

LEIse_WAND: innovative Fassaden für natürliche Raumlüftung und optimierten Schallschutz

LEI_WAND

A. Mahdavi, U. Pont,
E. Bajraktari, J. Lechleitner,
N. Maly, M. Schuss,
C. Steineder, C. Tauber

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

19/2018

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

LEIse_WAND: innovative Fassaden für natürliche Raumlüftung und optimierten Schallschutz

LEI_WAND

Univ.Prof. DI Dr.techn. Ardeshir Mahdavi

Univ.Ass. DI Dr.techn. Ulrich Pont

DI Dr.techn. Egzon Bajraktari,

ARat Josef Lechleitner

DI Nikolaus Maly

Ass.Prof. DDI Dr.techn. Matthias Schuss

DI Dr.techn. Christian Steineder

DI Christian Tauber

Abteilung Bauphysik und Bauökologie

Institut für Architekturwissenschaften

TU Wien

Wien, Oktober 2016

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform www.HAUSderZukunft.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	10
Abstract.....	12
1 Einleitung	14
1.1 Aufgabenstellung.....	14
1.1.1 Problemstellung.....	14
1.2 Stand der Technik	16
1.3 Verwendete Methoden / Vorgangsweise.....	17
1.3.1 Experimenteller Aufbau einer Musterwand und deren „Parameter“	17
1.3.2 Absorbermaterialien	20
1.3.3 Messtechnische Erfassung von akustisch relevanten Parametern.....	21
1.3.4 Einsatz von Simulations-Software im Rahmen des Projektes	22
1.3.5 Ansätze zur Implementierung von Active-Noise-Cancelation Technologien im Rahmen des Projektes.	23
1.3.6 Analytische Betrachtung des Systems.....	24
2 Ergebnisse.....	26
2.1 Ergründung der akustischen Parameter der geschlossenen Wand	26
2.2 Akustische Performance der Testwand basierend auf Versatz der Öffnungen sowie Einbringung von Absorbermaterialien.	27
2.2.1 Einfluss der Öffnungsfläche	29
2.2.2 Einfluss des Öffnungsabstands.....	33
2.2.3 Einfluss des View-Factors.....	35
2.2.4 Einfluss von Absorption / Reflexion im Zwischenraum.....	36
2.2.5 Einfluss der Position von absorbierenden Paneelen im Zwischenraum	38
2.2.6 Einfluss der kontinuierlichen / diskontinuierlichen Anordnung von absorbierenden Paneelen im Zwischenraum	41
2.2.7 Einfluss der Frequenzen	43
2.2.8 Schalldämmung der Doppelfassade als Einzahlwert (bewertetes Schalldämmmaß).....	47
3 Schlussfolgerungen	53
4 Ausblick und Empfehlungen.....	57
5 Verzeichnisse	59
5.1 Abbildungsverzeichnis	59
5.2 Tabellenverzeichnis	63
5.3 Literaturverzeichnis	64

Kurzfassung

[Anmerkung: Diese Kurzfassung orientiert sich an der Ursprungsversion, welche unter www.HausderZukunft.at am Anfang des Projektes veröffentlicht wurde, sowie darauf aufbauenden Anmerkungen aus einer Post-Projekt-Sicht.]

Ausgangssituation/Motivation

Diese Forschungsarbeit widmete sich der Entwicklung von kreativen low-tech Lösungen für Gebäudefassaden, die natürliche Lüftung ermöglichen ohne dabei einen entsprechenden (und auch zumeist mehr als notwendigen) Schallschutz zu opfern.

Die Anforderungen an moderne Fassaden sind vielfältig. Einerseits soll die Fassade vor Umwelteinflüssen schützen (Hitze und Kälte, Niederschlag, Lärm, etc.) und andererseits die Möglichkeit bieten die Gebäudenutzer ausreichend mit Licht und frischer Luft zu versorgen. Diese Funktionen in einer Konstruktion zu vereinen ist meist nicht ohne erhöhten technischen Aufwand möglich. Besonders im innerstädtischen Bereich stehen Planer immer wieder vor der Frage, wie energieeffiziente Raumlüftung und ausreichender Lärmschutz gleichzeitig gewährleistet werden können.

In vielen Fällen wird heute aufgrund von Lärmbelastung auf natürliche (Fenster-) Lüftung verzichtet. Stattdessen werden oftmals Klima- oder Lüftungsanlagen verwendet. Neben den komplexeren Anforderungen an die Haustechnikplanung verursacht deren Betrieb einen höheren Energieverbrauch. Darüber hinaus benötigen viele dieser Geräte bedenkliche Substanzen (z.B. Kühlmittel) um entsprechende Funktion zu gewährleisten.

Inhalte und Zielsetzungen

Um diesen Fragenkomplex zu behandeln, fokussierte die vorliegende Forschung auf das Potenzial von (und Planungsinstrumente für) innovative(n) doppelschalige(n) Fassadenkonstruktionen.

Dabei wurde die Optimierung jener Eigenschaften einer generischen doppelschaligen Fassade empirisch untersucht, die deren akustisches Verhalten beeinflussen. Diese beinhalten die Größe und die Form der Lüftungsöffnungen in den Schalen, die relative Lage der Öffnungen (ausgedrückt, zum Beispiel, als das Versetzungsmaß oder als Formfaktor) und das Vorhandensein von akustischem Absorptionsmaterial im Zwischenraum.

Um den Einfluss dieser Variablen unter zuverlässig kontrollierten Bedingungen experimentell zu untersuchen, wurde ein modulares und flexibles Musterbeispiel eines doppelschaligen Aufbaus zwischen den beiden Hallräumen des Akustik-Labors der Abteilung Bauphysik und Bauökologie realisiert.

Methodische Vorgehensweise

Die einzelnen Elemente von beiden Schalen dieses modularen Aufbaues konnten unabhängig voneinander entfernt werden, um Fassadenöffnungen zu emulieren. Eine

umfassende Folge von parametrischen Konfigurationen dieser Öffnungen wurde aufgestellt. Für diese Konfigurationen wurden systematische Schallübertragungsmessungen durchgeführt. Dadurch konnten verschiedene Werte der oben erwähnten Variablen realisiert und untersucht werden. Die Ergebnisse der umfassenden Messungen wurden in frequenzabhängigen und in bewerteten Schalldämm-Maßen ausgedrückt.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Resultate wurden mit statistischen Methoden analysiert und verwertet um daraus prädiktive Modelle für die Abschätzung und Optimierung von Schalldämmeigenschaften von doppelschaligen Fassaden mit Öffnungen für natürliche Lüftung zu entwickeln.

Die empirischen Ergebnisse wurden ebenfalls herangezogen um die Anwendbarkeit rechnergestützter Raumakustik-Methoden für das akustische Modellieren solcher doppelschaliger Elemente zu untersuchen.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass der Versatz der Öffnungen in beiden Schalen und die Applikation von Schallabsorptionsmaterialien im Schalenzwischenraum einen durchaus beachtlichen Effekt auf die Schalldämmung von doppelschaligen Fassaden mit Öffnungen für die natürliche Lüftung haben können. Das bewertete Schalldämmmaß konnte von 18 dB (gegenüberliegende Öffnungen in den beiden Schalen) auf 26 dB (Versatz der Öffnungen um 2 Meter zueinander) bis zu 34 dB (großer Versatz und zusätzliche Einbringung von Absorbermaterialien) gesteigert werden. Eine Doppelfassade mit Öffnungen zur natürlichen Lüftung kann – gemäß den empirischen Ergebnissen aus der realisierten Messwand – bewertete Schalldämmmaße von 27 bis 47 dB erreichen. Damit bewegt sich die akustische Performance eines solchen Bauelements, das eine Lüftungsmöglichkeit ermöglicht, im Bereich von (vollständig geschlossenen) transparenten Bauteilen (Fenstern).

Ausblick

Die Ergebnisse dieser Sondierung können als vielversprechend bezeichnet werden und es konnten hier auch Schritte in die richtige Richtung betreffend einer Optimierung von Lüftung und Schallschutz ermöglicht werden. Allerdings darf der Charakter der Ergebnisse – welche zum überwiegenden Teil auf im Labor stattgefundenen Messungen basieren – nicht überschätzt werden. Die empirischen und analytischen Methoden zur Vorhersage der Performance von solchen Systemen müssen weiter ausgebaut und verbessert werden. Ein wesentlicher nächster Schritt ist die Realisierung von Testwänden unter Realbedingungen, das bedeutet mit einem Konstruktionspartner (z.B. der Holzbauindustrie oder Fertighaus-Unternehmen) unter Verwendung von typischen Baumaterialien, konstruktiven Anpassungen an statische und wärmetechnische Erfordernisse und in der Nähe von realen (nicht emulierten) Schallereignissen.

Abstract

Starting point/Motivation

The main aim of this research was to advance the state of the art in the engineering double-leaf building facades that facilitate natural ventilation while providing sufficient sound insulation. Building envelopes that would allow natural ventilation without compromising the acoustical performance would be highly critical in view of energy efficiency of buildings located in urban settings and noise-affected locations. Realization of natural (window) ventilation is in some instances difficult not only due to climatic factors but primarily because of noise issues (especially traffic noise). The performed research focused on the latter impediment. Noise from outside of a building (particularly traffic noise) travels unhindered through open windows and can interfere with occupants' requirements (e.g. sleep and regeneration in residential habitat, concentration and communication in office spaces). One must thus address acoustical issues, while pursuing the – as such desirable – natural ventilation solutions for buildings. The current practice, especially in urban surroundings is the application of mechanical systems (mechanical ventilation or even A/C-Units). However, such systems can be considered as suboptimal, given their high energetic requirements, and – in the case of A/C units – often usage of questionable or even toxic substances. In this research project the potential of double skin facades with low-tech natural ventilation opportunities was assessed.

Contents and Objectives

Based on previous research and prior experiences in building acoustics, a set of candidate variables of a generic double-leaf construction was considered that would affect the sound insulation performance of double-leaf building elements with openings for natural ventilation. These included the size – and to a certain extent, the shape – of the openings in each layer, the relative positions of the openings (expressed, for instance, in terms of displacement or view factors), and the presence of acoustical absorption in the interstitial cavity between the two layers of the construction.

Methods

To experimentally assess the influence of these variables under reliably controlled conditions, a modular and flexible model instance of a double-leaf construction was designed, assembled, and installed between two adjacent reverberant chambers of our acoustics laboratory. The constitutive elements of both layers of this modular construction were designed, so that a removal was possible to emulate facade openings. A comprehensive sequence of parametric configurations of these openings was constructed. These configurations were subjected to systematic sound transmission measurements. Thereby, various values of the aforementioned candidate variables were realized and examined. The results of the comprehensive measurements have been structured in terms of both frequency-dependent and weighted sound transmission indices.

Results

The results have been analyzed toward developing empirically-based statistical models for the prediction of the sound insulation properties of double-leaf constructions with openings for natural ventilation. Likewise, the empirical results were deployed to examine the applicability of computational room acoustic applications for acoustical modeling of such double-leaf elements.

Results of the project suggest that the change of position of openings in the two façade shells and the application of absorber materials in the interstitial space offer a notable improvement of sound insulation values of double-skin-facades with natural ventilation openings. The evaluated sound insulation value R_w was increased from 18 dB (parallel openings in both shells) to 25 dB (2m offset of openings) up to 34 dB (large offset and application of absorber materials in the interstitial space). Thus, a double skin façade employing these principles could reach sound insulation values of 27 to 47 dB. These values resemble the acoustical performance of typical closed transparent components, but with deployed natural ventilation.

Prospects / Suggestions for future research

The results of this exploratory project can be considered as promising. However, it should not be forgotten that the presented results are based on empiric experiments in a laboratory setting. The empiric and analytic methods for impact determination require improvement. The next step in this domain should be the construction of a “real-world” double skin façade facing realistic setup in terms of material, building construction, structural and thermal requirements. Moreover, such a specimen needs to be tested in real-world surroundings, including real noise pollution events.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Dieses Projekt befasste sich mit der explorativen Erkundung der Möglichkeiten von natürlicher Lüftung bei gewährleistetem (ausreichendem Luft-) Schallschutz in doppelschaligen (Außen-)Bauteilen. Dazu ist es zunächst erforderlich die Problemstellung und die Hintergründe darzustellen.

1.1.1 Problemstellung

Lüftung (d.h. der Austausch von Luft in Innenräumen) ist aus mehreren Gründen bedeutsam, oftmals wird der Abtransport von „verbrauchter Luft“ (d.h. Kohlendioxid, Wasserdampf, Geruch- und Ekelstoffen) als ein wesentliches Kriterium für komfortable Innenbedingungen angegeben. Ein weiterer Aspekt ist der Luftaustausch in Sommernächten, wobei die Nachtlüftung als passive Kühlmethode helfen kann, das Auftreten von sommerlicher Überwärmung zu reduzieren (Mahdavi 2009, Artmann et al. 2006, Artmann et al. 2008) im Speziellen im Bereich der urbanen Hitzeinseln (vgl. MA22, 2015). Die natürliche Lüftung, beispielsweise durch Fensteröffnung, wird heutzutage hauptsächlich durch klimatische bzw. Wetterbedingungen (wie z.B. Außentemperatur, Windrichtung und –stärke, Niederschlag), Luftverschmutzung und Lärmbelastung eingeschränkt. In diesem Projekt geht es vor allem um den letzten Belang. Es ist „common knowledge“, dass sich Lärm negativ auf Menschen (und damit auch auf Gebäudenutzer, die Lärmimmissionen ausgesetzt sind) auswirken kann. Hierbei ist vor allem der urbane Bereich, also die Städte, die weltweit im Wachsen begriffen sind, kritisch zu betrachten, da hier die meisten Lärmimmissionen zu erwarten sind. Dies – genauso wie ein Anstieg der Meldungen über Lärmbelastungen und auch die gesundheitlichen Auswirkungen von Lärm – wird durch zahlreiche Studien, Fachartikel und Publikationen belegt. Um einige zu nennen: Fuchs (2010) hält fest, dass sich die Beschwerden über Umgebungslärm mehren. Diaz et al. (2001) zeigen in einem State-of-the-Art-Review im Programm *Pollution related diseases* die gesundheitlichen Konsequenzen von dauerhafter Lärmeinwirkung wie z.B. Schlafstörungen und Hormonlevelveränderungen. Beule und Ortscheid (2001) streichen heraus, dass etwa 20% der deutschen Bevölkerung sich durch Straßenverkehrslärm gestört fühlt und nur ein Drittel der Befragten sich gar nicht durch Straßenlärm gestört fühlt. Dreger et al. (2015) halten fest, dass es einen möglichen Zusammenhang zwischen Umgebungslärm und psychischen Problemen bei Heranwachsenden gibt. Halperin (2014) streicht die besonders schädlichen Gesundheitsauswirkungen von nächtlicher Lärmeinwirkung und die damit verbundenen Schlafstörungen hervor. Li et al. (2016) untersuchten die berufsbedingten Auswirkungen von Lärm auf Bauarbeiter und unterstrichen neben den individuellen gesundheitlichen Einschränkungen der Betroffenen auch den gesamtwirtschaftlichen Schaden, der durch Lärmeinwirkung entstehen kann. Recio et al. (2016) zeigen, dass auch kurzfristige Lärmexposition bereits substanzial zu kardio-vaskulären Gesundheitsproblemen beitragen kann. Sygna et al. (2014) untersuchten ebenfalls den Zusammenhang zwischen

Straßenverkehrslärm, Schlaf und psychischer Gesundheit in Norwegen und halten fest, dass die Auswirkung auch die Psyche wohl vor allem bei langfristiger Exposition bemerkbar ist. Tobías et al (2015) untersuchten die Lärmexposition in Madrid, Spanien, und bestätigten das Gesundheitsgefährdungspotential von Lärmeinwirkungen. Abbildung 1 zeigt die absoluten Zahlen von Bewohnern, welche nach der European Environmental Agency unter Tags und Nachts in städtischen Agglomerationen starker Lärmbelastung ausgesetzt sind.

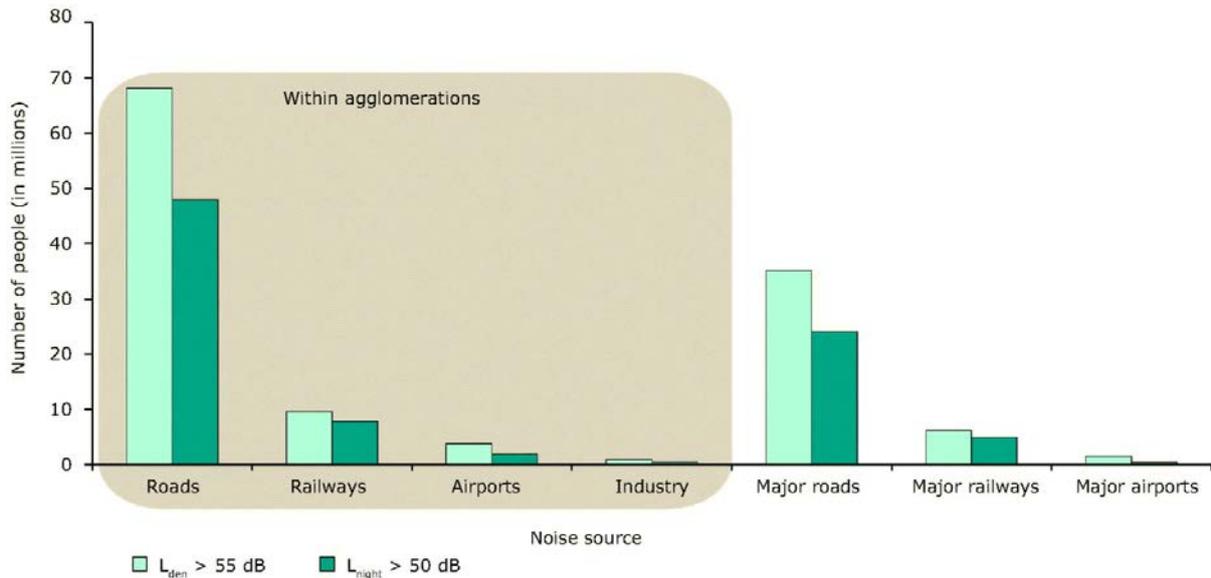


Abbildung 1: Anzahl der Personen in Europa (EU + Norwegen und Schweiz), welchen hohen Lärmbelastungen (unter Tags und in der Nacht) ausgesetzt sind. (Abbildung EEA 2012).

Die genannten Publikationen und Darstellungen zeigen, dass technologische Verbesserungen im Bereich des baulichen Lärmschutzes keineswegs nur kosmetischer Natur sind, sondern ein Forschungsfeld kritischer Notwendigkeit sind. Es muss an dieser Stelle aber unterstrichen werden, dass die Abschwächung von Lärmeinwirkungen nur die zweitbeste Strategie ist, um die Lärmproblematik besser in den Griff zu bekommen: Die erste Strategie aus bauphysikalischer und humanökologischer Sicht wären vor allem quellenseitige Vermeidungs- und Abschwächungsansätze, d.h. auf Seiten der Lärmemittenten, sowie immissionsseitige Lärmkontrolle (vergleiche hierzu Mahdavi 1986, Mahdavi 1996). Nichtsdestotrotz benötigen zeitgenössische Gebäudehüllen einen hinreichenden Schallschutz.

Eine oftmals vorgeschlagene Lösung für die Problematik des Lärmschutzes bei gleichzeitiger Lüftung ist die weitestgehend hermetische Abschottung des Innenraums und das Verwenden von mechanischen (Zwangs-)Lüftungsgeräte. Diese werden meist schallentkoppelt oder mittels einer Labyrinth-Konstruktion schalltechnisch optimiert. Die Verwendung von solchen Geräten bedeutet aber zusätzlichen technischen und konstruktiven Aufwand, bzw. stellen Sie ein Gerät dar, das zusätzliche Wartung erfordert. Die Geräte haben einen Platz- und Strombedarf und Ihre Verwendung erfordert vom Gebäudenutzer zusätzliches Verständnis für sinnvolle Lüftungsstrategien. Werden statt solchen Geräten geschlossene A/C-Geräte (Air Conditioning-Systeme) verwendet, kommt deren schlechte Umweltverträglichkeit (zum Teil toxische Betriebsstoffe, sowie sehr hoher Energieeinsatz für die Kühlung) als

negativer Aspekt hinzu. Die vorgeschlagenen und in diesem Projekt vorgeschlagenen „Low-Tech“-Ansätze besitzen diese Nachteile nicht.

Die verschiedenen – und auf den ersten Blick widersprüchlichen – Erfordernisse an eine Gebäudehülle – hier Schallschutz und Lüftungserfordernis – dürfen nicht isoliert betrachtet werden, sondern sollten mit Ihren jeweiligen Interdependenzen berücksichtigt werden.

