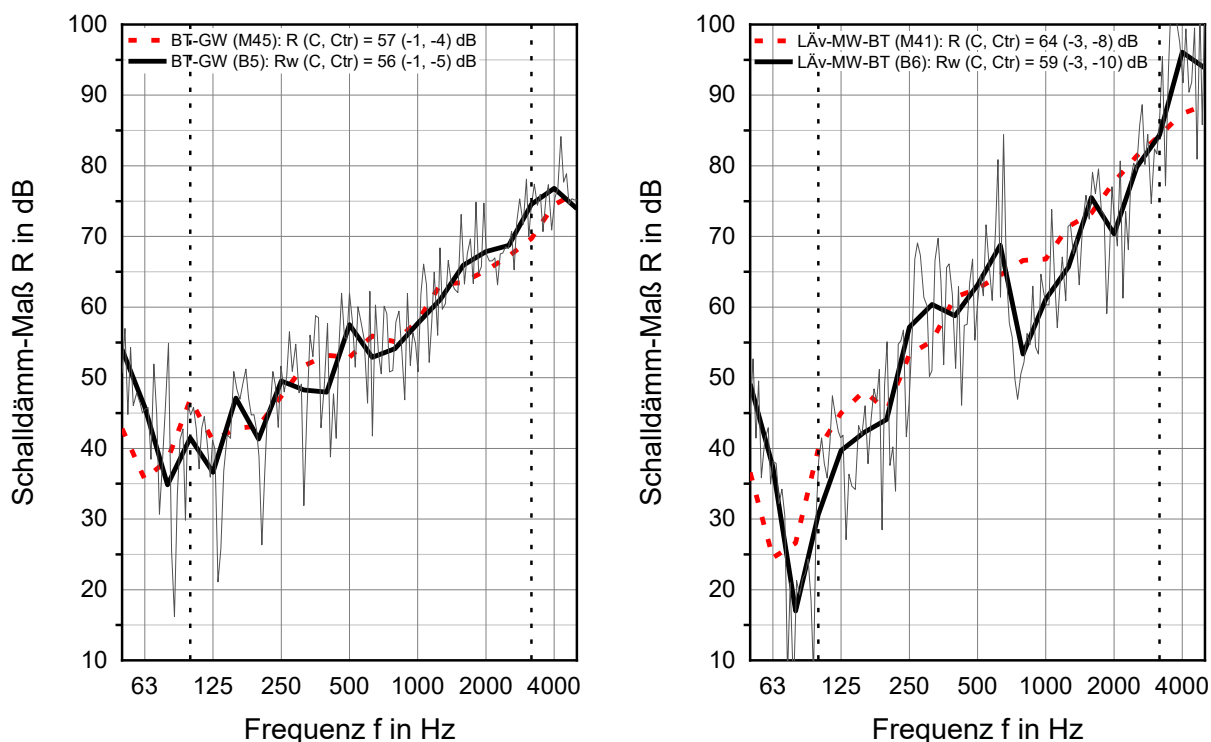


Abbildung 21: Gegenüberstellung des simulierten (schwarz) und des gemessenen (rot strichliert) Schalldämm-Maßes der Betonwand ohne (links) und mit (rechts) Fassade. Das simulierte Ergebnis ist auch in 1/24-Oktavband-Auflösung dargestellt.

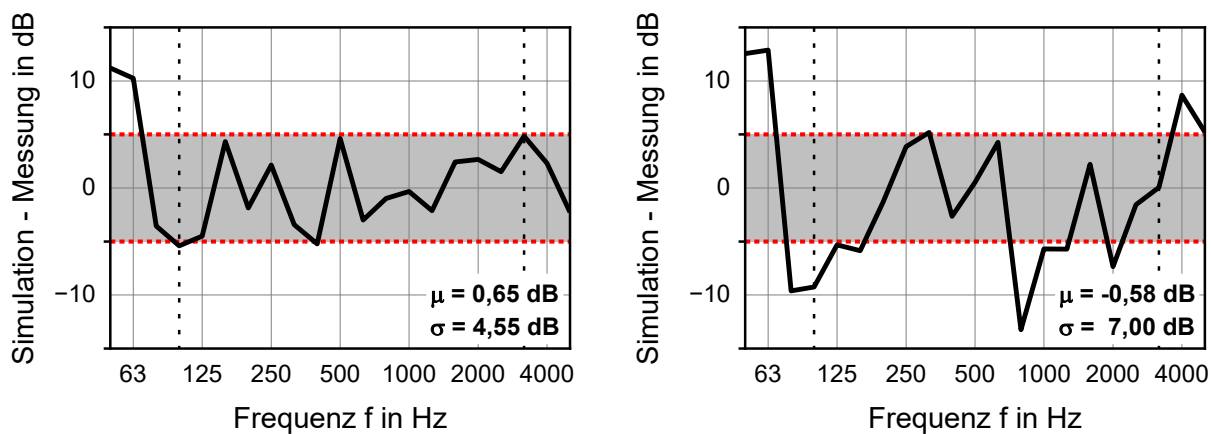


Abbildung 22: Differenz des simulierten und gemessenen Schalldämm-Maßes der Betonwand ohne (links) und mit (rechts) Fassade.

3 Zusammenfassung

Im Zuge der Modellierung wurden im ersten Schritt diverse Materialeigenschaften gemessen. Weitere unbekannte Parameter wurden im Zuge erster Simulationen anhand der Holzrahmengrundwand in Fenstergröße variiert und untersucht. Speziell die Modellierung der Fassade stellte die Autoren aufgrund der Nut-Feder-Verbindung vor Herausforderungen. Dabei wurde gezeigt, wie die Modellierung einer Fassade als Plattenwerkstoff gelingt. Sowohl für die Grundwände ohne Fassade als auch jene mit Fassade wurde über den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz mit Ausnahmen lag die Abweichung des simulierten Schalldämm-Maßes im Bereich ± 5 dB pro Terzband. Tieffrequent kommt es insgesamt zu größeren Abweichungen. Diese können auf im Modell nicht erfasste Raumeigenschaften sowie die Vereinfachung der Einspannung zurückgeführt werden. Die gemessenen und simulierten Einzahlwerte R_w inkl. der Spektrumanpassungswerte C und C_{tr} sind in Tabelle 5 ergänzend zu der Gegenüberstellung der Frequenzverläufe in Abschnitt 2.3 zusammenfassend dargestellt. In den Spalten „Differenz“ wird jeweils die Differenz des simulierten zu dem gemessenen Wert dargestellt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Einzahlwerte R_w inkl. der Spektrumanpassungswerte C und C_{tr} .

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung (Fensteröffnung)

Ohne Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	41 dB	40 dB	-1 dB
C =	40 dB	38 dB	-2 dB
C_{tr} =	37 dB	37 dB	0 dB

Mit Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	47 dB	47 dB	0 dB
C =	45 dB	44 dB	-1 dB
C_{tr} =	39 dB	39 dB	0 dB

Holzrahmenwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung

Ohne Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	39 dB	39 dB	0 dB
C =	37 dB	37 dB	0 dB
C_{tr} =	32 dB	34 dB	2 dB

Mit Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	45 dB	46 dB	1 dB
C =	42 dB	43 dB	1 dB
C_{tr} =	36 dB	39 dB	3 dB

Betongrundwand mit vertikaler Nut-Feder-Lärchenschalung

Ohne Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	57 dB	56 dB	-1 dB
C =	56 dB	55 dB	-1 dB
C_{tr} =	53 dB	51 dB	-2 dB

Mit Fassade

	<i>gemessen</i>	<i>simuliert</i>	<i>Differenz</i>
R_w =	64 dB	59 dB	-5 dB
C =	61 dB	56 dB	-5 dB
C_{tr} =	56 dB	49 dB	-7 dB

Es ist erkennbar, dass die simulierten Einzahlwerte, die den Frequenzbereich 100 Hz bis 3150 Hz abdecken, sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Die maximale Abweichung beträgt mit Ausnahme der Betonwand mit Fassade 2 dB. Der Grund für die große Unterschätzung der Betonwand mit Fassade liegt mutmaßlich an den Absorptionseigenschaften des Dämmstoffs, die im Modell aufgrund einer Vereinfachung nicht korrekt abgebildet werden.

Es wurde gezeigt, dass mithilfe der FEM Holzrahmen- und Betongrundwände gut prognostiziert werden können. Auch die Modellierung der Fassade mit stehender Luftschicht konnte mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. In weiteren Forschungsarbeiten sollte jedenfalls die Frequenzabhängigkeit der Plattenwerkstoffe untersucht und im Modell berücksichtigt werden. Besonders gilt das für die Nut-Feder-Verbindung der Fassade, die wie sich in Abschnitt 2.2.3 gezeigt hat, eine hohe Frequenzabhängigkeit aufweist. Weiters sollte bei Modellierung einer Dämmebene angrenzend an die Hinterlüftungsebene jedenfalls die Absorption des Dämmstoffs modelliert werden. Diese bietet Potential zur Verbesserung des Modells der Betonwand mit Fassade. In einer weiterführenden Arbeit sollte in jedem Fall auch die offene Frage beantwortet werden, wie eine hinterlüftete Fassade (vgl. Abschnitt 2.2.4) in der Simulationsumgebung abgebildet werden kann.

4 Literatur

- [1] 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung. ÖNORM EN ISO, Ausgabe 2021.
- [2] 717-1: Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. ISO, Ausgabe 2013.
- [3] *Neusser, M.*: Analyse des Einflusses von Verbindungsmitteln auf das Schalldämm-Maß von leichten Trennwandkonstruktionen durch realitätsnahe Modellierung von Schraub- und Klebeverbindungen. Wien, Technische Universität Wien, Dissertation, 2017.
- [4] *Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.*: Technische Akustik – Grundlagen und Anwendungen. Springer Bln, Berlin, 2009.
- [5] *Elliott, S.J.; Maury, C.; Gardonio, P.*: The synthesis of spatially correlated random pressure fields. *In: The Journal of the acoustical society of America* 117 (2005), Heft 3, S. 1186-1201.
- [6] *Díaz-Cereceda, C.; Hetherington, J.; Poblet-Puig, J. et al.*: A deterministic model of impact noise transmission through structural connections based on modal analysis. *In: Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), Heft 12, S. 2801-2817.
- [7] *Kaltenbacher, M.*: Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators – Finite elements for computational multiphysics, third edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [8] *Allard, J.F.; Atalla, N. (Hrsg.)*: Propagation of sound in porous media - modelling sound absorbing materials. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (United Kingdom), 2009.
- [9] *Göransson, P.*: Acoustic finite element formulation of a flexible porous material — a correction for inertial effects. *In: Journal of Sound and Vibration* 185 (1995), Heft 4, S. 559-580.
- [10] *Panneton, R.*: Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media. *In: The Journal of the acoustical society of America* 122 (2007), Heft 6, 217-222.
- [11] *Biot, M.A.*: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *In: The Journal of the acoustical society of America* 28 (2005), Heft 2, S. 168-178.
- [12] *Wilson, D.K.*: Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure. *In: The Journal of the acoustical society of America* 94 (1993), Heft 2, S. 1136-1145.
- [13] *Dunn, I.P.; Davern, W.A.*: Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers. *In: Applied Acoustics* 19 (1986), Heft 5, S. 321-334.
- [14] *Mechel, F.P.*: Ausweitung der Absorberformel von Delany and Bazley zu tiefen Frequenzen. *In: Acustica* 35 (1976), Heft 3, S. 210-213.
- [15] *Blevins, R.D.*: Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing, Malabar, Florida, 2001.

- [16] 10848-1: Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von Gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand am Bau. ÖNORM EN ISO, Ausgabe 2017.
- [17] Niemz, P.; Sonderegger, W.: Holzphysik – Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017.
- [18] Villasante, A.; Fernández-Serrano, Á.: Dynamic modulus of elasticity in flexural vibration tests of Pinus sylvestris sawn timber obtained with fundamental resonant frequency and overtones. In: Holzforschung 76 (2022), Heft 6, S. 485-492.

**Cooler Hülle -
Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen
Klimawandel und Technik**

**AP5: Feuchteresistente Fassade -
Konstruktiver Holzschutz
Anhang 5 zum Endbericht**

FFG-Projektnr.: FO999889550

HFA-Nr.: F518

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor:innen

DI Claudia Koch

Dr. Martin Felhofer

Weitere Projektmitarbeiter:innen

Ing. Daniel Resch

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Problemstellung	5
2	Material und Methoden.....	7
2.1	Versuchsaufbau.....	7
2.2	Materialien.....	10
2.3	Beschichtung.....	11
2.4	Bestimmung der Holzfeuchte	11
2.5	Klimakammer	13
2.6	Prüfzyklus in der Klimakammer.....	13
2.7	Datenlogger.....	15
2.8	Datenauswertung und Darstellung.....	16
3	Ergebnisse und Diskussion	17
3.1	Offene Fassade.....	17
3.1.1	Einfluss der Positionierung der Fassadenbahn auf das Feuchteverhalten	17
3.1.2	Einfluss der Positionierung der Fassadenbahn auf die Verformung	19
3.1.3	Einfluss der Unterkonstruktionsbreite und Nageldichtung auf das Feuchteverhalten	21
3.2	Geschlossene Fassade	25
3.2.1	Einfluss der Längsstoßausbildung bei einer vertikalen geschlossenen Fassade.....	25

3.2.2	Einfluss der Längsstoßausbildung bei einer horizontalen geschlossenen Fassade und unterschiedlichen Beschichtungssystemen	27
3.3	Wissenschaftliche Voruntersuchung eines innovativen Fassadensystems	29
4	Zusammenfassung.....	32
5	Literaturverzeichnis	33

1 Problemstellung

Obwohl der Einfluss des Klimawandels auf die thermische Leistung von Gebäuden in der wissenschaftlichen Literatur ausführlich behandelt wurde, wurde bis vor Kurzem nur wenig über die Auswirkungen von Fassadendesign, Regen, Wind und anderen klimatischen Faktoren diskutiert, die die Wasserpenetration von Gebäudehüllen beeinflussen können (Fawaier und Bokor 2022; Kaynakli 2012). Studien zeigen, dass Gebäudehüllen durch vermehrtes Auftreten von Schlagregenereignissen aufgrund des Klimawandels höherer Feuchtebelastung ausgesetzt sind (Nik et al. 2015). Im Vergleich zu vertikal fallendem Regen hat Schlagregen eine horizontale Geschwindigkeitskomponente und ein viel höheres Potenzial, eine Gebäudehülle zu durchdringen (Orr et al. 2018). Dadurch besteht ein erhöhtes Risiko, dass sich Wasser hinter der Fassadenschalung ansammelt, und zu lokaler hoher relativer Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte führt, was wiederum Schimmelbildung und Pilzbefall auf der Rückseite der Verkleidung zur Folge haben kann.

Daher sollte eine Fassade im Idealfall das Eindringen von Wasser verhindern, doch ist dies in der Praxis insbesondere bei Schlagregen schwer umzusetzen. Bei Holzfassaden wird diese Funktion von der Fassadenschalung gemeinsam mit der dahinter liegenden zweiten wasserführenden Ebene übernommen, die meist aus einer Fassadenbahn besteht. Um eine Kapillarunterbrechung zu schaffen und die Trocknung der Innenseite der Fassadenschalung zu ermöglichen, wird zudem in der Regel ein Hinterlüftungsspalt vorgesehen. Zusätzlich zum Feuchteeintrag von außen kann auch jener aus dem Innenraum des Gebäudes problematisch sein. Wenn die Außentemperatur niedriger ist als die Temperatur im Innenraum, findet eine Wärmeübertragung aus dem Innenraum statt. Die Übertragung von Wärme und Feuchtigkeit durch die Wandkonstruktion und in den Hinterlüftungsspalt stellt im Winter ein Risiko dar, es besteht die Gefahr der interstitiellen Kondensation. Dieses Risiko kann minimiert werden, indem der Dampfdruck in den Wohnräumen verringert wird, z. B. durch eine gute Belüftung der Innenräume oder durch die Verwendung einer Dampfbremse (Davies et al. 2012). Es ist wichtig zu beachten, dass die Trocknung des Hinterlüftungsspalts nur dann erfolgt, wenn ein Austausch mit der Umgebungsluft stattfindet, die im Vergleich zur Luft im Hohlraum eine geringere relative Feuchtigkeit aufweist (Jan de Place Hansen E, Brandt 2010). Folglich können lange Regenperioden zu einem hohen Feuchtigkeitsgehalt in der Hinterlüftung führen, selbst wenn eine angemessene Belüftung gewährleistet ist. Der Luftaustausch im Hohlraum wird durch die Anordnung von Belüftungsöffnungen an der Ober- und Unterseite der Verkleidung verbessert (Langmans et al. 2016). Das genaue Verhalten von belüfteten Hohlräumen ist jedoch komplex und schwer zu modellieren (van Belleghem et al. 2014).

Holz ist ein hygroskopisches Material, das es ermöglicht, Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufzunehmen und innerhalb der Zellwände und -hohlräume zu speichern. Das hygroskopische Verhalten von Holz wird durch das umgebende Klima bestimmt, insbesondere durch Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Abbildung 1 zeigt das Feuchteverhalten von Holz.

Bis etwa 30 % wird Wasser in den Zellwänden gebunden. Über dem Fasersättigungspunkt sind die Zellwände vollständig gesättigt und Feuchtigkeit wird in den Zellhohlräumen aufgenommen und liegt als freies Wasser vor. Der Fasersättigungspunkt variiert je nach Holzart und liegt zwischen 22 und 35 %. Die in dieser Studie verwendeten Holzarten weisen einen unterschiedlichen Fasersättigungspunkt auf: Fichte 30 – 34 % und Lärche 26 – 28 % (Kollmann und Côté 1968). Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts unterhalb des Fasersättigungspunktes beeinflussen die physikalischen, mechanischen und rheologischen Eigenschaften von Holz, einschließlich Schwinden und Quellen (Abbildung 1), Festigkeit und Elastizitäts- oder Steifigkeitsmodul (Niemz und Sonderegger 2017). Daher erfolgt bei der Planung von Holzkonstruktionen basierend auf den erwarteten klimatischen Bedingungen während der Design-Lebensdauer eine Einstufung der Holzbauteile in eine von drei Nutzungsklassen.

Der Feuchtigkeitsgehalt von Holz im Außenbereich sollte zwischen 12 und 19 % liegen. Es gibt jedoch mehrere Faktoren, die diesen erwarteten Bereich signifikant verändern können (Davies et al. 2012), beispielsweise die Ausführung und die Konstruktionsdetails. Insbesondere schnelle Schwankungen der Witterungsbedingungen können zu Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt in der Oberflächenregion (d. h. den äußersten wenigen Millimetern von Holz) führen und somit den Gesamtfeuchtigkeitsgehalt beeinflussen.

Daher ist es unerlässlich, in Zukunft Untersuchungen zum Einfluss des Fassadendesigns auf die Regendichtigkeit und dem Trocknungsverhalten verschiedener Holzfassadensysteme durchzuführen (Rüther und Time 2015). Demzufolge war das Ziel dieser Untersuchungen, das Feuchteverhalten verschiedener Konstruktionsdetails von Holzfassaden und den Einfluss von Schlagregen zu untersuchen. Dazu wurden unterschiedliche Fassadensysteme unter periodischen Beregnungs- und Trocknungsbedingungen beobachtet. Es wurden die gängigsten Systeme, wie vertikale, horizontale, geschlossene und offene Fassaden sowie die in Europa gängigsten Holzarten Fichte und Lärche untersucht. Dadurch konnten wir Schwachstellen und kritische Konstruktionsdetails aufzeigen, die für die Designpraxis von Holzfassaden hinsichtlich Feuchteresilienz von Bedeutung sind.

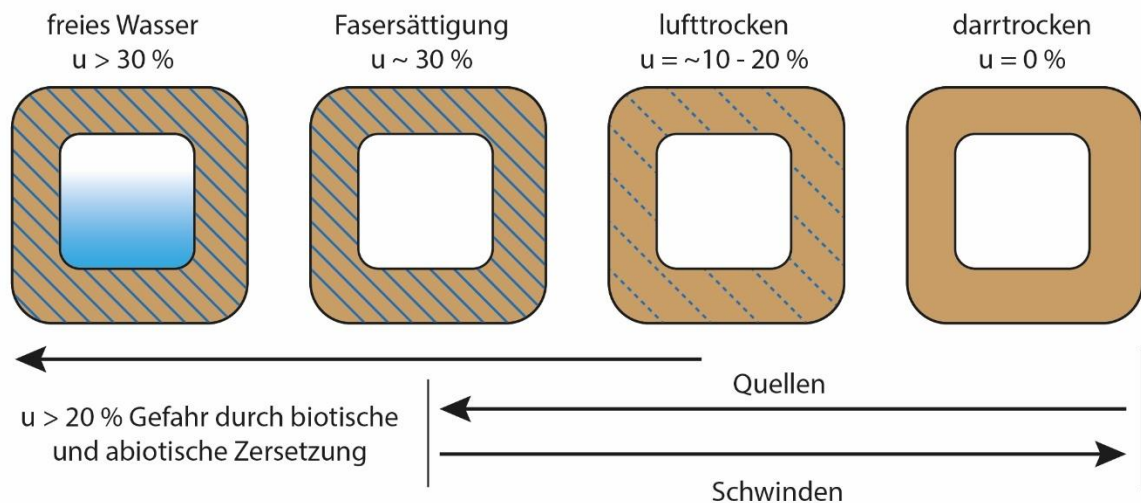


Abbildung 1: Feuchteverhalten von Holz bei unterschiedlicher Holzfeuchte (u). Über dem Fasersättigungspunkt (FSP) wird freies Wasser in den Zellhohlräumen (Lumen) eingelagert und es kommt zu keiner Volumensänderung. Unterhalb des FSP quillt und schwindet Holz und es kommt zu Verformungen. Über 20 % Holzfeuchte kann es zu Schimmelbildung und Pilzbefall kommen.

Es wurden folgende konkrete Fragestellungen formuliert, die in diesem Arbeitspaket beantwortet wurden:

- Ist es insbesondere bei offenen Fassaden sinnvoll, eine Fassadenbahn direkt an der Rückseite der Fassadenschalung zu verlegen?
- Ist bei Holzfassaden, insbesondere bei offenen Fassaden, für eine ausreichende Regensicherheit eine Nageldichtung (Dichtbänder oder Dichtmasse) zwischen Trag- bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner erforderlich?
- Sollen horizontale Traglatten bei offenen Fassaden oberseitig abgeschrägt werden?
- Wie können Längsstöße bei Fassadenbrettern ausgeführt werden, ohne die zu erwartende Lebensdauer der Fassade zu beeinträchtigen?
- Welchen Einfluss haben Beschichtungen in Zusammenhang mit Längsstößen?

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau

Zur Beantwortung der vorab formulierten Fragestellungen wurden 5 verschiedene Probekörper gebaut, bei denen folgende Parameter je nach Bedarf variiert wurden:

- Holzart (Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Lärche (*Larix decidua*))
- Orientierung der Fassadenschalung (vertikal, horizontal)

- Grundkonstruktion (offen, geschlossen)
- Lage der Fassadenbahn (hinter der Fassadenschalung, hinter der Unterkonstruktion)
- Verwendung eines Nageldichtbands hinter der Traglatte (ja, nein)
- Längsstoßausbildung (geschlossen, offen oder fliegend)
- Beschichtung in Zusammenhang mit der Längsstoßausbildung (unbeschichtet, Dünnschichtlasur, Mittelschichtlasur, mit und ohne Hirnholzbeschichtung)
- Ausführung der Unterkonstruktion (Abschrägung, Breite, 1 oder 2 Latten beim Stoß)

Die Versuchsaufbauten sind in Abbildung 2 ersichtlich.

Ein gemeinsames Merkmal aller Aufbauten war die Ausführung einer belüfteten Fassade (Zuluftöffnung unten, keine Abluftöffnung oben), um tendenziell kritische Bedingungen für die Abtrocknung zu erzeugen. Durch den Verzicht auf Abluftöffnungen oben wurde gleichzeitig auch verhindert, dass in diesem Bereich Spritzwasser durch die Beregnung hinter die Fassadenschalung dringt. Ebenso wurde besonderes Augenmerk auf die Abdichtung der seitlichen Randbereiche gelegt, um das seitliche Eindringen von Spritzwasser zu verhindern.

Eine zentrale Fragestellung dieser Studie war die Ausführung der Traglattung bei offenen Fassaden. Insbesondere wurde untersucht, ob die Abschrägung der Traglattung in Richtung der Fassadenschalung oder zum Wandbildner hin erfolgen sollte. Außerdem wurde die Platzierung der Traglattung im Stoßbereich analysiert, wobei unterschieden wurde, ob der Stoß hinterlegt oder die Traglatte mit einem Abstand von 50 mm zum Stoß ausgeführt werden sollte. Bei Verwendung einer Hinterlegung wurden auch unterschiedliche Breiten der Traglattung untersucht (50 mm, 80 mm und 110 mm).

Darüber hinaus wurde der Einfluss von zwei verschiedenen Beschichtungssystemen auf die Fassade in Zusammenhang mit der Stoßausbildung der Schalungsbretter untersucht. Dabei wurde auch die Bedeutung der Beschichtung des Hirnholzes an den Stoßstellen analysiert (Abbildung 2b). Zusätzlich wurde eine offene Fassade aus Lärchenholz untersucht, bei der die Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung angebracht wurde (Abbildung 2c). Eine weitere Fragestellung speziell für offene Fassaden betraf die Notwendigkeit eines Nageldichtbands zwischen Traglattung und Wandbildner (Abbildung 2d).

Zur Messung der Holzfeuchte wurden in den Traglatten an den Stoßstellen sowie in Referenzlatten, die nicht von Stoßstellen beeinflusst wurden, Messstellen eingebracht. Die Elektroden zur Messung der Holzfeuchte in der Fassadenschalung wurden von hinten eingebracht und 50 mm vom Stoß entfernt an Referenzpunkten gemessen, die nicht von einem Stoß beeinflusst wurden. Weitere Details zur Holzfeuchtemessung sind im Abschnitt 2.3 zu finden. Details zu den verschiedenen Fassadensystemen und der Positionierung der Messstellen sind in Abbildung 2 und in den Ergebnissen schematisch abgebildet.

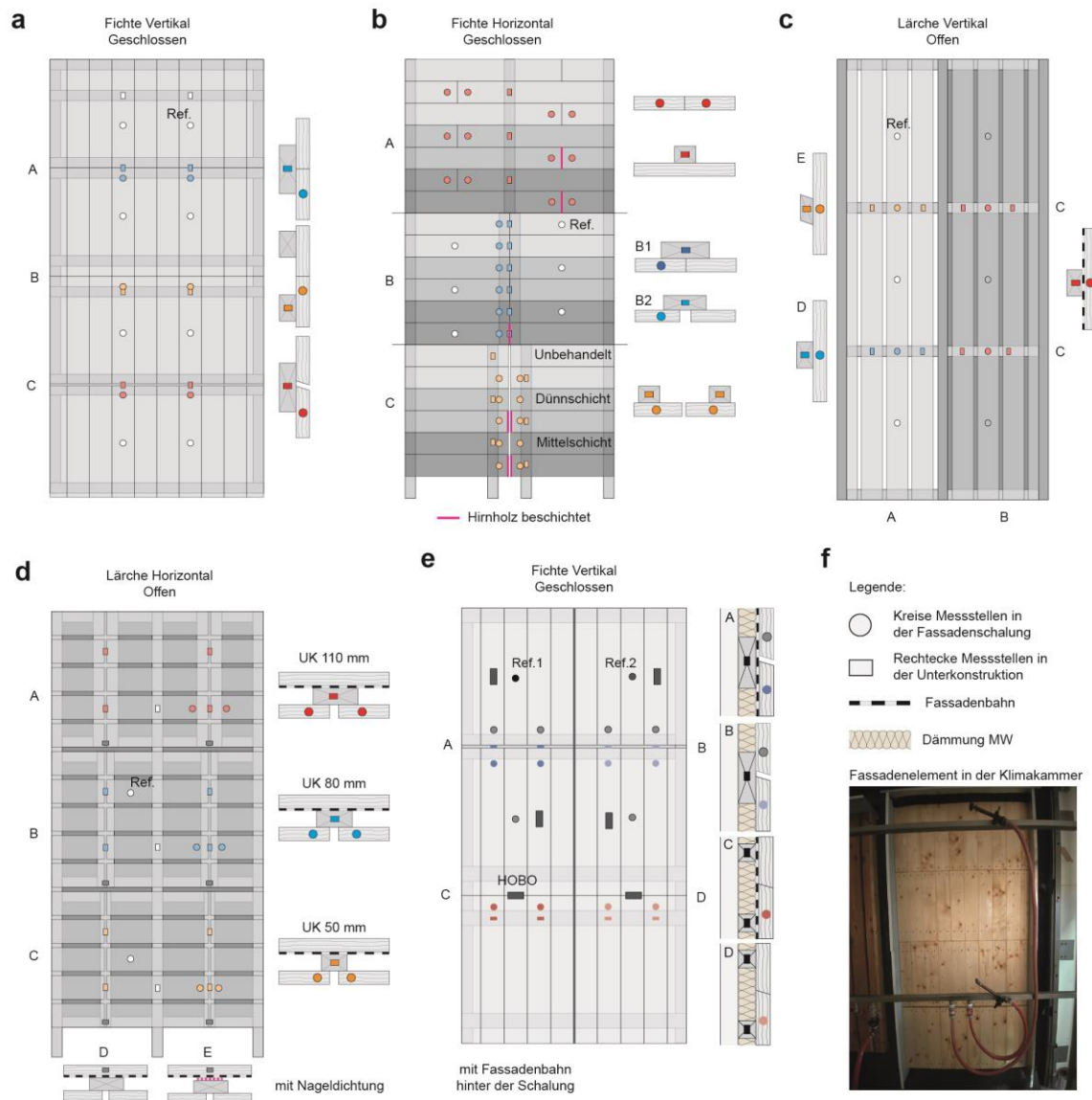


Abbildung 2: Übersicht der verschiedenen Fassadenelemente. (a) Fichte vertikal und geschlossen (Nut- und Federprofil); Detail A: geschlossene Fuge auf einer 110 mm Traglattung (hinterlegt); Detail B: geschlossene Fuge auf zwei Traglatten (30x50 mm) mit einem Abstand von 50 mm zur Fuge; Detail C: offene Fuge (10 mm) auf einer 110 mm Traglattung (hinterlegt). (b) Fichte horizontal und geschlossen mit unbehandelten Bereichen, Dünnschichtlasur und Mittelschichtlasur (siehe 2.3). Detail A zeigt fliegende Stöße, Detail B eine geschlossene Fuge auf einer 110 mm Traglattung (hinterlegt) und einen zweiten Versuch mit geöffneter Fuge (10 mm, B2). Detail C zeigt eine offene Fuge auf zwei Traglatten (30x50 mm) mit einem Abstand von 50 mm zur Fuge. (c) Die Lärchenholzverkleidung ist vertikal und offen gestaltet. Die rechte Seite des Elements (B) ist direkt hinter der Fassadenschalung mit einer Fassadenbahn versehen (siehe Detail C). Detail D zeigt eine gerade Traglattung, während Detail E eine zur Fassadenschalung hin abgeschrägte Traglattung aufweist. Dieser Versuch wurde mit einer Traglattung wiederholt, die weg von der Fassadenschalung abgeschrägt ist (siehe Abbildung 8, Detail F). (d) Die Lärchenholzverkleidung ist horizontal und offen gestaltet und weist variierende Traglattenbreiten auf. Detail A: offene Fuge auf einer 110 mm Traglatte; Detail B: offene Fuge auf einer 80 mm Traglatte; Detail C: offene Fuge auf einer 50 mm Traglatte. Die rechte Seite E wurde mit einer Nageldichtung zwischen Traglattung und Wandbildner versehen. (e) Innovatives Fassadensystem aus Fichte vertikal und geschlossen mit direkt hinter der Fassadenschalung angebrachter Dämmung. Auf der linken Seite ist eine Fassadenbahn zwischen Fassadenschalung und Dämmung angebracht. Detail A: Offene Fuge auf einer 110 mm Traglattung (hinterlegt). Detail C: Geschlossene Fuge auf zwei

Traglatten (30x50 mm) mit einem Abstand von 50 mm zur Fuge. Detail B und D sind identisch zu A und C, jedoch mit der Fassadenbahn. (f) Legende und ein Beispiel für ein montiertes Element in der Klimakammer mit den Beregnungsdüsen.

2.2 Materialien

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die zur Herstellung der Versuchsaufbauten eingesetzten Materialien.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Materialien

Material	Beschreibung	Verwendet bei Variante
Fassadenbretter	Fichte, Nut und Feder, gefast Breite x Dicke (105 x 19 mm) gehobelt, roh	Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2a Fichte Horizontal Geschlossen Abbildung 2b Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2e
	Lärche, Glattkant, gefast Breite x Dicke (112 x 19 mm) gehobelt, roh	Lärche Vertikal Offen Abbildung 2c Lärche Horizontal Offen Abbildung 2d
Unterkonstruktion	Fichte 50 x 30 mm Fichte 110 x 30 mm	Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2a Fichte Horizontal Geschlossen Abbildung 2b
	Lärche, Rhombusprofil 66 x 24 mm (Kontaktfläche 56 mm, Winkel 15°)	Lärche Vertikal Offen Abbildung 2c Lärche Horizontal Offen Abbildung 2d
	Lärche 50 x 30 mm Lärche 80 x 30 mm Lärche 110 x 30 mm	Lärche Horizontal Offen Abbildung 2d
Fassadenbahn	Monolithische, diffusionsoffene UV- beständige Fassadenbahn, schwarz	Lärche Vertikal Offen Abbildung 2c Lärche Horizontal Offen Abbildung 2d Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2e
Nageldichtband	UV-beständig	Lärche Horizontal Offen Abbildung 2d
Beschichtung	Dünnschichtprodukt, hellgrau, transparent Mittelschichtprodukt, anthrazitgrau, deckend	Fichte Horizontal Geschlossen Abbildung 2b
Befestigungsmittel	Edelstahl Schrauben mit Bohrspitze 5 x 45 mm	Lärche Vertikal und Horizontal Offen Abbildung 2c und d

	Verzinkte Schrauben 4 x 35 mm	Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2a Fichte Horizontal Geschlossen Abbildung 2b
Dämmung	Mineralwolle MW-EN13162-T3-WL(P)- MU1-AFr25, ThB mit Glasvlieskaschierung	Fichte Vertikal Geschlossen Abbildung 2e

2.3 Beschichtung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Teile der horizontalen geschlossenen Fichtenfassade mit zwei unterschiedlichen Beschichtungssystemen versehen (siehe Tabelle 1). Die Applikation erfolgte mittels einer Walze, wobei für jede Variante zwei Anstriche durchgeführt wurden und gemäß Versuchsplan teilweise auch das Hirnholz gestrichen wurde. Die Dünnschichtlasur wurde mit einer Auftragsmenge von $\sim 1,2 \text{ g/mm}^2$ und die Mittelschichtlasur mit einer Auftragsmenge von $\sim 0,9 \text{ g/mm}^2$ appliziert. Die Schichtdicke wurde mikroskopisch bestimmt (Abbildung 3a). Die statistische Auswertung der Schichtdicken zeigt signifikante Unterschiede zwischen den beiden Beschichtungsarten. Der Median der Schichtdicke nach zwei Anstrichen betrug $17,2 \text{ }\mu\text{m}$ für die Dünnschichtlasur und $32,2 \text{ }\mu\text{m}$ für die Mittelschichtlasur (Abbildung 3b).

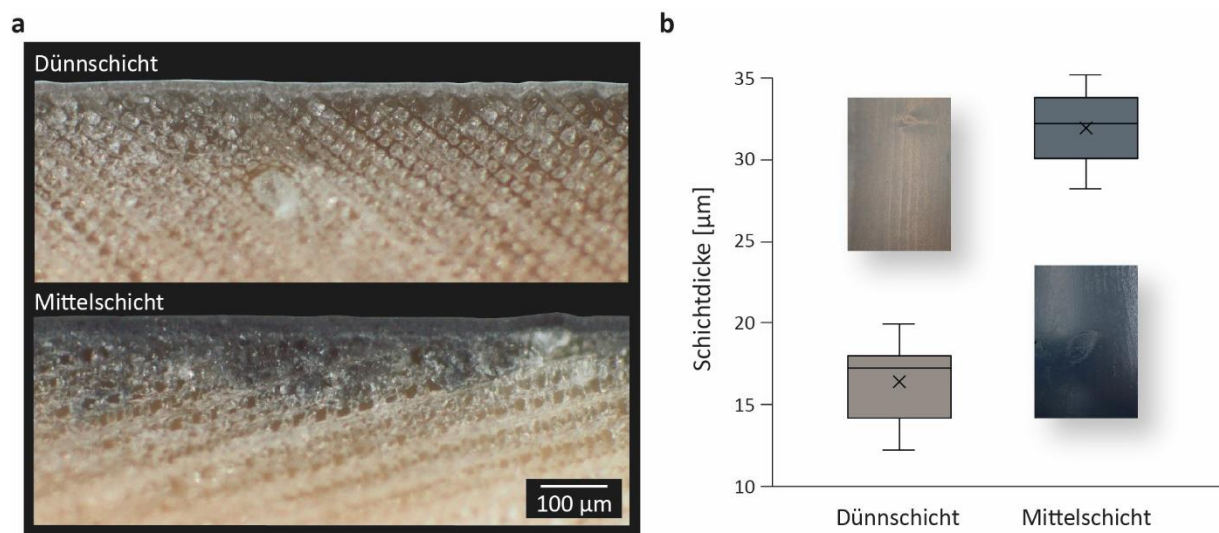


Abbildung 3: Bestimmung der Schichtdicke (a) Mikroskopische Aufnahmen der Hirnholzfläche der beschichteten Fassadenbretter. (b) Ergebnisse der Schichtdickenmessung dargestellt als Boxplot. Median der Dünnschicht liegt bei $17,2 \text{ }\mu\text{m}$ und $32,2 \text{ }\mu\text{m}$ bei der Mittelschicht ($n = 19$). Inlay zeigt die Farbe und Oberfläche der beschichteten Fassadenschalung.

2.4 Bestimmung der Holzfeuchte

Es wurde die Methode der elektrischen Widerstandsmessung verwendet, um die Holzfeuchte (HF) zu überwachen. Diese Methode ist weithin anerkannt und zuverlässig und ermöglicht die

zerstörungsfreie Messung von Feuchtgradienten über den Querschnitt an einer bestimmten Stelle. Sie ist nach EN 13183-1 genormt und eignet sich im Allgemeinen für Überwachungskonzepte von Feuchteverläufen (ÖNORM EN 13183-1).

Für einen Holzfeuchtebereich von 6 % bis 30 % (bis zur Fasersättigung, siehe Abbildung 1) haben handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte eine Varianztoleranz von $\pm 1,0$ % oder weniger. Für eine umfassende Methodenübersicht sowie einen Vergleich alternativer Methoden zur kontinuierlichen Holzfeuchtemessung wird auf (Dietsch et al. 2015) erwiesen.

Es ist zu beachten, dass die Holzfeuchtwerte der verschiedenen Holzarten (in dieser Versuchsreihe Fichte und Lärche) nicht direkt miteinander verglichen werden können. Das liegt an der unterschiedlichen Dichte von Lärche ($\sim 590 \text{ kg/m}^3$) und Fichte (470 kg/m^3) (Wagenführ und Wagenführ 2021). Bei höherer Dichte ist weniger freies Wasser in der Holzsubstanz vorhanden (siehe Abbildung 1) und der elektrische Widerstand bei der Holzfeuchtemessung höher (BARKAS et al. 1943).

Es wurde ein Messsystem für die Klimakammer etabliert, das es ermöglicht, die Holzfeuchten schnell und einfach auszulesen. Dazu wurden isolierter Drähte in die Fassadenbretter und in die Unterkonstruktion bis in die Mitte der jeweiligen Holzschicht gebohrt und eingeschlagen (Abbildung 4a und b). Die Holzfeuchte wurde kontinuierlich mit der gewählten Messtechnik und dem gleichen Holzfeuchtemessgerät (Brookhuis Moisture Detector, Seriennummer 22-070) an einem Dashboard abgelesen, an dem die Messstellen gesammelt wurden (Abbildung 4c). Die Holzfeuchte wurde alle 24 Stunden gemessen. Zur weiteren Validierung wurde die Holzfeuchte auch mit isolierten Einschlagelektroden direkt an der Fassade gemessen. Die Abweichungen lagen im Toleranzbereich von $\pm 1,0$ %.

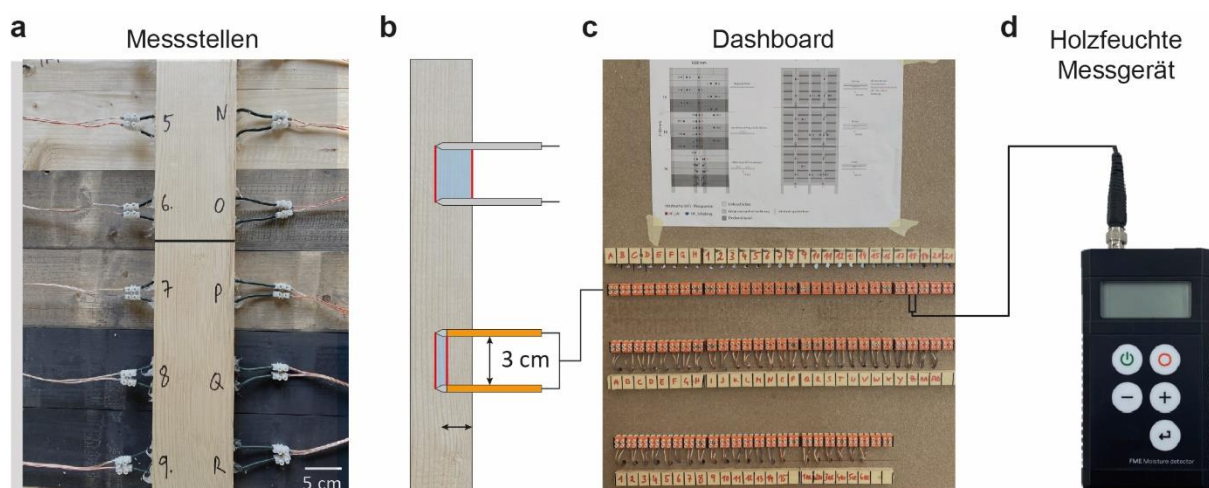


Abbildung 4: (a) Einbringung der Elektroden in die Traglattung unter Verwendung von isolierten Drahtverbindungen. (b) Prinzip der Holzfeuchtemessung mit einer isolierten Messspitze, im Abstand von 3 cm zueinander und bis in die Mitte der Holzdicke. Diese Darstellung dient dem Vergleich des Messbereichs im Vergleich zu nicht isolierten Messspitzen (oben). (c) Dashboard, auf dem die Messstellen zusammengeführt und mit dem Holzfeuchtemessgerät (d) "Bookhuis FME Moisture Detector" abgelesen wurden.

