

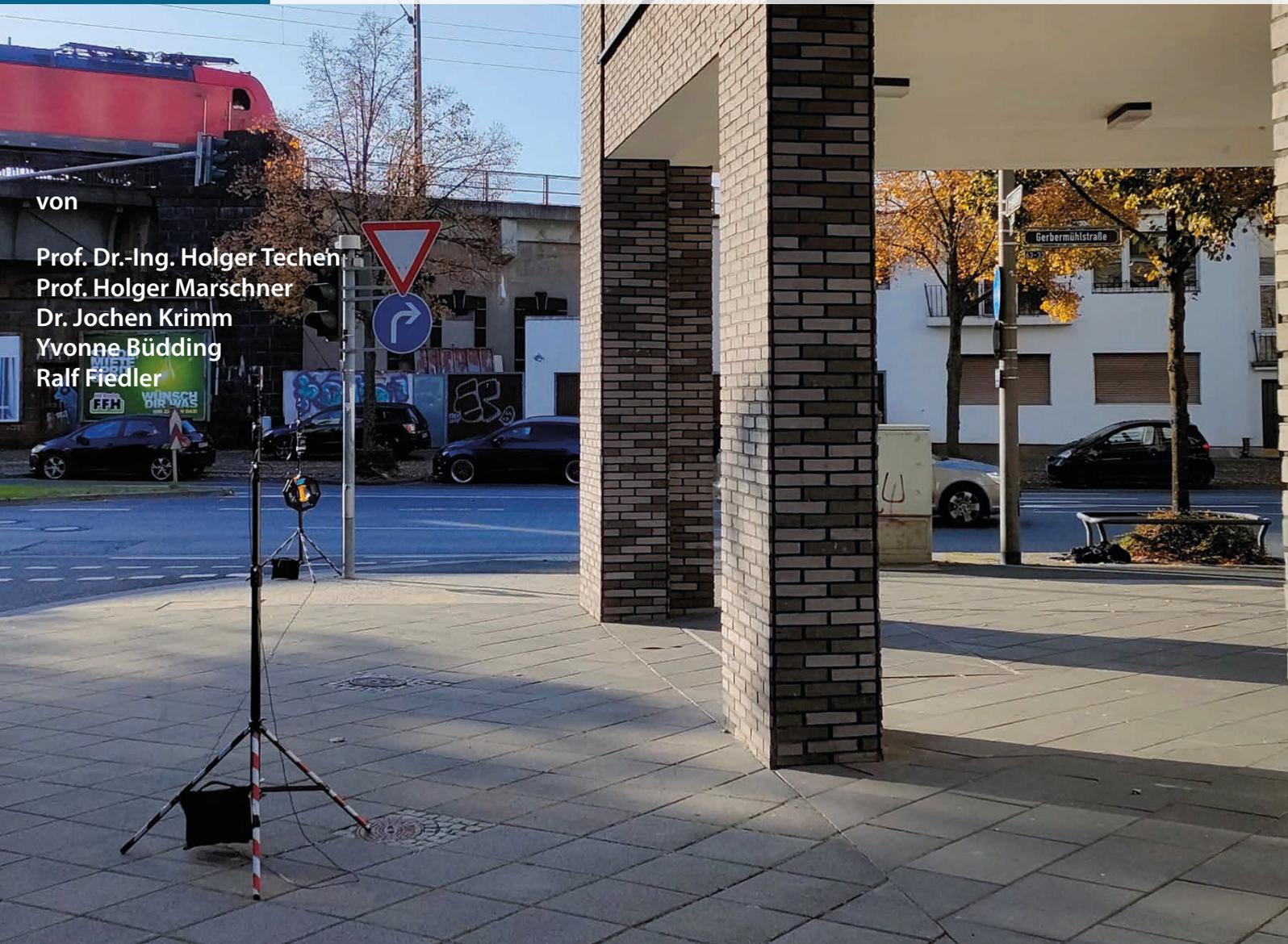
# Planungsparameter für das akustisch wirksame Bauen

## Bewertung von Gebäudeanordnungen

BBSR-  
Online-Publikation  
93/2024

von

Prof. Dr.-Ing. Holger Techent  
Prof. Holger Marschner  
Dr. Jochen Krimm  
Yvonne Büdding  
Ralf Fiedler



# Planungsparameter für das akustisch wirksame Bauen

Bewertung von Gebäudeanordnungen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.34

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 11.2022

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure  
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Frankfurt University of Applied Sciences  
Fachbereich 1, Architektur-Bauingenieurwesen-Geomatik  
Prof. Dr.-Ing. Holger Techen  
holger.techen@fb1.fra-uas.de

Dr. Jochen Krimm

Frankfurt University of Applied Sciences  
Fachbereich 2, Informatik und Ingenieurwissenschaften  
Prof. Holger Marschner  
holger.marschner@fb2.fra-uas.de

Yvonne Büdding, B. Eng.  
Ralf Fiedler, M. Eng.

### Redaktion

Frankfurt University of Applied Sciences

### Stand

Dezember 2023

### Gestaltung

Frankfurt University of Applied Sciences

### Bildnachweis

Titelbild: Yvonne Büdding, B. Eng.

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Techen, Holger; Marschner, Holger; Krimm, Jochen; Büdding, Yvonne; Fiedler, Ralf, 2024: Planungsparameter für das akustisch wirksame Bauen: Bewertung von Gebäudeanordnungen. BBSR-Online-Publikation 93/2024, Bonn.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung</b>	<b>6</b>
	Planungsparameter für das akustisch wirksame Bauen	6
	<b>Abstract</b>	<b>7</b>
	Planning parameters for acoustically effective construction	7
1	<b>Vorwort</b>	<b>8</b>
	Die "leisere" Stadt	8
2	<b>Akustisch Bauen!</b>	<b>10</b>
3	<b>Die Stadt als Labor</b>	<b>11</b>
	Arbeitshypothese	11
	Arbeitsplan	11
	Untersuchungen zur Identifizierung von Regelsituationen	11
	Untersuchungen zur Entwicklung der Messanordnung	14
	Durchführung der Feldmessungen 2021 und 2022	25
	Reproduzierbarkeit der Messergebnisse	29
	Auswertung der Messergebnisse	30
	Entwicklung des akustischen Planungsparameters	42
	Steigungsbetrachtung und Faltungsoperationen als Grundlage der Parameterbildung	43
	Impulsantworten als Grundlage der Parameterbildung	43
	Psychoakustische Kennwerte als Grundlage der Parameterbildung	43
	Äquivalente Dauerschallpegel als Grundlage der Parameterbildung	44
	NDSI-Index als Grundlage der Parameterbildung	47
	Berechnung des akustischen Planungsparameters	49
	Kategorisierung der Messorte	54
	Skalierte Messungen im Maßstab 1:50 in der Halle für akustische Modelltechnik der BAST	57
	Auswertung der skalierten Messungen	61
	Bewertung der Messorte aufgrund der Ergebnisse der skalierten Messungen	61
	Bewertungsmethode für die Messorte	63
	Feldmessungen - Vergleich des akustischen Planungsparameters mit der Bewertungsmethode	70
	Skalierte Messungen - Vergleich des akustischen Planungsparameters mit der Bewertungsmethode	73
4	<b>Der urbane akustische Planungsparameter <math>P_{xm}</math></b>	<b>75</b>
	Geeignete Messorte des urbanen akustischen Parameters	75
	Bildung des urbanen akustischer Planungsparameter	76
	Skalierte Messung des urbanen akustischen Planungsparameters	79
	Bewertungsmethode des urbanen akustischen Planungsparameters	79
	Die Praxis – ein Fazit	80
5	<b>Mitwirkende</b>	<b>82</b>
	Kurzbiographien	83
6	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>

---

Abbildungsverzeichnis	87
Tabellenverzeichnis	89
<b>7 Anlagen</b>	<b>91</b>
Anhang 1 – Ergebnisse und Fotos der Messorte der in situ Messungen	92
Anhang 2 – Ergebnisse und Versuchsaufbauten skalierte Messungen	105

---

## Kurzfassung

### Planungsparameter für das akustisch wirksame Bauen

In Planungs- und Genehmigungsverfahren wird der Aspekt der urbanen Akustik nur über numerisch bestimmte Einzahlwerte berücksichtigt. Daraus lassen sich keine Aussagen über die akustische Qualität der Planungen ableiten. Um diese Lücke zu schließen wird ein urbaner akustischer Parameter benötigt, der nicht nur den Schalldruckpegel, sondern auch die akustische Qualität eines Ortes widerspiegelt. Im Rahmen von städtebaulichen Untersuchungen wurden als Grundlage zur Datenerhebung bauliche Regelsituationen identifiziert und dokumentiert. In umfangreichen Messkampagnen wurden in 6 Untersuchungsgebieten in Frankfurt am Main 75 Messorte akustisch erfasst. Ergänzt wurden die Feldmessungen durch die akustische Bestimmung von einigen ausgewählten Orten im skalierten Modellmessverfahren.

Die grundlegende Arbeitshypothese zur Entwicklung des urbanen akustischen Parameters ist, dass über die erfassbaren Unterschiede zweier Mikrofonpositionen der städtischen Raum durch vorhandene Schallquellen akustisch charakterisiert werden können. Als Grundlage wird die häufigste Verkehrsschallquelle im urbanen Raum herangezogen, der Straßenverkehr. Es wurde zunächst die betrachtete Schallquelle, der Straßenverkehr im Freifeld und in städtischer Umgebung untersucht und eine Messanordnung entwickelt, die geeignete Kennwerte für die Arbeitshypothese liefert. Die Messanordnung basiert auf einem straßennahen und einem straßenfernen Mikrofon in 1,8 m Höhe. Mit dieser Messanordnung wurden die Feldmessungen in Frankfurt am Main und die skalierten Messungen durchgeführt. Analog zu normativ erfassten Messverfahren, wie dem des statistischen Vorbeifahrtverfahren, werden Vorbeifahrten zufälliger Fahrzeuge als Referenzschallquelle genutzt. Um trotz der unterschiedlichen Fahrzeuge referenzierbare Ergebnisse aus Vorbeifahrten zu erhalten, musste eine Grundanzahl an Vorbeifahrten ausgewertet werden. Zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei der Auswertung der Messdaten wurde eine automatisierte Erkennung von Vorbeifahrten entwickelt. Nach den Auswertungen der Feldmessungen standen die Daten als einzelne vergleichbare Vorbeifahrten und als Datensatz der Gesamtmesszeiträume von 10 Minuten bis 20 Minuten je Ort zur Verfügung. Zur Entwicklung des Planungsparameters wurden verschiedene akustische Kenngrößen betrachtet, wie der äquivalente Dauerschallpegel, die Steigung der Terzen innerhalb des Frequenzspektrums, NDSI-Index, Faltung und Impulsantwort, sowie Schärfe und Lautheit. Die Kenngrößen wurden jeweils aus den Daten der straßennahen und straßenfernen Messposition berechnet, um über diesen Unterschied den städtischen Raum zu charakterisieren. Die Untersuchungen zeigten, dass der äquivalente Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs zur Charakterisierung des städtischen Raumes die ausgeprägtesten Ergebnisse liefert. Die Differenz der äquivalenten Dauerschallpegel der straßennahen zur straßenfernen Messposition gibt die für den Messort charakteristische Pegelabnahme an. Darauf basierend wurde ein Parameter entwickelt, der die charakteristische Pegelabnahme des Messortes in das Verhältnis mit der im Freifeld auftretenden Pegelabnahme setzt. Um den urbanen akustischen Parameter anwenden und an verschiedenen Orten miteinander in Bezug setzen zu können war es notwendig, ein Kategorisierungs- und Bewertungssystem zu entwickeln. Aufgrund der Analyse der Messorte hinsichtlich der Geometrie und Oberflächenbeschaffenheiten zeigt sich, dass der Bereich zwischen Straße und Gebäudefassade sehr häufig vergleichbar ist. Im Zuge der Messortkategorisierung wurde dieser Bereich in Zonen unterteilt. Der Einfluss der Zonen im Zusammenhang mit der vom Straßenverkehr ausgehenden Schallausbreitung wurde bewertet, zusammen mit der Art der Fassade und deren Abstand zur Straße. Eine daraus abgeleitete Bewertungsmatrix dient als Grundlage für eine Punktevergabe in Anlehnung an die VDI 2225 Blatt 3. Lange Schallausbreitungswege, absorbierende Materialien und wenige reflektierende Begrenzungsflächen erhalten dabei hohe Wertungen. Mit weiteren Feldmessungen und skalierten Messungen im Maßstab 1:50 wurden einzelne Einflüsse von Gebäudeanordnungen und Variationen in den Zonen bestimmt und die Bewertungsmatrix verfeinert. Anhand dieser Ergebnisse scheint es möglich, einen straßennahen urbanen Raum durch einen Einzahlwert in seiner akustischen Qualität zu beschreiben und die Werte des akustischen Planungsparameters annäherungsweise vorherzusagen.

---

## Abstract

### Planning parameters for acoustically effective construction

In planning and approval procedures, the aspect of urban acoustics is only taken into account via numerically determined single number values. From this, no statements about the acoustic quality of the planning can be derived. To close this gap, an urban acoustic parameter is needed that reflects not only the loudness level but also the acoustic quality of a place. Within the framework of urban planning studies, standard building situations were identified and documented as a basis for data collection. In extensive measurement campaigns, 75 measurement locations were acoustically recorded in 6 study areas in Frankfurt am Main. The field measurements were supplemented by the acoustic determination of some selected locations using the scaled model measurement method.

The basic working hypothesis for the development of the urban acoustic parameter is that via the detectable differences of two microphone positions the urban space can be acoustically characterized by existing sound sources. The most common traffic sound source in urban space, road traffic, is used as a basis. First, the considered sound source, road traffic in free field and urban environment, was investigated and a measurement setup was developed, which provides suitable characteristic values for the working hypothesis. The measurement setup is based on a microphone close to the road and a microphone far from the road at a height of 1.8 m. With this measurement setup, the field measurements in Frankfurt am Main and the scaled measurements were performed. Analogous to normative measurement methods, such as the statistical pass-by method, pass-bys of random vehicles are used as reference sound sources. In order to obtain referenceable results from passbys despite the different vehicles, a basic number of passbys had to be evaluated based on freefield measurements. To reduce the time required to evaluate the measurement data, an automated pass-by detection system was developed. After the evaluations of the field measurements, the data were available as individual comparable drive-bys and as a data set of the total measurement periods from 10 minutes to 20 minutes per location. To develop the planning parameter, various acoustic parameters were considered, such as the equivalent continuous sound level, the slope of the third octaves levels within the frequency spectrum, NDSI index, convolution and impulse response, and sharpness and loudness. The parameters were calculated from the data of the measurement position near and far from the road, respectively, in order to characterize the urban area via this difference. The investigations showed that the equivalent continuous sound level of the flowing traffic provides the most pronounced results for the characterization of these urban spaces. The difference of the equivalent continuous sound levels of the measurement position near the road to the measurement position far from the road indicates the level decrease characteristic for the measurement location. Based on this, a parameter was developed that relates the characteristic level decrease of the measurement location to the level decrease occurring in the free field. In order to apply the urban acoustic parameter and to relate it to different locations, it was necessary to develop a categorization and evaluation system. Based on the analysis of the measurement locations in terms of geometry and surface properties, the area between the street and the building facade is very often comparable. While categorizing the measurement location, this area was divided into zones. The influence of the zones related to the propagation of noise from road traffic has been assessed, together with the type of facade and its distance from the road. An evaluation matrix derived from this, serves as the basis for awarding points based on VDI 2225 part 3. Long sound propagation paths, absorbent materials and few reflective boundary surfaces receive high ratings. With further field measurements and scaled measurements on a scale of 1:50, individual influences of building arrangements and variations in the zones were determined and the evaluation matrix was refined. Based on these results, it seems possible to describe an urban space close to a street in terms of its acoustic quality by using a single number value and to approximately predict the values of the acoustic planning parameter.

---

## Vorwort

Verkehrslärm ist laut aktueller Statistik des Umweltbundesamtes die Lärmquelle, von der die höchste Belästigung für die Menschen ausgeht. An zweiter Stelle steht der Nachbarschaftslärm, gefolgt von Industrie- und Baulärm [1]. Die gesamte Schallbelastung hat mittlerweile ein Ausmaß angenommen, das immer häufiger zu Beschwerden und Rechtsstreitigkeiten führt. Dabei sind die Lärmquellen recht vielfältig, und ihr Zusammenwirken in Verbindung mit den Umgebungseinflüssen und der Bebauung macht es oft unmöglich, einzelne Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Erst die ganzheitliche Analyse des vorliegenden Schallfelds kann eine methodische Charakterisierung der tatsächlichen Belastung und gleichzeitig des Optimierungspotenzials ermöglichen. Dabei ist es wichtig, zwischen der momentanen Schallemission und dem möglichen Optimierungspotenzial der Schallausbreitung zu differenzieren. Von Interesse für Städteplaner ist die akustische Wirkung der Bebauung auf das innerstädtische Schallfeld, also die Frage, wie effektiv die Stadt den emittierten Schall leitet und absorbiert. Mit dieser Erkenntnis kann anschließend die Wirkung der existierenden Schallquellen bewertet werden.

Eine bildhafte Analogie dieser Zusammenhänge bietet der Vergleich mit Hochwasser: Hochwasser und Flutereignisse sind die sichtbaren Auswirkungen eines im Ungleichgewicht befindlichen Systems zwischen Zu- und Abfluss. Viele Faktoren wie beispielsweise Niederschlagsmenge, Pegelstand, Auenfläche, Bodenversiegelung und Flussbegradigung spielen eine Rolle und entscheiden letztlich darüber, ob der Fluss über die Ufer tritt. Hier steht die keinesfalls trivial zu beantwortende Frage im Vordergrund, ob die getroffenen Hochwassermaßnahmen ausreichend Wirkung zeigen oder verbessert werden müssen. Ähnlich verhält es sich mit der innerstädtischen Akustik: Neben dem einfallenden Schall bestimmt die Dimensionierung von Freiflächen und die Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften an Grenzflächen den sich ausbildenden Schallpegel. Eine „leise“ Stadt fokussiert sich also nicht nur auf die Minimierung der Schallabstrahlung vorhandener Schallquellen, sondern ergreift auch Maßnahmen, die der Schallführung und Schallabsorption dienen.

### Die „leisere“ Stadt

Die Städte wachsen, und damit steigen sowohl die Quantität der urbanen Lärmquellen als auch deren Übertragungsqualität. Die akustischen Auswirkungen von urbanen Veränderungsprozessen und Möglichkeiten der gezielten Geräuschoptimierung untersucht seit einigen Jahren das Lärm- und Schall-Kompetenzzentrum der Frankfurt University of Applied Sciences. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachbereiche Architektur und Maschinenbau erfolgt die Betrachtung ganzheitlich und beziehen sowohl Schallquellen (wo entsteht der Schall) als auch Schallsenken (wo wird er absorbiert) mit ein. Die Besonderheit des interdisziplinären Frankfurter Forschungsansatzes liegt in der kontextuellen akustischen Betrachtung städtischer Situationen. In vorangegangenen Projekten wurde nicht nur dieser ortsbezogene Ansatz, sondern auch ein kontextuelles Messverfahren hierzu entwickelt, das ortsspezifische Schallquellen als Eingangsgröße zur Bestimmung der akustischen Beschreibung von Fassadenoberflächen nutzt [1,2].