1.2 Stand der Technik

Eine ganze Reihe von Forschungsarbeiten hat sich mit verschiedenen Teilaspekten der Problematik auseinandergesetzt. Nunes et al (2010) haben die akustische Performance von offenen Fenstern im Spiegel von Ventilationsanforderungen untersucht. Buratti (2002) untersuchte die Lärmreduktion von Außenlärm bei offenen Fenstern. In Rossing (2007) sind verschiedene Performance Indikatoren beschrieben, die für die gegenständliche Thematik von Bedeutung sind. De Salis et al. (2002) befassten sich ebenfalls mit der akustischen Performance von natürlich belüfteten Bauwerken, wie Oldham et al. (2002). Khalegi et al. (2007) beschrieb das Verhältnis von Lüftung, Luftqualität und Akustik in „grünen“ und „herkömmlichen“ Gebäuden. Eine wesentliche Vorarbeit für die im Zuge dieses Projektes beforschten Aspekte stellte auch die durch A. Mahdavi 1997 verfasste Arbeit „Thermal and Acoustical Performance of „Buffer Rooms“ (Mahdavi 1997) dar. Spezifische konstruktive und akustische Aspekte untersuchten ferner Viveiros et al. (1997, Auswirkung von Jalousien/Luftschlitzfenstern in Jalousien auf die akustische Performance), Field und Fricke (1995, Einsatz von Resonatoren in Lüftungsöffnungen), Migneron et al. (2012, Schallperformance von Doppelfassaden mit natürlicher Belüftung), Tong und Tang (2013, schalltechnische Werte von einem Fenster und Innenräumen an einer linien-förmigen Schallquelle), Wang et al. (2012, Lüftungsquerschnitte mit Resonatoren und Absorbern). Auch die Arbeiten von Arenas und Crocker (2010) und Parkin (2004) sollen an dieser Stelle erwähnt werden: Die erstgenannten haben die akustischen Absorber-Eigenschaften von mikro-perforierten Folien und anderen Absorbermaterialien untersucht, während Parkin eine systematische Kategorisierung der Doppelfassaden nicht aus konstruktiver Sicht, sondern auch aus akustischer und belüftungstechnischer Sicht erstellte.

Eine etwas exotisch anmutende, aber dennoch valide Forschungsrichtung in diesem Bereich ist die Applikation von aktiver Noise Control, etwas was eher aus dem Bereich der Kopfhörertechnologie bekannt ist. Jakob und Möser haben hierzu eine Studie angefertigt, welche sich mit der Applikation von Lautsprechern zur Gegenwellenerzeugung in zweischaligen Fenstern auseinandersetzte (Jakob und Möser 2003a, 2003b). Diese Technologie scheint jedoch noch mit einer ganzen Reihe von Schwierigkeiten zu kämpfen, daher ist eine breite Applikation als relativ marktfremd zu betrachten.

Die Forschungsgruppe der Abteilung Bauphysik und Bauökologie hat gleichermaßen für die Abwicklung dieses Projektes eine Reihe von wesentlichen Vorarbeiten dem Projekt zeitlich vorgelagert oder in diesem Projekt geleistet, diese sind in zum Teil projektspezifischen Publikationen dargestellt: Mahdavi et al. (2012), Mahdavi et al (2013), Bajraktari (2014),

Bajraktari et al (2015a), Bajraktari et al. (2015b), Hintermayer (2013), Tauber et al. (2017) sowie Mahdavi et al (2017a).

1.3 Verwendete Methoden/ Vorgangsweise

1.3.1 Experimenteller Aufbau einer Musterwand und deren „Parameter“

In einer ersten Herangehensweise wurde untersucht, wo und in welcher Form entsprechende empirische Experimente zur Thematik Doppelfassaden mit natürlicher Lüftung und gutem Schallschutz durchgeführt werden können. Dabei kristallisierte sich sehr rasch heraus, dass vor einer Applikation in der gebauten Realumwelt Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen erforderlich sind. Mit kontrollierten Bedingungen sind nicht nur die akustischen Verhältnisse auf beiden Seiten der doppelschaligen Wand gemeint, sondern auch eine genaue Kenntnis über die Einbausituation und die schalltechnischen Parameter aller verwendeten Materialien. Ein weiterer Aspekt war die Modifizierbarkeit der Wand, welche erforderlich erschien um einem ganzheitlichen Untersuchungsansatz folgen zu können. Dies wäre wohl bei einer „echten“, bereits gebauten Doppelfassade nur sehr eingeschränkt gewährleistet gewesen.

Demzufolge wurde entschieden eine experimentelle Wand zwischen den beiden Hallräumen der Abteilung Bauphysik und Bauökologie an der TU Wien zu errichten. Die beiden Schalen der Wand wurden so geplant, dass die beiden Schalen komplett voneinander entkoppelt sind und die Wirkung von Schallbrücken ausgeschlossen ist. Die doppelschalige Wand besitzt die Ausmaße 3,1 Meter Breite auf 3,1 Meter Höhe. Um eine „Wandbildung“ zu ermöglichen, wurde auf jeder Seite ein Steher- und Querstrebensystem aus Aluminium errichtet, welches einfach mit verschiedenen Materialien beplankt werden kann. Zwischen den Außenkanten dieses Systems liegt ein Abstand von 43 cm vor. Als flächiges Material wurden Holzwerkstoffplatten gewählt, die einen Kompromiss zwischen ganz harten Elementen wie Glas und akustisch wirkenden Materialien darstellten. Zunächst wurde ein fixer rechteckiger Rahmen konstruiert, welcher dicht an die Außenumrandung des Prüfstandes angeschlossen wurde. Holzwerkstoffplatten in den Abmessungen 50 auf 50 cm wurden in der offenen gelassenen Öffnung in einem 5 auf 5 Element-Raster montiert. Die Platten sind über Gummidichtungen an die Tragkonstruktion angeschlossen. Abbildung 2 zeigt den Raster beziehungsweise eine prinzipielle Darstellung der Situation, Abbildung 3 (links) zeigt eine Photographie des Systems (eine Seite bereits beplankt, eine Seite noch offen) Abbildung 3 (rechts) illustriert den Innenraum zwischen den beiden Schalen.

Neben ganzflächigen Paneelen wurden auch solche angeschafft, welche ein Loch in Größe von 50 % (Lochgröße also 0,125 m²) oder sogar 25% eines 0,5 auf 0,5 m Elements hatten (Lochgröße also 0,625 m²). Zum Vergleich, ein offengelassenes Feld hat eine Fläche von 0,25 m². Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt der Wand mit einem eingesetzten 50% Element. Abbildung 5 illustriert die Abmessungen der verschiedenen Paneele.

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

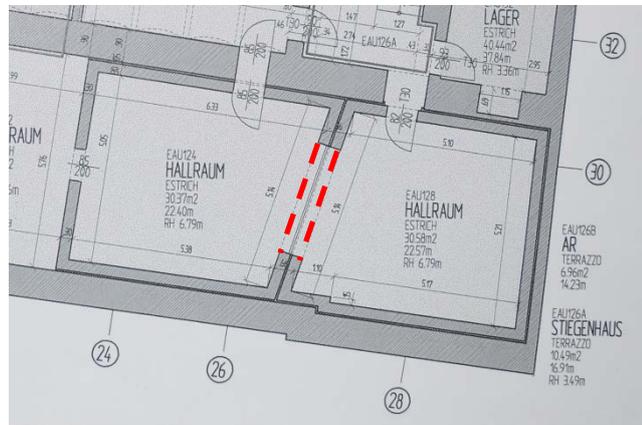
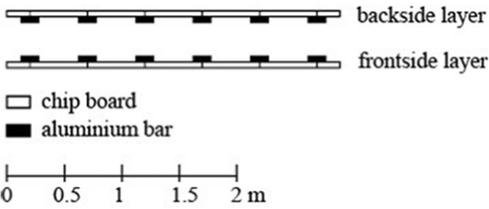


Abbildung 2 (links): Paneel-Raster beziehungsweise Darstellung der Einbausituation der Prüfwand im Labor der Abteilung Bauphysik und Bauökologie (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie); (rechts): Plandarstellung im Akustik-Labor (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)



Abbildung 3 (links): Photographie der zweischaligen Wand (eine Seite beplankt, eine Seite unbeplankt) (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie). (rechts): Zwischenraum zwischen den beiden Schalen. (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).



Abbildung 4: Ausschnitt der Testwand mit einem eingesetzten „50%-Feld“. (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Opening specifications

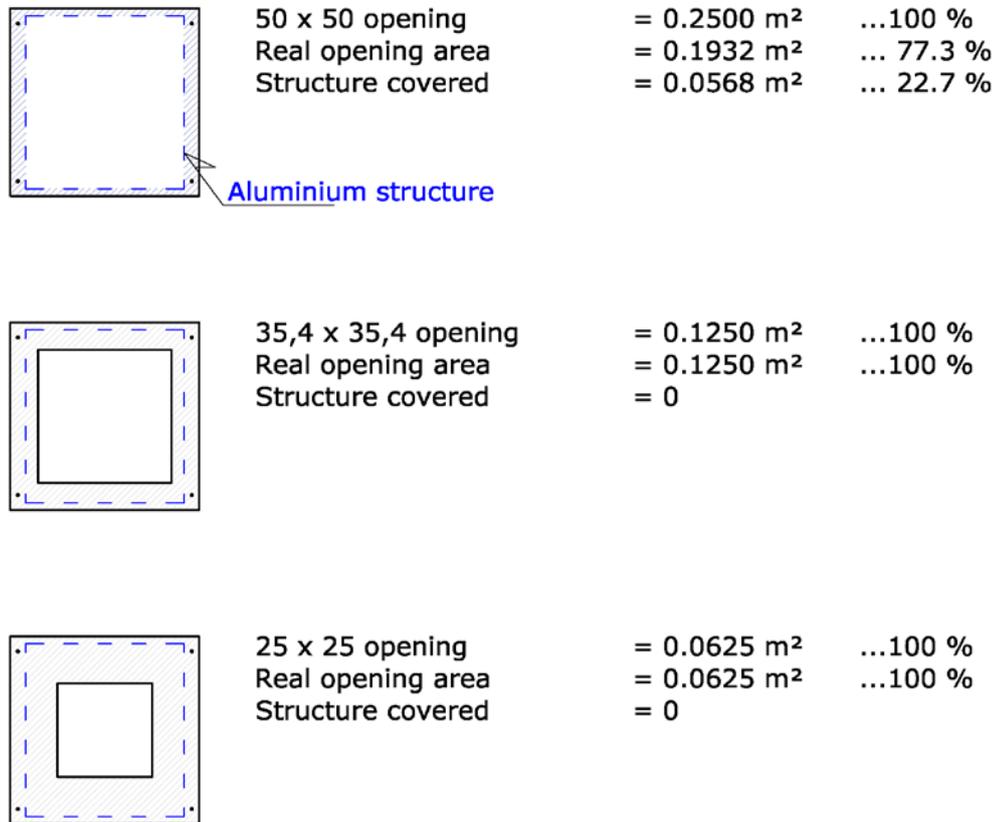


Abbildung 5: technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll-, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Im Zuge der Errichtung der Wand wurden auch entsprechende Parameter der Wand festgelegt, welche wesentlich für die Nomenklatur von Messsetups und Kategorisierung von später erfolgenden Messergebnissen waren. Nachstehende Tabelle 1 liefert einen Überblick über diese Parameter.

Tabelle 1: Parameter der Wand. (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Variablenname	Beschreibung (englischsprachig)	Einheit
S_1	Area of the ventilation opening in layer 1	m ²
S_2	Area of the ventilation opening in layer 2	m ²
Shape	Quadratic, rectangular, vertical versus horizontal alignment, aspect ratio	-
d	Distance: spatial distance between the center points of two openings in layers 1 and 2 respectively	m
θ	Angle of diffraction: The planar angle between the line connecting the center points of the two openings and the respective surface normals at these points.	Grad
View factor	The view factor between the opening geometry in the two layers	-
A	Absorption area: The equivalent frequency-dependent cavity absorption area between the openings in the two layers	m ²
Absorption position	Cavity absorption area attached to one versus to both layers	-

1.3.2 Absorbermaterialien

Neben dem bloßen Versatz der Öffnungen zueinander ist es naheliegend die Schalltransmission im Innenraum einer doppelschaligen Fassade durch Applikation geeigneter Materialien zu reduzieren.

Im Zuge dieses Projektes wurden hierzu zwei kommerziell erhältliche Absorbermaterialien verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Schaummaterial (SONATECH 2012)), sowie um eine Folien mit Mikroperforationen (Kaeffer 2015). Abbildung 6 zeigt das Schaummaterial, Abbildung 7 diese microperforierte Folie. Die akustischen Charakteristiken (d.h. die Absorptionscharakteristiken) nach Herstellerangaben sind in Abbildung 8 abgebildet (die Charakteristiken der Folie entsprechend den Einbaurichtlinien mit 30 mm zwischen zwei Folienlagen und 100 mm Distanz zur nächsten Wandoberfläche)

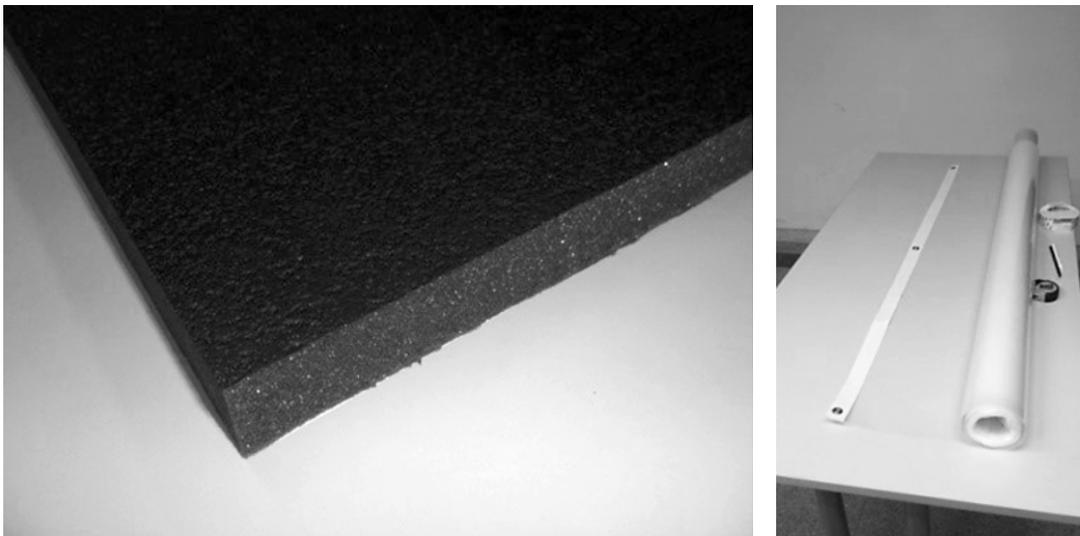


Abbildung 6 (links):: technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll-, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: SONATECH bzw. Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Abbildung 7 (rechts): technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll-, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: Kaeffer bzw. Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

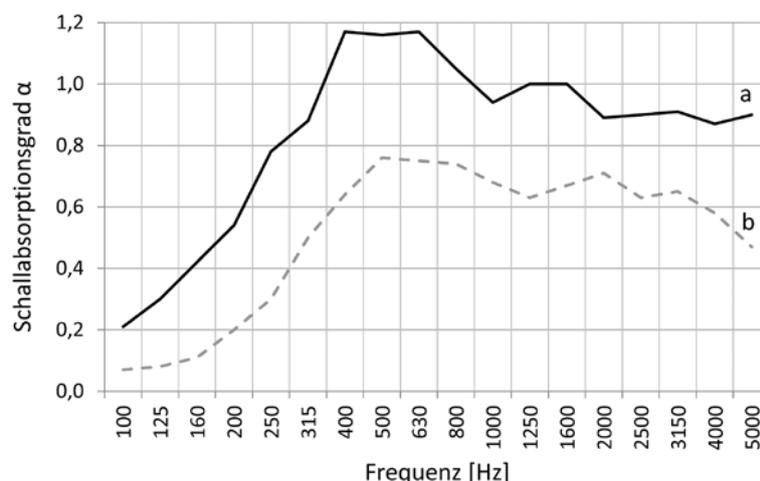
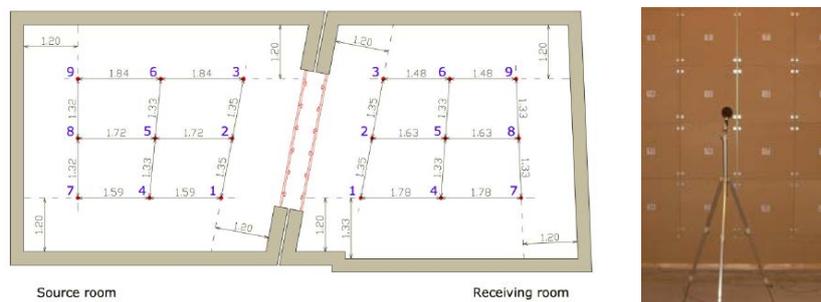


Abbildung 8: Akustische Absorbercharakteristiken der beiden Absorbermaterialien: Kurve a stellt Pur-Skin 50 (Schaummaterial) und Kurve b die mikroperforierte Folie dar (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).

1.3.3 Messtechnische Erfassung von akustisch relevanten Parametern

Die messtechnische Erfassung der Schalldämmeigenschaften der Wand wurde selbstverständlich in Einklang mit relevanten Messnormen geführt, wie beispielsweise der EN ISO 10140-2:2010 (EN ISO 2010) und der ISO 140-5 (ISO 1998). Die frequenzabhängige Messung der Luftschall-Übertragung wurde in Dritteloktav Frequenzbändern zwischen 50 und 5000 Hertz durchgeführt. Die Messergebnisse im Bereich tiefer Frequenzen müssen bei einer Evaluierung der Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden, gleichwohl eine ganze Reihe von messtechnischen Parametern und Empfehlungen für das Messen von tiefen Frequenzen im Forschungsdesign und Mess-Setup berücksichtigt wurden (Eine Kantenlänge sowohl von Sende- wie auch Empfangsraum entspricht der Wellenlänge der niedrigsten Frequenz von etwa 6,8 Metern, die Messdauern für statische Mikrofonposition wurde auf 20 Sekunden, die für das bewegende Mikrofon auf 30 Sekunden gesetzt, die Mindest-Abstände zwischen Lautsprecher und Mikrofonen wurden bei Weitem überschritten). Messtechnisch wurde mit rosa Rauschen (pink Noise) gearbeitet (dies wird in der Akustik als ein Geräusch empfunden, welches bei durchschnittlicher Hörleistung etwa in jeder Frequenz als gleich laut empfunden wird).

Nachstehende Abbildungen 9 und 10 zeigen die Messpunkte des statischen Mikrofons in den Laborräumlichkeiten, sowie das (statische) Mikrofon vor der Testwand. Abbildung 11 zeigt das rotierende Mikrofon, welches einen Sweep-Radius von mehr als einem Meter hatte.



die Messdaten mittels der Software der Firma Norsonic (Norsonic 2014) ausgewertet. Nachstehende Tabelle 2 bietet einen Überblick über das verwendete Mess-Equipment.

Tabelle 2: verwendete Messinstrumente und Beschreibung. (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Equipment	Einheiten	Specification
Mess-Setup 1		
Control Station	1	Nor514
Sound Analyzer	2	Nor140
Building Acoustic Case	2	Nor515
Mess-Setup 2		
Moxa-Router	1	Moxa AWK-3121-EU-WLAN
Sound Analyzer / Moxa	2	Nor140 / Moxa AWK1127
Microphone Boom and Turntable / Moxa	2	Nor265 / Moxa AWK1127
Sound generation / Calibration of Micro-Phones		
Power Amplifier	1	Nor280
Dodecahedron Loudspeaker	1	Nor270
Calibrator	2	Nor1251
Software		
ControlBuild	-	Nor1028/3
NorBuild	-	Nor1028

1.3.4 Einsatz von Simulations-Software im Rahmen des Projektes

Neben der messtechnischen Erfassung von akustischen Parametern wurde auch ein Simulationsmodell in einer State-of-the-Art – Raumakustik-Software erstellt. Dies diente vor allem dazu herauszufinden, ob solche Programme, die in der Regel auf Ray-Tracing-Methoden basieren, für Zwecke des Erschließens der Performance von doppelschaligen Wandsystemen und Ansätzen zur natürlichen Lüftung geeignet sind.

Im Zuge des Projektes wurde die Software ODEON 12 verwendet (ODENO n.d.), welche einen Ray-Tracing-basierten Ansatz verfolgt.

