

F 3150

Holger Techen, Jochen Krimm

Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Fassadenoberflächen im Stadtraum

Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen und -strukturen im Hinblick auf eine akustische Bewertung des Außenraumes / Stadtraumes an der Empfängerposition – Bestimmung von Transformationseffekten

> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

F 3150

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0395-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Fassadenoberflächen im Stadtraum –

Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen und – strukturen im Hinblick auf eine akustische Bewertung des Außenraumes / Stadtraumes an der Empfängerposition - Bestimmung von Transformationseffekten

Endbericht

Projektlaufzeit: 01.09.2016 – 30.11.2018 Der Bericht umfasst 87 Seiten Text

Autoren: Holger Techen, Frankfurt University of Applied Sciences Jochen Krimm, Frankfurt University of Applied Sciences

Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurter Forschungsinstitut für Architektur - Bauingenieurwesen - Geomatik

Frankfurt, 16. Juli 2019

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert (AZ: SWD-10.08.18.7-16.26) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.



Kurzbeschreibung

Akustisch wirksame Fassaden

Infolge des anhaltenden Zuzugs in die Metropolen, werden die bestehenden städtischen Strukturen stark nachverdichtet. Durch die hierfür notwendigen Neubauten, nimmt die Zahl der Fassadenflächen im Stadtraum deutlich zu. In der Folge führt dies zu mehr Lärm im Stadtraum, da der Schall der vorhandenen Verkehrslärmquellen an den, zumeist schallhart ausgeführten Fassaden reflektiert werden. Die Lärmerhöhung entsteht durch die Summierung der Reflexionen mit dem vorhandenen Direktschall. In der Akustik ist das Phänomen lange bekannt, jedoch beziehen sich aktuelle Messverfahren, technische Regeln und normierte Berechnungen nur auf die Materialität und nicht auf den Kontext der Anordnung im Stadtraum. Aufgrund der, daraus resultierenden, ungenügenden Datenlage konnte dieser Effekt bisher keinen Eingang in die Planungspraxis finden. Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes die akustische Wirkung von Fassadenoberflächen im Kontext des Stadtraums bestimmt. Für diesen Zweck wurde ein mobiles Fassadenlabor entwickelt um verschiedene Fassadenoberflächen an ausgewählten Standorten in Abhängigkeit des in situ vorhandenen Lärms akustisch zu bestimmen. Das Mess- und Auswerteverfahren zur akustischen Bestimmung der Oberflächenqualitäten wurde hierfür derart entwickelt, dass die in situ vorhandenen Lärmquellen als Eingangssignal genutzt werden. Dementsprechend wurden die Standorte so gewählt, dass eine Schallquelle im Soundscape des Ortes deutlich dominant wahrzunehmen war. Über die Standortauswahl konnten so die wichtigsten Verkehrslärmarten Straße, Schiene und Luftverkehr abgedeckt werden. Während der zwei Monate dauernden Messkampagne im Jahr 2017, wurden an acht verschiedenen Standorten, jeweils fünf verschiedene Fassadenoberflächen gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass über strukturierte Fassadengeometrien eine Pegelreduzierung von 4 dB in 4 m Entfernung zur Fassade erreicht werden kann. Bei sehr stark strukturierten Fassadenoberflächen ändert sich die erreichte Pegelreduzierung nur wenig, wenn sich die Einwirkungsrichtung der Schallquelle ändert. Die gemessene Pegelreduzierung lässt sich, bei gleicher Anordnung sowohl für Flug- als auch für Straßenlärm erreichen. Bei weniger strukturierten Fassadenoberflächen wurden für die Pegeländerung bei Flugund Straßenverkehrslärm stark unterschiedliche Pegeländerungen festgestellt. In zukünftigen Forschungsvorhaben werden die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung als Grundlage zur Entwicklung von Planungsparametern für die Entwicklung von akustisch wirksamen Fassaden dienen. Mit Anwendung dieser Planungsparameter wird eine verdichtete, aber trotzdem leisere Stadt in Zukunft möglich werden.

Schlagworte: Fassaden, Reflexionsvermögen, akustische Wirkung, Metropolen, Kontext, Messverfahren, Feldmessung, Verkehrslärm, Stadtraum



Abstract

Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Fassadenoberflächen im Stadtraum

Zum Thema der akustischen Wirkung einer Fassade im Stadtraum liefert die Akustik bisher überwiegend nur Ergebnisse aus zwei-dimensionalen Betrachtungen heraus. Vorhandene Messverfahren und Schallausbreitungsberechnungen basieren auf Materialkennwerten, die sich nicht in Planungsparameter für Stadträume überführen lassen. Aus diesem Grund findet das Reflexionsverhalten von Fassaden und die daraus resultierende Pegelerhöhung des Umgebungslärms im Stadtraum, bisher keinen Eingang in die Planungspraxis von Stadtplanern und Architekten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden fünf Fassadenoberflächen, die eine unterschiedliche Oberflächengeometrie aufwiesen, in einem mobilen Fassadenprüfstand an acht Orten im Stadtgebiet von Frankfurt am Main gemessen. Die fünf unterschiedlichen Fassadenoberflächen und das mobile Fassadenlabor wurden eigens hierfür entwickelt. Die vorhandenen Lärmquellen vor Ort und die notwendige Logistik für das mobile Fassadenlabor bestimmten die Standortauswahl. Zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, der eingesetzten Fassadenoberflächen, wurden die vorhanden Lärmquellen vor Ort als Eingangsgröße genutzt. Über den Vergleich der Messdaten von strukturierten Fassadenoberflächen mit den Messdaten einer glatten, schallharten Referenzfläche, konnte die Pegelveränderung zwischen beiden Oberflächen bestimmt werden. Dabei konnten Pegeländerungen von 1 dB - 6 dB für einzelne Frequenzbänder. oder breitbandige Pegelveränderungen von 0,5 dB - 4 dB festgestellt werden. So konnten Erkenntnisse hinsichtlich der frequenzabhängigen Wirkung von strukturierten Fassadenoberflächen gewonnen werden. Darüberhinaus lieferte die Betrachtung der eingesetzten Fassadengeometrien, in Abhängigkeit des Ortes, der Einwirkungsrichtung, des Lautstärkepegels und der Frequenzspektren von Verkehrslärmschallquellen, Erkenntnisse hinsichtlich der Gewichtung einzelner Parameter, im Bezug auf die erreichte Pegeländerung.

Schlagworte: Fassaden, Reflexionsvermögen, akustische Wirkung, Metropolen, Kontext, Messverfahren, Feldmessung, Verkehrslärm, Stadtraum



Abstract Englisch

Determining the acoustic effectiveness of facade surfaces in urban space

Today's findings on the acoustical effectiveness of facades in urban spaces derive from twodimensional investigations. In current measurement procedures and sound propagation calculations the quality of reflections is based on material properties. Yet these material properties cannot be transferred into design parameters for urban spaces. This is the reason why reflection properties of facades and the resulting level increases in surrounding urban spaces are not implemented in urban or architectural design processes up to now. Five different facade surfaces were evaluated in a mobile test rig. A measurement campaign was conducted at eight locations in the urban space of Frankfurt/Main A mobile test rig and five different facade modules were developed to fit the measurement setup. The selection of the measurement locations was determined by the noise sources, which are present on site and the necessary requirements regarding the logistics of the mobile test rig. The present noise sources on site were used to determine the acoustical properties of different facade surfaces in the mobile test rig. A comparison of measurement data from different structured surfaces with the measurement data of a plain hard reflective surface determined the level change between both surfaces. Level changes of 1 dB - 6 dB in single frequency bands or broadband level changes of 0,5 dB - 4 dB were reported. The evaluation of the measurement data provides insight on the frequency dependent effect of structured geometries. Findings regarding the weighting of parameters in relation the achieved level change were derived from the investigation of facade geometries in dependency to the location of the mobile test rig, the direction of the sound impact, noise level and frequency spectrum of traffic noise sources.

Keywords: Facades, reflection properties, acoustic effectiveness, metropolises, context, measurement procedure, on site measurement, traffic noise, urban space



 1 Einleitung 1.1 Vorwort 1.2 Der Urbane Raum in der Akustik 	7 7 7
 1.3 Das mobile urbane Akustiklabor 2 Entwicklung der Messungen 2.1 Entwicklung des mobilen Labors. 2.2 Entwicklung der räumlichen Anordnung der Messmikrofone. 2.3 Eingangsgröße Messsignal	10 11 . 11 . 14 . 15 . 15
 2.3.3 Längere Messzeiträume mit gleicher Länge miteinander vergleichen 2.3.4 Überprüfung der Vergleichbarkeit der Messsignale 2.4 Das Messequipement 	. <i>16</i> . <i>16</i> . 16
 3 Entwicklung der Testmodule 3.1 Grundlegende Varianten 3.2 Entwicklung des Kunststein Moduls Lithodecor 3.3 Entwicklung des Wärmedammverbundsystemmoduls Alsecco 3.4 Entwicklung des Textil Fassaden Moduls 3.5 Entwicklung des Metall Moduls 	18 . 18 . 19 . 19 . 20 . 21
 4 Auswahl der Standorte in Frankfurt/Main 4.1 Frankfurt, Europaviertel, Europa Allee/ Pariser Straße: 4.2 Frankfurt, Innenstadt, Taunusanlage: 4.3 Frankfurt, Innenstadt Ost, Lange Straße 14, Altenheim: 4.4 Frankfurt, Nordend, Matthias-Beltz-Platz: 4.5 Frankfurt, Innenstadt, Goetheplatz: 	22 . 25 . 25 . 26 . 27 . 28
 4.6 Frankfurt, Niederrad, Lyoner Str 1:	. 29 . 30 . 31 . 32 . 33 . 33
 4.12 Frankfurt, Schlössstraße 29-31. 4.13 Genehmigungsverfahren. 5 Die Feldmessungen. 5.1 Durchführung einer Messung 	. 34 . 35 37 . 38
6 Auswertung eines Datensatzes 6.1 Vorgehensweise. 6.1.1 Zusammenfügen der einzelnen Audiodateien einer Messung 6.1.2 Aufteilung in Auswertungsintervalle. 6.1.3 Erstellung von Pegel-Frequenzkurven. 6.1.4 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven 6.1.5 Auswertung der Datensätze anderer Standorte 6.1.6 Anordnung und Messdaten der Mikrofonpositionen.	40 . 40 . 40 . 41 . 41 . 42 . 46 . 47
 7 Ergebnisse der Auswertungen der Testfassaden 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für einzelne Testfassaden 7.1.1 Referenzfläche. 7.1.2 90° geöffnete Lamelle 7.1.3 45° geklappte Lamelle 7.1.4 WDVS System. 	51 51 51 53 54 56



2	7.1.5	Vergleich der Messergebnisse der vertikalen Einbaulage des WDVS Moduls	an
۱	versch	niedenen Standorten	60
2	7.1.6	Vergleich der Messergebnisse der horizontalen Einbaulage des WDVS Moduls	in
I	Abhän	ngigkeit verschiedener Lärmarten	60
2	7.1.7	Textil-Fassaden Modul	62
2	7.1.8	Metallfassade	65
2	7.1.9	Kunststein	67
7.2	Ein	nfluss der örtlichen Rahmenbedingungen auf die Ergebnisse	70
,	7.2.1	Einfluss der Einwirkungsrichtung der Lärmquelle	70
ĵ	7.2.2	Einfluss des Pegels der Lärmquelle	71
2	7.2.3	Einfluss der Eigenschaft der Lärmquelle	72
2	7.2.4	Einfluss der umgebenden Flächen	72
7.3	Ska	alierte Messungen der Grundanordnung des mobilen Labors	73
2	7.3.1	Aufbau und Durchführung	73
7	7.3.2	Ergebnisse und Vergleichbarkeit	75
8	Fazi	it und Ausblick	76
9	Verz	zeichnis der Abbildungen	79
10	Ve	rzeichnis der Tabellen	82
11	Lite	eratur	83
12	Eig	gene Veröffentlichungen zur akustisch wirksamen Fassade	86
13	Ve	ranstaltungen im Rahmen des Projektes:	88
14	Ve	röffentlichungen im Rahmen des Projektes:	88



1 Einleitung

1.1 Vorwort

Schallharte Fassaden beeinflussen den Lärmpegel im umgebenden Stadtraum. An Beispielen der aktuellen Neubauprojekte in Frankfurt/M. lässt sich erkennen, dass der Effekt des zusätzlichen Lärmeintrags in den Stadtraum durch Reflektion an großen schallharten Fassadenflächen nicht berücksichtigt wird.

Die Beeinflussung des Lärmeintrags durch Fassaden lässt sich in verschiedene Eingriffsfelder für die Manipulation einteilen. Diese Eingriffsfelder können, gemäß dem Maßstab der bestimmten Planungsbereichen zugeordnet werden. Im Planung. übergeordneten städtebaulichen Maßstab ist eine Steuerung des Lärmeintrags über die Gebäudestellung und Lage der reflektierenden und beugenden Baukörper zueinander möglich. Im Gebäudemaßstab kann über Geometrie und Material der Fassadenflächen die akustische Situation rund um das Gebäude beeinflusst werden. Dies lässt sich zum Beispiel darstellen durch Vor- und Rücksprünge der Gebäudehülle oder auch durch eine Anordnung von Balkonen nach akustischen Gesichtspunkten erzielen. Im Detailmaßstab der Fassadenkonstruktion lassen sich zwei Manipulationsmöglichkeiten abbilden. Zum einen der Einsatz von absorbierenden Materialien und zum anderen die Ausbildung von Fassadenflächen mit einer speziell Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden akustisch wirksamen Geometrie. ausschließlich Geometriebasierte Systeme betrachtet. Nachdem in vorausgegangenen Forschungen hierfür ausgerichtete Messverfahren entwickelt und deren Übertragbarkeit von Feldmessungen an existierenden Bauten auf skalierte Messungen betrachtet wurden, sollen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens 1:1 Situationen im Stadtraum mit modifizierten Fassaden Mock Up's untersucht werden. Der hier vorliegende Bericht beschreibt die Entwicklung eines mobilen urbanen Akustiklabors, die Auswahl der Standorte anhand von definierten Kriterien bis hin zu der Durchführung der Messungen und der anschließenden Auswertung und Interpretation der gewonnenen Messwerte.

1.2 Der Urbane Raum in der Akustik

Es gibt eine Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zum Thema der Schallausbreitung in Abhängigkeit von Fassaden im städtischen Raum. Sämtlichen Untersuchungen liegt immer eine räumliche Anordnung zugrunde, die entweder modellhaft gewählt wurde, oder eine vorhandene gebaute Situation darstellt. Eine Übersicht der Literatur zum Thema der akustischen Wirkung von Fassaden und Gebäuden ist in Kapitel 11 enthalten. Im Rahmen einer bereits durchgeführten Literaturrecherche wurden im ersten Schritt die darin untersuchten Gebäudehöhen / Anzahl der Geschosse analysiert. Hierbei zeichnet sich ab, dass die überwiegende Anzahl der Untersuchungen Gebäude bis zu einer Höhe von acht Geschossen als stadträumliche Anordnung berücksichtigt. Neben der Gebäudehöhe wurde in der Literaturrecherche auch die Untersuchungsmethode (zweidimensional oder räumlich) betrachtet. Viele Ergebnisse wurden über zweidimensionale Simulationen erzeugt. Die Abbildung 1 zeigt einen Schnitt durch eine Straßenschlucht mit einer Fassadenanordnung, wie sie in verschiedenen Literaturstellen ¹ vorgeschlagen wird.

¹ Echevarria Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., Botteldooren, D., The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads, Building and Environment 97 (2016) 96-110





Abbildung 1: Fassadenanordnung in einer Straßenschlucht, ähnlich den von Echevarria Sanchez vorgeschlagenen Fassadenschnittbildern.

Die Gebäudemodelle, die solchen simulierten Schnittbildern zugrunde liegen, sind bei gleichbleibender Geometrie der Fassadenoberfläche idealer Weise in ihrer Längenausdehnung nahezu unendlich. Überträgt man das in eine dreidimensionale Situation ergibt sich die Anordnung aus Abbildung 2.



Abbildung 2: Übertragung des Schnittbildes in einen dreidimensionalen Baukörper.

Bei der Umsetzung dieser Schnittbildsimulationen in gebaute Projekte führt die aktuelle Planungspraxis und Bautätigkeit im Prozess der städtischen Nachverdichtung zu massiven Diskrepanzen.

Die reale Situation einer innerstädtischen Situation mit Nachverdichtungsprozessen wird von der oben beschriebenen Simulation der Baumassen und Oberflächen nicht erfasst. Es werden entweder bei Sanierungsprojekten einzelne Objekte mit neuen Fassaden versehen oder einzelne Objekte neu gebaut. Das heißt, von der idealerweise unendlich gedachten Fläche zur Umsetzung einer simulierten und vorhersehbaren Fassadengestaltung zur Lärmminderung bleibt nur ein Ausschnitt übrig.





Abbildung 3: Tatsächliche Fassadenfläche die zur akustischen Intervention für einen leiseren Stadtraum zur Verfügung steht.

Bleibt nur ein Teil des Baukörpers der Simulation übrig, was bedeutet das dann für die Wirkung der Fassade? Hierzu stellt Lyon² fest, dass zweidimensionale Simulationen deshalb interessant sind, weil sie qualitative Trends enthüllen. Aber im Zusammenhang mit der gebauten Umwelt stellt sich die Frage nach der Gültigkeit der Trends. Ist die zweidimensionale Simulation bei einer Gebäudebreite von 15 m noch gültig, oder führt eine Überlagerung mit Beugungseffekten zur akustischen Wirkungslosigkeit hinsichtlich einer Lärmminderung?

Zusammenfassend hat die Literaturrecherche zum Thema der Schallausbreitung im städtischen Raum gezeigt, dass ein großer Anteil Simulationen für Gebäude mit maximal acht Geschossen geführt wurden und damit eine Übertragbarkeit nur auf Randgebiete der Metropolen / Großstädte zutrifft. In Frankfurt am Main existieren aktuell 109 Hochhäuser mit einer Höhe von über 50 m. Um im Rahmen der aktuellen Bautätigkeit und im Kontext innerstädtischer Nachverdichtung in den Metropolen lärmmindernde Maßnahmen definieren zu können, braucht es Untersuchungen, die sich mit dem Verhalten von Hochhausfassaden beschäftigen.