2.5 Klimakammer

Die Holzforschung Austria hat ein Schnellbewitterungsverfahren entwickelt, das den Alterungsprozess von Holzfassadensystemen durch künstliche Bewitterung simuliert. Die Versuche wurden in der Klimakammer der Holzforschung Austria durchgeführt, die mit einer Beregnungsanlage und einer UV-Bestrahlungseinrichtung ausgestattet ist. Die Beregnungsanlage verfügt über vier Sprühnebeldüsen, die einen Wasserauftrag zwischen 0,5 und 5 Liter pro Quadratmeter pro Minute ermöglichen. Die UV-Strahler haben eine Leistung von je 100 Watt, sodass eine Gesamtbestrahlungsstärke von 35 bis 50 Watt pro Quadratmeter bei einem Abstand von 40 cm zur Oberfläche erreicht wird.

Die Ergebnisse der Schnellbewitterung können zur vergleichenden Analyse von Fassadensystemen herangezogen werden. Eine direkte Übertragung auf die tatsächlichen Bewitterungszeiträume im Außenbereich ist nicht möglich. Im Einzelfall ist zudem immer auch die spezifische Situation am jeweiligen Standort bzw. Objekt zu betrachten.

Ziel dieser vergleichenden Untersuchungen war es, das Abtrocknungsverhalten unterschiedlicher Konstruktionsvarianten zu vergleichen und daraus das Potenzial zur Bildung von Flechtenestern abzuleiten. Damit ist durch die wissenschaftliche Bewertung eine Einschätzung des Schadenpotenzials und gleichzeitig der Feuchteresistenz der gewählten Konstruktion möglich.

Der Prüfzyklus ist nachfolgend beschrieben.

2.6 Prüfzyklus in der Klimakammer

Der Prüfzyklus basiert auf den Daten des Arbeitspakets 3 (Kühle Fassade) des Forschungshauses Stetten (Details siehe Anhang A1). Er simuliert die Umweltbedingungen, denen Holzfassaden in der Realität ausgesetzt sein können, hinsichtlich Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und UV-Belastung.

Die mittleren Tagesverläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit wurden anhand von Messungen von Mai bis Ende August an der Süd- und Westfassade des Forschungshauses ermittelt. Die mittlere Temperatur innerhalb von 24 Stunden lag zwischen 15 und 25 °C, die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 45 und 80 % (Abbildung 5a). Dies ergibt einen Median von 20 °C für die Temperatur und etwa 60 % für die relative Luftfeuchtigkeit (Abbildung 5b). Diese Bedingungen wurden für die 72-stündige Rücktrocknungsphase verwendet.

Die UV-Belastung wurde aus den im gleichen Zeitraum gemessenen Globalstrahlungsdaten abgeleitet und mit einem Anteil von 7 %¹ an der Globalstrahlung angenommen. Abbildung 5 zeigt den mittleren Tagesverlauf der UV-Belastung für die Süd- und Westfassade. Da die Gesamtbestrahlungsstärke in der Kammer auf der Fassadenoberfläche in einem Abstand von

¹ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/globalstrahlung.html>

ca. 40 cm zwischen Strahler und Fassade 35 bis 50 W/m² und der Abstand im Versuchsaufbau etwa 100 cm betrug, wurde während der Trocknungsphase eine kontinuierliche UV-Bestrahlung verwendet, um näherungsweise die gleiche UV-Belastung zu erzielen.

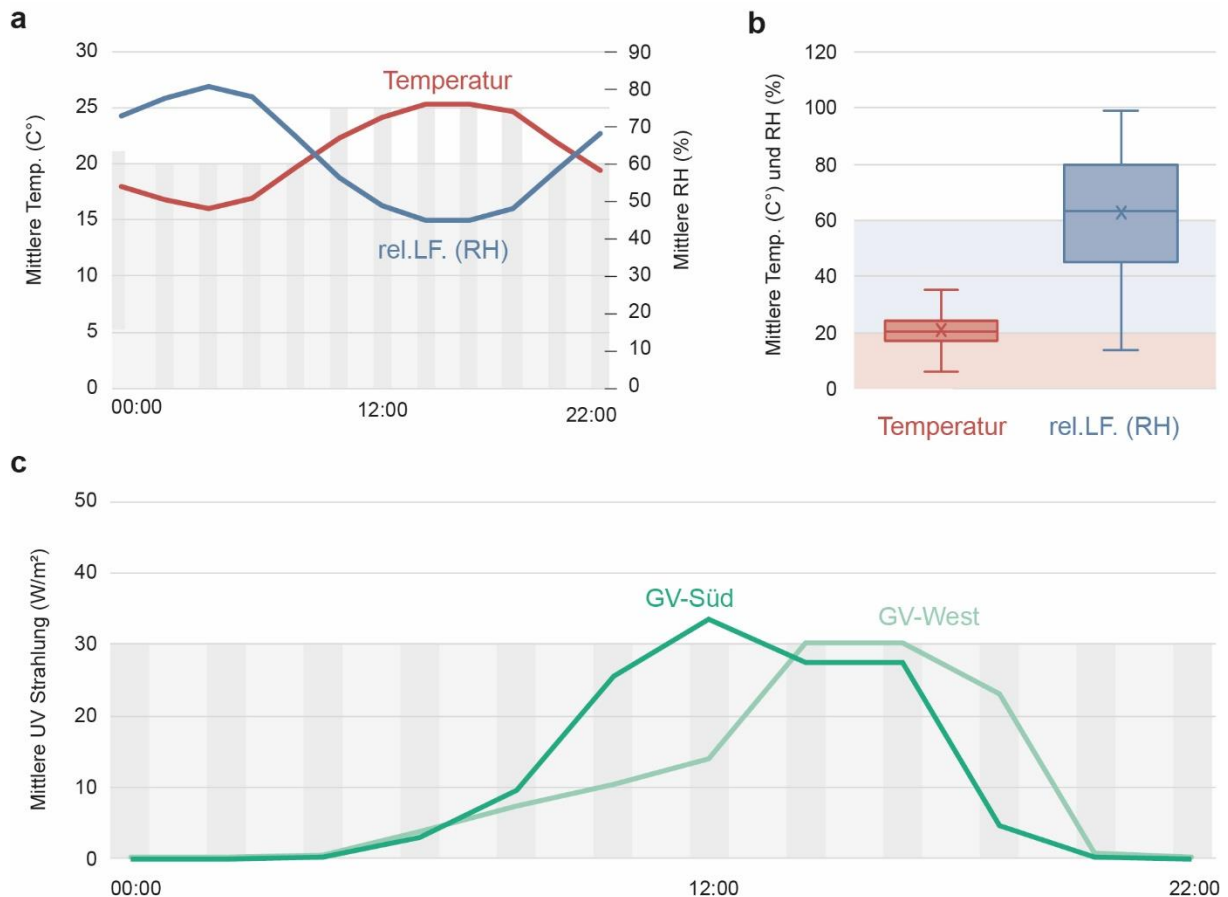


Abbildung 5: Ermittlung der Prüfparameter für die Klimakammer. (a) Mittlere Tagesverlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte an der Süd- und Westfassade. (b) Boxplot der Mittleren Temperatur und relativen Luftfeuchte. (c) Mittlere UV-Strahlung auf die Süd- und Westfassade. Die Werte wurden am Forschungshaus in Stetten aufgezeichnet und für diese Darstellung von Mai bis Ende August ausgewertet.

Die Beregnung erfolgte über vier quadratische Vollkegeldüsen mit einem Sprühwinkel von jeweils 120 Grad. Die auf die Fassade aufgetragene Wassermenge wurde im Vorfeld gemessen und auf ca. 2,4 l/m² pro Minute eingestellt.

Zu Beginn wurde ein Vorversuchszyklus durchgeführt (Abbildung 6), um die optimale Beregnungsdauer und Trocknungszeit innerhalb der Zyklen zu ermitteln. Ziel war es, den Zeitpunkt zu identifizieren, an dem die Fassadenschalung eine Holzfeuchte von ca. 30 % (entspricht etwa dem Fasersättigungspunkt) erreicht, während die anschließende Rücktrocknung die Holzfeuchte auf ca. 20 % reduziert. Abbildung 6 zeigt, dass bereits nach 24 Stunden die 30 % Holzfeuchte in der Fassadenschalung überschritten wurde. Nach einer dreitägigen Trocknungszeit sank der Verlauf der Holzfeuchtekurve wieder unter 20 %. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der nachfolgende Prüfzyklus festgelegt.

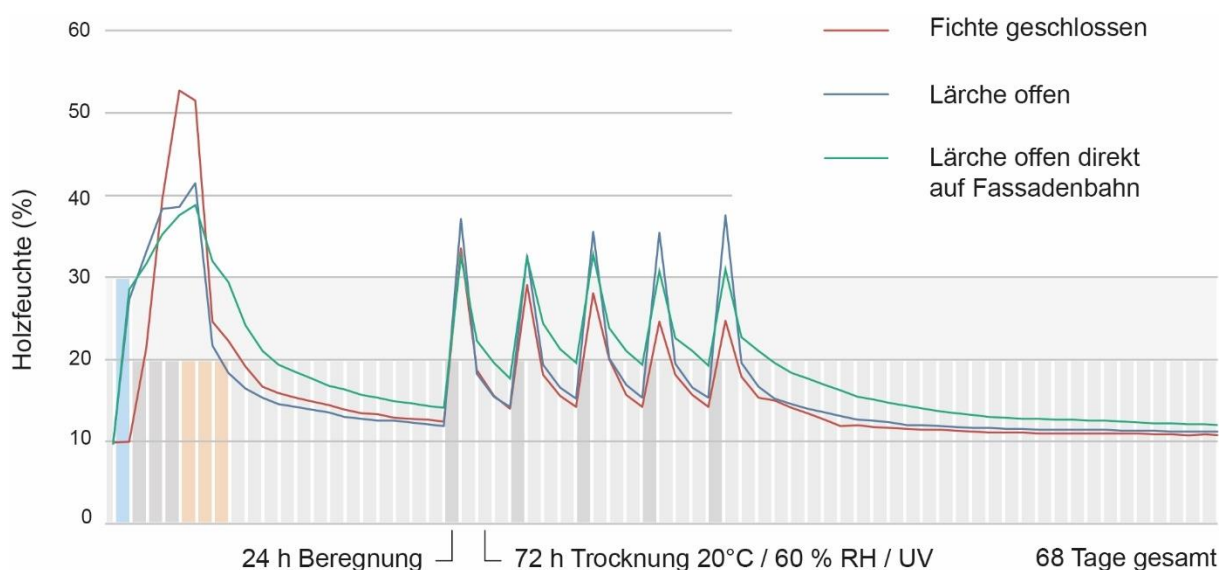


Abbildung 6: Probezyklus zur Bestimmung der Beregnungsdauer und Trocknungsdauer. Innerhalb von 24 h wurde Fasersättigung erreicht (blauer Balken) und nach drei Tagen Trocknung wurde die 20 % Holzfeuchte erreicht (orange Balken). Jeder Balken stellt 24 Stunden dar.

Daher wurde für den Prüfzyklus eine Beregnung über einen Zeitraum von 24 Stunden festgelegt. Danach folgte eine Trocknungsphase von 72 Stunden, sodass der gesamte Zyklus vier Tage dauerte. Dieser Zyklus wurde fünfmal wiederholt (Abbildung 6, dunkelgraue und hellgraue Abschnitte). Am Ende der fünf Zyklen wurde ca. 16 Tage rückgetrocknet. Der Zyklus setzt sich damit aus folgenden Teilschritten zusammen:

1. Beregnung der Fassadenelemente mit einer Wassermenge von etwa 2,4 l/min m² über einen Zeitraum von 24 Stunden.
2. Trocknung der Fassadenelemente bei einer Temperatur von 20 °C, einer relativen Luftfeuchte von 60 % und kontinuierlicher UV-Bestrahlung.
3. Tägliche Überprüfung der Holzfeuchte und visuelle Beurteilung der Fassaden.
4. Beginn eines neuen Zyklus mit insgesamt fünf Wiederholungen.
5. Nach dem Abschluss des fünften Zyklus wurde eine Rücktrocknungsphase von 16 Tagen durchgeführt.

Diese Methode ermöglichte die Untersuchung des Trocknungsverhaltens der Holzfassade unter realistischen Umweltbedingungen, wobei das angenommene Szenario eine durchaus hohe Beanspruchung darstellt. Die Versuche bilden die Grundlage für die nachfolgend präsentierten Ergebnisse.

2.7 Datenlogger

Die Temperatur- und relative Luftfeuchtigkeitsverläufe in Versuchsaufbau 3 (hinter der Fassadenschalung verbaute Dämmung) wurden mit HOBO MX2300 Datenloggern

aufgezeichnet. Zur Konfiguration der Logger wurde die HOBOMobile® App verwendet, wobei die Datenaufzeichnung über die gesamte Versuchszeit auf ein Intervall von 10 Minuten eingestellt wurde. Die aufgezeichneten Daten wurden über Bluetooth® abgerufen und anschließend als xlsx-Datei auf einen Computer übertragen. Die Daten wurden zur Auswertung in Microsoft Excel verwendet.

Die Datenlogger wurden sowohl in der Belüftungsebene als auch im Dämmstoff platziert. Im Dämmstoff wurden sie in Vertiefungen positioniert (Abbildung 7), um eine etwaige erhöhte Luftfeuchtigkeit während der Trocknungsphase zu erkennen. Das Auftreten einer erhöhten oder länger anhaltenden Luftfeuchtigkeit im Dämmstoff während der Trocknungsphase könnte auf einen möglichen Wassereintritt oder eine Wasseransammlung im Dämmstoff hinweisen.

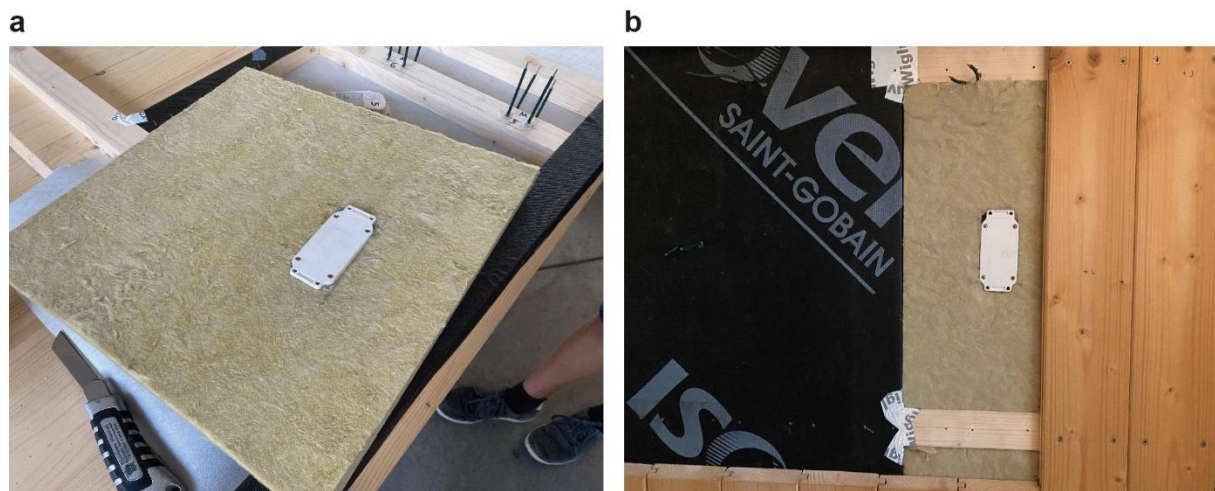


Abbildung 7: (a) Einbau der Datenlogger in die Dämmebene. (b) Datenlogger in der Dämmebene nach dem Versuch, links hinter der Fassadenbahn (nicht ersichtlich), rechts direkt hinter der Fassadenschalung.

2.8 Datenauswertung und Darstellung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Holzfeuchtwerte über einen Zeitraum von ca. 36 Tagen kontinuierlich erfasst und in Microsoft Excel protokolliert. Zur übersichtlichen Visualisierung des Feuchteverlaufs wurden Liniendiagramme erstellt, wobei jeder Tag eine Messung darstellt. Um eine konsistente Vergleichbarkeit der Holzfeuchteveränderungen über den gesamten Zeitraum zu gewährleisten, wurde die Ordinate stets im Bereich von 5 bis 50 % skaliert.

Zusätzlich zu den Liniendiagrammen wurden Heatmaps erstellt, um den Verlauf der Holzfeuchte anschaulicher darzustellen. In diesen Heatmaps wurde die Farbpalette entsprechend der Feuchtwerte angepasst, wobei Blau (50 %, feucht), Grau (im Bereich von 18 %, Grenzbereich) und Rot (5 %, trocken) verwendet wurden. Diese visuellen Darstellungen erleichterte das Erkennen von Mustern und Trends im Feuchteverlauf.

Alle Abbildungen, einschließlich der Liniendiagramme und Heatmaps, wurden anschließend in Adobe Illustrator 2023, Version 27.8.1, bearbeitet. Diese Software wurde ausgewählt, um die Qualität und Genauigkeit der Grafiken zu gewährleisten und sicherzustellen, dass die Darstellungen den wissenschaftlichen Standards entsprechen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Offene Fassade

3.1.1 Einfluss der Positionierung der Fassadenbahn auf das Feuchteverhalten

In dieser Untersuchung wurde der Einfluss der Positionierung der Fassadenbahn auf das Feuchte- und Verformungsverhalten bei offenen Fassaden analysiert. Die schematische Darstellung des Fassadenelements ist in Abbildung 8a zu sehen. Auf der linken Seite (A) ist die Fassadenbahn hinter der Traglattung, auf der rechten Seite (B) direkt hinter der Fassadenschalung angeordnet.

3.1.1.1 Feuchteverhalten der Fassadenschalung

In Abbildung 8b wird der Feuchteverlauf der Holzfassadenschalung dargestellt. Obwohl die Fassadenschalung ohne direkt dahinter verlegten Fassadenbahn in der Beregnungsphase stärker befeuchtet wird, erfolgt die Trocknung in der 72-stündigen Rücktrocknungsphase schneller und sinkt relativ rasch unter die kritische Marke von 20 % (Abbildung 8b, graue Kurve). Im Gegensatz dazu zeigt die Fassadenschalung mit der direkt hinter der Fassadenschalung angebrachten Fassadenbahn ein verlangsamtes Trocknungsverhalten und erreicht erst am Ende des 4-tägigen Zyklus die kritische Schwelle von 20 % Holzfeuchte (Abbildung 8b, schwarze Kurve). Zur Veranschaulichung dieses Verhaltens wurden Heatmaps erstellt, die die Extremwerte der Holzfeuchte farblich darstellen. Die Farben Blau und Rot wurden für die Maximal- und Minimalwerte gewählt, während die mittlere Farbe (Grau) den Schwellenwert von 18 % darstellt. Die Farbskala ist von 5 % bis 50 % skaliert. In den Heatmaps ist wiederum zu erkennen, dass die Trocknung mit einer direkt hinter der Fassadenschalung angebrachten Fassadenbahn länger dauert (Abbildung 8c, Details A und B).

Des Weiteren wurden die Holzfeuchteverläufe der Fassadenschalung an den Kreuzungspunkten mit der Traglattung gemessen. Dabei zeigte sich, dass eine zur Fassadenschalung hin abgeschrägte Traglatte („vom Gebäude weg“) den Trocknungsprozess der Fassadenschalung am stärksten beeinträchtigt (Abbildung 8b und c, Detail E).

3.1.1.2 Feuchteverhalten der Unterkonstruktion

Zusätzlich wurde untersucht, wie die Form der Traglattung das Befeuchtungs- und Trocknungsverhalten beeinflusst. Die Ergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass die feuchtekritischen Bereiche vorwiegend in der Unterkonstruktion liegen. Dieses Muster wird in den Abbildung 8d und e deutlich, da während der periodischen Beregnung ein stetiger Anstieg der Holzfeuchte zu verzeichnen ist, dem nur eine geringe Abnahme während der Trocknungsphase folgt.

Besonders auffällig ist, dass eine zur Fassadenschalung abgeschrägte Traglattung die höchsten Holzfeuchtwerte aufweist und gleichzeitig die längste Trocknungszeit benötigt (Abbildung 8d und e, Detail E). Im Gegensatz dazu zeigt eine von der Fassadenschalung weg geneigte Traglattung eine geringere Feuchteaufnahme und eine kürzere Trocknungszeit (Abbildung 8d und e, Detail F). Diese Unterschiede können auf die Wasserführung hin zu den Kontaktflächen zwischen Traglattung und Fassadenschalung zurückgeführt werden. Insbesondere bei einer in Richtung der Fassadenschalung geneigten Traglattung sammelt sich in diesen Bereichen Wasser und Schmutz, was wiederum zu einer erhöhter Holzfeuchte in der Fassadenschalung (am Knotenpunkt) und zu verlängerten Trocknungszeiten führt (Abbildung 8c, Detail E). Der Feuchteverlauf ohne Gefälle der Traglattenoberseite liegt zwischen den beiden anderen Ausführungsvarianten.

Erkenntnis (siehe auch Merkblatt und Hintergründe Abschnitt 1.3):

Wasserableitung in und aus der Fassade beachten. Bei offenen Fassaden benötigen horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm.

3.1.1.3 Feuchteverhalten der Unterkonstruktion hinter der Fassadenbahn

Die Abbildung 8d und e zeigen, dass sowohl die Traglattung hinter der Fassadenbahn (Detail C) als auch die Traglattung ohne vorgelagerte Fassadenbahn (Detail D) ähnlich schnell durchfeuchtet werden. Dies verdeutlicht, dass eine direkt hinter der Fassadenschalung angebrachte Fassadenbahn die Unterkonstruktion nicht wirksam vor Durchfeuchtung schützt. Die Traglattung hinter der Fassadenbahn (Detail C) trocknet jedoch am Ende des Zyklus nur sehr langsam ab, was zu einer längeren Phase mit kritischer Holzfeuchte führt.

Dieses Ergebnis ist nur eingeschränkt mit dem Versuch unter Verwendung einer Nageldichtung vergleichbar (siehe Abschnitt 3.1.3.2 Details D und E), da die Traglatte bei letzterem vertikal orientiert war, wodurch eine Luftschicht zwischen Fassadenschalung und Fassadenbahn entsteht. Dies bewirkt eine verbesserte Wasserableitung und verringert Kapillareffekte.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Dauer, während der die Holzfeuchte über 20 % liegt, ein entscheidender Faktor für das Wachstum holzerstörender Pilze ist. Holzkonstruktionen, die in der Regel schnell abtrocknen können, sind deutlich weniger anfällig für Pilzwachstum. Im Gegensatz dazu sind Konstruktionen mit eingeschränkter Luftzirkulation und einem Mikroklima mit hoher Luftfeuchtigkeit (Hill et al. 2022; Podgorski et al. 2019), wie die hier gezeigte offene Lärchenfassade mit einer direkt hinter der Fassadenschalung montierten Fassadenbahn, besonders gefährdet.

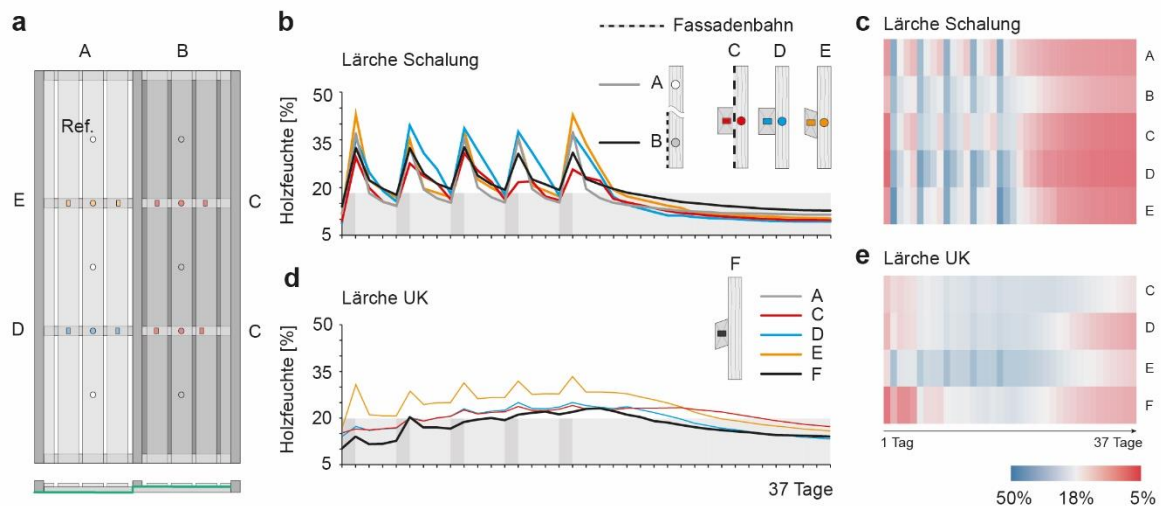


Abbildung 8: Einfluss der Fassadenbahn und der Neigung der Traglattung auf den Feuchteverlauf einer vertikalen, offenen Lärchenholzfassade. (a) Aufbau des Fassadelements mit den Messpunkten (Kreise Messpunkte in der Schalung, Rechtecke Messpunkte in der Traglattung). (b) Verlauf der Holzfeuchte in der Fassadenschalung in der Fläche (Details A und B) und am Knoten mit dahinterliegender Traglattung. Signifikant ist, dass die Fassadenbahn zu einer längeren Trocknung der Fassadenschalung führt, siehe graue (Detail A, ohne Fassadenbahn) und schwarze Linie (Detail B, mit Fassadenbahn). (c,e) Heatmap der Feuchteverteilung über die gesamte Versuchsdauer. Blau und Rot stellen die Extremwerte dar, die mittlere Farbe (grau) den Schwellenwert von 18 %. Die Farbskala ist von 5 % bis 50 % skaliert. (d) Feuchteverlauf in der Traglattung, die schwarze Linie (Detail F) zeigt den Feuchteverlauf, wenn die Unterkonstruktion nach hinten abgeschrägt ist und somit die beste Variante.

3.1.2 Einfluss der Positionierung der Fassadenbahn auf die Verformung

Wie bereits erwähnt, wird der Trocknungsprozess bei offenen Fassaden maßgeblich durch eine direkt hinter der Fassadenschalung angebrachte Fassadenbahn beeinflusst. Die Positionierung der Fassadenbahn hinter der Unterkonstruktion zeigte eine effektivere Trocknung der Fassadenschalung (Abbildung 8) sowohl nach außen als auch nach innen und somit nur eine minimale bis vernachlässigbare Verformung (Abbildung 9a). Im Gegensatz dazu wurden bei der Anordnung der Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung deutliche Verformungen bis hin zum Versagen der Befestigungsmittel beobachtet (Abbildung 9b und c). Dieses Verhalten kann durch eine eingeschränkte Trocknung erklärt werden. Die Fassadenbahn behindert die Abtrocknung nach innen, sodass ein Feuchtigkeitsgradient

zwischen der äußeren und inneren Oberfläche der Fassadenschalung entsteht. Während die äußere Oberfläche schwindet, kann die innere Oberfläche nicht in gleichem Maße schwinden, da sie eine höhere und länger anhaltende Holzfeuchte (Feuchteansammlungen) aufweist. Dies führt zu inneren Spannungen, die auch noch vorhanden sind, wenn die Fassadenschalung eine gleichmäßige Holzfeuchte erreicht hat. Wie andere Studien auch gezeigt haben, kann dies zum Versagen der Befestigungsmittel und zur Rissbildung führen (Jakiela et al. 2008; Kang et al. 2011).

Das Ausmaß der Krümmung bei der offenen Lärchenfassade, die direkt auf der Fassadenbahn montiert wurde, war deutlich stärker ausgeprägt als bei der geschlossenen Fichtenfassade (siehe Abbildung 13). Dies liegt zum einen daran, dass bei der offenen Fassade deutlich mehr Wasser hinter die Fassadenbretter gelangen kann als bei der geschlossenen, zum anderen werden bei der geschlossenen Fassade die Bretter zusätzlich durch die Nut- und Feder-Verbindung in Form gehalten. Die unterschiedliche Holzart ist in diesem Fall weniger relevant, da die Verformungen bei verschiedenen Holzarten relativ ähnlich ausfallen (Virta et al. 2005).

Um übermäßige Verformungen zu vermeiden, wird empfohlen, die Fassadenbahn nicht direkt hinter der Fassadenschalung anzubringen. Außerdem sollte auf die Holzqualität geachtet werden. Eine Untersuchung hat gezeigt, dass Fladerbretter im Vergleich zu Riftbrettern eine deutlich höhere Rissanfälligkeit und eine stärkere Neigung zur Verformung aufweisen (Sandberg 1999). Dies wird auch durch umfangreiche Praxiserfahrungen bestätigt.

Erkenntnis (siehe auch Merkblatt und Hintergründe Abschnitt 1.1):

Bei offener Fassade keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung, da eine direkt auf der Rückseite der Fassadenschalung anliegende Fassadenbahn zu Feuchteansammlungen und Verformungen (Schüsselungen) der Fassadenbretter bis hin zum Schraubenabriss führen kann.

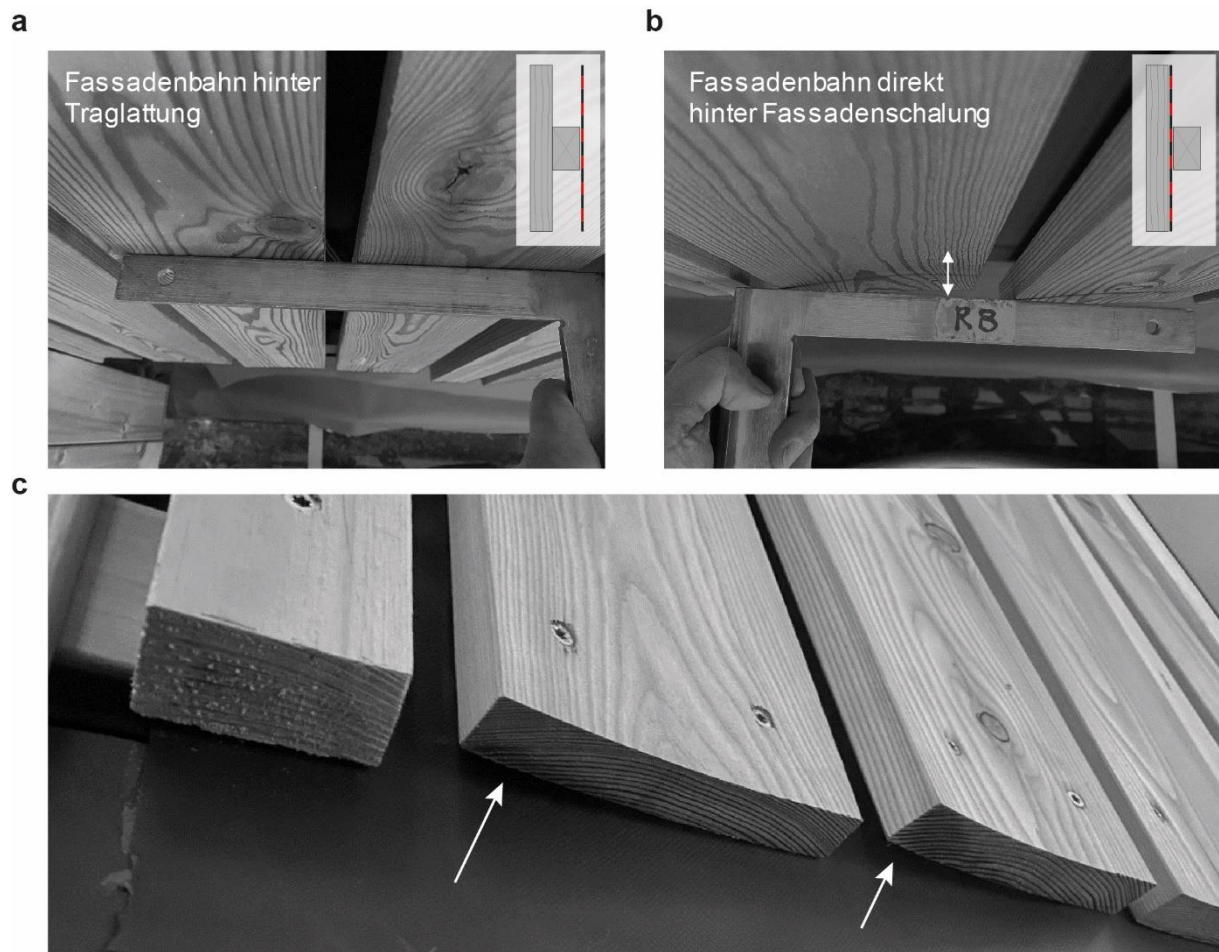


Abbildung 9: Eine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung führt zu Verformungen. (a) Fassadenbahn hinter der Traglattung. (b und c) Erhebliche Verformungen bei Verlegung der Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung.

3.1.3 Einfluss der Unterkonstruktionsbreite und Nageldichtung auf das Feuchteverhalten

3.1.3.1 Feuchteverhalten der Fassadenschalung

In der vorliegenden Untersuchung wurde der Einfluss der Unterkonstruktionsbreite und der Verwendung eines Nageldichtbandes auf das Feuchteverhalten einer horizontalen offenen Lärchenfassade untersucht. Abbildung 10a zeigt die schematische Darstellung des Fassadenelements mit den Positionen für die Holzfeuchtemessungen (Kreise für die Fassadenschalung und Rechtecke für die Unterkonstruktion). In der Mitte des Fassadenelements wurde eine Referenz-Traglatte installiert, die nicht durch Längsstöße beeinflusst wurde. In den Ergebnissen ist diese mit "Ref." bezeichnet.

Die Holzfeuchteverläufe in der Fassadenschalung zeigen, dass die unterschiedlichen Breiten der Traglattung keinen Einfluss auf das Trocknungsverhalten der Fassadenschalung haben. Obwohl die Holzfeuchte teilweise bis zu 40 % beträgt, erfolgt eine vergleichsweise schnelle und gleichmäßige Trocknung (Abbildung 10b).

3.1.3.2 Feuchteverhalten der Unterkonstruktion und des Wandbildners

Der Einfluss der Traglattenbreite auf die Holzfeuchte in der Traglattung selbst zeigt, dass die Holzfeuchtwerte der breiteren Traglatten weniger stark ansteigen als die der 50 mm breiten Traglatten. Das Verhalten der 110 mm (Detail A) und 80 mm (Detail B) breiten Latten ist ähnlich, während die 50 mm (Detail C) breite Traglatte insbesondere im vierten und fünften Zyklus generell eine höhere Holzfeuchte aufweist. Diese Unterschiede werden auch in den Medianwerten der Holzfeuchte der Traglatten in Abbildung 10d deutlich. Dies kann auf einen kürzeren Wasserweg von der Seite zur Messstelle in der 50 mm Traglatte zurückgeführt werden. Gleichzeitig kann die Feuchtigkeit aufgrund der kleineren Dimension auch schnell abtrocknen.

Generell hat eine Untersuchung gezeigt, dass „verwittertes“ Holz während einer kurzen, zyklischen Befeuchtung immer mehr und schneller Feuchtigkeit aufnehmen kann und nach der Befeuchtung länger auf einem höheren Feuchtigkeitsniveau verbleibt. Dies erleichtert auch das weitere Eindringen von Wasser in das Holzsubstrat, wo es sich im Laufe der Zeit ansammeln kann und zu Feuchtenestern führen kann (Niklewski et al. 2018). Daher ist bei offenen Fassaden auch die Traglattung gefährdet (Verwitterung), da diese nicht vor der Sonneneinstrahlung geschützt ist und sich, wie oben gezeigt, die kritischen Holzfeuchtebereiche vorwiegend in der Traglattung befinden.

Die Verwendung eines Nageldichtbands zwischen der senkrechten Traglattung und der Fassadenbahn auf dem Wandbildner wurde ebenfalls untersucht (siehe Konstruktionsdetails in Abbildung 10b, Detail D und E). Die Holzfeuchteverläufe und die Boxplots in Abbildung 10c und d (Details D und E) zeigen minimale Unterschiede der Holzfeuchte im Wandbildner hinter der Fassadenbahn mit und ohne Nageldichtband. Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Nageldichtband keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Holzfeuchte hat, da sie sich in einem ähnlichen Bereich von etwa 12 % bewegt.

Bemerkenswert ist, dass an einem Messpunkt der Referenztraglatte eine unerwartet hohe Holzfeuchte festgestellt wurde (Abbildung 10c, graue Linie). Wie in Abbildung 10e zu sehen ist, lag der Medianwert für diesen Messpunkt bei ca. 35 % und wurde daher als Ausreißer klassifiziert. Bei der Analyse des Fassadenelements und der visuellen Begutachtung wurde ein Riss in der Traglattung festgestellt. Abbildung 10f zeigt den Riss im Versuchsaufbau. Durch diesen Riss kann Wasser tiefer in das Holz eindringen, was zu einer lokal erhöhten Holzfeuchte führt (Osawa et al. 2023; Osawa et al. 2019).

Obwohl sich diese Studie nicht primär auf Risse und deren Auswirkungen konzentrierte, zeigen die Messungen, dass Risse einen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte des umgebenden Holzgewebes haben. Das daraus resultierende Mikroklima um die Risse könnte günstige Bedingungen für Pilzbefall schaffen. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um den Einfluss von Rissen auf die lokale Holzfeuchte und deren Zusammenhang mit der Pilzbesiedlung zu untersuchen, wie dies bereits in anderen Studien beobachtet wurde (Osawa et al. 2023; Osawa et al. 2019; Niklewski et al. 2018).

Zusätzlich führt Sonneneinstrahlung zu einem Ligninabbau, der eine erhöhte Rissbildung in exponiertem Holz zur Folge hat (Evans et al. 2008). Die beim Ligninabbau entstehenden Fragmente können zudem als Nährstoffquelle für holzerstörende Pilze dienen. Die Häufigkeit dieser Veränderungen hängt von verschiedenen Faktoren wie Standort, Holzart, Intensität der Sonneneinstrahlung und Dauer der Exposition ab (Hill et al. 2022). Dies betrifft bei offenen Fassaden auch die Traglattung. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Qualität des Holzes, das für Traglatten in offenen Fassaden verwendet wird, potenziell die Lebensdauer einer Holzfassade beeinflussen kann.

Erkenntnis (siehe auch Merkblatt und Hintergründe Abschnitt 1.2):

Zwischen Traglattung bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner ist keine Nageldichtung (Dichtbänder oder Dichtmittel) erforderlich.

Auf die Qualität auch bei der Traglattung achten, da Risse zu Feuchtenestern führen können.