Zunächst wurde ein Wireframe-Modell der Versuchswand erstellt (siehe nachstehende Abbildung 13), welches dann verwendet wurde um bereits gemessene Situationen nachzubilden und zu simulieren. Auf diese Weise konnte ein Abgleich zwischen den Ergebnissen der Simulation und den Messergebnissen durchgeführt werden. Eine Kalibration war erforderlich: Die Absorptions-Koeffizienten der verwendeten Materialien wurden in der Software angepasst um bessere Anpassung der Nachhallzeiten zwischen Messungen und Simulationen in Sende- und Empfangsraum zu erzielen. Es wurden nicht alle messtechnisch erfassten Konfigurationen nachsimuliert, jedoch für 28 verschiedene Kombinationen von Öffnungsanordnungen Simulationen erstellt. Die Bemühungen und Ergebnisse hierzu können detailliert in Bajraktari (2014) nachgelesen werden (Die Ausführungen in den Resultaten beschränken sich darauf, die Übereinstimmung von Berechnungen und Messungen aufzuzeigen, hinsichtlich des Simulationsansatzes wird auf die Dissertation von Egzon Bajraktari verwiesen).

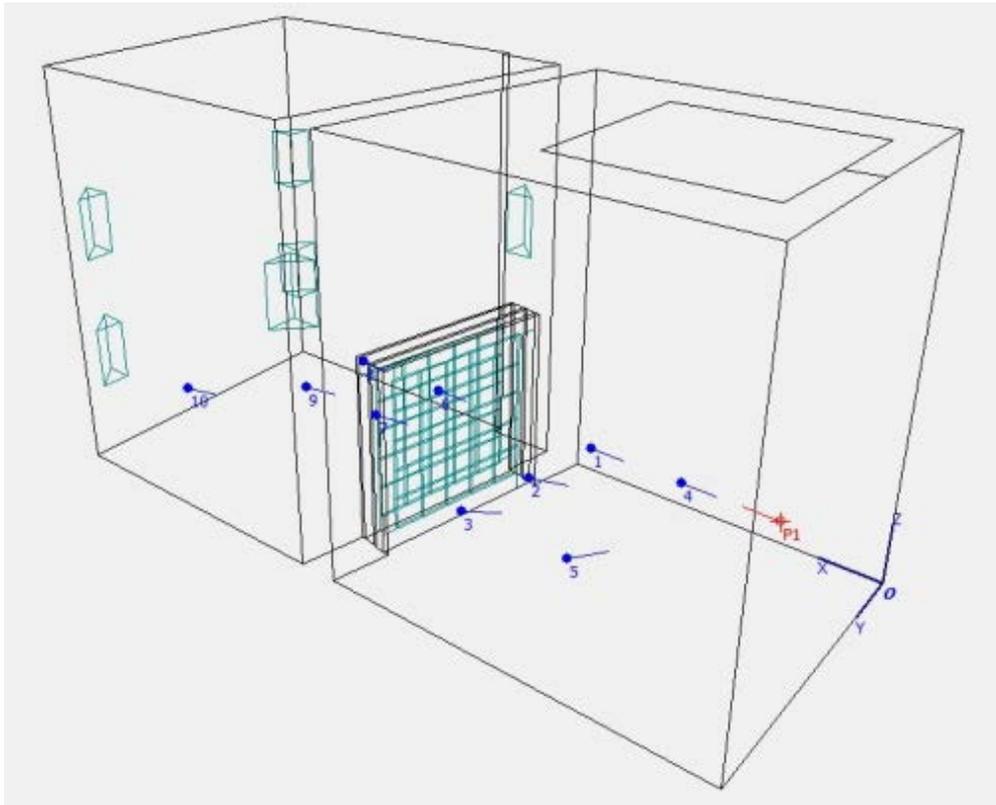


Abbildung 13: Simulations-Modell in Odeon (Wireframe-Modell) (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

1.3.5 Ansätze zur Implementierung von Active-Noise-Cancellation Technologien im Rahmen des Projektes.

Inspiziert von der Literatur (Jacob und Möser 2013a, 2013b), sowie von den eleganten Technologien von High-End Kopfhörern und deren Noise-Cancellation Technologie wurde in einer weiteren Facette des Forschungsprojektes das Potential von Active-Noise-Cancellation-Technologien untersucht. Hierbei wurde aus Gründen von Zeitressourcen und wirtschaftlichen Gründen vor allem untersucht, ob mit Low-Cost (und Eigenbau-) Komponenten diese Technologie prinzipiell geeignet wäre um mit den anderen untersuchten Aspekten der doppelschaligen Fassaden mit natürlicher Lüftung zu kooperieren. Es muss jedoch festgehalten werden, dass die Ergebnisse dieses Ansatzes noch Luft nach oben lassen; Es handelt sich schlicht um eine komplexe, elektro-akustische Applikation, deren Detaileinsatz im Rahmen dieser Sondierung den Rahmen gesprengt hätte. Trotzdem kann auf bescheidene Erfolge in der Applikation zurückgeblickt werden. Diese sind im Detail in Tauber et al. (2017) beschrieben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass – wie im Projekt verfolgt – mit nicht hochpreisigen High-End-Komponenten eine erfolgreiche Implementierung von Active-Noise-Cancellation vor allem durch zwei kritische Aspekte beeinträchtigt wurde: Zum einen die komplexe Natur von Wellen und Wellenüberlagerungen, die im Vergleich zu Domänen, wo Active-Noise-Cancellation-Technologien erfolgreich eingesetzt werden und wurden (Kopfhörer, Lüftungskanäle), in den nicht linearen/nicht-schachtförmigen Zwischenräumen von Doppelfassaden auftreten, zum anderen die mangelnde (elektro-)akustische Qualität von Komponenten moderater Preise, die sich dann in nur in bestimmten Frequenzbereichen erfolgreicher Noise-Cancellation niederschlug. Es ist

durchaus denkbar den Ansatz Active Noise-Cancellation in einem anderen Projekt oder einer Folgeprojektbemühung weiter zu erarbeiten, jedoch weisen die Ergebnisse der Versuche in LEIse-WAND auf durchaus herausfordernde Applikationsprobleme hin.

1.3.6 Analytische Betrachtung des Systems

Gleichwohl diese Forschungsarbeit – wie viele andere Forschungsarbeiten und normative Dokumente im Bereich der Bau- und Raumakustik - zum Großteil auf empirischen Ergebnissen fußt, ist eine prinzipielle Betrachtung der physikalischen Prozesse der Schalltransmission in doppelschaligen Bauteilen für das Verständnis, wie solche Prozesse beeinflusst werden können, dienlich. Eine fundierte Analyse kann bei der Identifikation von relevanten Einflussgrößen und sogenannten unabhängigen Variablen helfen.

Prinzipiell erfolgt die Luft-Schalltransmission durch ein (mehrschaliges) Trennelement zwischen nebeneinander angeordneten Räumen über drei Wege (siehe Abbildung 14):

- Der erste Weg τ_1 involviert die direkte Schallübertragung durch die beiden Schalen einer DLF (doppelschaligen Fassade). Dieser Weg ist bei einer geschlossenen Fassadenkonstruktion der dominante Bestandteil

Sobald geöffnete Elemente involviert sind müssen weitere Wege, nämlich

- Der direkte Weg durch die offenen Elemente τ_2
- Der Weg über mehrere Reflexionen im Zwischenraum τ_3

berücksichtigt werden. In dem Moment wo Öffnungen vorhanden sind, ist τ_1 im Vergleich zu den anderen beiden Komponenten als sehr klein anzusehen. Abbildung 14 illustriert die drei Schalltransmissionswege.

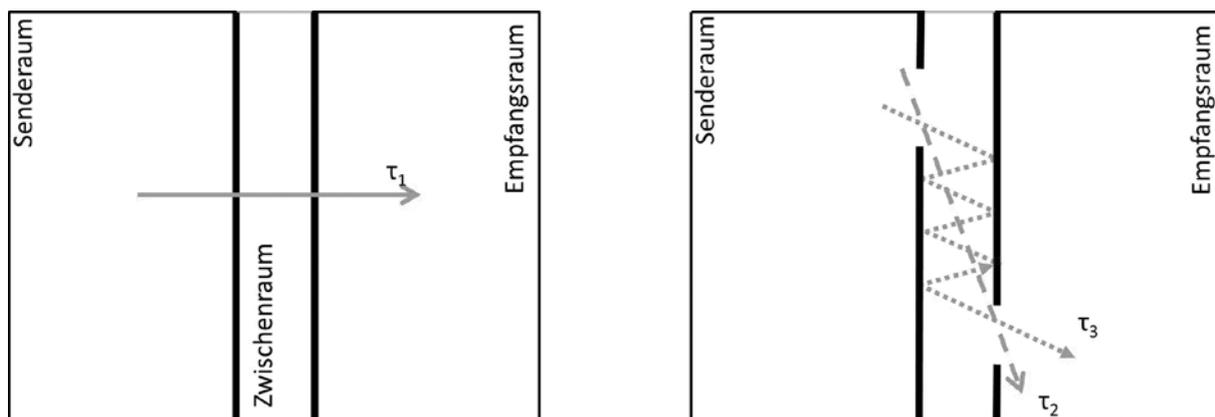


Abbildung 14: Illustration der Luft-Schalltransmissionswege durch ein mehrschaliges Trennelement. Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

In nachstehenden Ausführungen werden nun die verschiedenen Transmissionswege formeltechnisch (vereinfacht) beschrieben:

Der erste Weg kann wie nachstehend beschrieben werden:

$$\tau_1 = \frac{W_{f,2}}{W_{f,1}} = 10^{-0,1 \times R_{f,max}}$$

Der zweite Weg kann unter Verwendung des View Factors (VF, Sichtfaktor) wie nachstehend grob approximiert werden:

$$\tau_2 = \frac{W_{f,2} \times S_F \times VF}{W_{f,1}} \quad \text{wobei } S_F = \frac{S_{open}}{S_{ref}}$$

Der dritte Weg kann folgendermaßen angenähert werden:

$$\tau_3 = \frac{W_{f,2} \times S_F \times (1 - VF) \times (1 - \alpha_m)^n}{W_{f,1}}$$

In diesen Gleichungen bedeuten die Variablen folgendes:

τ_1 ... Schalltransmission durch die geschlossenen Schalen

τ_2 ... Schalltransmission direkt durch die offenen Elemente in beiden Schalen

τ_3 ... Schalltransmission indirekt über Reflexionen im Zwischenraum

VF ... View Factor (Sichtfaktor) zwischen den Öffnungen in beiden Schalen, berechnet gemäß EN ISO 10140 – 2:2010

$W_{f,1}$... frequenzbezogene Schallenergiedichte im Senderraum

$W_{f,2}$... frequenzbezogene Schallenergiedichte im Empfangsraum

S_{open} ... Fläche der (dem Senderraum zugewandten) Öffnung

S_{ref} ... Gesamtoberfläche der Experimentalwand

S_F ... Quotient aus S_{open} und S_{ref}

$R_{f,max}$... Schalldämmmaß der geschlossenen Konstruktion bei einer bestimmten Frequenz

α_m ... mittlerer Schallabsorptionsgrad des Zwischenraums zwischen den beiden Schalen (ausgedrückt als

flächengewichtetes Mittel der Absorptionsgrade der Oberflächen im Zwischenraum

n ... Faktor, der mit der Anzahl der Reflexionen innerhalb des Zwischenraumes zusammenhängt

Gemäß dieser vereinfachten systematischen Darstellung kann nun das Schalldämmmaß eines doppelschaligen Bauteils mit Öffnungen aus dem Vergleich der Schallenergiedichten in Senderraum und Empfangsraum (W_1, W_2) abgeleitet werden.

$$R = -10 \times \log \left[\frac{W_2}{W_1} \right] \quad [dB]$$

$$R_f = -10 \times \log [10^{-0,1 \times R_{f,max}} + S_F \times (VF + S_F \times (1 - VF) \times (1 - \alpha_m)^n)] \quad [dB]$$

Es ist wesentlich anzumerken, dass diese Annäherungen unter einer Reihe von Vereinfachungen betreffs der relevanten physikalischen Parameter vorgenommen wurden: Die detaillierten Eigenschaften einzelner Schalen hinsichtlich Biegesteifigkeit und anderer Parameter, so wie Resonanzphänomene, wie sie in jeder doppelschaligen Konstruktion vorkommen können, wurden hier nicht in die Betrachtung eingezogen. Die Bedeutung dieser Prozesse kann aber im Vergleich zur Wirkung der Öffnung beider Schalen als relativ gering angenommen werden. Im beschriebenen Falle mit Öffnungen sind die Wege τ_2 und τ_3 dominant. Als solches kann das beschriebene analytische Modell nun herangezogen werden um die empirischen Beobachtungen der Messungen der Performance der Doppelwand zu begleiten.

2 Ergebnisse

2.1 Ergründung der akustischen Parameter der geschlossenen Wand

Um in weiterer Folge die Performance von verschiedenen Öffnungskonfigurationen mit und ohne Verwendung von Absorber-Materialien im Zwischenraum in Relation zur akustischen Performance der gesamten Wand setzen zu können, war es zunächst erforderlich, diese Wand ausführlich hinsichtlich Ihrer akustischen Performance zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden Messungen angestellt und das bewertete Schalldämmmaß der Wand mit einer geschlossenen Schale (die zweite war komplett offen), wie auch mit zwei geschlossenen Schalen ermittelt. Das bewertete Schalldämmmaß dieser beiden Varianten betrug 35 dB für die einschalig geschlossene Wand, sowie 51 dB für die zweischalig geschlossene Wand. Abbildung 15 zeigt die frequenzabhängigen Schalldämmmaße für diese beiden Varianten. Es zeigt sich, dass die zweischalige geschlossene Wand speziell im Bereich höherer Frequenzen eine signifikant bessere Performance zeigt.

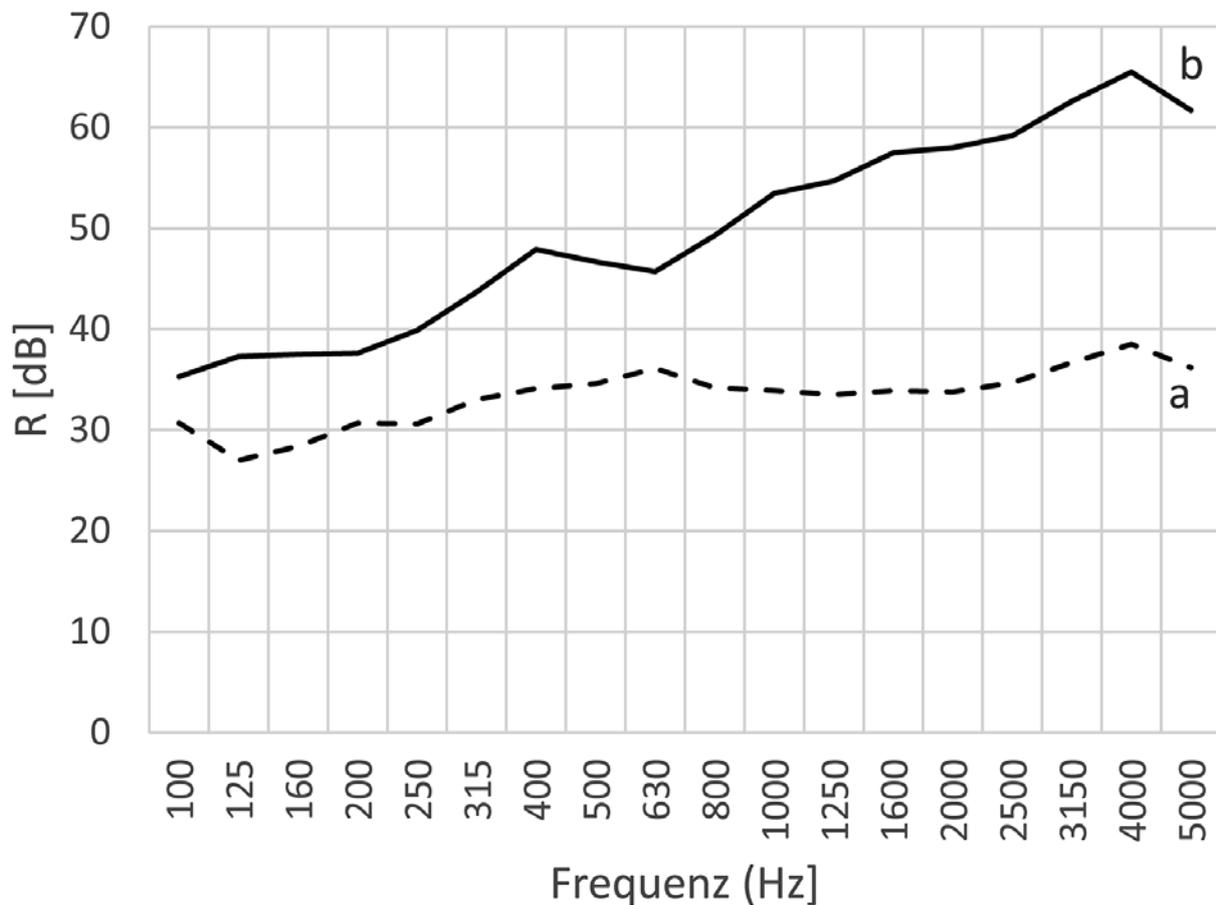


Abbildung 15: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß (R_f) der Versuchswand in den geschlossenen Zuständen: Kurve a bezieht sich auf den einseitig geschlossenen Aufbau, Kurve b bezieht sich auf den zweischalig geschlossenen Zustand (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

2.2 Akustische Performance der Testwand basierend auf Versatz der Öffnungen sowie Einbringung von Absorbermaterialien.

In den Versuchsreihen wurden insgesamt 176 verschiedene Konfigurationen messtechnisch untersucht. Nachstehende Tabelle 3 zeigt zur Illustration einen Auszug aus der Gesamtliste der getesteten Konfigurationen, strukturiert nach Öffnungsfläche. Gut ersichtlich ist die Abhängigkeit der Distanz d von den gewählten Öffnungen. Alle Konfigurationen durchliefen den stets gleich aufgebauten Mess-, Evaluierungs- und Dokumentationsprozess. Abbildung 16 zeigt hierzu die Illustrationen von Sende- und Empfangsraumwand, sowie der Konsequenz von unterschiedlichen Öffnungskonfigurationen. Abbildung 17 zeigt die Verteilung der unterschiedlichen Öffnungsflächen in den verschiedenen untersuchten Konfigurationen.

Tabelle 3: Auszug aus den getesteten Konfigurationen (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)

Konfig.	Code der offenen Elemente in der Schale zum Senderaum	Elemente mit Zusatz-Absorption im Zwischenraum in der Schale zum Senderaum	Code der offenen Elemente in der Schale zum Senderaum	Elemente mit Zusatz-Absorption im Zwischenraum in der Schale zum Senderaum	Distanz d (m)
1	-	-	-	-	-
2	-	-	alle	-	-
3	1	-	1	-	0,43
4	1	-	13	-	1,48
5	1	-	25	-	2,86
6	6,16	-	6,16	-	0,43
7	6,16	-	8,18	-	1,09
8	6,16	-	10,20	-	2,05
9	6,16	2,7,12,17,22,4,9,14,19,24	10,20	-	2,05
10	6,16	2,7,12,17,22,4,9,14,19,24	10,20	2,7,12,17,22,4,9,14,19,24	2,05
11	1,6,11,16,21	-	1,6,11,16,21	-	0,43
12	1,6,11,16,21	-	3,8,13,18,23	-	1,09
13	1,6,11,16,21	-	5,10,15,20,25	-	2,05
14	1,6,11,16,21	2,7,12,17,22,4,9,14,19,24	5,10,15,20,25	-	2,05
15	1,6,11,16,21	2,7,12,17,22,4,9,14,19	5,10,15,20,25	2,7,12,17,22,4,9,14,19	2,05

Konfig.	Code der offenen Elemente in der Schale zum Senderraum	Elemente mit Zusatz-Absorption im Zwischenraum in der Schale zum Senderraum	Code der offenen Elemente in der Schale zum Senderraum	Elemente mit Zusatz-Absorption im Zwischenraum in der Schale zum Senderraum	Distanz d (m)
		,24		,24	
16	1	2,7,12,17,22,4,9,14,19 ,24	25	2,7,12,17,22,4,9,14,19 ,24	2,86

Distance d

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

$S_{open} = 0.25 \text{ m}^2$

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

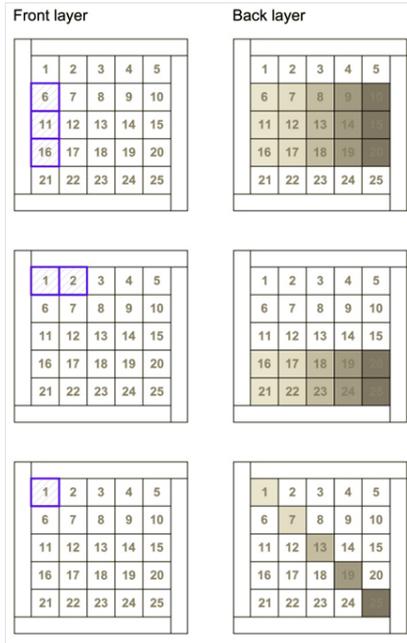
$S_{open} = 0.50 \text{ m}^2$

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

$S_{open} = 0.75 \text{ m}^2$

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

$S_{open} = 1.25 \text{ m}^2$



- d = 0.43 m
- d = 0.66 m
- d = 1.09 m
- d = 1.56 m
- d = 2.05 m

- d = 1.82 m
- d = 1.82 m
- d = 1.95 m
- d = 2.19 m
- d = 2.51 m

- d = 0.43 m
- d = 0.83 m
- d = 1.48 m
- d = 2.16 m
- d = 2.86 m



Abbildung 16: Konsequenz der unterschiedlichen geöffneten Paneele hinsichtlich Öffnungsgröße und Distanz d. Abteilung: Bauphysik und Bauökologie.