Ein weiterer, entscheidender Aspekt für die vorgeschlagenen Untersuchungen ist die Tatsache, dass Simulationen bislang lediglich den Einfluss einer Schallquelle berücksichtigten. Da es in dem Forschungsvorhaben um Ansätze für zu realisierte Projekte geht, ist es Ziel der Messungen, die Einflüsse mehrerer Schallquellen zu erfassen. Die nachfolgende Beschreibung der ausgewählten Standorte nimmt dieses Kriterium mit auf.

² Lyon, R. H., Pande, L., Kinney, W, A., Modeling of V/STOL noise in city streets, Washington, D.C. Dept. of Transportation, Office of Noise Abatement





1.3 Das mobile urbane Akustiklabor

Die aus den vorherigen Forschungstätigkeiten gewonnenen Erkenntnisse sollen in diesem Projekt auf ihren Effekt im Maßstab 1:1 hin überprüft werden. Mithilfe eines mobilen urbanen Labors sollen, die im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse, in der Realität überprüft werden. Durch Einbringen einer schallharten, planen Fassadenreferenzfläche, lässt sich der Wert für eine schallharte Fassade im Stadtraum erfassen. Über Messpunkte entlang der Fassade wird dieser messtechnisch erfasst. Über Messpunkte entlang der Fassade kann die akustische Situation an der modifizierten Fassade erfasst werden. Die Wirksamkeit einer Fassadenmodifikation lässt sich dann durch in Bezug setzen der Messwerte auslesen.



 $Pegel_{Referenz} - Pegel_{Modifikation} = Pegel_{Wirksamkeit der Fassadenmodifikation}$

Abbildung 4: Durch in Bezug setzen der Messwerte der geschlossenen Referenzfassade, mit den Messwerten einer Fassadenmodifikation, lässt sich der akustische Effekt der Fassademodifikation bestimmen.



2 Entwicklung der Messungen

2.1 Entwicklung des mobilen Labors.

Im Rahmen dieses Projektes sollten verschiedene Fassadentypen, in verschiedenen städtebaulichen Situationen anhand der Einwirkung von Lärmquellen akustisch bemessen werden. Dieser Anforderung musste ein mobiles Labor gerecht werden. Darüber hinaus wurden weitere Anforderungen definiert, die einen möglichst einfachen, aber doch zuverlässigen Aufbau und Betrieb des mobilen Labors sicherstellen. Tabelle 1 zeigt die Anforderungen im Überblick.

Anforderung	Ziel	Effekt
Einfach auf- und abzubauen	Mobilität des Moduls	Gute Wiederholqualität
Sicher auf- und abzubauen	Mobilität des Moduls	Gute Wiederholqualität
Kein Einzelteil schwerer als	Mobilität des Moduls	Geringere Unfallgefahr
35 kg	Geringes Einzelteilgewicht	Besseres Handling
		Einfacher Transport
Kein Einzelteil länger als 2,5	Mobilität des Moduls	Besseres Handling
m		Einfacher Transport
Modulgrösse der Testobjekte	Geringes Einzelteilgewicht	Geringere Unfallgefahr
unter 1 m ²	Leichtes Handling	Besseres Handling
		Einfacher Transport
Alle Testmodule müssen die	Einfacher Zusammenbau	Gute Wiederholqualität
gleichen Dimensionen und		Besseres Handling
Anschlusspunkte aufweisen		
Jedes Modul kann an jeder	Einfacher Zusammenbau	Gute Wiederholqualität
Stelle in jeder Lage eingebaut		Besseres Handling
werden		
Testmodule müssen in der	Messungen bei gedrehter	Gute Wiederholqualität
Einbaulage in 90° Schritten	Einbaulage	Vielfältige Messanordnungen
rotieren können		
Als Unterkonstruktion ein auf	Einfachere Planung im	Gute Wiederholqualität Evtl.
dem Markt erhältliches	Baukastensystem	Systemstatik vorhanden
modulares		Erweiterbarkeit gegeben
Konstruktionssystem		Verbindungs- und
verwenden		Anschlagmittel sind im
		System gelöst.

Tabelle 1 Übersicht der Anforderungen an ein mobiles Messlabor

Um den Anforderungen nach einer hohen Wiederholqualität und einem baukastenähnlichen Aufbauprinzip gerecht zu werden, wurde ein Gerüstbausystem der Firma Layer gewählt. Die Perspektive in Abbildung 5 zeigt die Grundversion des mobilen Labors. Die Grundfläche für die zu messenden Fassadenmodule wurde aus 21 mm starken, wasserfest verleimten Vielschichtplatten konstruiert. Die so entstandene Referenzfläche für die Messung bestand aus 12 Einzelplatten und war 12,5 m² groß.





Abbildung 5 Perspektive des mobilen Labors aus einem marktüblichen Gerüstbausystem aufgebaut

Über eine drehbare Befestigung der Einzelplatten, war es möglich eine Lamellenanordnung für die Messungen darzustellen. Eines von zwei Modulen mit den Einzelplatten in 90° Stellung zeigt Abbildung 6.



Abbildung 6. Perspektive eines Teilstücks des mobilen Labors. Zur Simulation einer Lamellenstruktur sind die Tragplatten um 90° gedreht.



Durch eine ausgeklügelte Modulaufteilung in Kombination mit einem Tragschienensystem für die Fassadenmodule, war es möglich Testmodule in zwei Größen zu verwenden. Sowohl ein Modul-Maß von 82,5 cm x 82,5 cm, als auch ein Modul-Maß von 1,25 m x 1,25 m war möglich. Alle Module konnten in jeder Ausrichtung an den Tragschienen befestigt werden. Für Messungen von vorgesetzten, hinter lüfteten Fassadenmodulen (z.B. Textilbespannung, gelochte Bleche, gefaltete HPL-Platten, etc.) dient die glatte Referenzfläche als reflexionsharte Rückwand, um die Einbausituation vor einer Fassade widerzuspiegeln. Die Trägerlage auf den Tragplatten und die dazugehörige Modulaufteilung zeigt Abbildung 7.



Abbildung 7 Varianten der Modulaufteilung in Abhängigkeit der Tragplattenabmessungen

Von den Anforderungen in Tabelle 1 wurde nur in zwei Punkten abgewichen.

- Das längste Bauteil, die Gerüstdiagonalen, waren 3,20 m lang. Da dies nur 6 von 160 Teilen betraf wurde dies zugelassen.
- Aus Gründen der wirtschaftlichen Produktion kamen zwei Modulgrößen zum Einsatz. Die Modulgröße von 1,25 m x 1,25 m lag über der geforderten Maximalmodulgröße von 1,0 m. Diese Modulgröße kam nur bei Leichtbautextilfassadenmodulen zum Einsatz, deshalb waren keine Einschränkungen durch die Größe im Handling zu erwarten.

Das mobile Labor, das "Urban Acoustic Facade Lab" bestand insgesamt aus ca. 160 Einzelteilen mit einem Gesamtgewicht von ca. 950 kg. Dadurch war sichergestellt, dass ein Transport mit Fahrzeugen unter einem Gesamtgewicht von 3,5 t möglich ist. Zum späteren Transport während der Messkampagne kam abweichend hiervon ein 7,49 t LKW zum Einsatz. Durch die später hinzugekommenen Varianten von Fassadenmodulen war ein Transport mit einem kleineren Fahrzeug nicht mehr möglich.

Mit diesem Gerüstbausystem war es möglich, das komplette Messlabor in ca. 2 h von zwei Personen auf- bzw. abbauen zu lassen.



2.2 Entwicklung der räumlichen Anordnung der Messmikrofone

Aus den Erfahrungen des vorangegangenen Forschungsprojektes, "Akustisch wirksame Fassaden" von 2013 bis 2015, wurde eine mehrkanalige Mikrofonanordnung zur Erfassung der akustischen Effekte grafisch entwickelt. Der Ideal Grundriss der Messmikrofonanordnung vor der 12,5 m² großen Testfassade ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8 Grundriss einer idealen Messmikrofonanordnung (Zeichnung ohne Maßstab)

Das Achsensystem für die Mikrofonanordnung besteht aus zwei Achsensystemen, den Messachsen und den Messfeldachsen. Die Messachsen verlaufen parallel zur Vorderkante der Referenzfläche des Fassadenteststandes. Das Messfeldachsensystem verläuft rechtwinkelig zu dem Messachsensystem. Im Messfeldachsensystem gibt es zwei Achsen. Die Fassadenachse verläuft lotrecht zur Testfassade. Die Feldachse verläuft in einem Mindestabstand von 1,5 m zu einer Ecke der Testfassade, parallel zur Fassadenachse. Das Messachsensystem hingegen kann mehrere Achsen beinhalten. Dies ist abhängig von der Anzahl der gewünschten Mikrofonpositionen. Die erste Achse verläuft parallel in einem Mindestabstand von 0,7 m zur Vorderkante der Referenzfläche des mobilen Labors. Die Zweite Achse wird in einem Abstand von 2,0 m bis 5,0 m zur Vorderkante der Referenzfläche positioniert. Die dritte Messachse verläuft in einem Abstand größer 5,0 m zur Vorderkante der Referenzfläche. Aufgrund ihrer definierten geometrischen Lage im Achsensystem lassen sich Messwerte untereinander vergleichen. So sind die Mikrofone auf einer Messachse immer im gleichen Abstand zu der Fassadenachse an der Vorderkante der Referenzfläche. Durch das Feldachsensystem wird gewährleistet, dass die räumliche Zuordnung vor und neben der Fassade vergleichbar ist. Um den Einfluss von Bodenreflexionen möglichst an allen Mikrofonpositionen gleich zu halten, wurden alle Mikrofonpositionen in der gleichen Höhe von 1,8 m über dem Bodenbelag gewählt.



Für die verschiedenen Standorte war nicht immer dieser ideale Aufbau möglich. Auch zeigte sich die Notwendigkeit, den Einfluss von Wind mit zwei zusätzlichen Mikrofonpositionen in 4 m Höhe zu erfassen. Die entsprechenden Modifikationen je Standort wurden über Grundrisszeichnungen für jeden Standort dokumentiert.

2.3 Eingangsgröße Messsignal

Im Rahmen des Projektes wurde ein kontextuelles Messverfahren eingesetzt. Die vor Ort vorhandenen Lärmquellen wurden als Messsignale für die Bestimmung der akustischen Wirkung von Fassaden genutzt. Eine Ungenauigkeit in den Messsignalen ist gleichbedeutend mit einer Ungenauigkeit in den Ergebnissen. Im angewandten Messverfahren werden die Messungen von Umgebungslärmeinwirkungen auf verschiedene Fassadenoberflächen vergleichen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit Lärmereignisse am gleichen Ort, aber in unterschiedlichen Zeitintervallen vergleichbar zu machen. Hierzu gibt es verschiedene Strategien.

2.3.1 Gemessene Einzelereignisse miteinander vergleichen.

Es werden Einzelereignisse vor verschiedenen Fassaden gemessen. Wenn diese in der Erzeugung und Dauer sehr ähnlich sind, ist eine gute Vergleichbarkeit gegeben. Für einzelne Vorbeifahrten von PKW's trifft das nur zu, wenn die Geschwindigkeit und das Fahrzeuggewicht genau zusammenpassen. Im regulären innerstädtischen Straßenverkehr in der Rhein-Main-Region ist das nicht oder nur kaum zu finden.

Diese Strategie lässt sich jedoch sehr gut bei Fluglärm im Rhein-Main-Gebiet anwenden. Der Flughafen Rhein Main wird nur von einer beschränkten Typenvielfalt Verkehrsflugzeuge angeflogen. Auch sind die Anflüge und Abflüge nach Typen und Landebahnen sortiert. So starten und landen die großen Verkehrsflugzeuge, wie etwa der A380 oder Maschinen aus der Boing 747 Familie, auf den Centerbahnen. Die kleineren Maschinen, wie etwa A321 und A323 landen meist auf der Landebahn Nordwest. Die, von den Autoren dieses Berichts durchgeführte Messkampagne in 2013, während des Rückbaus des Henninger Turms, zeigte die Benutzbarkeit der regelmäßigen Vorbeiflüge gleicher Flugzeugtypen als Eingangssignal einer vergleichenden Messung.³

2.3.2 Eine bestimmte Anzahl Ereignisse sammeln

Vor einer Fassadenvariante wird eine bestimmte Anzahl Lärmereignisse gesammelt. Ein Lärmereignis ist ein Vorgang, der in der Umwelt bei seiner Ausführung Lärm erzeugt. Im Kontext der hier vorgestellten Forschung sind typische Einzellärmereignisse zum Beispiel die Vorbeifahrt eines PKW oder der Vorbeiflug eines Flugzeugs am Messstandort. Mehrere Einzellärmereignisse können zu einem Lärmereignis zusammengefasst werden. Die Anzahl der Einzellärmereignisse innerhalb eines Lärmereignisses kann zum Beispiel bestimmt werden durch Ampelphasen im Straßenverkehr. Bei dieser Ereignisbildung besteht die Schwierigkeit nicht darin die Anzahl der PKW zu bestimmen, sondern in der Gleichmäßigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Schon ein LKW oder ein lauter PKW während eines Lärmereigniszeitraums kann die zugehörige Messung unbrauchbar machen für eine Wertebestimmung. Diese Methode der Ereignisbildung kommt zur Anwendung in dem Messverfahren der Statistischen Vorbeifahrtmessung. Indem die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge miterfasst wird, ist eine Vergleichbarkeit der vorbeifahrenden

³ Techen, H., Krimm, J., 2014, Die akustisch wirksame Fassade, Fortschritte der Akustik - DAGA 2014 S846-847 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2014



Fahrzeuge bei diesem Messverfahren gewährleistet. Nur Messdaten von PKW Vorbeifahrten in einem bestimmten Geschwindigkeitsfenster und gleichmäßiger Geschwindigkeit werden in den auszuwertenden Messdatensatz aufgenommen. DIN EN ISO 11819-1:2001 beschreibt dieses Verfahren.

2.3.3 Längere Messzeiträume mit gleicher Länge miteinander vergleichen

Die Messungen werden über Zeiträume, länger als 15 min, vor einem Fassadenmodell durchgeführt. Dabei ist eine Vergleichbarkeit nur gegeben, wenn eine ähnliche Anzahl von Ereignissen je Messzeitraum erfasst wird.

2.3.4 Überprüfung der Vergleichbarkeit der Messsignale

Zur Vorbereitung einer Auswertung müssen die erfassten Messsignale auf ihre Vergleichbarkeit hin überprüft werden.

- Optische Überprüfung: Überprüfung der Pegelzeitverläufe zweier Messzeiträume hinsichtlich einer gleichen Zahl von erkennbaren Vorbeifahrten oder Vorbeiflügen.
- Messtechnische Überprüfung: In jedem Messaufbau in diesem Projekt ist immer eine Mikrofonposition im Messfeld neben der Testfassade vorhanden, an der ein Einfluss der Fassade kaum zu einer Veränderung der Messdaten führt. Da alle anderen Faktoren gleichbleiben, ist an dieser Stelle eine Vergleichsmöglichkeit gegeben. Durch Auswertung der zu vergleichenden Datensätze hinsichtlich ihrer Frequenz/Pegel-Verteilung und dem Pegelwert über die gemessene Zeit lässt sich bestimmen, ob eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Hierüber lässt sich bestimmen welche Messintervalle sich zur Auswertung eignen.

Die Überprüfung und Auswahl der Messsignale für die Auswertung wird in Kapitel 6.1.4 beschrieben.

2.4 Das Messequipement

Eine Anforderung im Rahmen des Projektes war ein einfacher, schneller Aufbau der Messinstrumente vor Ort. Für die Messungen an den einzelnen Orten waren 8 Mikrofone und 3 Recorder vorgesehen. Um den Einfluss von leichtem Wind zu vermeiden wurden die Mikrofone mit einem Windschutz aus synthetischem Pelz versehen. In den Auswertungen konnte der Windeinfluss ermittelt und betroffene Messintervalle ausgeschlossen werden. Das Verfahren der Winderkennung wird in Kapitel 6.1.6 beschrieben. Die Messsignale der Positionen, die durch eine Straße getrennt waren, wurden über eine Audio Funkstrecke synchronisiert. Die Audio-Funkstrecke kam zum Einsatz, um Kabel über Straßen zu vermeiden. Eine Aufnahme Spur des sendenden Recorders wird parallel auf dem empfangenden Recorder aufgezeichnet. Die verwendete Funkstrecke weist eine zeitliche Verzögerung von 4 ms auf. Diese Verzögerung wird später in der Auswertung des empfangenden Recorders wieder herausgerechnet. Um die Daten später in möglichst vielfältiger Weise auswerten und anhören zu können, wurde als Datenformat das digitale, unkomprimierte ".wav" Format gewählt. Die Anforderungen an das Messequipment und den Aufbau führten zu der Auswahl, der in Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur

Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen

FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tabelle 2 aufgelisteten Komponenten.