Zu den urbanen Veränderungsprozessen gehören neben gesellschaftlichen Strömungen, wie der immer noch anhaltende Zuzug in die Metropolen, auch technologische Innovationen, wie etwa die Einführung der Elektromobilität. Das bedeutet, dass die erwähnten Mess- und Beurteilungsverfahren auch mit sich ändernden Schallquellen kompatibel sein müssen. Die vom Zuzug und der einhergehenden Raumnot getriebenen Verdichtungsprozesse werden durch städtebauliche und architektonische Planungsverfahren gesteuert. In diesen Verfahren werden ausschließlich numerisch berechnete Einzahlwerte für Schallpegel an bestimmte Stellen im Planungsgebiet, den maßgeblichen Immissionspunkten zugrunde gelegt. Es ist in den Planungsprozessen keine kontextuelle Datenerfassung oder Ortsbegehung vorgesehen. Das Verändern oder Nachverdichten eines Gebäudebestandes durch neue Baukörper bedeutet jedoch immer ein Hinzufügen von reflektierenden Flächen, was immer zu einer Veränderung der akustischen Situation führt oder gar zu lokalen Schallpegelerhöhungen. In den dafür eingeführten Planungsverfahren kommen Parameter zum Ansatz, die

---

ausschließlich aus der Betrachtung von Quellen und Ausbreitungswegen abgeleitet werden, wie in der DIN 18005 [3] oder der TA-Lärm [4] in Verbindung mit der DIN 9613-2 [5] definiert ist. Die zulässigen Lärmemissionen der Quellen werden durch Homologationsprozesse, wie z.B. durch das Messverfahren zur Ermittlung des von beschleunigten Straßenfahrzeugen der Klasse M und N abgestrahlten Geräusches nach DIN ISO 362-1 [2], seit vielen Jahren sehr genau bestimmt. Trotz dieses hohen Regulierungsaufwands im Bereich der Quelle und der Senke nimmt die Zahl der Lärmbelästigten und der Beschwerden stetig zu. Deshalb werden seit einigen Jahren im Zusammenhang mit Neubauvorhaben Vereinbarungen über die Einhaltung der bestehenden Immissionssituationen getroffen, um einen möglichen negativen akustischen Einfluss der hinzugefügten Bebauung zu reduzieren. Es wird z.B. über städtebauliche Verträge geregelt, dass durch den neu hinzugefügten Baukörper und die dadurch entstehenden Reflexionen keine Pegelerhöhung an den maßgeblichen Immissionspunkten entstehen darf. Der Nachweis hierzu ist immer über numerische Berechnung zu führen. Eine kontextuelle Betrachtung und Erfassung der örtlichen Gegebenheiten durch Messungen ist auch hier nicht vorgesehen. In der Praxis führt das in der Regel bisher nicht zu dem gewünschten Ziel, einen akustisch, dem Ursprungszustand gleichwertigen, lebenswerten urbanen Raum zu erhalten. Ein Grund liegt darin, dass in der aktuellen Bauproduktion der Weg über eine reflexionsmindernde oder absorbierende Fassade kaum berücksichtigt wird, da nicht nur eine Implementierung dieser Effekte in den Berechnungsvorschriften weitgehend fehlt, sondern auch auf der Seite der Bauschaffenden im Bereich der Material- und Konstruktionsauswahl kaum Erfahrung vorhanden ist. Ein anderer Grund ist, dass derartige Situationen über verwaltungsakustische Maßnahmen gelöst werden. So kann im Falle von Straßenverkehr der Pegel der Schallquelle durch Geschwindigkeits-beschränkungen reduziert werden. Zum Beispiel von 50 km/h innerorts auf 30 km/h. Vom baurechtlichen und verwaltungsakustischen Standpunkt aus ist damit den Planungsfestsetzungen Genüge getan. Durch das neue Gebäude wird es am Besten nicht zu höheren Pegeln kommen, da die Einganggröße Straßenlärm reduziert wurde. Aber es stellt sich die Frage nach der tatsächlichen Qualität des so geregelten städtischen Raumes. Ein Stadtraum besteht nicht nur aus regelkonformen Schallquellen, sondern auch aus akustischen Ereignissen, die notwendig sind, um einen Stadtraum lebenswert zu machen, wie etwa Außenflächen von Gastronomiebetrieben oder Aufenthaltszonen in Grünanlagen. Diese urbanen akustischen Ereignisse können dann zu belästigenden Schallpegeln an den maßgeblichen Immissionspunkten führen, weil zum einen durch den reduzierten Grundpegel des Straßenverkehrs andere Quellen verstärkt wahrgenommen werden und zusätzlich der Lärmeintrag durch Mehrfach-Reflexion an der hinzugefügten Bebauung verstärkt wird. Bisher nicht wahrgenommene Schallquellen werden so in das Bewusstsein und damit in das Beschwerdeverhalten der Anwohner gerückt. In Folge müssen weitere Schallquellen beschränkt werden. So geraten Schallquellen, die aus allen Formen von Außennutzungen im Stadtraum resultieren in den Fokus der genehmigenden Behörden. Durch zeitliche Limitierungen und umfangreiche Auflagen wird zum Beispiel der Betrieb von Außengastflächen unrentabel. Damit verschwinden nicht nur die, für eine lebendige und lebenswerte Stadt typischen Schallquellen aus dem Stadtraum, sondern auch die dazugehörigen Nutzungen. Dieses Anwendungs-beispiel aus der Praxis zeigt deutlich, dass über die Definition von numerisch berechneten Pegeln als Einzahlwerte in Abhängigkeit von Ausbreitungswegen kein belastbarer Planungs- oder Bewertungs-parameter für lebendige und leisere Städte gebildet werden kann. Die in den Planungsprozessen eingeführten Beurteilungsverfahren nach BImSchG auf der Basis von Ausbreitungsrechnungen nach DIN 9613-2 [5] eignen sich gut für eine Beschreibung des Status Quo einer urbanen Situation. Sie eignen sich nicht als Grundlage für eine zielführende Planung und damit den Erhalt lebenswerter Städte und deren komplexer akustischer Gegebenheiten.

---

## Akustisch Bauen!

Die Nachverdichtung unserer Städte muss im Sinne einer nachhaltigen und umweltgerechten Planung mit Fokus auf die Bewohner planbar sein. Um diese Planbarkeit herbeizuführen, muss als Grundlage ein belastbarer Parameter, der die akustische Qualität eines städtischen Raumes repräsentiert, entwickelt werden. Zur Umsetzung dieser Aufgabe wurde das interdisziplinäre Forschungsprojekt „Entwicklung eines Planungsparameters für das akustisch wirksame Bauen“ am Lärm- und Schall-Kompetenzzentrum der Frankfurt University of Applied Sciences unter der gemeinsamen Leitung von Prof. Dr.-Ing. Holger Techen, Fachbereich 1 Architektur und Prof. Dipl.-Ing. Holger Marschner, Fachbereich 2 Maschinenbau-KFZ-Technik entwickelt und durchgeführt. Ein Team von drei Forscher\_innen der Fachrichtungen Architektur und KFZ-Technik arbeitete von Januar 2020 bis November 2022 an den Grundlagen zur Bildung eines urbanen akustischen Planungsparameters. Das Projektteam bestand aus den wissenschaftlichen Mitarbeiter\_innen B. Eng. Yvonne Büdding, Dr.-Ing. Jochen Krimm und M. Eng. Ralf Fiedler. Das Projektteam wurde für den Modellbau ergänzt durch den studentischen Mitarbeiter Thomas Steigler. Im Rahmen von einem Semesterprojekt untersuchte James Douglas einzelne Aspekte im Bereich der urbanen Akustik und skalierten Messungen. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten skalierten Messungen fanden in der HaMT, Halle für akustische Messtechnik der BASt, Bundesanstalt für das Straßenwesen, mit fachlicher Unterstützung durch Dr. Wolfram Bartolomaeus statt.

In das Projekt flossen auch die Ergebnisse und Erfahrungen im Bereich von Feldmessungen und der Bewertung von akustischen Gegebenheiten aus Vorgängerprojekten der Forschenden ein. Die Ergebnisse des Vorgängerprojektes „Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen und -strukturen im Hinblick auf eine akustische Bewertung des Außenraumes/Stadtraumes an der Empfängerposition – Bestimmung von Transformationseffekten“ gefördert von der Forschungsinitiative Zukunft Bau haben gezeigt, dass eine kontextuelle Bestimmung unterschiedlicher Fassadenoberflächen mit hoher Genauigkeit möglich ist. [3] In diesem Projekt lag der Fokus auf einzelnen Fassadenoberflächen und deren Materialität. Aufgrund der Ergebnisse kann man die Wirkung einer Fassade an einem Ort bestimmen. Aus der ortsspezifischen Wirkung einer Fassade lässt sich jedoch nicht im Umkehrschluss der städtische Raum in seiner Gesamtheit planen. Im Rahmen dieses Projektes wird über umfangreiche Feldmessungen versucht, die Idee eines urbanen akustischen Planungsparameters zu entwickeln. Dabei werden städtebauliche Regelsituationen anhand von Bestandssituation definiert und bewertet, um daraus einen Katalog von Regelsituationen abzuleiten und einen oder mehrere Parameter zu identifizieren.

Das Projekt und die hier vorliegenden Ergebnisse wollen nicht nur einen Beitrag dazu leisten, dass eine akustisch verträgliche Planbarkeit der Verdichtungsprozesse im baulichen Bestand möglich ist, sondern auch ein Bewusstsein schaffen für die Bedeutung der akustischen Umwelt unserer Städte und die Verantwortung der handelnden Personen in den Planungsprozessen. Nach jahrelanger Erfahrung der Autoren ist dem größten Teil der Bauschaffenden nicht bewusst, dass alle baulichen Eingriffe immer eine akustische Intervention darstellen. Es gibt keine akustisch unsichtbaren Gebäude! Es ist zu hoffen, dass ein kontextuell bestimmter Parameter dazu führt, das nicht nur normgerecht und numerisch akustisch beurteilt und geplant wird, sondern darüber hinaus verstärkt mit Blick auf die komplexe akustische Umwelt agiert wird. Über Fachbeiträge und Veranstaltungen werden die, am Projekt beteiligten Forscher\_innen diese Diskussion über das Forschungsprojekt hinaus weiter betreiben.

---

## Die Stadt als Labor

### Arbeitshypothese

Die grundlegende Arbeitshypothese zur Bildung eines urbanen akustischen Planungsparameters besteht darin, dass über die akustisch erfassbaren Unterschiede an zwei Mikrofonpositionen der umgebende Stadtraum aufgrund der vor Ort vorhandenen Schallquellen charakterisiert werden kann. Aus dieser akustischen Charakterisierung von Orten sollte ein Parameter zur Planung von Bebauungen hinsichtlich ihrer akustischen Qualität abgeleitet werden können.

### Arbeitsplan

Die Entwicklung eines urbanen akustischen Parameters basiert auf den akquirierten Messdatensätzen von umfangreichen Feldmessungen und vergleichenden skalierenden Messungen. Auf dieser Datengrundlage wurde der Parameter nicht nur entwickelt, sondern auch überprüft und in seiner Genauigkeit verfeinert. Zur Durcharbeitung der verschiedenen Projektaspekte wurde das Projekt in vier große Arbeitsbereiche aufgeteilt, die innerhalb der Projektlaufzeit von 23 Monaten teilweise nacheinander oder parallel durchgearbeitet wurden. Die vier Bereiche waren wie folgt aufgeteilt.

Auswahl der Messorte, mit dem Ergebnis von 75 übertragbaren städtebaulichen Anordnungen im Kontext von urbanen Lärmquellen

Durchführung von zwei Messkampagnen, bestehend aus Erstmessung und Wiederholungsmessung an 75 Messorten im Stadtgebiet von Frankfurt am Main inklusive Auswertung, mit dem Ergebnis von 75 Messdatensätzen, auf deren Basis ein urbaner akustischer Parameter entwickelt werden kann.

Entwicklung eines urbanen akustischen Parameters, mit dem Ergebnis eines anwendbaren urbanen akustischen Parameters, der einen Stadtraum in seiner akustischen Qualität als Planungsparameter repräsentiert.

Überprüfung des entwickelten urbanen akustischen Parameters, mit dem Ergebnis die erfolgreiche Anwendung des urbanen akustischen Parameters in skalierten Messungen und Beispielanwendungen überprüft zu haben.

### Untersuchungen zur Identifizierung von Regelsituationen

In diesem Teil des Projektes wurden städtische Situationen ausgewählt, die eine städtische Bebauung im Kontext von Lärmquellen repräsentieren und durch eine Messanordnung mit zwei Mikrofonen akustisch bestimmt werden können. Grundlegende Bedingung hierzu ist das Vorhandensein einer oder mehrerer urbaner Lärmquellen. Urbane Lärmquellen im Sinne dem dieses Projektes sind Straßenverkehr, Schienenverkehr und Flugverkehr. Die Lärmquellen Gewerbe, Nachbarschaft, Freizeitanlagen und Schiffsverkehr wurden im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet, da durch die unregelmäßige Verteilung dieser Nutzungen in einer Stadt eine Regelmäßigkeit in den umgebenden baulichen Anordnungen nicht zu erwarten war. Auch ist es so, dass in den Nachverdichtungsprozessen gerade diese Nutzungen von Flächen im Stadtkontext durch Ersatzbauten mit anderen Nutzungen ersetzt werden. Es ist ein bekannter Trend seit vielen Jahren in den Metropolregionen und Ballungsräumen, dass Gewerbebetriebe und Freizeitnutzungen in weniger dicht besiedelte Randgebiete verlagert werden. Das ist gleichbedeutend mit dem Wegfall der Schallquelle der Nutzung. Die freiwerdenden Grundstücke werden mit Büro- oder Wohnimmobilien ersetzt, die in der Regel keine Schallquelle darstellen, jedoch aber durch die hinzugefügten Fassadenflächen im Stadtraum eine Pegelerhöhung erzeugen.

In einem ersten Schritt wurden 8 großräumliche städtebauliche Situationen in ihrem Bestand untersucht und nach zuvor definierten Kriterien erfasst. Die Analysen erfolgten auf Basis von Planunterlagen der Stadt Frankfurt, Karten und Luftbilder aus dem Internet, wie etwa Google-maps, in Kombination mit umfangreichen

Vor-Ort Begehungen. Im Rahmen der Vor-Ort Begehungen sind neben Regelsituationen auch akustisch besonders auffällige Situationen in Betracht gezogen worden. Als akustisch auffällig sind in diesem Kontext Orte zu sehen, die als besonders leise oder laut empfunden werden oder eine deutlich wahrnehmbare Änderung der umgebenden akustischen Situation erfahrbar ist.

Folgende akustisch relevante Bewertungsfaktoren werden für ein Untersuchungsgebiet betrachtet:

- Distanz zwischen Schallquelle und Gebäudefassaden
- Unterschiedliche Lautstärkepegel an der Schallquelle und an der Gebäudefassade
- Materialität und Geometrie der Gebäudeoberflächen
- Geometrie und Topografie der Straßen- / Platzsituation
- Verkehrsaufkommen / Nutzerverhalten

Die städtebaulichen Situationen innerhalb der Untersuchungsgebiete (Tabelle 1) wurden aufgrund von städtebautypischen Merkmalen ausgewählt.

**Tabelle 1 Übersicht der Untersuchungsgebiete**

Untersuchungsumfang		M	Bebauung			Lärmquellen		
Untersuchungsgebiet			linear, parallel zur Straße	locker	divers (beide Seiten)	Straße	Tram	Flug-Lärm
IB-NI	Im Birkengewann, Neu-Isenburg	4		X		X		X
FVS-Ni	Freiherr-vom-Stein Straße, NI	4		X		X		X
Fs Of	Frankfurter Straße, Offenbach	6	X	X		X		X
De	Deutschherrnufer, Ffm	5	X		X	X		
Mo	Mörfelder Landstraße, Ffm	6	X	X		X	X	X
Fr	Friedberger Landstraße, Ffm	4	X			X	X	
Ec	Eckenheimer Landstraße, Ffm	5	X			X	X	
Lyo	Lyoner Straße, Ffm	5		X	X	X	X	X
Nwz	Nordwestzentrum, Ffm	9	X	X	X	X		

---

Diese Auswahl repräsentiert einen heterogenen, städtebaulichen Zustand von Städten in Metropol Regionen. Die gründerzeitlichen Blockrandbebauungen, unterbrochen durch Plätze und Kreuzungssituationen, werden durch die Untersuchungsgebiete Frankfurter Straße, Offenbach (FS-Of), Friedberger Landstraße (Fr), Eckenheimer Landstraße (Ec) und teilweise in Mörfelder Landstraße (Mo) repräsentiert. Die 1920er Jahre im Städtebau werden anhand eines Abschnitts des Gebietes Mörfelder Landstraße (Mo) abgebildet. Die Gebiete Freiherr-von-Stein-Straße in Neu-Isenburg (FvS-NI) und Nordwestzentrum (Nwz) stellen die städtebaulichen Planungen der 1960er und 1970er Jahre dar. Typische städtebauliche Planungen der 1990er Jahre werden durch das Gebiet Deutschherrnrufer (De) repräsentiert. Die aktuellen Entwicklungen der Immobilienbranche im Bezug auf städtebauliche Anordnungen sind in einem Abschnitt im Gebiet Mörfelder Landstraße (Mo) und in Teilbereichen des Gebietes Lyoner Straße (Lyo) abgebildet. Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Projekt "Transformationseffekte von Fassaden" haben gezeigt, dass an Orten mit mehreren gleichzeitig auftretenden Lärmarten eine akustische Bestimmung des Ortes nur erschwert möglich ist. Das führte dazu, dass die intensiv überflogenen Gebiete Im Birkengewann, Neu-Isenburg (IB-NI), Freiherr-von-Stein-Straße in Neu-Isenburg (FvS-NI) und Frankfurter Straße, Offenbach (FS-Of) nicht in die Planung der Feldmessungen aufgenommen wurden. Die intensiv überflogenen Gebiete werden zum Teil von bis zu drei Flugrouten mit geringer Höhe überflogen. In Gebieten mit einer Überfliegung durch eine Flugroute, lässt sich der Einfluss der Lärmarten Straßenverkehr und Flugverkehr sehr gut erkennen und zeitlich in den Messdaten bestimmen und auswählen. Der Schienenverkehr wird in diesem Projekt nicht explizit betrachtet, da sich entlang der schienengebundenen Verkehre der Bundesbahn kaum städtebauliche Situationen mit Aufenthaltsqualität nachweisen lassen. Entlang innerstädtischer Trassen ist der Schalleintrag durch Lärmschutzwände reguliert. Der innerstädtische straßengebundene Schienenverkehr der Straßenbahnen und oberirdisch verkehrender U-Bahnen wird in den Untersuchungsgebieten Mörfelder Landstraße (Mo), Friedberger Landstraße (Fr), Eckenheimer Landstraße (Ec) und Lyoner Straße (Lyo) in den Messdatensätzen miteingefasst, jedoch nicht isoliert in seiner Wirkung betrachtet. Eine spezifische Betrachtung der Wirkung von Straßenbahnen und oberirdisch fahrenden U-Bahnen im Rahmen dieses Projektes war nicht möglich, da durch die Doppelbesetzung der Straßen mit Kfz und Schienenfahrzeugen immer beide Lärmquellen parallel vorhanden sind. Schienenverkehrsfahrzeuge im Straßenbereich isoliert messtechnisch zu erfassen, wäre nur durch Straßensperrungen möglich gewesen. Dieses Vorgehen widerspricht aber der Grundidee des Forschungsprojektes, den Stadtraum mit den vor Ort vorhandenen Schallquellen als Ist-Zustand zu erfassen. Im umgekehrten Fall lassen sich einzelne Vorbeifahrten sehr gut aus dem kombinierten Straßenverkehr mit Kfz und Schienenfahrzeugen isolieren, da die Straßenbahnen einer Fahrplankontakung mit Mindestabständen von mehreren Minuten unterliegen. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen untereinander und im Hinblick auf die Entwicklung des Parameters einen in sich konsistenten Datensatz zu haben, wurde der Fokus in den Messungen und Auswertungen ausschließlich auf städtischen Situationen mit Straßenverkehrslärmquellen gelegt. Der Straßenverkehr repräsentiert die häufigste Schallquelle, die Städte erst möglich macht. Nach Einschätzung der Autoren lässt sich ein gefundener Parameter auf andere Lärmarten anpassen. Diese Anpassung wird jedoch in einem weiteren Forschungsprojekt zu bearbeiten sein.