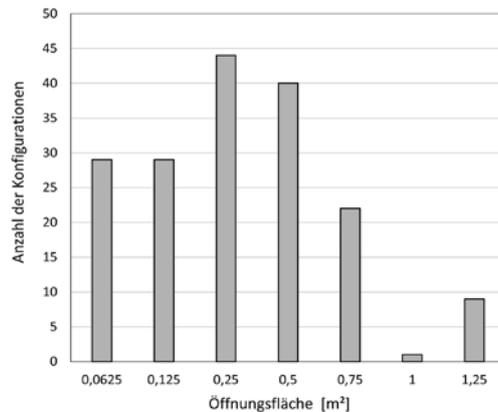


Abbildung 17: Verteilung der unterschiedlichen Öffnungskonfigurationen als Häufigkeitsverteilung. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Die Resultate der Messungen wurden mit nachstehender Formel (gemäß EN ISO 2010) herangezogen um frequenzabhängige Schalldämmmaße zu errechnen.

$$R_f = L_1 - L_2 + 10 \times \log \frac{S}{A}$$

In diesen Gleichungen bedeuten die Variablen folgendes:

R_f ... frequenzabhängiges Schalldämmmaß [dB]

L_1 ... mittlerer (gemessener) Schalldruckpegel im Senderraum [dB]

L_2 ... mittlerer (gemessener) Schalldruckpegel im Empfangsraum [dB]

S ... Fläche des Gesamtaufbaus in der Öffnung des Labors [m²]

A ... äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum [m²]

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass in Folge von Messunsicherheiten im äußerst tiefen Frequenzbereich von 50 bis 80 Hz einige Fälle auftraten (Konfigurationen mit kleinen und weit versetzten Öffnungen, sowie hohen Absorptionswerten im Zwischenraum), in denen die solchermaßen ermittelten R_f -Werte sogar geringfügig über den Werten der geschlossenen Wand lagen. Da dies aus physikalischer Sicht nicht plausibel erscheint wurden diese Ergebnisse in der statistischen Bearbeitung der Resultate nicht berücksichtigt. Der Vollständigkeit halber sei noch darauf verwiesen, dass die Resonanzfrequenz der experimentellen Wand mit etwa 25 Hz rechnerisch abgeschätzt wurde und damit unterhalb des für Zwecke der Bau- und Raumakustik interessanten Frequenzbereichs.

Das bewertete Schalldämmmaß der Messwand mit versetzten Öffnungen und gesteigerter Absorption im Zwischenraum resultiere nach den Messungen in Werten von 27 – 35 dB. Im Vergleich zu nicht-versetzten Öffnungen und Zwischenräumen ohne Absorptionsmaterial sprechen wir hier von einer Verbesserung von 11 bis 17 dB (Maximal Unterschied: 22dB). In den nachstehenden Sektionen soll seziert werden, welche Entscheidungen hinsichtlich Konfigurationen der Messwand welchen Einfluss auf das frequenzabhängige Schalldämmmaß (bzw. auch auf das bewertete Schalldämmmaß) haben.

2.2.1 Einfluss der Öffnungsfläche

Nachstehende Abbildung 18 zeigt drei unterschiedliche Konfigurationen im Vergleich miteinander: DLF002 ist die einschalig geschlossene Wand, DLF003 ist die einschalig geschlossene Wand mit einem offenen Panel (2,6% der Fassade offen) und DLF004 ist die einschalig geschlossene Wand mit 4 offenen Paneelen (10,4% der Fassade offen). DLF 003 zeigt in Vergleich zu DLF002 Abfälle von 0,4 – 20,7 dB, DLF004 zu DLF002 sogar Abfälle von 8,9 – 26,3 dB. Demzufolge kann festgehalten werden, dass Öffnungen in der einschaligen Konstruktion einen großen (und zwar negativen) Einfluss auf die akustische Performance der Wand haben.

Wie verhält sich das nun in der Doppelschaligen Wand? In nachstehender Abbildung 19 wird der komplett geschlossenen doppelschaligen Wand (DLF001) eine Reihe von Konfigurationen mit jeweils gegenüberliegenden Öffnungen ohne Versatz gegenüber gestellt. DLF025 hat ein offenes Panel (Öffnungsfläche 0,25m²), DLF010 zwei offene Paneele

(Öffnungsfläche 0,50m²), DLF015 drei offene Paneele (Öffnungsfläche 0,75m²) und DLF034 fünf offene Paneele (Öffnungsfläche 1,25 m²). Ähnlich den Konfigurationen bei der einschaligen Wand kann ein signifikanter Abfall des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes beobachtet werden. Je größer die Öffnungsfläche, desto größer auch die Abfälle (DLF025 zu DLF001 2,1 – 43,7 dB; DLF034 zu DLF001 14,3 – 52,1 dB). Es stellt sich die Frage, ob dieser Zusammenhang auch bei größtmöglicher Distanz der geöffneten Paneele zueinander auftritt. Dies kann in Abbildung 20 eingesehen werden, es handelt sich um die gleichen Öffnungsflächen (DLF024, DLF014, DLF018, DLF036) im Vergleich zur zweischaligen geschlossenen Wand wie vorher, nur nicht gegenüberliegend, sondern mit größtmöglicher Distanz zwischen den Öffnungen. Wenngleich die Abfälle hinsichtlich der frequenzabhängigen Schalldämmmaße geringer ausfallen, bleibt dennoch der Zusammenhang gleich – je größer die Öffnungsfläche, desto problematischer der Abfall im bewerteten Schalldämmmaß.

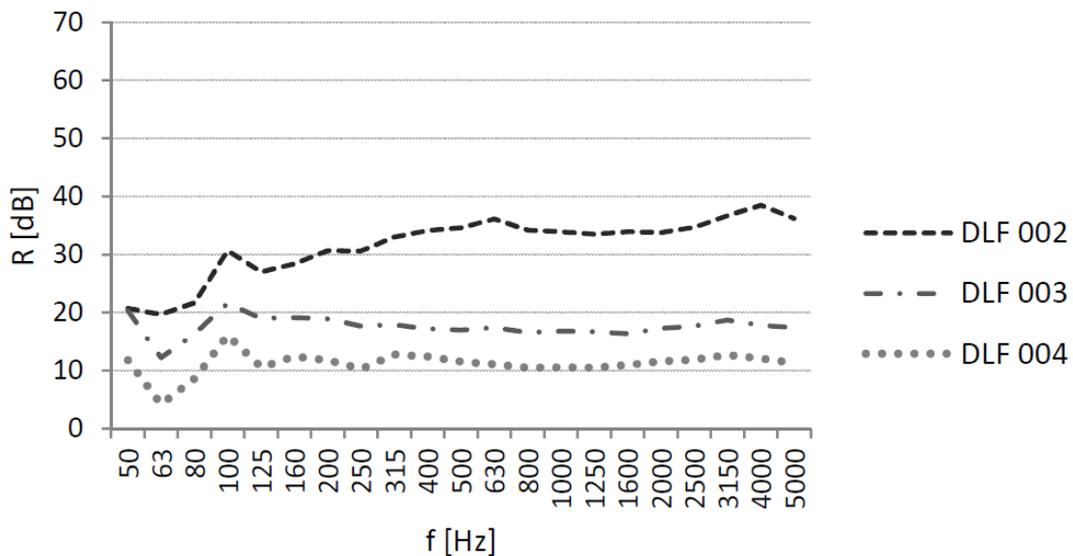


Abbildung 18: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von drei Konfigurationen einschaliger Natur (DLF002 – einschalig – ganzgeschlossen; DLF003 – ein Panel geöffnet; DLF004 – zwei Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

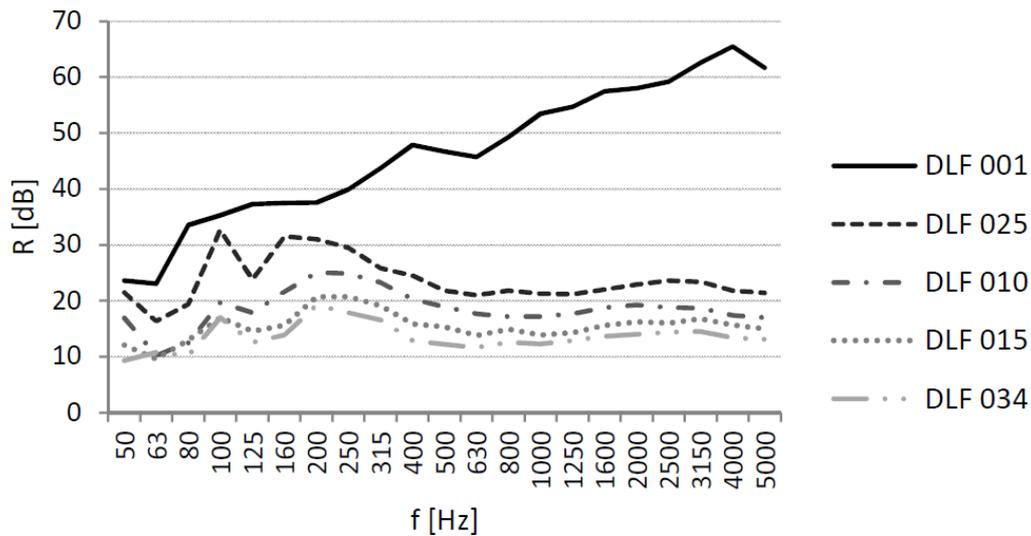


Abbildung 19: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von fünf Konfigurationen zweischaliger Natur (DLF001 – einschalig – ganz geschlossen; DLF025 – ein Panel geöffnet; DLF010 – zwei Panele geöffnet; DLF015 – drei Panele geöffnet; DLF034 – fünf Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

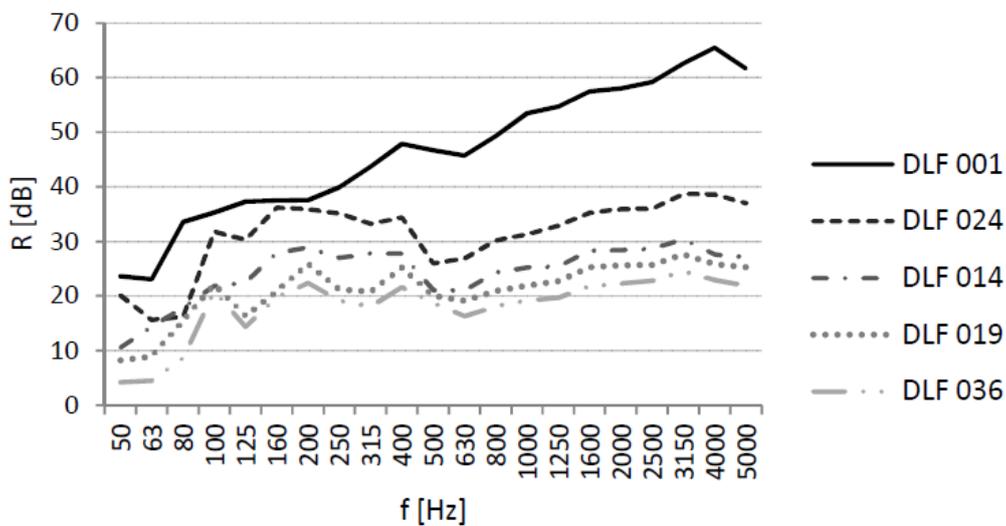


Abbildung 20: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von fünf Konfigurationen zweischaliger Natur mit jeweils größtmöglichem Abstand der Öffnungen zueinander (DLF001 – einschalig – ganz geschlossen; DLF024 – ein Panel geöffnet; DLF014 – zwei Panele geöffnet; DLF019 – drei Panele geöffnet; DLF036 – fünf Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Die nachstehenden Abbildungen 21 und 22 zeigen die Abhängigkeit von frequenzabhängigen Schalldämmmaß bzw. Delta des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes in Vergleich zur geschlossenen doppelschaligen Fassade zu den Öffnungs-Ratios (d.h. Quotient aus Öffnungsfläche zu Gesamtfassadenfläche).

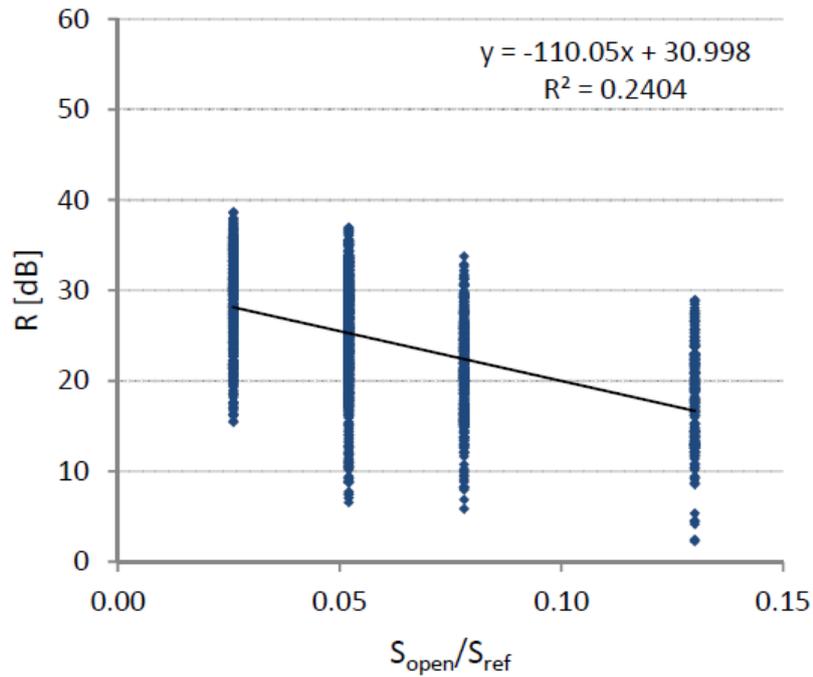


Abbildung 21: Zusammenhang Öffnungsratio und frequenzabhängiges Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

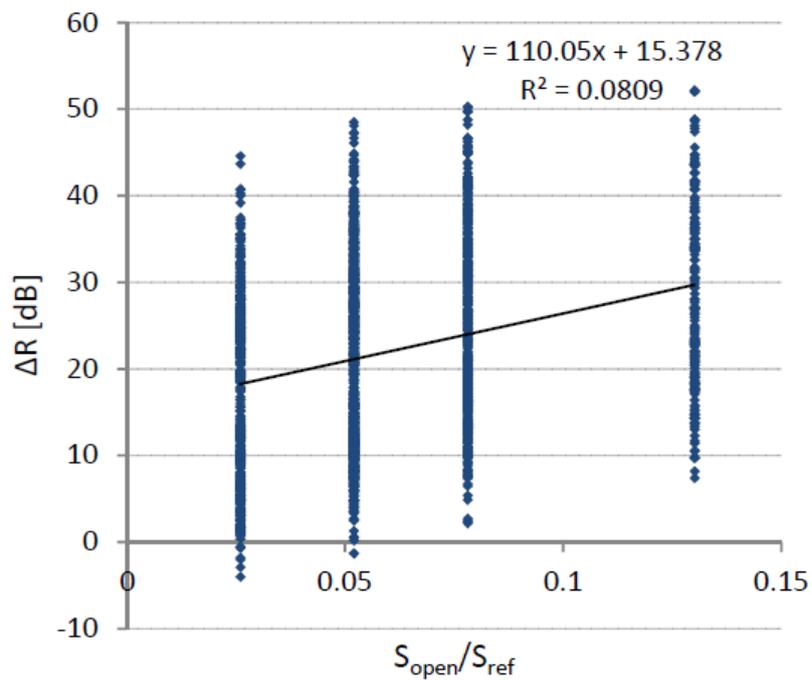


Abbildung 22: Zusammenhang Öffnungsratio und Veränderung frequenzabhängiges Schalldämmmaß zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.2 Einfluss des Öffnungsabstands

Wie schon aus der letzten Sektion ersichtlich, hat die Distanz d (center-point to center point der Öffnungen in beiden Schalen) einen Einfluss auf die frequenzabhängigen Schalldämmmaße – je größer der Abstand, desto größer auch das Schalldämmmaß, bzw. umgekehrt, je größer der Abstand, desto geringer das Delta zur geschlossenen Doppelfassade. Allerdings handelt es sich hierbei – wie bei sehr vielen Zusammenhängen in der Akustik – leider nicht um einen linearen Zusammenhang: Die „Gewinne“ bei den frequenzabhängigen Schalldämmmaßen verringern sich bei größeren Distanzen zunehmend. Die nachstehenden Abbildungen 23 - 27 zeigen diese Zusammenhänge zunächst als kumulierte Graphen über alle Messungen (Distanz zu frequenzabhängigem Schalldämmmaß bzw. zum Delta im Vergleich zur geschlossenen Fassade) und dann für eine Reihe von konkreten Fällen mit konstanten Öffnungsgrößen (0,25 und 0,5 m²) aber veränderlichen Werten für d .

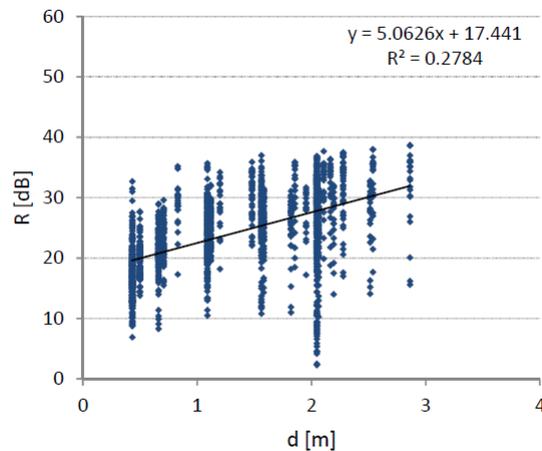


Abbildung 23: Verhältnis zwischen Mittelpunktabstand und frequenzabhängigen Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

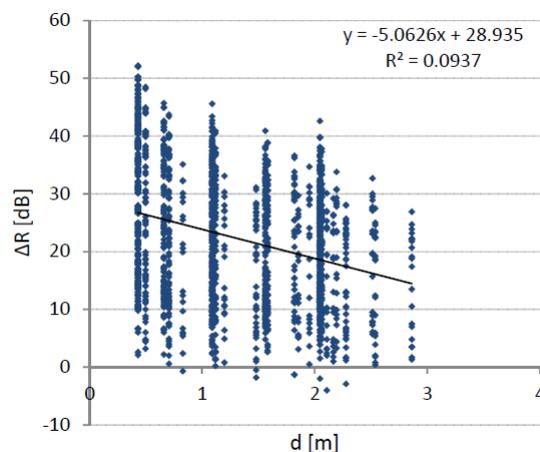


Abbildung 24: Verhältnis zwischen Mittelpunktabstand und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

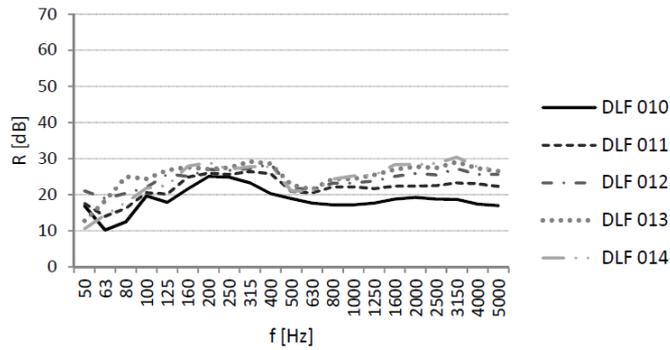


Abbildung 25: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,5 m²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 0,43m (DLF010), 0,66m (DLF011), 1,09m (DLF012), 1,56m (DLF013) und 2,05m (DLF014); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

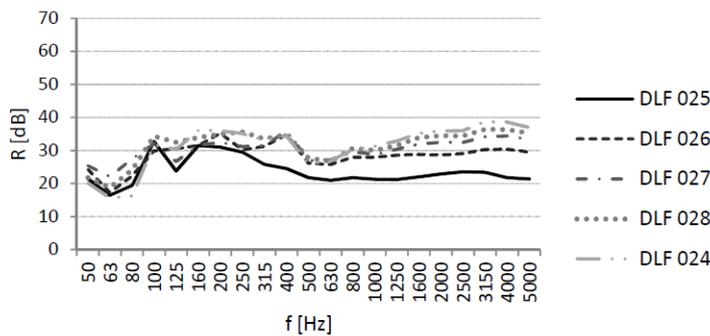


Abbildung 26: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,25 m²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 0,43m (DLF025), 0,83m (DLF026), 1,48m (DLF027), 2,16m (DLF028) und 2,05m (DLF024); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

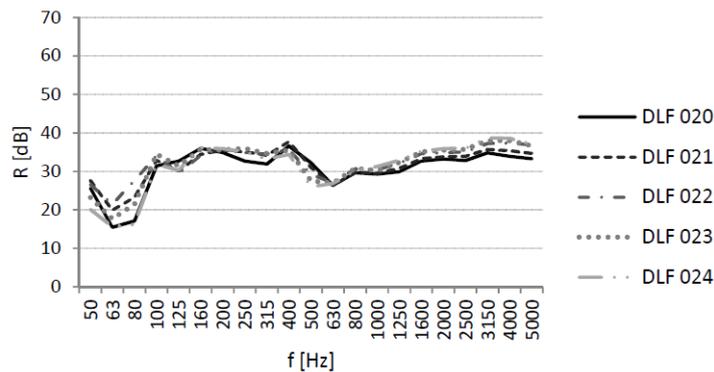


Abbildung 27: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,25 m²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 2,05m (DLF020), 2,11m (DLF021), 2,28m (DLF022), 2,54m (DLF023) und 2,86m (DLF024); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.3 Einfluss des View-Factors

Der „View-Factor“ (Sichtfaktor, VF) fusioniert die beiden vorherigen betrachteten Parameter, nämlich Öffnungsgröße und relativer Versatz / Versatzdistanz. Der Zusammenhang lautet: Wenn der VF sehr kleine Werte annimmt, dann bestehen große frequenzabhängige Schalldämmmaße. Mit zunehmendem VF nehmen die Werte für frequenzabhängige Schalldämmmaße ab. Abbildungen 28 – 31 zeigen zunächst verschiedene ausgewählte Konfigurationen im Vergleich und dann die Verteilungen aller Konfigurationen in kumulativen Punktwolken.