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur



Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen

Gerät	Тур	Bemerkung
Mobiler digitaler	Tascam DR 680 I	Batteriebetriebener
Mehrspurrekorder		Mehrspur-Digitalrekorder mit
		Aufzeichnung auf SD Karte
		Bis 96 kHz Sampling Rate
Mobiler digitaler	Marantz PMD 620	Batteriebetriebener
Zweispurrekorder		Mehrspur-Digitalrekorder mit
		Aufzeichnung auf SD Karte
		Bis 48 kHz Sampling Rate
Messmikrofon Klasse 2 mit	MicW i436 mit Adapter p149	Robustes Klasse 2 Mikrofon
XLRm Anschluss und	und Windschutz Rycote	
Windschutz aus Kunstpelz		
XLRf-XLRm Kabel 10 m	Sommerkabel 200-0051	Verlängerungskabel für
		Mikrofon
Referenzschallquelle	Bruel & Kjaer 4230	Klasse 1
_	-	Referenzschallquelle 94,4 dB
Audio Funkverbindung	Xvive Wireless System U2	Audio Funkstrecke um die
_		Synchronisation der Recorder
		zu gewährleisten
Dreibeinstativ, bis zu 4 m	Manfrotto 1004 BAC	Leicht und doch stabil
ausziehbar		

3 Entwicklung der Testmodule

3.1 Grundlegende Varianten

Die Literaturauswahl in Kapitel 11 gibt viele Beispiele für eine Beeinflussung der akustischen Situation durch strukturierte Oberflächen. Die Erkenntnisse wurden überwiegend in reinen Laborsituationen und Simulationen gewonnen. Ein häufiger Kritikpunkt an diesen Untersuchungen ist die Ferne zu der baulichen Realität. Die idealisierten akustischen Strukturen lassen sich nicht mit marktüblichen Materialien im Bauwesen darstellen. Um das Ziel der Anwendbarkeit von akustischen Fassadenelementen sicherzustellen, wurden Fassadenoberflächen entwickelt, die auf marktüblichen Systemen basieren. Im Rahmen der Untersuchungen wurden folgende Fassadentypologien betrachtet:

- Schallharte Oberfläche
- Vertikale Lamellenstruktur mit verschiedenen Öffnungswinkeln
- 3-D verformte Membranstruktur auf einen Rahmen aufgespannt, vor schallharter Rückwand
- Plane, gelochte HPL-Platten, vor schallharter Rückwand
- WDVS-System mit wellenförmiger Struktur, vor schallharter Rückwand
- Metallbleche mit verschiedenen Lochungen, vor schallharter Rückwand

Diese Fassadentypologien spiegeln die aktuell gebräuchlichen Fassadensysteme der Bauindustrie wider. Mit Systemherstellern wurden speziell für diese Anforderungen ausgerichtete Fassadenoberflächen entwickelt. Ziel der Entwicklungen war es nicht eine optimierte akustische Fassadenoberfläche herzustellen. Der Fokus in der Entwicklung der



Fassadengeometrien lag auf einer materialgerechten Produktion der akustischen wirksamen Oberfläche. Die unterschiedlichen Bearbeitungsmöglichkeiten der verschiedenen Materialien führten zu der materialabhängigen Oberflächenstruktur. Alle Testfassadenmodule weisen, bedingt durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften, deutliche Unterschiede in der Korngröße ihrer Oberflächenstruktur auf.

3.2 Entwicklung des Kunststein Moduls Lithodecor

Das Material des Lithodecor-Moduls, ein Leichtbeton, wird mit CNC gesteuerten Sägen bearbeitet. Die so erzielbare Binnenstruktur der Oberfläche, in Form von Wellen oder Rinnen, liegt in der Größenordnung von klassischen Ziegelformaten. Aus dem Produktionsprozess ergab sich in Abbildung 9 dargestellte Wellenstruktur.



Abbildung 9 Kunststeinmodul Lithodecor

3.3 Entwicklung des Wärmedammverbundsystemmoduls Alsecco

Für dieses Modul wurde ein Wärmedämmschaum mit einer strukturierten Oberfläche versehen. Bei der Ausführung dieser Struktur wurde darauf geachtet das die geneigten Flächen unterschiedliche Winkel und unterschiedliche Flächengrößen aufweisen. Für eine wiederholte Anwendung im mobilen Labor musste das Wärmedammverbundsystem auf eine Trägerplatte appliziert und abschließend verputzt werden. Abbildung 10 zeigt eine Perspektive des WDVS Moduls.





Abbildung 10 Wärmedämmverbundsystem-Modul Alsecco

3.4 Entwicklung des Textil Fassaden Moduls

Diese Fassadenmodule bestehen aus Glasfasergeweben, die üblicherweise als ebene vorgehängte Module Verwendung finden. Die Gewebedichte erlaubt eine Durchsichtigkeit bei gleichzeitiger Wirkung als starrer Sonnenschutz. Wie bei den zuvor beschriebenen Fassadentypen wurde auch dieses Produkt auf akustische Belange modifiziert, indem durch eine räumliche Verzerrung der ebenen Oberfläche eine Umlenkung der auftreffenden Schallwellen generiert wurde. Die Modul Abmessungen wurden mit 1,25 m x 1,25 so gewählt das eine wirtschaftliche Produktion möglich war. Das Modul wurde speziell an das Befestigungsraster angepasst, dass auch hier eine Drehung der Paneele umsetzbar war. Abbildung 11 zeigt eine Konstruktionsperspektive des Moduls.





Abbildung 11 Konstruktionsperspektive des Glasfasergewebemoduls Facid®, Zeichnung © EPS Systems GmbH

3.5 Entwicklung des Metall Moduls

Eine Variante der flächigen Fassaden stellt die Blechkassettenfassade dar. Für eine akustische Wirkung wurde die Vorderseite der Blechkassette mit einer Dreiecklochung versehen. Die CNC gesteuerte Laserfertigung der Kassette war so geplant, dass die Füllungen der Ausschnitte nicht vollständig herausgetrennt, sondern das in der Öffnung verbleibende Material nach innen geklappt wurde. Abbildung 12 zeigt eine Perspektive der Blechkassette.



Abbildung 12 Perspektive der Blechkassette



4 Auswahl der Standorte in Frankfurt/Main

Als Grundlage für die Standortauswahl wurden Pflichtkriterien und mögliche Kriterien für urbane Szenarien definiert. Diese Festsetzungen erfolgten auf der Basis der Erfahrungen aus den Feldmessungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes "Akustisch wirksame Fassaden" zwischen 2013 bis 2015 gewonnen werden konnten. Für das Verfahren der Standortauswahl werden diese Einzelkriterien in Zahlenwerten zwischen 1 (trifft zu) und 0 (trifft nicht zu) ausgedrückt.

Pflichtkriterien:

- Ein oder mehrere Lärmquellen
- Lärmquellen sind räumlich isolierbar (messtechnisch erfassbar)
- Lärmquellen sind zeitlich isolierbar (messtechnisch erfassbar)
- Grundfläche für den Aufbau des mobilen Labors ausweisbar, ohne schwerwiegende Eingriffe in Verkehrsführungen

Die Gesamtlärmstärke an jedem Ort wurde ermittelt über Ortsbegehungen und den Daten der Lärmkartierung. Für die Evaluation der Standorte wird die Lärmbelastung an einem Ort in einem Zahlenwert von 1 (niedrige Belastung) bis 10 (Hohe Belastung) ausgedrückt. So konnte die Zielsetzung möglichst unterschiedliche und doch eindeutige urbane Lärmsituationen abzubilden dargestellt werden.

Gemeinsam mit unserem Kooperationspartner, dem Umweltamt der Stadt Frankfurt wurden weitere Kriterien für jeden Standort diskutiert und entsprechend bewertet:

- Mögliches Interesse der Nutzer an einer Maßnahme zur akustischen Verbesserung
- Ausgeprägtes Interesse des Nutzers am Grundstück
- Ausgeprägtes öffentliches / politisches Interesse an dem Grundstück/Projekt
- Grundstück ist bebaut/unbebaut
- Projekt in Planung
- Schutzbedürfnis der vorhandenen/geplanten Nutzung
- Genehmigungsfähig (Zugriffsmöglichkeit auf den Grundstückseigentümer /Projektentwickler)

Mit den Pflichtkriterien wurden die einzelnen Szenarien in ihrer Vielfältigkeit und generellen Machbarkeit bewertet. Die anschließende Diskussion der möglichen Kriterien führte zu einer Machbarkeitsbetrachtung der vorgesehenen Arbeitspakete je Standort. An den Orten sollte eine Feldmessung zur Bestimmung der tatsächlichen Lärmpegel möglich sein. Auch sollte eine Aufstellung des mobilen Fassadenlabors ohne größere Eingriffe in die Verkehrsführung durchführbar sein. Darüberhinaus sollten alle Standorte auch mit der Methode der skalierten Messung untersucht werden können. Akustische Untersuchungen im Jahr 2015 am Platz der Republik in Frankfurt am Main zeigten, dass bei skalierten Messungen dann ein limitierender Faktor besteht, wenn mehrere Lärmquellen gleichzeitig auftreten. Die Übertragbarkeit auf skalierte Messungen ist dann mit eindeutigen Kalibrierungsfaktoren nicht möglich. Trotzdem lassen sich Trends in der Pegelzunahme oder Pegelabnahme erkennen, die den Trends der Feldmessung entsprechen.

Als erfassbare Lärmquellen werden im Rahmen dieses Projektes die Verkehrslärmquellen von Straße, Straßenbahn, Schiene und Flugverkehr untersucht.





In den vorläufigen Untersuchungsumfang wurden 5 Szenarien mit Straßenlärm als

Hauptlärmquelle aufgenommen. 4 Szenarien bilden die typische städtische Mischform von Straßenbahn und Straßenverkehr ab. Je ein Szenario konnte für Fluglärm oder Schienenlärm als Hauptimmissionsart gefunden werden. Für die Einwirkung aller vier Lärmquellen auf einen Ort konnte auch ein Objekt gefunden werden.

Es wurden ca. 50 Standorte anhand von Stadtkarten, Lärmkartierungen, Fotografien und Internet-Kartenmaterial vorbesprochen. Die hohe Zahl der vorbesprochenen Standorte ergab sich aus einem laufenden Schulstandortauswahlverfahren der Stadt Frankfurt am Main. Hier werden zur Zeit 150 Standorte hinsichtlich ihrer Eignung als Schulstandort durch einen externen Gutachter untersucht. Aus dieser Standortsammlung wurden die Standorte, die bezüglich einer Realisierung am aussichtsreichsten waren mitbesprochen. Hieraus ergaben sich die Standorte 1 und 12. Weitere Standorte kamen noch hinzu über Erfahrungen des Beschwerdewesens (Standort 3) und über den Vorschlag des Dezernates für Umwelt und Frauen der Stadt Frankfurt am Main (Standort 5). Schon in vorhergehenden Forschungsprojekten untersuchte Standorte wurden, um einen Vergleichbarkeit der Daten sicher zu stellen, auch in den Projektkatalog aufgenommen (Standort 5, 9).

Die final mit dem Umweltamt der Stadt Frankfurt ausgewählten Standorte sind in Tabelle 3 zusammen gefasst.



Tabelle 3 Übersicht der Standortauswahl

			Lärm	Iquelle		Isolier	barkeit	Labor			2	lögliche	Kriterien			Art	beitspak	et
		Straße Pkw/Lkw	Straßen- bahn	Flug- verkehr	Bahn- verkehr	räumlich	zeitlich	möglich	Nutzer Interesse	Offentlich es Interesse	Politische s Interesse	Bebauun	Projekt t	Schutzfak (Genehmi gungsfähi g	Scalierte \	/or Ort F	⁻ assaden abor
.	Frankfurt, Europaviertel, Europa Allee:	6	0	2	0	0	1	1	1	1	1	0	-	1	1	-	+	-
7	Frankfurt, Innenstadt, Taunusanlage:	10	0	2	0	ł	Ţ	ł	0	0	0	0	0	0,5	1	-	T.	-
с	Frankfurt, Innenstadt Ost, Lange Straße 14, Altenheim:	8	5	°.	o	0	1	1	1	0	0	1	0	-	1	-	-	-
4	Frankfurt, Nordend, Matthias-Beltz-Platz:	~	~	ę	0	0	-	•	0	0	0	0	0	0,5	0	0	-	0
2	Frankfurt, Innenstadt, Goetheplatz:	6	0	2	0	0	1	1	0	0	Ţ	+	0	0,5	1	-	-	-
9	Frankfurt, Niederrad, Lyoner Str 1:	8	2	8	9	0	1	1	1	0	0	۲	0	0,5	0	0,5	+	-
2	Frankfurt, Nied, Ferdinand- Scholling-Ring:	4	0	-	10	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0,5	-	+	-
ω	Frankfurt, Westend, Senckenberganlage	6	0	-	0	0	1	1	0	0	L.	o	-	0	1	-	-	-
თ	Frankfurt, Niederrad, Lyoner Straße 27:	3	4	8	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	-	1	0
10	Frankfurt, Innenstadt, Baseler Platz:	10	8	L.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
£	Frankfurt, Innenstadt, Stephanstraße 14	9	0	-	0	0	1	0,5	0	0	0	1	0	0,5	0,5	+	+	1
12	Frankfurt, Schloßstrasse 29-31	5	5	0	0	0	1	0,5	Ţ	Ļ	Ţ	-	-	-	0,5	-	-	-





Auf den Standortplänen sind die geplanten Positionen des Messlabors eingezeichnet. Ebenso die Lärmquellen. Die eingezeichneten Linien zeigen die Position einer oder mehrerer Lärmquellen. Falls nichts anderes vermerkt ist, handelt es sich um Straßenverkehrslärm.

4.1 Frankfurt, Europaviertel, Europa Allee/ Pariser Straße:

Stichworte: Neubauviertel, Wohnhochhäuser, Straßenverkehrslärm



Abbildung 13 Planausschnitt Europaviertel, Pariser Straße ©Google Maps



Abbildung 14 Geplanter Standort an der Ecke Pariser Straße und Maastricher Ring

4.2 Frankfurt, Innenstadt, Taunusanlage:



Stichworte: Grünanlage, Wohnhochhäuser, Hochhäuser, Straßenverkehrslärm Status: Lärmkartierung zu Maßnahme vorhanden, kein spezielles Objekt gewählt



Abbildung 15 Planausschnitt Taunusanlage ©Google Maps

4.3 Frankfurt, Innenstadt Ost, Lange Straße 14, Altenheim:

Stichworte: Altenheim, Garten-, Grünanlage, Straßenverkehrs-, Straßenbahnlärm



Abbildung 16 Planausschnitt Lange Straße ©Google Maps





Abbildung 17 Standort 3, Frankfurt Innenstadt Lange Straße, Starßenansicht

Die Abbildung 17 zeigt die Situation am Standort 3. Die Lärmquellen Straßenbahn und Pkw sind in ihrer Nähe zum Gebäude des Altenzentrums gut zu erkennen. Der schützenswerte Bereich ist der Hof an der Sandsteinmauer auf der straßenabgewandten Seite des Gebäudes rechts im Bild.

4.4 Frankfurt, Nordend, Matthias-Beltz-Platz:

Stichworte: Altbaubestand, Durchgangsplatz, Straßenverkehrs-, Straßenbahnlärm



Abbildung 18 Planausschnitt Matthias-Beltz-Platz ©Google Maps



4.5 Frankfurt, Innenstadt, Goetheplatz:

Stichworte: lärmbelasteter Platz, Straßenverkehrslärm, dichte Bebauung



Abbildung 19 Planausschnitt Europaviertel, Pariser Straße ©Google Maps



Abbildung 20 Westkante am Goetheplatz mit stark befahrener Straße

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur

Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen



4.6 Frankfurt, Niederrad, Lyoner Str 1:

Stichworte: Bestand, Innenhof, Straßenverkehrs-, Straßenbahn-, Flug-, Bahnlärm



Abbildung 21 Planausschnitt Lyoner Straße 1 ©Google Maps



Abbildung 22 Blick aus dem Innenhof in Richtung Main

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur





4.7 Frankfurt, Nied, Ferdinand-Scholling-Ring:

Stichworte: Wohnungsbau als Reihenbebauung entlang der Bahnlinie, Schienenlärm



Abbildung 23 Planausschnitt Ferdinand-Scholling-Ring ©Google Maps



Abbildung 24 Zustand Ferdinand-Scholling-Ring im März 2017

Links in Abbildung 24 liegt die, in naher Zukunft zu bebauende Fläche. Dahinter verläuft die stark befahrene Bundesbahntrasse. Die Fassadenmodifikationen sollen mit dem mobilen Labor vor der Fassade des Gebäudes auf der rechten Seite gemessen werden.



4.8 Frankfurt, Westend, Senckenberganlage - Robert-Mayer-Straße:

Stichworte: Straßenverkehrslärm, Ampelanlage



Abbildung 25 Planausschnitt Senckenberganlage ©Google Maps



Abbildung 26 Senckenberganlage, links im Bild der Eckbau des Senkenbergmuseums

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur





4.9 Frankfurt, Niederrad, Lyoner Straße 27:

Stichworte: Konversionsviertel für Bürohochhäuser, Fluglärm, Straßenverkehrslärm, Straßenbahnlärm



Abbildung 27 Planausschnitt Lyoner Straße 27 ©Google Maps



Abbildung 28 Lyoner Straße in Richtung Westen, Paralleler Verlauf von Straße und Straßenbahn

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur





4.10 Frankfurt, Innenstadt, Baseler Platz:

Stichworte: Altbaubestand, Grünflächenintervention, Straßenverkehrslärm, Straßenbahnlärm



Abbildung 29 Planausschnitt Baseler Platz ©Google Maps

4.11 Frankfurt, Innenstadt, Stephanstraße 14:

Stichworte: Bürogebäude der städtischen Verwaltung, Straßenverkehrslärm



Abbildung 30 Planausschnitt Stephanstraße ©Google Maps





Abbildung 31 Stephanstraße in Richtung Westen

Diese städtebauliche Situation mit einer sechs- bis siebengeschossigen Bebauung ist typisch für zahlreiche Frankfurter Stadtteile und spiegelt in Verbindung mit dem dort ausschließlich vorhandenen Verkehrslärm eine Situation wider, die in zahlreichen deutschen Großstädten vorherrscht.

4.12 Frankfurt, Schlossstraße 29-31:

Stichworte: Schule (in Planung), Straßenverkehrslärm, Straßenbahnlärm



Abbildung 32 Planausschnitt Schloßstraße ©Google Maps




Abbildung 33 Situation Schloßstraße Blick in Richtung Südwesten

Die Stadt Frankfurt plant an zahlreichen Schulbauten energetische Sanierungen in Kombination mit Erweiterungen. Die Erneuerung des weiß verputzen eingeschossigen Pavillons liefert hier die Möglichkeit, akustische Veränderungen an zwei- bis dreigeschossigen Gebäuden zu ermitteln.

4.13 Genehmigungsverfahren

Für alle geplanten Standorte des mobilen Messlabors wurden Genehmigungen in Zusammenarbeit mit dem Umweltamt bei den zuständigen Behörden angefragt. Diese waren das Hochbauamt, Straßenbauamt und das Grün- und Freiflächenamt. Grundlage für die Genehmigungen war der Standsicherheitsnachweis durch eine Statik. Mit der vorhandenen Statik stufte das Hochbauamt der Stadt Frankfurt das Labor als "mobiles Bauwerk ohne Baugenehmigungspflicht" ein. Nicht für alle Standorte waren Genehmigungen durch das Straßenbauamt oder das Grün- und Freiflächenamt möglich. So musste zum Beispiel der Standort 2 "Frankfurt Innenstadt-Taunusanlage" aus der Liste gestrichen werden, da durch starke Niederschläge im Verlauf des Sommers 2017 die Wege in den Grünanlagen nicht mit Fahrzeugen über 2,8 t Gesamtgewicht befahren werden durften. Im Verlauf der Standortprüfungen mussten weitere Standorte aufgegeben werden, da sie ebenfalls nicht mit einem LKW anfahrfahrbar waren. In der Vorbereitung der mehrwöchigen Feldmessungen kam es zusätzlich zu einer zeitlichen Verzögerung, die aus Lieferengpässen beim Gerüstbau resultierten. Es wurde darauf geachtet, trotz aller Streichungen alle Lärmarten mit mindestens je einem Standort abzudecken, so dass Aussagen zum entwickelten Messverfahren und den erzielbaren Lärmminderungen durch gezielt entwickelte akustische Fassaden getroffen werden konnten. Von 12 Standorten blieben nach der Beurteilung der Machbarkeit und dem Genehmigungsverfahren 6 Standorte übrig. In Tabelle 4 ist die Genehmigungslage sowie die Durchführbarkeit für alle Standorte dargestellt.