Aufgrund der Ortsbegehungen und den Überlegungen im Hinblick auf die vorhandenen Lärmarten wurden die Messungen in den 6 Gebieten Mo, Fr, Ec, Lyo, Nwz und D aus Tabelle 1 durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die Gebiete und die Anzahl der Untersuchungsorte, die als Grundlage für die Feldmessungen diente.

Tabelle 2 Vorschlag der Untersuchungsgebiete zur Durchführung der Feldmessungen mit 75 Messorten

Untersuchungsgebiet		Anzahl Messorte
Mo	Mörfelder Landstraße, Ffm	18
Fr	Friedberger Landstraße, Ffm	17
Ec	Eckenheimer Landstraße, Ffm	13
Lyo	Lyoner Straße, Ffm	8
Nwz	Nordwestzentrum, Ffm	9
D	Deutschherrnufer	10

Eine genauere Beschreibung der Messorte mit Abbildungen und Koordinaten kann dem Anhang entnommen werden.

### Untersuchungen zur Entwicklung der Messanordnung

In diesem Bereich des Projektes wurde aufgrund der Erkenntnis aus der Messortauswahl und im Hinblick auf die Priorisierung der Lärmart Straßenverkehr, die Messanordnung anhand verschiedenen Einzelmessungen erprobt und weiterentwickelt.

Straßenverkehr ist die dominante und flächendeckend auftretende Schallquelle im innerstädtischen Bereich und wird in verschiedenen Normen, wie der DIN 45642 [4], EN ISO 11819-1 und -4 [5, 6] und der DIN ISO 362-1 [2], als Eingangsgröße verwendet. Die grundlegende Idee einer Messanordnung mit der Eingangsgröße Straßenverkehr, auf dessen Messergebnisse ein Parameter zur Bewertung des städtischen Raumes basieren kann, besteht darin, dass eine Messposition, die straßennah aufgestellt wird, die Schallquelle betrachtet. Mindestens eine weitere, straßenferne Messposition betrachtet zeitgleich den städtischen Raum.

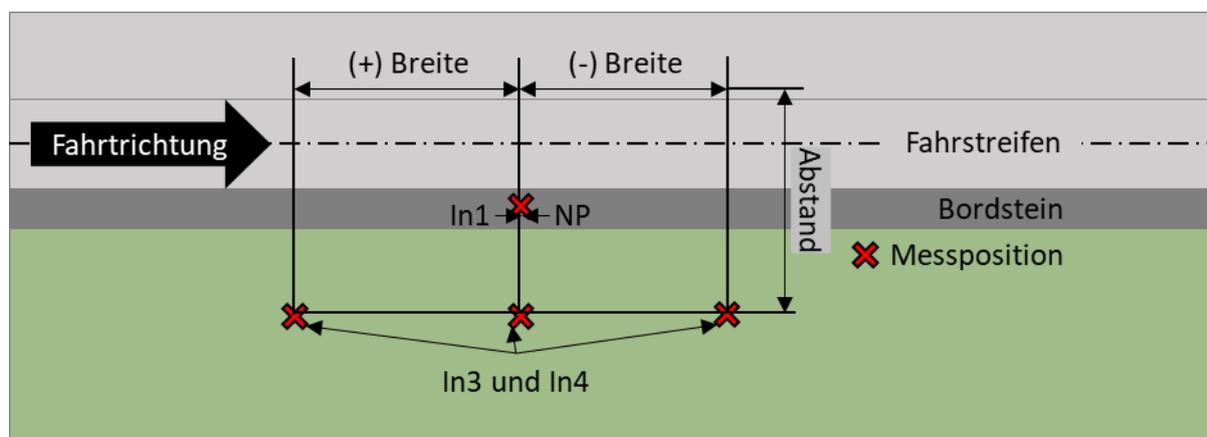
In der ersten Insitu-Messreihe zur Voruntersuchung wurden verschiedene Messanordnungen in einem städtischen Umfeld aufgebaut, um sicherzustellen, dass diese aussagekräftige Ergebnisse liefern. Zur weiteren Qualitätsprüfung der Messanordnungen und ihrer Ergebnisse wurden Messungen unter Freifeldbedingungen am ehemaligen August-Euler-Flugplatz in Darmstadt-Griesheim durchgeführt.

### Messanordnungen mit verschiedenen Mikrofonpositionen

Die DIN 45642 [4] zur Messung von Vorbeifahrtgeräuschen beschreibt die mittlere Ausbreitungshöhe von Verkehrsgeräuschen mit 2 Metern. Messpositionen sind in einem horizontalen Abstand von 7,5 m zur Schallquelle, der Mitte der Fahrbahn, auf 1,2 m Höhe festgelegt. Vorangegangene Forschungen der FRA-UAS zeigen, dass bei einer Messposition auf der Höhe von 1,2 m der Einfluss der Bodenreflexionen hoch ist. Da der Einfluss des städtischen Raumes mit seinen Fassaden betrachtet werden soll und nicht der straßennahe Bodenbelag, wurde neben der Messposition nach Norm noch eine weitere Messposition mit einem größeren Abstand zum Boden gewählt. Im Kontext der Lärmkartierungen ist eine Höhe von 4 m über Grund definiert [7]. Diese Höhe vermeidet zwar die Störung durch Bodenreflexionen, befindet sich aber auch nicht in einem Bereich, in dem sich Passanten im städtischen Bereich aufhalten. Es wurde schließlich eine Höhe von 1,8 m definiert, da der Einfluss von Bodenreflexionen geringer ausfällt und zugleich der Höhe des Gehörs eines Menschen nahekommt. Eine in situ Messreihe an der Friedberger Landstraße in Frankfurt am Main untersuchte diesen Vorschlag. Wie in Abbildung 2 erkennbar wurden zwei Mikrofone straßennah am Bordstein aufgestellt: Zum einen die Normposition (NP) auf 1,2 m Höhe und In1 auf 1,8 m Höhe. Zur Ermittlung von geeigneten straßenfernen Messpositionen wurden zwei weitere Mikrofone im städtischen Raum zwischen der Straße und

der Fassade aufgestellt (In3 und In4). Die straßenfernen Mikrofone wurden entlang der Fahrbahn versetzt positioniert, was im Folgenden durch die Breite beschrieben wird (Abbildung 1). Durch die Variation der Breite, wurde der Effekt der Winkelabhängigkeit der Vorbeifahrten untersucht. Die Höhe der Messpositionen betrug jeweils 1,8 m.

**Abbildung 1** Schematische Darstellung der Messpositionen bei den Insitu-Messreihen an der Friedberger Landstraße zur Entwicklung einer Messanordnung (Draufsicht)



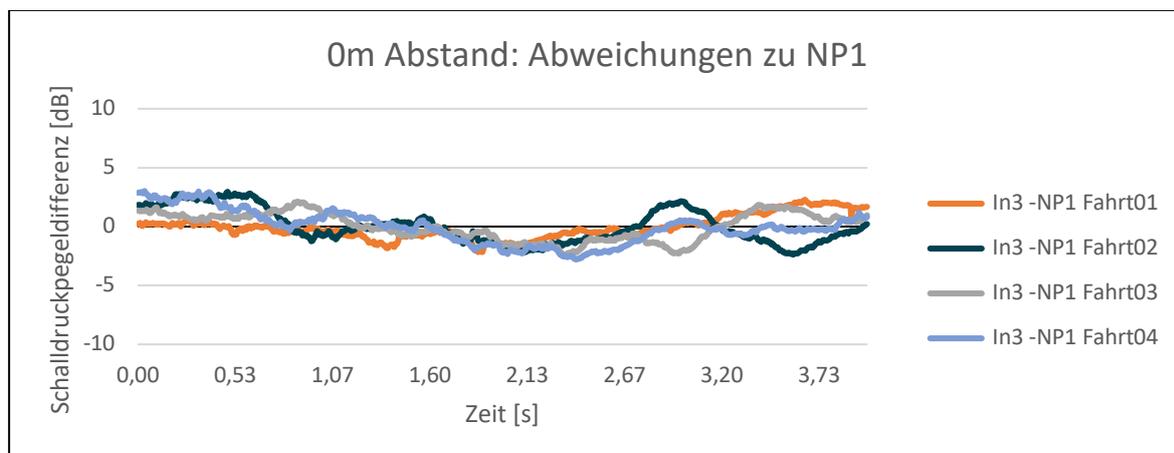
Quelle: Yvonne Büdding

Es zeigt sich, dass die Pegeldifferenz zwischen den Mikrofonen nahe der Fahrbahn (In 1) und den weiter von der Fahrbahn entfernten Mikrofonen (In3 und In4) jeweils ein ähnlicher Verlauf erkennbar ist: Zunächst messen die entfernteren Mikrofone einen höheren Schalldruckpegel, der zur Mitte der Vorbeifahrt geringer wird und zuletzt wieder ansteigt (vgl. Abbildung 2).

Werden die entfernteren Mikrofone nun entlang der Fahrbahn verschoben, spiegeln sich die Graphen der Pegeldifferenzen von den straßennahen Mikrofonen zum Mikrofon mit positivem Abstand (In3) und dem zum negativem Abstand (In4). Die Graphen kreuzen sich jeweils etwa bei der Mitte der Vorbeifahrt (nach etwa 2 Sekunden). In3 ist zu Beginn jeweils lauter als die Fahrbahn nahen Mikrofone und zuletzt leiser. Dieser Effekt verstärkt sich mit größerem Abstand (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

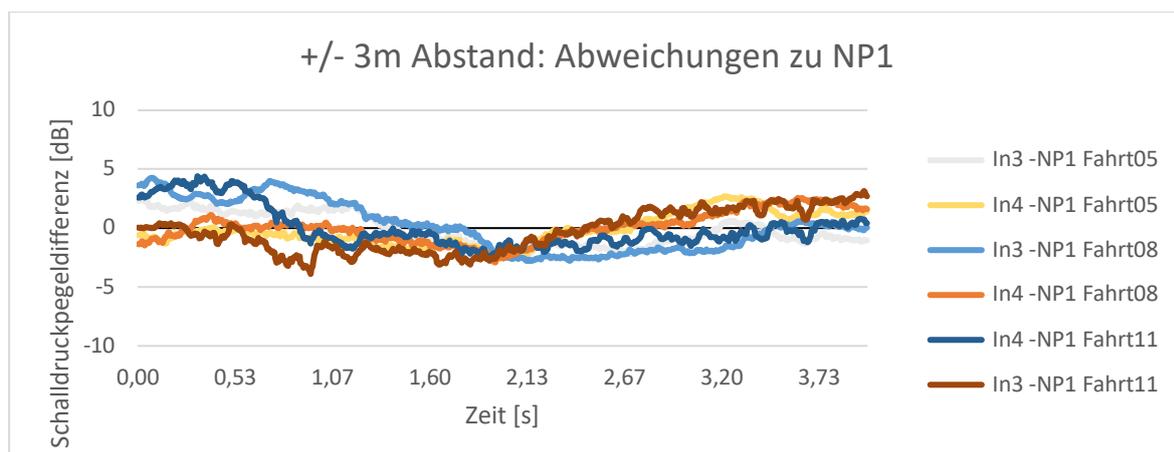
Auffällig ist, dass der maximale Pegelunterschied nicht immer zu Beginn bzw. Ende der Vorbeifahrt ist, sondern nach etwa 0,5 bzw. 3,5 Sekunden. Je weiter die Mikrofone entlang der Fahrbahn zueinander verschoben sind, und damit die Messfeldstrecke entlang der Straßen sich vergrößert, desto höhere Abweichungen zeigen sich zwischen den Pegeln der Normposition und den straßenfernen Mikrofonen.

**Abbildung 2** Schalldruckpegeldifferenzen zwischen der straßennahen Normposition NP und In3 bzw. In4 bei einer Breite von 0 m



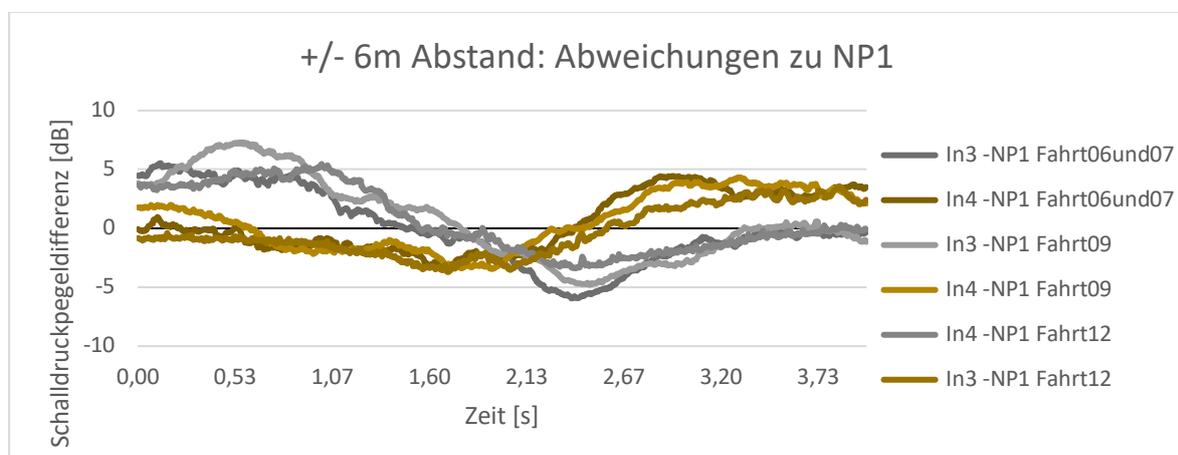
Quelle: Yvonne Büdding

**Abbildung 3** Schalldruckpegeldifferenzen zwischen der straßennahen Normposition NP und In3 bzw. In4 und NP1 bei einer Breite von 3 m



Quelle: Yvonne Büdding

**Abbildung 4** Schalldruckpegeldifferenzen zwischen IN3 bzw. In4 und NP1 bei einer Breite von 6 m

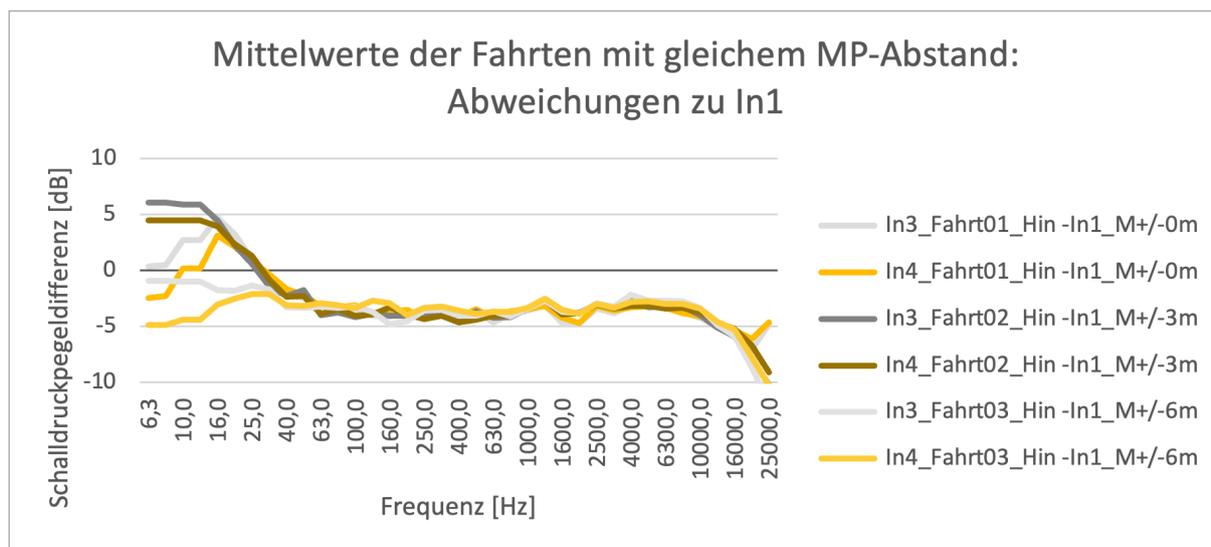


Quelle: Yvonne Büdding

Eine Änderung der Breite zeigt keinen prägnanten Einfluss auf die Terzspektren, gebildet über den gesamten Zeitraum der jeweiligen Vorbeifahrt. Eine Abweichung der Pegel ist vor allem im tieffrequenten Bereich bis ca. 63 Hz und im sehr hochfrequenten Bereich ab ca. 12 kHz in Abbildung 5 erkennen. Je größer die Breite von In3 und In4, desto größer die Abweichungen zu den anderen Messpositionen.

Bei den Terzspektren für den Moment der Vorbeifahrt (bei 2 Sekunden), schwanken die Werte für die einzelnen Frequenzen sehr stark.

**Abbildung 5** Differenzen der Mittelwerte zwischen den Terzspektren von In3 bzw. In4 zu In1 bei Vorbeifahrten einer Messanordnung



Quelle: Yvonne Büdding

Die Betrachtung der Winkelabhängigkeit der Vorbeifahrten durch die Variation der Breite liefert keine signifikanten Erkenntnisse über den städtischen Raum. Das bedeutet, wenn nicht einzelne Fassaden, sondern ein städtischer Raum in seiner akustischen Gesamtheit erfasst wird, ist die Winkelabhängigkeit des Reflexionsverhaltens einzelner Fassaden nicht mehr messtechnisch mit dieser Messanordnung nachweisbar. Zudem erhöht sich der messtechnische Aufwand durch die zusätzliche Messposition. Daher wird im Weiteren keine Variation der Breite, beziehungsweise der Winkelabhängigkeit und damit der Messstreckenlänge entlang der Fahrbahn mehr verfolgt.

### Messanordnung mit einer Abschirmplatte (Backingboard)

Bei einer weiteren in situ Messreihe wurde der Einsatz einer Abschirmplatte überprüft. Im statistischen Vorbeifahrtsverfahren kann unter bestimmten Bedingungen zum Ausschluss von Umgebungseffekten eine Abschirmplatte (Backingboard) [6] verwendet werden. Die Hypothese für diese Messanordnung war, dass durch das Backingboard die reine Betrachtung der Schallquelle unabhängig vom Einfluss des städtischen Raumes und insbesondere der Fassadenoberflächen ermöglicht werden könnte. Ein weiteres Mikrofon wurde dazu im straßennahen Raum aufgestellt und der Verkehr inklusive der Einflüsse des städtischen Raumes gemessen.