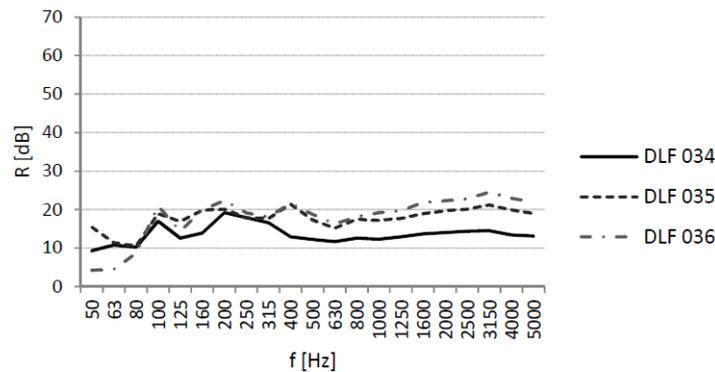


Abbildung 28: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für drei Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (1,25 m²) aber vergrößernden Distanzen der Öffnungen zueinander und daher abnehmenden VF: DLF034: 0,4056; DLF035: 0,0326; DLF036: 0,0033; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

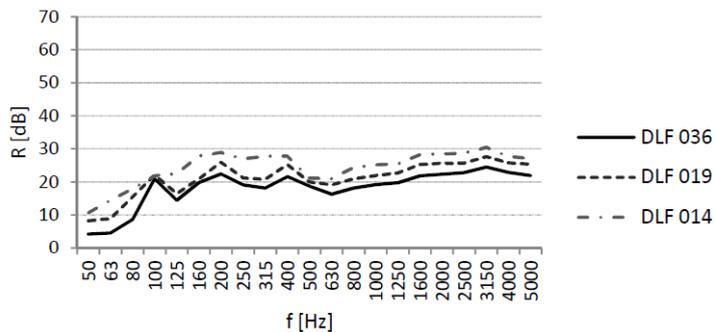


Abbildung 29: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für drei Konfigurationen mit konstanter Distanz (2,05) aber abnehmender Öffnungsfläche und daher abnehmenden VF: DLF036: 0,0033; DLF019: 0,0024; DLF014: 0,0015; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

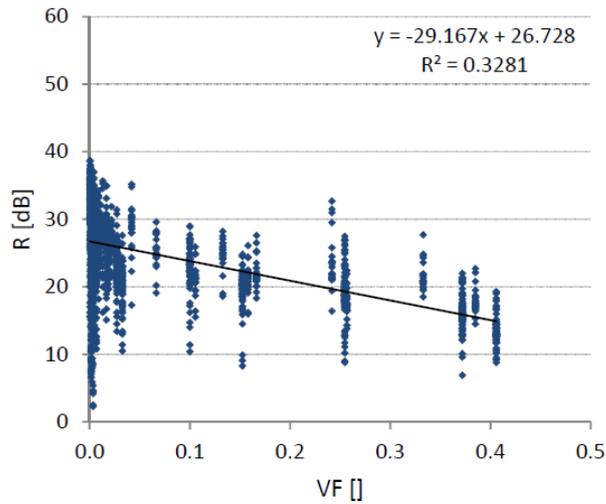


Abbildung 30: Verhältnis von VF und frequenzabhängigem Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

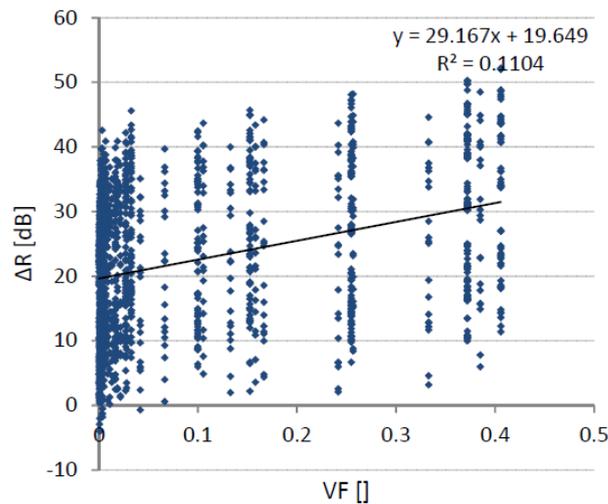


Abbildung 31: Verhältnis von VF und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß im Vergleich zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.4 Einfluss von Absorption / Reflexion im Zwischenraum

In einem nächsten Schritt wurde nun der Einfluss der Einbringung von Absorbermaterialien untersucht. Die Absorbermaterialien drücken sich in einem veränderten mittleren Absorptionskoeffizient α_m des Zwischenraums aus und damit gleichwohl auch in einem veränderten Reflexionskoeffizient ρ_m . In dieser Sektion sollen alle Messungen mit eingebrachten Absorbermaterialien, unabhängig von Ihrer Positionierung betrachtet werden. Betrachtet man nun alle Messungen, die mit eingebrachten Absorbermaterialien durchgeführt wurden, ergibt sich auf den ersten Blick ein etwas paradoxes Bild. Die geringen

R²-Werte dieser Darstellungen weisen zusätzlich darauf hin, dass man eine differenziertere Betrachtung durchführen muss (Abbildungen 32 und 33). Es ist erforderlich, den Effekt der Absorbermaterialien bei bestimmten Frequenzen und nicht über alle Frequenzen anzusehen, dies liegt auch in den unterschiedlichen Charakteristiken dieser Absorbermaterialien begründet. In den Abbildungen 34 und 35 ist dies für die Frequenz von 1000 Hz durchgeführt worden.

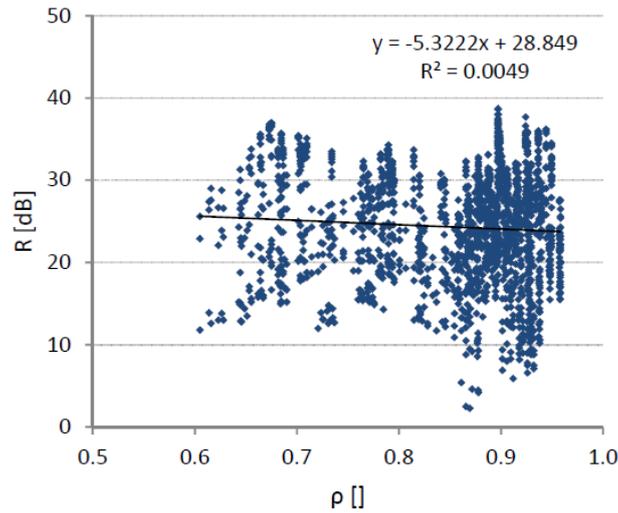


Abbildung 32: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und frequenzabhängigem Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

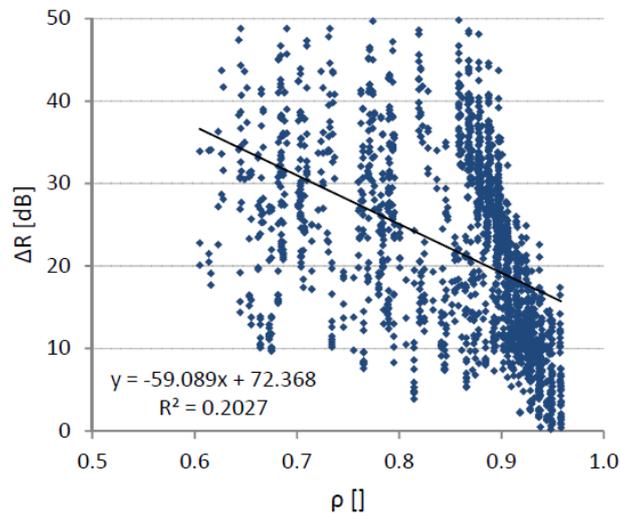


Abbildung 33: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß im Vergleich zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

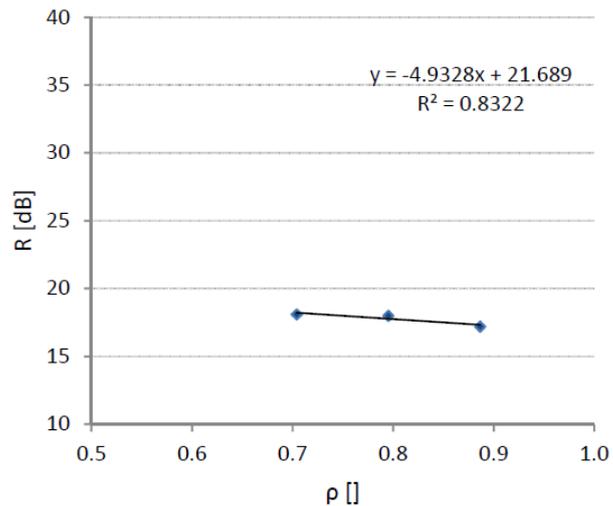


Abbildung 34: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF010, DLF101, DL120 (alle Parameter bis auf den Reflexionsgrad gleich) bei 1000 Hz; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

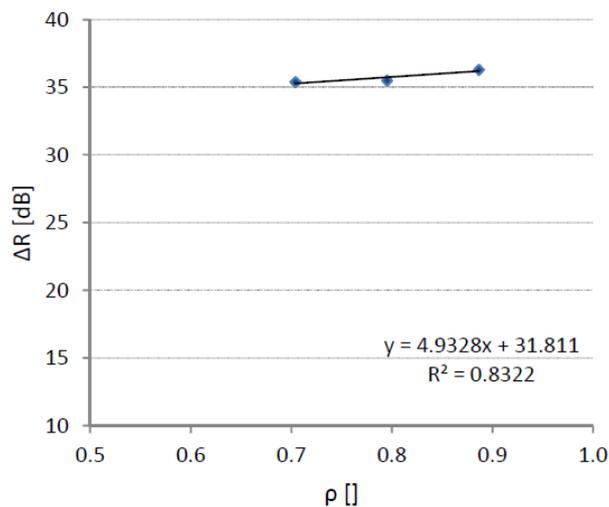


Abbildung 35: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und Reduktion des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelfassade für die Konfigurationen DLF010, DLF101, DL120 (alle Parameter bis auf den Reflexionsgrad gleich) bei 1000 Hz; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.5 Einfluss der Position von absorbierenden Paneelen im Zwischenraum

Bei jenen Konfigurationen, wo die Absorption-Materialien so positioniert wurden, dass sie nicht in der Nähe der Öffnungen und/oder des direkten Verbindungspfad der Öffnungen wirken konnten, konnte nur ein geringfügiger (0,2 bis 1,5 dB) verbesserter frequenzbezogener Schallschutz festgestellt werden (siehe Abbildungen 36 und 37). In Konfigurationen, wo sich die Anordnung näher an den Öffnungen und dem direkten Weg

zwischen den Öffnungen orientierte, konnte eine Verbesserung von 0,4 bis 4,4 dB bei den frequenzabhängigen Schalldämmmaßen festgestellt werden (siehe Abbildungen 38 und 39).

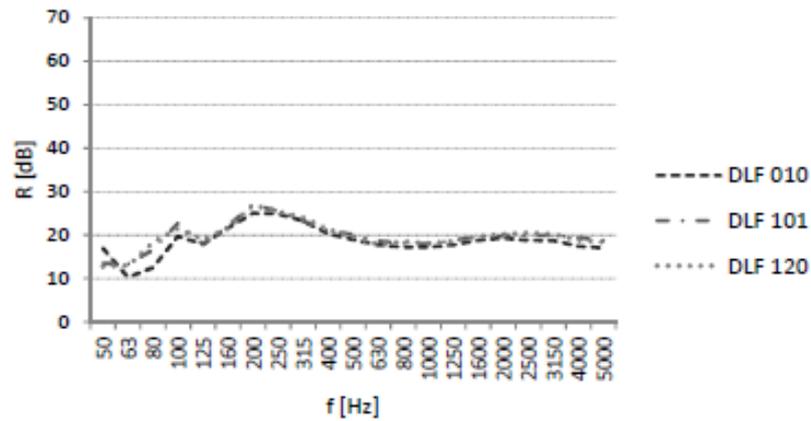


Abbildung 36: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF010 (ohne Absorber), DLF101 (10 Absorber-Paneele), DL120 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele außerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

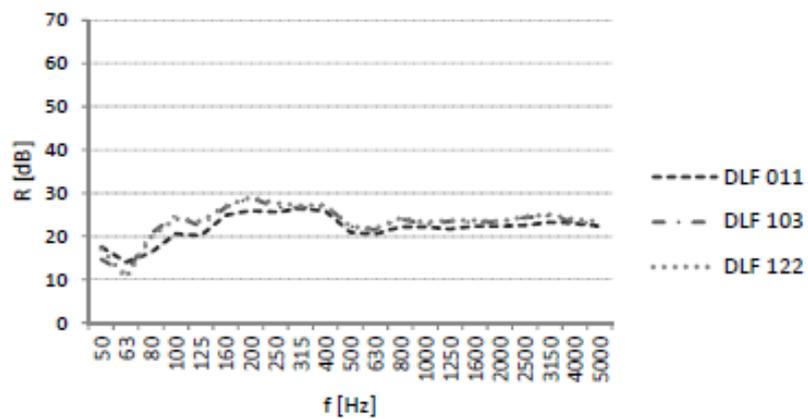


Abbildung 37: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF011 (ohne Absorber), DLF103 (10 Absorber-Paneele), DL122 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele außerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

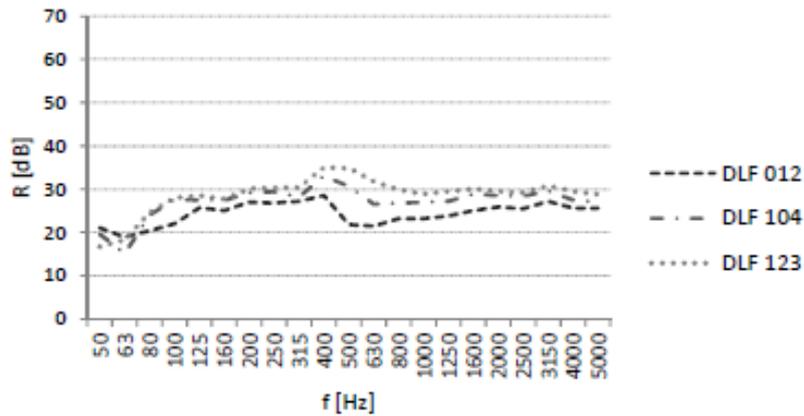


Abbildung 38: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF012 (ohne Absorber), DLF104 (10 Absorber-Paneele), DLF123 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele zum Teil innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

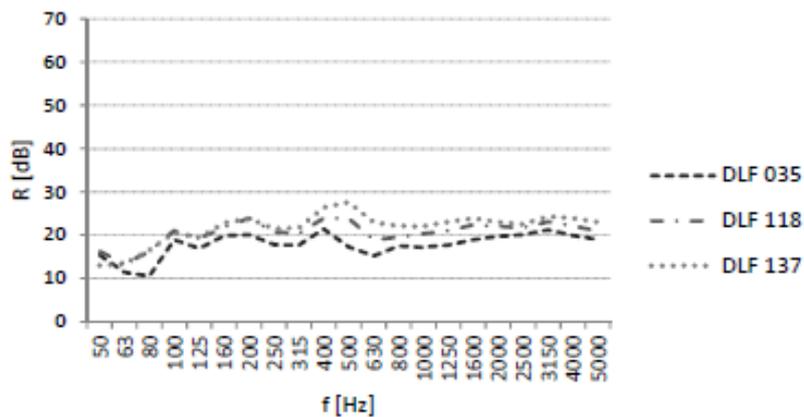


Abbildung 39: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF035 (ohne Absorber), DLF118 (10 Absorber-Paneele), DLF137 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele zum Teil innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Orientierte sich die Anbringung der Absorbermaterialien genau an den Öffnungen und dem direkten Pfad (also gewissermaßen als „Barriere“), so konnten Verbesserungen von 2,9 bis 5,3 dB festgestellt werden (siehe Abbildungen 40 und 41).

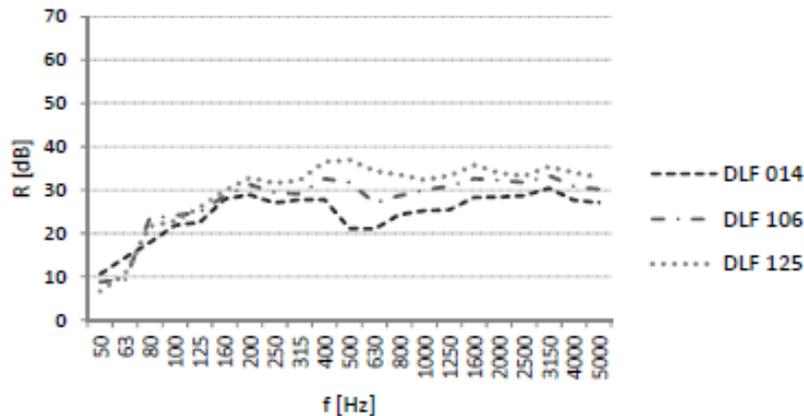


Abbildung 40: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF014 (ohne Absorber), DLF106 (10 Absorber-Paneele), DL125 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele komplett innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

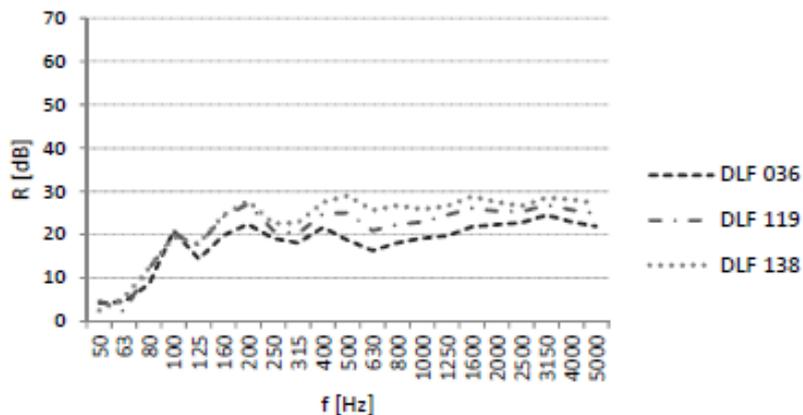


Abbildung 41: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF036 (ohne Absorber), DLF119 (10 Absorber-Paneele), DL138 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele komplett innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.6 Einfluss der kontinuierlichen / diskontinuierlichen Anordnung von absorbierenden Paneelen im Zwischenraum

Wenn man Konfigurationen, die eine kontinuierliche Anordnung von Absorberpaneelen haben, mit denen vergleicht die diskontinuierlichen Anordnungen aufweisen (bei sonst gleich gelassenen Parametern) kann kaum ein Unterschied in der Performance ausgemacht werden. Bei fixierten Nummern an Absorberpaneelen kann darüber hinaus kaum ein Unterschied hinsichtlich der Performance wahrgenommen werden, wenn diese auf die eine oder andere Art entlang des direkten Pfades bzw. zwischen den Öffnungen eingebracht werden (Siehe Abbildungen 42-45).