Nummer	Standort	Durchführung	Bemerkungen
1	Frankfurt,	Genehmigung erteilt	Genehmigung des
	Europaviertel, Europa		Grundstückeigentümer
	Allee		
2	Frankfurt, Innenstadt,	Keine Genehmigung	Wege nicht befahrbar mit
	Taunusanlage:		7,5 T LKW
3	Frankfurt, Innenstadt Ost,	Messung logistisch nicht	Standort nicht anfahrbar
	Lange Straße 14	durchführbar	mit 7,5 T LKW
4	Frankfurt, Nordend,	Messungen nicht	Straßenverkehrslärm
	Matthias-Beltz-Platz:	durchführbar	wegen häufiger Staus
			nicht referenzierbar
5	Frankfurt, Innenstadt,	Keine Genehmigung	Keine Genehmigung im
	Goetheplatz		Zeitraum möglich
6	Frankfurt, Niederrad,	Genehmigung erteilt	Genehmigung des
	Lyoner Str 1		Grundstückeigentümer
7	Frankfurt, Nied,	Genehmigung erteilt	Genehmigung Stadt
	Ferdinand-Scholling-		Frankfurt
	Ring		
8	Frankfurt, Westend,	Genehmigung erteilt	Genehmigung des
	Senckenberganlage		Grundstückeigentümer
9	Frankfurt, Niederrad,	Genehmigung erteilt	Genehmigung Stadt
	Lyoner Straße 27		Frankfurt
10	Frankfurt, Innenstadt,	Messungen nicht	Straßenverkehrslärm
	Baseler Platz:	durchführbar	wegen häufiger Staus
			nicht referenzierbar
11	Frankfurt, Innenstadt,	Genehmigung erteilt	Genehmigung Stadt
	Stephanstraße 14		Frankfurt
12	Frankfurt, Schloßstrasse	Messung logistisch nicht	Nicht anfahrbar mit 7,5 t

Tabelle 4 Übersicht der Genehmigungen/Durchführbarkeit der Messungen an den Standorte



5 Die Feldmessungen

Die Messungen wurden durchgeführt vom 28.8.2017 bis zum 5.10.2017. In Tabelle 5 sind die untersuchten Standorte und die verwendeten Module in den Messungen in einer Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 5 Übersicht der durchgeführten Messungen

Nummer	Standort	Reihenfolge	Lärmquelle	Referenz- fläche	Lamellen 90 grad geklappt	Lamellen 45 Grad geklappt	WDVS Modul	Textil Modul	Kunststein Modul	Metall Modul
1	Frankfurt, Europaviertel, Europa Allee	6	Strasse	1	1	0	1	0	0	0
6	Frankfurt, Niederrad, Lyoner Str 1	1	Alle Lärmarten	1	1	0	1	1	1	0
7	Frankfurt, Nied, Ferdinand- Scholling-Ring	2	Bahn	1	1	0	1	1	0	0
8	Frankfurt, Westend, Senckenberganlage	3	Strasse	1	1	1	1	1	1	1
9	Frankfurt, Niederrad, Lyoner Straße 27	4	Fluglärm/Straße	1	1	1	1	0	1	1
9	Frankfurt, Niederrad, Lyoner Straße 27	7	Fluglärm/Straße	1	1	0	0	1	0	0
11	Frankfurt, Innenstadt, Stephanstraße 14	5	Strasse	1	1	0	1	1	0	0
0	Frankfurt,Nibelungenring	8	Strasse	1	1	0	0	0	0	1

Das Labor und die Testfassaden wurden in einem LKW zu den Standorten transportiert. Um eine hohe Präzision und Schnelligkeit in der Wiederholbarkeit des Aufbaus zu gewährleisten, wurden die einzelnen Schritte vorab anhand eines Probeaufbaus auf dem Campus der Frankfurt University optimiert. Durch geeignetes Werkzeug und Training konnte ein vollständiger Aufbau des mobilen Labors mit 3 Personen innerhalb von zwei Stunden erfolgen. Die Auf- und Abbauten und die Messungen verliefen störungsfrei.

Die Messdaten wurden in Form von wav.-Dateien gespeichert. Während der laufenden Messung wurden Notizen geführt, um die Randbedingungen festzuhalten. Ereignisse während der Messung wurden ebenso notiert wie sich ändernde Wetterbedingungen. Ein kompletter Datensatz einer Messung einer Fassadenvariante bestand aus den Notizen, mehreren Mehrspur-Audiodateien und einem Dateiordner mit Bildern des Aufbaus.





5.1 Durchführung einer Messung

Im Folgenden wird exemplarisch die Durchführung einer Messung anhand der Messungen am Standort 8 "Frankfurt Westend-Senckenberg-Anlage" dargestellt.



Abbildung 34 Situation an der Senckenberg Anlage / Ecke Robert-Mayer-Straße

Das mobile Fassadenlabor besitzt eine Fassaden-Testfläche von 5 m x 2,5 m. Zwischen der Fassade-Testfläche und der Straßenkante bestand ein Abstand von ca. 6 m. Zwei Mikrofone wurden unmittelbar vor der Testfläche, in einem Abstand von 70 cm installiert, 4 weitere Mikrofone in 4 m Abstand jeweils zwei in einer Höhe von 1,80 m und 4,0 m über Straßenniveau. Um einen Richtungseinfluss erfassen zu können, wurden die Mikrofone in Pärchen unterteilt (Nord- und Südstandorte). Die Verortung der Mikrofone in 1,8 m erfasste die Straßenampel, so dass der stehende und der durchfahrende Verkehr klar hörbar aufgezeichnet werden konnten. Anhand dieser Mikrofone war es möglich den Einfluss der Fassadengeometrie in Bezug zum Abstand zur Fassade zu analysieren. Von den zwei Mikrofonen in 4 m Höhe wurde nur eines mit Windschutz ausgestattet. Aus dem Unterschied der beiden Kanäle lässt sich die Einwirkung von Wind auf die Messumgebung erkennen. Als Referenz wurde ein weiteres Mikrofon auf der gegenüberliegenden Straßenseite installiert. Dies diente als Referenzsignal, da hier der Einfluss Schallreflektion durch die Fassade nicht bestand. Die Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen diese Anordnung perspektivisch und im Grundriss. Zusätzlich gab es noch eine Mikrofonposition in 4 m Abstand seitlich zur Testfläche. Dieses Mikrofon war neben der Fassade positioniert.

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur



Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen





Abbildung 36 Grundriss Messanordnung Senckenberg Anlage

Die Messungen wurden mit Mehrspur-Digitalrekordern durchgeführt. Als Mikrofone wurden Messmikrofone der Klasse 2 eingesetzt. Als Referenzsignal wurde ein Referenzpegel von



94,4 dB zu Beginn einer jeden Messung für jeden einzelnen Kanal aufgenommen. Hierfür wurde eine kalibrierte Referenzsignalschallquelle auf jedes einzelne Mikrofon aufgesteckt. Dadurch war es möglich, Messwerte verschiedener Digitalrekorder in gegenseitigen Bezug zu setzen und vergleichende Messergebnisse zu erhalten. Während der Messungen wurden parallel Beobachtungen über besondere Ereignisse notiert. Einzelne Vorbeifahrten lauter Fahrzeuge, Stauungen des Verkehrs oder LKW Einfahrten in die nahe Baustelle wurden als besondere Ereignisse erfasst.

6 Auswertung eines Datensatzes

6.1 Vorgehensweise

6.1.1 Zusammenfügen der einzelnen Audiodateien einer Messung

In einer ersten Datenprüfung wurden alle Audiodateien auf Vollständigkeit und Fehler überprüft. Fehlende oder fehlerhafte Dateien wurden falls nötig aussortiert. Im zweiten Schritt wurden alle Einzel-Audio Dateien einer Messung zu einer Mehrspur-Audio Datei zusammengefasst. In der Mehrspur-Audio Datei ist jede Audiospur einer bestimmten Mikrofonposition zugewiesen. Die zeitliche Übereinstimmung der Audiospuren wurde mithilfe der in der Audio Software dargestellten Pegel/Zeitverläufe und durch Anhören überprüft und nötigenfalls korrigiert. Im Falle der drahtlosen Übertragung zwischen den Recordern wurden 4 ms aus der betreffenden Audiospur am Anfang der Spur herausgeschnitten. In Abbildung 37 ist ein Datensatz einer 23 minütigen Messung am Standort Senckenberg Anlage dargestellt. Die Kanalbezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen der Mikrofonpositionen.

										17	0919_Refere	nz.											
		NI				R		-1)	Ő.		· / -		るる国	11-11-13	1 00	Ó	PPI	22	- 0				
	الكالك	- 5	• * •	D) 🔻	-18 -12 -6	° / -	-18 -12 -6	o Ci	ore Au	()	Built-in Out	sut 🖸 🎤	Built-in M	icroph	2 (Stered) Input	0						
-1:00	0 1:0	0 2:0	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:	0 11:0	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
× ME15Senc0 ▼ 1.0 Mono, 48000Hz																							
24-bit PCM 0.5																							
- + 0.0	-	440						<u>s. 112</u>					1000	-	1002						and the second		-
1 - 3 -05	C	h 0.	PMD62	20 1	, para	llel zu	Nor1	16															
-10		000000																					
× MZ000012 ▼ 1.0	1																						-
Left, 48000Hz 0.5																							
Mute Solo	- de se	-	maline	لسب	herende	-		10	Judi	leans l	- Hall		a an	- h		Helene	handl	line		la mi	and an est		
0.0			The state	-			and the second		1410	In the second	MAL CON		-			Magner	and the second	CHANGE ST		(MIRA)	Man Providence		
1	C	HI;	PMD6	60, 7	70cm	vor F	assad	e, Ch	ISU	iden				- 19									11
-1.0			0.000	0.001	and the second				eneresees														
× M2000012 ▼ 1.0 Right, 48000Hz																							
24-bit PCM 0.5	-													16									
- + 0.0	-	-	budden -			- A AMARIA	-				- And			-	-	Andrew a		Press	-		-		-
1 - 1 -05			DMD	00	70	- · · · · · · ·				Invel				(L)		and the second							
-1.0	<u> </u>	л II,	PIVIDO	00,	7000	I VOI P	assac	ie, C	n ii b	10106	en												
× SCENE1_27 ▼ 1.0	-																						=
Left, 96000Hz 24-bit PCM 0.5																							
Mute Solo			1				and the second second				S. 10.					a dine	2. A.			i			
				and the second	19 Y	The second s	and a second second			97.	Men 1		100100	- C	- M	- Alexandre	1.000	1100	1000			-	
L	-	h 1	PMDG	80	1000	nvor	Facca	de C	'h 1	unto	n Süd	on											
-1.0	<u> </u>	п ц			10001		1 4554	ue, c		unic	nouu	CII											
x SCENE1_27 V 1.0																							
24-bit PCM 0.5																							
- + 0.0											-			-		+ +++++++++++++++++++++++++++++++++++++							-
1 0 1 -0.5		h 2	PMDG	80	1000	nvor	Facca	do C	h 2	ohor	Süde	10											
-1.0	, v	11 Z ,	FIVIDO	00, •	40001		assa	ue, c	11 2	obei	ouue	211											
× SCENE1_27 ▼ 1.0																							=
Mono, 95000Hz 24-bit PCM 0.5																							
Mute Solo			- Ju			- and	A CONTRACT				and a second			du		endian	L						
in Quant			A Madan			marke				Secol Bask								-	10 cto odka				
L 8 -0.5	C	h 3,	PMD6	80, 4	400ci	n vor l	Fassa	de, C	ch 3	unte	n Nore	den											
-1.0				110																			
× SCENE1_27 ▼ 1.0 Mono, 96000Hz																							
24-bit PCM 0.5	1								17													LA	
+ 0.0	-				-					-	-							-				- Cille	
1 0 8 -0.5		h1	PMDG	80	1000	nvor	Facca	do C	h A	ohor	Nord	on										l'ar	
-1.0		n 4,	FIVIDO	00, ·	40001		rassa	ue, c	414	oper	TNOTO	en											
× ME12SENC0 ▼ 1.0		_		_	_	_		_		_	_	_	_		_	_			_	_	_	_	-
Mono, 48000Hz 24-bit PCM 0.5																							
Mute Solo	-	delle	hadded	100	and a	marke		No. of	all real		milio			unde		a shine	Links	June	have	ALL AN		a blow and	
· · · · · ·		India	The second second	-	-	Sulfary In	and the second second	-	101010-005		ADDALL TO	Contraction of the	-	1	STAND STATE	A statement		- Poster		(Internet	Contract Contract	ALM THE	
L0.5	C	h 8.	PMD6	20 2	auf	ler an	deren	Straf	3ens	eite.	in Act	nse mi	t Chl	und C	h 1/2								
-1.0				-													_	_		_			
n x i shel Track ▼I																							
Project Rate (Hz):	_	Selection S	tart: OI	End O Le	ingth A	udio Position	11																
48000	Snap To	000.317	seconds - 00	∞ 000.0	conds	000,000 see	conds -																

Abbildung 37 Achtkanaliger Datensatz, Zuordnung der Audiospuren im Datensatz zu den Messpunkten



6.1.2 Aufteilung in Auswertungsintervalle

Die grundlegende Frage dieses Messverfahrens ist die in Bezug-Setzung zweier Messungen, die zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt wurden. Um im Datensatz zu referenzierbaren und wiederkehrenden Ereignissen zu kommen, wurden die Ampelintervalle als zeitliche Rasterung genutzt. In Abhängigkeit der Ampelschaltung an der Senckenberg Anlage gab es alle 178 s ein 30 s Intervall mit überwiegend schnellen Vorbeifahrten. Die zeitliche Zuordnung zum Zeitpunkt der Ampelgrünschaltung zeigt Abbildung 38.



Abbildung 38 Zeitverlauf im Datensatz. Bildung der Auswerteintervalle in Abhängigkeit der Ampelschaltung

Dadurch ist es möglich, je nach Messdauer bis zu 10 Auswerteintervalle zu definieren. Die Auswerteintervalle werden einer Frequenz-Spektrum Analyse unterzogen.

6.1.3 Erstellung von Pegel-Frequenzkurven

Für jedes Auswerteintervall wird eine Verteilungskurve der charakteristischen Pegel-Frequenz erzeugt. Abbildung 39 zeigt die Messkurven von zehn Auswerteintervallen. Die Pegelunterschiede der Messwerte liegen bei ca. 10 dB, hervorgerufen durch Unterschiede in der Stärke und Zusammensetzung des Verkehrslärms im Auswerteintervall. Es ist deutlich erkennbar, dass die Kurvenverläufe ähnliche Charakteristika aufweisen.





Abbildung 39 Pegel-Frequenzkurven für 10 Auswerteintervalle mit je 30 s Dauer. Auswertung von Mikrofonposition Ch 1 einer Messung von 23 min Gesamtdauer.

6.1.4 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven

Im Feldversuch kann die akustische Wirkung einer strukturierten Fassade nur im direkten Vergleich mit einer Referenzfläche analysiert werden. Hierzu werden die Messergebnisse der glatten Referenzfläche mit Messergebnissen der unterschiedlichen Fassadenmodifikationen in Bezug gesetzt. Dazu werden vergleichbare Auswerteintervalle des charakteristischen Verkehrslärms über die Mikrofonposition Ch 8 in Bezug gesetzt. Die Audiospur von Ch 8 gibt die Messung ohne Einfluss der Fassade wieder. Diese Verläufe werden im Zuge der Auswertung verglichen und, bei guter "Passung" zweier Auswerteintervalle, zu Paaren zusammen gefasst. Abbildung 40 stellt einen derartigen Pegelverlauf mit guter "Passung" dar.



Abbildung 40 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit einer guten Passung hinsichtlich Charasteristika und Pegeldifferenzen

Abbildung 41 zeigt zwei Pegel-Frequenzkurven für Kanal Ch 8 mit ähnlichem charakteristischen Verlauf, aber deutlichen Pegelunterschieden. Eine derartige Kurvenpaarung würde in der Bestimmung des akustischen Effekts bedingt durch die Pegelunterschiede unrealistische Werte liefern.





Abbildung 41 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit vergleichbarem Verlauf aber hoher Pegeldifferenz.

Die in Abbildung 42 dargestellte Kurvenpaarung weist zwar geringe Pegelunterschiede, aber unterschiedliche Charakteristika der Pegel-Frequenzkurven auf. In der Auswertung führt diese Kurvenpaarung zu einer partiell verzerrten Bewertung der akustischen Wirksamkeit einer modifizierten Fassade.



Abbildung 42 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit unterschiedlichem Verlauf aber geringer Pegeldifferenz zueinander.



Aus der Ungleichmäßigkeit der gemessenen Verkehrsereignisse über verschiedene Tage hinweg ergab sich eine Übereinstimmung von 3 Kurvenpaarungen je 10 Auswerteintervallen. Anhand der 3 ausgewählten Kurvenpaare mit guter Passung können die anderen Kanäle der zugehörigen Auswerteintervalle miteinander verglichen werden. Um die Wirkung der Fassade an einer Mikrofonposition darzustellen, wurde die Differenz zwischen den Pegel-Frequenzkurven der Referenzfläche und der Testfassade für den entsprechenden Kanal beider Datensätzen gebildet. Aus den so entstandenen 3 Wertekurven je Kanal wurde eine Mittelwertkurve gebildet. Abbildung 43 zeigt stellvertretend für andere Auswertungen die Mittelwert-Pegel-Frequenzkurve für die Lamellen 90 Grad geklappt (AVG-L 90).