Das Backingboard mit den Maßen 60x40 cm wurde parallel zur Straße in Höhe der Mikrofone mittig hinter dem Straßen zugewandten Mikrofon ausgerichtet (vgl. Abbildung 6). Es wurde an der Friedberger Landstraße (50°08'30.1"N 8°42'04.4"O) gemessen. Vor Ort war eine vierspurige Straße, die von zwei Straßenbahngleisen und schmalen Grünstreifen getrennt ist. Der Raum hinter dem Gehweg besteht aus 30 m Rasenfläche mit vereinzelt Bäumen. Die Gebäude hinter den Grünflächen sind vier- bis fünfstöckige geschlossene

Reihenhäuser mit verputzter Fassade. Es wurden drei Messungen im Abstand zur Straße von 0, 4, und 8 m durchgeführt.

**Abbildung 6** In situ Messungen mit der Anordnung von einem Mikrofon vor einem Backingboard an der Friedberger Landstraße in Frankfurt



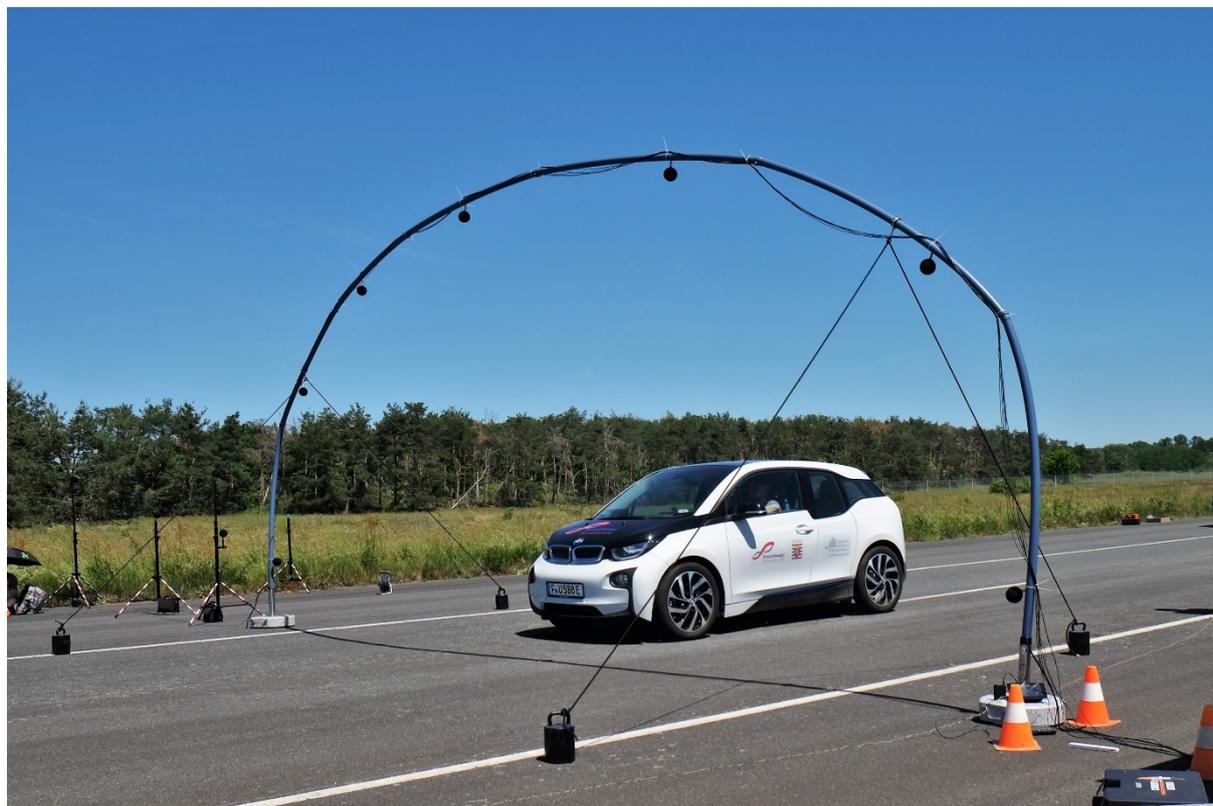
Quelle: Jochen Krimm

Der Vergleich der Messungen mit und ohne Backingboard zeigt, dass es durch Beugung und Reflexionen des Schalles am Backingboard zu starken frequenzabhängigen Veränderungen der Messdaten kommt. Um die Beugung des Schalles zu verhindern, müsste das Backingboard größere Maße aufweisen, dadurch wäre es zugleich eine signifikante Fläche im Raum und würde diesen beeinflussen. Die Verwendung eines ausreichend großen Backingboardes, die eine Beugung des Schalles verhindert, ist daher nicht zielführend. Die Einflüsse des Backingboardes lassen sich nur mit großem Aufwand aus den Messdaten herausrechnen, wodurch ein Vergleich der Messdaten von Messungen mit und ohne Backingboard nicht zu aussagekräftigen Daten führt. Die Verwendung eines Backingboardes zur Ermittlung der akustischen Charakteristik des Messortes wurde daher nicht weiter verfolgt.

## Untersuchung der Messanordnung unter Freifeldbedingungen

Im Zuge der in situ Messreihen wurde eine Messreihe unter nahezu idealen Freifeldbedingungen am ehemaligen August-Euler-Flugplatz in Darmstadt-Griesheim durchgeführt (vgl. Abbildung 7). Durch die ebene grasbewachsene Umgebung, die die Landebahn umgibt, sowie das Fehlen von nahen Fremdschallquellen, sind ideale Freifeldbedingungen gegeben. Lediglich die Autobahn in 1 km Entfernung und gelegentliches Vogelgezwitscher stellen Fremdschallquellen dar, die aufgrund der geringen Schalldruckpegel vernachlässigt werden können.

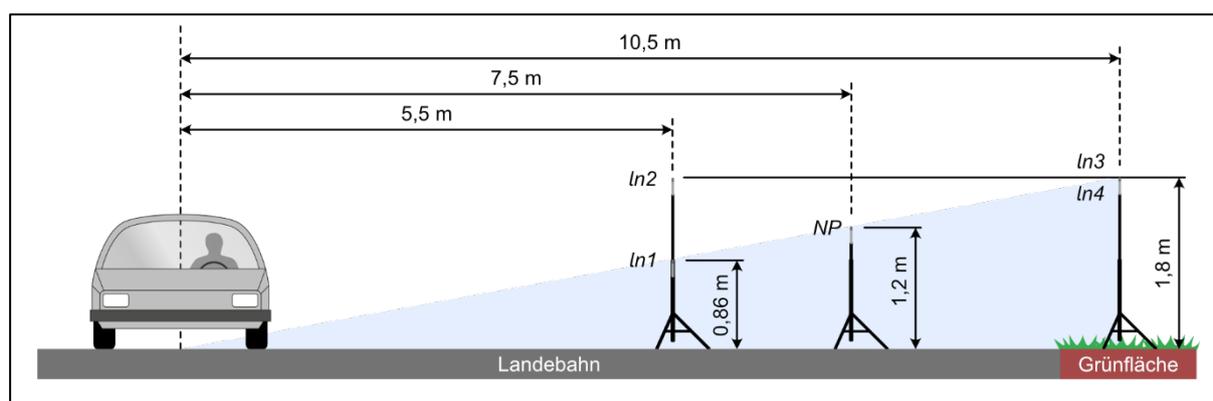
Abbildung 7 Vorbeifahrtmessung eines Elektro-Kleinwagens während der Freifeldmessung auf dem ehemaligen August-Euler-Flugplatz 2021



Quelle: Holger Marschner

Eine Messposition wurde gemäß DIN 45642 [4] im Abstand von 7,5 m auf 1,2 m Höhe positioniert (vgl. Abbildung 8). Eine weitere Messposition wurden in einem Abstand von 5,5 m in 0,86 m Höhe und eine dritte und vierte in einem Abstand von 10,50 m auf einer Höhe von 1,80 vorgesehen.

Abbildung 8 Messanordnung der Freifeldmessung auf dem ehemaligen August-Euler-Flugplatz 2021



Quelle: Ralf Fiedler

Zur Abdeckung verschiedener Fahrzeug- und Antriebstypen wurden verschiedene Fahrzeuge gemäß Tabelle 2 gewählt, sodass der Einfluss dieser Faktoren auf die Messergebnisse ermittelt werden konnte. Es wurde zunächst eine Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h gewählt, die der am häufigsten innerstädtisch auftretenden Fahrgeschwindigkeit entspricht [2]. Um den Einfluss von einer davon eindeutig trennbaren Fahrgeschwindigkeit analysieren zu können, wurde die Fahrgeschwindigkeit in Stufen von 10 km/h bis zu

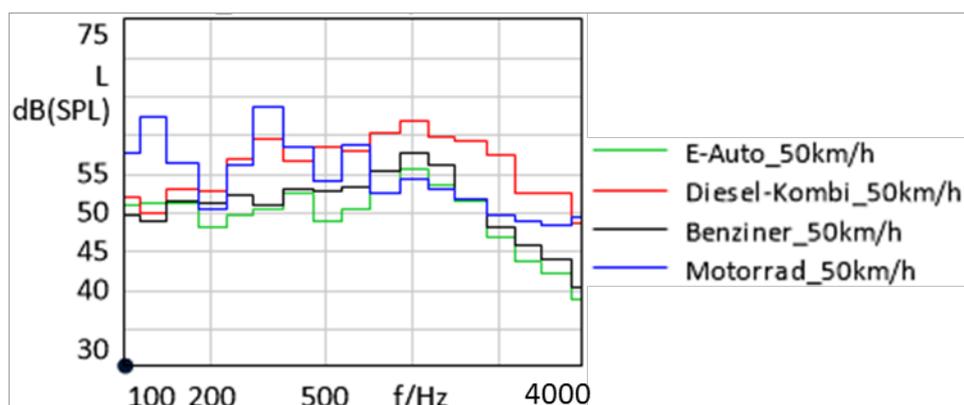
einer Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h erhöht. Es wurde jeweils darauf geachtet, dass die Fahrgeschwindigkeit konstant ist. Für das akustische Verhalten von Fahrzeugen bei nicht konstanter Geschwindigkeit, wie es zum Beispiel an Kreuzungen oder Ampelanlagen auftritt, kann dieses Messprocedere keine Aussage treffen. In den Messungen ging es darum den Unterschied der einzelnen Antriebsarten zu im Vergleich zu ermitteln. Das war möglich, da alle Fahrzeuge eine Standard Sommerbereifung aufwiesen und auf dem gleichen Abschnitt der asphaltierten ehemaligen Landebahn gemessen wurden. Der Belag der Landebahn konnte nicht näher klassifiziert werden. Die Messungen wurden bei trockenem sonnigen Wetter mit Windstärken deutlich unter 5 m/s durchgeführt

**Tabelle 2 Beschreibung der Fahrzeuge bei der Freifeldmessung**

Benennung	Fahrzeugtyp	Antriebstyp	Gewicht [kg]	Produktionsjahr
E-Auto	Kleinwagen	Elektromotor	1345	2016
Diesel-Kombi	Kombi	Dieselmotor	1564	2005
Benziner	Kleinwagen	Benzinmotor	1199	2016
Motorrad	Motorrad	Benzinmotor	246	1993

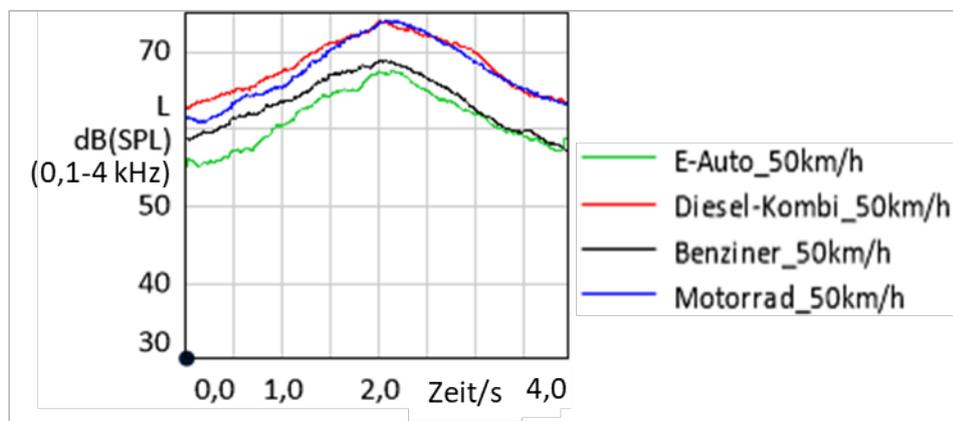
Bei Betrachtung der Pegel-Zeit-Verläufe von Vorbeifahrten verschiedener Fahrzeuge bei gleicher Geschwindigkeit sind ähnliche Verläufe mit unterschiedlicher Pegelhöhe erkennbar (vgl. Abbildung 10). Die Terzspektren der Vorbeifahrten hingegen sind für die Fahrzeuge nicht vergleichbar (vgl. Abbildung 9). Jedes Fahrzeug weist bei 1 kHz eine Pegelspitze auf, die durch das Reifenabrollgeräusch erzeugt wird. Daraus kann gefolgert werden, dass für Untersuchungen von Vorbeifahrten der Fahrzeugtyp eine prägende Auswirkungen hat.

**Abbildung 9 Terzspektren gemittelt über 4 s einer Vorbeifahrt von verschiedenen Fahrzeugen bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition)**



Quelle: Jochen Krimm

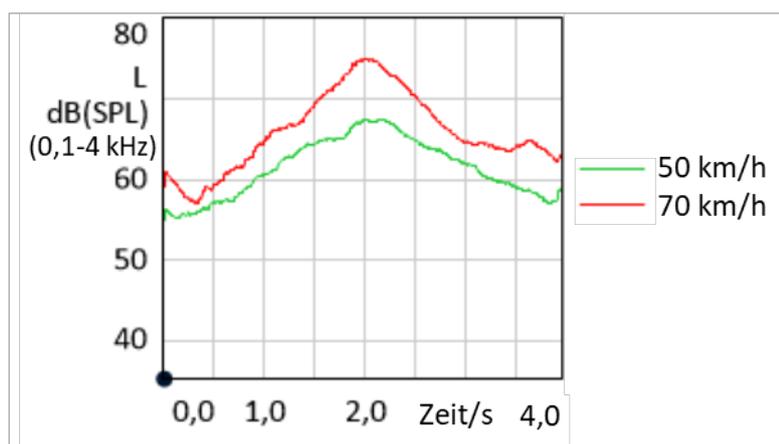
Abbildung 10 Pegel-Zeit-Verläufe der Vorbeifahrten verschiedener Fahrzeuge bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition)



Quelle: Jochen Krimm

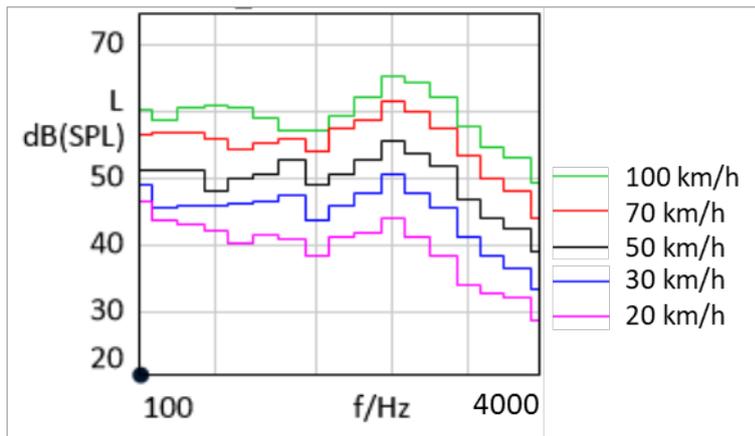
Der Unterschied zwischen verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten zeigt sich durch höhere Pegel und einen steileren Pegelanstieg im Pegel-Zeit-Verlauf der Vorbeifahrt (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Die Terzspektren bleiben bei gleichmäßig gefahrenen Geschwindigkeiten von 50 und 70 km/h vergleichbar. Demnach hat eine Differenz der Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h kaum Auswirkungen auf die Frequenzverteilung (vgl. Abbildung 12). Bei der Betrachtung von Messorten muss demnach die gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit, solange sie zwischen 30 km/h und 100 km/h liegt nicht berücksichtigt werden. Diese Festlegung wurde gewählt, da bei Fahrgeschwindigkeiten unterhalb von 30 km/h vorwiegend die Antriebsgeräusche und bei über 100 km/h breitbandige Windgeräusche dominant sind. [8]

Abbildung 11 Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten bei verschiedener Fahrgeschwindigkeit bei der Freifeldmessung 2021 in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle des E-Autos (Normposition)



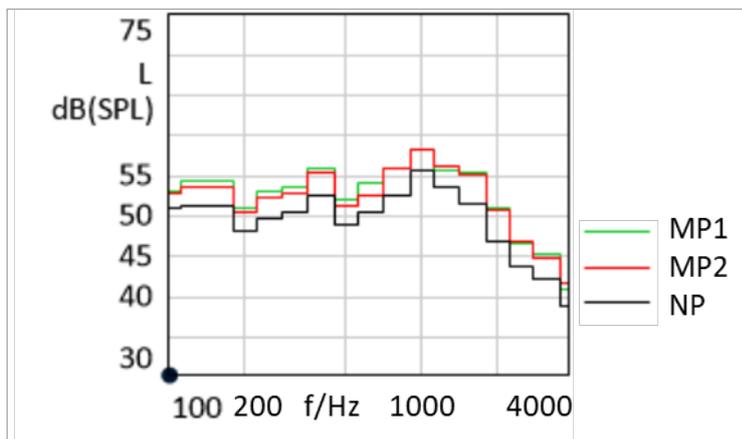
Quelle: Jochen Krimm

Abbildung 12 Terzspektren gemittelt über 4 s einer Vorbeifahrt des E-Autos von verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition)



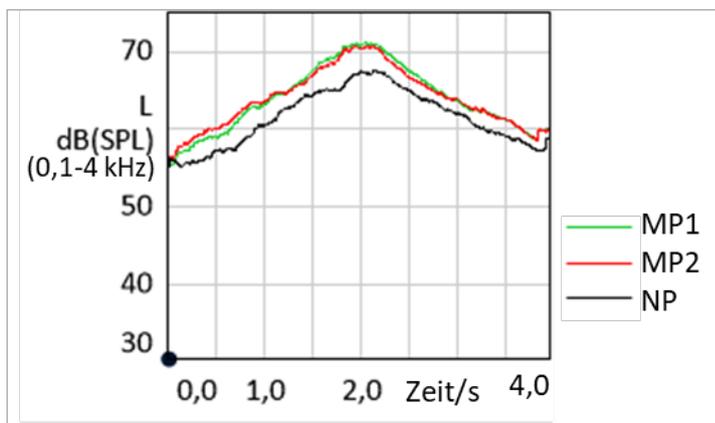
Quelle: Jochen Krimm

Abbildung 13 Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten unterschiedlicher Messpositionen bei der Freifeldmessung 2021



Quelle: Jochen Krimm

Abbildung 14 Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten unterschiedlicher Messpositionen bei der Freifeldmessung 2021



Quelle: Jochen Krimm

Die beiden quellennahen Messpositionen MP1 und MP2 weisen nahezu identische Pegel-Zeit-Verläufe und Terzspektren der Vorbeifahrten auf. Aufgrund des erhöhten Abstandes zur Schallquelle sind die Pegel der Normposition NP niedriger (vgl. Abbildung 13). Die Frequenzverteilung bei der Normposition ist trotz