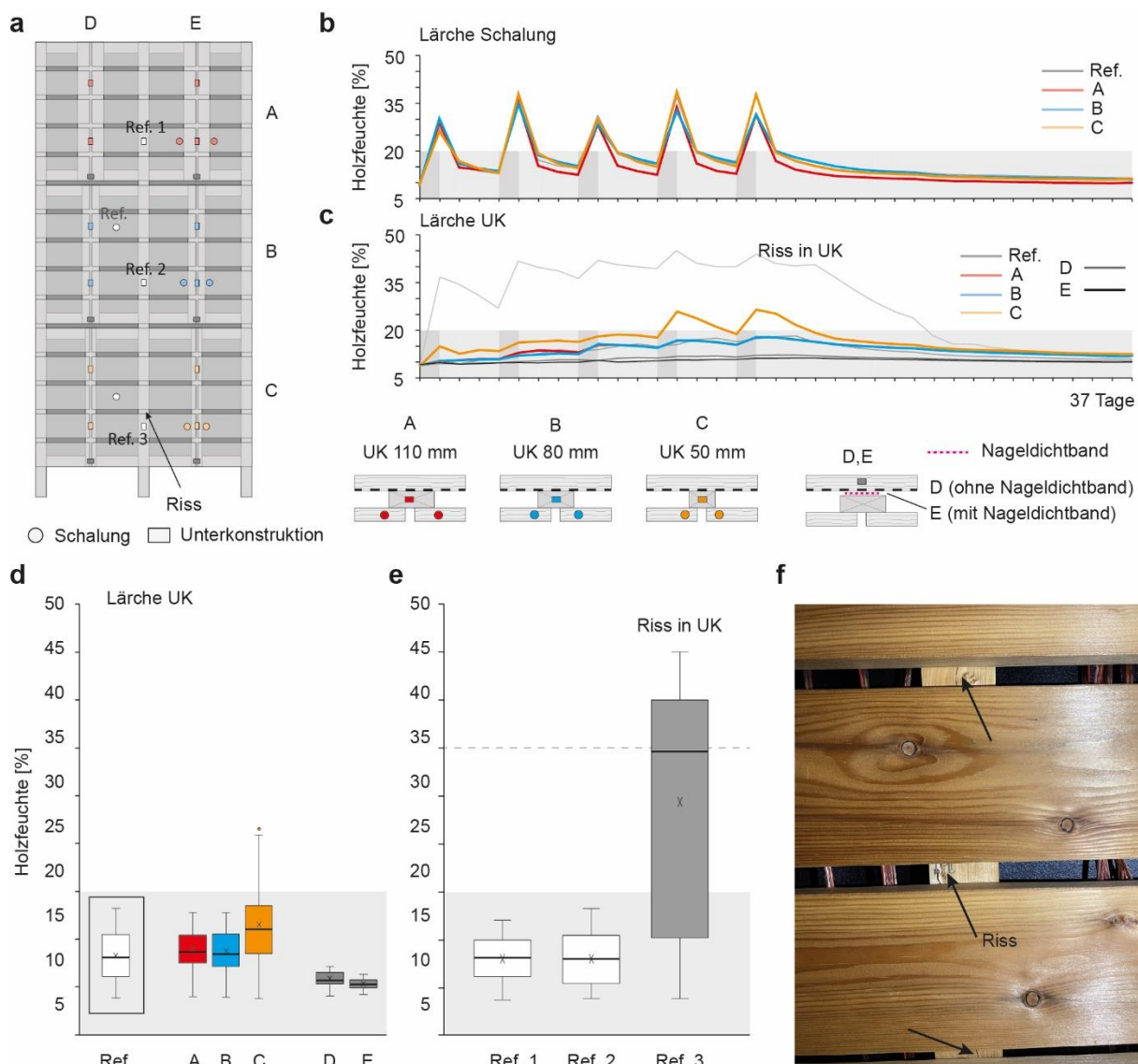


Abbildung 10: Der Einfluss verschiedener Traglattenbreiten und des Nageldichtbandes auf das Feuchteverhalten einer horizontal ausgeführten offenen Lärchenfassade. (a) Zeigt die Konstruktion des Fassadenelements mit den Messpunkten, wobei Kreise die Messpunkte in der Schalung und Rechtecke die Messpunkte in der Traglattung repräsentieren. (b und c) Holzfeuchteverläufe in der Fassadenschalung und der Traglattung. (d) Die Holzfeuchteverteilung für die Traglattung als Boxplots dargestellt. (e) Da im Referenz-Boxplot in (d) die Median-Holzfeuchte-Werte der Traglattung dargestellt sind und der Ausreißer (Riss) nicht erkennbar ist, wurde in Abbildung (f) die Referenz-Messstellen getrennt dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass ein Riss und somit die Holzqualität lokal einen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte hat. (f) Zeigt ein Bild der Referenz-Tragplatte, auf der ein deutlicher Riss im unteren Feld (Detail C) sichtbar ist.

3.2 Geschlossene Fassade

3.2.1 Einfluss der Längsstoßausbildung bei einer vertikalen geschlossenen Fassade

3.2.1.1 Feuchteverhalten der Fassadenschalung

Der folgende Versuchsaufbau hatte zum Ziel, die Auswirkungen unterschiedlicher Längsstoßvarianten auf den Holzfeuchteverlauf an vertikalen, geschlossenen Fassaden zu untersuchen. In Abbildung 11a ist das Fassadenelement schematisch dargestellt, wobei die spezifischen Holzfeuchtemesspunkte eingezeichnet sind. Im oberen Bereich ohne Längsstöße der Fassadenschalung wurde eine Traglatte als Referenzlatte angebracht, um den Einfluss der Stöße auf die Holzfeuchte der Traglattung bewerten zu können. Zusätzlich wurden sechs Referenzmesspunkte in der Fassadenschalung angebracht (weiße Kreise), um auch hier Vergleichswerte zu erhalten, die nicht durch Stöße beeinflusst wurden.

Diese Referenzpunkte wiesen während der periodischen Beregnung die niedrigsten Holzfeuchtwerte auf und zeigten ein schnelles Trocknungsverhalten (Abbildung 11b, graue Linie). Im Vergleich dazu stellen sich an den Knotenpunkten zwischen Fassadenschalung und Traglatten erhöhte Holzfeuchtwerte in der Fassadenschalung ein (Abbildung 11b und c, Details A, B, C). Dies lässt sich einerseits dadurch erklären, dass die Messpunkte 50 mm vom Längsstoß (Hirnholz) entfernt liegen und andererseits dadurch, dass Wasser bei Schlagregen durch die offene Fuge eindringen kann und die Hölzer im Anschlussbereich auffeuchtet. Allerdings trocknet die Fassadenschalung beim offenen, auf einer Traglatte positionierten Stoß am schnellsten ab (Abbildung 11b, Detail C), während die Fassadenschalung bei beiden geschlossenen Varianten (direkt auf einer Traglatte sowie auf zwei Traglatten mit jeweils 50 mm Abstand zum Stoß) die längste Trocknungsphase aufwies (Abbildung 11b, Details A und B). Vergleicht man diese beiden Varianten miteinander, verhält sich der nicht hinterlegte Stoß auf zwei Traglatten (Detail B) günstiger als der geschlossene hinterlegte Stoß (Detail A).

Dieses Muster ist deutlich in den Heatmaps zu erkennen, in denen der hinterlegte geschlossene Stoß nach den Zyklen den längsten Zeitabschnitt mit höheren Holzfeuchtwerten aufwies (Abbildung 11c, Detail A). Im Gegensatz dazu trocknete der hinterlegte offene Stoß am schnellsten ab (Abbildung 11c, Detail C), was auf die freiliegenden abgeschrägten Hirnholzflächen zurückzuführen ist, die einen schnelleren Trocknungsprozess ermöglichen.

3.2.1.2 Feuchteverhalten der Traglattung

Die Abbildung 11d zeigt, dass die 110 mm breite Traglatte beim hinterlegten geschlossenen Stoß zwar eine geringere Feuchteaufnahme aufweist, aber während der Trocknungsphasen keine signifikante Feuchteabnahme zeigt (Abbildung 11d und e, Detail A). Auch die 50 mm breite Traglatte mit einem Abstand von 50 mm zur Fuge weist längere Trocknungszeiten auf (Abbildung 11d und e, Detail B). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Schlagregen Wasser

durch den nicht hinterlegten stumpfen Stoß eindringen kann und sich auf der Tragplatte sammelt. Bei der hinterlegten offenen Fuge trocknet die Tragplatte dagegen ausreichend schnell ab und es besteht keine Gefahr von Feuchtenestern.

Die Fugenbreite von Holzfassaden wurde bereits in einigen Studien untersucht, jedoch nicht speziell in Hinblick auf die Holzfeuchte. Die Fugenbreite hat einen erheblichen Einfluss auf das Eindringen von Wasser hinter die Fassadenschalung. Es konnte gezeigt werden, dass Fugenbreiten ≥ 7 mm erhebliche Wassermengen in die Hinterlüftungsebene leiten. Spätere Untersuchungen haben diese Erkenntnisse bestätigt und gezeigt, dass bereits bei einer Fugenbreite von 5 mm erhebliche Wassermengen hinter die Fassade gelangen können. Bei Fugenbreiten ≤ 5 mm besteht jedoch die Gefahr der Wasseransammlung in der (Kapillar-) Fuge, was zur Bildung von Feuchtenestern und einem erhöhten Risiko von Pilzbefall führt (Støver et al. 2022). Auch die vorliegenden Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen eine längere Holzfeuchte bei geschlossenen Fugen (Abbildung 11)

Diese Beobachtungen unterstreichen die Notwendigkeit einer sorgfältigen Planung und Ausführung von Längsstößen. Es ist wichtig, dass zukünftige Konstruktionen diese Aspekte berücksichtigen, um die langfristige Integrität und Leistungsfähigkeit von Holzfassaden zu gewährleisten.

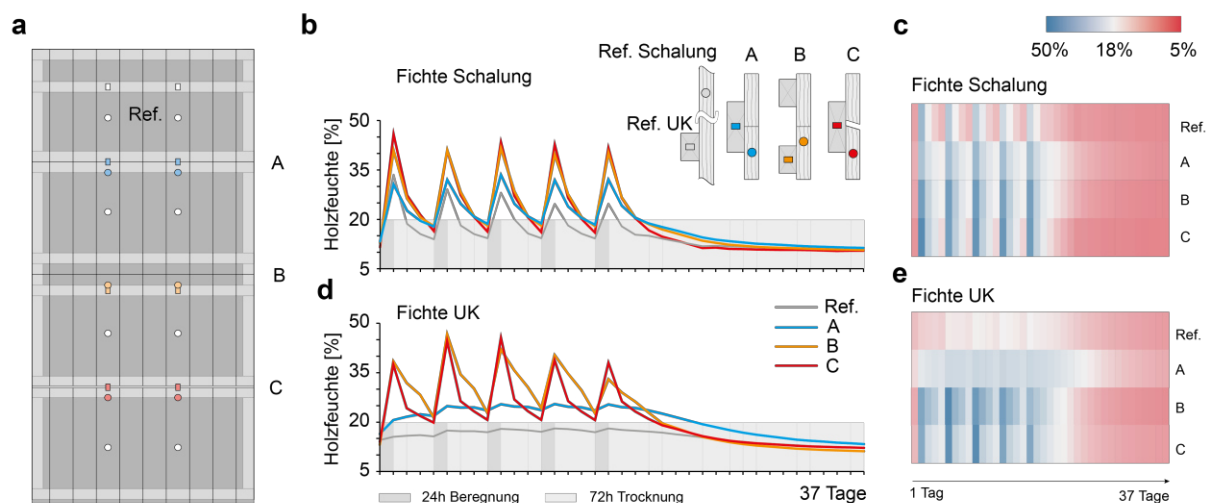


Abbildung 11: Einfluss der Längsstoßausbildung bei einer vertikalen geschlossenen Fassade. (a) Schematische Darstellung des Fassadenelements. Detail A geschlossene Fuge auf einer 110 mm breiten Tragplatte. Detail B geschlossene Fuge auf zwei Traglatten (Breite 50 mm) mit einem Abstand von 50 mm zur Fuge. Detail C offene Fuge (10 mm) auf einer 110 mm breiten Tragplatte, Hirnholzflächen sind 15° schräg geschnitten. (b) Holzfeuchteverläufe gemessen in der Fassadenschalung einschließlich der Knotenpunkte. (c) Heatmaps der Holzfeuchteverläufe in der Fassadenschalung. (d) Holzfeuchteverläufe in der Traglattung. (e) Heatmaps der Holzfeuchte in der Traglattung.

3.2.2 Einfluss der Längsstoßausbildung bei einer horizontalen geschlossenen Fassade und unterschiedlichen Beschichtungssystemen

3.2.2.1 Feuchteverhalten der Fassadenschalung

Der Schutz von Holzfassaden besteht häufig auch aus einer Beschichtung, insbesondere bei traditionellen Gebäuden. Es gibt jedoch einen zunehmenden Trend, unbeschichtetes Holz zu verwenden, unter anderem weil damit ein wesentlich geringerer (oder gar kein) Wartungsaufwand und damit eine geringere Umweltbelastung verbunden ist (Hill et al. 2021). Unbeschichtetes Holz kann unter ungünstigen Bedingungen (Konstruktionsfehler) anfällig für Verwitterung und biotischen (Schimmel, Pilze) und abiotischen (Wasser, Sonneneinstrahlung) Abbau sein (Evans et al. 2005), was im Außenbereich relativ rasch zu starken optischen Veränderungen führt („Vergrauung“). Wenn dies aus ästhetischen Gründen verhindert werden soll, kommen auch weiterhin immer wieder Beschichtungen zum Einsatz. Daher wurde im folgenden Versuchsaufbau das Feuchteverhalten von vertikalen, geschlossenen Holzfassaden mit verschiedenen Beschichtungssystemen und unterschiedlichen Längsstoßvarianten untersucht.

In Abbildung 12b sind die Feuchteverläufe der Fassadenschalung für verschiedene Varianten (Abbildung 12a) dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass die Holzfeuchte im Fugenbereich bei fliegenden Stößen (Detail A) moderat bleibt und nicht über 20 % steigt. Diese Ausführung verhält sich annähernd wie die Referenzmessungen in der Fassadenschalung ohne Einfluss von Längsstößen (Abbildung 12b, schwarze Kurven). Im Gegensatz dazu zeigt die Fassadenschalung mit dem geschlossenen hinterlegten Längsstoß (Detail B), dass die Holzfeuchte unabhängig vom Beschichtungssystem ähnlich reagiert. Allerdings dauert die Rücktrocknung am Ende bei dieser Stoßausbildung am längsten (Abbildung 12b, blaue Kurven, Detail B). Dieses Ergebnis korreliert mit den Erkenntnissen der vertikalen Fassade mit gleicher Stoßausbildung (Abbildung 11b, Detail A).

Die Fassadenschalung beim offenen Stoß (Detail C) hingegen weist während der periodischen Beregnung unabhängig vom verwendeten Beschichtungssystem die höchste Feuchteaufnahme auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine offene Fuge Wasser in die Konstruktion lässt und die Fassadenschalung auch an der Rückseite befeuchtet.

In Abbildung 12c sind die Ergebnisse in Form von Heatmaps dargestellt, um die beobachteten Holzfeuchteverläufe visuell zu veranschaulichen. Es wird deutlich, dass die Variante B unabhängig vom Beschichtungssystem nach fünf Zyklen die längste Trocknungszeit aufweist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Beschichtung des Hirnholzes mit einer Dünnschichtlasur einen positiven Einfluss auf die Feuchteaufnahme im Fugenbereich bei fliegenden Stößen hat (Abbildung 12c, Detail A, Hirnholz unbeschichtet und beschichtet). Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Wasseraufnahme über das Hirnholz verringert wird.

3.2.2.2 Feuchteverhalten der Traglattung

Die verschiedenen Stoßausbildungen zeigen tendenziell einen ähnlichen Einfluss auf das Feuchteverhalten der Traglattung (Abbildung 12d und e). Es zeigt sich jedoch, dass die hinterlegte geschlossene Fuge (Detail B1) sich auf die Rücktrocknung der Traglatte negativ auswirkt (Abbildung 12d und e). Dies korreliert mit der gleichen Ausführung an der vertikalen Fassade (Abbildung 11, Detail A). Daher wirkt sich eine geschlossene Fuge nachteilig auf die Trocknung der Traglattung aus und birgt somit ein Risiko für die Bildung von Feuchtenestern. Daher wurde in weiterer Folge die Fuge geöffnet und der Versuch wiederholt. Dabei zeigte sich, dass die Traglattung bei der hinterlegten offenen Fuge nicht so hoch auffeuchtet und deutlich schneller rücktrocknet (Abbildung 12d und e, Detail B2).

Bei der offenen Längsstoßausführung auf zwei Traglatten (Detail C) nimmt die Traglattung die Feuchtigkeit am schnellsten auf und zeigt während der Beregnungs- und Trocknungszyklen kaum eine Trocknung, der Holzfeuchtegehalt liegt beständig über 20 %. Nach den Beregnungszyklen trocknet diese Variante jedoch ähnlich schnell wie Variante A und B2 (Abbildung 12d und e). Die graue Kurve in Abbildung 12d zeigt zu Beginn zwei auffällig hohe Feuchtwerte, weshalb die Messstellen nach dem Versuch überprüft wurden. An mehreren Messstellen wurden Undichtheiten in der Abdichtung festgestellt. Diese wurden daher erneut abgedichtet und das Fassadenelement erneut mit dem gesamten Versuchszyklus gemessen. Die Ergebnisse der einzelnen Messstellen im zweiten Versuch korrelierten mit den ersten Messungen, was die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Prüfungen belegt. Es zeigt sich auch, dass die Feuchteverläufe des zweiten Versuchs (Abbildung 12d, gelbe Kurve) ab dem dritten Zyklus mit der ersten Messung (graue Kurve) übereinstimmt. Die im ersten Versuch gemessenen hohen Werte in den ersten beiden Beregnungszyklen sind somit auf die undichten Messstellen zurückzuführen.

Generell zeigt sich, dass die Traglattung bei einer offenen, nicht hinterlegten Fuge am stärksten aufgefuechtet wird, aber auch schnell genug wieder abtrocknet, sodass die Bildung von Feuchtenestern vermieden wird. Bei diesem Versuchsaufbau erwies sich, wie bei der vertikalen Fassade, die hinterlegte geschlossene Fuge als kritisch.

Erkenntnis (siehe auch Merkblatt und Hintergründe Abschnitt 1.4):

Längsstöße bei Fassadenbrettern exakt planen und ausführen.

Neben dem Generalstoß mit Z-Blech kann auch ein Generalstoß mit 1 cm Fuge auf einer Traglatte (8 – 12 cm breit) oder auf 2 Traglatten (4 – 8 cm breit) ausgeführt werden; vertikale Fassadenbrettenden ca. 15° schräg geschnitten.

Einzelne fliegende Stöße (kein Generalstoß) sind nur bei horizontalen Nut- und Feder-Schalungen empfohlen.

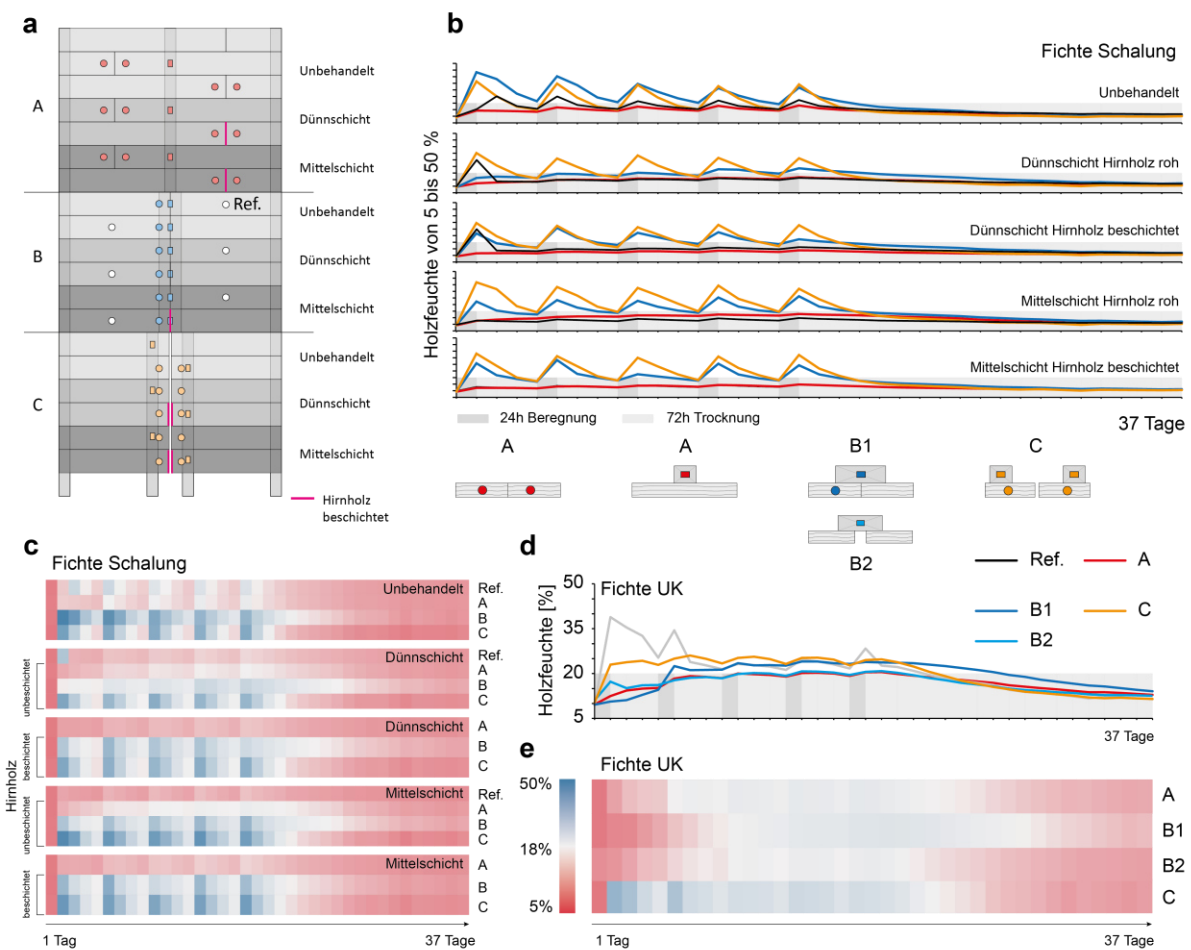


Abbildung 12: Einfluss der Längsstoßausbildung und der unterschiedlichen Beschichtungssysteme bei einer horizontalen Fassade. (a) Schematische Darstellung des untersuchten Fassadenelements. In Variante A sind fliegende Stöße zu sehen, in Variante B hinterlegte geschlossene Stöße und Variante C zeigt offene Stöße (10 mm Fuge) mit Traglatten, die einen Abstand von 50 mm zur Fuge aufweisen. Die Holzfeuchtemessstellen sind als Kreise für die Fassadenschalung und als Rechtecke für die Traglattung dargestellt. Die unterschiedlichen Beschichtungssysteme sind durch die grauen Schattierungen der Fassadenschalung gekennzeichnet, während die pinken Markierungen den Bereich zeigen, in dem das Hirnholz beschichtet wurde. (b) Holzfeuchteverläufe der Fassadenschalung. (c) Heatmaps für die Fassadenschalung. (d) Holzfeuchteverläufe der Traglattung. Die graue Linie zeigt den ersten Versuch mit deutlichen Ausreißern daher wurde dieser wiederholt (gelbe Kurve). (e) Heatmaps für die Traglattung.

3.3 Wissenschaftliche Voruntersuchung eines innovativen Fassadensystems

In den Arbeitspaketen 3 und 4 wurden bauphysikalische Untersuchungen und Simulationen eines innovativen Fassadensystems durchgeführt, bei dem eine Dämmschicht (Mineralwolle) unmittelbar hinter der Fassadenschalung angeordnet ist. Ziel der Untersuchung dieser Variante war sowohl eine Verbesserung der sommerlichen Überwärmung als auch des Schallschutzes zu erreichen. Im Folgenden wurde daher die Praxistauglichkeit dieses Systems im Hinblick auf die Feuchteresilienz untersucht. Der Versuchsaufbau erfolgte unter identischen

Bedingungen wie oben beschrieben, einschließlich periodischer Beregnungs- und Trocknungszyklen, um potenzielle Auswirkungen auf die Holzfeuchteverläufe und die Bildung von Feuchtenestern zu erfassen.

In Abbildung 13a ist das Fassadenelement schematisch dargestellt, wobei die Messpunkte farblich markiert sind. Die linke Hälfte des Elementes weist eine Fassadenbahn zwischen der Fassadenschalung und der Dämmung als Schutz auf, während auf der rechten Seite die Dämmung direkt an der Fassadenschalung liegt. Die Holzfeuchteverläufe der Fassadenschalung ohne Fugeneinfluss zeigen, dass die Fassadenbahn nur minimale Auswirkungen auf die Holzfeuchte hat (Abbildung 13b, Referenz 1 und 2). Die etwas höhere Holzfeuchte der Fassadenschalung mit direkt dahinter montierter Fassadenbahn ist darauf zurückzuführen, dass das durchdringende Wasser an der Bahn abläuft und somit die Fassadenschalung von der Rückseite her auffeuchtet.

Die höchsten Holzfeuchtwerte treten bei geschlossenen Fugen auf zwei Traglatten ohne Fassadenbahn auf (Abbildung 13b, Detail D). Die direkt hinter der Fassadenschalung angebrachte Fassadenbahn wirkt sich bei dieser Fugenausbildung positiv auf die Holzfeuchte im Knotenpunkt aus (Abbildung 13b, Detail C). Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der offenen Fuge auf einer Traglatte, dass die Fassadenbahn keine Auswirkungen auf die Holzfeuchte der Fassadenschalung im Fugenbereich hat (Abbildung 13b, Detail A und B).

Überraschenderweise hat die Fassadenbahn auch keinen Einfluss auf die Holzfeuchte der Traglattung bei offenen Fugen, da beide Varianten denselben Holzfeuchteverlauf aufweisen (Abbildung 13c, Detail A und B). Diese gleiche Auffeuchtung könnte durch das Umgebungsklima erklärt werden, da auch die Belüftungsebene während der Beregnung eine hohe Luftfeuchtigkeit aufweist. Bei geschlossenen Fugen auf zwei Traglatten feuchtet die Traglattung am stärksten auf und bleibt während des gesamten Zyklus bis zur Rücktrocknung auf dem Niveau von 20 %, da sich das durch die Fuge eindringende Wasser auf der Traglatte sammeln kann. Die Traglatte, die durch die Fassadenbahn geschützt ist, zeigt einen ähnlichen Verlauf, jedoch mit etwas geringerer Holzfeuchte (Abbildung 13c, Detail C).

Um die Rücktrocknung der Dämmung während der Trocknungszyklen zu überprüfen, wurde die relative Luftfeuchte mittels Datenloggern (HOBOS) erfasst, deren Positionen in Abbildung 13a als schwarze Rechtecke dargestellt sind. Die Kurve in Abbildung 13d zeigt den mittleren Verlauf der relativen Luftfeuchte aller Messstellen und zeigt, dass die Luftfeuchte in der Dämmung während der Trocknungszyklen immer auf 60 % fällt. Daraus kann geschlossen werden, dass in der Dämmung keine Feuchtenester entstehen. Zur weiteren Veranschaulichung sind die Details in Abbildung 13e dargestellt.

Es ist wichtig zu betonen, dass es sich hierbei um eine wissenschaftliche Voruntersuchung eines innovativen Fassadensystems handelt, die darauf abzielt, die Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 3 und 4 im Hinblick auf den Feuchteschutz zu validieren. Daher können noch keine konkreten Empfehlungen ausgesprochen werden, und es sind weitere Langzeit- und Freiluftversuche erforderlich.

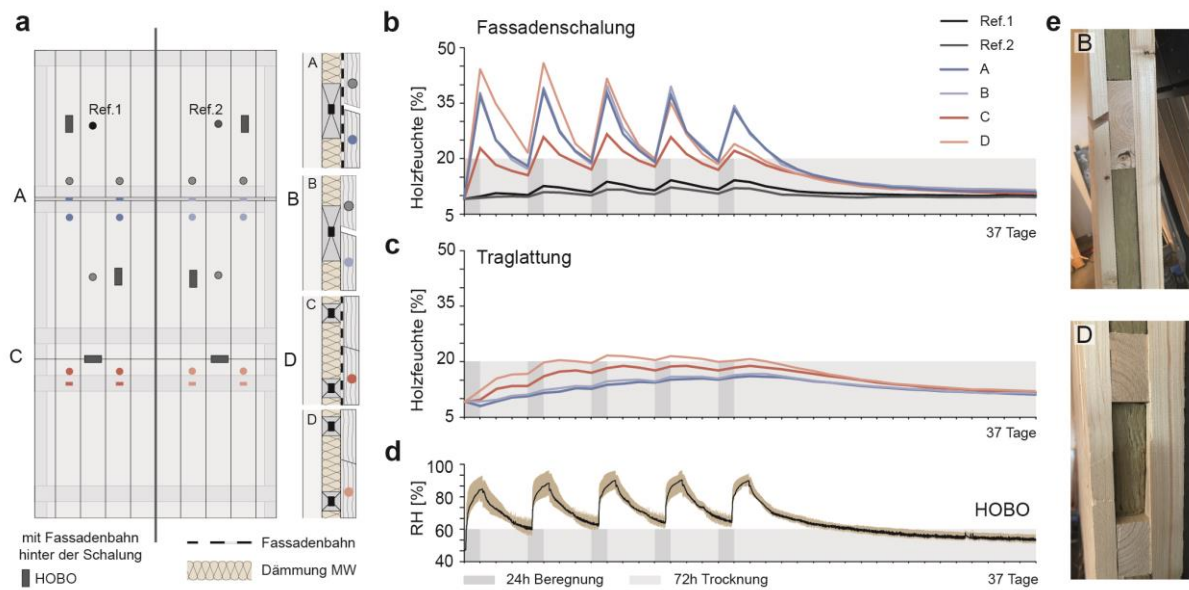


Abbildung 13: Fassadenelement mit direkt hinter der Fassadenschalung angebrachter Dämmung. (a) Schematische Darstellung des untersuchten Fassadenelementes. Linke Hälfte mit Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung. (b) Holzfeuchteverlauf in der Fassadenschalung. (c) Holzfeuchteverlauf in der Traglattung. (d) Verlauf der relativen Luftfeuchte (RH) in der Dämmung. Die schwarze Linie ist der Median und die beige Fläche stellt die Minimal- und Maximalwerte dar. (e) Fotos der Details B und D.

4 Zusammenfassung

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Untersuchung des Feuchteverhaltens verschiedener Holzfassadensysteme unter simulierten Witterungsbedingungen in einer Klimakammer. Untersucht wurden sowohl offene als auch geschlossene Fassaden aus Fichten- und Lärchenholz, wobei unterschiedliche Konstruktionsdetails, Beschichtungen und Positionierungen der Fassadenbahn berücksichtigt wurden. Die Untersuchungen erfolgten unter zyklischen Beregnungs- und Trocknungsphasen, während die Holzfeuchte kontinuierlich durch elektrische Widerstandsmessungen erfasst wurde. Ein besonderes Augenmerk lag auf den Holzfeuchteverläufen in kritischen Konstruktionsdetails.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Positionierung der Fassadenbahn, die Abschrägung der Traglattung, die Gestaltung der Fugen sowie, in einigen Fällen, die Art der Beschichtung einen erheblichen Einfluss auf das Feuchtigkeits- und Trocknungsverhalten der Fassaden haben.

Bei offenen Fassaden zeigte sich, dass die Platzierung der Fassadenbahn einen erheblichen Einfluss auf die Trocknung der Fassadenschalung und deren Verformung hat. Insbesondere führte die direkte Platzierung der Fassadenbahn unmittelbar hinter der Fassadenschalung zu verlängerten Trocknungszeiten und ausgeprägten Verformungen, die bis zum Abriss der Verbindungsmittel reichten.

Die Abschrägung der Traglattung beeinflusste sowohl die Wasserableitung als auch die Holzfeuchte. Traglatten, die auf der Oberseite zur Fassadenschalung hin abgeschrägt waren, resultierten in höheren Holzfeuchtwerten und verlängerten Trocknungszeiten im Knotenpunkt. Daher wird für offene Fassaden die Verwendung horizontaler Traglatten empfohlen, die an der Oberseite von der Fassadenschalung weg in eine mindestens 1 cm tiefe Entwässerungsebene abgeschrägt sind.

Die Breite der Traglattung sowie die Nageldichtung zwischen Traglattung und Wandbildner zeigten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte. Daher ist zwischen Traglattung bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner keine zusätzliche Nageldichtung, wie Dichtbänder oder Dichtmittel, erforderlich.

Für geschlossene Fassaden ergab die Untersuchung, dass die Fugenbreite (offen oder geschlossen) und die Art der Hinterlegung der Fuge einen signifikanten Einfluss auf die Holzfeuchte in der Fassadenschalung und der Traglattung haben. Eine geschlossene Fuge, die direkt auf einer Traglatte aufliegt, führte zu verlängerten Trocknungszeiten und zur Bildung von Feuchtenestern. Im Gegensatz dazu ermöglichte eine offene Fuge, die auf einer oder zwei Traglatten aufliegt, eine schnellere Trocknung. Daher können Fugenbreiten von 1 cm auf einer Traglatte (8–12 cm breit) oder auf zwei Traglatten (4–8 cm breit) empfohlen werden. Es wird zudem empfohlen, die vertikalen Enden der Fassadenbretter in einem Winkel von 15°

abzuschrägen. Einzelne fliegende Stöße (kein durchgehender Stoß) können nur bei horizontalen Nut- und Feder-Schalungen empfohlen werden.

Des Weiteren zeigte sich, dass das Beschichtungssystem nur einen geringen Einfluss auf die Holzfeuchte hatte. Allerdings erwies sich eine Beschichtung des Hirnholzes als vorteilhaft.

Hinsichtlich des innovativen Fassadensystems, bei dem eine Dämmung direkt an der Rückseite der Fassadenschalung angebracht wird, zeigen erste Ergebnisse, dass die Dämmung keinen nachteiligen Einfluss auf das Feuchteverhalten hat. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich hierbei um eine wissenschaftliche Voruntersuchung handelt, weshalb weitere Langzeit- und Freilandversuche notwendig sind.

Zusammenfassend leisten die gewonnenen Erkenntnisse einen wichtigen Beitrag zur optimalen Gestaltung von Holzfassaden im Hinblick auf den Feuchteschutz. Die Ergebnisse sollen die bestehende Literatur, wie das Buch "Fassaden aus Holz", ergänzen und erweitern. Ein detailliertes Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Fassadendesign, Regen, Wind und anderen klimatischen Faktoren, die die Wasserpenetration von Gebäuden beeinflussen, ist entscheidend für die Planung moderner, widerstandsfähiger und umweltfreundlicher Gebäude. Die neuen Erkenntnisse wurden bereits als Merkblatt und einem erläuternden Dokument zu den Hintergründen von der Holzforschung Austria veröffentlicht und sind somit der Praxis zugänglich gemacht worden.

5 Literaturverzeichnis

BARKAS, W. W.; HEARMON, R. F. S.; PRATT, G. H. (1943): Electrical Resistance of Wood. In: *Nature* 151 (3820), S. 83. DOI: 10.1038/151083a0.

Davies, Ivor; Fairfield, Charles; Stupart, Alastair; Wilson, Peter (2012): Moisture conditions in timber cladding. Field trial data for Sitka spruce. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 165 (5), S. 263–278. DOI: 10.1680/coma.11.00033.

Dietsch, Philipp; Franke, Steffen; Franke, Bettina; Gamper, Andreas; Winter, Stefan (2015): Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. In: *J Civil Struct Health Monit* 5 (2), S. 115–127. DOI: 10.1007/s13349-014-0082-7.

Evans, Philip; Chowdhury, Mohammed Jahangir; Mathews, Brian; Schmalzl, Karl; Ayer, Stephen; Kiguchi, Makoto; Kataoka, Yutaka (2005): Chapter 14 - Weathering and surface protection of wood. In: Myer Kutz (Hg.): *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Norwich, NY: William Andrew Publishing, S. 277–297.

Evans, Philip D.; Urban, K.; Chowdhury, M. J. A. (2008): Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. In: *Wood Sci. Technol.* 42 (3), S. 251–265. DOI: 10.1007/s00226-007-0175-0.

- Fawaier, Mohammad; Bokor, Balázs (2022): Dynamic insulation systems of building envelopes. A review. In: *Energy and Buildings* 270, S. 112268. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112268.
- ÖNORM EN 13183-1, 2004: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.
- Hill, Callum; Hughes, Mark; Gudsell, Daniel (2021): Environmental Impact of Wood Modification. In: *Coatings* 11 (3), S. 366. DOI: 10.3390/coatings11030366.
- Hill, Callum; Kymäläinen, Maija; Rautkari, Lauri (2022): Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment. In: *J Mater Sci* 109 (1), S. 54. DOI: 10.1007/s10853-022-07211-x.
- Jakiela, S.; Bratasz, Ł.; Kozłowski, R. (2008): Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. In: *Wood Sci Technol* 42 (1), S. 21–37. DOI: 10.1007/s00226-007-0138-5.
- Jan de Place Hansen E, Brandt (2010): Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI. Proceedings, Buildings XI Conference, Dec. 5-9, 2010, Clearwater Beach, Florida ; [includes 7 workshops]. Atlanta, Ga.: American Soc. of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- Kang, Ho-Yang; Muszyński, Lech; Milota, Michael R. (2011): Optical Measurement of Deformations in Drying Lumber. In: *Drying Technology* 29 (2), S. 127–134. DOI: 10.1080/07373937.2010.482725.
- Kaynakli, Omer (2012): A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (1), S. 415–425. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.006.
- Kollmann, Franz F. P.; Côté, Wilfred A. (1968): Principles of Wood Science and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Langmans, Jelle; Desta, Tadiwos Z.; Alderweireldt, Lieven; Roels, Staf (2016): Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems. A parameter analysis. In: *Build. Environ.* 95, S. 1–12.
- Niemz, Peter; Sonderegger, Walter (2017): Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Nik, Vahid M.; Mundt-Petersen, S.Olof; Kalagasidis, Angela Sasic; Wilde, Pieter de (2015): Future moisture loads for building facades in Sweden. Climate change and wind-driven rain. In: *Build. Environ.* 93 (3), S. 362–375. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.012.
- Niklewski, J.; Brischke, C.; Frühwald Hansson, E.; Meyer-Veltrup, L. (2018): Moisture behavior of weathered wood surfaces during cyclic wetting. Measurements and modeling. In: *Wood Sci Technol* 52 (6), S. 1431–1450. DOI: 10.1007/s00226-018-1044-8.

- Orr, Scott Allan; Young, Maureen; Stelfox, Dawson; Curran, Joanne; Viles, Heather (2018): Wind-driven rain and future risk to built heritage in the United Kingdom. Novel metrics for characterising rain spells. In: *Science of The Total Environment* 640-641, S. 1098–1111. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.354.
- Osawa, Tomoko; Maeda, Kei; Tsunetsugu, Yuko (2023): Influence of check depth, redrying conditions of various ambient humidities, and the presence or absence of airflow on moisture trapping in surface checks of wood. In: *Eur. J. Wood Prod.* 81 (2), S. 329–341. DOI: 10.1007/s00107-022-01851-1.
- Osawa, Tomoko; Maeda, Kei; Tsunetsugu, Yuko; Shida, Satoshi (2019): Influence of surface checks on wood moisture content during wetting and re-drying. In: *Eur. J. Wood Prod.* 77 (4), S. 681–689. DOI: 10.1007/s00107-019-01423-w.
- Podgorski, Laurence; Reynaud, Céline; Montibus, Mathilde (2019): Fungal Growth on Coated Wood Exposed Outdoors. Influence of Coating Pigmentation, Cardinal Direction, and Inclination of Wood Surfaces. In: *Coatings* 9 (1), S. 27. DOI: 10.3390/coatings9010027.
- Rüther, Petra; Time, Berit (2015): External wood claddings – performance criteria, driving rain and large-scale water penetration methods. In: *Wood Mater. Sci. Eng.* 10 (3), S. 287–299. DOI: 10.1080/17480272.2015.1063688.
- Sandberg, Dick (1999): Weathering of Radial and Tangential Wood Surfaces of Pine and Spruce. In: *hfs* 53 (4), S. 355–364. DOI: 10.1515/HF.1999.059.
- Støver, Eva Armstrong; Sundsøy, Marte Haugen; Andenæs, Erlend; Geving, Stig; Kvande, Tore (2022): Rain Intrusion through Horizontal Joints in Façade Panel Systems—Experimental Investigation. In: *Buildings* 12 (10), S. 1497. DOI: 10.3390/buildings12101497.
- van Belleghem, Marnix; Steeman, Marijke; Janssens, Arnold; Paepe, Michel de (2014): Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls. In: *Journal of Building Physics* 38 (4), S. 317–349. DOI: 10.1177/1744259114543984.
- Virta, Jari; Koponen, Simo; Absetz, Ilmari (2005): Cupping of wooden cladding boards in cyclic conditions—a study of boards made of Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris*). In: *Wood Sci. Technol.* 39 (6), S. 431–438. DOI: 10.1007/s00226-005-0023-z.
- Wagenführ, R.; Wagenführ, A. (2021): *Holzatlas*: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.

**Cooler Hülle -
Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen
Klimawandel und Technik**

AP5: Feuchteresistente Fassade -
Umweltverhalten und Korrosion

Anhang 6 zum Endbericht

FFG-Projektnr.: F0999889550

HFA-Nr.: F518

Gefördert durch die FFG

Projektleitung

Dipl. HTL.Ing. Peter Schober (Forschungsjahr 1)

Dr. Bernd Nusser (Forschungsjahr 2)

Autor:innen

DI(FH) Christina Fürhapper

Mag. Elisabeth Habla

Weitere Projektmitarbeiter:innen

Wolfgang Hochschorner

Wien, Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	5
2	Material und Methoden.....	5
2.1	Umweltverhalten	5
2.1.1	Small-scale Leaching Tests	5
2.1.2	Large-scale Leaching Tests	8
2.1.3	Freiland-Versuch	11
2.2	Korrosion	14
2.2.1	Beschleunigter small-scale Laborversuch	14
2.2.1	Freiland-Versuch - Korrosionseffekte	16
3	Ergebnisse und Diskussion.....	17
3.1	Umweltverhalten.....	17
3.1.1	Vergleich small-scale Leaching-Tests	17
3.1.2	Ergebnisse aus dem large-scale Leaching Test.....	21
3.1.3	Ergebnisse aus dem Freilandversuch.....	23
3.1.4	Conclusio zur Praxistauglichkeit beschleunigter Leaching-Verfahren.....	26
3.2	Korrosion	27
3.2.1	Beschleunigter small-scale Laborversuch	27
3.2.2	Freiland-Versuch Korrosionseffekte	36
3.2.3	Conclusio zur Praxistauglichkeit beschleunigter Korrosionsverfahren	39

4	Zusammenfassung / Praxisrelevante Erkenntnisse	40
----------	---	-----------

1 Einleitung

Der Projektteil Umweltverhalten und Korrosion beschäftigte sich mit der Entwicklung und Optimierung beschleunigter Messverfahren, die eine frühzeitige Prognose des Expositions-Verhaltens von Fassadenkonstruktionen während der Nutzungsphase erlauben. In diesem Zusammenhang wurde einerseits die ökologische Relevanz ausgewaschener Holz- und Beschichtungsmittelkomponenten betrachtet und ökotoxikologisch bewertet. Andererseits wurden unterschiedliche Holz / Metall-Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihres Korrosionspotentials untersucht.