Abbildung 43 Pegel-Frequenzkurve für Mikrofonposition Ch I gemessen vor den Lamellen 90 Grad geklappt.

Die Kurve wurde gemittelt aus den 3 Kurvenpaarungen L90 1, L90 3 und L90 6. Diese sind im Graphen nur mit Markern ohne Linien gezeigt. Die, als Linie dargestellte Mittelwertkurve, beschreibt den Effekt der Veränderung zwischen zwei unterschiedlichen Fassadenoberflächen an einer bestimmten Mikrofonposition. Positive Werte bedeuten eine Pegelerhöhung, negative Pegelwerte bedeuten eine Pegelreduzierung durch die Lamellenstruktur im Vergleich zu der geschlossenen Referenzfläche. Eine Übersicht der Auswerteprozedur ist in Abbildung 44 wieder gegeben.





Abbildung 44 Ablaufschema der Auswertung



6.1.5 Auswertung der Datensätze anderer Standorte

Um Datensätze anderer Standorte auswerten zu können, wurde die Referenzierung der Schallquelle an die örtlichen Gegebenheiten und die Lärmquelle angepasst. Da nicht alle Standorte mit Straßenverkehrslärm eine Ampelschaltung aufwiesen, wurden andere Zeitintervalle zur Bildung von vergleichbaren Messdaten verwendet. Anhand der parallel zu den Messungen geführten Notizen und über eine visuelle Datenschau der aufgenommenen Messsignale in einem Audioprogramm wurden einzelne Vorbeifahrten im Messdatensatz identifiziert. Fluglärmereignisse wurden in gleicher Weise als einzelne Vorbeiflüge identifiziert. Die Überprüfung der Einzelereignisse auf Störgeräusche wurde durch Anhören per Kopfhörer durchgeführt. Tabelle 6 liefert einen Überblick über die verwendeten Referenzierungsintervalle und deren Dauer.

Standort	Lärmquelle	Referenzierung	Dauer
Pariser Straße	Strasse	Einzelne Vorbeifahrten	20 s
Lyoner Str 1	Alle Lärmarten	Zeitintervalle mit gleicher	8,00 min
		Anzahl	
		Einzelereignisse	
Senckenberganlage	Strasse	Zeitintervalle	30 s
		definiert durch	
		Ampelschaltung	
Lyoner Straße 27	Fluglärm/Straße	Einzelne	20 s
		Vorbeifahrten	
		Einzelne	
		Vorbeiflüge	
Nibelungenallee	Strasse	Zeitintervalle	4 min
		definiert durch	
		Ampelschaltung	

Tabelle 6 Übersicht der standortabhängigen Referenzierung der Lärmquelle



6.1.6 Anordnung und Messdaten der Mikrofonpositionen

Im Folgenden wird die Anordnung des Messaufbaus und die Bedeutung der Mikrofonpositionen für die Auswertungen anhand der Messungen an der Senckenberganlage vorgestellt. Abbildung 45 zeigt die Anordnung der Mikrofonpositionen und Zuordnung der Kanalbezeichnungen.



Abbildung 45 Grundriss der Mikrofonpositionen am Standort 11 "Senckenberganlage"

• Mikrofonposition **Ch 0**

Die Position für Ch 0 ist immer so gewählt, dass eine Beeinflussung durch die Fassade ausgeschlossen werden kann. Je nach Platzverfügbarkeit am Standort war diese Mikrofonposition in Achse mit Ch I und Ch II oder mit Ch 1 und Ch 3. Die Audiodateien dieser Spur dienen als Back-Up für das Referenzierungsprocedere anhand der Messdaten von Mikrofonposition Position Ch 8. Die Daten von Mikrofonposition Ch 0 wurden nur ausgewertet, wenn an Position Ch 8 Fehler auftraten.

• Mikrofonposition Ch I und Ch II

Die Mikrofonpositionen Ch I und Ch II wurden immer in 70 cm Abstand zur Testfläche in 1,8 m Höhe über dem Boden positioniert. Diese beiden Positionen erfassen den Nahbereich der Testfassade. Durch die Nähe zur Testfläche ergab sich bei Fassaden Modulen die eine größere räumliche Tiefe aufwiesen ein Abstandsproblem zum Mikrofon. Die gemessenen Werte stiegen durch den geringen Abstand zur reflektierenden Fläche um bis zu 8 dB an. Besonders ausgeprägt war dies beim Textil-Modul mit bis zu 60 cm Tiefe. Anhand der Grafik in Abbildung 46 läßt sich ein Pegelunterschied von 2 dB erkennen. Die geringeren Werte an Mikrofonposition Ch I wurden in einer lotrechten Distanz von 40 cm zur Testfassade gemessen. Für die höheren Werte von Ch II betrug die lotrechte Distanz zwischen Mikrofonposition und Testfassadenoberfläche 10cm.





Abbildung 46 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven der Textilfassadenmodule für die Mikrofonpositionen Ch I und Ch II im Nahfeld.

Da diese Werte an dieser Stelle keine Aussage über die Wirkung der Fassade treffen, sondern nur über den geringen Abstand des Mikrofons zur Oberfläche, wurden sie im weiteren Projektverlauf zwar ausgewertet aber nicht weiter betrachtet.

• Mikrofonpositionen Ch 1 und Ch 3

Beide Mikrofonpositionen waren in 1,8 m Höhe und in einem Abstand von 4 m zur Testfläche der Fassade positioniert. In der Ansicht des mobilen Labors war Ch 1 immer 1, 25 m von der linken Kante und Ch 3 1,80 m von der rechten Kante des Fassadenstandes positioniert. Wie der nahezu deckungsgleiche Verlauf der Pegel-Frequenz Kurven in Abbildung 47 zeigt, hat die Positionierung des Mikrofons zum seitlichen Rand hin keinen signifikanten Einfluss. Im weiteren Verlauf wurden daher die Messergebnisse des Kanals Ch 1 ausgewertet und die Ergebnisse des Kanals Ch3 als Kontrollwerte betrachtet.



Abbildung 47 Pegel-Frequenzkurve für Mikrofonpositionen Ch 1 und Ch 3 gemessen vor den Lamellen 90 Grad geklappt

• Mikrofonpositionen Ch 2 und Ch 4

Beide Mikrofonpositionen waren in 4 m Höhe über den Mikrofonpositionen Ch 1 und Ch 3 angebracht. Die Mikrofonposition Ch 2 war mit einem Windschutz ausgestattet, die Position



Ch 4 ohne. Ein Mikrofon des mehrkanaligen Messaufbaus kam immer ohne diesen Windschutz zum Einsatz. Auftretender Wind ließ sich so an den Audiodaten dieses Mikrofonkanals ablesen. In Abbildung 48 ist erkennbar, dass der untere Kanal der Mehrspur-Audiodatei deutlich höhere Pegel aufweist.



Abbildung 48 Bestimmung der Unterschiede zwischen einem Auswerteintervall mit Wind und einem Auswerteintervall ohne Wind .

Auch bei einer Überprüfung durch Anhören des aufgenommenen Signals mit einem Kopfhörer lässt sich der Wind gut detektieren. In den Frequenzauswertungen ist Wind an diesen Stellen als deutliche Pegelsprünge von mehr als 5 dB ablesbar. In Abbildung 49 dargestellt ist die Differenz der Auswertungen der Intervalle "mit Windeinwirkung" und "Ohne Windeinwirkung". Ohne Windeinwirkungen ist die Differenz im Bereich von 1 dB. Bei Windeinwirkung steigt die Differenz mit fallender Frequenz auf Werte über 10 dB. Damit ist sichergestellt, dass der verwendete Windschutz keinen störenden Einfluss auf die Messwerte hat. Darüber hinaus ist mit einem Anhören der Audiodatei des Mikrofons ohne



Windschutz und Inspektion der grafischen Darstellung des zugehörigen Pegelverlaufs eine zuverlässige Winderkennung sichergestellt. Teile des Datensatzes können so vorab aus der Auswertung ausgeschlossen werden.



• Mikrofonposition Ch 8

Die Position für Ch 8 ist immer so gewählt, dass eine Beeinflussung durch die Fassade ausgeschlossen werden kann. Je nach Platzverfügbarkeit am Standort war diese Mikrofonposition in Achse mit Ch I und Ch 1 oder mit Ch II und Ch 3 auf der anderen Straßenseite. Die Audiodateien dieser Spur dienen als Referenz für die Bildung der Kurvenpaare für die Auswertung. Falls ein Fehler an Position Ch 8 vorliegt, können die Audiodaten von Mikrofonposition Ch 0 verwendet werden.



7 Ergebnisse der Auswertungen der Testfassaden 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für einzelne Testfassaden

Im Folgenden werden die Messergebnisse der gemessenen und erfolgreich ausgewerteten Testfassaden und Standorte für die Mikrofonposition Ch 1 vorgestellt. Die Mikrofonposition Ch 1 in 4 m Entfernung zur Testfassade ist in in Abbildung 50 dargestellt.



Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade.

7.1.1 Referenzfläche

Als Referenz wurde zunächst die glatte, ebene Fassadenoberfläche nach dem oben beschriebenen Prozedere gemessen und deren Ergebnisse analysiert. Die Referenzfläche im mobilen Labor ist in Abbildung 51 dargestellt.





Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27.

Die frequenzabhängigen Pegelwerte dieser Messreihe dienten bei allen nachfolgenden Messwertvergleichen als Referenz für den jeweiligen Standort und werden von den Messwertergebnissen der Fassadenmodifikationen für den gleichen Standort subtrahiert. Die Graphen in Abbildung 52 zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Standorte von der dort vorherrschenden Verkehrslärmquelle und deren Pegel.



Abbildung 52 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Referenzfläche an fünf Standorten.



- Die beiden lauten Standorte sind Senckenberganlage und Nibelungenallee. Beide Standorte liegen an stark befahrenen mehrspurigen Straßen. Die Pegelmaxima der dB(A) bewerteten Kurven liegen bei 1000 Hz.
- Der Kurvenverlauf des Standortes Nibelungenallee weist im Vergleich zum Standort Senckenberganlage höhere Pegel für Frequenzen über 1000 Hz. Im Falle der Nibelungenallee ist dafür ein reflektierender Bodenbelag zwischen Straße und dem mobilen Labor verantwortlich. Am Standort Senckenberganlage befand sich vor dem Testlabor ein 2m breiter Grünstreifen mit geringeren Reflektionseigenschaften.
- Der Verlauf der Pegel-Frequenzkurve des Standortes Lyoner Straße 27 zeigt ein nach höheren Frequenzen verschobenes Maxima. Diese Verschiebung ist dem vermehrten Einfluss von Fluglärm an diesem Standort geschuldet.
- Der Standort Pariser Straße wies zwei Besonderheiten auf. Zum einen lag er in einer Tempo 30 Zone, zum Anderen befand sich zwischen der Gehsteiganlage und der Testfläche des mobilen Labors ein 1 m breiter Streifen lockeren Erdreichs.
- Am Standort Lyoner Straße 1 sind keine klaren Maxima im Pegelverlauf erkennbar. Dies lässt sich auf die Einwirkung von mehreren Lärmquellen aus verschiedenen Richtungen auf einen Innenhof in Kombination mit Reflexionen an den umgebenden Gebäudewänden zurückführen. Eine eindeutige Lärmquelle ist an den Ergebnissen der Messung der Referenzfläche nicht ablesbar.

7.1.2 90° geöffnete Lamelle

Die Konstruktion der Referenzfläche bietet die Möglichkeit, die Fläche in Lamellenbreiten von 42 cm um bis zu 90° zu öffnen. Die in Abbildung 53 dargestellte Fassadengeometrie stellt bei direkt lotrecht einfallender Schallwelle eine maximal durchlässige Oberfläche ohne jegliche Reflexion dar.



Abbildung 53 Testfassade "L 90", Lamellen aus Siebdruckplatten um 90 Grad geöffnet





Abbildung 54 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade L_90 an fünf Standorten.

- Die in Abbildung 54 dargestellten Pegelkurven bei 90° geöffneter Lamelle zeigen erwartungsgemäß eine durchgängige Verbesserung des Lärmpegels um bis zu -0,5 dB für die Standorte Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße 27.
- Für die Standorte Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße 27 ist der gemessenen Pegel im Bereich von 250 Hz bis 400 Hz um ca 1,5 dB niedriger als der gemessene Pegel der Referenzfläche.
- Die typischen Muster im Kurvenverlauf der Messungen der Standorte Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße 27 sind in einer ähnlichen Anordnung von beeinflussenden Umgebungsflächen entstanden.
- Die Pegel-Frequenzkurve für den Standort Lyoner Straße 1 ist im Verlauf gegenüber den anderen Kurvenverläufen stark gekippt. Im Bereich unter 800 Hz findet eine Pegelerhöhung um bis zu 2 dB statt. Im Bereich über 1000 Hz findet eine Pegelabsenkung um bis zu 3 dB statt.
- Der Standort Lyoner Straße 1 weist als einziger Standort räumliche Begrenzungen und Lärmquellen in allen Richtungen auf. Dies zeigt sich in der verzerrten Kurve im Vergleich zu den Standorten Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße 27.
- An der Pegel-Frequenzkurve des Standortes Pariser Straße lässt sich im Bereich von 250 Hz bis 315 Hz und um 1000 Hz eine Pegelerhöhung um 1 dB ablesen. Im übrigen Frequenzbereich ist eine Pegelreduktion um 1 dB erkennbar.
- Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Straßenverkehrs-Standorten Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße zur Pariser Straße besteht in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Anzahl der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Diese Änderung der Verkehrsstärke führt zu unterschiedlichen Wirkungen der Lamellen an diesen Standorten.

7.1.3 45° geklappte Lamelle

Die Konstruktion der Referenzfläche bietet die Möglichkeit, die Fläche in Lamellenbreiten von 42 cm um bis zu 90° zu öffnen. Abbildung 55 zeigt die Messung der Lamellen in einem Öffnungswinkel von 45° am Standort Senckenberg.





Abbildung 55 Testfassade "L 45", Lamellen aus Siebdruckplatten um 45 Grad geöffnet



Abbildung 56 Pegel-Frequenzkurve für die Messung der Testfassade L_45 am Standort Senckenberganlage





Senckenberganlage

Abbildung 56 zeigt die Pegel-Frequenzkurven für die Messung der 45° geklappten Lamelle am Standort Senckenberganlage.

• Für die um 45° geöffnete Lamelle ist keine eindeutige Reduktion innerhalb des gemessenen Frequenzbereichs erkennbar.

Die Unterschiede in der Wirkung der 45° geklappten Lamelle und der 90° geklappten Lamelle ist ablesbar an den Pegel-Frequenzkurven in Abbildung 57.

• Im Bereich von 630 Hz bis 800 Hz erhöht sich der Pegel um 0,5 dB. Im Bereich von 250 Hz, 400 Hz und 2500 Hz reduziert sich der Pegel um 0,5 dB. Diese unstete Veränderung ist auf den gewählten Lamellenabstand und die Mehrfachreflexion von Lamellenrückseite auf Lamellenvorderseite zurück zu führen.

7.1.4 WDVS System

Die in Abbildung 58 dargestellte Fassade stellt eine, auf akustische Belange modifizierte Oberflächenstruktur eines Wärmedämm-Verbundsystems dar. Im Zuge dieser Versuche wurden mit einem Hersteller nach unseren Vorgaben einzelne Paneele produziert und mit Hilfe von Agraffen in die Unterkonstruktion des Versuchsstandes eingehängt. Durch die Modularisierung in Kombination mit dem Agraffensystem war es möglich die Elemente in 90° Schritten gedreht einzubauen.





Abbildung 58 WDVS Module eingebaut in das mobile Labor am Standort Lyoner Straße 27. Einbaulage der Module war GFU (<u>G</u>roße <u>F</u>läche <u>un</u>ten)

Der Einbau und die Messung der Module wurden sowohl mit horizontaler, als auch mit vertikaler Strukturierung in allen 4 möglichen Einbaulagen durchgeführt. Die Einbaulage wurde anhand der Position der großen Fläche am Modul beschrieben. In Tabelle 7 sind die Einbaulagen des WDVS Moduls in das mobile Labor und die zugehörigen Abkürzungen aufgeführt.

vertikal

horizontal

	Abkürzung	Beschreibung	Orientierung	Messung
1	GFL	Große Fläche links	vertikal	Pariser Straße
2	GFO	Große Fläche oben	horizontal	Pariser Straße

Große Fläche rechts

Große Fläche unten

Tabelle 7 Einbaulagen und Abkürzungen für die WDVS-Testfassade

3

4

GFR

GFU

Im Folgenden werden die Messwerte in Abhängigkeit der Einbaulagen dargestellt.

Senckenberg

Senckenberg





Abbildung 59 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS in vertikaler Einbaulage GFL am Standort Pariser Straße

• Der Graph der Messwerte für die vertikale Einbaulage GFL am Standort Pariser Straße lässt Pegelerhöhungen von bis zu 1,5 dB im Bereich der Frequenzbänder 315 Hz, 1000 Hz und zwischen 2000 Hz bis 3000 Hz erkennen.



Abbildung 60 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS in horizontaler Einbaulage GFO am Standort Pariser Straße

- Bei den Messwerten der um 90° gedrehten horizontalen Einbaulage GFO ist eine Pegelerhöhung am gleichen Standort nur im Bereich um 2500 Hz schwach vorhanden. In den übrigen Frequenzbändern können Pegelreduzierungen mit bis zu -1,5 dB abgelesen werden
- Der charakteristische Knick im Kurvenverlauf ist bei 315 Hz in beiden Messungen erkennbar





Abbildung 61 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS in der vertikalen Einbaulage GFR am Standort Senckenberganlage.

• An den Messwerten für die Messung der Testfassade WDVS in der vertikalen Einbaulage GFR am Standort Senckenberganlage lässt sich eine breitbandige Pegelreduzierung um bis zu -1,5 dB im Bereich von 800 Hz bis 200 Hz ablesen. In den übrigen Frequenzbändern findet kaum eine Pegeländerung statt.



Abbildung 62 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS in der horizontalen Einbaulage GFU am Standort Senckenberganlage.

- An den Messwerten für die Messung der Testfassade WDVS GFU am Standort Senckenberganlage lässt sich eine breitbandige Pegelreduzierung um bis zu -0,5 dB im Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz ablesen.
- In den Frequenzbändern unterhalb 400 Hz und ober halb 2500 Hz findet eine Pegelerhöhung um bis zu 1 dB statt.
- Der charakteristische Knick im Kurvenverlauf ist bei 315 Hz auch hier in beiden Messungen am Standort Senckenberganlage erkennbar.