---

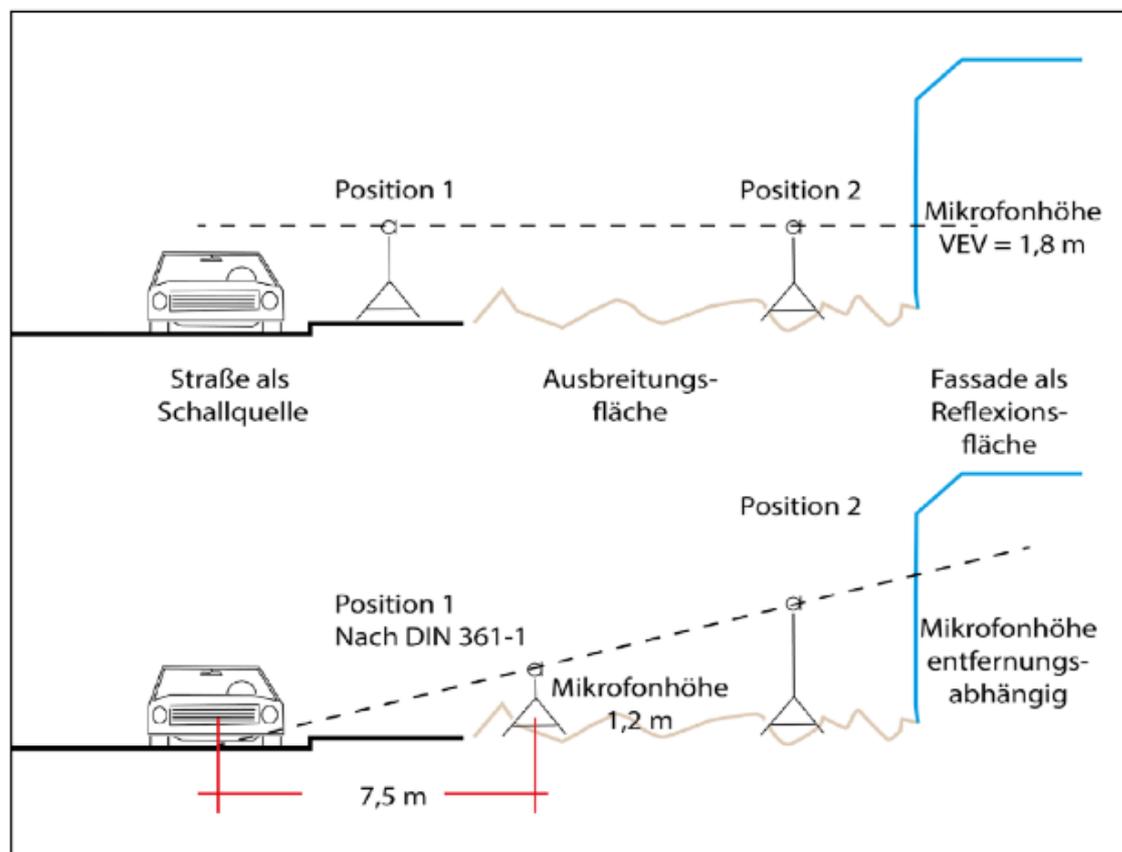
niedrigerer Pegel vergleichbar an den Messpositionen MP1 und MP2 (vgl. Abbildung 14). Alle drei betrachteten Messpositionen ermitteln exakte Werte von der Vorbeifahrt. Die Effekte, die bei der unterschiedlichen Positionierung der straßenfernen Messpositionen der in situ Messungen festgestellt wurden, sind auch unter Freifeldbedingungen erkennbar.

### **Überlegungen zur Anwendbarkeit der Messanordnungen**

Bei materialbezogenen Messungen liegt der Fokus auf dem Einfluss des Materials beziehungsweise der Oberflächen auf eine Mikrofonposition, deshalb ist der Abstand zwischen Material beziehungsweise Oberfläche und Mikrofonposition immer gleich groß zu wählen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Diese Abstandsdefinition findet sich zum Beispiel in der Normenreihe zum sogenannten Adrienne Verfahren gemäß CEN/TS 1793-5 [16]. Bei quellenbezogenen Messungen wird der sich ausbreitende Schallstrahl betrachtet. Das führt in der Regel mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle zu unterschiedlichen Höhen der Mikrofonpositionen über Grund (siehe DIN 361-1). In der Quellen-bezogenen Messung ändert sich die Mikrofonhöhe in Abhängigkeit zur Entfernung. Werte mit unterschiedlicher Entfernung zur Quelle lassen sich also nicht direkt in Bezug setzen. Mit einem Korrekturfaktor müsste immer die veränderliche Höhe berücksichtigt werden. Zudem ist die Grundposition von 1,2 m Mikrofonhöhe in 7,5 m Abstand zur Mitte der Quelle, also zur Mitte der näheren Richtungsfahrbahn selten in städtischen Situationen umsetzbar. Es wurde deshalb ein Kompromiss für die Mikrofonanordnung gesucht, der zum einen die Schallquelle berücksichtigt und aber auch das Material des umgebenden Stadtraums einbezieht.

Der Vergleich der Positionen für Material beziehungsweise Oberflächen bezogene Messungen in Abbildung 15 (oben) mit den Positionen für quellenbezogene Messungen in Abbildung 15 (unten) zeigt die geometrische Anordnung der Messpositionen im Schnitt eines urbanen Raumes. Diese Überlegungen und messtechnischen Voruntersuchungen führten zu dem Vorschlag eine Messanordnung mit zwei Mikrofonpositionen in 1,80 m Höhe und einem festen Abstand zueinander zu wählen. Die Abstände zum den umgebenden Fassaden und der Schallquelle können je nach städtischer Gegebenheit unterschiedlich ausfallen.

Abbildung 15 Vergleich zwischen der geometrischen Anordnung für Material/Oberflächen bezogenen Messungen (Schnittzeichnung oben) und Quellen bezogene Messungen (Schnittzeichnung unten)

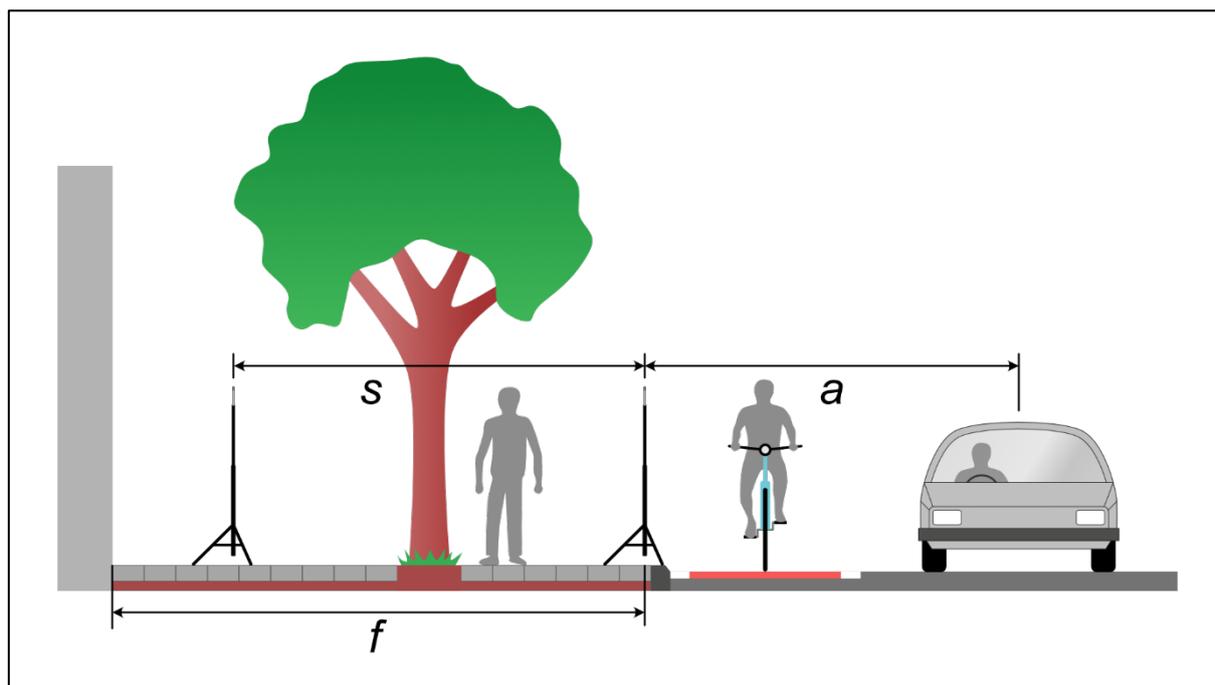


Quelle: Jochen Krimm

## Entwickelte Messanordnung auf Grundlage der zuvor beschriebene Untersuchungsoptionen

Aufgrund der Voruntersuchungen und einer räumlichen Analyse der geplanten Messorte wurde eine Messanordnung zur Verwendung in den Feldmessungen geplant, die aus zwei Mikrofonpositionen in einem konstanten Abstand zum Boden und zueinander besteht. Der Versuchsaufbau ist darauf ausgelegt, dass der vom Straßenverkehr abgestrahlte Schall sich vom ersten Mikrofon aus in Richtung des zweiten Mikrofons ausbreitet. Damit lassen sich verschiedenste bauliche Situationen wie zur Straße parallelen oder schrägen Fassaden, zwischen Häusern oder an Hausecken und an kleineren Seitenstraßen akustisch bestimmen. Als Mikrofonhöhe wurde  $1,8\text{ m}$  über Grund festgesetzt. Diese Höhe folgt wird auch bei geeigneten städtischen Oberflächen beibehalten. Bei unveränderter Mikrofonhöhe von  $1,8\text{ m}$  lassen sich Messergebnisse von Position 1 und Position 2 direkt in Bezug setzen. Die Praxis in den vorangegangenen Projekten hat hier gezeigt, dass der Abstand des Mikrofones zur Quelle, also zur Mitte der näheren Richtungsfahrbahn, sehr gut in einem Bereich von  $3,0\text{ m}$  bis  $4,5\text{ m}$  im städtischen Kontext umsetzbar ist. Als Abstand der Mikrofonpositionen zueinander wurden die zwei Abstände von  $5\text{ m}$  beziehungsweise  $10\text{ m}$  geplant. Zur Anpassung des Messaufbaus an die Größe des städtischen Raumes kann einer der beiden Mikrofonabstände gewählt werden. Ein geringerer Abstand als  $5\text{ m}$  wurde nicht in Betracht gezogen, da sich städtische Räume mit einer Ausdehnung von unter  $5\text{ m}$  in einer Richtung und in direkter Nähe zu einer Verkehrsschallquelle sich schwerlich als qualitativer Aufenthaltsort für Stadtbewohner nutzen lassen. Die Reduzierung auf zwei Mikrofonpositionen führt dazu, dass durch die geringe erforderliche Anzahl an Messkanälen der messtechnische Aufwand überschaubar ist. Zudem ist die Positionierung der Mikrofone durch handelsübliche Mikrofonstative umsetzbar. Der Versuchsaufbau im Schnitt ist in Abbildung 16 zu sehen.

Abbildung 16 Anordnung der Mikrofone für die Messung der Schallausbreitung



Quelle: Ralf Fiedler

### Durchführung der Feldmessungen 2021 und 2022

Die Messungen wurden im September 2021 durchgeführt und zwischen September und Oktober 2022 wiederholt. Zur Durchführung wurden Teams aus je zwei Projektmitarbeiter\_innen eingesetzt. Das Equipment ist im Umfang so ausgewählt, dass der Transport mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder mit einem Lastenrad durchgeführt werden konnte. Die Messungen wurden nur bei trockenem Wetter, Temperaturen über 15° Celsius und Windgeschwindigkeiten unter 5 km/h durchgeführt. Das Equipment bestand aus einem tragbaren vierkanaligem Schallpegelmessgerät Klasse 1, zwei Messmikrofone Klasse 1, zwei Stative und den notwendigen Mikrofonkabeln. Über Markierungen an den Mikrofonkabeln und den Mikrofonstativen konnte eine hohe Wiederholgenauigkeit für die Abstände und Höhen der Mikrofonpositionen gewährleistet werden. Die Abstände zur Straße oder den umgebenden Fassaden wurden mit einem Metermaß beziehungsweise mit einem Laserentfernungsmessgerät ermittelt. Parallel wurden die GPS-Daten der Messorte gespeichert. Um die Gültigkeit und Genauigkeit der Messung und des Messequipments im aufgebauten Zustand zu gewährleisten, wurde vor Beginn einer Feldmessung eine Messung mit dem Aufsteck-Kalibrator durchgeführt. Dadurch ist es möglich, Abweichungen oder Ungenauigkeiten in den Messdatensätzen zu identifizieren. Durch den effizienten Einsatz des Equipments war nicht nur ein schneller Auf- und Abbau, sondern auch ein flexibler Umgang mit den Wetterbedingungen gewährleistet. Die Messdaten wurden als Originalrohdaten parallel auf Speichermedien (SD-Karte) und auf dem Forschungsdatenserver des Fachbereichs 2 gesichert. Zur Auswertung wurden ausschließlich Kopien der Originalrohdaten verwendet. In der ersten Runde der Feldmessungen in 2021 wurden alle 6 Untersuchungsgebiete (siehe Tabelle 2) an 75 Messorten untersucht. In der Tabelle 3 sind alle Messorte der in situ Messkampagnen der Jahre 2021 und 2022 enthalten, die zur Entwicklung des Parameters im Auswerteprozess verblieben, sowie die Information, ob die bauliche Situation des Messorts in den skalierten Messungen untersucht wurde. An manchen Messorten wurde nicht direkt der Versuchsaufbau aus der Abbildung 16 mit einem straÙennahen Mikrofon eingesetzt, sondern im hinteren Stadtraum gemessen. Diese Messtellen wurden bei den Wiederholungsmessungen größtenteils nicht betrachtet. Die Zwischenauswertung der Messungen von 2021 ergab, dass in diesen Fällen keine eindeutige Zuordnung zu referenzierbaren Ereignissen, wie etwa einzelne Vorbeifahrten möglich war. Eine weitere Ausnahme bildeten die Untersuchungsgebiete Lyoner Straße und Nordwestzentrum. Es zeigte sich schon in

der ersten Datenschau der Messungen von 2021, dass die Gebiete Nordwestzentrum und Lyoner Straße nicht weiterverfolgt werden können, da zum einen die Entfernungen der Schallquellen und Fassaden zu den Mikrofonpositionen zu groß waren als auch der Lärmeintrag sich nicht im Hinblick auf Pegel- oder Zeitverlauf konkret einordnen ließ. Bis auf einen Messort konnten in den vier verbleibenden Untersuchungsgebieten alle Messungen im Jahr 2022 wiederholt werden. Eine zusätzliche Messtelle kam im Jahr 2022 hinzu, da diese für den Vergleich mit den skalierten Messungen notwendig geworden war. Die Messorte sind im Einzelnen im Anhang 1 fotografisch dokumentiert.

**Tabelle 3 Gemessene Orte im Rahmen der In situ-Messungen 2021 sowie 2022, und den skalierten Messungen in der Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt), die im weiteren Verlauf als Datengrundlage verwendet wurden.**

Messort Kürzel	Messort Beschreibung	Messungen in situ 2021	Messungen in situ 2022	skalierte Messungen (BASt)
Mo_01	bewaldet	ja	ja	vgl. absorbierende Freifläche
Mo_02	bewaldet	ja	ja	vgl. absorbierende Freifläche
Mo_03	vor 1,8 m hoher Mauer	ja	ja	nein
Mo_04	Gastronomie neben Unterführung	ja	ja	nein
Mo_05	unter Unterführung	ja	ja	ja
Mo_06	Vor Fassade mit Lücke	ja	nein	nein
Mo_07	hinten im Stadtraum	ja	nein	nein
Mo_08	zwischen Reihenhäusern, 90° parkende Pkw, Wiese	ja	ja	ja
Mo_09	zwischen Reihenhäusern, hinten im Raum	ja	nein	nein
Mo_10	vor geschlossener Fassade, Raum Wiese	ja	ja	ja
Mo_11	zwischen Reihenhäusern, 90° parkende Pkw, Wiese	ja	ja	nein
Mo_12	zwischen Reihenhäusern, im straßenfernen Raum	ja	nein	nein
Mo_13	Vor geschlossener Fassade, parkende Pkw	ja	ja	ja
Mo_14	Hausecke, asphaltierter Platz	ja	ja	ja
Mo_15	Hausecke, im straßenfernen Raum	ja	nein	nein
Mo_16	kleiner Park vor geschlossener Fassade	ja	ja	ja
Mo_17	Hausecke, asphaltierter Platz	ja	ja	ja
Mo_18	unter Arkaden, Raum Pflaster	ja	ja	nein
Ec_01	offene Fassade, große Kreuzung	ja	ja	nein

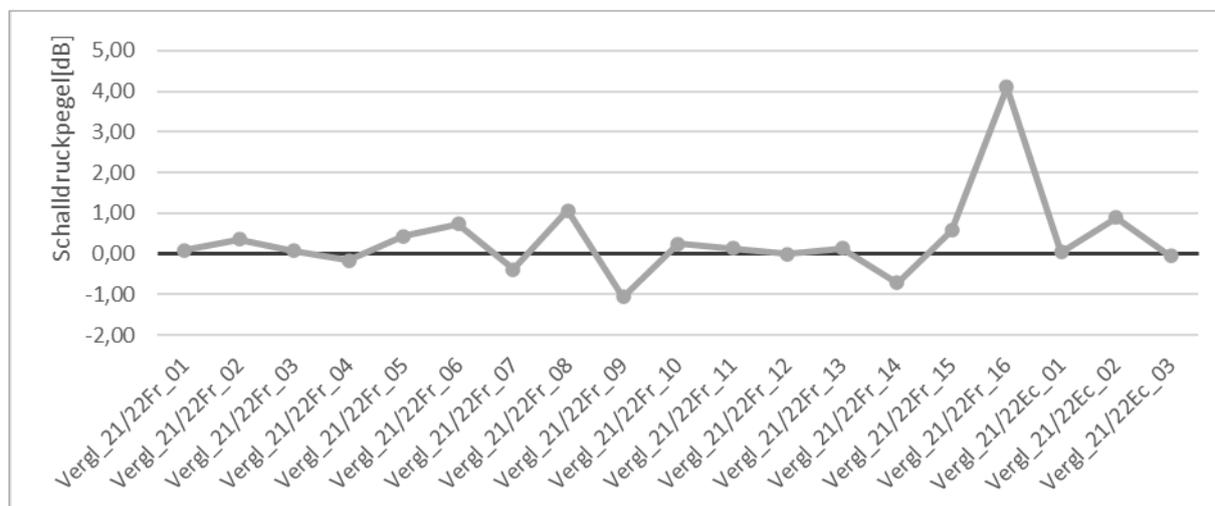
Messort Kürzel	Messort Beschreibung	Messungen in situ 2021	Messungen in situ 2022	skalierte Messungen (BASt)
Ec_02	Hausecke, Vorgarten mit Grünfläche (hohe Hecke)	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, absorbierend
Ec_03	Hausecke, Raum Pflaster	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, reflektierend
Ec_04	Hausecke, Raum teils Pflaster, teils Grünfläche	ja	ja	nein
Ec_05	Hausecke, großer Raum mit Pflaster	ja	ja	ja
Ec_06	vor geschlossener Fassade, hinter Haltestelle	ja	ja	nein
Ec_07	vor geschlossener Fassade, Bäume im Raum	ja	ja	ja
Ec_08	Geschlossene Fassade, parkende Pkw, Raum Grünfläche	ja	ja	ja
Ec_09	Geschlossene Fassade, parkende Pkw, Raum Pflaster	ja	ja	ja
Ec_10	Hausecke, parkende Pkw, Raum Pflaster	ja	ja	nein
Ec_11	Geschlossene Fassade, parkende Pkw, kein Raum	ja	ja	nein
Ec_12	Hausecke, hinter Haltestelle, im straßenfernen Raum	ja	nein	nein
Ec_13	Hausecke, Vorgarten mit Grünfläche (hohe Hecke)	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, absorbierend
De_01	Hausecke, Raum mit Pflaster	ja	ja	ja
De_02	Hausecke neben Arkaden, parkende Pkw	ja	ja	ja
De_03	Hausecke unter Arkaden, parkende Pkw	ja	ja	ja
De_04	Geschlossene Fassade, unter Arkaden, parkende Pkw	ja	ja	ja
De_05	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	nein	nein
De_06	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	nein	nein
De_07	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	nein	nein
De_08	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	nein	nein