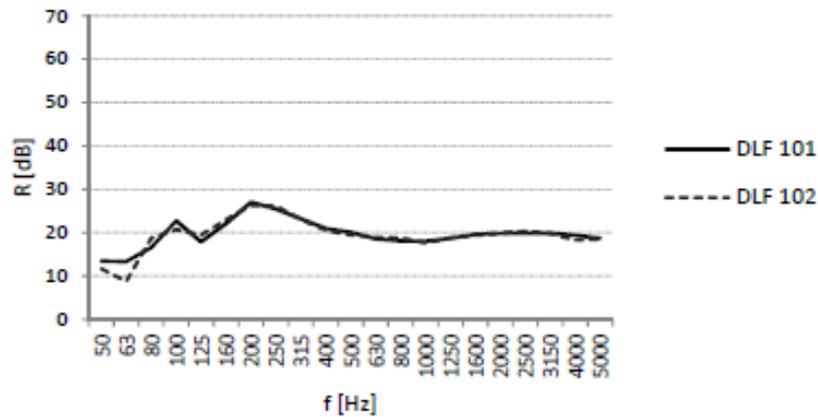


Abbildung 42: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF101 (10 Absorberpaneele in kontinuierlicher Anordnung), DLF102(10 Absorberpaneele in diskontinuierlicher Anordnung),; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

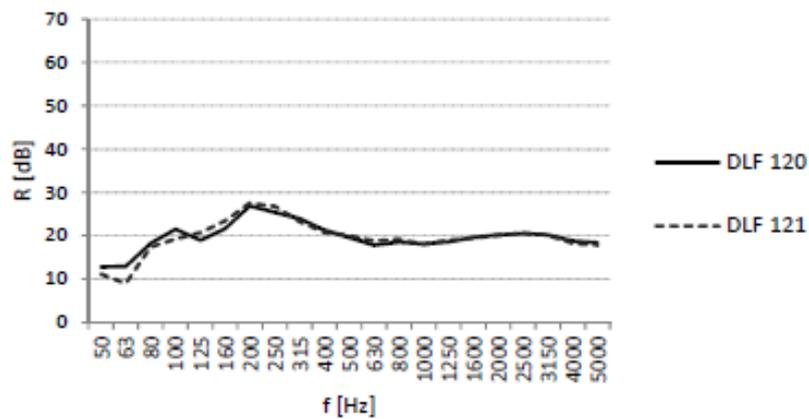


Abbildung 43: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF120 (10 Absorberpaneele in kontinuierlicher Anordnung), DLF121(10 Absorberpaneele in diskontinuierlicher Anordnung),; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

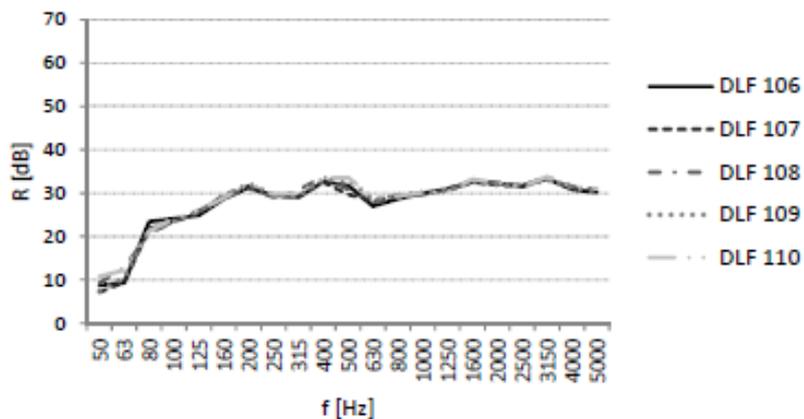


Abbildung 44: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF106-DLF110. Alle Parameter bis auf die Anordnung der 10 Absorberpaneele sind gleich. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

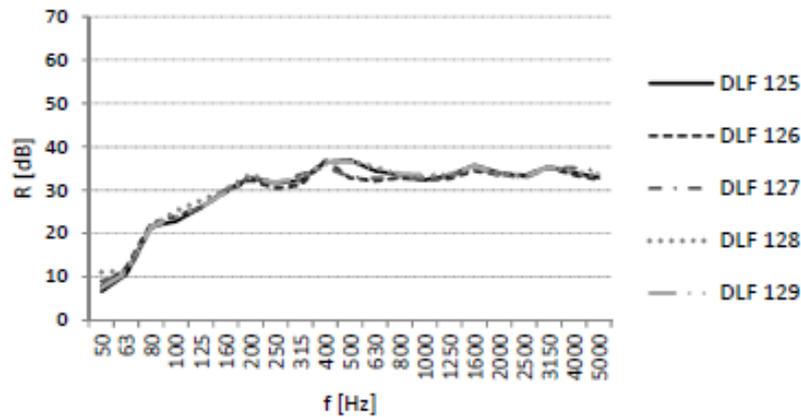


Abbildung 45: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF125-DLF129. Alle Parameter bis auf die Anordnung der 20 Absorberpaneele sind gleich. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Es kann also hinsichtlich der Absorber-Materialien folgendes festgehalten werden: Grundsätzlich sollte so viel Absorptionsmaterial wie möglich im Zwischenraum in den relevanten Bereichen eingebracht werden, jedoch nicht weit weg von Öffnungen und direkter Verbindung der Öffnungen.

2.2.7 Einfluss der Frequenzen

Bestimmte Effekte der gezeigten Verbesserungsmaßnahmen haben ein frequenzspezifisches Verhalten. Beispielsweise verhalten sich jene Konfigurationen, bei denen keine zusätzlichen Absorber-Materialien eingebracht wurden, relativ gleichartig hinsichtlich der Veränderung der Schalldämmmaße, sieht man von einem geringen Ausreißer bei etwa 500 Hz ab (Abbildungen 46 und 47). Bei direkt gegenüberliegenden Öffnungen nimmt das Schalldämmmaß vor allem bei den mittleren bis hohen Frequenzen stark ab. Bei Versatz der Öffnungen sieht man, dass in diesen Frequenzen bessere Schalldämmmaße erzielt werden, jedoch kaum ein Einfluss bei den niedrigen Frequenzen festgestellt werden kann.

Der Einfluss von zusätzlich eingebrachten Absorbermaterialien kann wie folgt beschrieben werden: Eine Verbesserung des Schalldämmmaßes kann vor allem bei den mittleren und hohen Frequenzen abgelesen werden. Der Ausreißer bei 500 Hz wird abgeflacht, wenn auch die sonstige spektrale Anordnung eine ähnliche Form wie die Fälle ohne Absorbermaterialien aufweist.

Generell zeigen die niederen Frequenzen (50 – 400 Hz) ein sehr anderes Verhalten, als die mittleren und hohen Frequenzen (500 – 5000 Hz). Die nachstehenden Abbildungen zeigen das Verhältnis von R und Delta R und den jeweiligen Frequenzen.

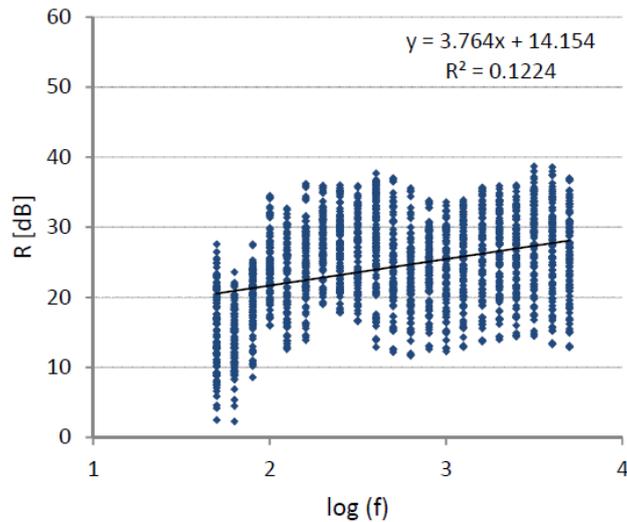


Abbildung 46: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und dem Schalldämmmaß für alle Messungen. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

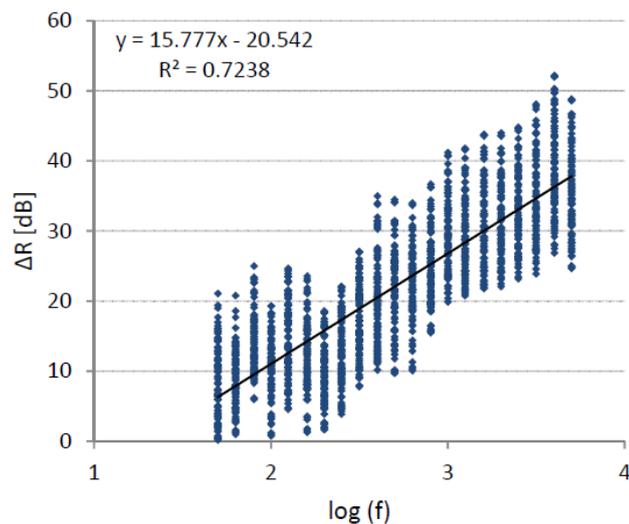


Abbildung 47: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für alle Messungen. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Für die Konfigurationen DLF010 – 014 (Abbildungen 48 und 49), DLF102 – 106 (Abbildungen 50 und 51) sowie DLF 121 – 125 (Abbildungen 52 und 53) sind die frequenzabhängigen Veränderungen von R und Delta R nachgestehend gezeigt.

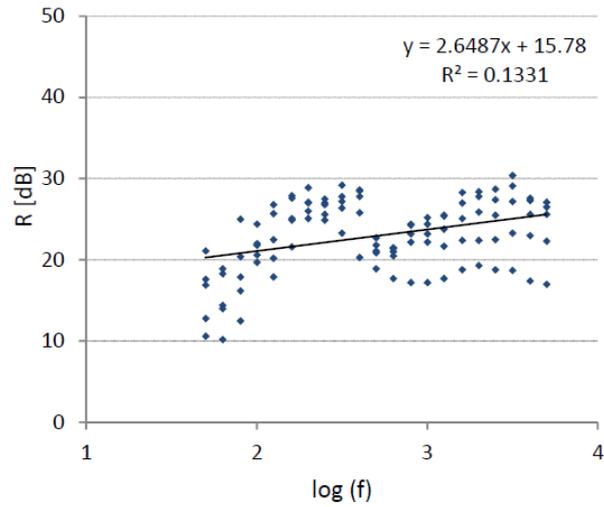


Abbildung 48: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF010-DLF014. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

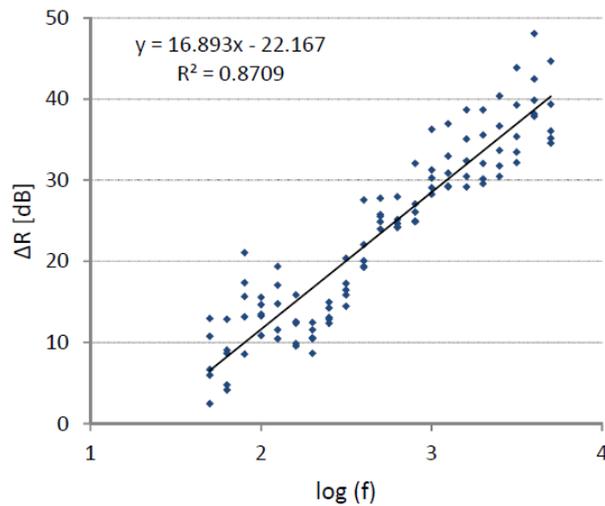


Abbildung 49: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF010-DLF014. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

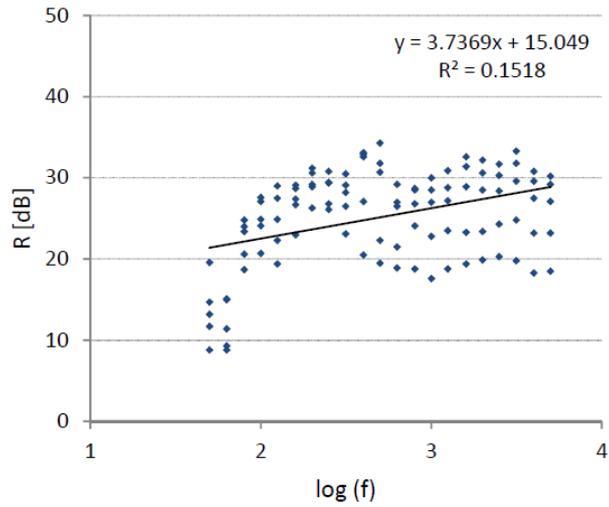


Abbildung 50: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF102-DLF106. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

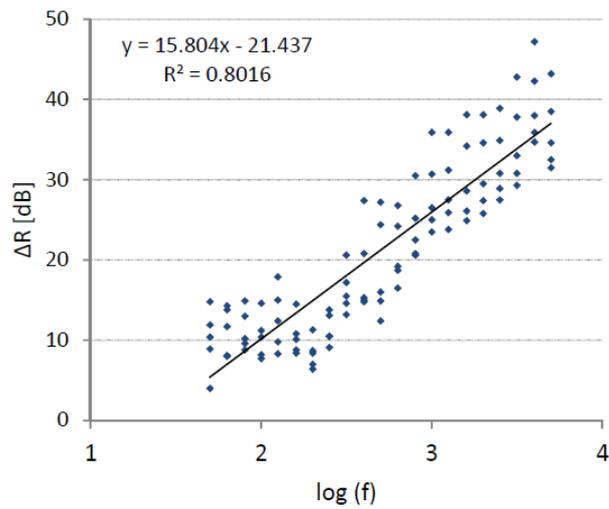


Abbildung 51: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF102-DLF106. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

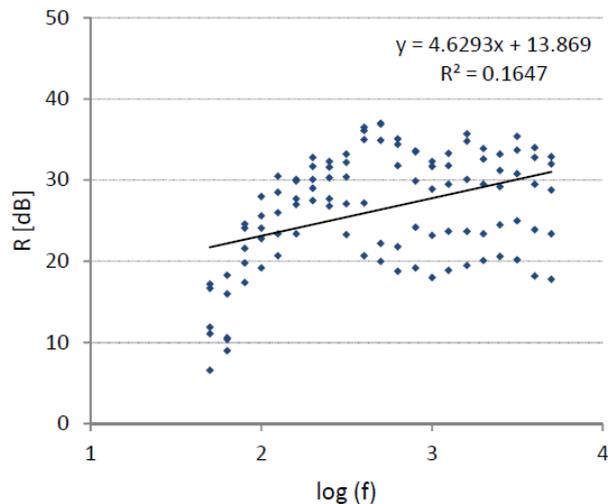


Abbildung 52: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF121-DLF125. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

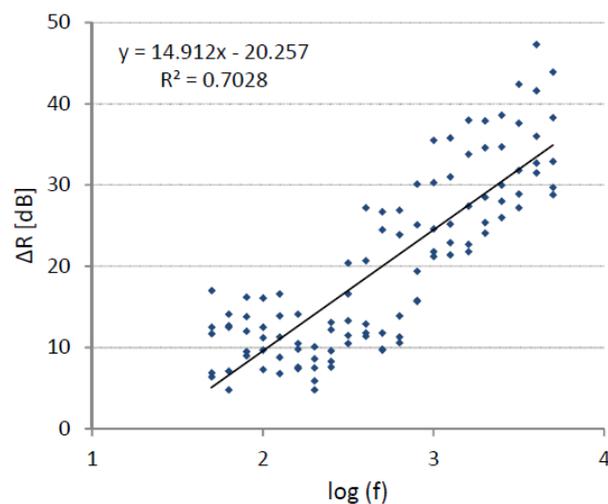


Abbildung 53: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF121-DLF125. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.2.8 Schalldämmung der Doppelfassade als Einzahlwert (bewertetes Schalldämmmaß)

Das bewertete Schalldämmmaß R_w dient als Einzahlwert der Bewertung von Konstruktionen. Es kann über die Berechnungsformel der ISO 717-1 (ISO 2013) aus den frequenzabhängigen Schalldämmmaßen ermittelt werden. Im Zuge des durchgeführten Projektes wurden diese Werte automatisiert mit den verwendeten Softwaretools der Firma Norsonic ermittelt. In den nachstehenden Abbildungen ist das Verhältnis der R_w -Werte und

von Variablen der Vorsektionen wie dem VF, der Distanz d und dem Öffnungsratio ($S_{\text{Open}} / S_{\text{Ref}}$) dargestellt (Abbildungen 54-56).

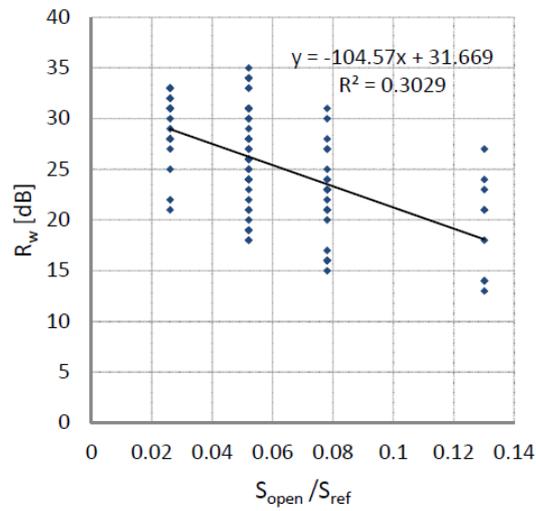


Abbildung 54: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Opening Area Ratio; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

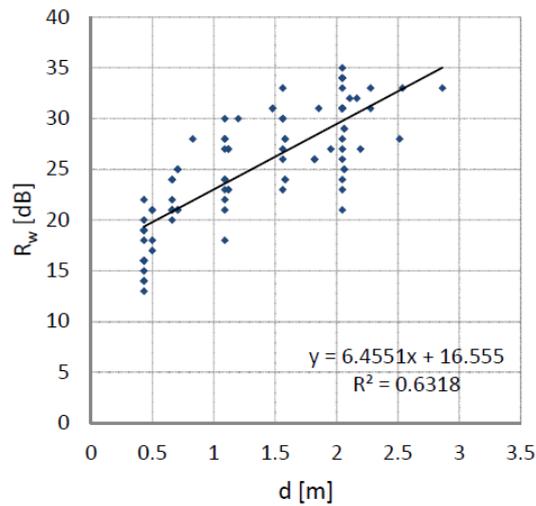


Abbildung 55: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Distanz d; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

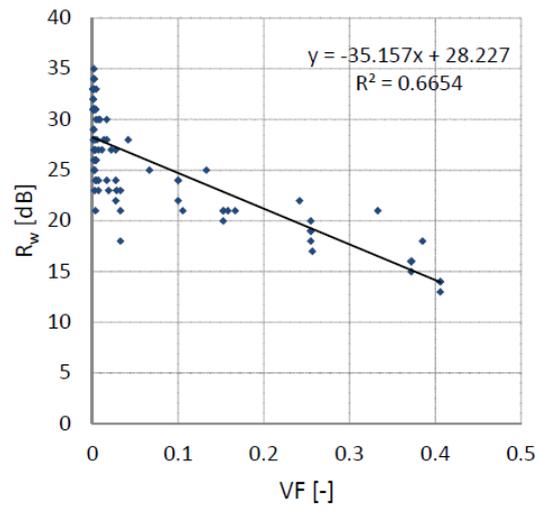


Abbildung 56: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Viewfaktor VF; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.3 Rechen-Modelle zur Abschätzung der Performance

Basierend auf den gezeigten Messreihen konnten nun Rechenmodelle für R_f und R_W aufgestellt werden, welche eine Abschätzung des Effektes ohne weitere Versuchsreihen zulassen, akzeptiert man geringe Abstriche in der Genauigkeit solcher Vorhersagen.

2.3.1 Empirisches Modell für die Abschätzung des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes R_f

Die Verringerung des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes (ΔR_f) ist die Differenz zwischen dem Schalldämmmaß der vollständig geschlossenen Konstruktion ($R_{f,max}$) und dem Schalldämmmaß einer spezifischen Konfiguration (R_f) bei einer bestimmten Frequenz.

$$\Delta R_f = R_{f,max} - R_f \text{ [dB]}$$

Aus einer statistischen Analyse der Messresultate mittels Regressionsanalyse konnte folgende Formel zur Vorhersage der Verringerung des Schalldämmmaßes erstellt werden:

$$\Delta R_f = 16,3 \times \log[f \times (1 - \alpha_m) \times S_F \times \sqrt{\log(VF \times 10000)}] \text{ [dB]}$$

In nachstehender Abbildung 57 werden die Ergebnisse aus dieser Formel und die Ergebnisse aus den Messserien verglichen.