7.1.5 Vergleich der Messergebnisse der vertikalen Einbaulage des WDVS Moduls an verschiedenen Standorten.

Die vertikalen Einbaulagen GFR und GFL haben die gleichen geometrischen Bedingungen zu den umgebenden Flächen im Hinblick auf die Schallumlenkung, nur jeweils gespiegelt. Sie können also an unterschiedlichen Standorten verglichen werden. Für die horizontalen Einbaulagen GFO und GFU gilt dies nicht. Bei diesen Einbaulagen ist die größte Teilfläche des Moduls entweder nach unten nach oben orientiert. Bei einer Orientierung der großen Einzelfläche nach unten entsteht ein starker Bezug zur Bodenfläche. Bei der Orientierung der großen Einzelfläche nach oben ist kein Bezug zu einer weiteren reflektierende Fläche vorhanden.



Abbildung 63 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS GFL/GFR in vertikaler Einbaulage am Standort Senckenberganlage und Pariser Straße.

- An der Pegel-Frequenzkurve des Standortes Pariser Straße lässt sich im Bereich von 800 Hz bis 1600 Hz und um 2500 Hz eine Pegelerhöhung um bis zu 1,5 dB ablesen.
- Der charakteristische Knick im Kurvenverlauf bei 315 Hz ist auch hier in beiden Messungen erkennbar.
- Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Straßenverkehrs-Standorten Senckenberganlage, Nibelungenallee und Lyoner Straße zur Pariser Straße besteht in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge und deren Anzahl. Die Geschwindigkeit und Anzahl der vorbeifahrenden Fahrzeuge hat einen Einfluß auf die akustische Wirkung der Fassadenstruktur.

7.1.6 Vergleich der Messergebnisse der horizontalen Einbaulage des WDVS Moduls in Abhängigkeit verschiedener Lärmarten.





Abbildung 64 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade WDVS GFU in horizontaler Einbaulage am Standort Senckenberganlage und Lyoner Straße 1 mit unterschiedlichen Lärmquellen.

- Die in Abbildung 64 dargestellten Graphen lassen deutliche Unterschiede in den Bereichen unterhalb 500 Hz und oberhalb 1200 Hz erkennen.
- Am Frequenzband 315 Hz ist der charakteristische Knick im Kurvenverlauf für das WDVS Modul erkennbar. Für Fluglärm weist das Frequenzband von 315 Hz eine Pegelreduzierung um -2 dB auf. Für Straßenlärm erhöht sich für das Frequenzband von 315 Hz der Pegel um 1 dB.
- Für von oben kommenden Fluglärm wird im Bereich der Frequenzbänder 2000 Hz und 2500 Hz eine Pegelreduzierung von -2 dB erreicht. Im Zusammenhang mit Straßenverkehrslärm lässt sich im gleichen Frequenzbereich nur eine geringe Pegeländerung ablesen.
- Die gemessene, effektivere Pegelreduzierung für Fluglärmereignisse wird durch ein Strahlendiagramm bestätigt. Das Strahlendiagramm in Abbildung 65 zeigt deutlich, dass im Falle einer Fluglärmquelle von oben, weniger reflektierte Strahlen den Bereich des Mikrofons erreichen.





Abbildung 65 Strahlendiagram für das WDVS System in der horizontalen Einbaulage GFU im Bezug zu zwei Lärmarten.

7.1.7 Textil-Fassaden Modul

Diese Fassadenmodule bestehen aus Glasfasergeweben, die üblicherweise als ebene vorgehängte Module Verwendung finden. Die Gewebedichte erlaubt eine Durchsichtigkeit bei gleichzeitiger Wirkung als starrer Sonnenschutz. Wie bei den zuvor beschriebenen Fassadentypen wurde auch dieses Produkt auf akustische Belange modifiziert, indem durch eine räumliche Verzerrung der ebenen Oberfläche eine Umlenkung der auftreffenden Schallwelle möglich wurde. Die Paneelabmessungen wurden auf die Größe des Versuchsstandes angepasst, so dass auch hier eine Drehung der Paneele umsetzbar war und Erkenntnisse zur Schallumlenkung gewonnen werden konnten.





Abbildung 66 In das mobile Labor sind Textil-Fassaden-Module eingebaut. Die Einbaulage der Module war Textil_UL (<u>Textil-Fassaden-</u>Modul, Fläche nach oben gekippt)

Die Messung der Module wurde für zwei Einbaulagen durchgeführt. Die Einbaulage wurde beschrieben anhand der Orientierung der geneigten Textiloberfläche. In Tabelle 8 sind die Einbaulagen des Textilfassaden Moduls in das mobile Labor und die zugehörigen Abkürzungen aufgeführt.

Tabelle 8 Einbaulagen und Abkürzungen für die Textil-Testfassade

	Abkürzung	Beschreibung
1	Textil_UL	Fläche nach oben gekippt
2	Textil_OR	Fläche nach unten gekippt

Im Folgenden werden die Messwerte in Abhängigkeit der Einbaulagen dargestellt.





Abbildung 67 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Textilfassade, Einbaulage "Fläche nach unten gekippt" am Standort Senckenberganlage

- Die Messkurve in Abbildung 67 weist im Bereich der Frequenzbänder von 500 Hz bis 2000 Hz eine nahezu konstante Minderung von -1,5 dB auf. Die Pegelminderung in dem Bereich zwischen 500 Hz und 1600 Hz ist auf die frequenzabhängigen Reflexionseigenschaften des Textils zurückzuführen.
- In den Bereichen unter 400 Hz und oberhalb 2000 Hz lässt sich nur eine geringe Pegelreduzierung feststellen.



Abbildung 68 Pegel-Frequenzkurve für die Messungen der Textilfassade, Einbaulage "Fläche nach oben gekippt" am Standort Senckenberganlage



- Die Messkurve in Abbildung 69 weist im Bereich der Frequenzbänder von 400 Hz bis 6000 Hz eine nahezu konstante Minderung von -2 dB auf. Die breitbandige Pegelreduzierung ist auf eine Reflexion des Straßenverkehrslärms nach oben zurückzuführen.
- In dem Frequenzbereich unter 315 Hz lässt sich nur eine geringe Pegelreduzierung feststellen. Hier verhält sich das Textilfassaden-Modul bei beiden Einbaulagen ähnlich. Unterhalb des Frequenzbandes von 315 Hz ist die Wellenlänge des auftreffenden Verkehrslärmspektrums größer als die Dimensionen des Textilfassadenmoduls. Der Einfluss der aufgebrachten reflexionsverändernden Struktur auf den einfallenden Schall nimmt ab 315 Hz mit fallender Frequenz ab.



Abbildung 69 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Textilfassade in Einbaulage "Fläche nach oben gekippt" am Standort Senckenberganlage und Lyoner Straße 27 mit unterschiedlichen Lärmquellen.

• Ein Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Einbaulage "Fläche nach oben gekippt" zeigt die reflexionsverändernde Wirkung in Abhängigkeit der betrachteten Schallquelle. Die Für Straßenverkehrslärm breitbandig wirksame Pegelreduzierung von -2 dB der Einbaulage zeigt für Fluglärmereignisse Pegelerhöhungen von bis zu 3 dB. Im Falle von Schalleinwirkungen von oben erhöhen die Reflexionen an der Oberfläche des Textils die gemessenen Schallpegel.

7.1.8 Metallfassade

Als weitere Fassadenvariante wurden Blechpaneele mit einem ausgelaserten Lochmuster untersucht. Die dreieckförmigen Einschnitte der Fassadenoberfläche wurden in zwei Größen ausgeführt. Von den Dreiecken wurden jeweils zwei Kantenlinien ausgelasert und über die dritte Kante nach innen gekantet. Damit ergibt sich aus akustischer Sicht eine Umlenkung der Schallwellen über das nach innen gekantete Dreiecksblech auf die Paneel-Rückseite. Diese Metallpaneele wurden mit Agraffen an der Systemunterkonstruktion befestigt.





Abbildung 70 Metallfassadenmodule eingebaut in das mobile Messlabor





• Die Pegel-Frequenzkurve der Messung am Standort Senckenberganlage in Abbildung 71 zeigt Pegelreduzierungen von bis zu -2 dB im Bereich der Frequenzbänder 250 Hz bis 500 Hz. Oberhalb 630 Hz sind kaum Pegelreduzierungen zu erkennen.





Abbildung 72 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die gemessenen Pegelreduzierungen der Metallfassade am Standort Senckenberganlage und Nibelungenallee.

• Die Pegel Frequenzkurve der Senckenberganlage zeigt im Vergleich zu den Messwerten der Nibelungenallee deutliche Unterschiede. Im Bereich der Pegelreduzierungen am Standort Senckenberganlage sind am Standort Nibelungenallee deutliche Pegelzunahmen festzustellen. Durch die metallene Oberfläche der Testfassade ist hier der Einfluss der reflektierenden Fläche vor dem Testlabor am Standort Nibelungenallee besonders dominant

7.1.9 Kunststein

Mit dem Material Kunststein wurde eine Fassadenstruktur gezielt auf akustische Belange hergestellt. Die plane Leichtbetonplatte wurde hierzu über Sägeschnitte in eine wellenförmige Oberflächenstruktur verändert. Die Rasterung der Einschnitte beträgt nur wenige Zentimeter. Die einzelnen Paneele dieser Testfassade sind über Agraffen an der Unterkonstruktion befestigt. Die Module können um 90 ° gedreht in zwei Einbaulagen eingebaut werden.

	Abkürzung	Beschreibung
1	Litho vertikal	Sägestruktur der Module verläuft vertikal
2	Litho horizontal	Sägestruktur der Module verläuft horizontal

Tabelle 9 Einbaulagen und Abkürzungen für die Kunststein-Testfassade





Abbildung 73 Kunststeinmodule eingebaut in das mobile Labor am Standort Senckenberganlage



Abbildung 74 Pegel-Frequenzkurve für die Messungen der Kunststeinfassade am Standort Senckenberganlage.

• Der Verlauf der Pegel-Frequenzkurve für die vertikale Einbaulage des Kunststein-Moduls in Abbildung 74 zeigt das Potential der Fassadengeometrie im Bezug auf eine Pegelreduzierung. Über einen breiten Frequenzbereich von 200 bis 5000 Hz ist durchgängig eine Pegelreduktion von -2 dB, teilweise von -4 dB gemessen worden.





Abbildung 75 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Kunststeinfassade am Standort Senckenberganlage in den Einbaulagen vertikal und horizontal.

• Der Vergleich der Pegel-Frequenzkurven in Abbildung 75 der beiden Einbaulagen vertikal und horizontal zeigt deutliche Unterschiede im Verlauf. Im Gegensatz zur vertikalen Anordnung ist die breitbandige Wirkung zwar auch für die horizontale Einbaulage ablesbar, jedoch im Bereich von -1 bis -2 dB. Im Bereich von 400 Hz bis 630 Hz erreicht die horizontale Einbaulage eine Pegelreduzierung von -4 dB.



Abbildung 76 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Kunststeinfassade am Standort Senckenberganlage und Lyoner Straße 1 in der Einbaulage horizontal.

• Auch der Vergleich der Pegel-Frequenzkurven in Abbildung 76 für die Lärmarten Fluglärm und Straßenverkehrslärm zeigt deutliche Unterschiede von bis 2 dB im Verlauf. Jedoch ist eine Ähnlichkeit der Wirkung im Frequenzverlauf ablesbar. Beide Pegel-Frequenzkurven haben im Bereich von 315 Hz bis 630 Hz eine Pegelreduktion.



Im Bezug auf Fluglärm von 2 dB. Für die Messung mit Straßenverkehrslärm wird an gleicher Stelle ein Wert von -4 dB erreicht.

7.2 Einfluss der örtlichen Rahmenbedingungen auf die Ergebnisse

7.2.1 Einfluss der Einwirkungsrichtung der Lärmquelle

Die Lärmquellen Fluglärm und Straßenlärm unterscheiden sich in der Richtung ihrer Einwirkung auf das mobile Fassadenlabor. Der Einfluss der unterschiedlichen räumlichen Anordnung einer Lärmquelle zu einer Testfassade zeichnet sich in den Messergebnissen deutlich ab. Bei der Beschallung einer Testfassade mit Fluglärm oder Straßenverkehrslärm wurden Pegelunterschiede für die Wirkung der Testfassade im Vergleich zur Referenzfläche von bis zu 5 dB festgestellt. Die ermittelten Pegelreduzierungen bei gleicher Einbaulage der Testfassade, aber unterschiedlichen Lärmquellen sind zu erkennen in Abbildung 64, Abbildung 69 und Abbildung 76. Diese unterschiedlichen Pegelreduzierungen in Abhängigkeit der Richtung einer Lärmquelle stehen in ihrer Quantität im Bezug zu den geometrischen Größen der Moduloberflächen. Die Oberflächen der strukturierten Testfassadenmodule werden aus Teilflächen gebildet. Die Größe der Teilflächen im Verhältnis zur Modulgesamtfläche ist mit der Korngröße von Materialgemengen vergleichbar. Diese kann als akustische Korngröße einer Fassade definiert werden. In Abbildung 77 sind die unterschiedlichen Korngrößen von drei Modulen dargestellt.



Abbildung 77 Wirksame Teil-Einzelflächen der Testfassaden

Um für eine Testfassade die Änderung der Pegelreduzierung in Abhängigkeit der Einwirkungsrichtung der Lärmquelle zu quantifizieren wurde die Differenz zwischen den Pegelreduzierungen für Strassenverkehrslärm und Fluglärm gebildet. Die Frequenzkurven in Abbildung 78 zeigen die Differenz zwischen den gemessenen Pegelreduzierungen für Fluglärm und Straßenverkehrslärm für drei verschiedene Testfassaden.




Abbildung 78 Pegelfrequenzkurven für die Differenz der gemessenen Pegelreduzierungen zwischen Straßen- und Fluglärm für drei Testfassaden.

Bringt man die Pegel-Frequenzkurven in Bezug zu den wirksamen Einzelteilflächen der verwendeten Testfassaden lässt sich ein Zusammenhang in Abbildung 78 erkennen. Je kleiner die wirksamen Einzelteilflächen eines Moduls sind, desto kleiner ist die Änderung der Pegelreduktion bei Änderung der Einwirkungsrichtung einer Lärmquelle. Das bedeutet, wenn große Flächen richtig eingebaut werden erzeugen sie hohe Pegelreduktionen. Falsch eingebaut hingegen verschärfen sie die Lärmsituation. Das Textilmodul erzeugt mit einer Einzelteilfläche von 1,44 m2 eine Änderung der Pegelreduktion von 1 dB bis -5 dB. Bei einem Einbau von kleineren Einzelflächen tritt dieser Effekt deutlich schwächer auf. Fassaden mit kleinen Teilflächen führen bei einem falschen Einbau nicht zu drastischen Pegelerhöhungen. Für das Kunststeinmodul mit einer Einzelteilflächengröße von 0,01 m2 liegt die Änderung der Pegelreduzierung zwischen 1 dB und -3 dB.

7.2.2 Einfluss des Pegels der Lärmquelle

Die Messungen der Referenzfläche in Abbildung 52 dokumentieren die Grundlautstärke der Lärmquellen an dem betreffenden Ort. Um den Einfluss der Grundlautstärke auf die gemessenen Pegelreduzierungen der Testfassaden zu ermitteln, wurden die Messwerte der Referenzfläche mit den gemessenen Pegelreduzierungen der 90° geklappten Lamelle verglichen. Um die Werte unabhängig von der Frequenz zu vergleichen, wurden Einzahlwerte als Mittelwert der gemessenen Pegelwerte und Pegelreduzierungen im Frequenzbereich von 160 Hz bis 6000 Hz gebildet.





Abbildung 79 Mittelwerte der Messung der Referenzfläche und der Pegelreduzierung für die Testfassade Lamelle 90° geklappt an 5 Standorten

In Abbildung 79 lässt sich an den Mittelwerten je Standort ablesen, das die Differenz Δ zwischen der Referenzfläche und der Pegelreduktion unabhängig von der Grundlautstärke des Ortes im Bereich von 0,6 dB bis 1,7 dB liegt. Es ist kein klarer Zusammenhang der Grundlautstärke eines Ortes und der Wirksamkeit der Lamellenanordnung zu erkennen. Das bedeutet das die Grundlautstärke eines Ortes keinen Einfluss auf die Wirkung einer Fassade hat.

7.2.3 Einfluss der Eigenschaft der Lärmquelle

Verkehrslärmquellen werden nicht nur über den Pegel beschrieben sondern auch in der Art der Erzeugung. In den Messdaten der Lamellenanordnung in Kapitel 7.1.2 und des WDVS Moduls in Kapitel 7.1.5 finden sich Hinweise darauf, dass die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge eine Rolle spielt. Bei langsam fahrenden Fahrzeugen sind Reflexionsereignisse, die im Verlauf einer Vorbeifahrt entstehen, länger im Pegel-Zeitverlauf sichtbar. Dadurch entstehen andere Pegel-Frequenzverläufe als bei schnelleren Vorbeifahrten. Siehe auch die Pegel-Frequenzkurven in Abbildung 54 und Abbildung 63. Eine genauere Bestimmung dieses Einflusses ist anhand der Messdaten innerhalb dieses Projektes nicht möglich. Mit Sicherheit ist der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit von großem Interesse für die Bewertung von Geschwindigkeitsbegrenzungen in Abhängigkeit von Lärmschutzmaßnahmen. Dies wird in einem weiterführenden Forschungsvorhaben zu behandeln sein.

7.2.4 Einfluss der umgebenden Flächen

Messdaten von unterschiedlichen Standorten Anhand der mit unterschiedlichen Bodenbedingungen kann man auf einen starken Einfluss der Bodenfläche zwischen der Lärmquelle und der Testfassade des mobilen Labors schließen. Der Einfluss der Bodenfläche Vergleich zwischen den Messungen gleicher Testfassaden ist ablesbar am an unterschiedlichen Standorten. Die Standorte weisen im wesentlichen zwei unterschiedliche Reflexionseigenschaften der Bodenfläche auf. Erde / Grasfläche hatte hierbei ein höheres Absorptionsverhalten als die schallharte Oberfläche aus Steinpflaster oder Asphalt. Die Pegel-Frequenzkurven für die Metallfassade mit einer absorbierenden und einer schallharten



Bodenfläche zwischen Schallquelle und Testfassade sind in Abbildung 80 dargestellt. Die schallharte Bodenfläche modifiziert die Wirkung deutlich.