2 Material und Methoden

2.1 Umweltverhalten

Bei der Beurteilung des Umweltverhaltens von Fassadenelementen geht es vorrangig um die Freisetzung von Stoffen aus den exponierten Bauteilen. Durch Bewitterung können sowohl klassische Schadstoffe, wie z.B. Biozide aus Holzschutzapplikationen, ausgewaschen werden, als auch sonstige Substanzen, wie z.B. Holzinhaltsstoffe oder Metallkomponenten aus Brandabschnittsblechen oder Befestigungsmitteln, aus dem Bauteil in die Umgebung migrieren. Eine diesbezügliche Prognose kann mittels beschleunigten Leaching-Verfahren erfolgen. Im Projekt wurde die Praxistauglichkeit mehrerer Verfahren in unterschiedlichen Maßstäben (small-scale Labor < large-scale Labor < Freiland-Versuch) untersucht.

2.1.1 Small-scale Leaching Tests

Die vergleichende Untersuchung der Praxistauglichkeit von small-scale Leaching-Methoden für Holzfassadenelemente im Labor wurde anhand von drei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt (siehe 2.1.1.2). Diese stammen aus verschiedenen Anwendungsbereichen, und dienen der umwelt- und/oder wirkungsbezogenen Bewertung von Bauprodukten (DSL-Test gem. CEN/TS 16337-2), Biozidprodukten (CEN/TS 15119-1) und Beschichtungsmitteln (EN 16105). Sie eignen sich somit allesamt grundsätzlich zur Beurteilung von Fassadenelementen. Die zu testenden Anstrichprodukte wurden in Absprache mit den Projektpartnern ausgewählt und finden sich zum Teil auch in den large-scale und Freilanduntersuchungen wieder, ebenso in den Prüfungen bzgl. konstruktivem Feuchteschutz.

2.1.1.1 Prüfkörpervorbereitung

Standardisierte Prüfkörper (Fichte) wurden durch Streichen mit einer Holzschutzgrundierung sowie zwei unterschiedlichen Deckbeschichtungen bekannter Biozidausstattung behandelt.

Die Prüfkörperdimension richtete sich nach den Vorgaben des nachfolgenden Leaching-Tests, die Produkt-Applikation erfolgte nach Herstellerangaben. Um zwei typische Szenarien darzustellen, wurde bei den Deckbeschichtungen eine Dünnschichtlasur (System A) und eine Mittelschichtlasur (System B) grauer Farbe gewählt, die Hirnseiten der Prüfkörper wurden mit einem Versiegelungsanstrich kaschiert.

Tabelle 1: Beschichtungsprodukte für die small-scale Leaching Tests

Produkt	Holzschutz		
	Biozid 1	Biozid 2	Biozid 3
Grundierung	0,5% (m/m) IPBC	0,2% (m/m) Tebuconazol	0,06% (m/m) Permethrin
Produkt	Filmschutz		
	Biozid 1		
Deckbeschichtung System A	0,29% (m/m) Propiconazol		
Deckbeschichtung System B	0,29% (m/m) Propiconazol		

IPBC: 3-Iodo-2-propinyl-butyl-carbamate, CAS 55406-53-6, Propiconazol: CAS 60207-90-1, Tebuconazol CAS: 107534-96-3, Permethrin: CAS 52645-53-1

2.1.1.2 Auslaugung

Die wesentlichen Unterschiede der drei Auslaugverfahren sind in Tabelle 2 dargestellt, die Methoden sind in den folgenden Absätzen im Detail beschrieben.

Tabelle 2: Gegenüberstellung small-scale Leaching Tests

Test	Wasserkontakt	Verhältnis V/A (L/m²)	Anzahl Eluate	Testdauer (d)
DSLIT	permanent	25	8	64
CEN/TS 15119-1	Immersion		9	19
EN 16105	Immersion		9	19

DSLIT gem. CEN/TS 16337-2

Die horizontale dynamische Auslaugprüfung (DSLIT) dient der Bestimmung der oberflächenabhängigen Freisetzung von Stoffen aus monolithischen und plattenartigen Bauprodukten. Die zu untersuchenden Prüfkörper wurden im Zuge der Prüfung über einen Zeitraum von 64 Tagen permanentem Wasserkontakt ausgesetzt, wobei zu definierten Zeitpunkten (6h, 1d, 2d plus 6h, 4d, 9d, 16d, 36d und 64d) Wasserwechsel vorgenommen wurden und insgesamt acht Eluate (= Auswaschwässer) gewonnen wurden, die anschließend chemisch, sowie hinsichtlich von pH-Wert und Leitfähigkeit, analysiert wurden. Das Verhältnis von aufnehmendem Wasservolumen zu exponierter Oberfläche hat lt. Norm zwischen 20 und 80 L/m² zu liegen und wurde im durchgeführten Test in Übereinstimmung zu den anderen beiden small-scale Verfahren bei 25 L/m² festgelegt.

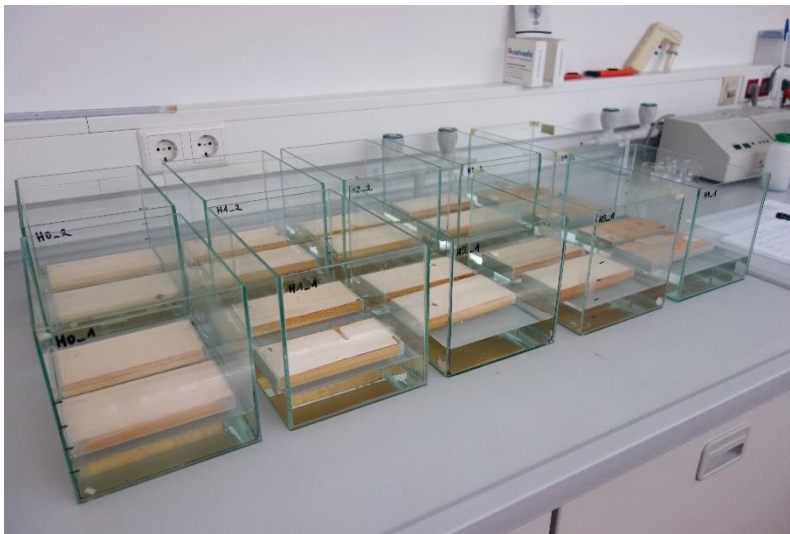


Abbildung 1: Prüfkörper im DSLT-Test

Auslaugung gem. CEN/TS 15119-1

Bei der Prüfung nach CEN/TS 15119-1, die der Bestimmung der Emissionen aus schutzmittelbehandeltem Holz der Gebrauchsklasse 3, (nicht abgedeckt und kein direkter Bodenkontakt in der Exposition) dient, handelt es sich um einen Immersionstest, d.h. die Prüfkörper unterlaufen abwechselnd Nass- und Trockenphasen. Während der Testdauer von 19 Tagen wurden die Prüfkörper an neun definierten „Berechnungstagen“ (1d, 3d, 5d, 8d, 10d, 12d, 15d, 17d und 19d) drei Mal täglich für jeweils eine Minute in Wasser getaucht, wobei die Eluate eines Tages anschließend miteinander vereint wurden. Die neun gewonnenen Eluate wurden anschließend chemisch, sowie hinsichtlich von pH und Leitfähigkeit, analysiert.

Auslaugung gem. EN 16105

Auch dies ist ein Immersionstest in intermittierendem Wasserkontakt, der zur Beurteilung der Freisetzung von Substanzen aus Beschichtungen vorgesehen ist. Die Testdauer beträgt ebenfalls 19 Tage, wobei die Prüfkörper an den neun definierten „Berechnungstagen“ (1d, 3d, 5d, 8d, 10d, 12d, 15d, 17d und 19d) zwei Mal täglich für jeweils eine Stunde in Wasser getaucht und die Tageseluate vereint wurden. Ebenso erfolgte anschließend die chemische Analyse inkl. pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessung.



Abbildung 2: Prüfkörper im Auswaschtest gem. CEN/TS 5119-1 und EN 16105

2.1.1.3 Chemische Analyse der Eluate

Die Eluate aus den Leaching Tests wurden über eine Festphasenextraktion mit Strata X 33 Polymeric Reversed Phase-Kartuschen (Phenomenex) aufkonzentriert und mittels HPLC/DAD (Hochleistungsflüssigchromatographie mit Dioden-Array-Detektion) quantitativ hinsichtlich der Biozide IPBC, Tebuconazol und Propiconazol analysiert. Der Wirkstoff Permethrin wurde aufgrund der geringen Konzentration im Beschichtungsmittel nicht berücksichtigt. Aus den gewonnenen Ergebnissen wurden Emissionsraten (ausgewaschene Menge Biozid / Tag / Fläche) berechnet.

2.1.2 Large-scale Leaching Tests

Dieses Verfahren wurde in einer umgebauten und eigens für dieses Forschungsprojekt zweckangepasst optimierten Klimakammer durchgeführt. Fassadenelemente einer Dimension von 2,10 x 1 m und inklusive eines Brandschutzblechabschnittes wurden darin einem 28 tägigen, beschleunigten künstlichen Bewitterungszyklus unterzogen, wobei das Beregnungswasser (= Leitungswasser) zur nachfolgenden chemischen Analyse aufgefangen wurde. Für die Untersuchung wurden 14 verschiedene Varianten festgelegt und gebaut, die sich in der Holzart, Konstruktion, Zusammensetzung der Brandschutzblechabschnitte und Beschichtung unterschieden. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt. Die grau beschichtete Variante V13 entspricht System A aus den small-scale Versuchen (siehe Tabelle 1), die Aufbringmenge wurde unter Berücksichtigung der jeweiligen Herstellerempfehlungen gewählt.

Tabelle 3: Varianten des large-scale Leaching-Tests

Variante	Beschichtung	Holzart	Profil	Unterkonstruktion	Brandschutzblech
1 (Referenz)	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
2	unbeschichtet	Fichte	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
3	unbeschichtet	Eiche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
4	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech
5	unbeschichtet	Fichte	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech
6	unbeschichtet	Eiche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech
7	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Edelstahl V2A
8	unbeschichtet	Eiche	Nut und Feder	Fichte	Edelstahl V2A
9	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Edelstahl V4A
10	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Aluminium Blech beschichtet
11	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Aluminium Blech
12	unbeschichtet	Lärche	offene Fuge	Lärche	Verzinktes Blech beschichtet
13	Grau gestrichen	Fichte	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
14	unbeschichtet	Thermofichte	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet

Abbildung 3 zeigt den Bewitterungszyklus für eine Woche, der jeweils vier Mal wiederholt wurde.

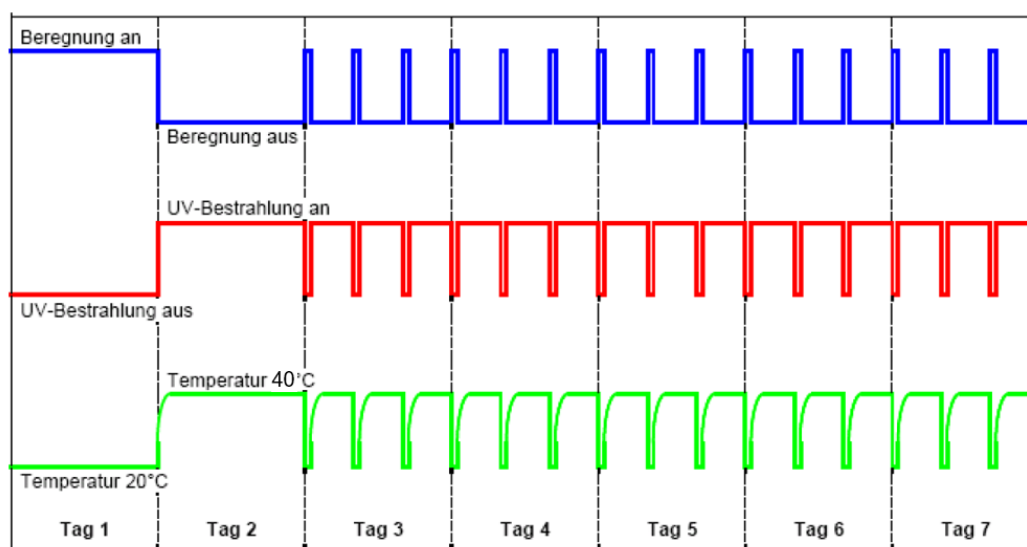


Abbildung 3: Wochen-Zyklus in der Schnellbewitterungskammer

1. Besprühung mit einer Wassermenge von ca. 1L ($\text{m}^2 \text{ min}$) für 24 h bei einer Temperatur von 20°C ohne UV-Bestrahlung
2. UV-Bestrahlung bei einer Temperatur von 40°C mit einer Strahlungsleistung von 35 bis 50 W/m^2 für 24 h
3. Besprühung mit einer Wassermenge von ca. 1L ($\text{m}^2 \text{ min}$) für 1 h bei einer Temperatur von 20°C ohne UV-Bestrahlung
4. UV-Bestrahlung bei einer Temperatur von 40°C mit einer Strahlungsleistung von 35 bis 50 W/m^2 für 7 h

Die Punkte 3 und 4, welche zusammen 8 Stunden dauern, wurden 15 Mal wiederholt.

Das Beregnungswasser wurde über die Brandschutzblechabschnitte in entsprechende Sammelbehälter geleitet und im Kreis geführt, wobei nach jedem Wochenzyklus ein Wasserwechsel vorgenommen wurde. Bei den Eichenvarianten wurde aufgrund der starken Verfärbung durch holzart-typische Extraktstoffe zusätzlich nach den ersten 24h das Wasser gewechselt.

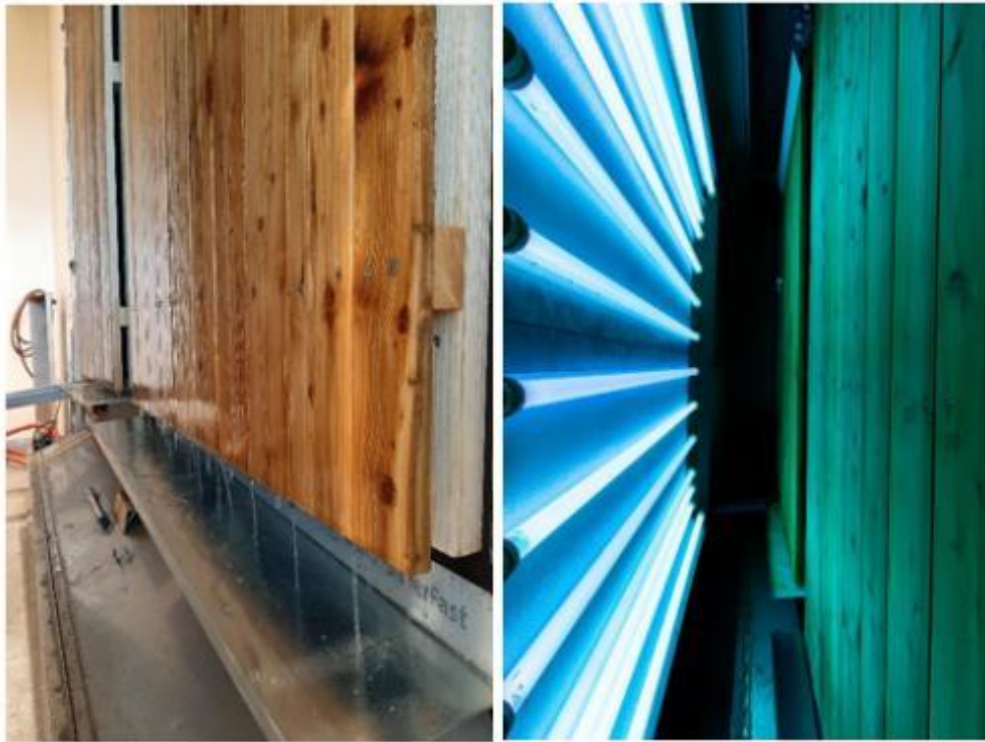


Abbildung 4: Messbetrieb in der Schnellbewitterungskammer, links Beregnung, rechts UV-Bestrahlung, das Beregnungswasser wurde über den Brandschutzblechabschnitt in Sammelbehälter geleitet.

Zu den Zeitpunkten 24h, 7d, 14d, 21d und 28d wurden Proben der Beregnungswässer entnommen und chemisch analysiert. Untersucht wurde der TOC (total organic carbon, Parameter für die organische Belastung von Wasserproben), die elektr. Leitfähigkeit und der pH-Wert, verschiedene Anionen und organische Säuren sowie Metalle und sonstige Elemente. Bei der beschichteten Variante V13 wurden zusätzlich Biozide gemessen. Die Analysenparameter und Methoden sind in Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4: Angewandte Messverfahren

Parameter	Regelwerk	Methode
TOC	EN 1484	TOC-Analysator
Elektr. Leitfähigkeit	-	Leitfähigkeitsmessgerät mit Sonde
pH-Wert	EN ISO 10523	pH-Meter mit pH-Elektrode
Anionen und organische Säuren (Ameisensäure, Essigsäure, Fluor, Chlor, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat)	EN ISO 16994	Ionenchromatographie mit Leitfähigkeitsdetektion (IC)
Metalle und andere Elemente (Al, As, Ba, Pb, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Sb, Sr, Ti, V, Zn, Zr)	EN ISO 11885	Induktiv gekoppeltes Plasma - optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES)
Biozide (nur Variante V13, IPBC, Tebuconazol, Propiconazol)	HFA Arbeitsanweisung AA-A036	Aufkonzentrierung über Festphasenextraktion und Analyse mittels Hochleistungsflüssigchromatographie mit Diodenarray-Detektor (HPLC/DAD)

2.1.3 Freiland-Versuch

Sieben der im large-scale Versuch getesteten Varianten wurden zusätzlich über den gesamten Projektzeitraum (abzüglich der Aufbau- und Abbauphasen) mit südwestlicher Ausrichtung im Freiland exponiert. Im gleichen Zeitraum wurde zu Referenzzwecken Regenwasser gesammelt (= Blindwert). Der Versuchsaufbau und -ablauf orientierte sich dabei an einer Semi-Field Test-Methode aus dem Bereich der Beurteilung von Holzschutzmitteln (NT-Build 509). Konkret wurden die in Tabelle 5 dargestellten Varianten bewittert, Abbildung 5 zeigt den aufgebauten Freilandprüfstand. Die grau beschichtete Variante V13 wurde mit der gleichen Holzschutzmittelgrundierung wie das System A aus dem small-scale und large-scale Versuch (siehe Tabelle 1) behandelt, wobei die Aufbringmenge unter Berücksichtigung der jeweiligen Herstellerempfehlungen gewählt wurde.

Tabelle 5: Varianten im Freilandversuch

Variante	Beschichtung	Holzart	Profil	Unterkonstruktion	Brandschutzblech
1 (Referenz)	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
3	unbeschichtet	Eiche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet
4	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech
7	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Edelstahl V2A
10	unbeschichtet	Lärche	Nut und Feder	Fichte	Aluminium Blech beschichtet
12	unbeschichtet	Lärche	offene Fuge	Lärche	Verzinktes Blech beschichtet
13	Grau gestrichen	Fichte	Nut und Feder	Fichte	Verzinktes Blech beschichtet



Abbildung 5: Coole-Hülle-Fassadenprüfstand auf den Freigelände der Holzforschung Austria. Links: Sieben Testvarianten, das Beregnungswasser wurde über die Brandschutzblech-Elemente in die Auffangbehälter geleitet. Rechts: Blindwert, das Beregnungswasser wurde ausschließlich über das Brandschutzblech-Element aufgefangen und in den Auffangbehälter geleitet.

Die Sammlung des Beregnungswassers, welches über die Fassadenoberflächen abrann, erfolgte über das jeweilige Brandschutzblech der Varianten in 30 L-Auffangbehältern (siehe Abbildung 5). Eluate wurden entnommen, wenn der Auffangbehälter annähernd voll war oder für längere Zeit kein Regen zu erwarten war. Jedes Einzel-Eluat wurde unmittelbar nach der Probenahme hinsichtlich des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit analysiert. Ein laufendes Monitoring der Niederschlagsmengen erfolgte über eine unmittelbar neben dem Prüfstand installierte Wetterstation. Die Einzel-Eluate wurden nach Niederschlagsmengen gepoolt, wobei grundsätzlich nach dem Schema 0-60 mm, 60-120 mm, 120-250 mm, 250-500 mm und 500-1000 mm vorgegangen wurde, Abweichungen ergaben sich aufgrund der tatsächlichen Regensituation (Tabelle 6).

Tabelle 6: Eluat-Probenahmen und Niederschlags-Perioden im Freilandversuch

Eluat	Datum Probenahme	Gepooltes Eluat	Niederschlags-Periode (mm)
Start Freilandversuch	21.03.2022	-	-
E1	04.04.2022	Pool 1	0-56
E2	21.04.2022		
E3	09.05.2022		
E4	25.05.2022	Pool 2	56-95
E5	07.06.2022	Pool 3	95-236
E6	08.06.2022		
E7	15.06.2022	Pool 4	236-518
E8	28.06.2022		
E9	09.08.2022		
E10	24.08.2022		
E11	13.10.2022		
E12	16.01.2023		
E13	22.03.2023	Pool 5	518-1.052
E14	17.04.2023		
E15	07.06.2023		
E16	27.06.2023		
E17	07.08.2023		

Die chemische Untersuchung der gepoolten Eluate wurde analog zu den im large-scale Leaching-Test angewandten Parametern und Verfahren durchgeführt (Tabelle 4).

Zusätzlich wurden jeweils das erste und das letzte gepoolte Eluat einer jeden Variante einer ökotoxikologischen Untersuchung hinsichtlich der Algentoxizität unterzogen. Hierfür wurde das Verfahren nach EN ISO 8692 zur Bestimmung der Wachstumshemmung von einzelligen Grünalgen angewandt und die prozentuelle Hemmung der Wachstumsraten berechnet.

2.2 Korrosion

2.2.1 Beschleunigter small-scale Laborversuch

Alle im Projekt eingesetzten Brandschutzblecharten wurden in small-scale Laborversuchen auf die Korrosionswirkung von Holzextrakten untersucht. Tabelle 7 listet die im beschleunigten Korrosionsversuch geprüften Blecharten auf.

Tabelle 7: Im beschleunigten small-scale Korrosionslaborversuch untersuchte Brandschutzbleche

Blechart	Kürzel	Blechstärke	Verwendet für Varianten (large scale/Freiland)
Verzinktes Blech beschichtet	VzB	0,6 mm	1,2,3
Verzinktes Blech	Vz	0,55 mm	4,5,6
Edelstahl V2A	V2A	0,8 mm	7,8
Edelstahl V4A	V4A	0,5 mm	9
Aluminium beschichtet	AlB	0,7 mm	10
Aluminium	Al	0,7 mm	11

Ursprünglich sollte hierzu eine Modifikation des Salzsprühtests gemäß ISO 9227 verwendet werden, wobei geplant war anstelle der Salzlösung die Extrakte unterschiedlicher Holzarten auf die Metallelemente zu sprühen. Diese Idee erwies sich jedoch als nicht praktikabel, da die Holzextrakte zu einer dauerhaften Verunreinigung der Sprühanlage geführt und die Sprühdüse verklebt hätten. Aus diesem Grund wurde ein anderer Versuchsaufbau für die small-scale Versuche erarbeitet. Die Korrosion wurde dabei beschleunigt, indem einerseits hoch konzentrierte Extrakte eingesetzt wurden und andererseits der Potentialunterschied an Grenzflächen von Flüssigkeiten zur Umgebungsluft ausgenutzt wurde. Weiters wurden auf jedem Blech jeweils ein tiefer und ein oberflächlicher Kratzer erzeugt, um Oberflächenbeschädigungen von Blechen, wie sie auch im Freiland zu beobachten sind, nachzustellen. Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung des small-scale Aufbaus.

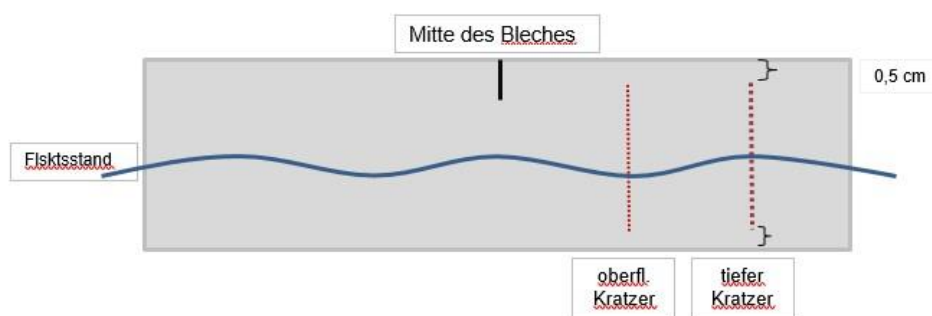


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zu den small-scale Korrosionsversuchen

Zur Herstellung der konzentrierten Extrakte wurden jeweils 100 g der gemahlenden Holzprobe in eine Schottflasche eingewogen und mit 1 L deionisiertem Wasser aufgefüllt. Die Flaschen wurden danach für ca. 6 Stunden im Ultraschallbad extrahiert, wobei in regelmäßigen Abständen das Wasser des Bades ausgetauscht wurde, um eine Überhitzung der Proben zu vermeiden. Nach einer Ruhezeit über Nacht wurden die Flaschen nochmals für ca. 2 Stunden im Ultraschallbad extrahiert, bevor der Extrakt mittels Nutsche, Filterpapier und Saugflasche vom gemahlenden Holz abgetrennt wurde. Je Holzart wurden 6 Extraktionen durchgeführt, wodurch ca. 5,5 L Extrakt gewonnen werden konnten. Die erhaltenen einzelnen Extraktfraktionen wurden vereint, gut durchmischt und bis zum Versuchsstart im Kühlschrank gelagert.

Zusätzlich zu den Holzextraktversuchen wurden Versuchsreihen mit einer Negativkontrolle (H₂O deionisiert) und einer Positivkontrolle (essigsäure Salzsprühnebellösung in Anlehnung an die Salzsprühnebellösung nach ISO 9227: 50±5 g/L NaCl mit Essigsäure auf ca. pH 3 eingestellt) durchgeführt, um die Eignung des gewählten Versuchsaufbaus zu prüfen. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der im Versuch verwendeten Lösungen und Extraktarten.

Tabelle 8: Im beschleunigten small-scale Korrosionsversuch verwendete Lösungen und Extrakte

Lösung bzw. Holzart	Kürzel	Verwendet für Varianten (large-scale/Freiland)
Negativkontrolle (deionisiertes Wasser)	nK	---
Positivkontrolle (Salzsprühlösung in Anlehnung an ISO 9227)	pK	---
Lärche gehobelt	Lg	1,4,7,9, 10,11,12
Fichte	F	2,5,13
Eiche	E	3,6,8
Thermofichte	Tf	14

Von den Brandschutzblechen wurden Stücke mit 16 x 5 cm bzw. 20 x 5 cm herausgeschnitten und an den oberen Kanten angebohrt, sodass die Bleche mit Schnüren an einer Aufhängevorrichtung befestigt werden konnten. Die Bleche wurden anschließend für je 28 Tage derart montiert, dass sie etwa zur Hälfte in die verschiedenen Extrakte eingetaucht waren. Um Wechselwirkungen zwischen den Blechen und der aus ihnen ggf. herausgelösten Metalle zu vermeiden, befand sich jedes Blech in einem eigenen mit je 600 ml Extrakt bzw. Lösung befüllten Glasbehälter. Es wurden immer 2 Extraktarten parallel auf ihre Korrosionswirkung untersucht, wobei die Aufbauten voneinander und von der Umgebungsluft durch Kunststoffolie abgetrennt waren. Abbildung 7 zeigt die Bleche vor Versuchsstart sowie den verwendeten Versuchsaufbau am Beispiel des Lärchenextrakts am Tag des Aufbaus (Tag 0 - noch mit offener Kunststoffolie).

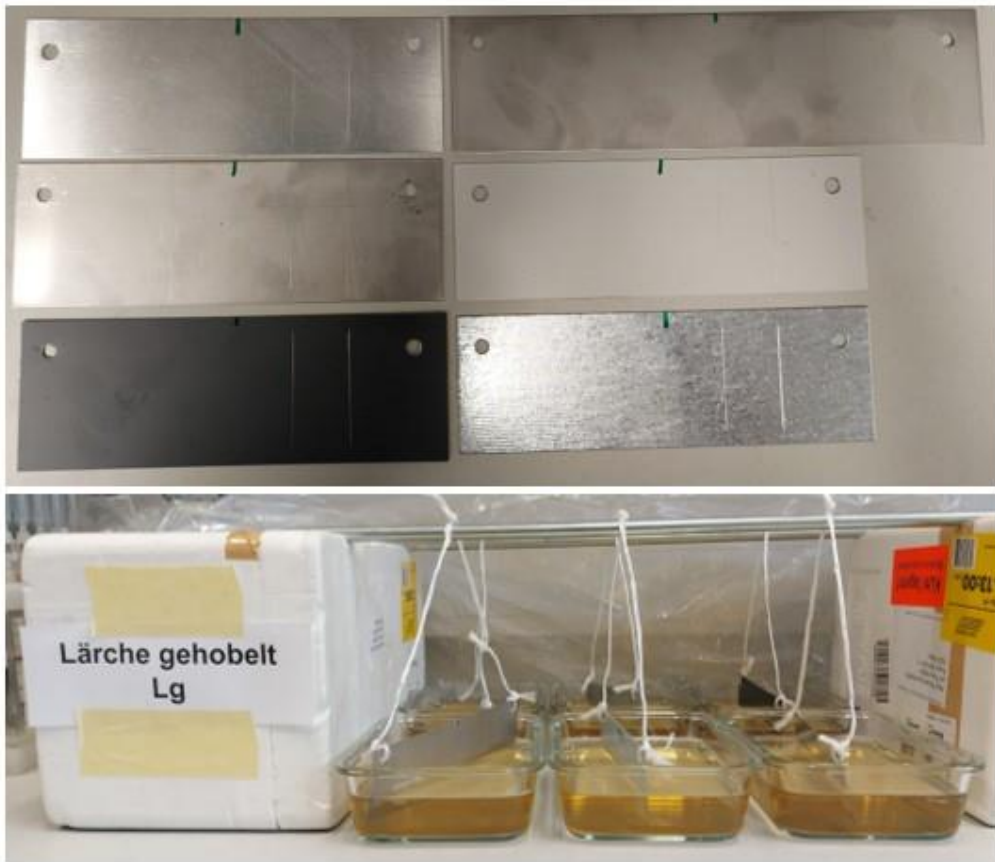


Abbildung 7: Für den Versuch vorbereitete Bleche und Versuchsaufbau mit dem Lärchenextrakt am Tag 0

Die sichtbaren Veränderungen an den Blechoberflächen sowie den Extrakten wurden an den Tagen 7, 14, 21 und 28 schriftlich und fotografisch dokumentiert. Am Tag 28 wurden die Lösungen der einzelnen Glasbehälter gefiltert, einzeln in Röhrchen abgefüllt und bis zu den geplanten Analysen im Kühlschrank aufbewahrt. Jede Lösung wurde auf ihre elektrische Leitfähigkeit, ihren pH-Wert und die Gehalte an verschiedenen Anionen, organischen Säuren sowie Metallen untersucht. Die erhaltenen Werte wurden dabei mit einem Aliquot des Extraktes verglichen, welcher nicht für die Versuche verwendet und in der Zwischenzeit im Kühlschrank aufbewahrt worden war.

2.2.1 Freiland-Versuch - Korrosionseffekte

Die an den unter Punkt 2.1.3 beschriebenen Freilandversuchsaufbauten montierten Brandschutzbleche wurden über den gesamten exponierten Zeitraum auf Beschädigungen und Verfärbungen überprüft. Zur Beurteilung wurden je Variante zwei Abschnitte mit jeweils 20 cm Länge ausgewählt und gekennzeichnet. Die Dokumentation der Veränderungen erfolgte für diese Abschnitte fotografisch und schriftlich in mehrwöchigem Abstand.

Die bewitterten Brandschutzbleche, welche Oberflächenveränderungen zeigten, wurden nach dem Versuchsabbau rasterelektronenmikroskopisch untersucht, wobei zur Bestimmung der Elementverteilung energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) eingesetzt wurde.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Umweltverhalten

3.1.1 Vergleich small-scale Leaching-Tests

Die durchgeführten Leaching-Tests im Labormaßstab unterscheiden sich grundsätzlich voneinander. Während die Prüfkörper im DSLT-Test permanentem Wasserkontakt ausgesetzt sind, basieren die Verfahren nach CEN/TS 15119-1 und EN 16105 auf dem Immersionsprinzip, d.h. die Proben erfahren abwechselnd Tauch- und Trocknungsphasen. Dies spiegelt sich auch in den Testergebnissen wider. Tabelle 9 sind die Wirkstoffemissionen, die über die jeweilige Testdauer freigesetzt wurden, aufsummiert in mg/m^2 Prüfkörperoberfläche dargestellt. Für den Vergleich der Verfahren untereinander ist die prozentuale Darstellung zielführend, wobei sich diese auf die im jeweiligen Versuch mit der Beschichtung aufgebrachte Wirkstoffmenge bezieht. Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Emissionsraten der einzelnen Wirkstoffe über den gesamten Testverlauf. Links sind die Wirkstoffkonzentrationen punktuell dargestellt, rechts sind diese kumuliert abgebildet.

Tabelle 9: Gesamtwirkstoffemissionen aus den unterschiedlichen small-scale Verfahren

DSL T (64d)		Variante A		Variante B		Relative Bewertung der Emissionen in Summe
		Emission gesamt		Emission gesamt		
Wirkstoff		mg/m²	%	mg/m²	%	
GD	IPBC	57,2	9,0	55,6	8,4	Höchste Wirkstofffreisetzung
	Tebuconazol	13,3	5,2	12,4	4,7	
DS	Propiconazol	23,8	8,1	52,6	14,9	
CEN/TS 15119-1 (19d)		Variante A		Variante B		Relative Bewertung der Emissionen in Summe
		Emission gesamt		Emission gesamt		
Wirkstoff		mg/m²	%	mg/m²	%	
GD	IPBC	1,4	0,2	4,4	0,7	Niedrigste Wirkstofffreisetzung
	Tebuconazol	0,7	0,3	1,0	0,4	
DS	Propiconazol	2,8	0,7	3,8	1,0	
EN 16105 (19d)		Variante A		Variante B		Relative Bewertung der Emissionen in Summe
		Emission gesamt		Emission gesamt		
Wirkstoff		mg/m²	%	mg/m²	%	
GD	IPBC	53,7	7,9	67,4	9,7	Mittlere Wirkstofffreisetzung
	Tebuconazol	1,5	0,6	2,5	0,9	
DS	Propiconazol	16,8	4,1	26,9	6,9	

GD...Grundierung, DS...Deckbeschichtung

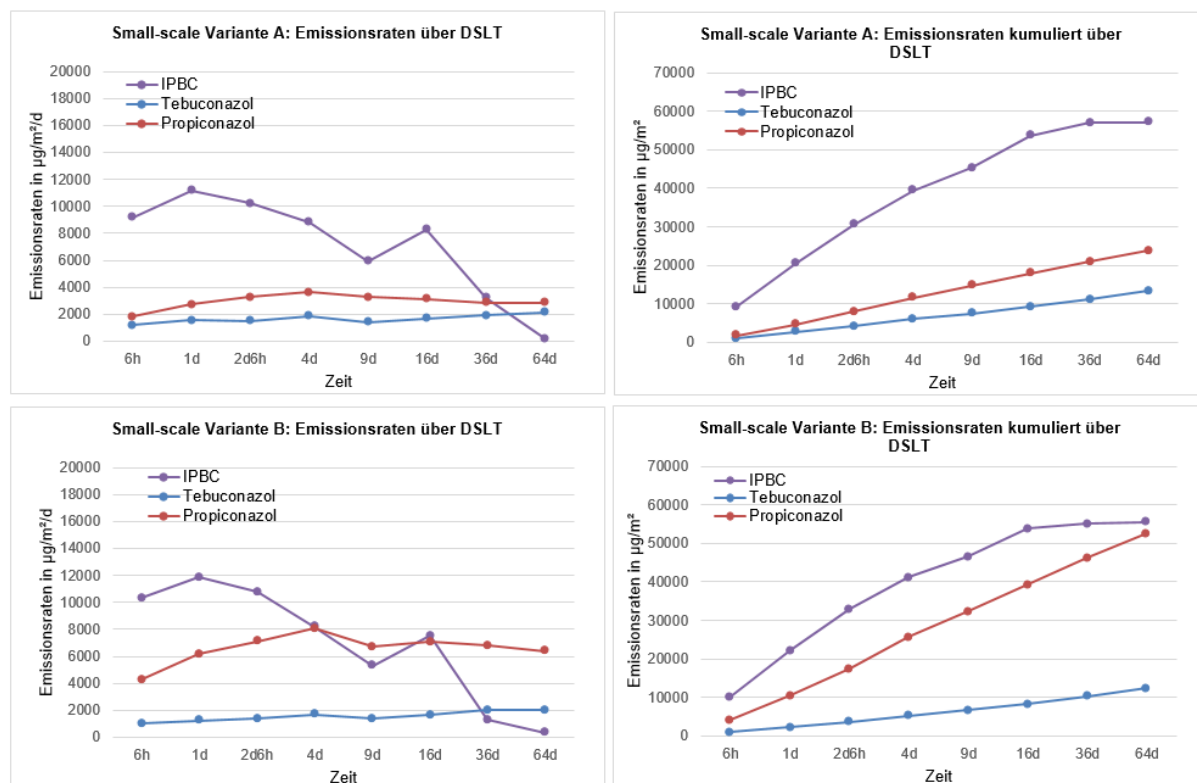


Abbildung 8: Auslaugverhalten im DSLT-Test bei permanentem Wasserkontakt

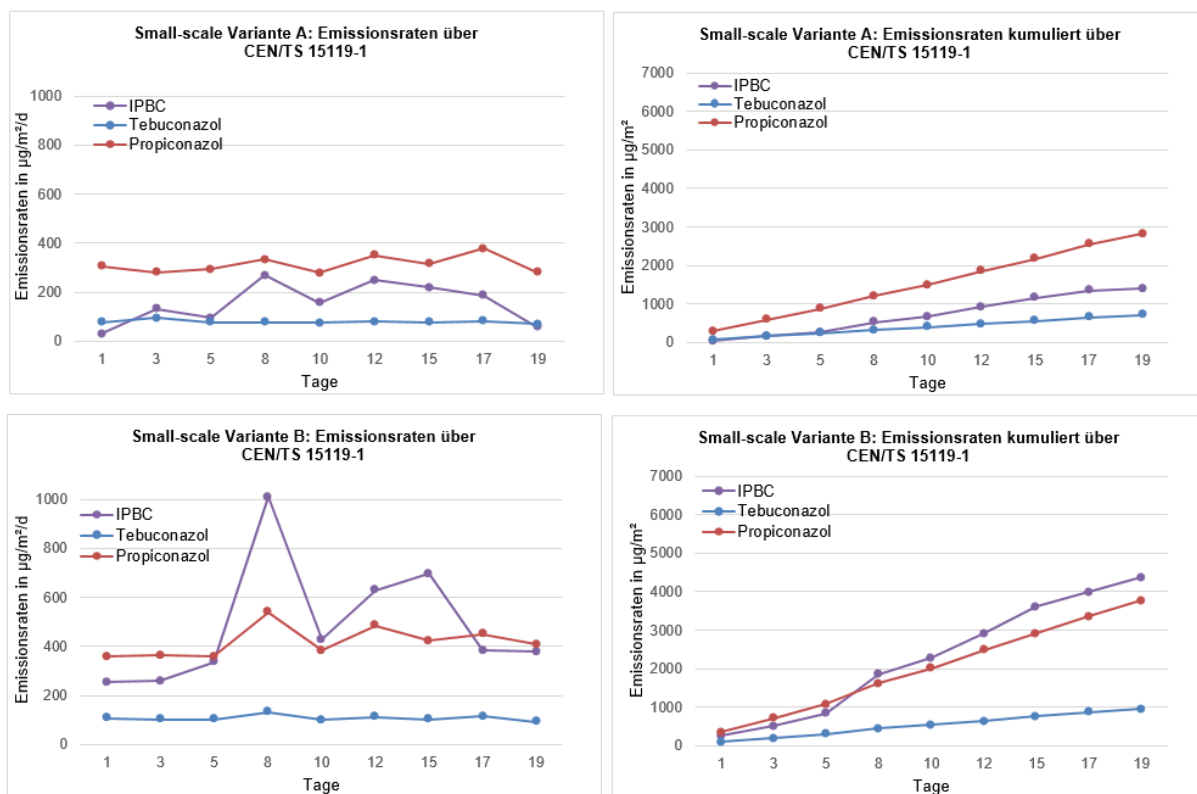


Abbildung 9: Auslaugverhalten im Immersionstest gem. CEN/TS 15119-1

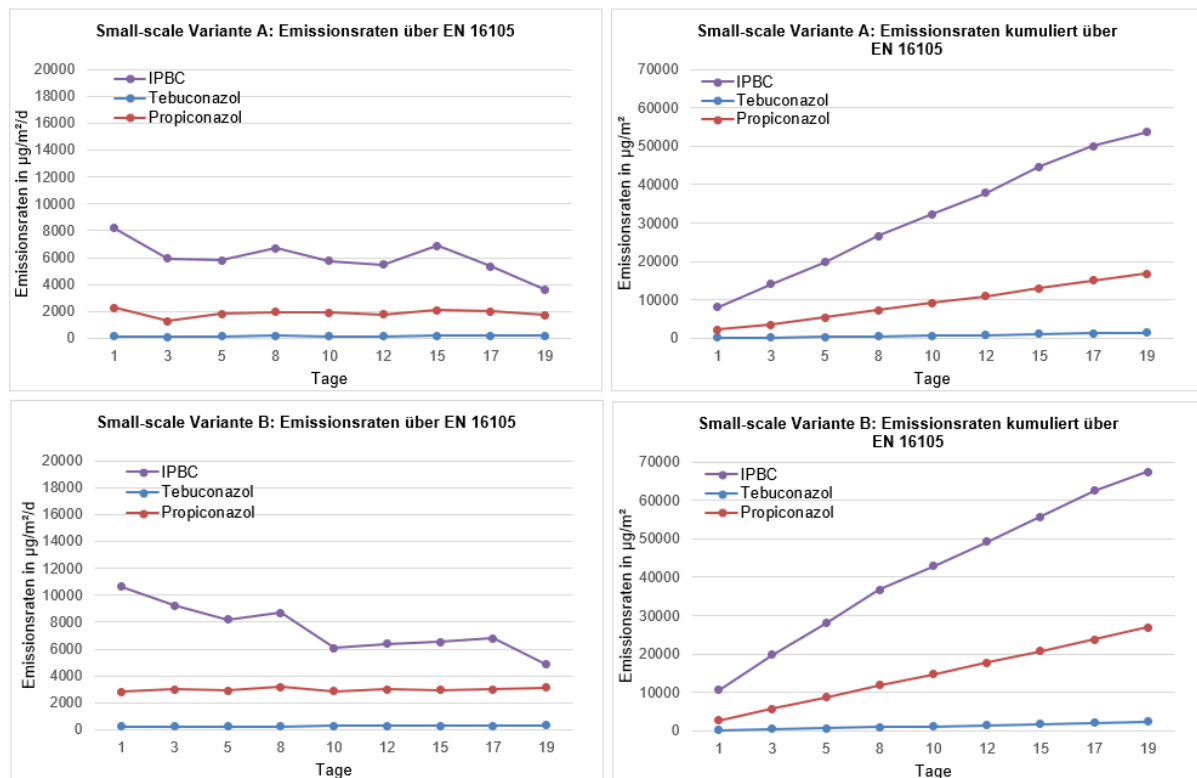


Abbildung 10: Auslaugverhalten im Immersionstest gem. EN 16105

Zu berücksichtigen ist, dass die Wirkstoffe IPBC und Tebuconazol aus der Grundierung stammen, d.h. im Falle einer Freisetzung erst durch die Deckbeschichtung diffundieren müssen, während der Wirkstoff Propiconazol ggf. direkt ausgelaugt wird. Zudem ist das Emissionsverhalten der Wirkstoffe aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen Struktur und physikalischen Eigenschaften divers. Auslaugprozesse sind unter anderem von der Wasserlöslichkeit des jeweiligen Stoffes abhängig. Das IPBC aus der Gruppe der Carbamate weist mit 168 mg/L (20°C, pH 7) die höchste Wasserlöslichkeit auf und unterscheidet sich demnach wesentlich von den Triazolen Tebuconazol und Propiconazol (Wasserlöslichkeit bei 20°C, pH 7, Tebuconazol: 29 mg/L Propiconazol: 100 mg/L).