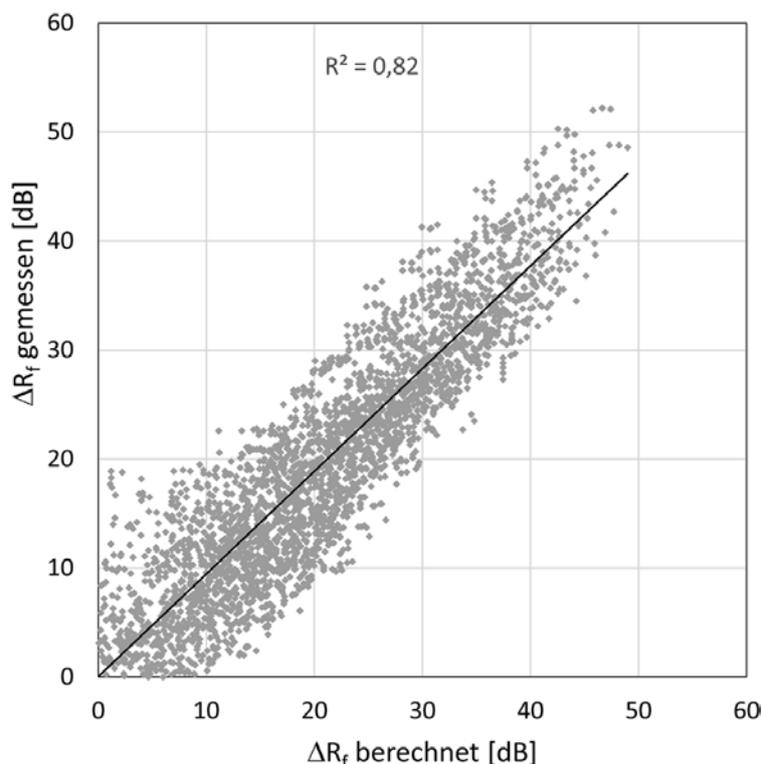


Abbildung 57: Errechnete versus gemessene ΔR_f -Werte. Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

Der in der Formel vorkommende Sichtfaktor VF kann unter Umständen sehr aufwendig in seiner Ermittlung sein. Daher wurde eine alternative Ausformulierung der Formel erstellt:

$$\Delta R_f = 16,3 \times \log[f \times G \times (1 - \alpha_m)^3] + 9 \text{ [dB]}$$

In dieser Beschreibung kommt ein Geometriefaktor G vor, welcher sich folgendermaßen berechnen lässt:

$$G = \frac{S_F \times D}{d}$$

Dabei beschreibt S_F den Quotient aus der Fläche der dem Senderraum zugewandten Öffnung S_{Open} und der Gesamtoberfläche der Experimentalwand S_{Ref} , D den Normalabstand zwischen den beiden Schalen und d den Abstand der Öffnungen (Mittelpunkt zu Mittelpunkt) zueinander.

Bei gegebenem ΔR_f ist die Berechnung von R_f anhand folgender Umformung einer der oben genannten Formeln möglich:

$$R_f = R_{f,max} - \Delta R_f [dB]$$

2.3.2 Empirisches Modell für die Abschätzung des bewerteten Schalldämmmaßes R_W

Ähnlich den Berechnungen von R_f kann auch beim bewerteten Schalldämmmaß R_W vorgegangen werden. Die Verringerung des bewerteten Schalldämmmaßes ΔR_W beschreibt die Differenz zwischen dem bewerteten Schalldämmmaß der geschlossenen Konstruktion ($R_{W,max}$) und dem bewerteten Schalldämmmaß einer spezifischen Öffnungskonfiguration R_W .

$$\Delta R_W = R_{W,max} - R_W [dB]$$

Analog zum frequenzabhängigen Schalldämmmaß konnte auch hier eine Formel aufgestellt werden, welche zur rechnerischen Vorhersage der Performance der Wand verwendet werden kann:

$$\Delta R_W = 10 \times \log \times [S_F \times \sqrt{VF} \times (1 - \alpha_m)^3] + 50 [dB]$$

In der nachstehenden Abbildung 58 kann eine Gegenüberstellung von gemessenen und errechneten R_W eingesehen werden – es zeigt sich ein recht hohes Bestimmtheitsmaß. Bei gegebenem ΔR_W kann R_W mittels des Formelzusammenhangs ermittelt werden:

$$R_W = R_{W,max} - \Delta R_W [dB]$$

Analog zur Vorsektion wurde eine Alternativ-Schreibweise der Annäherungsformel erstellt, welche einem das mühevollen Ermitteln des Sichtfaktors VF über Verwendung des in der Vorsektion vorgestellten Geometriefaktors G erspart.

$$\Delta R_W = 15,7 \times \log[G \times (1 - \alpha_m)^3] + 56 [dB]$$

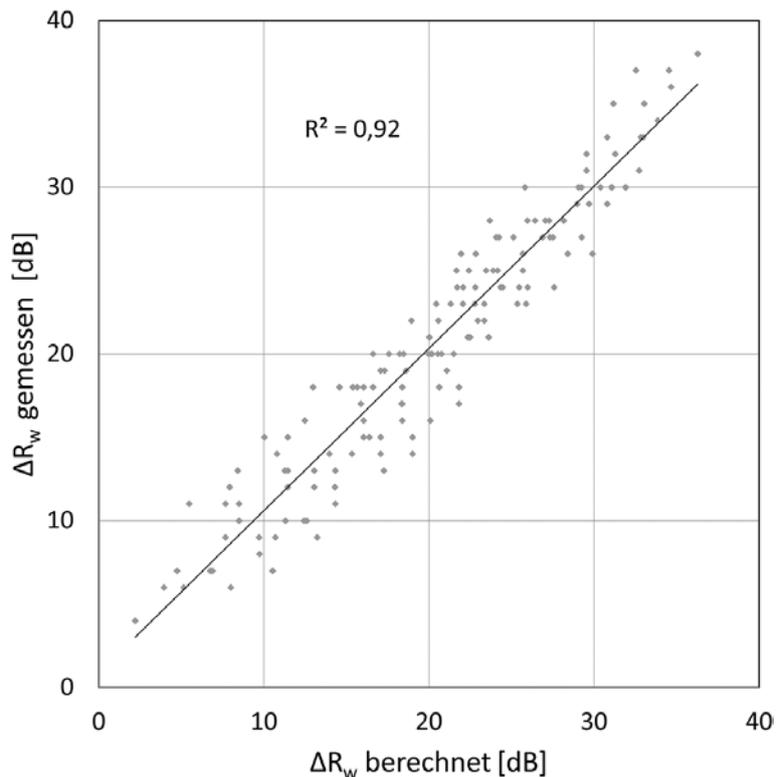


Abbildung 58: Errechnete versus gemessene ΔR_w -Werte. Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.

2.3.3 Genauigkeitsabschätzungen der Modelle für R_f und R_w

Die Abbildungen aus den Vorsektionen haben rechnerisch abgeschätzte und gemessene Werte für das bewertete Schalldämmmaß wie auch für das frequenzabhängige Schalldämmmaß gegenübergestellt. Die Resultate dieses Vergleichs unter Verwendung der Qualitätsindikatoren R^2 (Bestimmtheitsmaß) und RMSE (quadratischer Mittelwertfehler) sind in nachstehender Tabelle 4 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4: Bewertung der Berechnungsalgorithmen für frequenzbezogenes und bewertetes Schalldämmmaß unter Verwendung der Qualitätsindikatoren R^2 und RMSE.

Berechneter Parameter	Verwendete Formel(n)	R^2	RMSE
ΔR_f	Näherungsformel unter Verwendung von VF	0,82	4,9
R_f	VF-Formel + R_f -Formel	0,68	4,9
ΔR_f	Näherungsformel unter Verwendung von G	0,86	4,1
R_f	G-Formel + R_f -Formel	0,77	4,1
ΔR_w	Näherungsformel unter Verwendung von VF	0,92	2,2
R_w	VF-Formel + R_w -Formel	0,92	2,2
ΔR_w	Näherungsformel unter Verwendung von G	0,92	2,3
R_w	G-Formel + R_w -Formel	0,92	2,3

Es kann also prinzipiell von einer relativ hohen Annäherung der errechneten Werte an die Mess-Werte (und damit die gebaute Realität) ausgegangen werden.

3 Schlussfolgerungen

3.1 **Abgeleitete Abschätzungsmethoden für Planer**

Gleichwohl die empirischen Messergebnisse streng genommen nur für die gemessene Musterwand zutreffen, besteht dennoch die Möglichkeit anhand der Resultate dieser Messungen Rohfassungen von Planungsinstrumenten zu erstellen. Hierbei werden wesentliche Einflussgrößen in übersichtlicher und leicht fassbarer Form zusammengeführt. Die Parameter, die dabei beachtet werden (Frequenz, Öffnungsverhältnis, Sichtfaktor, Absorptionsverhalten im Zwischenraum), können als Richtschnur für Planer und Ingenieure dienen. Das ist insofern beachtlich, als dass eine Anzahl von potenziell wichtigen Einflussparametern (Resonanz-Phänomene, Aspekte der Wellentheorie) nicht explizit in den Modellen Eingang fanden.

In den folgenden Abbildungen sind die graphischen Hilfsmittel, welche im Projekt erstellt wurden, dargestellt: Abbildung 59 zeigt die Abnahme des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes im Vergleich zum geschlossenen Zustand der Fassade als Funktion der Frequenz f und des Geometriefaktors G . Dabei wird ein vollständig reflektierender, d.h. wenig bis gar nicht absorbierender Zwischenraum vorausgesetzt. Abbildung 60 illustriert den gleichen Zusammenhang, dieses Mal aber mit dem Geometriefaktor G als Bestandteil des Koordinatensystems (als Abzisse). Bild 61 zeigt den Korrekturfaktor $K\alpha$ für die absorptionsabhängige Korrektur der Ergebnisse aus den vorherigen Abbildungen. Die Korrektur der Abnahme des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

Abbildung 62 zeigt schlussendlich die Abnahme des bewerteten Schalldämmmaßes des jeweiligen Bauteils im Vergleich zum geschlossenen Zustand als eine Funktion des Geometriefaktors G und des mittleren Schallabsorptionsgrades α_m des Schalenzwischenraums.

Mithilfe der gezeigten Dimensionierungsdiagramme können für unterschiedliche Eingabewerte hinsichtlich Schalenabstand, Öffnungsflächenverhältnisse und deren räumliche Anordnung, sowie unterschiedliche Absorptionseigenschaften nun frequenzspezifische aber auch bewertete Schalldämmmaße zweischaliger Bauteile abgeschätzt werden.

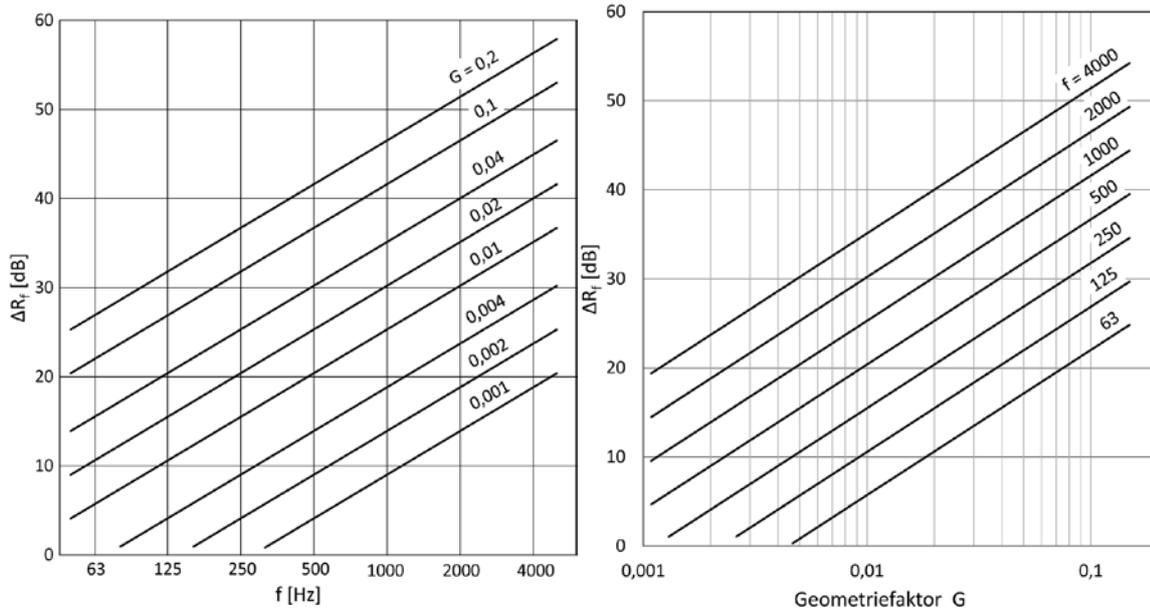


Abbildung 59 (links): Abnahme frequenzabhängigen Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelschaligen Fassade (Funktion der Frequenz F und des Geometriefaktors G) bei vollständiger Reflexion im Innenraum. Diagramm: Abbildung Bauphysik und Bauökologie

Abbildung 60 (rechts): Abnahme frequenzabhängigen Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelschaligen Fassade bei vollständiger Reflexion im Innenraum. (Abszisse: Geometriefaktor). Diagramm: Abbildung Bauphysik und Bauökologie

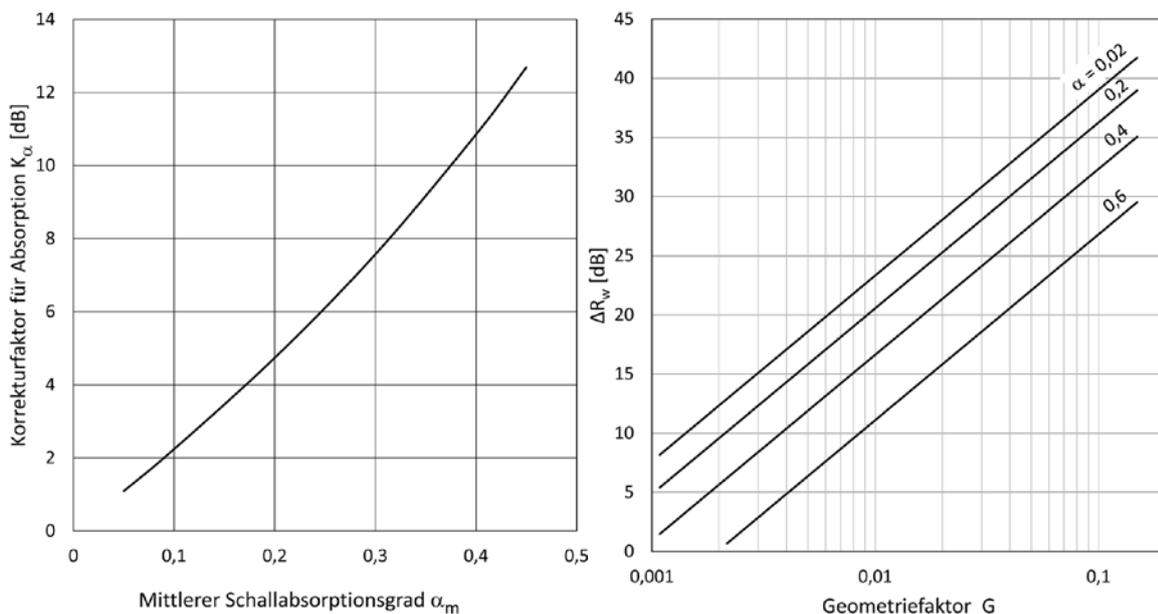


Abbildung 61 (links): Korrekturfaktor für die Abschätzung der Abnahme des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes als Funktion des mittleren Schallabsorptionsgrades des Zwischenraums des jeweiligen Bauteils

Abbildung 62(rechts): Abnahme des bewerteten Schalldämmmaßes des jeweiligen Bauteils im Vergleich zur geschlossenen Doppel-Fassade als Funktion von Geometriefaktor G und mittlerem Schallabsorptionsgrad.

Es ist an dieser Stelle aber darauf hinzuweisen, dass die gezeigten Abschätzungsmethoden bestimmten, aber wesentlichen Einschränkungen hinsichtlich einer praktischen Anwendung unterliegen:

- Alle abgeleiteten Zusammenhänge wurden in diesem Fall zwar aufgrund umfassender und sehr detaillierter Messungen abgeleitet, jedoch besitzt die zugrundeliegende Experimentalwand sehr spezifische Eigenschaften in Bezug auf Größe, Geometrie und konstruktiven Aufbau. Daher müssen Extrapolationen auf andere, davon abweichende Konstruktionen mit äußerster Vorsicht vorgenommen werden.
- Die hier vorgestellten Gleichungen und Bilder – allein aufgrund der zugrundeliegenden statistischen Annäherungsverfahren – nur für bestimmte Wertebereiche der Eingangsvariablen angewendet werden.
- Die vorgestellten Modelle dürfen nicht für jene doppelschaligen Konstruktionen verwendet werden, deren bewertetes Schalldämmmaß RW unter geschlossenen Bedingungen einen Wert von 40 dB unterschreitet.
- Das Verhältnis der Öffnungsflächenverhältnisse SF muss zwischen 0,01 und 0,05 liegen.
- Der Abstand zwischen geöffneten Elementen d darf nicht kleiner als 0,5 m und nicht größer als 3 m sein. Darüber hinaus sollte der Abstand zwischen den beiden Schalen D zwischen 0,3 und 1 m betragen.
- In diesem Zusammenhang ist ein weiterer Aspekt der Vorhersagegenauigkeit der vorgestellten Modelle von Relevanz. Während die rechnerische Abschätzung des bewerteten Schalldämmmaßes der untersuchten Wand ausgesprochen gute Resultate lieferte, zeigten die Abschätzungen der frequenzabhängigen Schalldämmmaße zum Teil (vor allem in tiefem Frequenzbereich) größere Abweichungen.

3.2 Publikationen, die im Rahmen des Projektes erstellt und publiziert wurden.

Diese sind auch in den Referenzen enthalten und sind folgende:

Bajraktari E. (2014): "Sound Insulation of Double-leaf Facades with Openings for natural Ventilation"; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): A. Mahdavi, M. E. Ilal, C. Kühn; Institut f. Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie, 2014.

Bajraktari, E.; Lechleitner, J.; Mahdavi, A. (2015a): Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia* 78 (2015), pp. 140–145.

Bajraktari, E.; Lechleitner, J.; Mahdavi, A. (2015b): The sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Building Acoustics*, Volume 22, No 3+4 (2015), pp. 163–176.

Mahdavi, A., Bajraktari, E., Lechleitner J. (2017a): "Computational Design Support for Double-facades with Concomitant Acoustical Protection and Natural Ventilation Capability"; Talk: Building Simulation 2017 - 15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, San Francisco, USA; 08-07-2017 - 08-09-2017; in: "Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017", IBPSA (ed.); IBPSA, (2017), 21 - 27.

Mahdavi, A., Bajraktari, E., Lechleitner J., Pont (2017b) : Doppelfassaden mit Kombination von Schallschutz und (natürlicher) Lüftungsmöglichkeit. *Bauphysik-Kalender 2017*, Herausgegeben von Nabil A. Fouad, 2017, 2017 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Tauber, C., Bajraktari, E., Lechleitner, J., Pont, U., Mahdavi, A. (2017): "Double Skin Facades with Natural Ventilation Capability: A Case Study of Acoustical Enhancement via Passive and Active (Noise Cancelling) Methods"; *Applied Mechanics and Materials*, 861 (2017), 537 - 544.

Darüber hinaus wurde Projekt mehrfach im Rahmen der akademischen Lehre an der TU Wien vorgestellt.