Abbildung 80 Vergleich der Pegel-Frequenz Kurven für die gemessenen Pegelreduzierungen der Metallfassade am Standort Senckenberganlage und Nibelungenallee.

Ebenso ablesbar sind die Unterschiede an den Pegel-Frequenzkurven der Referenzflächenmessung in Abbildung 52. Im bisherigen Datensatz ist der Einfluss der Bodenfläche erkennbar, aber kann noch nicht quantifiziert werden. Um den Einfluss der Bodenreflexion auf die Pegeländerungen der Testfassaden systematisch zu erfassen, müssen speziell daraufhin ausgelegte Messreihen durchgeführt werden. Eine Bewertung muss diesen Faktor "Boden" zukünftig berücksichtigen.

7.3 Skalierte Messungen der Grundanordnung des mobilen Labors

7.3.1 Aufbau und Durchführung

Im Rahmen des Projekts wurde der Aufbau des mobilen Labors mit dem Verfahren der skalierten Messung im Maßstab 1:10 gemessen. Ziel war es, eine Vergleichbarkeit der Laborsituation mit dem realen Aufbau des mobilen Labors zu überprüfen. Die Messungen fanden in der Halle für akustische Messtechnik der Bundesanstalt für das Straßenwesen in Bergisch Gladbach statt. Die Halle gewährt über eine Lufttrocknung und Klimatisierung konstante Bedingungen von 5% Luftfeuchte und 21°C Raumtemperatur. Als Schallquelle wird eine Pressluftschallquelle verwendet. Die Konstanz der Quelle wird überwacht durch einen präzise Regelung des Arbeitsdrucks von 6,0 bar mit einer Genauigkeit von +/- 0,01 bar. Die Qualität der Schallquelle wird zusätzlich durch einen Mikrofonkanal für jede Messung mit aufgezeichnet. Aufgrund dieser konstanten Bedingungen ist es möglich sehr genaue Messungen mit einer sehr guten Wiederholqualität durchzuführen. Den dort durchgeführten Aufbau im Grundriss zeigt Abbildung 81



Abbildung 81 Grundriss des Aufbaus in der Halle für akustische Messtechnik.

Im skalierten Aufbau wird die Lärmquelle Straßenverkehr durch eine linear verfahrbare Pressluftschallquelle simuliert. Die Pressluftschallquelle wurde über die Strecke von 300 cm an dem Modell vorbeigefahren. Das Modell des mobilen Fassadenlabors wurde im Maßstab 1:10 hergestellt. Das Modell war in der Mitte der Vorbeifahrt in einem Abstand von 80 cm positioniert. Das entspricht 8 m Entfernung der Schallquelle zur Fassade im Maßstab 1:1. Die Grundkonstruktion verkleinerten mobilen Labors bestand aus Metall. Die Referenzfläche der Feldmessungen wurde im Modell aus Polystyrol-Platten hergestellt, ebenso wie die 90° geklappte Lamelle. Die Kunststeinfassade wurde als Modell im FDM 3D Druck Verfahren hergestellt. Um Absorptionseffekte ausschließen zu können, wurde das Modell auf eine stark reflektierende Siebdruckplatte positioniert. Die Größe der Siebdruckplatte war so gewählt das die gesamte Länge einer Vorbeifahrt von 300 cm abgedeckt war.





Abbildung 82 Die Referenzfläche des mobilen skalierten Fassadenlabors während der Messung. Die Pressluftschallquelle wurde entlang der Aluminiumschiene, die vor der dunkelbraunen schallharten Grundplatte verläuft, verfahren.

Den Aufbau in der Halle für akustische Messtechnik zeigt Abbildung 82. In der skalierten Anordnung wurden die in Tabelle 10 aufgeführten Testfassaden gemessen.

Versuch	Beschreibung	Abkürzung
1	Referenzfläche aus poliertem Polystyrol	Ref_s
2	Lamellen aus poliertem Polystyrol	Lamellen 90°_s
3	Struktur der 3D-Druck Modelle verläuft vertikal	Litho vertikal_s
4	Struktur der 3D-Druck Modelle verläuft horizontal	Litho horizontal_s

Tabelle 10 Übersicht der eingesetzten Modellfassaden in der skalierten Messung.

7.3.2 Ergebnisse und Vergleichbarkeit

Die gewonnen Daten jeder Messung wurden analog zu den Messdaten des realen mobilen Fassadenlabors ausgewertet. Ein skalierte Messung ist immer identisch mit einer Vorbeifahrt. Je Vorbeifahrt wurden 300 Messwerte bestimmt. Das entspricht einem Messpunktabstand von 1,0 cm oder 0,10 m in der Realität. Aus der gesamten Vorbeifahrt der Pressluftschallquelle wurde dann der Bereich ausgewählt der einer Vorbeifahrt während der Feldmessungen entspricht. Für dieses Intervall von 100 cm wurden die Pegel-Frequenzkurven ermittelt und auf das reale Frequenzspektrum hochgerechnet. Der Frequenzbereich der Pressluftschallquelle von 1000 Hz – 50.000 Hz wurde durch 10 geteilt und ergab so den realen Frequenzumfang von 100 Hz – 5000 Hz.





Abbildung 83 Pegel-Frequenz Kurve für die Messungen der Testfassaden an der Mikrofonposition Ch 1 in 4 m Entfernung zur Testfläche. Im Maßstab 1:10 entspricht das 40 cm.

An den Pegel-Frequenzkurven für die Position Ch 1 in 40 cm (4m) Entfernung zur Fassade lässt sich eine deutlich geringere Wirkung der Testfassaden ablesen, als das in den Feldmessungen der Fall war. Durch die idealisierte Anordnung der Testfassade auf einer stark reflektierenden Fläche ist der Einfluss der Testfassaden auf die Mikrofonposition deutlich reduziert. Trotzdem sind aber noch Ähnlichkeiten im Pegel-Frequenzverlauf zwischen der skalierten Messung und der Messung im Mobilen Labor erkennbar.

Obwohl der durchgeführte Aufbau der skalierten Messungen die Realität noch nicht widerspiegelt, zeigt er doch den starken Einfluss der Bodenfläche. Die in diesen ersten Testmessungen gewonnen Erkenntnisse sollten in weiteren Untersuchungen verifiziert werden, um darüber Parameter für Messreihen zu entwickeln, die eine zielgerichtete Betrachtung von akustisch wirksamen Fassaden ermöglichen.

8 Fazit und Ausblick

Die durchgeführten und ausgewerteten Feldmessungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben gezeigt, dass mit strukturierten Fassaden eine gezielte Beeinflussung der akustischen Situation vor einer Fassade durchführbar ist. Das Austauschen der glatten, schallharten Fassade durch verschiedene, strukturierte Testfassaden führte zu Pegelreduzierungen von bis zu - 6 dB für einzelne Frequenzbänder. Über den gemessenen Frequenzbereich als Mittelwert betrachtet, lag die maximale gemessene Pegelreduzierung bei - 3,6 dB. Diese Werte wurden gemessen in 4 m Entfernung zur Fassade.

Der Messaufbau und das Auswerteverfahren des mobilen Labors wurde entwickelt, um real am Ort vorhandene Schallquellen als Messsignal nutzen zu können. Eine Hauptaufgabe, die gelöst wurde, war die Frage der Referenzierung einer Schallquelle als Eingangsgröße für die Messungen. Darüber hinaus wurde nach einer Möglichkeit gesucht, an einem Standort die



Messwerte verschiedener Testfassaden, zu verschiedenen Zeitpunkten, mit den Messungen der Referenzfläche vergleichen zu können. Das hier vorgestellte Verfahren zur Referenzierung von Verkehrslärmereignissen durch Zerlegung in sich wiederholende Ereignisse ermöglichte den Vergleich von Messwerten unterschiedlicher Zeitintervalle. Die Unterschiedlichkeit der Messungen der Referenzfläche zeigt, das sich die Werte der Testfassaden nur immer ortsbezogen interpretieren lassen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass jede Fassade an jedem Ort individuell akustisch wirksam ist. Das ist dem Sachverhalt geschuldet, dass jeder akustische Stadtraum individuell ist, da dieser aus unterschiedlichsten städtebaulichen Elementen und Lärmquellen gebildet wird. Die erzeugenden Oberflächen eines Stadtraumes haben hier unterschiedlich starken Einfluss. Von den umgebenden urbanen Oberflächen spielen nicht nur die Fassaden eine Rolle. sondern auch die Bodenbeschaffenheiten. So verändert eine reflexionsarme Oberfläche angeordnet vor einer akustischen Fassade deren Wirkung. Weiterhin lassen die Messergebnisse den Schluss zu, dass der wichtigste Parameter bezüglich einer Lärmquelle im Stadtraum nicht der Pegel ist, sondern die Richtung der Einwirkung. Für den Wechsel von Flug zu Straßenlärm wurden, bei gleicher Testfassade, Pegeländerungen von bis zu 6 dB dokumentiert. In diesem Zusammenhang zeigte sich eine Abhängigkeit zwischen der Richtungsänderung und der Pixelgröße der Fassadengeometrie. Bei Testfassaden die aus kleineren Teilflächen bestanden, fielen die Änderungen der Pegelreduzierungen deutlich moderater aus als bei Testfassaden mit sehr großen Teilflächen. Überträgt man die Erkenntnisse der Messungen auf die Anwendung in Bauprojekten bedeutet dies, dass jedes Bauvorhaben individuell akustisch dokumentiert werden muss. Ähnlich einer Bodenbeprobung zum Standsicherheitsnachweis muss die akustische Situation rund um das geplante Gebäude im Hinblick auf Lärmquellen und deren Richtungen erfasst werden. In einer, für jedes Bauprojekt individuellen Messung, müssen die bestimmenden Faktoren des akustischen Stadtraums erfasst werden. Anhand der gefunden Parameter kann dann ein Fassadendesign mit einer beabsichtigten akustischen Wirkung gestaltet und vor Ort getestet werden. Die gemessenen Pegeländerungen von bis zu 6 dB für bestimmte Frequenzbänder bei Änderung der Richtung der Schallquelle zeigen die zwingende Notwendigkeit akustische Interventionen in der Fassade individuell zu planen. Die Messwerte belegen auch welche Potentiale in der Fassade für die Gestaltung einer leiseren Stadt noch nicht abgerufen werden. Es ist angedacht Planungswerkzeuge für Lärmminderungspotentiale der Fassaden im Gebäudebestand der Städte, als auch in Neubauprojekten im Rahmen von Forschungsprojekten zu entwickeln.

Der Faktor der akustischen Wirkung von Fassaden darf nicht nur von den Bauschaffenden betrachtet werden. Im Rahmen von Neuplanungen im Zuge der Nachverdichtung von Städten müssen die genehmigenden Behörden und die politischen Entscheider das Thema in ihre Betrachtungen einbeziehen. Das Potential der Fassade kann nur in Planungen getragen werden, wenn die Politik Anreize bietet, den zusätzlichen Aufwand einer akustischen Fassadenplanung über Entlastungen an anderer Stelle zu ermöglichen. Ähnlich dem Verfahren bei Sonnenschutzsystemen, könnte man akustischen Strukturen erlauben die Baugrenze um ein festgelegtes Maß zu überschreiten. Über eine Berücksichtigung der akustischen Außenraumqualitäten in den Gebäudezertifizierungssysteme, wie z.B.: DGNB oder LEED, ließe sich die akustische Betrachtung schon frühzeitig in Großprojekte integrieren. Die Materiallieferanten und Systemhersteller der Bauindustrie können. wie unser Forschungsprojekt gezeigt hat, teilweise schon aus dem vorhandenen Produktportfolio Lösungen anbieten. Die akustische Herausforderung kann hier als Innovationsmotor der Industrie wirksam werden. Die Entwicklung von innovativen Fassadenoberflächen im



Hinblick auf eine akustische Wirksamkeit wird einen deutlichen Wettbewerbsvorteil im internationalen Wettbewerb erzeugen.

Leisere Innenstädte sind möglich durch eine gezielte Implementation von akustisch Über geförderte wirksamen Fassaden in Bauprojekten. und gezielte Weiterbildungsmaßnahmen von Hochschulen und Berufsbildungseinrichtungen kann in Lehre und Praxis das Verständnis für den Zusammenhang zwischen Lärmeinwirkung und Fassade geschult werden. Ein grundsätzlicher Sachverhalt muss allen Bauschaffenden klar sein: Architektur hat immer einen maßgeblichen Einfluss auf die Akustik eines Ortes. Die räumlichen Begrenzungsflächen eines Stadtraums werden immer durch Planungsleistungen der Architektur in Qualität und Quantität bestimmt. Dieser Zusammenhang lässt sich nicht getrennt voneinander betrachten. Das Ziel einer integrierten akustischen Planung kann aber nur erreicht werden, wenn vom Planer bis zur Ausbildungseinrichtung, das Thema Akustik in die Agenda mit einbezogen wird. Die Impulse für eine umfassende Integration von akustischer Lehre in bestehenden Lehrumgebungen müssen aus der Politik kommen.

Die Forschung im Rahmen des hier vorgestellten Projektes, "Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Fassadenoberflächen im Stadtraum", war nur der erste Schritt auf dem Weg zu einer planbar leiseren Umwelt.

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur



Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen

9 Verzeichnis der Abbildungen

Sofern nicht anders vermerkt, wurden alle Grafiken und Bilder erstellt von Jochen Krimm.

Abbildung 1: Fassadenanordnung in einer Straßenschlucht, ähnlich den von Echeva	ırria
Sanchez vorgeschlagenen Fassadenschnittbildern.	8
Abbildung 2: Übertragung des Schnittbildes in einen dreidimensionalen Baukörper	8
Abbildung 3: Tatsächliche Fassadenfläche die zur akustischen Intervention für einen leise	eren
Stadtraum zur Verfügung steht.	9
Abbildung 4: Durch in Bezug setzen der Messwerte der geschlossenen Referenzfassade,	mit
den Messwerten einer Fassadenmodifikation. lässt sich der akustische Effekt	der
Fassademodifikation bestimmen	. 10
Abbildung 5 Perspektive des mobilen Labors aus einem marktüblichen Gerüstbausvs	tem
auforhaut	12
Abbildung 6 Perspektive eines Teilstücks des mobilen Labors Zur Simulation e	iner
Lamellenstruktur sind die Tragnlatten um 90° gedreht	12
Abbildung 7 Varianten der Modulaufteilung in Abhängigkeit der Tragplattenabmessungen	13
Abbildung 8 Grundriss einer idealen Messmikrofonanordnung (Zeichnung ohne Maßstab)	11
Abbildung 9 Kunststeinmodul Lithodecor	10
Abbildung 10 Wärmedämmverbundsystem Modul Alsecco	20
Abbildung 11 Konstruktionsperspektive des Glasfasergewebemoduls Eacid® Zeichnun	20 a O
EDS Systems CmbH	g ⊜ 21
Abbildung 12 Derspektive der Plachkassette	21
Abbildung 12 Perspektive der Diechkässelle	21
Abbildung 15 Planausschnitt Europaviertei, Pariser Straße ©Google Maps	25
Abbildung 14 Geplanter Standort an der Ecke Pariser Straße und Maastricher Ring	25
Abbildung 15 Planausschnitt Laures Strele @Google Maps	26
Abbildung 16 Planausschnitt Lange Straße ©Google Maps	20
Abbildung 17 Standort 3, Frankfurt Innenstadt Lange Straße, Starbenansicht	27
Abbildung 18 Planausschnitt Matthias-Beltz-Platz ©Google Maps	27
Abbildung 19 Planausschnitt Europaviertel, Pariser Straße ©Google Maps	28
Abbildung 20 Westkante am Goetheplatz mit stark befahrener Straße	28
Abbildung 21 Planausschnitt Lyoner Straße I ©Google Maps	29
Abbildung 22 Blick aus dem Innenhof in Richtung Main	29
Abbildung 23 Planausschnitt Ferdinand-Scholling-Ring ©Google Maps	30
Abbildung 24 Zustand Ferdinand-Scholling-Ring im Marz 2017	30
Abbildung 25 Planausschnitt Senckenberganlage ©Google Maps	31
Abbildung 26 Senckenberganlage, links im Bild der Eckbau des Senkenbergmuseums	31
Abbildung 27 Planausschnitt Lyoner Straße 27 ©Google Maps	32
Abbildung 28 Lyoner Straße in Richtung Westen, Paralleler Verlauf von Straße	und
Straßenbahn	32
Abbildung 29 Planausschnitt Baseler Platz ©Google Maps	33
Abbildung 30 Planausschnitt Stephanstraße ©Google Maps	33
Abbildung 31 Stephanstraße in Richtung Westen	34
Abbildung 32 Planausschnitt Schloßstraße ©Google Maps	34
Abbildung 33 Situation Schloßstraße Blick in Richtung Südwesten	35
Abbildung 34 Situation an der Senckenberg Anlage / Ecke Robert-Mayer-Straße	38
Abbildung 35 Perspektive der Messanordnung	39
Abbildung 36 Grundriss Messanordnung Senckenberg Anlage	39



Abbildung 37 Achtkanaliger Datensatz, Zuordnung der Audiospuren im Datensatz zu den
Messpunkten
Abbildung 38 Zeitverlauf im Datensatz. Bildung der Auswerteintervalle in Abhängigkeit der
Ampelschaltung
Abbildung 39 Pegel-Frequenzkurven für 10 Auswerteintervalle mit je 30 s Dauer.
Auswertung von Mikrofonposition Ch 1 einer Messung von 23 min Gesamtdauer 42
Abbildung 40 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit einer guten
Passung hinsichtlich Charasteristika und Pegeldifferenzen
Abbildung 41 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit vergleichbarem
Verlauf aber hoher Pegeldifferenz
Abbildung 42 Vergleich zweier Pegel-Frequenzkurven von Kanal Ch 8 mit
unterschiedlichem Verlauf aber geringer Pegeldifferenz zueinander
Abbildung 43 Pegel-Frequenzkurve für Mikrofonposition Ch I gemessen vor den Lamellen 90
Grad geklappt
Abbildung 44 Ablaufschema der Auswertung
Abbildung 45 Grundriss der Mikrofonpositionen am Standort 11 "Senckenberganlage" 47
Abbildung 46 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven der Textilfassadenmodule für die
Mikrofonpositionen Ch I und Ch II im Nahfeld
Abbildung 47 Pegel-Frequenzkurve für Mikrofonpositionen Ch 1 und Ch 3 gemessen vor den
Lamellen 90 Grad geklappt
Abbildung 48 Bestimmung der Unterschiede zwischen einem Auswerteintervall mit Wind
und einem Auswerteintervall ohne Wind
Abbildung 49 Frequenzabhängige Abweichung der Messwerte bei Wind innerhalb der
Auswerteintervalle 50
Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51
Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade 51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade51 Abbildung 51 Das mobile Labor mit der Referenzfläche aus Siebdruckplatten 19 mm während der Messung am Standort Lyoner Straße 27
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade
 Abbildung 50 Standort Senckenberganlage, Kanal Ch1 in 4 m Distanz zur Testfassade