Zusätzlich ist die zeitliche Komponente zu betrachten. Während die Testdauer bei den Immersionstests jeweils 19 Tage beträgt, wird die Emissionsrate beim DSLT-Test über 64 Tage hinweg betrachtet.

Aus Abbildung 8 geht hervor, dass die Wirkstofffreisetzung des IPBC beim DSLT gegen Ende des Versuchs signifikant abnimmt. Besonders ersichtlich wird dies in der kumulierten Darstellung, in der die Emissionskurve ab Tag 16 einer deutlichen Abflachung unterliegt. Die Emissionen der letzten beiden Messpunkte (Tag 36 und Tag 64) tragen demnach in verhältnismäßig geringem Ausmaß zur Gesamtemission des Wirkstoffes bei. Die Emission der beiden anderen Wirkstoffe verläuft über den gesamten Testverlauf hinweg annähernd linear. Trotz dem das IPBC aus der Grundierung stammt, wird es im DSLT-Test und im Verfahren gem. EN 16105 in höherem Maße ausgewaschen als die beiden Triazole. Tebuconazol wird in allen drei Tests am wenigsten freigesetzt, was einerseits mit der geringsten Wasserlöslichkeit korreliert und andererseits vermutlich daran liegt, dass der Wirkstoff in der Grundierung, nicht aber in der Deckbeschichtung vorhanden ist.

In der Gesamtbetrachtung wurden im DSLT-Verfahren die höchsten relativen Emissionsraten erzielt, während der Immersionstest nach CEN/TS 15119-1 die niedrigste Wirkstofffreisetzung bedingte. Die mit der Methode gem. EN 16105 erzielten Emissionswerte liegen im mittleren Bereich. Dies traf in Summe auf beide Beschichtungssysteme zu, wobei es im Vergleich bei System B grundsätzlich zu einer etwas höheren Wirkstofffreisetzung kam.

Grundsätzlich eignen sich laborbasierte Leaching-Tests gut für eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Materialien, für eine Übertragung der Ergebnisse in die Praxis braucht es jedoch entsprechende Modellrechnungen. Immersionstests, innerhalb derer sich Nass- und Trockenphasen abwechseln, weisen im Vergleich zum DSLT bereits im Testansatz den größeren Praxisbezug auf. Der permanente Wasserkontakt im DSLT führt wie im Versuch gezeigt zu einer Überschätzung der Emissionen. Zudem ist der DSLT für Beschichtungen, deren physikalische und chemische Eigenschaften durch dauerhaften Wasserkontakt geändert werden könnten, generell nicht geeignet (dies ist auch im Abschnitt Anwendungsbereich der entsprechenden Norm angeführt).

Der in der CEN/TS 15119 festgelegte 1-minütige Tauchzyklus stellt kein realistisches Szenario für den Anwendungsfall Fassade dar und ist zudem rein auf die Erfassung von Bioziden ausgelegt.

Die größte Praxisnähe im Testansatz wird mit dem Verfahren nach EN 16105 erzielt.

Alle drei Leaching-Methoden erlauben aufgrund ihres small-scale-Charakters jedoch ausschließlich die Untersuchung sehr kleindimensionierter Probenstücke. So kann z.B. der Holzanteil eines Fassadenelements getestet werden, nicht aber ein komplettes Fassadensystem inkl. Befestigungsmitteln und/oder Brandschutzabschnitts-Blechen.

3.1.2 Ergebnisse aus dem large-scale Leaching Test

Die Ergebnisse der large-scale Leaching Tests in der Schnellbewitterungskammer zeigten mit Ausnahme der pH-Werte und der Leitfähigkeiten deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten. Je nach beurteiltem Parameter werden diese vorrangig durch die Holzart, das Brandschutzabschnittsblech oder die Beschichtung bedingt.

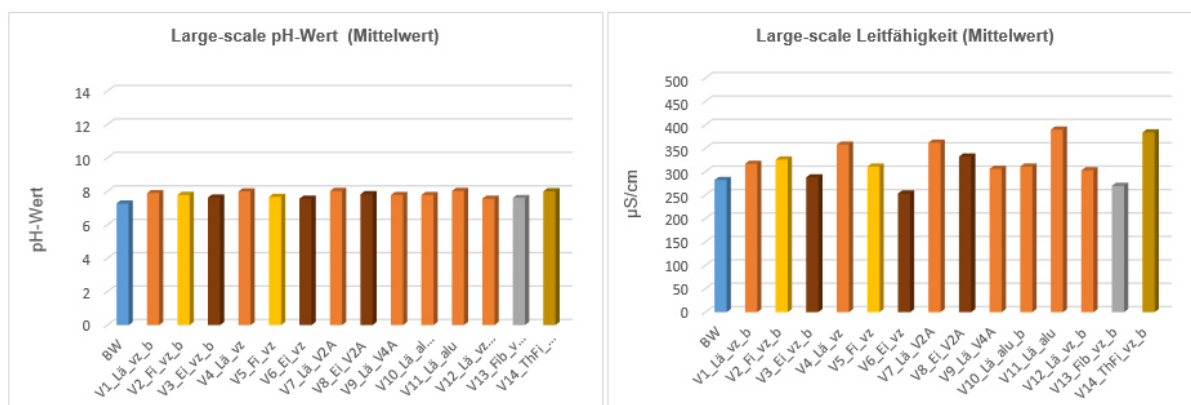


Abbildung 11: pH-Wert (links) und Leitfähigkeit (rechts) der Eluate aus der Schnellbewitterungskammer

In Abbildung 11 ist ersichtlich, dass die pH-Werte und die Leitfähigkeiten der Eluate der unterschiedlichen Varianten relativ ähnlich sind. Da die Werte innerhalb des Testzeitraums keine starken Schwankungen oder Trends aufwiesen, werden im Diagramm die Durchschnittswerte angegeben. Sowohl die pH-Werte als auch die Leitfähigkeiten der Eluate der getesteten Fassadenelemente liegen im Bereich der Blindwerte (Leitungswasser) und sind damit als unauffällig einzuordnen.

Deutliche Unterschiede sowohl zum Blindwert als auch relativ zueinander wurden beim TOC (total organic carbon) beobachtet. Dieser wird oftmals als Indikator für die organische Belastung von Eluaten verwendet. Dargestellt ist dies in Abbildung 12 links. Die Eluate der Lärchen-Varianten lieferten die höchsten TOC-Werte, bei den Fichten-Varianten, inklusive dem beschichteten und thermobehandelten Material, wurden die niedrigsten Werte verzeichnet. Die aus Eichenholz ausgelaugten Eluate sind im mittleren Bereich angesiedelt.

Die gemessenen TOC-Werte werden vermutlich zum Großteil durch aus dem Holz ausgewaschene Stoffe bestimmt.

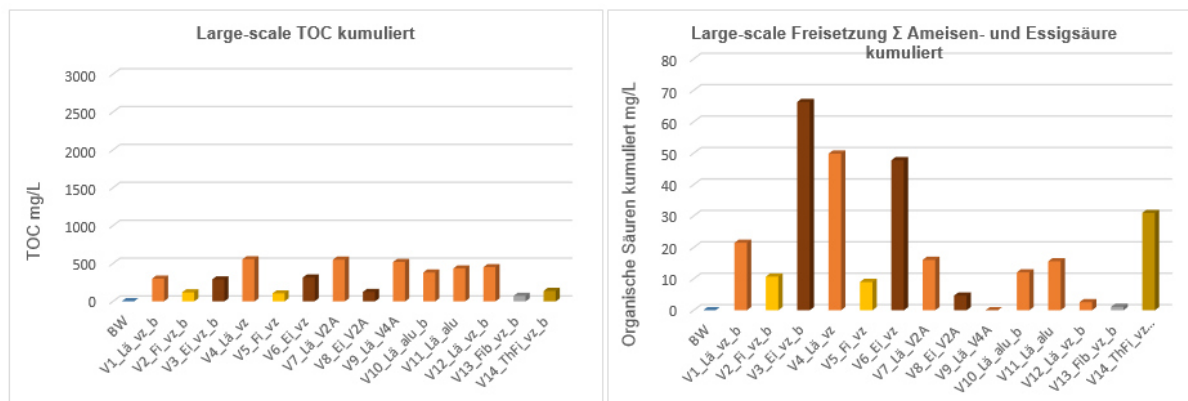


Abbildung 12: Kumulierte TOC-Werte (links) und Freisetzung von Ameisen- und Essigsäure kumuliert (rechts) in der Schnellbewitterungskammer

Holzimmanent und holzarten-determiniert ist großteils auch die Freisetzung von Ameisen- und Essigsäure, die in Abbildung 12 rechts als kumulierte Summe dargestellt ist. Säureemissionen werden insbesondere mit extraktstoffreichen Holzarten wie Eiche aber auch Lärche in Verbindung gebracht. Zudem neigen thermobehandelte Hölzer zu erhöhter Freisetzung organischer Säuren. Dies wird durch die dargestellten Ergebnisse bestätigt.

Der Anteil an Ameisensäure ist in allen Fällen dominant. Aus den eichenbasierten Varianten V3_Ei_vz_b und V6_Ei_vz werden verhältnismäßig am meisten der beiden organischen Säuren freigesetzt, hohe Konzentrationen wurden auch bei der Lärchenvariante V4_Lä_vz und der thermobehandelten Fichtenvariante V14_ThFi_vz_b verzeichnet. Deutlich niedriger verläuft die Freisetzung der Säuren bei den nicht behandelten oder beschichteten Fichtenvarianten sowie den übrigen Lärchen- und Eichenelementen. Tendenziell liefern dennoch die Eichenvarianten gefolgt von den Lärchen- und der Thermofichte-Variante die höchsten Emissionen.

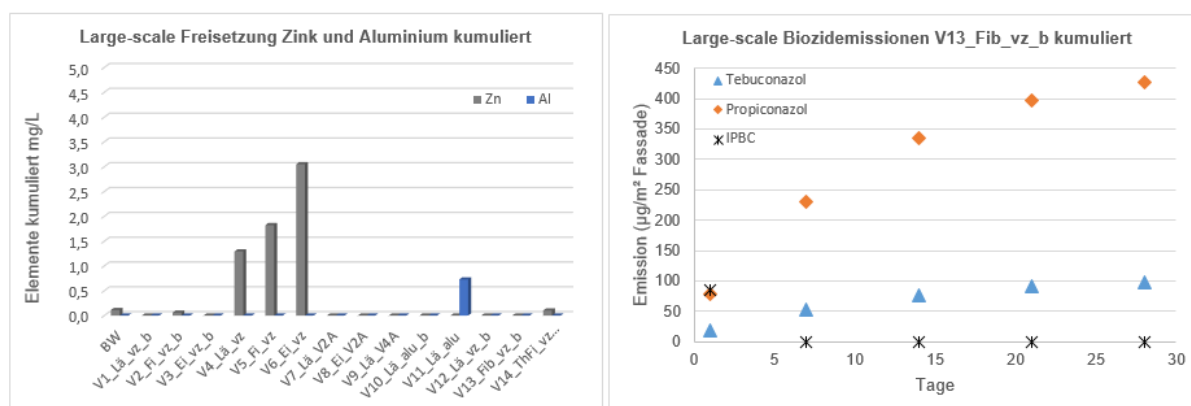


Abbildung 13: Freisetzung von Zink und Aluminium (links) und Biozidmissionen der Variante V13_Fib_vz_b (rechts) in der Schnellbewitterungskammer

Die Analyse der Eluate hinsichtlich von Metallen und anderen Elementen ergab ausschließlich in Bezug auf Zink und Aluminium Auffälligkeiten (Abbildung 13, links). Bei denjenigen Varianten, bei denen als Brandabschnitt unbeschichtete Bleche eingesetzt wurden, kam es zu einer Freisetzung des jeweils verwendeten Metalls. So wurden in den Eluaten der Varianten V4_Lä_vz, V5_Fi_vz und V6_Ei_vz mit unbeschichtetem verzinktem Blech unabhängig von der Holzart Zinkemissionen verzeichnet, aus der Variante V11_Lä_alu mit unbeschichtetem Aluminiumblech emittierte Aluminium. Bei den beschichteten Blechen kam es hingegen zu keinerlei Metallabwaschungen.

Abbildung 13 rechts zeigt die kumulierten Biozidemissionen aus Variante V13_Fib_vz_b im large-scale Versuch. Während der Wirkstoff IPBC ausschließlich zum ersten Messzeitpunkt (24h) in den Eluaten detektiert wurde, verlief die Auswaschung der beiden Triazole konstant über den gesamten Versuchszeitraum. Propiconazol, das aus der Deckschicht des Anstrichsystems stammt, wurde in höheren Konzentrationen ausgelaugt als Tebuconazol.

3.1.3 Ergebnisse aus dem Freilandversuch

Auch im Freilandversuch zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Im Gegensatz zum large-scale Versuch in der Schnellbewitterungskammer wurden auch bei den gemessenen pH-Werten und Leitfähigkeiten Unterschiede verzeichnet, zudem lagen die Werte beider Parameter auf einem wesentlich niedrigeren Niveau (Abbildung 14). Die durchschnittlich höchste Leitfähigkeit wurde bei der Variante V3_Ei_vz_b verzeichnet, während Blindwert und die beschichtete Variante V13_Fib_vz_b die niedrigsten Durchschnittswerte lieferten.

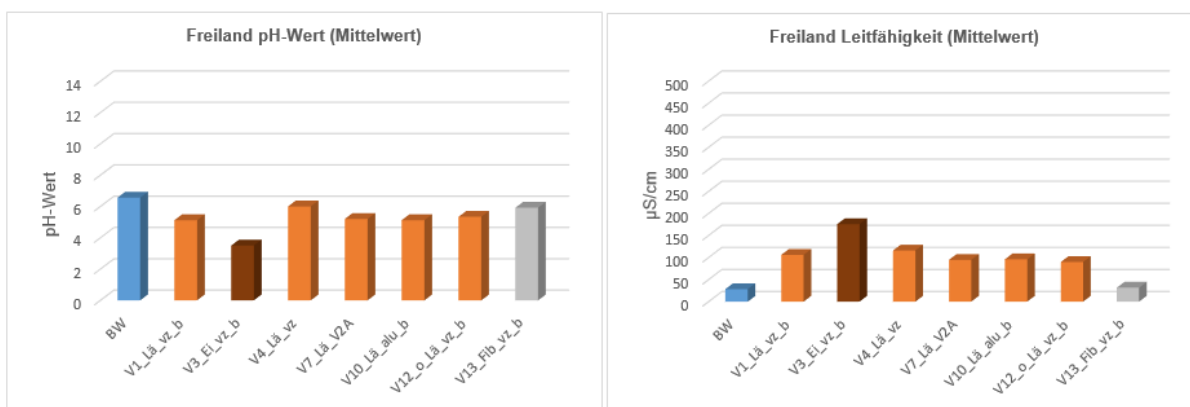


Abbildung 14: pH-Wert (links) und Leitfähigkeit (rechts) der Eluate aus dem Freilandversuch

Der durchschnittlich niedrigste pH-Wert wurde mit 3,5 bei der Variante V3_Ei_vz_b gemessen und lag damit in einem deutlich sauren Bereich. Die pH-Werte der im Freiland untersuchten Lärchen-Variante lagen im Durchschnitt ebenfalls niedriger als die pH-Werte des Blindwerts (Regenwasser) und der beschichteten Fichten-Variante V13_Fib_vz_b. Die

pH-Werte korrelieren damit sehr gut mit den gemessenen Säureemissionen (Abbildung 15, rechts). Die höchste Emission an Ameisen- und Essigsäure wurde bei Variante V3_Ei_vz_b detektiert, im Vergleich zu Blindwert und beschichteter Variante V13_Fib_vz_b wiesen alle Lärchen-Varianten ebenfalls hohe Säureemissionen auf.

Die detektierten TOC-Konzentrationen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lärchen- und der Eichenvariante, erreichten für beide Holzarten jedoch höhere Werte als für den Blindwert und die beschichtete Variante, deren Eluate kaum organischen Kohlenstoff aufwiesen. Generell lagen die Freiland-TOC-Werte auf einem deutlich höheren Niveau als im lage-scale Versuch.

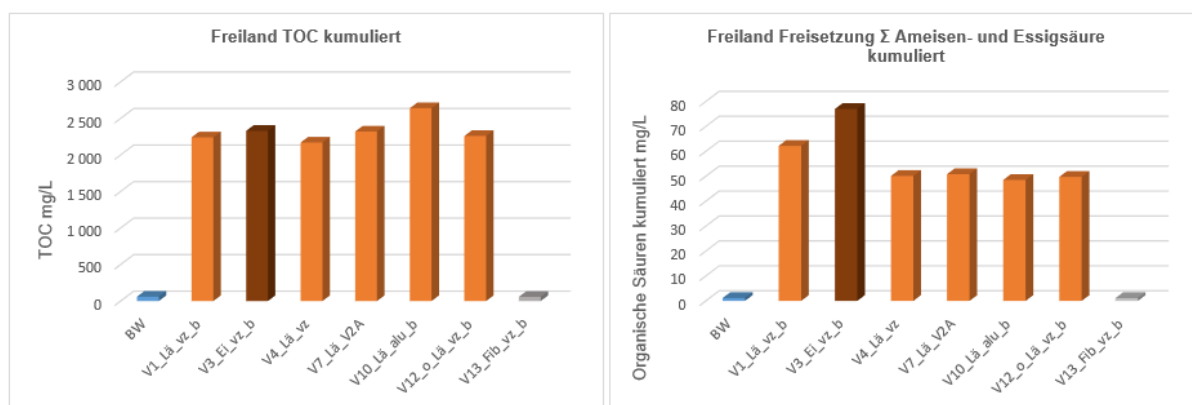


Abbildung 15: Kumulierte TOC-Werte (links) und Freisetzung von Ameisen- und Essigsäure kumuliert (rechts) im Freilandversuch

Wie schon im large-scale Versuch beobachtet, kam es auch im Freiland ausschließlich bei derjenigen Variante, wo unbeschichtete, verzinkte Bleche für den Brandschutzabschnitt eingesetzt wurden, zu einer Freisetzung von Metallen – konkret wurden bei Variante V4_Lä_vz signifikante Zinkemissionen detektiert (Abbildung 16, links).

Abbildung 16, rechts zeigt die kumulierten Biozidemissionen der Variante V13_Fib_vz_b. Anders als im large-scale Versuch bezieht sich die Darstellung auf die im Expositionszeitraum aufgezeichnete Niederschlagsmenge in mm. Während der Wirkstoff IPBC in keinem der Eluate nachgewiesen wurde, wurden Tebuconazol und Propiconazol über den gesamten Beobachtungszeitraum freigesetzt. Auch im Freiland dominierte die Emission des Wirkstoffes Propiconazol aus der Deckschicht des Anstrichsystems.

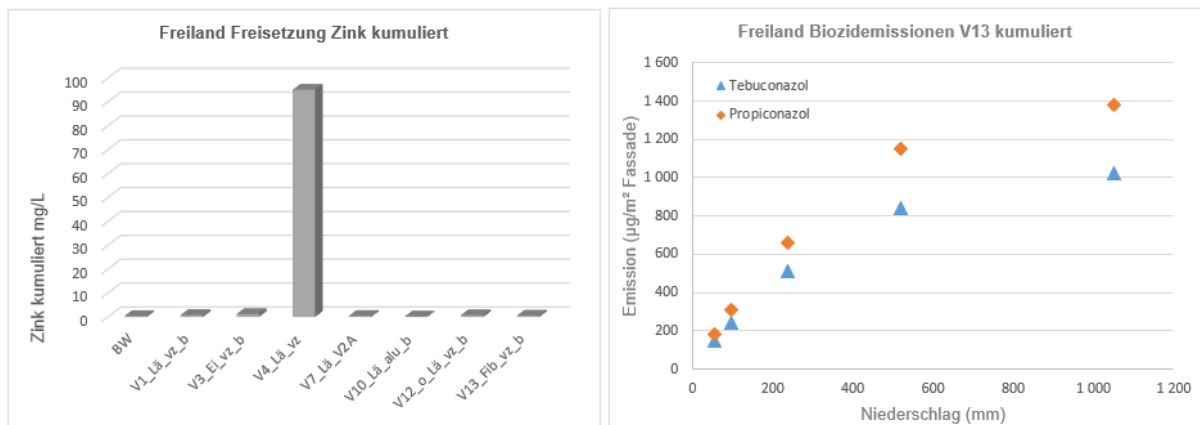


Abbildung 16: Freisetzung von Zink (links) und Biozidemissionen der Variante V13_Fib_vz_b (rechts) im Freiland

Die Ergebnisse zur ökotoxikologischen Untersuchung hinsichtlich der Algentoxizität sind in Abbildung 17 grafisch dargestellt. Die linke Grafik zeigt hierbei den Wachstumsverlauf (Anzahl der Zellen pro Milliliter) einzelliger Grünalgen bezogen auf das erste gepoolte Eluat (0-56 mm Niederschlag), während rechts das Wachstum bezogen auf das letzte gepoolte Eluat (518-1.052 mm Niederschlag) dargestellt ist. Wachstumsraten sind stets in Relation zur Testkontrolle zu betrachten.

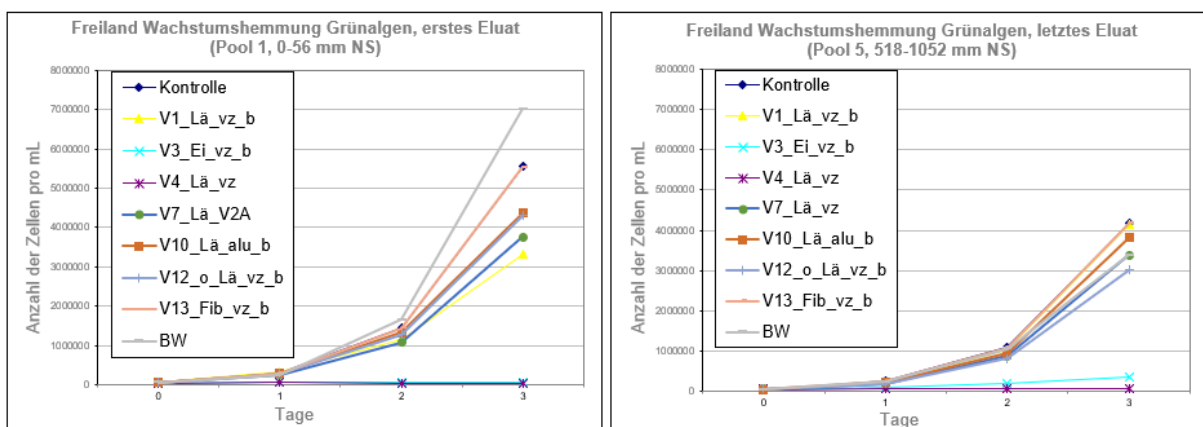


Abbildung 17: Verlauf der Wachstumshemmung einzelliger Grünalgen durch das erste und letzte gepoolte Freilandeluat über den Zeitraum des Ökotoxizitätstests (3 Tage)

In Tabelle 10 ist die prozentuelle Wachstumshemmung einzelliger Grünalgen durch das erste (0-56 mm Niederschlag) und letzte gepoolte Eluat (518-1.052 mm Niederschlag) dargestellt. Als ökotoxikologisch relevant gelten Wachstumshemmungen von $\geq 25\%$. Solche wurden bei den Varianten V3_Ei_vz_b und V4_Lä_vz verzeichnet. Bei ersterer nimmt die Hemmung über den Beobachtungszeitraum hinweg deutlich ab (86,3 % versus 54,6 %), bei letzterer bleibt sie auf einem konstant hohen Niveau (99,2 % vs. 91,9 %). Dementsprechend wird die Hemmung bei V3_Ei_vz_b vermutlich durch holzimmanente Extraktstoffe determiniert, deren Freisetzung im zeitlichen Verlauf langsam abnimmt. Dahingegen sind die ökotoxikologischen Effekte im Zusammenhang mit V4_Lä_vz mit großer Wahrscheinlichkeit

auf die kontinuierliche Zinkemission aus den unbeschichteten verzinkten Blechen zurückzuführen.

Tabelle 10: Prozentuelle Wachstumshemmung einzelliger Grünalgen

Variante	Pool 1 (0-56 mm NS)	Pool 5 (518-1.052 mm NS)
	I _{pi} (%)	I _{pi} (%)
Test-Kontrolle	0,0	0,0
BW	-4,9	3,9
V1_Lä_vz_b	13,8	0,7
V3_Ei_vz_b	86,3	54,6
V4_Lä_vz	99,2	91,9
V7_Lä_V2A	8,8	7,6
V10_Lä_alu_b	4,7	3,2
V12_o_Lä_vz_b	7,0	8,7
V13_Fib_vz_b	-1,8	-1,9

3.1.4 Conclusio zur Praxistauglichkeit beschleunigter Leaching-Verfahren

Im small-scale Leaching Test können kleindimensionierte Materialproben vergleichend untersucht werden. In diesem Zusammenhang erwies sich das Verfahren nach EN 16105, das im Testansatz in Bezug auf mögliche Bewitterungsszenarien die größte Praxisnähe aufweist, am praktikabelsten. Zur Beurteilung der Umweltrelevanz von Fassadenelementen ist diese Methode dennoch nur bedingt geeignet, da der geringe Maßstab nicht ausreicht, um Fassadenkomplettsysteme abzubilden. Umwelteinträge können jedoch aus verschiedenen Komponenten der Elemente erfolgen. So wurden in den durchgeführten Untersuchungen nicht nur Biozidemissionen aus beschichteten Holzoberflächen detektiert, sondern auch umweltrelevante Abwaschungen von Zink aus unbeschichteten verzinkten Brandschutzblechabschnitten nachgewiesen.

Im Sinne einer holistischen Betrachtung möglicher Umwelteinträge ist daher das gesamte Bauteil zu berücksichtigen. Dies ist ausschließlich im large-scale Maßstab durchführbar.

Der Vergleich der Ergebnisse aus dem large-scale Maßstab zeigt eine gute Übereinstimmung mit den im Freiland generierten Daten. Die wesentlichen Unterschiede im Emissionsverhalten der einzelnen Varianten, welche im large-scale Versuch bereits nach 28 Tagen festgestellt werden konnten, bestätigten sich im Freiland innerhalb der 18-monatigen Expositionszeit. Insbesondere trifft dies auf die Detektion umweltrelevanter Substanzen wie Zink oder Biozide zu. Auch Säureemissionen, welche den pH-Wert der Abwaschwässer beeinflussen, werden bereits im large-scale Schnellverfahren erkannt.

Der entwickelte Test ist demnach nicht nur dazu geeignet, Unterschiede im Umweltverhalten verschiedener Varianten relativ zueinander aufzuzeigen, sondern lässt sich auch auf die Praxis übertragen.

3.2 Korrosion

3.2.1 Beschleunigter small-scale Laborversuch

In den folgenden Grafiken werden die Proben gemäß der in Tabelle 11 aufgelisteten Kürzel bezeichnet, wobei für die Kennzeichnung immer jeweils die Brandschutzblechart und die Extrakt- bzw. Lösungsart kombiniert wurden. So bezeichnet „VzB_Lg“ das „verzinkte Blech beschichtet“ im Extrakt der „Lärche gehobelt“ oder „V4A_pK“ den „V4A Edelstahl“ in der „Positivkontrolle“.

Tabelle 11: Kürzel der Probenzuordnung anhand der verwendeten Brandschutzbleche und Extrakt-/Lösungsarten

Brandschutzblech	Kürzel	Extrakt/Lösung	Kürzel
Verzinktes Blech beschichtet	VzB	Negativkontrolle (deionisiertes Wasser)	nK
Verzinktes Blech	Vz	Positivkontrolle (essigsäure Salzsprühlösung)	pK
Edelstahl V2A	V2A	Lärche gehobelt	Lg
Edelstahl V4A	V4A	Fichte	F
Aluminium beschichtet	AlB	Thermofichte	Tf
Aluminium	Al	Eiche	E

3.2.1.1 Veränderung der Extrakteigenschaften

An allen Extrakten und Lösungen wurden im Laufe des 28 Tage andauernden Versuchs Veränderungen an den Flüssigkeiten selbst beobachtet. Besonders bei den Versuchen mit dem verzinkten Blech war nach einigen Tagen bei allen Extraktarten bereits eine deutliche Veränderung der Färbung zu beobachten. Im weiteren Verlauf zeigte meist auch der Aufbau mit dem verzinkten und beschichteten Blech ein deutliches Nachdunkeln. Abbildung 18 zeigt die Extraktfarbveränderungen am Beispiel des Lärchenextraktes am Tag 7 und am Tag 28 (Tag 0 siehe Abbildung 7). Aufgrund der hohen Menge an Nährstoffen in den Extrakten und den in der Umgebungsluft immer vorhandenen Schimmelsporen, setzte bei einigen Extrakten über die Versuchsdauer auch eine Schimmelbildung ein. Von Maßnahmen zur Verhinderung des Schimmels (z.B. durch Erhitzen) wurde Abstand genommen, da dadurch auch die chemische Zusammensetzung der Extrakte und damit die korrosiven Eigenschaften verändert worden wären. Um den Schimmel und entstandene Niederschläge zu entfernen, wurden alle Extrakte vor der Durchführung der Analysen filtriert.



Abbildung 18: Nachdunkeln des Lärchenextraktes im Laufe des Versuches, oben: Aufbau Lärchenextrakt am Tag 7; unten: Aufbau Lärchenextrakt am Tag 28, vorne rechts: verzinktes Blech, vorne Mitte: verzinktes Blech beschichtet

Die Extrakte/Lösungen wiesen vor dem Versuchsstart deutliche Unterschiede bei ihren pH-Werten und ihrer Leitfähigkeit auf (siehe Abbildung 19). Da die Leitfähigkeit einer Lösung maßgeblich von den in der Flüssigkeit vorhandenen Ionen abhängt, zeigte die Salzlösung (Positivkontrolle) aufgrund der durch das Salz enthaltenen hohen Ionenanzahl, erwartungsgemäß wesentlich höhere Leitfähigkeit als die untersuchten Extrakte.



Abbildung 19: Vergleich der pH-Werte und der Leitfähigkeiten der Originallösungen/-extrakte

Abbildung 20 zeigt die unterschiedlichen in den Originallösungen bzw. -extrakten enthaltenen Mengen an Essig- und Ameisensäure, welche wesentlich zum Korrosionspotential beitragen.

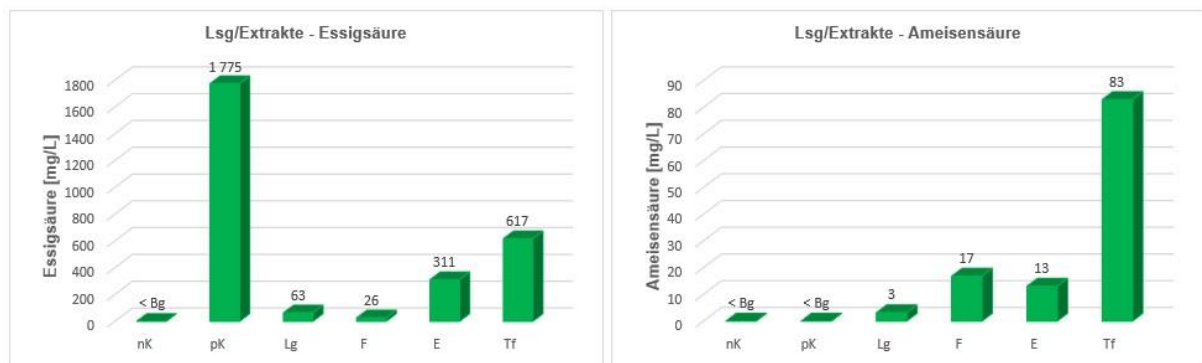


Abbildung 20: Vergleich der Essig- und Ameisensäuregehalte der Originallösungen/-extrakte

Die pH-Wertmessungen der Extrakte nach 28 Tagen im Korrosionsversuch ergaben im Vergleich zu den Originallösungen/-extrakten (nach 28 tägiger Lagerung im Kühlschrank) für alle Proben einen Anstieg des pH-Wertes (siehe Abbildung 21). Die Originalextrakte waren somit saurer als die Lösungen nach Kontakt mit den Blechen, wobei dieser Effekt besonders bei der Positivkontrolle mit den verzinkten Blechen (beschichtet sowie unbeschichtet) deutlich wurde. Bei Eiche und Thermofichte ist für die verzinkte Blechprobe ebenfalls ein deutlicher pH-Unterschied zu erkennen.



Abbildung 21: Vergleich der pH-Werte der Originallösungen/-extrakte (orange) zu den Lösungen nach 28 Tagen small-scale Korrosionsversuch mit den unterschiedlichen Blecharten (grün)

In allen Versuchsreihen wurde bei den Lösungen mit dem verzinkten Blech ein deutlicher Anstieg der Leitfähigkeit detektiert (siehe Abbildung 22). Dieser Umstand erklärt sich durch das Herauslösen von Zink-Ionen durch die von den Extrakten hervorgerufene Korrosion der Blechoberfläche (siehe Punkt 3.2.1.3).

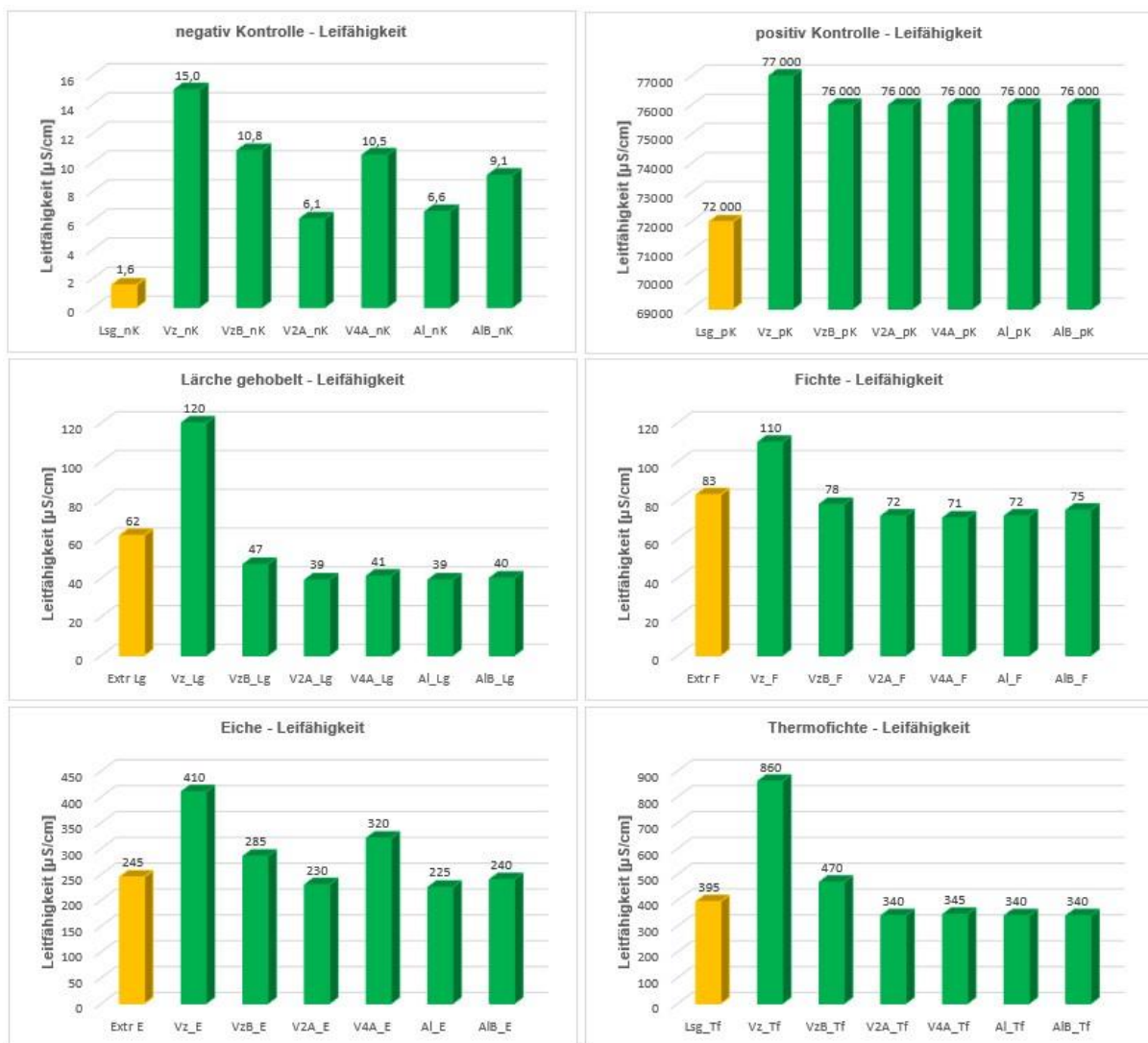


Abbildung 22: Vergleich der Leitfähigkeit der Originallösungen/-extrakte (orange) zu den Lösungen nach 28 Tagen small-scale Korrosionsversuch mit den unterschiedlichen Blecharten (grün)

3.2.1.2 Oberflächenveränderungen der Bleche

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen einen Überblick der Veränderungen der Blechoberflächen nach 28 Tagen im Korrosionsversuch, geordnet nach der eingesetzten Lösung bzw. Extraktart. Deutlich erkennbare Veränderungen wurden bei den verzinkten Blechen (beschichtet und unbeschichtet) sowie beim unbeschichteten Aluminium beobachtet. Beim beschichteten Aluminiumblech (AlB) zeigte sich bei den Extraktversuchen eine leicht bräunliche Verfärbung innerhalb der tiefen Kratzer, wobei es sich hier wahrscheinlich um Ablagerungen von Extraktinhaltsstoffen handelt. An den Edelstahlblechen V2A und V4A waren lediglich die Flüssigkeitsstände der Lösungen/Extrakte, ebenfalls anhand von Ablagerungen von Inhaltsstoffen der Extrakte, erkennbar. Eine Beschädigung durch Korrosion war für diese Bleche nicht zu beobachten.