Messort Kürzel	Messort Beschreibung	Messungen in situ 2021	Messungen in situ 2022	skalierte Messungen (BASt)
De_09	Hausecke, Raum mit Pflaster	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, reflektierend
De_10	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	nein	nein
Fr_01	Hausecke (schräg), an großer Kreuzung	ja	ja	nein
Fr_02	Hausecke (schräg), an großer Kreuzung	ja	ja	nein
Fr_03	vor geschlossener Fassade, Raum Pflaster	ja	ja	ja
Fr_04	vor geschlossener Fassade, Raum Grünfläche	ja	ja	nein
Fr_05	vor geschlossener Fassade, Raum Grünfläche	ja	ja	ja
Fr_06	Hausecke, Raum mit Pflaster	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, reflektierend
Fr_07	Hausecke, Vorgarten mit Grünfläche	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, absorbierend
Fr_08	straßenferner Raum zwischen Häusern	ja	ja	nein
Fr_09	geschlossene Fassade (schräg), Raum mit Pflaster	ja	ja	nein
Fr_10	Geschlossene Fassade, Raum Erdboden, Bäume	ja	ja	ja
Fr_11	großer urbaner Park, gemischter Untergrund Pflaster und Wiese	ja	ja	nein
Fr_12	großer urbaner Park, Untergrund Wiese	ja	ja	ja
Fr_13	Hausecke, Raum mit Pflaster	ja	ja	vgl. Hausecke kleine Kreuzung, reflektierend
Fr_14	geschlossene Fassade, Grünstreifen zwischen Gehweg und Straße	ja	ja	nein
Fr_15	geschlossene Fassade, parkende Pkw, kein Raum	ja	ja	nein
Fr_16	geschlossene Fassade (schräg), kleiner Platz, Raum mit Pflaster	ja	ja	nein
Fr_17	geschlossene Fassade, Engstelle, kein Raum	ja	ja	ja

## Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der innerstädtischen Messungen von 2021 wurden die Messungen im Oktober 2022 wiederholt. Die äquivalenten Dauerschallpegel der einzelnen Messpositionen weichen maximal um 4 dB von denen des anderen Jahres ab. Ausnahme bilden Messungen an den Messorten Fr08, Fr16 und Ec02, bei denen der äquivalente Dauerschallpegel zwischen 2021 und 2022 um bis zu 6 dB abweicht. Diese hohen Abweichungen wurden durch veränderte Schallquellen im städtischen Raum erzeugt. Beispielsweise hielten sich bei der Wiederholungsmessung 2022 am Messort Fr16 Menschen im Bereich nahe der straßenfernen Messposition auf. Durch den zusätzlichen Schalleintrag der Passanten an der straßenfernen Messposition von Messort Fr16 stieg der äquivalente Dauerschallpegel im Gegensatz zum Vorjahr, was die Abweichung verursachte. Bei den Messungen 2021 befand sich am Messort Ec02 eine aktive Baustelle ca 50 m entfernt, die 2022 nicht vor Ort war, und da sie nicht über Zeit oder Frequenzselektion isoliert werden konnte für einen zusätzlichen Schalleintrag und eine Pegelerhöhung an den Messmikrofonen sorgte. Diese Pegelerhöhung an den einzelnen Mikrofonpositionen ist jedoch nicht entscheidend, da in dem hier vorgestellten Messverfahren immer nur die Differenz der Messpositionen betrachtet wird. Um die Abweichungen für die Differenzbetrachtung festzustellen wurden für die Messungen beider Jahre die äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs ermittelt und im Anschluss die Differenz zwischen den Dauerschallpegeln des straßennahen zu dem des straßenfernen Mikrofons berechnet. In Abbildung 17 ist die Differenz der so berechneten Werte von 2021 zu denen von 2022 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen den beiden Jahren maximal 1 dB betragen, mit Ausnahme des Wertes am Messort Fr16, der aus oben genannten Gründen abweicht. Das heißt, ist der Schalleinfluss des Umgebungslärms auf nur eine der beiden Mikrofonpositionen signifikant hoch, ist die Messung ungültig. Die Abweichung der Differenzen der Dauerschallpegel beider Messpositionen von 1 dB zeigt eine gute Reproduzierbarkeit der Feldmessungen mit der hier vorgestellten Messmethode. Demzufolge können die Messdaten als Eingangsdaten zur weiterführenden Entwicklung einer akustischen Bewertung von urbanen Räumen reproduzierbar bestimmt werden.

**Abbildung 17** Differenzen der Messdaten von 2021 und 2022 anhand der Differenzen äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs von straßennahen zur straßenfernen Messposition



Quelle: Ralf Fiedler

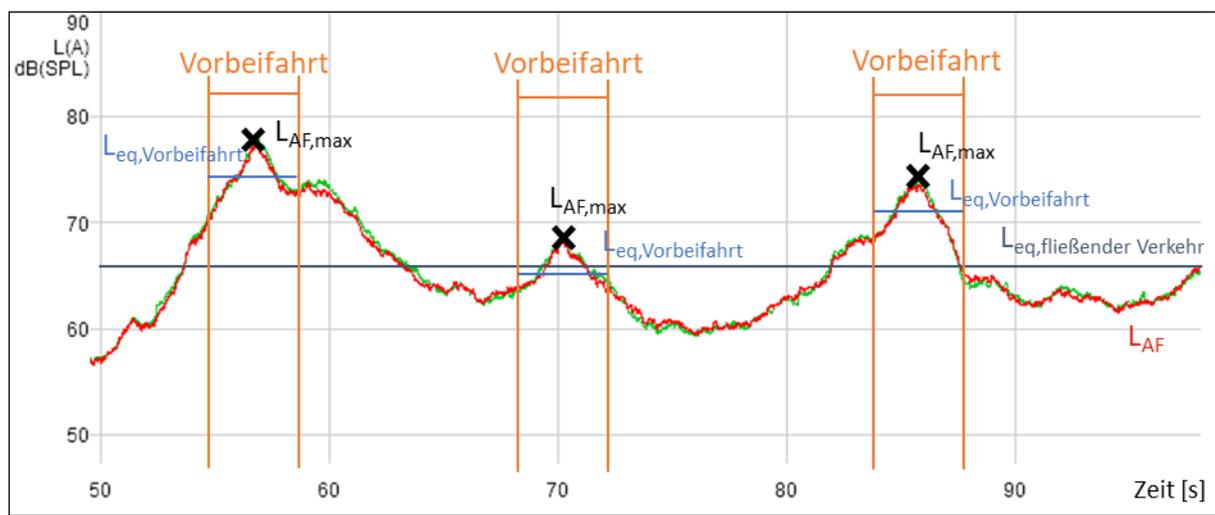
## Auswertung der Messergebnisse

Ziel des Projektes war es, einen urbanen akustischen Planungsparameter aus der Charakterisierung eines urbanen Raumes anhand der Unterschiede zwischen zwei Mikrofonpositionen im urbanen Raum durch vor Ort vorhandenen Schallquellen zu ermitteln. Hierzu mussten die gesamte Messdaten gesichtet und einer Auswertung unterzogen werden. Messorte mit großer Abweichung der Differenzen zwischen den Messungen in 2021 und 2022, wie in dem Abschnitt „Reproduzierbarkeit der Messergebnisse“ beschrieben, wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Um den Zeitaufwand für die Auswertung reduzieren zu können, wurde der Fokus auf die Entwicklung einer automatisierten Auswertung gelegt. Akustische Messdaten und die zugehörigen Tonaufnahmen, die zur Kontrolle der Einzelereignisse notwendig sind, erreichen schon bei Einzelmessungen ein Datenvolumen von mehreren Gigabyte. Die Komplexität der geplanten Auswertungen wurde durch die notwendige Bildung von einzelnen Vorbeifahrtereignissen und dem Vergleich von Einzelereignissen aus unterschiedlichen Messungen noch erhöht. Eine weitgehend automatisierte Auswertung bildete daher die Basis für eine zeiteffiziente Auswertung umfangreicher Datensätze.

Basierend auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojektes: „Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Fassadenoberflächen im Stadtraum, gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) AZ: SWD-10.08.18.7-16.26“ war eines der Ziele in dem hier vorgestellten Projekt Vorbeifahrten zufälliger Fahrzeuge als Referenzschallquelle zu nutzen. Aus den Ergebnissen des vorherigen Projektes konnte eine reale, verwertbare Vorbeifahrt für die anstehenden Messungen definiert werden. Danach dauerte eine auswertbare Vorbeifahrt 4 Sekunden mit einem maximalen Pegelausschlag ( $L_{AF,max}$ ) bei 2 Sekunden. Um trotz der unterschiedlichen Fahrzeuge vergleichbare Ergebnisse aus Vorbeifahrten zu erhalten, musste eine Grundanzahl an Vorbeifahrten ausgewertet werden. Parallel zu den Mittelungspegeln über den Zeitraum einer Vorbeifahrt ( $L_{eq,Vorbeifahrt}$ ) wurden immer auch andere akustische Kennwerte wie der Mittelungspegel  $L_{eq,fließenderVerkehr}$  des fließenden Verkehrs oder maximale Schalldruckpegel einer Vorbeifahrt  $L_{AF,Max}$  mitbetrachtet (vgl. Abbildung 18).

Abbildung 18 Darstellung der aus den Messdaten gewonnenen Kennwerte zur Erfassung von Vorbeifahrten



Quelle: Yvonne Büdding

## Vorbeifahrten als Eingangsgröße

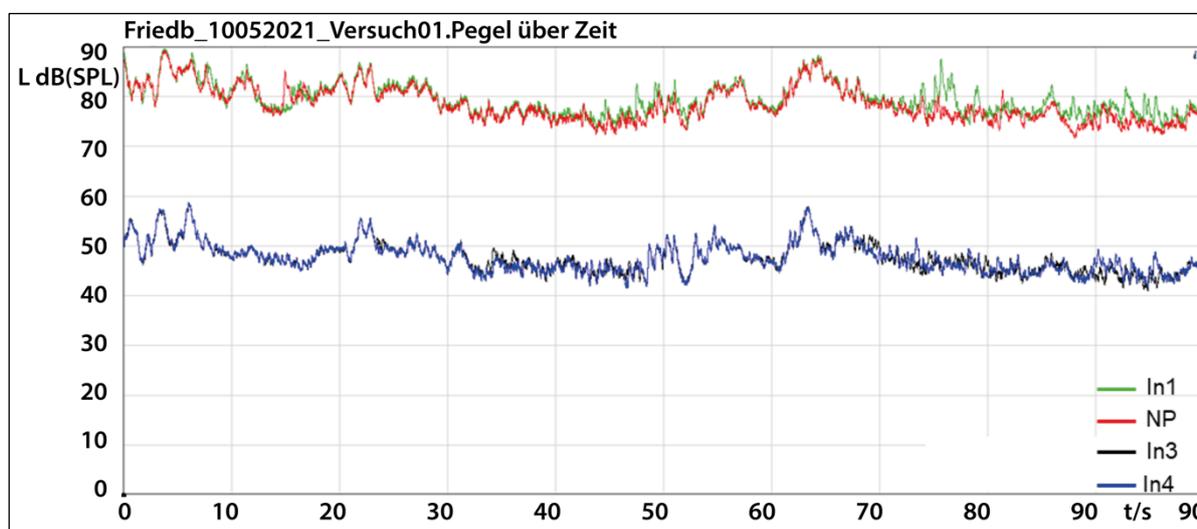
Es wurde untersucht, ob die gemäß der DIN 45642 [4] zur Messung von Verkehrsgeräuschen verwendeten Einzelereignispegel ( $L_{AF}$ ), maximale Vorbeifahrtpegel ( $L_{AF,max}$ ) oder Mittelungspegel ( $L_{eq}$ ) als Eingangsgröße für einen zukünftigen Planungsparameter genutzt werden können.

Für die Verwendung von Einzelereignispegeln und maximale Vorbeifahrtpegeln schreibt DIN 11819-1 [5] im statistischen Vorbeifahrtmessverfahren 100 Vorbeifahrten als Eingangsgröße vor. Vorangegangene Untersuchungen der Frankfurt UAS und der BASt zeigten, dass die Anzahl der Vorbeifahrten als Eingangsgröße auf zehn vergleichbare Vorbeifahrten reduziert werden kann. [9] Vergleichbare Vorbeifahrten zeichnen sich durch konstantes Fahrverhalten, sowie geringe Fremdgeräusche aus. Diese Eigenschaften können nicht zuverlässig durch einen Betrachter während der Messung festgestellt werden. Vergleichbare Vorbeifahrten wurden daher nur aus den erhobenen Messdatensätzen wie folgt ermittelt. Es wurden für Vorbeifahrten Zeitfenster von 4 s Länge betrachtet. Dies entspricht bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h einer zurückgelegten Strecke von 55,5 m. Damit liegt der betrachtete Messbereich innerhalb der Vorgaben der Norm für das statistische Vorbeifahrtmessverfahren. [5] Anhand von visuell erkannten Vorbeifahrten wurden Charakteristika der akustischen Signale von vergleichbaren Vorbeifahrten ermittelt. Diese Charakteristika wurden im Anschluss dazu genutzt, um aus den Messdatensätzen automatisiert vergleichbare Vorbeifahrten abzuleiten. Die vergleichbaren Vorbeifahrten, die als Eingangsgrößen in diese Untersuchungen eingingen, wurden händisch aus dem A-bewerteten Schalldruckpegel-Zeitverlauf des Messdatensatzes ermittelt und durch Anhören überprüft. Im Weiteren wurden die Eigenschaften von vergleichbaren Vorbeifahrten definiert. Das händische Verfahren ist jedoch extrem zeitintensiv und steht deswegen dem Ziel einer niederschwelligen Anwendung des hier vorgestellten Messverfahrens im Weg.

## Erkennung von Vorbeifahrten mittels automatisch erzeugter Markierungen im Pegel Zeitverlauf eines Messdatensatzes

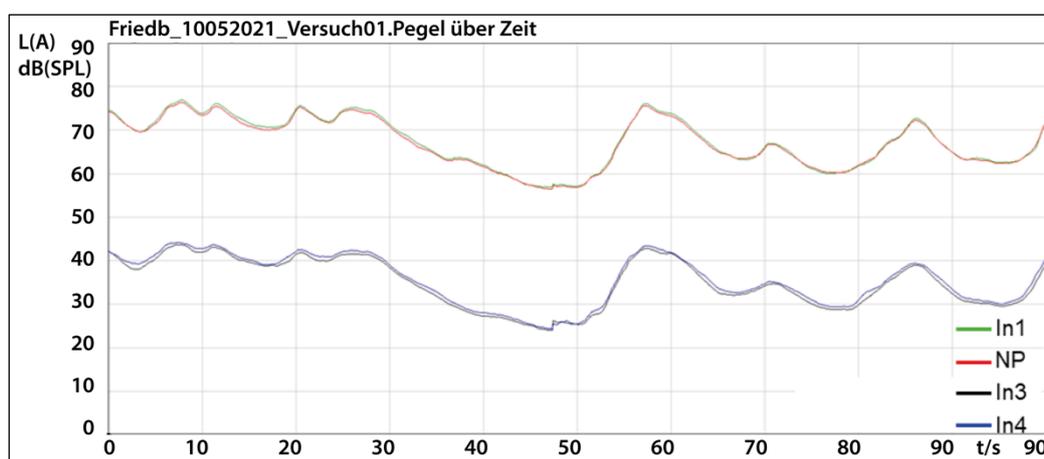
Die Auswertungsprogramme für akustische Messdatensätze der Messgerätehersteller bieten die Möglichkeit an, aufgrund definierter Schwellwerte bestimmte Punkte im Pegel-Zeit Verlauf eines Messdatensatzes zu identifizieren und zu markieren. In diesem Projekt wurde die Software ArtemiS Suite des Herstellers Head Acoustic verwendet. Um diese Auswertemöglichkeit zu testen, wurde wie folgt vorgegangen. Die Vorbeifahrtmessungen von Fahrzeugen werden zunächst als Pegel-Zeit-Verläufe ausgegeben. Die Schalldruckpegel sind zeitlich Fast-bewertet ( $L_F$ ), d.h. Pegeländerungen werden mit einer Reaktionsgeschwindigkeit von 125 ms abgebildet. Im Anschluss muss der Pegel weiterbearbeitet werden, da aus den  $L_{ZF}$ -Verläufen die Vorbeifahrten nicht klar erkennbar sind (vgl. Abbildung 19). Die  $L_{ZF}$ -Verläufe zeigen den reinen Rohdatensatz einer Messung mit linearem, so bezeichnetem Z-Filter. Es sind alle tieffrequenten Anteile unter 100 Hz und alle hochfrequenten Anteile über 8 kHz in dem Datensatz enthalten. In diesen Bereichen sind aber auch die größten Abweichungen der Messungen zueinander feststellbar, da hier sich der Einfluss von Wind oder unterschiedlicher Luftabsorption durch unterschiedliche Luftfeuchtigkeit niederschlägt. Um die Messdaten klarer lesen zu können, müssen Filter angewendet werden.

Abbildung 19 Unbewerteter Pegel-Zeit-Verlauf der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung



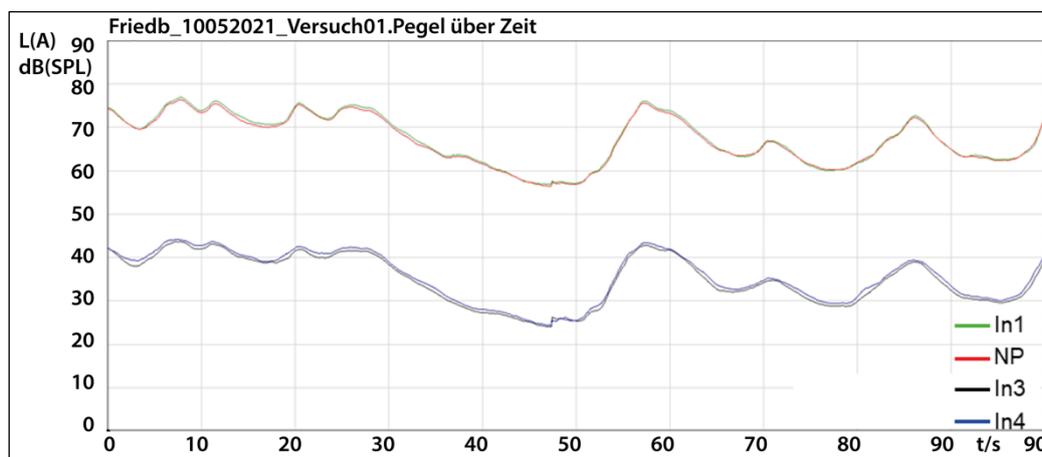
Quelle: Yvonne Büdding

Um den Graphen zu glätten, wird zunächst der A-Filter angewendet. Diese Filterung mit einer A-Bewertung stellt eine grobe Annäherung an den Frequenzumfang und die Empfindlichkeit eines durchschnittlichen menschlichen Gehörs dar. Da in diesem Projekt die Lärmimmission im Hinblick auf Menschen in Städten betrachtet wird, wird im Weiteren immer mit dem A-Filter gearbeitet. Nach Anwendung des A-bewerteten Filterns ist der Pegel Zeit Verlauf  $L_{AF}$  deutlich klarer lesbar. Es sind bereits einige Vorbeifahrten anhand von Spitzen erkennbar. (vgl. Abbildung 20).