Abbildung 63 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade
WDVS GFL/GFR in vertikaler Einbaulage am Standort Senckenberganlage und Pariser
Straße
Abbildung 64 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Testfassade
WDVS GFU in horizontaler Einbaulage am Standort Senckenberganlage und Lyoner
Straße 1 mit unterschiedlichen Lärmquellen
Abbildung 65 Strahlendiagram für das WDVS System in der horizontalen Einbaulage GFU
Im Bezug zu zwei Larmarten
Additidung of in das mobile Labor sind Textil-Fassaden-Module eingebaut. Die
gekippt) 63
Abbildung 67 Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Textilfassade Finbaulage
"Fläche nach unten gekinnt" am Standort Senckenberganlage
Abbildung 68 Pegel-Frequenzkurve für die Messungen der Textilfassade Finhaulage "Fläche
nach oben gekippt"am Standort Senckenberganlage
Abbildung 69 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Textilfassade in
Einbaulage "Fläche nach oben gekippt" am Standort Senckenberganlage und Lyoner
Straße 27 mit unterschiedlichen Lärmquellen
Abbildung 70 Metallfassadenmodule eingebaut in das mobile Messlabor
Abbildung 71 Pegel-Frequenzkurve für die Messungen der Metallfassade am Standort
Senckenberganlage
Abbildung 72 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die gemessenen Pegelreduzierungen
der Metallfassade am Standort Senckenberganlage und Nibelungenallee
Abbildung 73 Kunststeinmodule eingebaut in das mobile Labor am Standort
Senckenberganlage
Abbildung /4 Pegel-Frequenzkurve für die Messungen der Kunststeinfassade am Standort
Senckenberganlage
am Standort Senckenbergenlage in den Einbaulagen vertikal und horizontal
Abbildung 76 Vergleich der Pegel-Frequenzkurven für die Messungen der Kunststeinfassade
am Standort Senckenberganlage und Lyoner Straße 1 in der Einbaulage horizontal 69
Abbildung 77 Wirksame Teil-Einzelflächen der Testfassaden
Abbildung 78 Pegelfrequenzkurven für die Differenz der gemessenen Pegelreduzierungen
zwischen Straßen- und Fluglärm für drei Testfassaden
Abbildung 79 Mittelwerte der Messung der Referenzfläche und der Pegelreduzierung für die
Testfassade Lamelle 90° geklappt an 5 Standorten
Abbildung 80 Vergleich der Pegel-Frequenz Kurven für die gemessenen Pegelreduzierungen
der Metallfassade am Standort Senckenberganlage und Nibelungenallee73
Abbildung 81 Grundriss des Aufbaus in der Halle für akustische Messtechnik
Abbildung 82 Die Referenzfläche des mobilen skalierten Fassadenlabors während der
Messung. Die Pressluftschallquelle wurde entlang der Aluminiumschiene, die vor der
dunkelbraunen schallharten Grundplatte verläuft, verfahren
Abbildung 83 Pegel-Frequenz Kurve für die Messungen der Testfassaden an der
Mikroionposition Ch 1 in 4 m Entiernung zur Testfläche. Im Maßstab 1:10 entspricht
uas 40 cm



10 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 Übersicht der Anforderungen an ein mobiles Messlabor	
Tabelle 2 Übersicht des verwendeten Messequipments	
Tabelle 3 Übersicht der Standortauswahl	
Tabelle 4 Übersicht der Genehmigungen/Durchführbarkeit der Messungen an den	Standorte36
Tabelle 5 Übersicht der durchgeführten Messungen	
Tabelle 6 Übersicht der standortabhängigen Referenzierung der Lärmquelle	
Tabelle 7 Einbaulagen und Abkürzungen für die WDVS-Testfassade	
Tabelle 8 Einbaulagen und Abkürzungen für die Textil-Testfassade	63
Tabelle 9 Einbaulagen und Abkürzungen für die Kunststein-Testfassade	67
Tabelle 10 Übersicht der eingesetzten Modellfassaden in der skalierten Messung	75



11 Literatur

- Wiener, F. M., Malme, C. I., and Gogos, C. M., Sound Propagation in Urban Areas, J. Acoust. Soc. Am. 37, 738 (1965);
- [2] Lyon, R. H., Pande, L., Kinney, W, A., Modeling of V/STOL noise in city streets, Washington, D.C. : Dept. of Transportation, Office of Noise Abatement
- [3] Kinney, W. A., and Pierce, A.D., Helicopter Noise Experiments in an Urban Environment, Interim Report, Dept.Transportation, Contract DOT-TSC-93, MIT, (March 1973),
- [4] Lyon, R. H., Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation, J. Acoust. Soc. Am. (1974), pp. 493–503
- [5] Bullen, R., Fricke, F., Sound propagation in a street, Journal of Sound and Vibration, Volume 46, Issue 1, 8 May 1976, Pages 33-42
- [6] Nijs, L.:The prediction of traffic noise levels with the aid of a scale model, Institute for town planning research, group of acoustics, Delft University of Technology, Delft, 1977
- [7] Mohsen, E. A., Oldham, D.J., Traffic noise reduction due to the screening effect of balconies on a building façade, doi:10.1016/0003-682X(77)90010-X
- [8] Ko, N.W.M., Traffic noise in a high-rise city, Applied Acoustics, Volume 11, Issue 3, July 1978, Pages 225-239
- [9] May, D. N., Freeway noise and high rise balconies, J. Acoust. Soc. Am. 65, 699 (1979); http://dx.doi.org/10.1121/1.382482
- [10] Heutschi, K., A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings for a long straight street, Appl Acoust, 44 (1995), pp. 259–274
- [11] Hothersall, D. C., Horoshenkov, K. V., Mercy, S. E., Numerical modelling of the sound field near a tall building with balconies near a road, doi:10.1006/jsvi.1996.0584
- [12] Walerian, E., and Janczur, R., Noise shielding in an urban system, Journal of Sound and Vibration (1998) 212(2), 187–214
- [13] Horoshenkov, K. V., Hothersall, D. C., Mercy, S. E., Scale Modelling of Sound Propagation in a City Street Canyon, Journal of Sound and Vibration (1999) PPQ(5), 795-819
- [14] Horoshenkov, K. V., Hothersall, D. C., Mercy, S. E., Scale Modelling of Sound Propagation in a City Street Canyon, Journal of Sound and Vibration (1999) PPQ(5), 795-819
- [15] Walerian, E., Janczur, R., Czechowicz, M., Sound level forecasting for city-centers. Part 1: sound level due to a road within an urban canyon, Applied Acoustics 62 (2001) 359-380
- [16] J. Picaut, L. Simon, A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas, Applied Acoustics 62 (2001) 327-340
- [17] Walerian, E., Janczur, R., Czechowicz, M., Sound levels forecasting for city-centers. Part II: Effect of source model parameters on sound level in built-up area, Applied Acoustics 62 (2001) 461-492
- [18] Walerian, E., Janczur, R., Czechowicz, M., Sound levels forecasting for city-centers Part III: a road lane structure in uence on sound level within urban canyon, Applied Acoustics 62 (2001) 493-512
- [19] Walerian, E., Janczur, R., Czechowicz, M., Sound levels forecasting for city-centers Part IV. Vehicles stream parameters in uence on sound level distribution within a canyon street, Applied Acoustics 62 (2001) 645-664
- [20] Cheng, W. F., and Ng, C. F., The acoustic performance of an inclined barrier for high-rise residents, J. Sound Vib. 242, 295–308 (2001).
- [21] Lu, K. K., and Li, K. M., The propagation of sound in narrow street canyons, J. Acoust. Soc. Am. 112, 537 (2002)

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur



- [22] Kai Ming Lia and Siu Hong Tang, The predicted barrier effects in the proximity of tall buildings, 2003 Acoustical Society of America. DOI: 10.1121/1.1593060
- [23] Heutschi, K., Parameter Study of the Insertion Loss Reduction in Case of a Building Facade Parallel to a Noise Barrier, Acta Acustica united with Acustica 89, Ausgabe:5, Seite(n):908-912
- [24] Hossam El Dien, H., Woloszyn, P., Prediction of the sound field into high-rise building facades due to its balcony ceiling form, Applied Acoustics 65 (2004) 431–440
- [25] Ögren, M., and Kropp, W., Road traffic noise propagation between two dimensional city canyons using an equivalent source approach, Acta Acust. Acust. 90, 293–300 (2004).
- [26] "Hossam El Dien, H., Woloszyn, P., The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations, Applied AcousticsVolume 66, Issue 5, May 2005, Pages 533–551"
- [27] Ismail, M. R., Oldham, D. J., A scale model investigation of sound reflection from building facades, Applied Acoustics 66 (2005) 123–147
- [28] Picaut, J., Simon, L., A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas, Applied Acoustics, Volume 62, Issue 3, March 2001, Pages 327–340
- [29] Van Renterghem, T., Salomons, E., Botteldooren, D., Parameter study of sound propagation between city canyons with a coupled FDTD-PE model, Applied Acoustics, Volume 67, Issue 6, June 2006, Pages 487– 510
- [30] Memoli, G., Kephalopoulos, S., Paviotti, M., Licitra, G., Effect on measured noise levels of the microphone position in front of a façade, INTER-NOISE 2006, Volume 8, 2006, Pages 5136-5145
- [31] Picaut, J., Schmich, I., Defrance, J., Woloszyn, P., Barlet, A., Chartier, F., Effects of diffuse reflection by building façades on the sound propagation and soundscapes in urban areas, EURONOISE 2006 - The 6th European Conference on Noise Control: Advanced Solutions for Noise Control 2006,
- [32] Hornikx, M., Forssén, J., Improving the shielding of road traffic noise in courtyards: Absorption treatments, INTER-NOISE 2007; Istanbul; Turkey; 28 August 2007 through 31 August 2007
- [33] Van Renterghem, T., Botteldooren, D., Numerical evaluation of sound propagating over green roofs, Journal of Sound and Vibration, Volume 317, Issues 3–5, 11 November 2008, Pages 781–799
- [34] Hornikx, M., Forssén, J., A Scale Model Study of Parallel Urban Canyons, Acta Acustica United with Acustica Vol. 94 (2008) 265 – 281
- [35] Hornikx, M., Forssén, J., Noise abatement schemes for shielded canyons, Applied Acoustics 70 (2009) 267–283
- [36] Kirkpatrick Alberts II, W. C., Noble, J. M., and Coleman, M. A., Sound propagation in the vicinity of an isolated building: An experimental investigation, J. Acoust. Soc. Am. 124, 733 (2008);
- [37] Wang, B., Kang, J., Zhou, J., Comparison of traffic noise distribution between high and low density cities, Proceedings of the 36th international congress on noise control engineering, Shanghai, China; 2008
- [38] Van Renterghem, T., Botteldooren, D., Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs, Building and Environment, Volume 44, Issue 5, May 2009, Pages 1081–1087
- [39] Nyuk Hien Wong, Alex Yong Kwang Tan, Puay Yok Tan, Kelly Chiang, Ngian Chung Wong, Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls, Building and Environment, Volume 45, Issue 2, February 2010, Pages 411-420,
- [40] Van Renterghem, T., Botteldooren, D., The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment, Journal of Sound and Vibration, Volume 329, Issue 9, 26 April 2010, Pages 1422-1434
- [41] Martin Schiff, M., Hornikx, M., Forssén, J., Excess attenuation for sound propagation over an urban canyon, Applied Acoustics, Volume 71, Issue 6, June 2010, Pages 510–517
- [42] Tang, S.K., Scale model study of balcony insertion losses on a building façade with non-parallel line sources, Applied AcousticsVolume 71, Issue 10, October 2010, Pages 947–954"

Frankfurt University of Applied Sciences Fachbereich 1 Studiengang Architektur



- [43] Van Renterghem, T., Botteldooren, D., In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs, Building and Environment, Volume 46, Issue 3, March 2011, Pages 729–738
- [44] Tang, S.K., Piippo, K.E., Sound fields inside street canyons with inclined flanking building façades, Proceedings of Meetings on Acoustics, Volume 12, 2011, Article number 040004, 7p, 161st Meeting Acoustical Society of America 2011
- [45] Picaut, J.; Scouarnec, D., Using Acoustic Diffusors to Reduce Noise in Urban Areas, Acta Acustica united with Acustica, Volume 95, Number 4, July/August 2009, pp. 653-668
- [46] Probst, W., Probst, F., Reflected sound in street canyons Diffuse or specular?, 2017-03-15, 11:32, retrieved from http://www.datakustik.com/fileadmin/user_upload/PDF/Papers/310_Reflected_Sound_in_Street_Canyons.p df
- [47] Probst, W., Straßenlärm bei dichter Randbebauung, Untersuchungen zur reflexionsbedingten Pegelerhöhung. Bremerhaven, Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss., 2013, ISBN: 978-3-86918-283-4
- [48] Guillaume, G., Gauvreau, B., L'Hermite, P., Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model, Science of The Total Environment, Volume 502, 1 January 2015, Pages 22-30
- [49] Moleron, M., Felix, S., Pagneux, V., and Richoux, O., Low frequency acoustic resonances in urban courtyard, J. Acoust. Soc. Am. 135, 74 (2014);
- [50] Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jeand, P., Defranced, J., Hornikx, M., Kang, J., Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors, Applied Acoustics 92 (2015) 86–101
- [51] "Pyoung Jik Lee, Yong Hee Kim, Jin Yong Jeon, Kyoo Dong Song, Effects of apartment building façade and balcony design on the reduction of exterior noise, Building and EnvironmentVolume 42, Issue 10, October 2007, Pages 3517–3528"
- [52] Hyung Suk Jang, Ho Jun Kim, Jin Yong Jeon, Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation, Building and Environment, Volume 86, April 2015, Pages 81-88
- [53] Echevarria Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., Botteldooren, D., The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads, Building and Environment 97 (2016) 96-110
- [54] retrieved from: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Hochhäuser_in_Frankfurt_am_Main, 2017-04-01, 5:56



12 Eigene Veröffentlichungen zur akustisch wirksamen Fassade

Krimm, J., 2011, Akustische Unsichtbarkeit Über Grenzen, Frankfurt High Rise Symposium 2011, Verlag Fachbereich 1 der Fachhochschule Frankfurt am Main Band 11, Schriftenreihe des Fachbereichs 1 ISBN 978-3-98-14445-1-3

Techen, H. Krimm, J., 2013 Fassaden Stadtraum und Akustik XIA 07-09/ 2013, Alexander Koch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, ISSN 0949-2356

Techen, H., Krimm, J., 2014, Die akustisch wirksame Fassade, Fortschritte der Akustik - DAGA 2014 S846-847 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2014 ISBN: 978-3-939296-06-5

Techen, H., Krimm, J., 2014 Acoustically effective facade design Engineered transparency, Glasstec 2014 Düsseldorf, Darmstadt : Techn. Univ. [u.a.] ISBN: 978-3-86780-402-8

Techen, H., Krimm, J., 2015 Mit Hochhausfassaden den Stadtraum gestalten Fortschritte der Akustik - DAGA 2015, S688 - 691 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2015 ISBN-10: 3939296082, ISBN-13: 978-3939296089

Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2015 Hochhausfassaden und akustische Stadraumgestaltung Lärmbekämpfung Nr. 3 2015, S117 - 125 Springer - VDI - Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2015 ISSN 1863 – 4672

Techen, H., Krimm, J., 2015, Acoustical invisible envelopes Future Envelope 9 Unobtainium Delft University of Technology, Delft 2015

Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2016 Transformationspotentiale von Hochhausfassaden Fortschritte der Akustik - DAGA 2016 S846-847 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2016 ISBN: 978-3-939296-10-2



Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2016
Tuning acoustical facade designs aiming for a controlled influence on the urban soundscape
Proceedings of the INTER-NOISE 2016,
45th International Congress and Exposition
on Noise Control Engineering
Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2016
ISBN USB Stick/Online 978-3-939296-11-9

Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2017 Updated urban facade design for quieter outdoor spaces JFDE - DElft 2017 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2016 ISBN: 978-3-939296-10-2

Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2017 Der urbane Raum in der Akustik als architektonische Gestaltungsgrundlage für leisere Städte Fortschritte der Akustik - DAGA 2017 S846-847 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2016 ISBN: 978-3-939296-10-2

Knaack, U., Techen, H., Krimm, J., 2018 Die leise Stadt planen Der Gemeinderat 6/2018 S36-37 pVS - pro Verlag, ISSN: 0723-8274

Krimm, J. (2018). Acoustically effective facade design A+BE | Architecture and the Built Environment DOI: 10.7480/abe.2018.16



13 Veranstaltungen im Rahmen des Projektes:

- Projektetage der Bauforschung am 7. und 8. März 2017 im Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR), Bonn
- Projektetage der Bauforschung am 6. und 7. November 2018 im Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR), Bonn
- Messe BAU 2019, Messestand des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat, 11. 16. Januar 2019, Messegelände / ICM Internationales Congress Center München.
- DAGA 2019 45. Jahrestagung für Akustik der deutschen Gesellschaft für Akustik e.V., 18. 21. März 2019, Rostock

14 Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes:

Techen, H., Krimm, J., 2019 In Situ Messung von Fassadenoberflächen im Stadtraum mit einem mobilen Fassadenlabor Fortschritte der Akustik - DAGA 2019, S1470 - 1473 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2019 ISBN: ISBN 978-3-939296-14-0

Krimm, J., Bartolomaeus, W., 2019 Vergleich von verschiedenen Messverfahren für Fassadenoberflächen Fortschritte der Akustik - DAGA 2019, S1212 - 1215 Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2019 ISBN: ISBN 978-3-939296-14-0