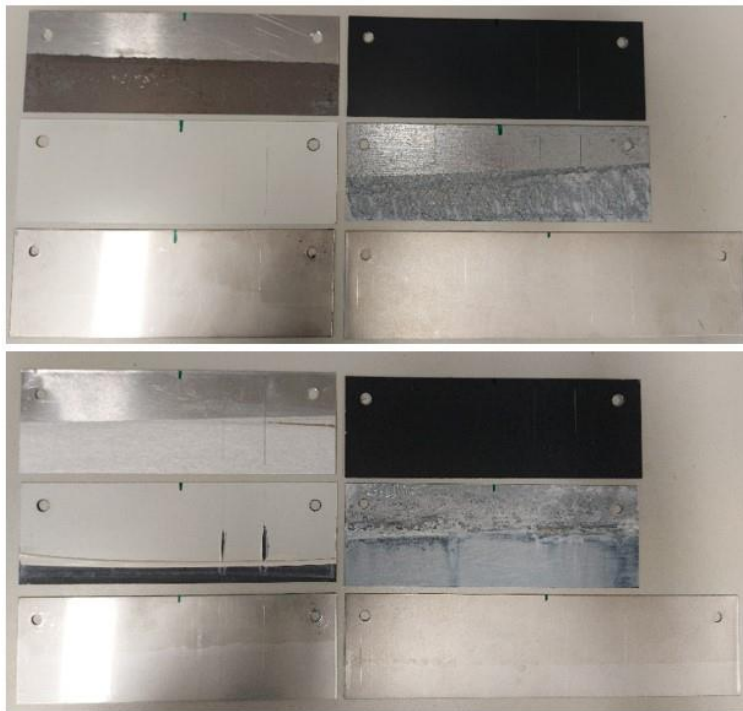


Abbildung 23: Veränderungen der Blechoberflächen nach 28 Tagen im Korrosionsversuch, oben: Negativkontrolle, unten: Positivkontrolle, jeweils: 1. Reihe: Aluminium (Al), Aluminium beschichtet (AlB), 2. Reihe: verzinktes Blech beschichtet (VzB), verzinktes Blech (Vz), 3. Reihe: Edelstahl V2A (V2A), Edelstahl V4A (V4A)



Abbildung 24: Veränderungen der Blechoberflächen nach 28 Tagen Korrosionsversuchen, Reihenfolge von oben: Lärche gehobelt, Fichte, Eiche, Thermofichte, jeweils: 1. Reihe: Aluminium (Al), Aluminium beschichtet (AlB), 2. Reihe: verzinktes Blech beschichtet (VzB), verzinktes Blech (Vz), 3. Reihe: Edelstahl V2A (V2A), Edelstahl V4A (V4A)

3.2.1.3 Verzinktes Blech und verzinktes Blech beschichtet

Das verzinkte Blech zeigte mit allen Lösungen, inklusive der Negativkontrolle (deionisiertes Wasser) deutliche Anzeichen von Korrosion. Diese begannen meist bereits am Tag 7 mit der Ausbildung von kleinen schwarzen Punkten, insbesondere an den Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Umgebungsluft. Die geringste Korrosionswirkung übte dabei der Fichtenextrakt aus, während Lärche gehobelt, Thermofichte und insbesondere die Eiche zu starken Korrosionseffekten führten. Beim Versuch mit der Positivkontrolle bildete sich außerdem ein weißer Niederschlag in der Lösung aus, bei welchem es sich um Zinkacetat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) handelte, welches durch die Reaktion mit der in der Lösung enthaltenen Essigsäure ausfiel. Auch beim Versuch mit der Negativkontrolle entstand ein weißlicher Niederschlag, jedoch in wesentlich geringerer Menge. In diesem Fall handelte es sich wahrscheinlich um Zinkhydroxid ($\text{Zn}(\text{OH})_2$). Abbildung 25 zeigt die in den Lösungen/Extrakten nach 28 Tagen enthaltenen Konzentrationen an Zink im Vergleich zum ursprünglichen Zinkgehalt der Originallösungen/-extrakte.

Am beschichteten, verzinkten Blech waren vor allem im tiefen Kratzer in Kombination mit der Positivkontrolle, sowie mit den Extrakten der Lärche, Eiche und Thermofichte bereits am Tag 7 erste Rostschäden zu erkennen. Lediglich bei der Negativkontrolle und beim Fichtenextrakt war bis zum Tag 28 keine Rostbildung am Blech zu beobachten. Beim Versuch mit der Positivkontrolle weichte sich außerdem die Beschichtung auf und begann sich vom Blech abzulösen. Darunter war eine Schwarzfärbung des Bleches zu beobachten. Wie auch beim verzinkten Blech, wurden bei den Lösungen/Extrakten der Versuche mit dem verzinkten, beschichteten Blech erhöhte Zinkwerte gefunden (siehe Abbildung 25).

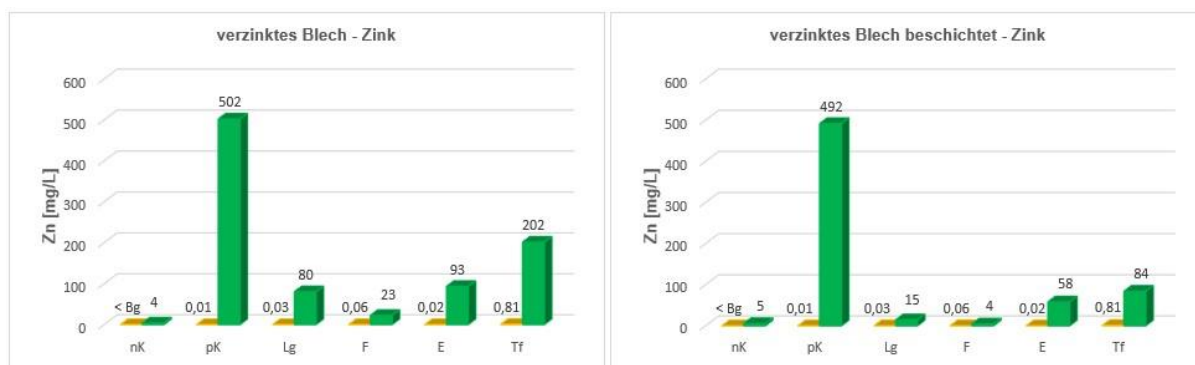


Abbildung 25: Vergleich des Zinkgehaltes der Originallösungen/-extrakte (orange) zu den Lösungen nach 28 Tagen small-scale Korrosionsversuch (grün) mit dem verzinkten (links) und dem verzinkten und beschichteten Blech (rechts)

Auch in den aufgenommenen EDX-Spektren des unbeschichteten verzinkten Bleches nach 28 Tagen im Lärchenextrakt ist im Vergleich zum Spektrum eines Referenzstückes des verzinkten Bleches eine deutliche Änderung der Oberflächenzusammensetzung zu erkennen (siehe Abbildung 26). Während bei der Referenz über den ausgewählten Bereich die Counts von Zink lediglich in einem gewissen Bereich schwanken, ist bei der Probe Vz_Lg ein

deutlicher Abfall der Zinkcounts an der Grenzlinie der korrodierten zur unbeschädigten, nicht in den Extrakt eingetauchten Oberfläche erkennbar.

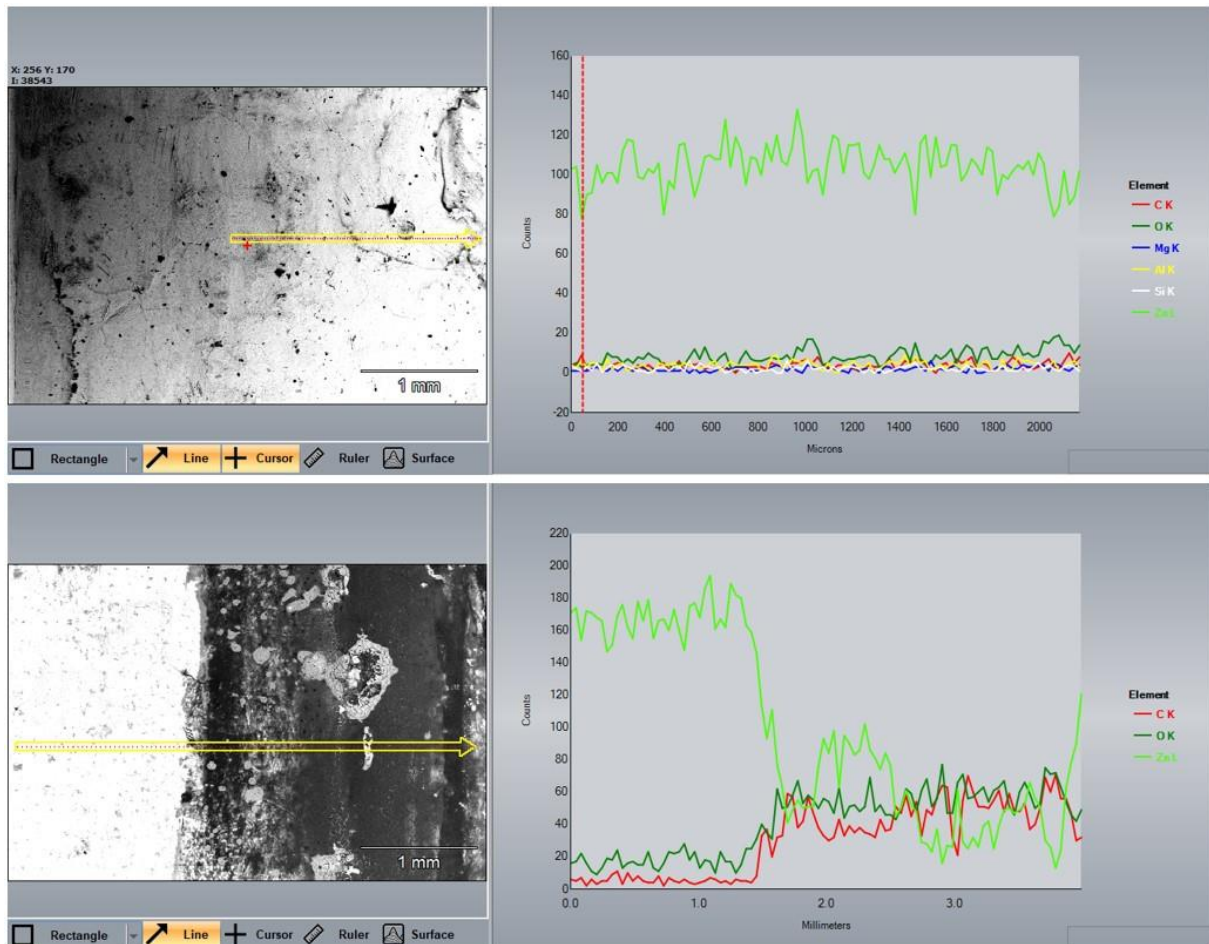


Abbildung 26: EDX-Spektrenvergleich einer nicht korrodierten Referenz des verzinkten Bleches (oben) zur deutlich angegriffenen Oberfläche der Probe Vz_Lg durch Einwirkung des Lärchenextraktes (unten)

3.2.1.4 Edelstahl V2A und V4A

Die Edelstahlbleche zeigten keine Korrosionseffekte an ihren Oberflächen und den Kratzern. Die Eluate enthielten dennoch geringe Mengen an Eisen, wobei bei beiden Stählen die Positivkontrolle am meisten Eisen herauslösen konnte (Abbildung 27). In den korrosiveren Extrakten und der Positivkontrolle wurden außerdem geringe Spuren an Chrom und Nickel nachgewiesen, welche auch zu den Bestandteilen von Edelstahl zählen.

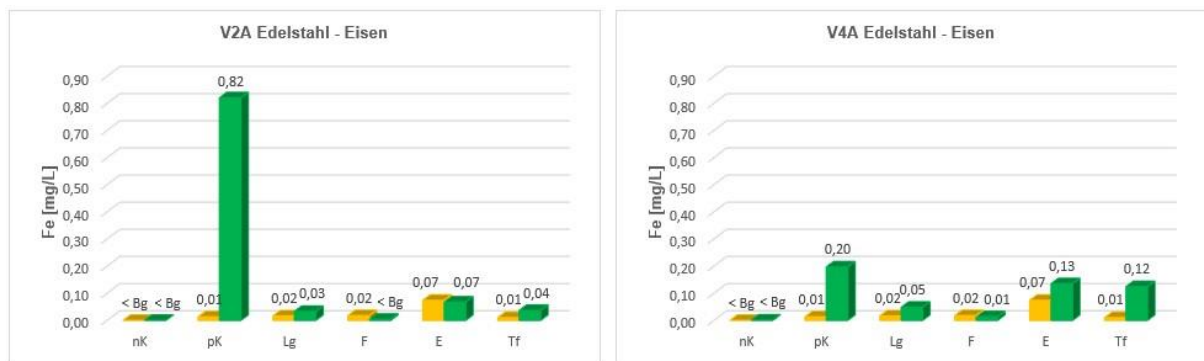


Abbildung 27: Vergleich des Eisengehaltes der Originallösungen/-extrakte (orange) zu den Lösungen nach 28 Tagen small-scale Korrosionsversuch (grün) mit den Edelstahlblechen V2A (links) und V4A (rechts)

3.2.1.5 Aluminium und Aluminium beschichtet

Das Brandschutzblech aus Aluminium zeigte besonders bei der Positivkontrolle aber auch in Kombination mit dem Eichenextrakt, deutliche Anzeichen einer Oberflächenpassivierung in Form einer weißlichen Verfärbung. Nach der erfolgten Passivierung traten keine weiteren sichtbaren Veränderungen mehr auf. Mit der Negativkontrolle (deionisiertes Wasser) bildete sich über die 28 Tage Versuchsdauer eine dunkelbraune Verfärbung aus. Das Brandschutzblech Aluminium beschichtet zeigte in keinem der Versuche eine Oberflächenveränderung. Abbildung 28 zeigt die in den Eluat/Lösungen gefundenen Konzentrationen an Aluminium nach 28 Tagen im Korrosionsversuch.

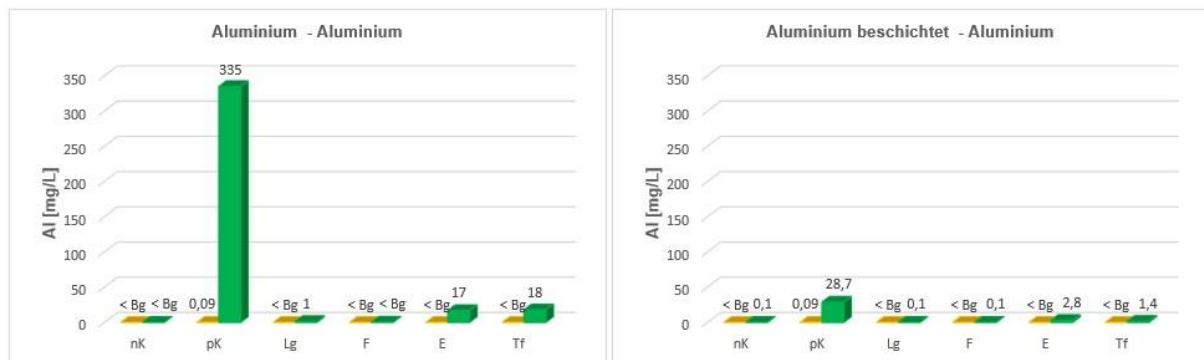


Abbildung 28: Vergleich des Aluminiumgehaltes der Originallösungen/-extrakte (orange) zu den Lösungen nach 28 Tagen small-scale Korrosionsversuch (grün) mit Aluminium (links) und Aluminium beschichtet (rechts)

3.2.2 Freiland-Versuch Korrosionseffekte

Alle im Freiland aufgebauten Bewitterungsvarianten (siehe Übersicht Tabelle 5) wurden über 15 Monate auf Oberflächenveränderungen der Brandschutzbleche untersucht. Dabei wurde bei den Varianten mit beschichtetem Aluminium, beschichteten verzinkten Blechen, sowie beim Edelstahlblech keine Korrosion beobachtet. Generell wurden, mit Ausnahme des

Auftretens von flachen Kratzern bzw. Verschmutzung durch Umwelteinflüsse, welche durch Reinigung entfernt werden konnten, keine Veränderungen an den Oberflächen festgestellt (siehe Abbildung 29).

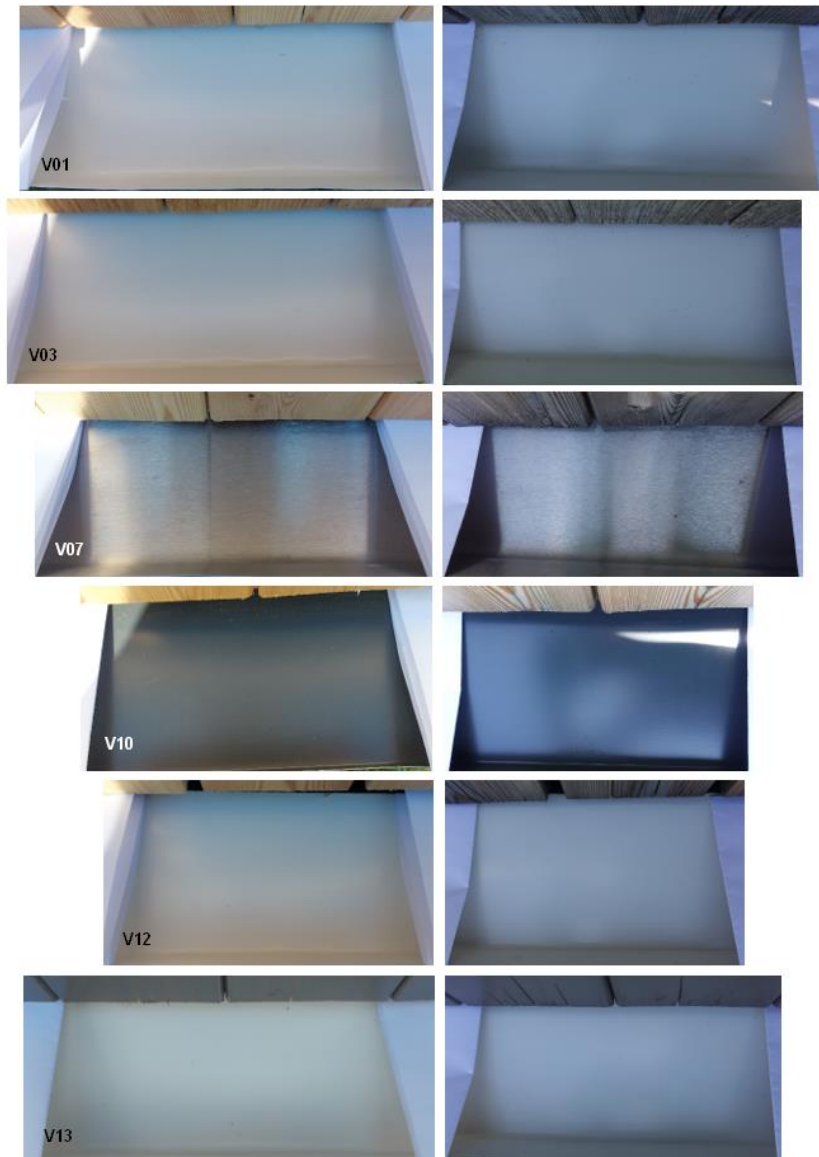


Abbildung 29: Vergleich der verschiedenen Varianten des Freilandversuches ohne sichtbare Oberflächenveränderung direkt nach Aufbau (links) und nach 15 Monaten Versuchsdauer (rechts)

Bei Variante V4_Lä_vz, für welche das verzinkte Blech ohne Beschichtung in Kombination mit unbeschichtetem Lärchenholz verwendet wurde, konnten bereits nach einem Monat Bewitterung weißliche Verfärbungen an der Oberfläche beobachtet werden. Die Verfärbungen verstärkten sich über die nächsten Monate stetig, bis nach 7 Monaten im Freilandversuch erste Roststellen am Blech auftraten, welche bis zum Versuchsende nach 15 Monaten an Fläche zunahmen (siehe Abbildung 30).

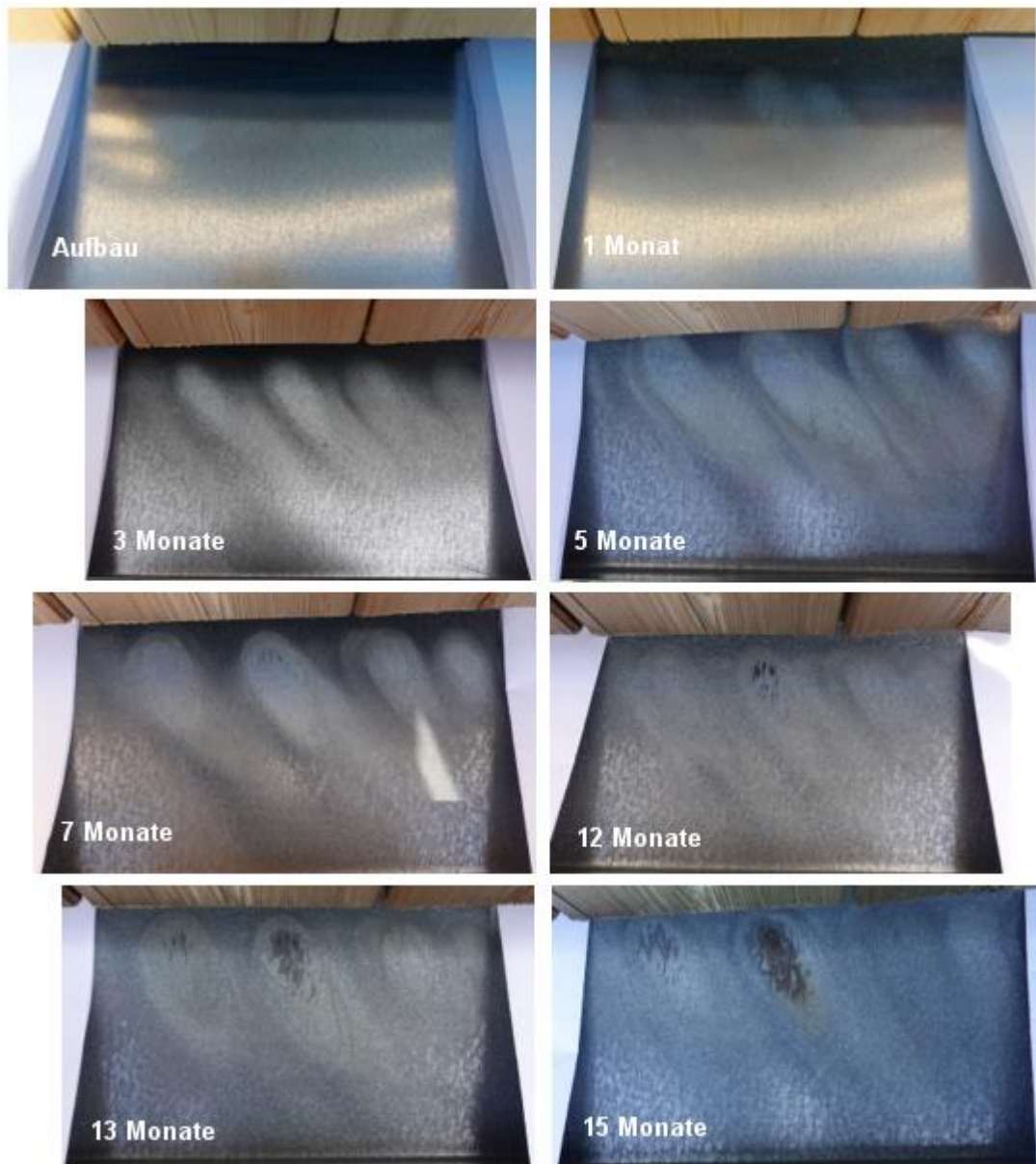


Abbildung 30: Oberflächenveränderung der Variante V4_Lä_vz (Brandschutzblech verzinkt, unbeschichtete Lärchenfassade) über 15 Monate Bewitterung im Freilandversuch

Auch für das beschädigte verzinkte Blech des Freilandversuches wurden EDX-Spektren mit dem Spektrum eines Referenzstückes des verzinkten Bleches verglichen (siehe Abbildung 31), wobei an der Grenzfläche zur Verfärbung ein deutlicher Abfall der Zinkcounts erkennbar war.

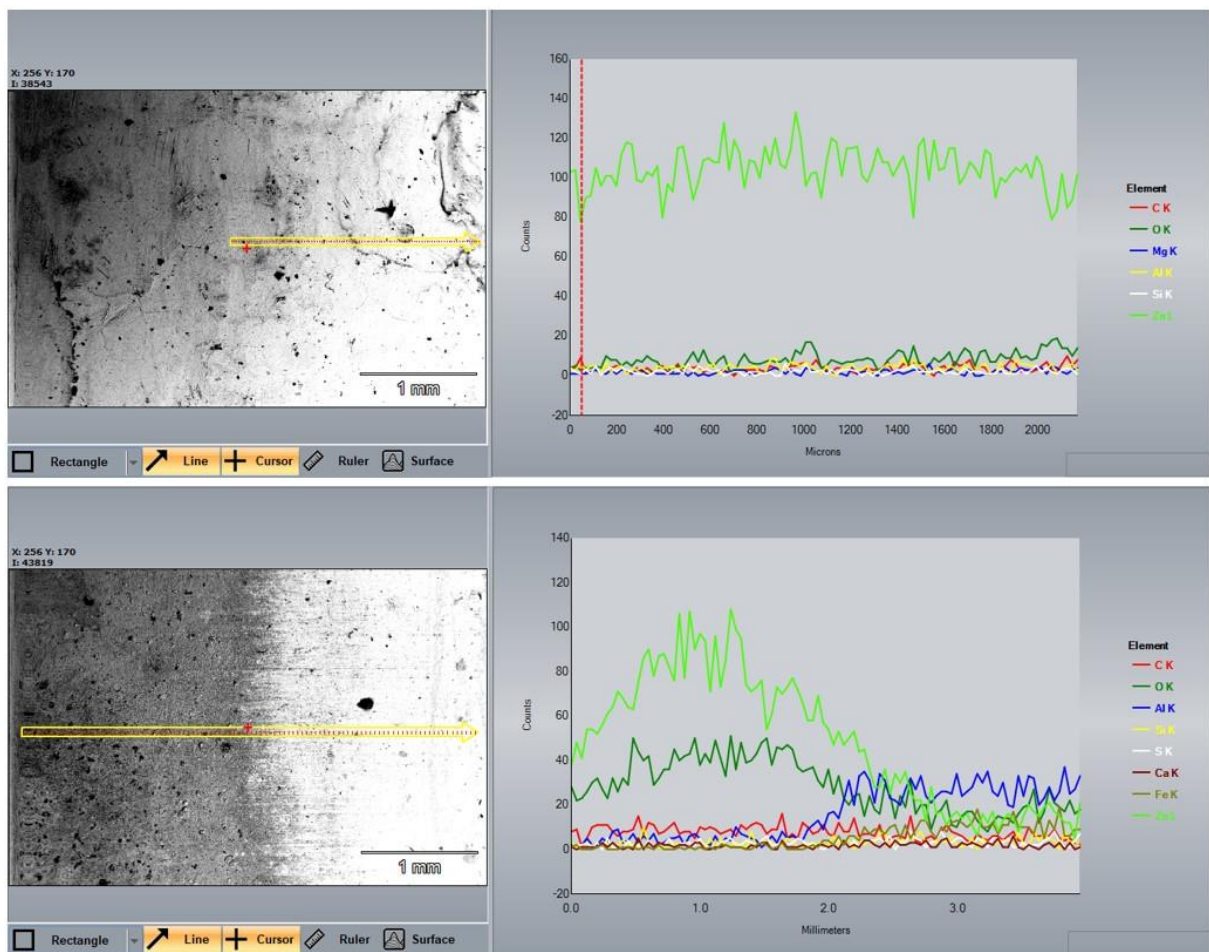


Abbildung 31: EDX-Spektrenvergleich einer nicht korrodierten Referenz des verzinkten Bleches (oben) zur angegriffenen Oberfläche der Freilandvariante V4_Lä_vz (unten)

3.2.3 Conclusio zur Praxistauglichkeit beschleunigter Korrosionsverfahren

Korrosionsanfällige Blecharten zeigten durch die verschärften Bedingungen im small-scale Versuch bereits nach wenigen Tagen/Wochen erste Korrosionsschäden. Die beobachteten Effekte stimmten mit den für diese Bleche im Freilandversuch über längere Zeiträume beobachteten Korrosionseffekten (Auswaschung von Zink, Verfärbung der Oberfläche und Auftreten von sichtbaren Schäden) überein. Bei den im Freilandversuch unbeschädigt gebliebenen Blechen wurden auch im beschleunigten Korrosionsversuch keine sichtbaren Effekte an den Blechoberflächen beobachtet. Die einzige Ausnahme dazu bildete die im small-scale Versuch bei stark sauren Extrakten auftretende Passivierung der unbeschichteten Aluminiumblechoberflächen, welche jedoch lediglich zu einer leichten weißlichen Verfärbung, aber nicht zum Auftreten von Korrosionsschäden führte.

Der Aufbau des entwickelten beschleunigten Korrosionsversuchs ermöglicht es somit, in kurzer Zeit einzuschätzen ob bei der Kombination einer Brandschutzblechart mit einer ausgewählten Holzart Korrosionseffekte auftreten können.

4 Zusammenfassung / Praxisrelevante Erkenntnisse

Zusammenfassend können die folgenden praxisrelevanten Erkenntnisse aus den Ergebnissen abgeleitet werden.

- Beschleunigte small-scale Leaching Laborverfahren liefern variable Ergebnisse und eignen sich nur bedingt zur Beurteilung von Fassadenelementen
- Beschleunigte large-scale Leaching Tests lassen sich auf die Praxis übertragen
- Aus unbeschichteten verzinkten Blechen wird in der Nutzungsphase durch Bewitterung Zink freigesetzt
- Zinkeinträge in die Umwelt haben ökotoxikologische Relevanz
- Bei unbeschichteten verzinkten Blechen kommt es in Kombination mit extraktstoffreichen Hölzern zu Korrosionseffekten (Lärche, Eiche)
- Beschleunigte small-scale-Korrosionstests lassen sich auf die Praxis übertragen

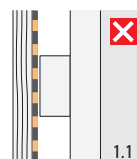
MERKBLATT: NEUE ERKENNTNISSE ZU HOLZFASSADEN

Dieser Publikation liegt das im Herbst 2023 abgeschlossene zweijährige FFG-Forschungsprojekt „Coole Hülle - Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik“ zugrunde. Das übergeordnete Ziel des Projekts war es, mithilfe von optimierten Holzfassaden den Einfluss des Klimawandels auf das Raumklima im Sommer zu reduzieren. Zusätzlich wurden Aspekte zur Verbesserung des Schallschutzes sowie zur Verbesserung der Feuchteresistenz der Holzfassaden untersucht. Daraus ergeben sich ergänzend zum Stand der Technik folgende neue Erkenntnisse:

1 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER FEUCHTERESISTENZ

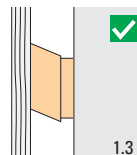
1.1 Bei offener Fassade keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung

Eine direkt auf der Rückseite der Fassadenschalung anliegende Fassadenbahn führt zu Feuchteansammlungen und Verformungen (Schüsselungen) der Fassadenbretter bis hin zum Schraubenabriss.



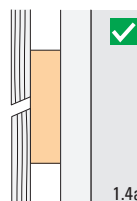
1.2 Keine Nageldichtung hinter der Lattung erforderlich

Zwischen Traglattung bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner ist keine Nageldichtung (Dichtbänder oder Dichtmittel) erforderlich.



1.3 Wasserableitung in und aus der Fassade beachten

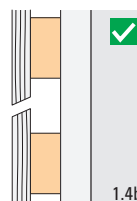
Bei offenen Fassaden benötigen horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm.



1.4 Längsstöße bei Fassadenbrettern exakt planen und ausführen

Neben dem Generalstoß mit Z-Blech kann auch ein Generalstoß mit 1 cm Fuge auf einer Traglatte (8 – 12 cm breit) [1.4a] oder auf 2 Traglatten (4 – 8 cm breit) [1.4b] ausgeführt werden; vertikale Fassadenbrettenden ca. 15° schräg geschnitten.

Einzelne fliegende Stöße (kein Generalstoß) sind nur bei Nut- und Feder-Schalungen empfohlen.



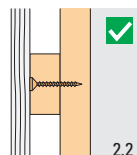
1.5 Unbeschichtete verzinkte Bleche oder Zinkbleche bei Holzfassaden vermeiden

Unbeschichtete verzinkte Bleche sind aufgrund ihres Korrosionspotentials nicht für extraktstoffreiche Holzarten geeignet, wenn über das Holz ablaufendes Wasser in Kontakt mit dem Blech kommen kann. Aus ökologischen Gründen wird generell von unbeschichteten verzinkten Blechen oder Zinkblechen abgeraten, da Zink freigesetzt wird.

2 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DES SCHALLSCHUTZES

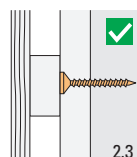
2.1 Geschlossene hinterlüftete Fassaden meist günstiger hinsichtlich Schallschutz

Geschlossene Fassaden erreichen bei Holzrahmenwänden ein bis zu 4 dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß als offene Fassaden.



2.2 Bei Kreuzlattung die Traglattung nicht durchschrauben

Wird die Traglattung nur in die Konterlattung und nicht bis in die Grundwand geschraubt, sind Verbesserungen im bewerteten Schalldämm-Maß von bis zu 2 dB möglich (aus statischen Gründen ist ggf. eine dickere Konterlattung notwendig). Die Traglattung dabei möglichst zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung anordnen.



2.3 Lattung mit Vollgewindeschrauben am tragenden Wandbildner befestigen

Vollgewindeschrauben bewirken einen geringeren Anpressdruck und damit eine geringere Schallbrücke, Verbesserungen im bewerteten Schalldämm-Maß von bis zu 1 dB sind möglich.

3 MASSNAHMEN ZUR REDUKTION DER SOMMERLICHEN ÜBERWÄRMUNG IN INNENRÄUMEN

3.1 Geschlossene Fassaden mit einer Hinterlüftung, nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausführen

Durch eine Hinterlüftung ist ein guter Wärmeabtransport gegeben.

3.2 Hinterlüftungsspalt von mindestens 3 cm an der engsten Stelle einplanen

Zum Wärmeabtransport im Sommer sind mind. 3 cm erforderlich (je mehr desto besser).

3.3 Zu- und Abluftöffnungen mit einem freien Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm sicherstellen

Hinterlüftungsöffnung nicht unbeabsichtigt durch ein feines Insektenschutzgitter verschließen und den Lochanteil des Insektenschutzgitters entsprechend anpassen (mind. 50 %).

3.4 Helle Beschichtungen erwärmen die Fassaden weniger

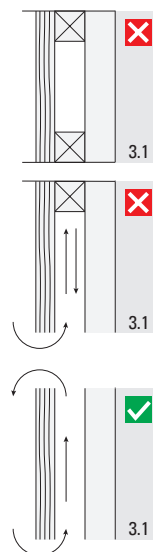
Helle Beschichtungen, die eine niedrige solare Absorption aufweisen ($a \leq 0,2$), reduzieren die sommerlichen Wärmeströme durch die opaken Bauteile in den Innenraum tagsüber um bis zu 35 %.

3.5 Unbehandeltes vergrautes Holz erwärmt sich ähnlich stark wie eine dunkel beschichtete Oberfläche

Unbehandelte Fassaden vergrauen (verdunkeln) innerhalb weniger Jahre und erreichen dann einen ähnlichen solaren Absorptionsgrad wie dunkelgraue Beschichtungen ($a > 0,8$). Günstiger verhält sich bei unbehandeltem Holz eine offene Fassade, um einen effizienteren Wärmeabtransport zu ermöglichen.

3.6 Fassadenbahn soll selbst bei offenen Fassaden stets beschattet werden

Selbst kurzzeitige Einstrahlungen von Sonnenlicht durch die offenen Fugen können dazu führen, dass sich die dunkle Fassadenbahn an diesen Stellen um bis zu 14 Kelvin stärker erwärmt als im beschatteten Bereich. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der sommerlichen Wärmeströme tagsüber durch die opaken Bauteile in den Innenraum um bis zu 20 %. Eine kontinuierliche Beschattung der Fassadenbahn ist insbesondere bei horizontalen Rhombusprofilen mit Fugenbreiten von 7 mm – 10 mm gegeben.



Obige Aussagen basieren auf den im Forschungsprojekt „Coole Hülle“ untersuchten Bauteilen und Fassadenkonstruktion. Erläuterungen zu den Fragestellungen und Antworten und detaillierte Begründungen zu den einzelnen Empfehlungen entnehmen Sie bitte der Publikation „Neue Erkenntnisse zu Holzfassaden – Hintergründe“, downloadbar unter www.holzforschung.at.

Das Projekt wurde durch die inhaltliche und finanzielle Beteiligung zahlreicher Partner aus der Holz- und Baubranche sowie mit Unterstützung durch die Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) ermöglicht.

Wir danken den beteiligten Verbänden:

Bundesgremium des Baustoff-, Eisen- und Holzhandels
Bundesinnung Holzbau
Fachverband der Holzindustrie Österreich
Österreichischer Fertighausverband
Verband der Europäischen Hobelindustrie
sowie 10 Wirtschaftsunternehmen.

Kontakt:

Holzforschung Austria
hfa@holzforschung.at
Tel.: +43/1/798 26 23-0



NEUE ERKENNTNISSE ZU HOLZFASSADEN – HINTERGRÜNDE

Feuchteresistenz – Schallschutz – Sommerlicher Wärmeschutz



Neue Erkenntnisse zu Holzfassaden – Hintergründe

Feuchteresistenz – Schallschutz – Sommerlicher Wärmeschutz

Autor:innen

Dr. Bernd Nusser, Dr. Martin Felhofer, DI (FH) Christina Fürhapper, DI Claudia Koch,
Dr. Christian Lux, Mara Schumacher M.Sc., DI Johannes Tieben,
Dipl.-HTL-Ing. Michael Truskaller

Fördergeber

Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Beteiligte Verbände und Firmen

Bundesgremium des Baustoff-, Eisen- und Holzhandels
Bundesinnung Holzbau
Fachverband der Holzindustrie Österreich
Österreichischer Fertighausverband
Verband der Europäischen Hobelindustrie

ARWAG Wohnpark Errichtungs-, Vermietungs- und Beteiligungsgesellschaft m.b.H.
J. u. A. Frischeis GmbH
Getzner Werkstoff GmbH
MIGRA Gemeinnützige Wohnungsges.m.b.H.
Osmo Holz und Color GMBH & Co KG
Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH
SIHGA GmbH
Stora Enso WP Bad Sankt Leonhard GmbH
Weiss GmbH
Weissenseer Holz-System-Bau GmbH

Wien, Juli 2024

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	5
1 Maßnahmen zur Verbesserung der Feuchteresistenz.....	7
1.1 Bei offener Fassade keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung	8
1.2 Keine Nageldichtung hinter der Lattung erforderlich	10
1.3 Wasserableitung in und aus der Fassade beachten	12
1.4 Längsstöße bei Fassadenbrettern exakt planen und ausführen.....	13
1.5 Unbeschichtete verzinkte Bleche oder Zinkbleche bei Holzfassaden vermeiden	15
2 Maßnahmen zur Verbesserung des Schallschutzes	17
2.1 Geschlossene hinterlüftete Fassaden meist günstiger	18
2.2 Bei Kreuzlattung die Traglattung nicht durchschrauben.....	19
2.3 Lattung mit Vollgewindeschrauben am tragenden Wandbildner befestigen	20
2.4 Kreuzlattung kann Vor- und Nachteile bringen	21
2.5 Teildämmung des Hinterlüftungsspalts verbessert die Schalldämmung.....	23
3 Maßnahmen zur Reduktion der sommerlichen Überwärmung in Innenräumen.....	25
3.1 Geschlossene Fassaden mit einer Hinterlüftung, nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausführen	26

3.2	Hinterlüftungsspalt von mindestens 3 cm an der engsten Stelle einplanen	28
3.3	Zu- und Abluftöffnungen mit einem freien Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm sicherstellen.....	29
3.4	Helle Beschichtungen erwärmen die Fassaden weniger.....	30
3.5	Unbehandeltes vergrautes Holz erwärmt sich ähnlich stark wie eine dunkel beschichtete Oberfläche	32
3.6	Fassadenbahnen sollten selbst bei offenen Fassaden stets beschattet werden.....	33
4	Literaturverzeichnis	35

Einleitung

Der Klimawandel und die damit steigenden Temperaturen rücken den sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden zunehmend in den Fokus. Vor diesem Hintergrund hat sich die Holzforschung Austria gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Handwerk (siehe Seite 1) im Rahmen des zweijährigen FFG-Forschungsprojekts *"Coole Hülle - Hinterlüftete Holzfassaden im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Technik"*, das im Herbst 2023 erfolgreich abgeschlossen wurde, intensiv mit diesem Themenkomplex auseinandergesetzt. Übergeordnetes Ziel des Projekts war es, den Einfluss des Klimawandels auf das sommerliche Raumklima durch den Einsatz von Holzfassaden zu minimieren. Darüber hinaus wurden Aspekte zur Optimierung des Schallschutzes und zur Erhöhung der Feuchteresistenz von Holzfassaden untersucht.

Praxisrelevante Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt wurden bereits in der Zeitschrift *„Holzbau - die neue quadriga“* in drei Teilen veröffentlicht. In Heft 5/2023 (Nusser et al. 2023) wurden die Ergebnisse zum Schallschutz, in Heft 6/2023 (Schumacher et al. 2023) die Ergebnisse zum Wärmeschutz und in Heft 1/2024 (Koch et al. 2024) die Ergebnisse zur Feuchteresistenz vorgestellt.

Das vorliegende Dokument fasst die umfangreichen Ergebnisse des zweijährigen Projekts anschaulich zusammen und erläutert die Hintergründe der Handlungsempfehlungen, die kompakt auf zwei Seiten veröffentlicht wurden und auf der Webpage der Holzforschung Austria zum [Download](#) zur Verfügung stehen. Diese neuen Empfehlungen ergänzen die bisherigen Konstruktionsempfehlungen, die auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen in früheren Forschungsprojekten nach den Grundsätzen des konstruktiven Holzschutzes erarbeitet und veröffentlicht wurden. Als verlässliche Informationsquelle zum Stand der Technik wird auf das Fachbuch *"Fassaden aus Holz"* (Schober et al. 2018) verwiesen.

Wir danken den beteiligten Verbänden:

Bundesgremium des Baustoff-, Eisen- und Holzhandels
Bundesinnung Holzbau
Fachverband der Holzindustrie Österreich
Österreichischer Fertighausverband
Verband der Europäischen Hobelindustrie
sowie 9 Wirtschaftsunternehmen (siehe Seite 1).