4 Ausblick und Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen des Forschungsprojektes LEIse_WAND kann abschließend folgendes festgehalten werden:

- Der Ansatz für eine Ermöglichung natürlicher Lüftung bei gleichzeitigem, ausreichendem Schallschutz ist vielversprechend. Die Performance der untersuchten Varianten kann durchaus als – im Rahmen der Möglichkeiten – vielversprechend bezeichnet werden.
- Die Aspekte von Materialität und Konstruktion wurden in diesem Projekt – in Folge des Sondierungscharakters – noch nicht ergründet. Dies ist ein Belang für ein aufzusetzendes Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit einer Realisierung eines Versuchsbauteils unter Realbedingungen, gemeinsam mit Wirtschaftspartnern.
- Die Lüftungsaspekte beschränkten sich in diesem Projekt auf die ungezwungene Lüftung durch den Zwischenraum der Fassade. Weder wurden Versuche mit Labyrinthen – vergleichbar denen, die in Lüftungsgeräten eingebaut sind – vorgenommen, noch wurde das Projekt auf thermische Aspekte durch die Lüftung fokussiert. Gleichwohl wurde auch der Einsatz einer erzwungenen Lüftung, beispielsweise mittels Ventilator, hier außer Acht gelassen. All diese Aspekte sind im Zuge von kooperativen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in Folgeforschungsbemühungen vertieft zu ergründen. Mit der Sondierung ist aber sehr wohl die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes unterstrichen worden und damit der Weg für Folgebemühungen geebnet worden.
- Die akustischen Parameter des Laboraufbaus berücksichtigten keine Schallbrücken bzw. waren keine schalltechnischen Entkopplungen erforderlich. Bei Realfassaden sind selbstverständlich diese Aspekte zu berücksichtigen.
- Die Anwendung von Absorber-Materialien zeigte einen Einfluss auf die Ergebnisse, daher ist es auch in diesem Bereich von Bedeutung weitere Entwicklungen und F&E-Bemühungen einfließen zu lassen.
- Die Bemühungen, Instrumente für Planer zu erstellen, basierten hier auf den Erkenntnissen der empirischen Experimente und der analytischen Untersuchungen. Gleichwohl wurden mit State-of-the-Art Simulationswerkzeugen parallel zu den anderen Bemühungen die Experimente virtuell wiederholt um zu ergründen, ob diese Werkzeuge zum Teil die aufwändige experimentelle Arbeit ersetzen könnten. Dabei zeigte sich, dass hier noch spezifische Arbeiten zu erfolgen haben, im Detail die Erhöhung der Vorraussagegenauigkeit von Simulationsmodellen bzw. dem analytischen Modell.
- Die Verwendung von Active-Noise-Cancelation mit einfachem und wirtschaftlichvertretbarem Aufwand wurde im Zuge des Projektes ebenfalls angesehen. Hier ist allerdings festzuhalten, dass in Folge der Diversität von Konstruktionen und der Komplexität von einwirkenden Schallereignissen an einer breiten Vertretung dieser Technologie in naher Zukunft stark gezweifelt werden muss, zumindest unter Einsatz von einfachen Signalumwandlern, Signalgeneratoren und Lautsprechern.

Grundsätzlich ist der nächste Schritt nun das Aufsetzen eines kooperativen F&E-Projektes mit Partnern aus der Wirtschaft und anderen wissenschaftlichen Partnern der Domäne, z.B. mit Fertig-Holzbau-Firmen und der Holzforschung Austria gemeinsam.

5 Verzeichnisse

5.1 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Anzahl der Personen in Europa (EU + Norwegen und Schweiz), welchen hohen Lärmbelastungen (unter Tags und in der Nacht) ausgesetzt sind. (Abbildung EEA 2012). ...	15
Abbildung 2 (links): Paneel-Raster beziehungsweise Darstellung der Einbausituation der Prüfwand im Labor der Abteilung Bauphysik und Bauökologie (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie); (rechts): Plandarstellung im Akustik-Labor (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)	18
Abbildung 3 (links): Photographie der zweischaligen Wand (eine Seite beplankt, eine Seite unbeplankt) (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie). (rechts): Zwischenraum zwischen den beiden Schalen. (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	18
Abbildung 4: Ausschnitt der Testwand mit einem eingesetzten „50%-Feld“. (Photographie: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)	18
Abbildung 5: technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)	19
Abbildung 6 (links):: technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: SONATECH bzw. Abteilung Bauphysik und Bauökologie)	20
Abbildung 7 (rechts): technische Spezifikationen / Abmessungen der Voll, 50% und 25% Paneele. (Darstellung: Kaeffer bzw. Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	20
Abbildung 8: Akustische Absorbercharakteristiken der beiden Absorbermaterialien: Kurve a stellt Pur-Skin 50 (Schaummaterial) und Kurve b die mikroperforierte Folie dar (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).	20
Abbildung 9: Messpunkte des statischen Mikrofons (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	21
Abbildung 10: statisches Mikrofon auf Stativ (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	21
Abbildung 11: rotierendes Mikrofon (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)....	21
Abbildung 12: verwendeter Kugellautsprecher (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	21
Abbildung 13: Simulations-Modell in Odeon (Wireframe-Modell) (Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	23
Abbildung 14: Illustration der Luft-Schalltransmissionswege durch ein mehrschaliges Trennelement. Darstellung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	24
Abbildung 15: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß (Rf) der Versuchswand in den geschlossenen Zuständen: Kurve a bezieht sich auf den einseitig geschlossenen Aufbau, Kurve b bezieht sich auf den zweischalig geschlossenen Zustand (Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	26
Abbildung 16: Konsequenz der unterschiedlichen geöffneten Paneele hinsichtlich Öffnungsgröße und Distanz d. Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	28

Abbildung 17: Verteilung der unterschiedlichen Öffnungskonfigurationen als Häufigkeitsverteilung. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	28
Abbildung 18: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von drei Konfigurationen einschaliger Natur (DLF002 – einschalig – ganz geschlossen; DLF003 – ein Panel geöffnet; DLF004 – zwei Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	30
Abbildung 19: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von fünf Konfigurationen zweischaliger Natur (DLF001 – einschalig – ganz geschlossen; DLF025 – ein Panel geöffnet; DLF010 – zwei Panele geöffnet; DLF015 – drei Panele geöffnet; DLF034 – fünf Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	31
Abbildung 20: frequenzabhängiges Schalldämmmaß von fünf Konfigurationen zweischaliger Natur mit jeweils größtmöglichem Abstand der Öffnungen zueinander (DLF001 – einschalig – ganz geschlossen; DLF024 – ein Panel geöffnet; DLF014 – zwei Panele geöffnet; DLF019 – drei Panele geöffnet; DLF036 – fünf Panele geöffnet) Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	31
Abbildung 21: Zusammenhang Öffnungsratio und frequenzabhängiges Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	32
Abbildung 22: Zusammenhang Öffnungsratio und Veränderung frequenzabhängiges Schalldämmmaß zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	32
Abbildung 23: Verhältnis zwischen Mittelpunktabstand und frequenzabhängigen Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	33
Abbildung 24: Verhältnis zwischen Mittelpunktabstand und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	33
Abbildung 25: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,5 m ²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 0,43m (DLF010), 0,66m (DLF011), 1,09m (DLF012), 1,56m (DLF013) und 2,05m (DLF014); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	34
Abbildung 26: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,25 m ²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 0,43m (DLF025), 0,83m (DLF026), 1,48m (DLF027), 2,16m (DLF028) und 2,05m (DLF024); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	34
Abbildung 27: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für fünf Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (0,25 m ²) aber variablen Distanzen der Öffnungen zu einander: 2,05m (DLF020), 2,11m (DLF021), 2,28m (DLF022), 2,54m (DLF023) und 2,86m (DLF024); Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	34
Abbildung 28: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für drei Konfigurationen mit konstanter Öffnungsfläche (1,25 m ²) aber vergrößernden Distanzen der Öffnungen zueinander und daher abnehmenden VF: DLF034: 0,4056; DLF035: 0,0326; DLF036: 0,0033; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	35
Abbildung 29: Frequenzabhängiges Schalldämmmaß für drei Konfigurationen mit konstanter Distanz (2,05) aber abnehmender Öffnungsfläche und daher abnehmenden VF: DLF036:	

0,0033; DLF019: 0,0024; DLF014: 0,0015; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	35
Abbildung 30: Verhältnis von VF und frequenzabhängigem Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	36
Abbildung 31: Verhältnis von VF und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß im Vergleich zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	36
Abbildung 32: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und frequenzabhängigem Schalldämmmaß; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	37
Abbildung 33: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und Veränderung des frequenzabhängigen Schalldämmmaß im Vergleich zur geschlossenen Fassade; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	37
Abbildung 34: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex ρ_m und Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF010, DLF101, DL120 (alle Parameter bis auf den Reflexionsgrad gleich) bei 1000 Hz; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	38
Abbildung 35: Verhältnis von mittlerem Reflexionsindex $[\rho]_m$ und Reduktion des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelfassade für die Konfigurationen DLF010, DLF101, DL120 (alle Parameter bis auf den Reflexionsgrad gleich) bei 1000 Hz; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	38
Abbildung 36: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF010 (ohne Absorber), DLF101 (10 Absorber-Paneele), DL120 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele außerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	39
Abbildung 37: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF011 (ohne Absorber), DLF103 (10 Absorber-Paneele), DL122 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele außerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	39
Abbildung 38: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF012 (ohne Absorber), DLF104 (10 Absorber-Paneele), DL123 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele zum Teil innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	40
Abbildung 39: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF035 (ohne Absorber), DLF118 (10 Absorber-Paneele), DL137 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele zum Teil innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	40
Abbildung 40: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF014 (ohne Absorber), DLF106 (10 Absorber-Paneele), DL125 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele komplett innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	41
Abbildung 41: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF036 (ohne Absorber), DLF119 (10 Absorber-Paneele), DL138 (20 Absorberpaneele); Absorberpaneele komplett innerhalb des „Opening Path“; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	41
Abbildung 42: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF101 (10 Absorberpaneele in kontinuierlicher Anordnung), DLF102(10 Absorberpaneele in diskontinuierlicher Anordnung);, Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	42
Abbildung 43: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF120 (10 Absorberpaneele in kontinuierlicher Anordnung), DLF121(10 Absorberpaneele in diskontinuierlicher Anordnung);, Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	42

Abbildung 44: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF106-DLF110. Alle Parameter bis auf die Anordnung der 10 Absorberpaneele sind gleich. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	42
Abbildung 45: frequenzabhängiges Schalldämmmaß für die Konfigurationen DLF125-DLF129. Alle Parameter bis auf die Anordnung der 20 Absorberpaneele sind gleich. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	43
Abbildung 46: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und dem Schalldämmmaß für alle Messungen. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie....	44
Abbildung 47: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für alle Messungen. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	44
Abbildung 48: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF010-DLF014. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	45
Abbildung 49: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF010-DLF014. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	45
Abbildung 50: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF102-DLF106. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	46
Abbildung 51: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF102-DLF106. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	46
Abbildung 52: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und des Schalldämmmaßes für DLF121-DLF125. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.	47
Abbildung 53: Verhältnis der Frequenz (Logarithmus der Frequenz) und der Veränderung des Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Wand für DLF121-DLF125. Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	47
Abbildung 54: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Opening Area Ratio; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	48
Abbildung 55: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Distanz d; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	48
Abbildung 56: Verhältnis zwischen bewertetem Schalldämmmaß und Viewfaktor VF; Diagramm: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	49
Abbildung 57: Errechnete versus gemessene ΔRf -Werte. Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	50
Abbildung 58: Errechnete versus gemessene ΔRW -Werte. Abbildung: Abteilung Bauphysik und Bauökologie.....	52
Abbildung 59 (links): Abnahme frequenzabhängigen Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelschaligen Fassade (Funktion der Frequenz F und des Geometriefaktors G) bei vollständiger Reflexion im Innenraum. Diagramm: Abbildung Bauphysik und Bauökologie.....	54

Abbildung 60 (rechts): Abnahme frequenzabhängigen Schalldämmmaßes im Vergleich zur geschlossenen Doppelschaligen Fassade bei vollständiger Reflexion im Innenraum. (Abszisse: Geometriefaktor). Diagramm: Abbildung Bauphysik und Bauökologie	54
Abbildung 61 (links): Korrekturfaktor für die Abschätzung der Abnahme des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes als Funktion des mittleren Schallabsorptionsgrades des Zwischenraums des jeweiligen Bauteils	54
Abbildung 62(rechts): Abnahme des bewerteten Schalldämmmaßes des jeweiligen Bauteils im Vergleich zur geschlossenen Doppel-Fassade als Funktion von Geometriefaktor G und mittlerem Schallabsorptionsgrad.....	54

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Wand. (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie)	19
Tabelle 2: verwendete Messinstrumente und Beschreibung. (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	22
Tabelle 3: Auszug aus den getesteten Konfigurationen (Quelle: Abteilung Bauphysik und Bauökologie).....	27
Tabelle 4: Bewertung der Berechnungsalgorithmen für frequenzbezogenes und bewertetes Schalldämmmaß unter Verwendung der Qualitätsindikatoren R^2 und RMSE.	52

5.3 Literaturverzeichnis

Arenas, J.P., Crocker M.J. (2010): Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration* 44 (7):12-17

Artmann, N., Manz, H., & Heiselberg, P. (2006). Potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in present and future climates in Europe. In R. Compagnon, P. Haefeli, & W. Weber (Eds.), *PLEA2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006: Conference Proceedings Volume 2.

Artmann, N., Manz, H., & Heiselberg, P. (2008). *Passive Cooling of buildings by night-time ventilation*. Duebendorf: Schlussbericht. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK. Bundesamt für Energie BFE

Bajraktari E. (2014): "Sound Insulation of Double-leaf Facades with Openings for natural Ventilation"; Betreuer/in(nen), Begutachter/in(nen): A. Mahdavi, M. E. Ilal, C. Kühn; Institut f. Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie, 2014.

Bajraktari, E.; Lechleitner, J.; Mahdavi, A. (2015a): Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia* 78 (2015), pp. 140–145.

Bajraktari, E.; Lechleitner, J.; Mahdavi, A. (2015b): The sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Building Acoustics*, Volume 22, No 3+4 (2015), pp. 163–176.

Beule, B., Ortscheid, J. (2001) *Lärmbelästigung durch Straßenverkehr – Aktion der Stiftung Warentest und des Bundesumweltamtes – Leseraktion Straßenlärm – Lärmgutachten*. Umweltbundesamt, februar 2001.

Buratti, C. (2002): Indoor noise reduction index with open window. *Applied Acoustics* 63 (2002), pp. 431–451.

De Salis, M. H., Oldham, D. J., Sharples, S.(2002): Noise control strategies for naturally ventilated buildings. *Building and Environment* 37, pp. 471–484.

Díaz, J., Ekelund, M., Gothe, R., Huber, M., Jordan, A., Kallischnigg, G, Kampet, T., Kappos, A., López Santiago, C., Mansfield, T., Maschke, C., Niemann, H., Welker, D. (2001) *Traffic Noise Pollution – A State-of-the-Art Review – Final Report*. Within Framework of the Programme Pollution related Diseases. www.tu-berlin.de/bzph/tnp2001 (last accesseds 2017)

Dreger, S., Meyer, N., Fromme, H., Bolte, G. (2015). Environmental noise and incident mental health problems: A prospective cohort study among schoolchildren in Germany. *Environmental Research* 143 (2015) 49–54

EEA (2012). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps> (last accessed 2015)

EN ISO (2010): EN ISO 10140-2:2010: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation.

Field, C. D., Fricke, F. R. (1995): The attenuation of road traffic noise entering buildings through ventilation openings using quarter wave resonators: mechanism of attenuation and model experiments. *Building Acoustics* 1995; 2(4), pp. 625–635.

Fuchs, H. V. (2010): *Schallabsorber und Schalldämpfer*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.

Halperin, D. (2014): Environmental noise and sleep disturbances: A threat to health? *Sleep Science* 7 (2014) 209-212.

Hintermayer M. (2013): "Gleichzeitige Gewährleistung von natürlicher Belüftung und ausreichendem Schallschutz via innovativer Fassadenkonstruktionen"; Betreuer/in(nen): A. Mahdavi; Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie, 2013; Abschlussprüfung: 20.06.2013.

ISO (1998) – ISO 140-5 Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Systems. Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and facades.

ISO (2013) – ISO 717-1, Acoustics – rating of sound insulation in building and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation.

Jakob, A., Möser, M. (2003a) Active control of double-glazed windows, Part I: Feedforward control. *Applied Acoustics* 64: 163-182

Jakob, A., Möser, M. (2003b) Active control of double-glazed windows, Part I: Feedback control. *Applied Acoustics* 64: 183-196

Kaeffer. 2015. www.microsorber.com (accessed 05.09.2015).

Khalegi, A., Bartlett, K., Hodgson, M.(2007): Relationship between ventilation, air quality and acoustics in ‚green‘ and ‚brown‘ buildings. 19th International Congress of Acoustics. Madrid 2007.

Li, X., Song, Z., Wang, T., Zheng, Y., Ning, X. (2016): Health impacts of construction noise on workers: A quantitative assessment model based on exposure measurement. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 721-731.

Mahdavi, A. (1986): Das Dilemma immissionsseitiger Lärmkontrolle. *Baummagazin*, 3/86, S. 134–138.

Mahdavi, A. (1996): Approaches to Noise Control: A Human Ecological Perspective. *Proceedings of the NOISE-CON 96*, S. 649–654.

Mahdavi, A. (1997): Thermal and Acoustical Performance of „Buffer Rooms“. *ASHRAE Transactions*, Volume 99 (1997), Part 1. 1092–1105.

Mahdavi, A. (2009): Applying High-Tech Environmental Control Strategies in a low-Tech Context: An innovative Approach to smart passive cooling in buildings; Hauptvortrag: The 40th International Congress on Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, Belgrad

(eingeladen); 02.12.2009 - 04.12.2009; in: "The 40th International Congress on Heating, Refrigeration and Air-Conditioning", B. Todorovic (Hrg.); Eigenverlag, (2009), 8 S.

Mahdavi, A.; Çakir, O.; Pröglhöf, C.; Lechleitner, J. (2012): Sound insulation of a double-leaf wall system with openings for natural ventilation. Proceedings of the 5th International Building Physics Conference (IBPC), Kyoto, Japan, 2012, pp. 1115–1118.

Mahdavi, A.; Bajraktari, E.; Hintermayer, M.; Lechleitner, J.(2013): Sound Insulation of Double Facades with Operable Windows: an Empirical Inquiry. „CLIMA 2013–11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings“, Kabele, K.; Urban, M.; Suchý, K.; Lain, M. (Ed.); Society of Environmental Engineering (STP), 1/1/1 (2013), Paper-Nr. 275.

Mahdavi, A., Bajraktari, E., Lechleitner J. (2017a): "Computational Design Support for Double-facades with Concomitant Acoustical Protection and Natural Ventilation Capability"; Talk: Building Simulation 2017 - 15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, San Francisco, USA; 08-07-2017 - 08-09-2017; in: "Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017", IBPSA (ed.); IBPSA, (2017), 21 - 27.

Mahdavi, A., Bajraktari, E., Lechleitner J., Pont (2017b) : Doppelfassaden mit Kombination von Schallschutz und (natürlicher) Lüftungsmöglichkeit. Bauphysik-Kalender 2017, Herausgegeben von Nabil A. Fouad, 2017, 2017 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

MA22 (Hrsg.), (2015): Urban Heat Islands Strategieplan Wien, Jürgen Preiss, Christian Härtel Wiener Umweltschutzabteilung – Magistratsabteilung 22, 2015

Migneron, J-P., Potvin, A. (2012): Noise reduction of a double-skin facade considering opening for natural ventilation. Acoustics 2012 Hong Kong. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 131, No. 4, Pt. 2, pp. 3320–3320. April 2012.

Norsonic (2014). www.norsonic.com (accessed 2017)

Nunes, Z.; Wilson, B.; Rickard, M.: An assessment of the acoustic performance of open windows, in line with ventilation requirements for natural ventilation. InterNoise 2010.

Oldham, D. J., De Salis, M. H., Sharples, S.(2002): Reducing the ingress of urban noise through natural ventilation openings. Indoor Air 14 (2002), pp. 118–126.

Parkin, S. (2004): A Description of a Ventilated Double-Skin Façade Classification. ICBEST 2004 – The International Conference on Building Envelope Systems and Technologies, Sydney, 31 March – 02. April 2004.

Recio, A., Linares, C., Banegas, J.R., Díaz, J. (2016) The short-term association of road traffic noise with cardiovascular, respiratory, and diabetes-related mortality. Environmental Research 150 (2016) 383-390

Rossing, T. D. (ed.), (2007): Springer Handbook of Acoustics. New York: Springer Science + Business Media. 2007.

SONATECH. 2012. <http://www.sonatech.at/> (accessed 05.03.2014).

Sygna, K., Aasvang, G.M., Aamodt, G., Oftedal, B., Krog, N.H. (2014): Road traffic noise, sleep and mental health. *Environmental Research* 131 (2014) 17-24.

Tauber, C., Bajraktari, E., Lechleitner, J., Pont, U., Mahdavi, A. (2017): "Double Skin Facades with Natural Ventilation Capability: A Case Study of Acoustical Enhancement via Passive and Active (Noise Cancelling) Methods"; *Applied Mechanics and Materials*, 861 (2017), 537 - 544.

Tobías, A., Recio, A., Díaz, J., Linares, C. (2015). Health impact assessment of traffic noises in Madrid (Spain). *Environmental Research* 137 (2015) 136-140

Tong, Y. K., Tang, S. K. (2013): Plenum window insertion loss in the presence of a line source – A scale model study. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 133, No. 3, March 2013.

Viveiros, E. B., Gibbs, B. M. (1997): Sound insulation of ventilation louvres. *Proceedings of Internoise*, 97, 1997. pp. 739–742.

Wang, Z., Ng, C. F., Ngai E. (2012): Ventilated window design with multiple resonators and panel absorbers. *Inter-Nise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, InterNoise12*, New York City NY, pp. 1146–1158.