Abbildung 20 Ergebnis Pegel Zeit Verlauf  $L_{AF(Fast)}$  mit einer Zeitbewertung Fast (125 ms) und einem A-bewerteten Filter

Quelle: Yvonne Büdding

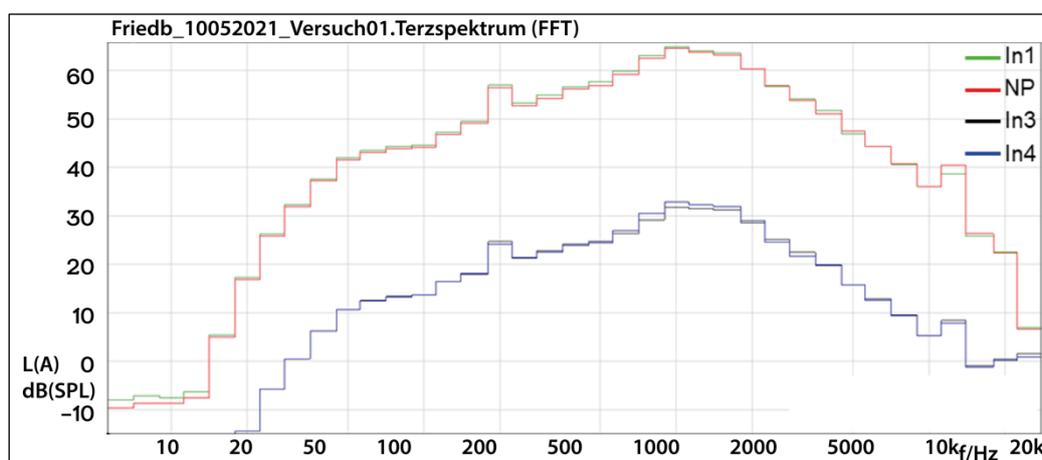
Um die Ergebnisse einzelner Vorbeifahrten noch deutlicher herauszustellen, wird im nächsten Schritt anstelle der Fast-Bewertung mit einem Zeitintervall von 125 ms die Slow-Bewertung mit einem Zeitintervall von 1 s angewendet (vgl. Abbildung 21). Da Vorbeifahrten mehrere Sekunden dauern, werden diese klar erkennbar bleiben, während kürzere Störgeräusche mit dem Graphen geglättet werden.

Abbildung 21 Ergebnis Pegel Zeit Verlauf  $L_{AS(Slow)}$  mit einer Zeitbewertung Slow (1s) und einem A-bewerteten Filter

Quelle: Yvonne Büdding

Um die Filterung weiter zu verfeinern, wurde in Betracht gezogen, dass den größten Frequenzbeitrag am Schallpegel einer Vorbeifahrt das Abrollgeräusch der Reifen auf der Straße liefert. Dieses liegt bei etwa 1000 Hz (vgl. Abbildung 22) [10].

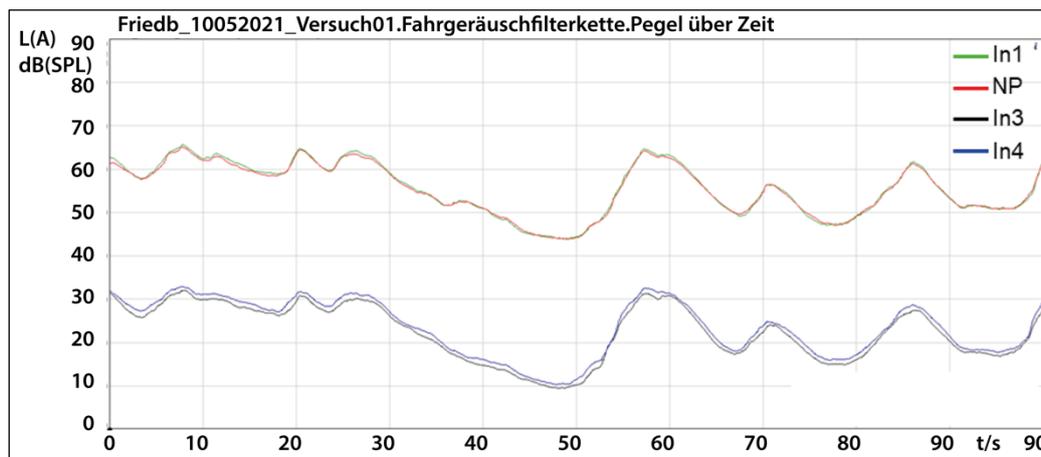
Abbildung 22 Terzspektrum mit Maximalpegel bei 1 kHz der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung



Quelle: Yvonne Büdding

Zur Filterung der Fremdgeräusche wird nun mit einem Hoch- und Tiefpass-Filter mit einem Grenzwert von 1kHz gearbeitet. So wird lediglich der Pegel der Abrollgeräusche betrachtet. Die Schalldruckpegel sind zusätzlich zeitlich Slow-bewertet ( $L_S$ ), d.h. Pegeländerungen werden mit einer Reaktionsgeschwindigkeit von 1 s abgebildet. Aus dem entstandenen  $L_S$ -Zeit-Verlauf sind einzelne Vorbeifahrten durch Spitzen klar erkennbar (vgl. Abbildung 23). Durch Anhören der jeweiligen Zeitabschnitte auf der synchron aufgenommenen Audio-Datei wird überprüft, ob es sich bei den Pegelspitzen tatsächlich um Vorbeifahrten handelt.

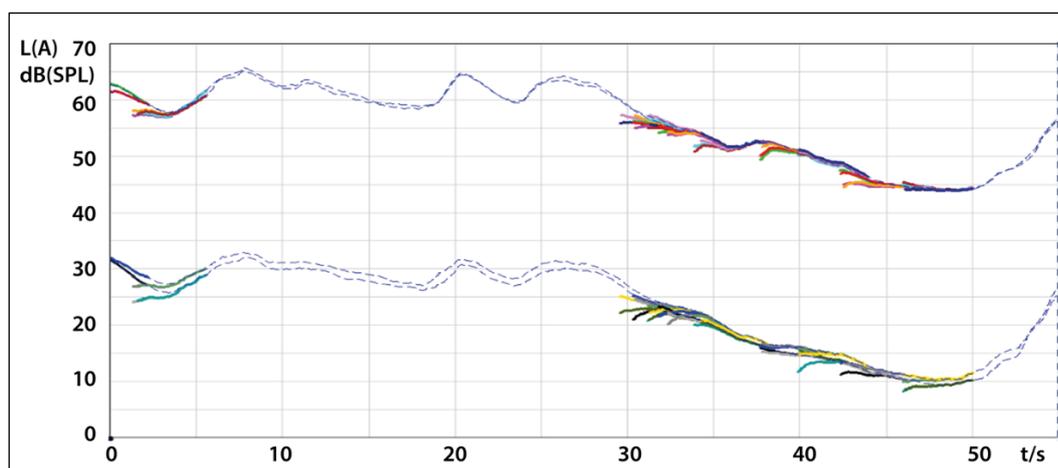
Abbildung 23 LAS-Zeit-Verlauf mit Hoch- und Tiefpassfilter mit Grenzwerten von 1 kHz der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung



Quelle: Yvonne Büdding

Im nächsten Schritt werden diese klar erkennbaren Vorbeifahrten in einzelne Messdaten-Dateien von 4 Sekunden unterteilt. ArtemiS Suite bietet dazu die Anwendung von Triggern an. Dabei wird entlang des Pegelverlaufs eines ausgewählten Kanals (hier Channel 1) nach einem Wert gesucht, der den Trigger auslöst. So kann zum Beispiel nach Schwellwerten gesucht werden. Einen weiteren Trigger stellt der Extremwert dar, d.h. lokales oder globales Maximum oder Minimum. Dabei wird der Trigger so definiert, dass eine Markierung je zwei Sekunden vor und nach dem Auslöse-Zeitpunkt erfolgt. So ergibt sich direkt die 4 Sekunden lange Vorbeifahrt. Die Software erkennt dabei aber nicht alle Maxima der einzelnen Vorbeifahrten. In Abbildung 24 sind die einzelnen Vorbeifahrten als dicke bunte Kurvenabschnitte dargestellt, während die Pegel-Zeitverläufe der verschiedenen Mikrofone als gestrichelte blaue Linien zu erkennen sind.

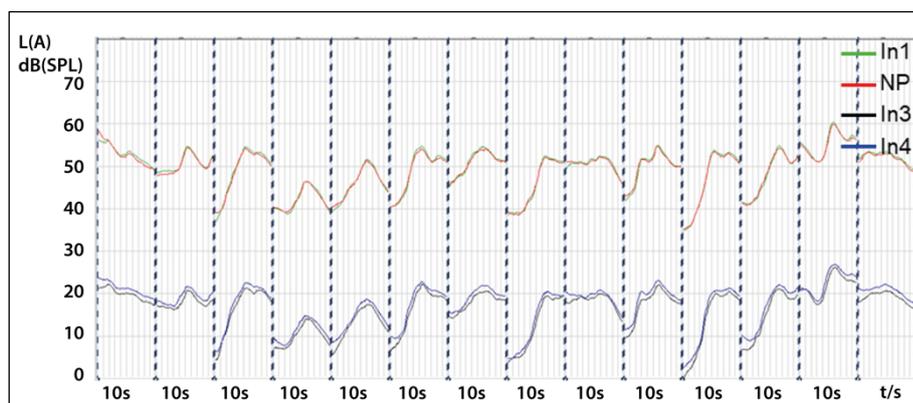
Abbildung 24 Darstellung einzelner Vorbeifahrten durch triggern lokaler Maxima im LAS-Zeit-Verlauf



Quelle: Yvonne Büdding

Daher wird im Weiteren mit den Triggern nach globalen Maxima gesucht. Dazu muss zunächst die gesamte Messung in Teilabschnitte geteilt werden. Von einer automatisierten Aufteilung in Zeitabschnitte wird dabei abgesehen und die Unterteilung händisch vorgenommen. Jedes Zeitfenster erstreckt sich  $\pm 5$  Sekunden um ein lokales Maximum (s. Abbildung 25).

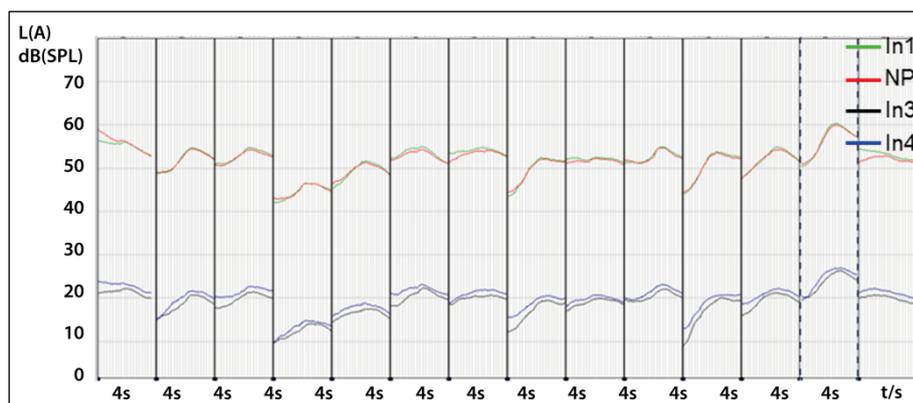
Abbildung 25 10 Sekunden-Abschnitte mit einzelnen Vorbeifahrten im LAS-Zeit-Verlauf



Quelle: Yvonne Büdding

Die einzelnen Messdaten-Dateien werden anschließend durch die Trigger nach dem globalen Maximum weiterverarbeitet. Daraus ergeben sich 4 Sekunden lange Abschnitte mit dem Pegelmaximum des Referenzmikrofons auf halber Zeit (s. Abbildung 26).

Abbildung 26 Einzelne Vorbeifahrten nach Trigger-Auswertung im LAS-Zeit-Verlauf

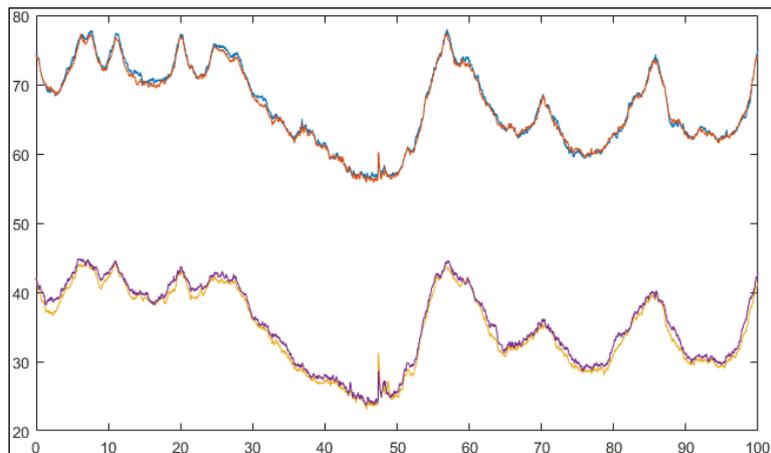


Quelle: Yvonne Büdding

Zum Abschluss der Datenerfassung und -darstellung werden die Daten der einzelnen Vorbeifahrten zur weiteren Verarbeitung im Projekt als  $L_{ZF}$ -Zeit-Verlauf (Z-Filter bedeutet ohne Frequenz-Filter) und Terzspektren in Excel-Tabellen exportiert. Dieses Verfahren stellte sich aufgrund der vielen Teilschritte und Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der globalen Maxima als sehr aufwendig heraus. Daher wurde die Anwendung dieses Verfahrens verworfen.

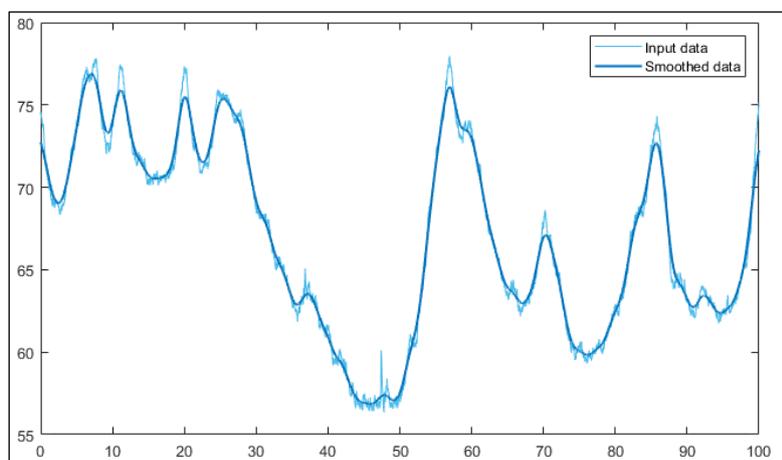
### Definition von Charakteristika für die Vergleichbarkeit von Vorbeifahrten

Für diesen Schritt wurde eine frei programmierbare Labor Software „MatLab“ angewendet. Um die Vorbeifahrten noch präziser zu erkennen, war es notwendig nicht nur die Pegelzeitverläufe, sondern auch die Pegel-Frequenzverteilung zu analysieren, um Störeinfüsse genauer zu identifizieren und ausschließen zu können. Als Eingangsgröße werden die  $L_{AF}$ -Zeit-Verläufe verwendet, die aus Rohdatensatz einer Messung mittels der Messgeräte Software ArtemiS als MatLab-Datei ausgegeben wurden. Diese Datei enthält Matrizen für die Schalldruck-Verläufe, die für den zugehörigen Zeitverlauf in Pegel umgerechnet werden (s. Abbildung 27).

**Abbildung 27 Pegel-Zeit-Verlauf in MatLab**

Quelle: Yvonne Büdding

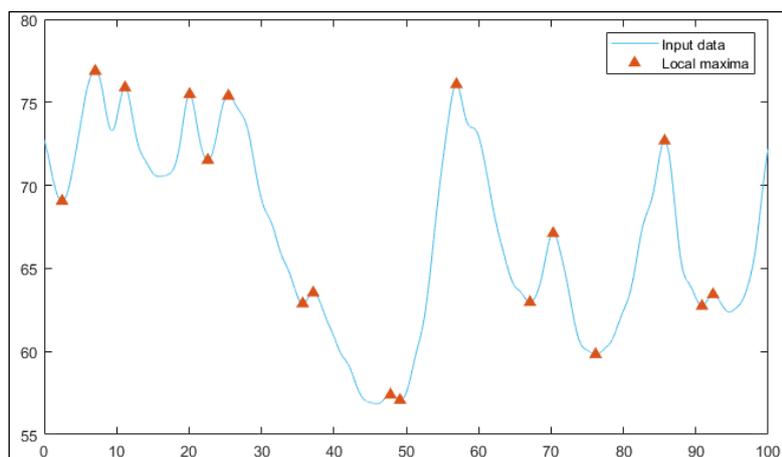
Analog zum Vorgehen bei Anwendung der Software ArtemiS Suite wird erneut der Graph geglättet, um einzelne Vorbeifahrten klarer zu erkennen. Dies ist in MatLab über den Programmblock „Smooth Data“ erreichbar. Über den Gauß-Filter mit einem Glättungsfaktor 0,05 ergibt sich für Channel 1 der in Abbildung 28 dargestellte Graph. Dieser zeigt eindeutige Pegelspitzen, die einzelnen Vorbeifahrten der Auswertung mittels ArtemiS Suite entsprechen.

**Abbildung 28 Anwendung des Gauß'schen Filters auf den Pegel-Zeit-Verlauf in MatLab**

Quelle: Yvonne Büdding

Über den Programmblock „Find Local Extrema“ werden die Zeitpunkte der lokalen Maxima hervorgehoben (vgl. Abbildung 29).