Kontakt:

Holzforschung Austria
hfa@holzforschung.at
Tel.: +43/1/798 26 23-0



1 Maßnahmen zur Verbesserung der Feuchteresistenz

Neue Anforderungen an Holzfassaden

In den letzten Jahren haben sich die Anforderungen an Holzfassaden deutlich verändert. Kubische Gebäudeformen sind ein wichtiges Ausdrucksmittel moderner Architektur geworden. Dachüberstände sind bei Flachdächern mit Attika obsolet und wurden selbst bei Satteldächern kontinuierlich reduziert oder werden heute oft gänzlich weggelassen (siehe Abbildung 1). Gleichzeitig gewinnen bei Holzfassaden Ausführungen mit offenen Fugen – so genannte „offene Fassaden“ – an Bedeutung. Die Abstände zwischen Brettern oder Latten werden dabei immer größer. Derartige Fassaden bieten naturgemäß weniger Schutz für die dahinterliegenden Bauteilschichten im Vergleich zu geschlossenen Holzfassaden, beispielsweise Nut- und Feder-Schalungen (siehe Abbildung 2). Zudem wird bei dieser Art von Fassaden bewusst auf den Vorteil der zweiten Ebene verzichtet, wie sie bei klassischen geschlossenen Holzfassaden durch eine dahinterliegende zweite wasserführende Ebene in Form einer Fassadenbahn oder eines geeigneten Plattenwerkstoffs gegeben ist (Hill et al. 2022).

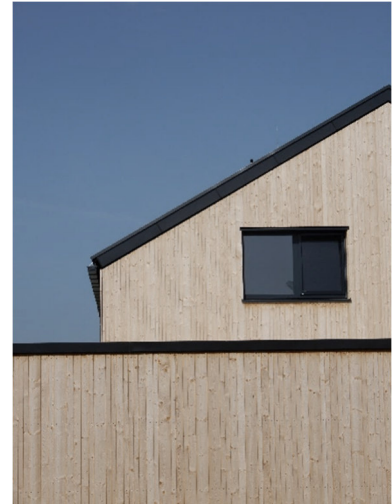


Abbildung 1: Moderne Holzfassade

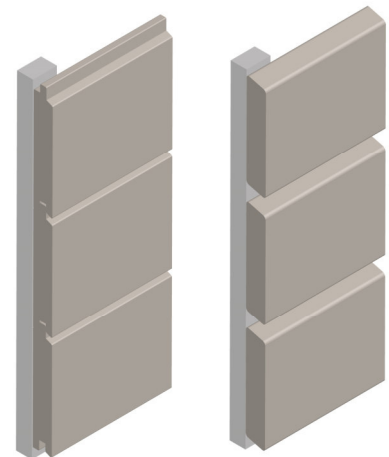


Abbildung 2: Vergleich geschlossene (links) und offene Fassade (rechts)

Diese Entwicklungen haben zu neuen Fragen geführt, die in dem Projekt beantwortet werden sollten. Ziel war es, das Feuchteverhalten verschiedener Konstruktionsdetails sowie den Einfluss von Schlagregen zu untersuchen. Dazu wurden verschiedene Fassadensysteme unter periodischer Beregnung und Trocknung beobachtet. Die Festlegung des Prüfzyklus erfolgte auf Basis von realen Messdaten, welche am Forschungshaus in Stetten erhoben wurden. Vorversuche dienten der Evaluierung der Daten und der Optimierung des Zyklus. Der festgelegte Prüfzyklus umfasste eine Beregnung der Fassadenelemente über 24 Stunden, eine anschließende Trocknungsphase von 72 Stunden bei 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit sowie fünf Wiederholungen. An den fünften Zyklus wurde eine Rücktrocknungsphase von etwa 16 Tagen angeschlossen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und Hintergründe zur Feuchteresistenz kompakt zusammengefasst.

Es ist anzumerken, dass Konstruktionsfehler, die zu einer langfristigen Durchfeuchtung führen, nicht durch andere Maßnahmen, wie z.B. die Verwendung von Hölzern mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit, ausgeglichen werden können. Solche Fehler können zu Fäulnis und einer verkürzten Lebensdauer führen.

1.1 Bei offener Fassade keine Fassadenbahn direkt hinter der Fassadenschalung

1.1.1 Fragestellung

Ist es insbesondere bei offenen Fassaden sinnvoll, eine Fassadenbahn direkt an der Rückseite der Fassadenschalung zu verlegen?

1.1.2 Antwort

Eine direkt an der Rückseite der Fassadenschalung verlegte Fassadenbahn wird nicht empfohlen, da sich diese hinsichtlich des konstruktiven Holzschutzes nachteilig auswirkt. Sie führt zu Feuchteansammlungen und Verformungen.

1.1.3 Begründung

In einigen Fällen wird bei offenen Fassaden die Verwendung einer Fassadenbahn direkt hinter den Fassadenbrettern in Erwägung gezogen, um eine gleichmäßige, dunkle Fugenoptik zu erzielen, in der keine Unterkonstruktionshölzer sichtbar sind. Die aktuellen Ergebnisse bestätigen das, was bereits in der Praxis beobachtet wurde: Eine Fassadenschalung unmittelbar auf einer Fassadenbahn anzubringen (siehe Abbildung 3) führt zu Feuchteansammlungen an der Rückseite der Fassadenbretter.

Obwohl die Fassadenschalung ohne direkt dahinter angebrachter Fassadenbahn während der Beregnungsphase etwas stärker befeuchtet wird, erfolgt die Trocknung während der 72-stündigen Rücktrocknungsphase deutlich schneller (Abbildung 3, rote Kurve).

Im Gegensatz dazu trocknen die Fassadenbretter mit einer direkt auf der Rückseite anliegenden Fassadenbahn während des Bewitterungsversuchs signifikant langsamer. Dies führt dazu, dass die Holzfeuchtigkeit erst am Ende des 4-tägigen Zyklus die kritische Schwelle von 20 % unterschreitet (Abbildung 3, blaue Kurve). Das eingeschränkte Trocknungsverhalten wird besonders deutlich nach dem fünften Zyklus. In der abschließenden Abtrocknungsphase nähern sich die beiden Feuchteverläufe nur langsam an.

Weiters führt die länger anhaltende erhöhte Holzfeuchtigkeit an der Brettrückseite zu teils massiven Verformungen (Schüsselungen) der Fassadenbretter weg von der Fassadenbahn bis hin zum Schraubenabriss (Abbildung 4). Auch Rissbildung im Holz ist aufgrund der entstehenden Spannungen in den Fassadenbrettern möglich (Jakiela et al. 2008).

Diese Feuchteansammlungen können zu Staunässe führen, welche das Wachstum von holzerstörenden Pilzen begünstigen und Fäulnisschäden verursachen können. Diese Ausführung widerspricht zudem den Prinzipien des konstruktiven Holzschutzes, welche darauf abzielen, Kapillarfugen zu vermeiden. Weiters kann eine an dieser Stelle verlegte Fassadenbahn auch nicht die Funktion des winddichten Wandabschlusses sowie der

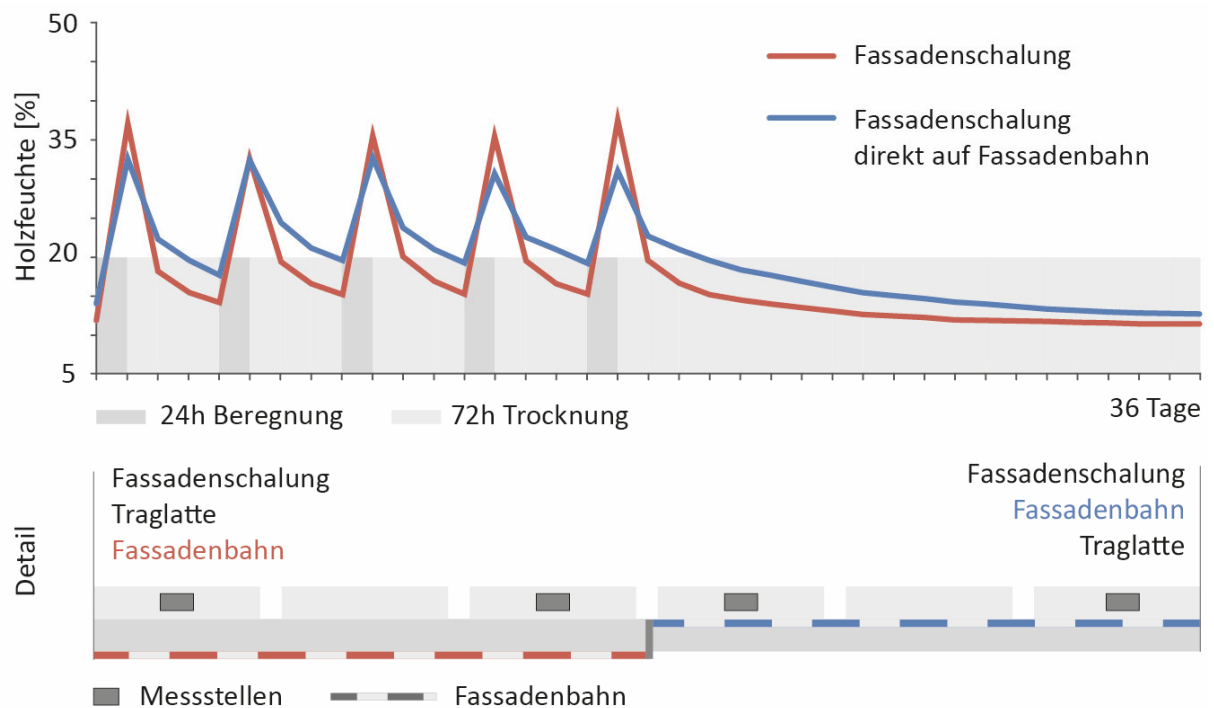


Abbildung 3: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in der Fassadenschalung mit und ohne direkt an der Schalungsrückseite anliegender Fassadenbahn. Das Diagramm zeigt den Holzfeuchteverlauf über den gesamten Versuchszeitraum mit fünf Zyklen zu je einer 24-stündigen Beregnungsphase (dunkelgrau) und einer 72-stündigen Trocknungsphasen (hellgrau) sowie der Rücktrocknungsphase am Ende. Unten die Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

eigentlichen wasserführenden Ebene erfüllen. Um eine optisch ansprechende schwarze Fuge zu erzielen, können die Unterkonstruktionslatten beispielsweise mit einer geeigneten schwarzen Beschichtung versehen werden (siehe Abbildung 5).



Abbildung 4: Durch die Bewitterung verformte (geschüsselte) Bretter beim Versuchsaufbau mit direkt an der Brettrückseite anliegender Fassadenbahn.



Abbildung 5: Fassade mit offenen Fugen mit ca. 10 mm Breite, in denen die schwarz gestrichen Traglatten nicht erkennbar sind

1.2 Keine Nageldichtung hinter der Lattung erforderlich

1.2.1 Fragestellung

Ist bei Holzfassaden, insbesondere bei offenen Fassaden, für eine ausreichende Regensicherheit eine Nageldichtung (Dichtbänder oder Dichtmasse) zwischen Trag- bzw. Konterlattung und Fassadenbahn auf dem Wandbildner erforderlich?

1.2.2 Antwort

Für die ausreichende Regensicherheit ist eine Pressung der Trag- oder Konterlatte durch die Verschraubung oder Nagelung auf die Fassadenbahn am tragenden Wandbildner ausreichend.

1.2.3 Begründung

Die Nageldichtung (Dichtband oder Dichtmasse) unter Konterlatten ist bei Dächern Stand der Technik. Ob dies bei offenen Fassaden bei Trag- oder Konterlatten, die direkt auf einer Fassadenbahn liegen, ebenfalls erforderlich ist, wurde in den letzten Jahren immer wieder hinterfragt, obwohl bisher keine Schadensfälle bekannt sind, die auf einen Wassereintritt in diesem Bereich hindeuten (Abbildung 6a). Allerdings fehlten bisher Untersuchungsergebnisse dazu.

Die nun vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der hinter der Fassadenbahn liegende Wandbildner während der Zyklen keine erhöhten Holzfeuchtwerte aufweist. Auch nach mehreren Beregnungs- und Trocknungszyklen blieb die Fassadenbahn bei üblicher Befestigung (verschraubt) ausreichend regensicher. Die Feuchteverläufe der Variante ohne Nageldichtband unterschieden sich nur geringfügig von denen der Variante mit Nageldichtband (Abbildung 6b).

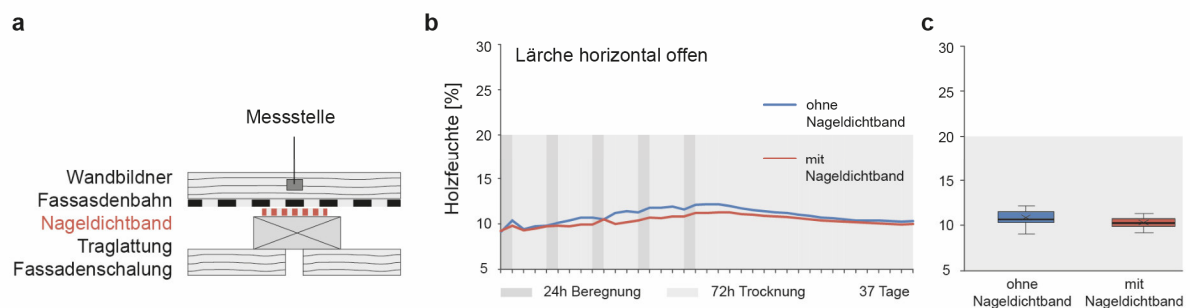


Abbildung 6: Holzfeuchteverlauf des Wandbildners während eines Bewitterungsversuchs an offenen Fassaden, mit und ohne Nageldichtband zwischen Traglattung und Wandbildner. (a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. (b) Diagramm zeigt den Holzfeuchteverlauf über den gesamten Versuchszeitraum mit fünf Zyklen zu je einer 24-stündigen Beregnungsphase (dunkelgrau) und einer 72-stündigen Trocknungsphasen (hellgrau) sowie der Rücktrocknungsphase am Ende. (c) Boxplots zeigen die mittlere Holzfeuchteverteilung und verdeutlichen die geringen Unterschiede.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Nageldichtband keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Holzfeuchte hat, da diese in einem ähnlichen Bereich von ca. 12 % liegt (Abbildung 6c).

Für eine ausreichende Regensicherheit reicht es daher aus, wenn die Trag- oder Konterlatte durch Verschrauben oder Vernageln mit der Fassadenbahn am tragenden Wandbildner verpresst wird.

1.3 Wasserableitung in und aus der Fassade beachten

1.3.1 Fragestellung

Sollen horizontale Traglatten bei offenen Fassaden oberseitig abgeschrägt werden?

1.3.2 Antwort

Bei offenen Fassaden benötigen horizontale Traglatten oberseitig eine Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm.

1.3.3 Begründung

Bei Fassaden mit offenen Fugen stellt die Unterkonstruktion ebenso wie die Fassadenschalung eine bewitterte Bauteilschicht dar und der Wasserablauf muss entsprechend geplant werden. Eine möglichst schnelle und ungehinderte Wasserableitung ist entscheidend für eine zügige Rücktrocknung und die Vermeidung von Feuchtenestern.

In den Versuchen zeigte sich, dass eine zur Fassadenschalung hin abgeschrägte Traglatte sowohl in der Fassadenschalung als auch in der Unterkonstruktion zu vergleichsweise höherer Holzfeuchtigkeit führt (Abbildung 7, blaue Kurve). Diese Variante birgt zudem die Gefahr von Schmutzansammlungen im Bereich der Kontaktfläche, was wiederum zu lokal erhöhter Holzfeuchtigkeit und verlängerten Trocknungszeiten führt.

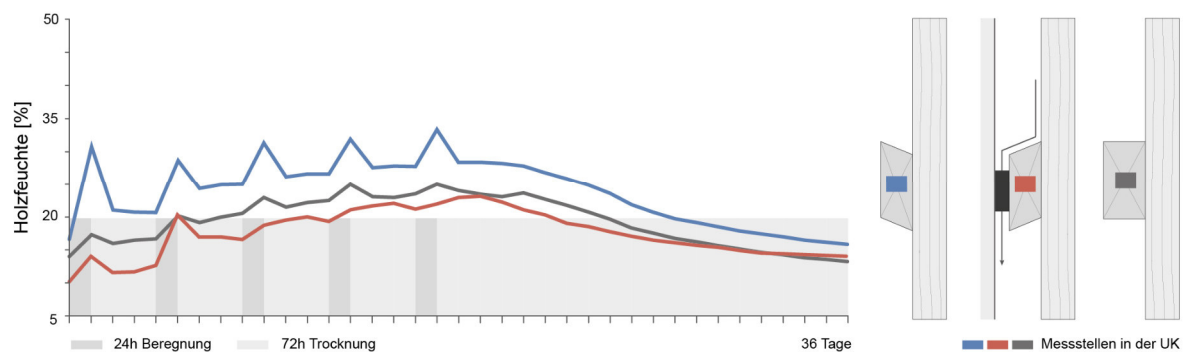


Abbildung 7: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in horizontalen Traglatten bei einer offenen Fassade mit unterschiedlicher Ausführung der Traglattenoberseite

Im Gegensatz dazu ist bei einer von der Fassadenschalung weg geneigten Traglatte die Feuchtigkeitsaufnahme geringer und die Trocknungszeit kürzer (Abbildung 7, rote Kurve). Diese Unterschiede lassen sich auf die verbesserte Wasserableitung weg von den Knotenpunkten zurückführen. Der Feuchteverlauf ohne Gefälle der Traglattenoberseite liegt zwischen den beiden anderen (Abbildung 7, graue Kurve). Daher ist die Traglatte mit Abschrägung weg von der Fassadenschalung in eine Entwässerungsebene von mindestens 1 cm die empfohlene Ausführung.

Diese Empfehlung bezieht sich ausdrücklich auf offene Fassaden. Bei geschlossenen Fassaden mit einzelnen offenen Fugen, z.B. im Bereich von offenen horizontalen Generalstößen (siehe Abschnitt 1.4), ist eine Abschrägung der Traglattenoberseite aufgrund der deutlich geringeren anfallenden Wassermenge nicht erforderlich, aber natürlich auch nicht nachteilig.

Eine andere Möglichkeit zur Sicherstellung einer raschen Wasserableitung besteht in einer Drainageebene direkt an der Rückseite der Fassadenschalung, z.B. durch punktuelle Unterlegung der Fassadenschalung.

1.4 Längsstöße bei Fassadenbrettern exakt planen und ausführen

1.4.1 Fragestellung

Wie können Längsstöße bei Fassadenbrettern ausgeführt werden, ohne die zu erwartende Lebensdauer der Fassade zu beeinträchtigen?

Kann das obligatorische Geschoßtrennblech (Z-Blech) beim Generalstoß vertikaler Fassadenbretter entfallen?

1.4.2 Antwort

In Ergänzung zu den bekannten Längsstoßvarianten können Fassadenbrettlängsstöße wie folgt ausgeführt werden:

- Generalstoß oder versetzt angeordneter Stoß mit 1 cm Fuge auf **einer** Traglatte (8 – 12 cm breit) bei vertikalen und horizontalen Fassaden; vertikale Brettenden ca. 15° schräg geschnitten
- Generalstoß oder versetzt angeordneter Stoß mit 1 cm Fuge auf **zwei** Traglatten (4 – 8 cm breit) bei vertikalen und horizontalen Fassaden; vertikale Brettenden ca. 15° schräg geschnitten
- einzelne fliegende Stöße (kein Generalstoß oder versetzt angeordneter Stoß) sind nur bei horizontalen Nut- und Feder-Schalungen empfohlen

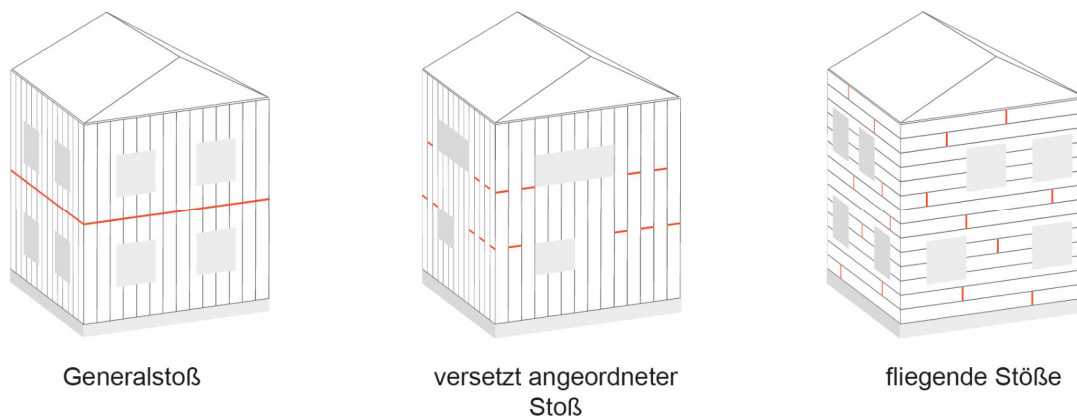


Abbildung 8: Verschiedene Stoßausbildungen bei Holzfassaden

1.4.3 Begründung

Bisher wurde für Fassadenhöhen, die die maximale Brettlänge überschreiten, generell die Ausführung eines Generalstoßes mit Z-Blech empfohlen. Diese Methode bietet aufgrund des optimalen konstruktiven Schutzes für das Hirnholz die technisch beste und sicherste Stoßausführung. Jedoch wird dies aus architektonischen Gründen oft nicht favorisiert (Rüther und Time 2015). Daher war das Ziel der aktuellen Untersuchungen, alternative Lösungen zu entwickeln, die die Fuge optisch weniger betonen und dennoch möglichst geringe Nachteile in Bezug auf die Lebensdauer mit sich bringen.

Die Bewitterungsuntersuchungen haben gezeigt, dass eine schadensträchtige Erhöhung der Holzfeuchtigkeit in der Unterkonstruktion vor allem bei stumpfen, hinterlegten Stößen zu befürchten ist. Offene Stöße ermöglichen sowohl auf zwei Traglatten als auch auf einer Traglatte eine ausreichend schnelle Abtrocknung.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich zwischen einem stumpfen, hinterlegten Stoß und einem offenen, hinterlegten Stoß jeweils bei einer geschlossenen, horizontalen und einer geschlossenen, vertikalen Fassade. Die für die ordnungsgemäße Befestigung der Fassadenbretter erforderliche größere Breite der Traglatte im Stoßbereich hat bis zu einer Breite von 12 cm keinen nachteiligen Effekt auf das Feuchteverhalten. Der Mindestabstand der Schrauben zum Brettende beträgt 2 cm, um Rissbildung zu vermeiden; die Schrauben sollten vorgebohrt werden. Bei vertikalen Fassaden sind die Brettenden schräg zu schneiden. Die Fassadenbretter trocknen auch in unmittelbarer Nähe zum Stoßbereich im Normalfall rasch genug aus, sodass keine Staunässe entsteht und somit auch keine Gefahr von Fäulnis besteht.

Jedenfalls sind Längsstöße frühzeitig im Bauprozess zu thematisieren und unter Berücksichtigung von Gebäudehöhe, verfügbarer Fassadenbrettlänge und architektonischen Anforderungen zu planen.

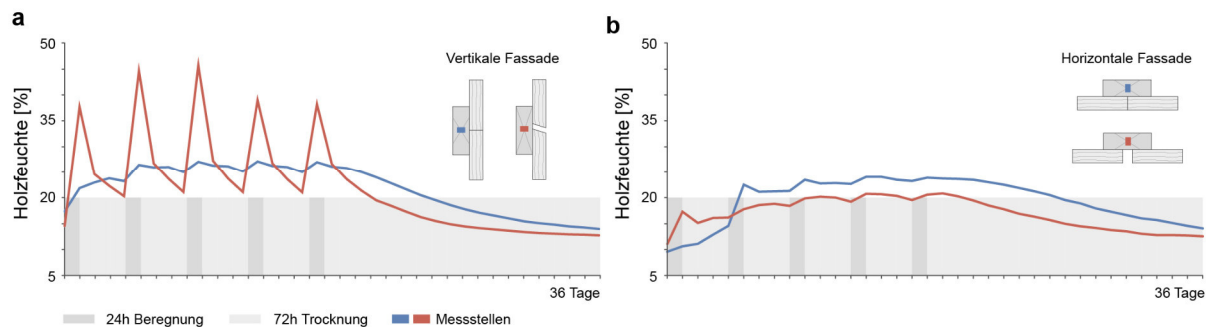


Abbildung 9: Holzfeuchteverlauf im Bewitterungsversuch in der Traglatte bei Ausführung von stumpfen, hinterlegten und offenen, hinterlegten Stößen bei einer geschlossenen Fassade. (a) Vertikale Fassade mit horizontalen Traglatten (b) Horizontale Fassade mit vertikalen Traglatten

1.5 Unbeschichtete verzinkte Bleche oder Zinkbleche bei Holzfassaden vermeiden

1.5.1 Fragestellung

Können Zinkbleche oder unbeschichtete verzinkte Bleche beispielsweise als Geschoßtrennblech, Brandschutzabschottung oder Fensterbank an Holzfassaden eingesetzt werden?

1.5.2 Antwort

Unbeschichtete verzinkte Bleche sind aufgrund ihres Korrosionspotentials für Holzfassaden aus extraktstoffreichen Holzarten nicht geeignet, wenn über das Holz ablaufendes Wasser in Kontakt mit dem Blech kommen kann. Aus ökologischen Gründen wird generell von unbeschichteten verzinkten Blechen oder Zinkblechen abgeraten, da Zink freigesetzt wird.

1.5.3 Begründung

In der Praxis kommt es an Verblechungen innerhalb von Fassadenelementen, so wie sie z.B. im Zusammenhang mit Brandschutzabschottungen ausgeführt werden, fallweise zu Korrosionserscheinungen. In umfangreichen Freiland- und eigens dafür entwickelten beschleunigten Laborversuchen wurde erforscht, bei welchen konkreten Holz-/Metallkombinationen es zu Korrosionseffekten am Metall kommen kann. Hierzu wurde sowohl das Beregnungswasser hinsichtlich der Freisetzung spezifischer Metallionen analysiert als auch

eine kontinuierliche Inspektion von Veränderungen den Metalloberflächen vorgenommen (siehe Abbildung 10).

Die Untersuchungen zeigten, dass Kombinationen aus extraktstoffreichen Hölzern (wie beispielsweise Lärche oder Eiche) und unbeschichteten, verzinkten Blechen zum Auftreten von Korrosion führen können (Abbildung 10b). Durch die entwickelte Schnellmethode konnte darüber hinaus das Korrosionsverhalten spezifischer Materialkombinationen erfolgreich prognostiziert werden (Abbildung 10c). Auf Basis der Untersuchungen wird empfohlen, unbeschichtete, verzinkte Bleche oder Zinkbleche an Holzfassaden zu vermeiden.

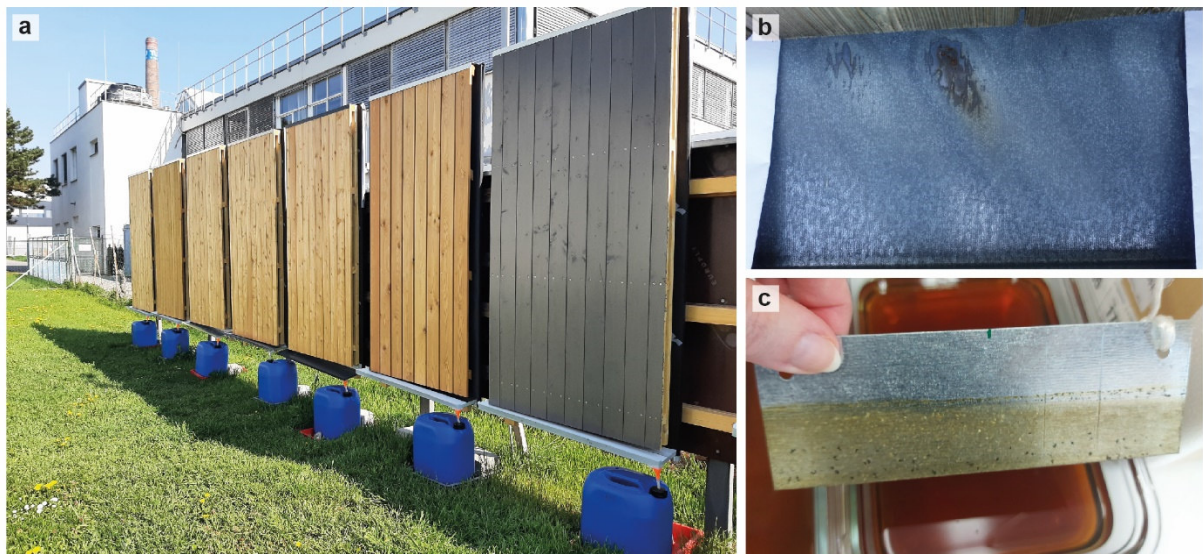


Abbildung 10: (a) Freilandversuch (b-c) Korrosion an einem unbeschichteten, verzinkten Blech in Kombination mit Lärche, (b) nach 15 Monaten in der Freilandbewitterung und (c) nach 28 Tagen im Schnellbewitterungslaborversuch

2 Maßnahmen zur Verbesserung des Schallschutzes

Werden hinterlüftete Fassaden hinsichtlich ihrer Feuchteresistenz oder ihres sommerlichen Wärmeschutzes modifiziert, darf sich daraus kein Nachteil für den Schallschutz der Außenwände ergeben. Um dies sicherzustellen und ein mögliches bauakustisches Verbesserungspotential von hinterlüfteten Fassaden zu eruieren, wurden im Forschungsprojekt umfassende Schallmessungen im Akustik Center Austria durchgeführt. Abbildung 11 zeigt eine Innenansicht des Akustik Center Austria, welches von der Holzforschung Austria in Kooperation mit dem Technologischen Gewerbemuseum (tgm) betrieben wird. Untersucht wurden Grundwände in Holzrahmen- und Holzmassivbauweise mit geschlossenen und offenen Holzfassadensysteme in verschiedenen Variationen.



Abbildung 11: Innenansicht des Akustik Center Austria in welchem die Fassadensysteme auf ihr bauakustisches Verhalten hin untersucht wurden (© ACR/schewig-fotodesign).

Zur einfachen Beschreibung der Luftschalldämmung eines Bauteils hat sich in den D-A-CH-Ländern die Verwendung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w etabliert. Es hat sich jedoch gezeigt, dass zwischen dem subjektiven Empfinden der Schalldämmung und der objektiven Beurteilung eines Bauteils durch den reinen R_w -Wert häufig eine schlechte Korrelation besteht. Um diese Situation zu verbessern, können normativ definierte Spektrum-Anpassungswerte mitberücksichtigt werden. Dadurch werden Frequenzspektren bestimmter Geräusche, wie z. B. der tieffrequente Anteil von Straßenverkehr, besser bei der objektiven Beschreibung der Schalldämmung eines Bauteils berücksichtigt. Gemäß Hörversuchen in Finnland (Hongisto et al. 2018), sollten zur korrekten Beschreibung der subjektiven Wahrnehmung der Schalldämmung einer Außenwand je nach Verkehrsart entweder der $R_w + C_{tr,50-5000}$ -Wert („tr“ für traffic, Hauptlärm durch schwere, langsame Fahrzeuge) oder der $R_w + C_{50-5000}$ -Wert (Lärm durch allgemeinen Straßenverkehr) verwendet werden. Dass die angeführten Spektrum-Anpassungswerte auch wirklich das subjektive Empfinden bauweisenneutral widerspiegeln, wird in der wissenschaftlichen Welt allerdings noch kontrovers diskutiert (Chmelík et al. 2020;

Scrosati et al. 2019). Um dennoch eine erste Orientierung zur subjektiv empfundenen Schalldämmung der untersuchten Außenwände zu bekommen, werden im Weiteren neben den R_w -Werten auch die $R_w + C_{50-5000}$ - und $R_w + C_{tr,50-5000}$ -Werte der Wände mit aufgelistet.

Da der Fokus des Forschungsprojekts auf den Fassadensystemen lag, wurden auf der Innenseite der verwendeten Grundwände keine weiteren Schichten wie Gipsplattenbeplankungen, Installationsebenen oder Vorsatzschalen aufgebracht. Die Schalldämm-Maße der untersuchten Wandvarianten werden beim Anbringen weiterer innenseitiger Schichten – vor allem bei den Holzrahmenwänden – somit höher ausfallen als nachfolgend gezeigt. In (Nusser et al. 2020) und (Ferk et al. 2020) kann nachgelesen werden, wie sich zusätzliche Schichten bei Außenwänden in Holzbauweise bauakustisch auswirken.

Im Folgenden werden die wesentlichsten, baupraktisch relevanten Forschungsergebnisse zum Schallschutz mit Holzfassaden aufgeführt.

2.1 Geschlossene hinterlüftete Fassaden meist günstiger

2.1.1 Fragestellung

Macht es aus schallschutztechnischer Sicht einen Unterschied ob ich eine offene oder eine geschlossene Holzfassade ausführe?

2.1.2 Antwort

Ja, bei einer Holzrahmenwand kann mit einer geschlossenen Fassade ein bis zu 4 dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß erreicht werden als mit einer offenen Fassade.

2.1.3 Begründung

Anhand von Abbildung 12 wird der Einfluss der Fassadenart auf die Schalldämmung einer Holzrahmen- bzw. einer Holzmassivwand ersichtlich. Wie sich zeigt, führt eine geschlossene Fassade im Frequenzbereich > 500 Hz bei beiden Wänden zu höheren Schalldämm-Maßen als eine offene Fassade. Dabei sind die Unterschiede bei der Holzrahmenwand deutlich stärker ausgeprägt als bei der Brettsperrholzwand (BSP). Im Frequenzbereich unter 500 Hz werden mit der offenen Fassade in einigen Terzen hingegen bessere Schalldämm-Maße erreicht als mit der geschlossenen Fassade. Der Grund hierfür dürfte in den unterschiedlichen Eigenfrequenzen der Fassaden liegen, worauf Schwingungsmessungen mittels Laser-Doppler-Vibrometer hindeuten.

Wie die Legende der linken Grafik in Abbildung 12 zeigt, wurde mit der offenen Fassade auf einer Holzrahmenwand ein R_w -Wert von lediglich 38 dB erreicht. Um damit beispielsweise die österreichische Mindestanforderung von $R_w = 43$ dB zu erreichen sind innenseitig jedenfalls Zusatzmaßnahmen notwendig (z. B. eine 60 mm Lattung mit 2 x 12,5 mm GKF oder besser

Federschienen mit 2 x 18 mm GKF, vgl. (Nusser et al. 2023)). Auch bei der geschlossenen Fassade auf der Holzrahmenwand sollte innenseitig zumindest noch eine, besser zwei Lagen GKF aufgebracht werden. Die BSP-Wände schneiden bei beiden Fassadenarten deutlich besser ab, wobei die offene Fassade tieffrequent Vorteile mit sich bringt, was auch die $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ Werte in der Legende der rechten Grafik verdeutlichen. Anzumerken ist hierbei, dass bei den BSP-Wänden auf der Dämmebene lediglich eine Fassadenbahn aufgebracht war. Wird auf der Dämmebene eine MDF oder ein anderer Plattenwerkstoff aufgebracht, ändert sich auch das bauakustische Verhalten der Wand. Die Daten der BSP-Wände sind somit nicht 1:1 auf Varianten mit Plattenwerkstoffen im Hinterlüftungsspalt übertragbar.

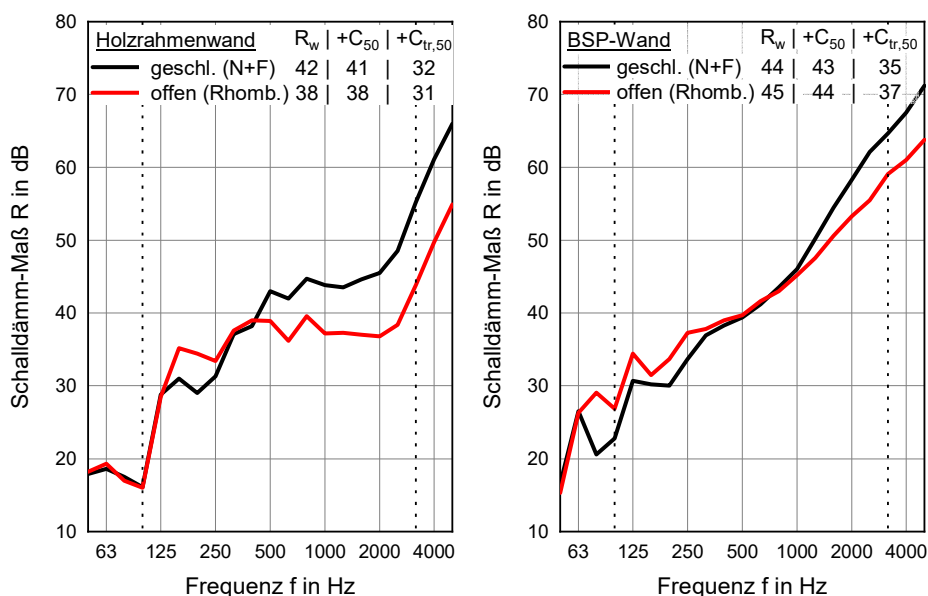


Abbildung 12: Einfluss der Fassadenart, geschl. (N+F): geschlossene Fassade mit Nut+Feder-Brettern; offen (Rhomb.): offene Fassade mit Rhombusleisten Links: Holzrahmenwand, Rechts: BSP-Wand; Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in den Legenden

2.2 Bei Kreuzlattung die Traglattung nicht durchschrauben

2.2.1 Fragestellung

Macht es aus schallschutztechnischer Sicht einen Unterschied ob ich die Traglattung bei einer zweilagigen Unterkonstruktion (Kreuzlattung) bis in die Grundwand verschraube oder nicht?

2.2.2 Antwort

Ja, wird die Traglattung nur in die Konterlattung und nicht bis in die Grundwand geschraubt, sind Verbesserungen im bewerten Schalldämm-Maß von bis zu 2 dB möglich. Die Traglattung sollte dabei möglichst zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung angeordnet werden. Achtung: aus statischen Gründen ist ggf. eine dickere Konterlattung notwendig.

2.2.3 Begründung

Um die Fassade bestmöglich von der Grundwand zu entkoppeln, ist es wichtig, dass die Traglattung nur mit der Konterlattung verschraubt wird und nicht mit der Grundwand. Ansonsten erhöht sich die Anzahl der Schallbrücken zur Grundwand deutlich. Abbildung 13 zeigt, wie solche zusätzlichen Schallbrücken die Schalldämmung der Wand zwischen 250 Hz und 2000 Hz deutlich verschlechtern.

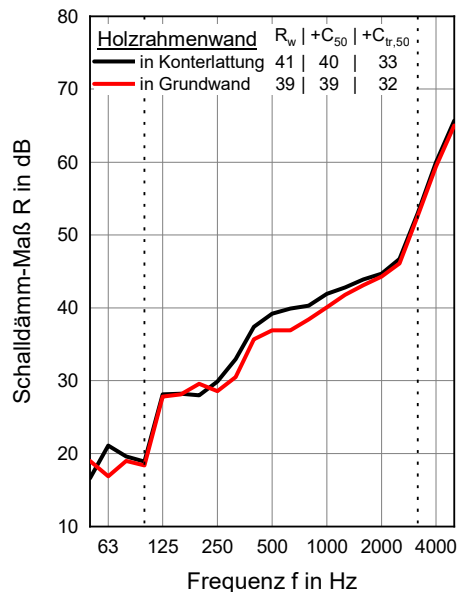


Abbildung 13: Einfluss der Verschraubungstiefe der horizontalen Traglattung (Traglattung zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung) bei geschlossener vertikaler Fassade

Um die Entkoppelung der Fassade bestmöglich umzusetzen sollte die Traglattung zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung angebracht werden, so erhöht sich die Schalldämmung der Außenwand im mittleren Frequenzbereich um bis zu 4 dB.

Wichtig: Kann nicht sichergestellt werden, dass die Traglattung lediglich in der Konterlattung verankert wird (und diese Verschraubung statisch ausreicht → ggf. dickere Konterlattung wählen), sollte die Traglattung direkt neben den Verschraubungspunkten der Konterlattung platziert werden. Aus bauakustischer Sicht gilt generell, je weniger Verschraubungen der Fassade mit der Grundwand desto besser.

2.3 Lattung mit Vollgewindeschrauben am tragenden Wandbildner befestigen

2.3.1 Fragestellung

Macht es aus schallschutztechnischer Sicht einen Unterschied, mit welcher Schraubenart ich die Lattung an der Grundwand befestige?

2.3.2 Antwort

Ja, Vollgewindeschrauben bewirken einen geringeren Anpressdruck und damit eine geringere Schallbrücke, Verbesserungen im bewerteten Schalldämm-Maß von bis zu 1 dB sind möglich.

2.3.3 Begründung

Wird die Unterkonstruktion der Fassade stark an die Grundwand gepresst, so führt dies zu einer deutlichen Körperschallübertragung im mittel- und hochfrequenten Bereich und somit zu einer reduzierten Schalldämmung der Wand. Durch die Verwendung von Vollgewindeschrauben anstelle von Teilgewindeschrauben wird ein zu hoher Anpressdruck an die Grundwand verhindert, was der Schalldämmung zugutekommt. Vor allem bei der offenen horizontalen Fassade mit direkt auf der Grundwand verschraubter Traglattung haben sich hier Vorteile gezeigt, wie Abbildung 14 am Beispiel der BSP-Wand verdeutlicht. Bei einer geschlossenen vertikalen Fassade mit besser entkoppelter Kreuzlattung war der Einfluss der Verschraubung geringer ausgeprägt.

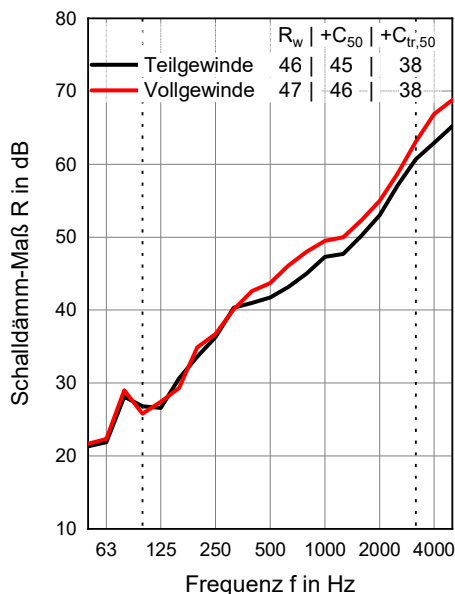


Abbildung 14: Einfluss der Verschraubung der Traglattung bei einer offenen horizontalen Fassade auf der BSP-Wand, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in der Legende

2.4 Kreuzlattung kann Vor- und Nachteile bringen

2.4.1 Fragestellung

Macht es aus schallschutztechnischer Sicht einen Unterschied ob ich eine einteilige oder zweiteilige Unterkonstruktion (d.h. Kreuzlattung) ausführe?

2.4.2 Antwort

Ja, durch eine Kreuzlattung kann im mittleren und hohen Frequenzbereich eine höhere Schalldämmung erreicht werden, im tieferen Frequenzbereich können jedoch auch Nachteile entstehen.

2.4.3 Begründung

Die Orientierung der Fassadenschalung bestimmt im Allgemeinen, ob die Unterkonstruktion aus einer einfachen (nur Traglattung) oder einer doppelten Lattungsebene (Kreuzlattung) besteht. Eine Kreuzlattung hat dabei – ähnlich zum oben gezeigten Einfluss der Schraubenart – den bauakustischen Vorteil, dass die Kopplung zwischen der Fassadenschalung und der Grundwand verringert wird. Abbildung 15 zeigt, wie sich die Schalldämmung ändert, wenn eine geschlossene Fassade mit einer Kreuzlattung anstelle einer einfachen – auf die Steher geschraubten – Traglattung ausgeführt wird. Sowohl bei der Holzrahmen- wie auch bei der BSP-Wand zeigen sich durch die verbesserte Entkoppelung mit der Kreuzlattung höhere Schalldämm-Maße im mittel- und höherfrequenten Bereich. Während bei der BSP-Wand eine Kreuzlattung auch im tieferen Frequenzbereich meist zu höheren Schalldämm-Maßen führt, zeigen sich bei der Holzrahmenwand mit einer Kreuzlattung geringere Schalldämm-Maße im tiefen Frequenzbereich. Der Grund hierfür kann noch nicht eindeutig benannt werden. Diesbezüglich besteht jedenfalls noch Forschungsbedarf.

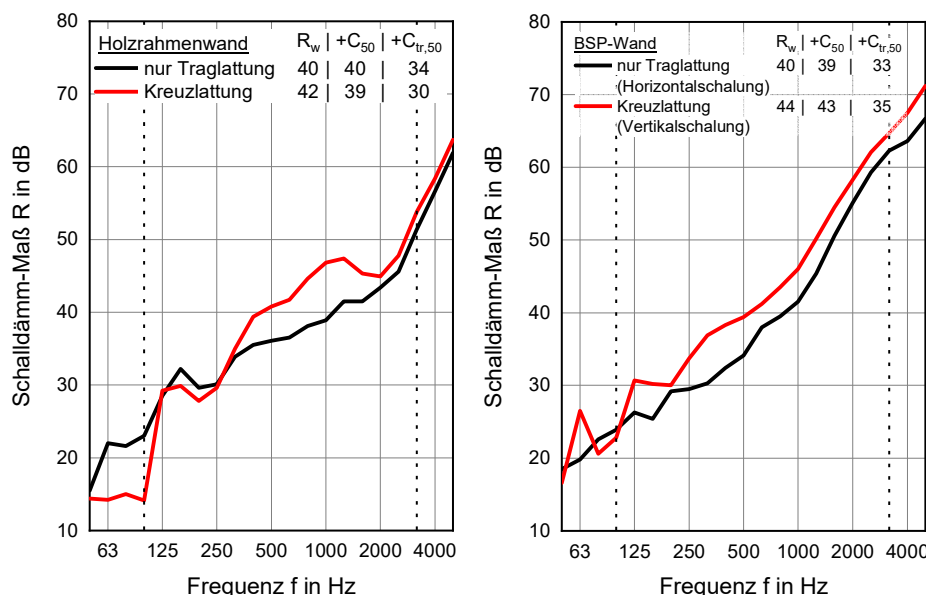


Abbildung 15: Einfluss der Variation der Unterkonstruktion bei geschlossener Fassade, links: Holzrahmenwand mit Horizontalschalung, rechts: BSP-Wand mit Horizontal- bzw. Vertikalschalung, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in den Legenden

2.5 Teildämmung des Hinterlüftungsspalts verbessert die Schalldämmung

2.5.1 Fragestellung

Wie kann die Schalldämmung von hinterlüfteten Fassaden verbessert werden?

2.5.2 Antwort

Durch eine Teildämmung der Lattungsebene mit faserigem Dämmstoff kann die Schalldämmung (und die sommerliche Wärmedämmung) der Wand erhöht werden.

2.5.3 Begründung

Eine Methode, welche sowohl akustisch wie auch thermisch (siehe Abschnitt 3) zu einer Verbesserung der Fassaden führt, ist die Teildämmung der Trag- bzw. Konterlattungsebene. Im Forschungsprojekt wurde hierfür Mineralwolle so zwischen den Latten der Unterkonstruktion eingebracht, dass ein freier Lüftungsspalt von 30 mm Höhe erhalten blieb. Abbildung 16 zeigt eine schematische Darstellung der mit Mineralwolle teilgedämmten Konterlattungsebene.

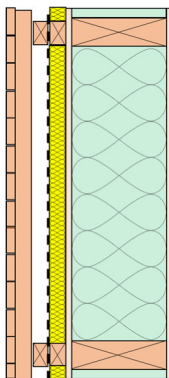


Abbildung 16: Darstellung der teilgedämmten Konterlattungsebene mit zweiteiliger Konterlattung und durchgehender Fassadenbahn

Sowohl bei einer offenen als auch einer geschlossenen Fassade wurde durch die Teildämmung der Lattungsebene die Schalldämmung erhöht. Dabei war die Verbesserung bei der offenen Fassade deutlicher ausgeprägt als bei der geschlossenen Fassade. Abbildung 17 zeigt die Schalldämm-Maße der beiden Fassadenvarianten auf einer Holzrahmenwand, zum einen mit ungedämmter 60 mm tiefer Trag- bzw. Konterlattungsebene und zum anderen mit 30 mm dicker Mineralwolle zwischen den Trag- bzw. Konterlattungen. Wie zu erkennen ist, führt die Dämmung in der Unterkonstruktion bei der offenen Fassade im Frequenzbereich ≥ 500 Hz zu einem deutlichen Anstieg der Schalldämmung. Das zeigt sich ebenfalls in der Zunahme

des R_w -Wertes um 4 dB. Bei der geschlossenen Fassade ist die Zunahme der Schalldämmung weniger deutlich, wobei hier eine Verbesserung bereits ab 125 Hz festzustellen ist.

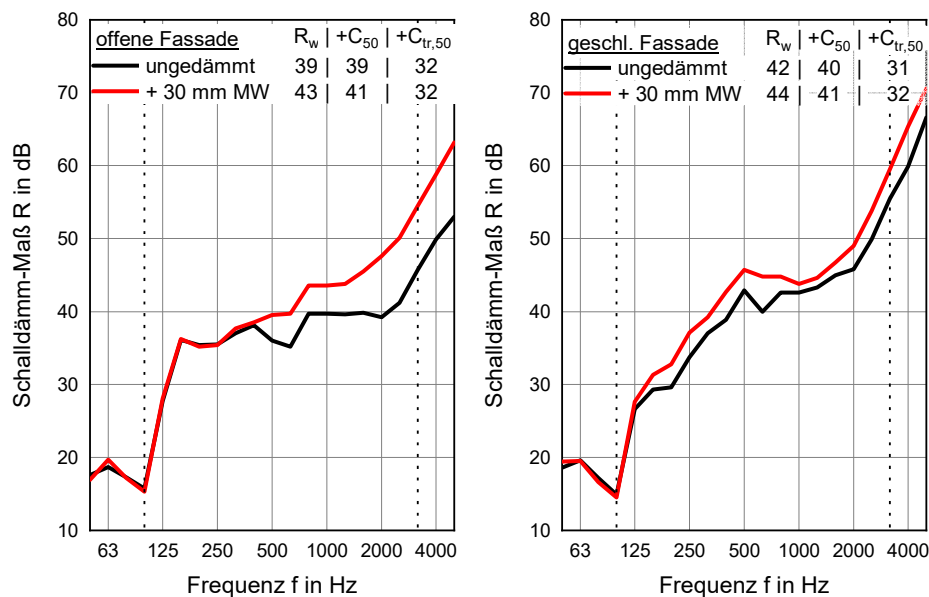


Abbildung 17: Einfluss einer 30 mm dicken Mineralwolle (MW) zwischen den 60 mm tiefen Trag- bzw. Konterlatten (offene horizontale bzw. geschlossene vertikale Fassade) jeweils auf einer Holzrahmenwand, Einzahlkennwerte R_w , $R_w + C_{50-5000}$ und $R_w + C_{tr,50-5000}$ in dB in den Legenden

Soll eine teilgedämmte Lattungsebene umgesetzt werden, so ist eine Fassadenbahn auf dem faserigen Dämmstoff anzuordnen. Hier kann es sinnvoll sein, die Lattung über die Dicke zweiteilig auszuführen und so eine vollflächige Verlegung der Fassadenbahn auf der Teildämmung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 16). Es ist jedenfalls darauf zu achten, dass ein ausreichender Hinterlüftungsspalt frei bleibt.

3 Maßnahmen zur Reduktion der sommerlichen Überwärmung in Innenräumen

Der vorhandene Klimawandel macht Änderungen in der derzeitigen Bauweise notwendig, da der Heizwärmebedarf im Winter zurückgeht und der Kältebedarf durch die steigenden sommerlichen Temperaturen zunimmt. Neben dem Wärmeeintrag über die Fenster kann auch der Wärmestrom durch die opaken Bauteile zum sommerlichen Raumklima beitragen. Daher wurde im Projekt der Einfluss verschiedener Fassadenausbildungen auf das thermische Verhalten einer Außenwand untersucht.

Insgesamt wurden 24 verschiedene Holzfassadenvarianten sowie zwei Putzreferenzfassaden an der Süd- und Westfassade des Forschungshauses der Holzforschung Austria in einem Realversuch untersucht. Die Abbildung rechts zeigt die verschiedenen Versuchsaufbauten am Forschungshaus.



Abbildung 18: Versuchsaufbauten am Forschungshaus der Holzforschung Austria

Gemessen wurden je nach Beschaffenheit u.a. die Temperaturen verschiedener Materialoberflächen – abhängig von der Lage der Schicht sowie des Wandaufbaus – und mittels Kombifühlern sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte im Hinterlüftungsspalt und im Gefach an der Außenbeplankung. Zusätzlich wurde in ausgewählten Varianten der Wärmestrom aufgezeichnet. Um die Effektivität der Varianten bestimmen zu können wurde darüber hinaus die Innentemperatur gemessen. Über eine Wetterstation wurden zusätzlich Außentemperatur, Globalstrahlung, Regenmenge und -intensität sowie Windrichtung und -geschwindigkeit erfasst.

Mit Hilfe eines validierten Simulationsmodells wurde neben den messtechnischen Untersuchungen zusätzlich eine umfassende Parameterstudien zum thermischen Verhalten der verschiedenen Fassadenvarianten durchgeführt. Dabei wurden jeweils die Wärmestrombilanzen im Zeitraum zwischen 01. Juli 2022 bis 31. August 2022 täglich von 06:00 Uhr bis 23:00 Uhr ausgewertet. Im Zeitraum zwischen 23:00 Uhr und 06:00 Uhr wurde eine Kühlung durch nächtliche Lüftung angenommen. Die dabei auftretenden Wärmeströme durch die opaken Bauteile wurden wegen ihres geringen Einflusses nicht in der Bilanz betrachtet.

3.1 Geschlossene Fassaden mit einer Hinterlüftung, nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausführen

3.1.1 Fragestellung

Warum sollte eine geschlossene Fassade mit einer Hinterlüftung und nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausgeführt werden?

3.1.2 Antwort

Durch eine hinterlüftete Fassadenausführung ist ein guter Wärmeabtransport aus der Hinterlüftungsebene gewährleistet, wodurch sich die Wärmeeinträge durch die opaken Bauteile in das Gebäude im Vergleich zur belüfteten Fassade oder Fassaden mit stehender Luftschicht um bis zu 36 % reduzieren.

3.1.3 Begründung

Der natürliche Luftaustausch im Hinterlüftungsspalt der Fassade (Windwirkung, thermischer Auftrieb) kann einen Teil der solar eingebrachten Wärme abführen. Abbildung 19 zeigt dieses Prinzip: die solare Einstrahlung trifft auf den Fassadenschirm und erwärmt diesen. Die absorbierte Wärmeenergie wird in der dahinterliegenden Hinterlüftungsebene über Luftströmung teils abgeführt. Im Gegensatz dazu fällt die solare Einstrahlung bei einer Putzfassade direkt auf den Wandbildner und die absorbierte Wärmeenergie wandert in das Bauteil.

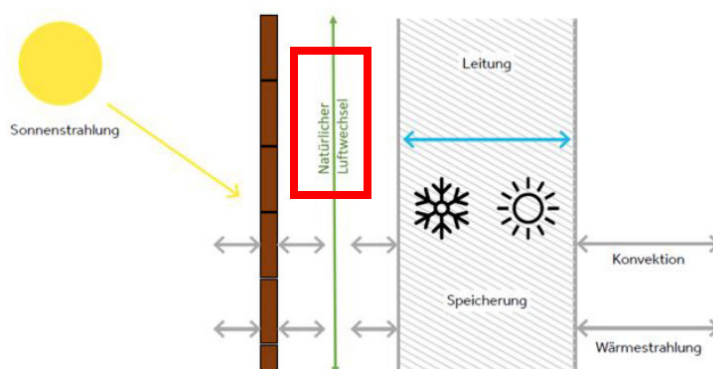


Abbildung 19: Abbildung der für die Wärmeübertragung von außen nach innen maßgeblichen Effekte [abgeleitet nach (Treberspurg et al. 2018)]

Dieser Effekt konnte auch in Realversuchen festgestellt werden. In Abbildung 20 sind die Messergebnisse von unterschiedlich ausgebildeten Fassaden dargestellt, die bei gleichen

Randbedingungen getestet wurden. Die gepunktete Fläche (links) zeigt den Wärmestrom durch eine weiße Fassade mit EPS-WDVS, die schraffierte Fläche (rechts) zeigt den Wärmestrom durch eine weiß beschichtete hinterlüftete Holzfassade. Der restliche Wandaufbau war ident. Der große Unterschied ist auf den veränderten Wärmestrom durch die Hinterlüftungsebene zurückzuführen.

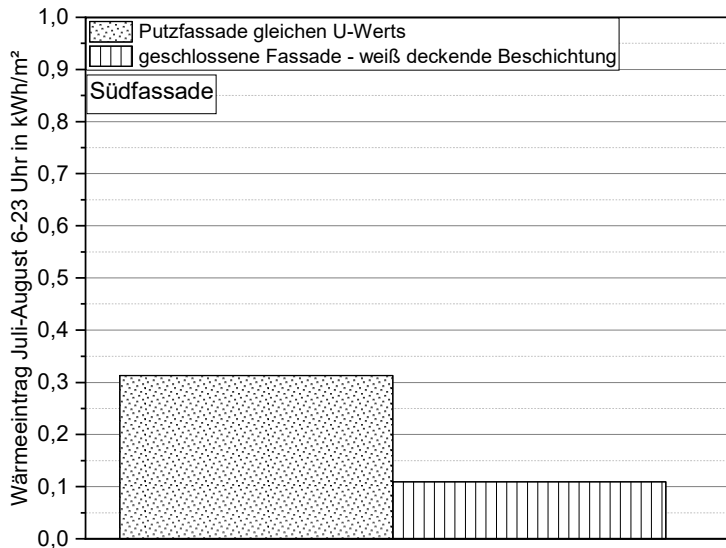


Abbildung 20: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der weiß beschichteten hinterlüfteten Variante der geschlossenen Fassade auf der Südfassade mit einer weißen Putzfassade mit gleichem U-Wert.

Zudem wurde deutlich, dass sowohl eine stehende Luftschicht als auch eine belüftete Fassade (mit Zuluftöffnungen unten, keine Abluftöffnungen oben) zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt als eine hinterlüftete Fassade (Abbildung 21 links). Dies zeigt sich auch sehr deutlich in den resultierenden Wärmeströmen in den Wandbildner (Abbildung 21 rechts). Neben der höheren feuchteschutztechnischen Robustheit sollte somit auch aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes wenn möglich eine hinterlüftete Fassade ausgeführt werden.

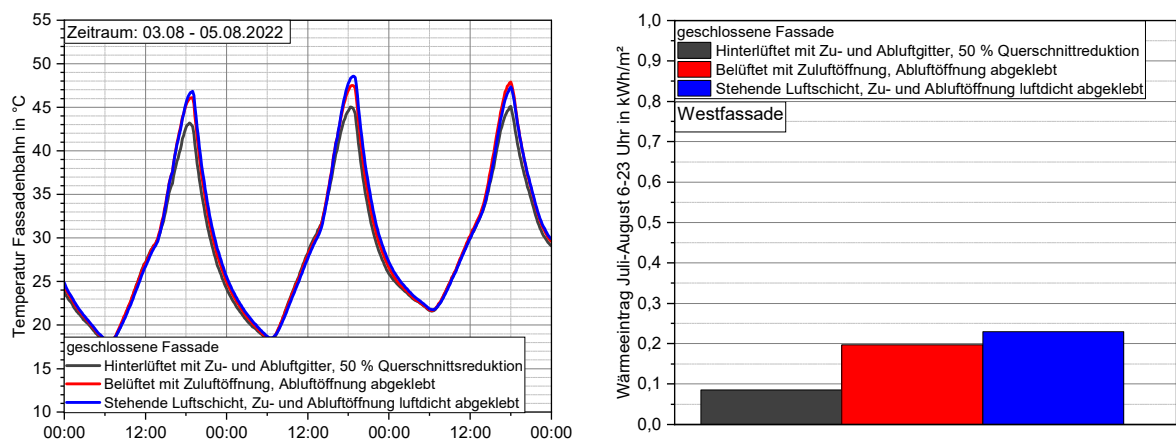


Abbildung 21: links: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten einer geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschiedenen ausgeführten Be- und Entlüftungsöffnungen an 3 exemplarischen Tagen im Sommer; rechts: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr bei den betrachteten Varianten.

3.2 Hinterlüftungsspalt von mindestens 3 cm an der engsten Stelle einplanen

3.2.1 Fragestellung

Ist es unerheblich mit welcher Breite der Hinterlüftungsspalt ausgeführt wird?

3.2.2 Antwort

Der Hinterlüftungsspalt sollte 3 cm Breite nicht unterschreiten. Eine Reduktion führt zu deutlich erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn, da die Wärme nicht mehr so effizient über Luftströmung abgeführt werden kann.

3.2.3 Begründung

Wie oben beschrieben reduziert eine Hinterlüftungsebene den Wärmestrom in einen Wandbildner erheblich. Daraus ergibt sich die Frage, wie die Breite des Spalts den Wärmestrom beeinflusst. Aus diesem Grund wurden verschiedene Spaltausführungen auf demselben Fassadenaufbau untersucht. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse dieser Messung. Auf der linken Seite sind die Temperaturen der Fassadenbahn an drei exemplarischen Sommertagen abgebildet. Es zeigt sich, dass ein sehr dünner Hinterlüftungsspalt von 1 cm zu deutlich höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt als die Variante mit einer 3 cm dicken Konterlattung. Eine weitere Erhöhung auf 6 cm erreicht nur leicht geringere Temperaturen. Eine weitere Verdopplung der Konterlattungsdicke auf 12 cm zeigt quasi keinen nennenswerten Effekt mehr.

Die Ermittlung der Wärmeströme dieser Varianten zwischen dem 1. Juli und dem 31. August zwischen 6 und 23 Uhr bestätigen die Beobachtung: Eine Erhöhung der Spaltbreite von 3 cm auf 6 cm respektive 12 cm führt nur zu geringen Reduktionen der Wärmeströme. Eine Erhöhung von 1 cm Spaltbreite auf 3 cm reduziert den Wärmestrom dagegen deutlich. Ein Hinterlüftungsspalt mit 3 cm scheint demnach ein guter Kompromiss zwischen Platzbedarf und sommerlicher Wärmeabfuhr zu sein.

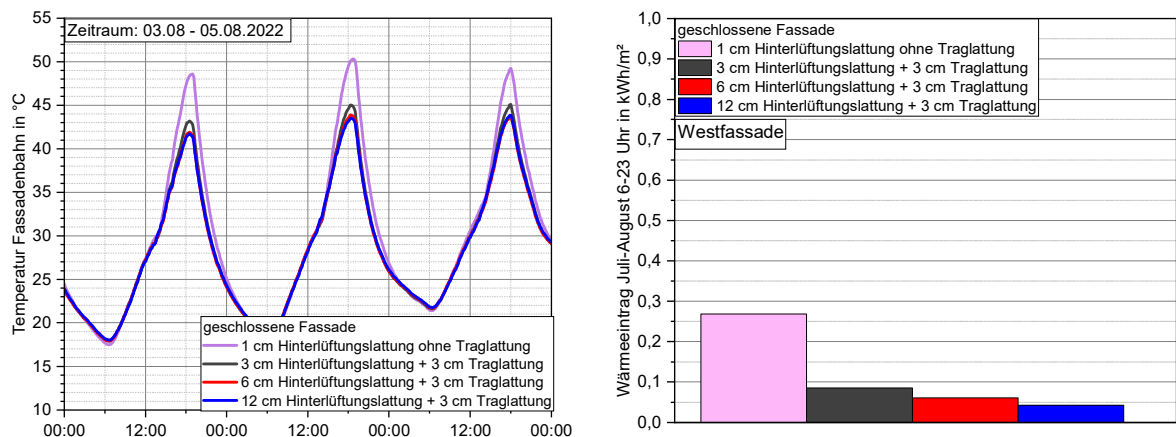


Abbildung 22: links: Temperaturentwicklung bei den konstruktiven Varianten einer geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschiedenen ausgeführten Hinterlüftungsquerschnitten an 3 exemplarischen Tagen im Sommer; rechts: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr bei den betrachteten Varianten.

3.3 Zu- und Abluftöffnungen mit einem freien Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm sicherstellen

3.3.1 Fragestellung

Beeinflusst der Lochanteil eines Insektenschutzgitters die Wärmeabfuhr im Hinterlüftungsspalt?

3.3.2 Antwort

Ja, der Lochanteil beeinflusst die Wärmeabfuhr deutlich. Um die Wärmeabfuhr im Hinterlüftungsspalt nicht durch ein Insektenschutzgitter zu stark zu reduzieren, sollte der Lochanteil 50 % nicht unterschreiten. Ein frei bleibender Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm ist sicherzustellen.

3.3.3 Begründung

Eine hinterlüftete Fassade besitzt einen oben und unten geöffneten Hinterlüftungsspalt. Dessen Effektivität bezüglich Wärme- und Feuchteschutz wird vor allem von der Zirkulationsfähigkeit der Luft darin bestimmt. Lediglich die Festlegung der Spaltbreite ist daher nicht ausreichend, um eine hinreichende Zirkulation sicherzustellen. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Lüftungsgitter mit einem geringen Lochanteil von 10 % an den Zu- und Abluftöffnungen zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt. Zudem wurde bereits verdeutlicht, dass sowohl eine belüftete Fassade (obere Öffnung verschlossen) als auch eine stehende Luftschicht (beide Öffnungen verschlossen) zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt als eine hinterlüftete Fassade (Abbildung 21).

Die Analyse der Wärmeströme zwischen dem 1. Juli und dem 31. August zwischen 6 und 23 Uhr (Abbildung 23 rechts) bestätigen den Trend: eine zunehmende Reduktion der Luftbewegung im Hinterlüftungsspalt führt zu erhöhten Wärmeströmen. Um einen ausreichenden Schutz vor Insekten und Kleintieren als auch einen effektiven Schutz vor sommerlicher Überwärmung zu erreichen, sollte ein Lochanteil von 50 % des Lüftungsgitters nicht unterschritten werden.

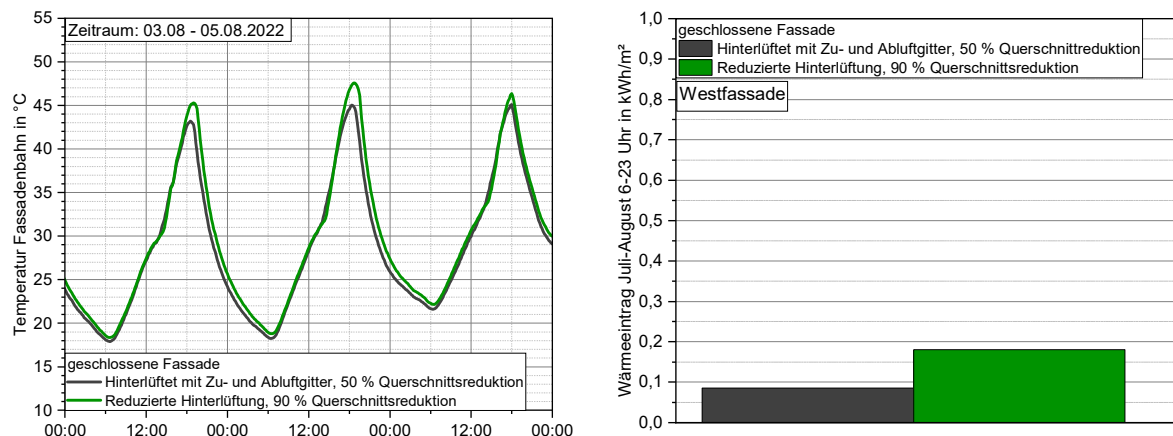


Abbildung 23: links: Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten einer geschlossenen Fassade auf der Westfassade mit verschiedenen ausgeführten Be- und Entlüftungsöffnungen an 3 exemplarischen Tagen im Sommer; rechts: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr bei den betrachteten Varianten.

3.4 Helle Beschichtungen erwärmen die Fassaden weniger

3.4.1 Fragestellung

Hat die Farbgestaltung der Fassade eine Auswirkung auf den sommerliche Wärmeeintrag?

3.4.2 Antwort

Ja, die Farbgestaltung der Fassade kann einen wesentlichen Einfluss auf den sommerlichen Wärmeeintrag haben. Helle Beschichtungen weisen eine niedrigere solare Absorption als dunkle Farben auf, erhitzen sich dadurch weniger und reduzieren somit die sommerlichen Wärmeströme in den Innenraum je nach Wandaufbau mehr oder weniger deutlich.

3.4.3 Begründung

Abbildung 24 zeigt den Temperaturverlauf verschiedener Fassadenfarben bei offenen (links) sowie geschlossenen Fassaden (rechts) an drei exemplarischen Tagen im Sommer. Bei beiden Fassadenausführungen ist ersichtlich, dass eine schwarze Fassadenfarbe im Vergleich zur weißen Farbe oder einer unbehandelten Oberfläche zu erhöhten Temperaturen an der Fassadenbahn führt. Bei einer geschlossenen Fassade ist dieser Effekt aufgrund des geringeren Luftaustauschs deutlich stärker ausgeprägt als bei einer offenen Fassade.

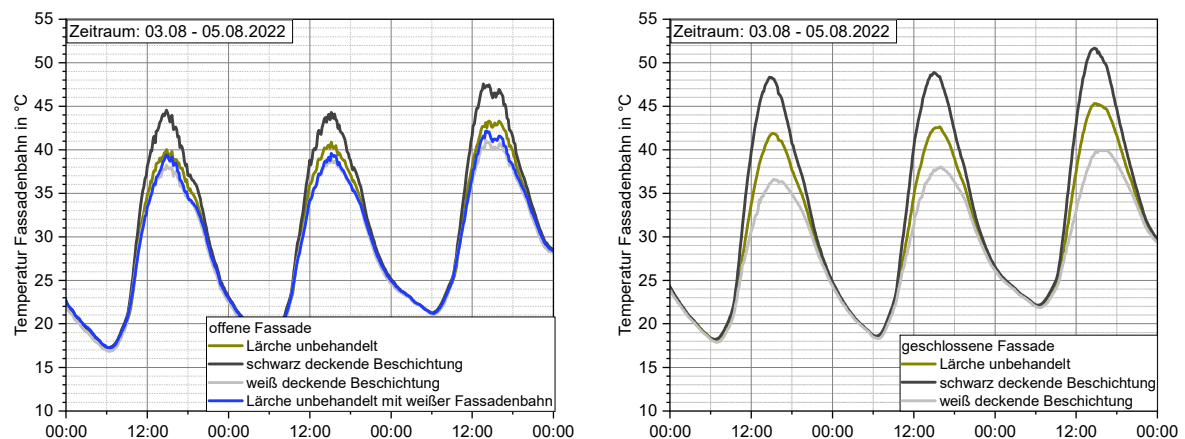


Abbildung 24: links: Vergleich Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten einer offenen Fassade (links) und geschlossenen Fassade (rechts) mit unterschiedlicher Farbgebung.

Die in Abbildung 25 dargestellten Wärmeströme der entsprechenden Varianten zwischen dem 1. Juli und dem 31. August zwischen 6 Uhr und 23 Uhr zeigen die gleichen Ergebnisse: eine schwarze Fassade führt zu deutlich erhöhten Wärmeströmen, bei einer geschlossenen Fassade deutlich stärker als bei einer offenen Fassade.

Vergleicht man in Abbildung 25 beide Fassadenarten mit weißer Beschichtung miteinander, wird deutlich, dass bei einer geschlossenen Fassade geringere Temperaturen auf der Fassadenbahn erreicht werden als bei einer offenen, horizontalen Fassade. Dies resultiert aus der solaren Diffusstrahlung, welche bei einer offenen Fassade auf die Fassadenbahn trifft. Im Vergleich zu anderen untersuchten Farben, hat eine helle Fassadenfarbe stets einen positiven Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz.

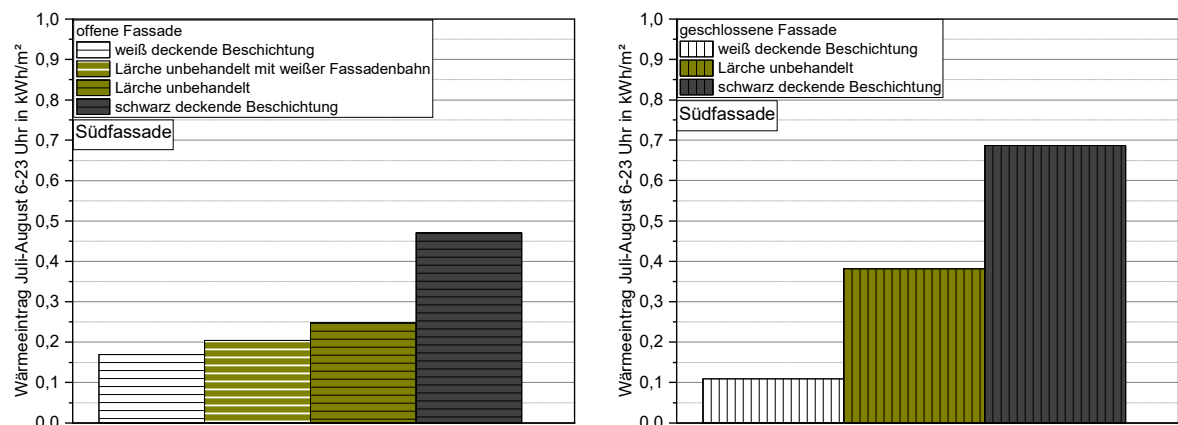


Abbildung 25: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der offenen (links) und geschlossenen (rechts) Fassaden auf der Südfassade mit unterschiedlicher Oberflächenfarbe bzw. Farbgebung der Fassadenbahn.

3.5 Unbehandeltes vergrautes Holz erwärmt sich ähnlich stark wie eine dunkel beschichtete Oberfläche

3.5.1 Fragestellung

Ändert sich der Wärmeeintrag durch das Vergrauen der unbeschichteten Holzfassade?

3.5.2 Antwort

Ja, das ist möglich, da sich die Erwärmung der Fassade bei Sonneneinstrahlung mit zunehmender Vergrauung der Holzoberfläche erhöht. Unbehandelte Fassaden vergrauen (verdunkeln) innerhalb weniger Jahre, sodass sie eine höhere solare Absorptionszahl aufweisen und sich somit bei Sonneneinstrahlung stärker erwärmen. Günstiger verhält sich bei unbehandeltem Holz deshalb eine offene Fassade, wodurch ein effizienterer Wärmeabtransport ermöglicht wird.

3.5.3 Begründung

Es ist bekannt, dass unbehandeltes Holz innerhalb weniger Jahre bei freier Bewitterung vergrauen kann. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob bzw. wie stark sich die solare Absorptionszahl der Holzoberfläche durch Bewitterung ändert und wie stark sich diese auf die Wärmeströme in das Bauteil auswirkt. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse einer Untersuchung zur solaren Absorptionszahl a von frischen und gealterten Hölzern. Bei allen untersuchten natürlichen Holzoberflächen ist ein deutlicher Anstieg der solaren Absorption festzustellen. Die Alterung von unbehandeltem Holz führt zu einer solaren Absorptionszahl, die im Bereich einer dunkel beschichteten Oberfläche liegt (Messwert schwarze Fassadenbeschichtung: $a = 0,92$). Daher sollten insbesondere unbehandelte frische als auch dunkle Holzoberflächen wenn möglich als offene Fassade ausgeführt werden, um einen effizienteren Wärmeabtransport zu ermöglichen.

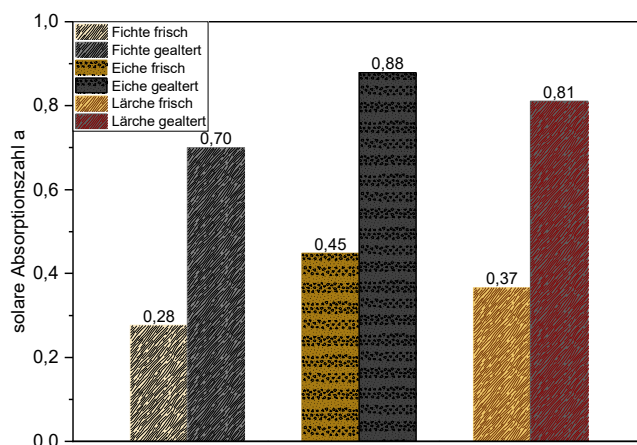


Abbildung 26: solare Absorptionszahl a von frischen und gealterten Hölzern

3.6 Fassadenbahnen sollten selbst bei offenen Fassaden stets beschattet werden

3.6.1 Fragestellung

Hat es einen negativen Effekt wenn bei einer offenen Fassade im Sommer die Sonne direkt auf die Fassadenbahn scheint?

3.6.2 Antwort

Ja, durch kurzzeitige Einstrahlungen von Sonnenlicht kann es bei offenen Fugen zu erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn und somit zu einem erhöhten Wärmeeintrag in die Konstruktion kommen. Daher sollte eine möglichst kontinuierliche Beschattung der Fassadenbahn stattfinden, wie sie beispielsweise bei horizontalen Rhombusprofilen mit Fugenbreiten von 7 – 10 mm möglich ist.

3.6.3 Begründung

Der Einfluss der Spaltbreite zwischen den horizontalen Rhombusleisten bei einer offenen Fassade verdeutlicht Abbildung 27. Die Temperaturspitzen im Tagesverlauf (links) fallen umso höher aus, je größer der Spalt zwischen den Schalungsbrettern ausgeführt wurde. Der Grund dafür ist wiederum die Bilanz der auf die dunkle Fassadenbahn auftreffenden Diffusstrahlung, welche sich mit zunehmender Spaltbreite erhöht. Eine senkrechte Ausführung der Rhombusleisten kann zu deutlich erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn führen: Unter einem bestimmten Sonnenwinkel trifft die Direktstrahlung im Tagesverlauf unmittelbar auf die dunkle Fassadenbahn auf, wodurch diese Temperaturspitzen hervorgerufen werden. Die Wärmeströme (rechts) zeigen, dass dieser Effekt im gewählten Zeitraum von Anfang Juli bis Ende August zu erhöhten Wärmeströmen in den Raum führt.

Wenn möglich sollten daher Rhombusprofile mit nach vorne und unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung und einer Spaltenbreite zwischen den Brettern von ca. 7 mm (bei ca. 10 % Fugenanteil an der Gesamtfläche) umgesetzt werden. Zur Reduktion des sommerlichen Wärmeeintrags ist eine waagerechte Ausführung der offenen Fassaden daher günstiger als eine senkrechte Ausführung.

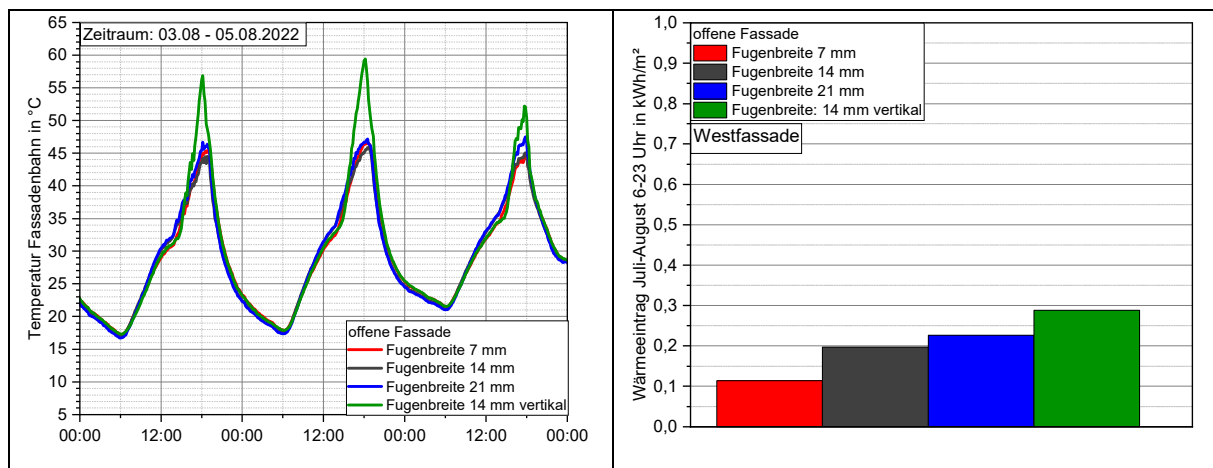


Abbildung 27: links: Oberflächentemperaturen auf der Fassadenbahn bei den konstruktiven Varianten der offenen Fassade auf der Westfassade mit unterschiedlicher Fugenbreite sowie Ausrichtung; rechts: Gesamtwärmeeintrag zwischen dem 01. Juli 2022 und dem 31. August 2022 täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr. Vergleich der konstruktiven Varianten der offenen Fassaden auf der Westfassade mit unterschiedlicher Fugenbreite sowie Ausrichtung.

4 Literaturverzeichnis

- Chmelík, Vojtech; Rychtáriková, Monika; Müllner, Herbert; Jambrošić, Kristian; Zelem, Lukáš; Benklewski, Jakub; Glorieux, Christ (2020): Methodology for development of airborne sound insulation descriptor valid for light-weight and masonry walls. In: *Appl. Acoust.* 160, S. 107144.
- Ferk, Heinz; Leh, Christopher; Mosing, Markus; Vavrik-Kirchsteiger, Selina; Nusser, Bernd (2020): Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau - Teil 2: Holzmassivbauweise. In: *Holzbau - die neue Quadriga* (5), S. 46–51.
- Hill, Callum; Kymäläinen, Maija; Rautkari, Lauri (2022): Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment. In: *J Mater Sci* 109 (1), S. 54.
- Hongisto, Valtteri; Oliva, David; Rekola, Laura (2018): Subjective and objective rating of the sound insulation of residential building façades against road traffic noise. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 144 (2), S. 1100.
- Jakiela, S.; Bratasz, Ł.; Kozłowski, R. (2008): Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. In: *Wood Sci Technol* 42 (1), S. 21–37.
- Koch, Claudia; Felhofer, Martin; Fürhapper, Christina (2024): Holzfassaden im Fokus. Teil 3: Feuchteresistenz. In: *Holzbau - die neue quadriga* (1), S. 50–53.
- Nusser, Bernd; Lux, Christian; Ferk, Heinz (2020): Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau. Teil 1: Holzrahmenbauweise. In: *Holzbau - die neue quadriga* (4), S. 43–47.
- Nusser, Bernd; Lux, Christian; Stenitzer, Alexander (2023): Holzfassaden im Fokus. Teil 1: Schallschutz. In: *Holzbau - die neue quadriga* (5), S. 46–49.
- Rüther, Petra; Time, Berit (2015): External wood claddings – performance criteria, driving rain and large-scale water penetration methods. In: *Wood Mater. Sci. Eng.* 10 (3), S. 287–299.
- Schober, Peter; Koch, Claudia; Maximilian, Neusser; Gamerith, Horst; Grüll, Gerhard; Höfler, Karl et al. (2018): Fassaden aus Holz: proHolz-Information. 3. Aufl. Wien: proHolz Austria.
- Schumacher, Mara; Tieben, Johannes; Nusser, Bernd (2023): Holzfassaden im Fokus. Teil 2: Wärmeschutz. In: *Holzbau - die neue quadriga* (6), S. 43–46.
- Scrosati, Chiara; Scamoni, Fabio; Depalma, M.; Ghellere, M. (2019): Facade Sound Insulation as Protection to Outdoor Noise. In: *Proceedings of the ICA 2019 and EAA Euroregio. 23rd International Congress on Acoustics. Aachen.*
- Treberspurg, Martin; Österreicher, Doris; Inigo, Carmen Vicente (2018): Hitze! vermeiden - Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Wohnbau. Technologieleitfaden Sommerliche Überwärmung. Hg. v. Stadt Wien (MA 20). Universität für Bodenkultur Wien - Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für konstruktiven Ingenieurbau.