Abbildung 29 Ausgabe der lokalen Maxima in MatLab

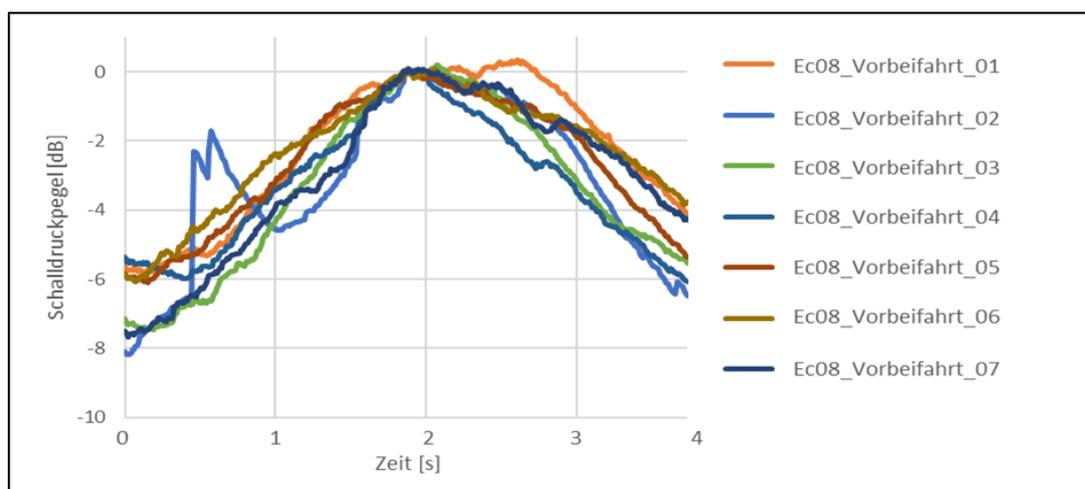


Quelle: Yvonne Büdding

### Betrachtung der Eigenschaften von vergleichbaren Vorbeifahrten

Bei Vorbeifahrten, die manuell ermittelt wurden, traten bei näherer Betrachtung Abweichungen von mehreren Dezibel zwischen den A-bewerteten Schalldruckpegel-Zeit-Verläufen von Vorbeifahrten des gleichen Messortes auf. Zudem wurden Vorbeifahrten mit starken Fremdschalleinwirkungen ausgewählt. Um die Messdaten der Vorbeifahrten besser miteinander vergleichen zu können, wurden Differenzen zwischen den Schalldruckpegeln und den Schalldruckpegel bei 2 s gebildet und in einem Diagramm aufgetragen. In Abbildung 30 sind die beschriebenen Differenz-Schalldruckpegel-Zeit-Verläufe von zehn Vorbeifahrten am Messort Ec08 (Messort in der Eschersheimer Landstraße Position 8) des straßennahen Mikrofons aufgetragen. Durch diese Darstellungsform lassen sich Unterschiede im Schalldruckpegel-Zeit-Verlauf gut erkennen. So zeigt die dritte Vorbeifahrt einen Pegelsprung bei etwa 1 Sekunde, der auf ein ausschlaggebendes Fremdgeräusch hinweist. Diese Vorbeifahrt ist aufgrund des hohen Fremdgeräuscheinflusses nicht nutzbar. Durch diese Darstellungsform kann auch sichergestellt werden, dass der Unterschied zwischen dem Pegel zu Beginn bzw. zum Ende der Vorbeifahrt eine ausreichend große Differenz zum Pegelmaximum aufweist. In der DIN 11819-1 ist diese Differenz mit mindestens 6 dB beschrieben. [5]

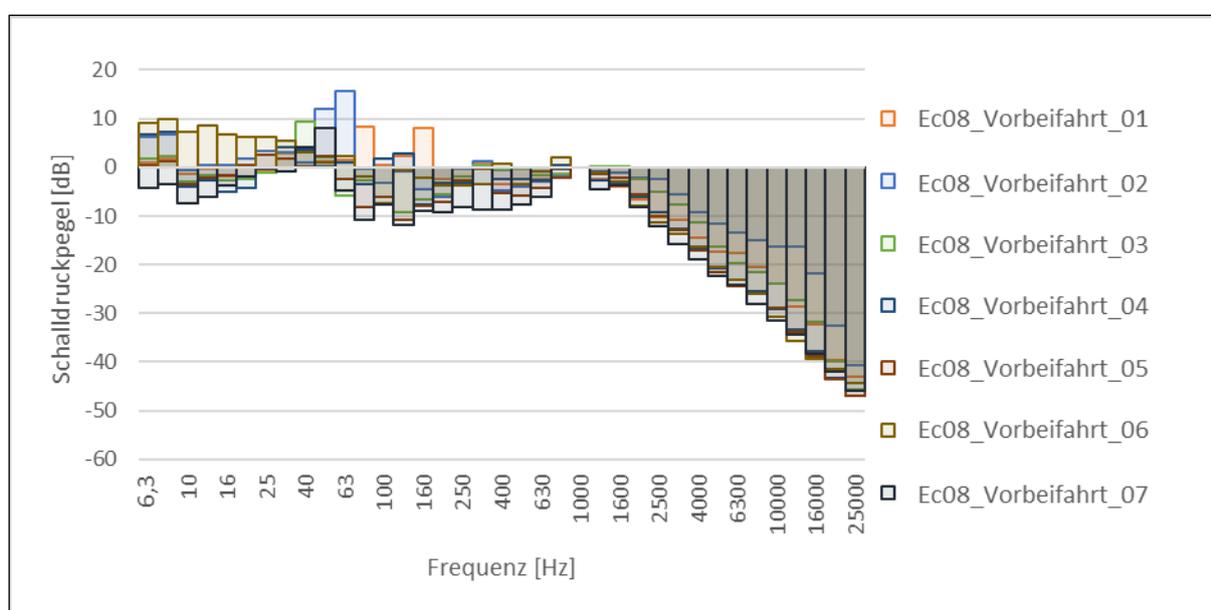
Abbildung 30 Differenz-Schalldruckpegel-Zeit-Verläufe von sieben Vorbeifahrten am Messort Ec08 des straßennahen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

Um Vorbeifahrten genauer betrachten zu können, wurden die Pegel je Frequenzband analysiert. Das Ergebnis ist ein Terzspektrum des Messsignals. Zum Vergleich der Terzspektren der Vorbeifahrten untereinander wird für jede Vorbeifahrt die Differenz zwischen den Pegeln aller Terzen zu dem der Terz von 1000 Hz gebildet. Die 1000 Hz-Terz wurde als Auswahlgrundlage gewählt, da das Reifen-Fahrbahngeräusch in dem Frequenzspektrum in dem Frequenzband um 1000 Hz eine deutliche Pegelüberhöhung aufweist. Durch die Differenzbildung sind die Unterschiede der Terzspektren der einzelnen Vorbeifahrten, wie in Abbildung 31 dargestellt, zu erkennen. Für die Vorbeifahrten eines Messortes zeigen die Terzspektren bis zu 10 dB Unterschied. Diese hohen Abweichungen sind neben Fremdgeräuschen auf die verschiedenen Fahrzeug- und Antriebstypen der Vorbeifahrten zurückzuführen, wie in den Freifeldmessungen, siehe Abschnitt „Untersuchung der Messanordnung unter Freifeldbedingungen“ dargestellt. Die größten Abweichungen zueinander zeigen sich dabei im Frequenzbereich von unter 100 Hz und von über 4000 Hz. Um zu genaueren Aussagen zu kommen und im Hinblick auf eine Anwendung im Baubereich, wie z.B. in der Norm zur Fassadenschalldämmung [11], wird im Folgenden nur noch der Frequenzbereich von 100 bis 4000 Hz betrachtet.

Abbildung 31 Differenz-Terzspektren von sieben Vorbeifahrten am Messort Ec08 des straßennahen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

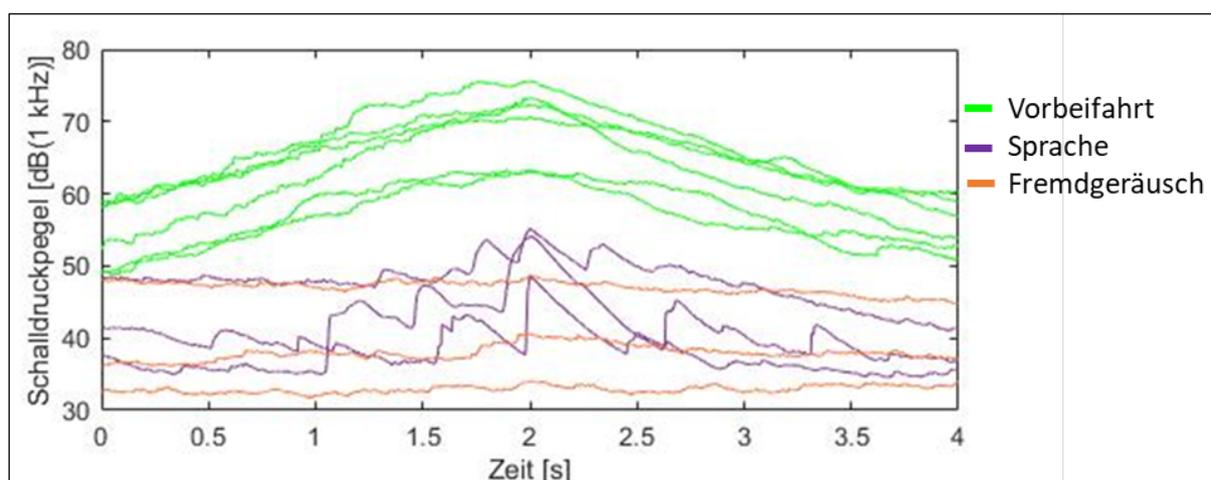
### Automatisierte Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten

Zur Verringerung des Aufwandes der Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten wurde dieser oben beschriebene Ablauf der Messdatenverarbeitung zu großen Teilen automatisiert. Für die Automatisierung der Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten wurden die oben beschriebenen Eigenschaften, die vergleichbare Vorbeifahrten von anderen akustischen Signalen abheben, genutzt. Das Programm wurde mithilfe der Software MATLAB R2021b der Math Works Inc. realisiert.

Um innerhalb einer Software die gesamte automatisierte Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten durchzuführen, wurde als Eingangsgröße das allgemein verfügbare wave-Format definiert. Dieses Format bietet sich durch die Kompatibilität mit der MatLab-Software an und dadurch, dass Audiodaten mit hoher Abtastrate und Auflösung in diesem Format gespeichert werden können. Zu Beginn des Programmes müssen Parameter, wie der Dateiname und die Kanalnummer des straßennahen Mikrofons angepasst werden. Nach

Anpassung der Parameter werden über den Baustein „audioread“ die Audiodaten ausgelesen. Aus den Audiodaten wird mithilfe des Bausteins „SPL-Meter“ der Pegel-Zeit-Verlauf der 1000-Hz-Terz des straßennahen Mikrofons gezogen, der als Grundlage der Erkennung von Vorbeifahrten dient. Die Daten des straßennahen Mikrofons werden betrachtet, da diese Messposition durch die Nähe zur Schallquelle Straßenverkehr und der Entfernung von Reflexionsflächen wie Fassaden die Schallquelle mit geringen Störfaktoren aufzeichnet. Die Pegel der 1000 Hz Terz wurden gewählt, da sich Vorbeifahrten durch Pegelspitzen in diesem Frequenzbereich auszeichnen. Der Pegel-Zeit-Verlauf wird geglättet, damit die anschließende Suche nach lokalen Maxima optimiert wird. Für die Glättung wurde ein bewegter Mittelwert gewählt. Es werden die Zeitpunkte ausgegeben, zu denen sich lokale Maxima im Pegel-Zeit-Verlauf ergeben, die eine Prominenz von 0,2 haben. Für die jeweiligen Zeitpunkte werden die unbearbeiteten 1kHz-Pegel-Zeitverläufe von 4 s mit dem Zeitpunkt des lokalen Maximums bei 2 s darauf hin untersucht, ob das betrachtete lokale Maximum zugleich das globale Maximum innerhalb der 4 s ist. Stimmen lokales und globales Maximum überein, handelt es sich höchstwahrscheinlich um eine einzelne Vorbeifahrt. Stimmen sie nicht überein, handelt es sich bei dem betrachteten Signal nicht um eine einzelne Vorbeifahrt. Treten mehrere lokale Maxima in kurzer Zeit auf, handelt es sich häufig um Fremdgeräusche, wie Gespräche, Baustellenlärm, oder weitere Vorbeifahrten, auch die des Gegenverkehrs (vgl. Abbildung 32). Ist der Pegel-Zeit-Verlauf flach, so sind die betrachteten akustischen Signale meist Fremdgeräusche, wie beispielsweise Laubrascheln. Der Gegenverkehr als Fremdschallquelle spielt nur eine Rolle, wenn er ungleichzeitig auf das Maximum bezogen zur mikrofonnahen Vorbeifahrt ist. Dadurch verändert sich der Kurvenverlauf dahingehend, dass keine eindeutig erkannte Vorbeifahrt erkannt wird. Im Falle eines zeitgleichen Maximums von gegenläufigen Vorbeifahrten erhöht sich der gemessene Pegel an beiden Mikrofonpositionen und das Ereignis wird als gültige Vorbeifahrt erkannt.

**Abbildung 32** Pegel-Zeit-Verläufe der 1 kHz Terz der automatisiert erkannten akustischen Signale durch Filterung lokaler Maxima

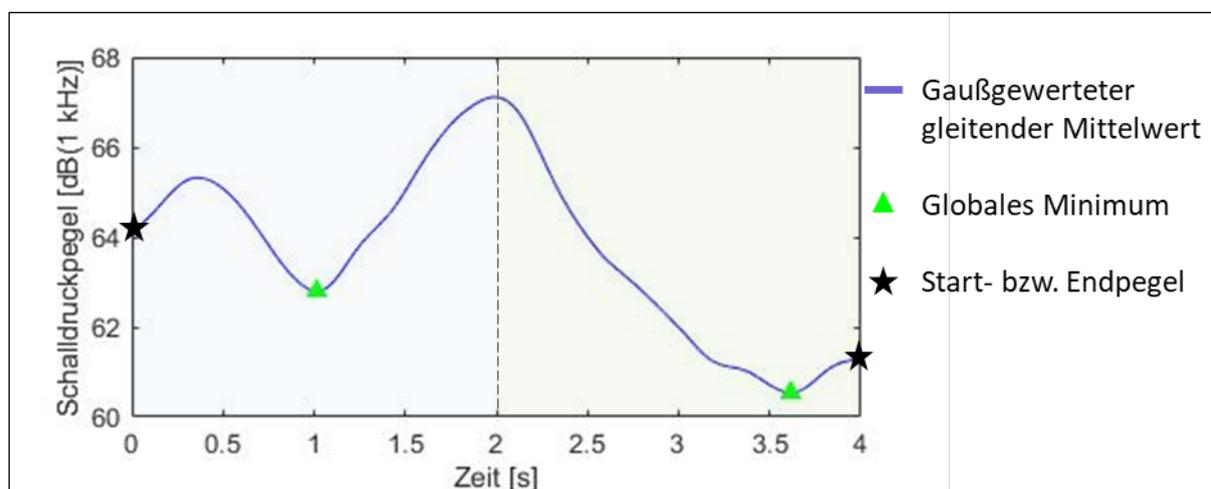


Quelle: Yvonne Büdding

Um sicherzustellen, dass es sich bei den betrachteten akustischen Signalen um vergleichbare Vorbeifahrten handelt, wurden drei Filter entwickelt. Dazu wurden jeweils die Pegel-Zeit-Verläufe der 1kHz-Terz für den Zeitraum von 2 s vor und nach dem lokalen Maximum betrachtet. Die 1kHz-Pegel-Zeit-Verläufe wurden über einen Gauß'schen gleitenden Mittelwert geglättet. Der erste Filter prüft, ob eine signifikante Pegeldifferenz vorliegt und wirft Pegel-Zeit-Verläufe mit flachem Verlauf aus. Liegt eine Pegeldifferenz von über 1 dB zwischen dem maximalen Pegel und dem Pegel bei 0 bzw. 4 s vor, so handelt es sich um eine signifikante Pegeldifferenz und das akustische Signal wird weiter betrachtet. Das statistische Vorbeifahrtmessverfahren [5] schreibt eine Pegeldifferenz von 6 dB vor. Da hier anstelle eines breiten Frequenzbereiches lediglich eine Terz betrachtet wird, wird der hier angewandte Schwellwert von 1 dB empirisch aus den Daten von zehn innerstädtischen Messungen ermittelt. Die akustischen Signale mit signifikanter Pegeldifferenz durchlaufen im Anschluss den zweiten Filter. Der zweite Filter untersucht den geglätteten 1 kHz-Pegel-Zeitverlauf auf

weitere signifikante lokale Maxima, die eine minimale Prominenz von mindestens 0,1 aufweisen. Treten innerhalb des betrachteten Zeitraumes mehr als ein signifikantes lokales Maximum auf, so handelt es sich bei dem akustischen Signal nicht um eine einzelne Vorbeifahrt und das akustische Signal wird verworfen. Der dritte Filter prüft, ob der 1 kHz-Pegel-Zeit-Verlauf zu Beginn oder Ende auf weitere Pegelanstiege hinweist (vgl. Abbildung 33). Dazu werden jeweils für die erste und zweite Hälfte des akustischen Signals die globalen Pegelminima ermittelt. Ein signifikanter Pegelanstieg liegt vor, wenn die Pegeldifferenz zwischen dem Start-Pegel bei 0 Sekunden und dem ersten globalen Minimum oder dem End-Pegel bei 4 s und dem zweiten globalen Minimum mehr als 1 dB beträgt. Im Fall eines signifikanten Pegelanstieges liegt zu Beginn oder Ende der Vorbeifahrt ein Fremdgeräusch vor und die Vorbeifahrt ist nicht vergleichbar.

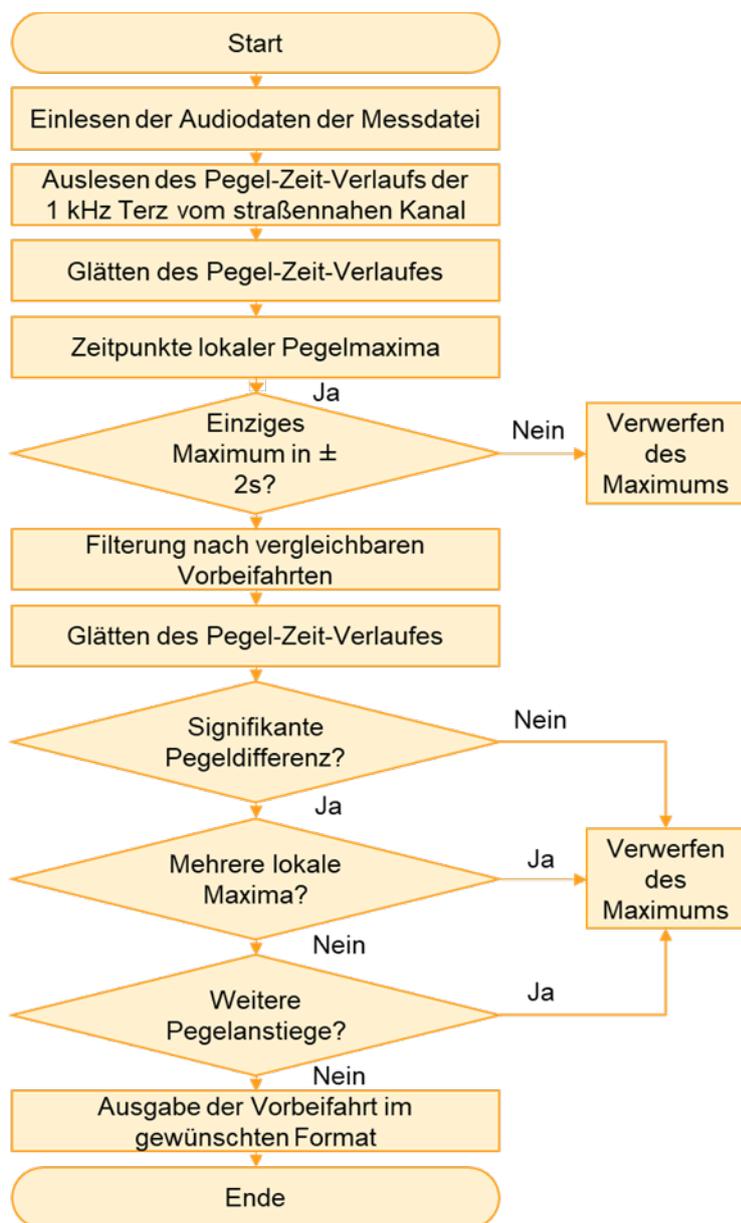
**Abbildung 33** Darstellung der benötigten Größen zur Filterung nach signifikanten Pegelanstiegen im Pegel-Zeit-Verlauf eines akustischen Signals



Quelle: Yvonne Büdding

Nach der erfolgreichen Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten werden diese im gewünschten Format wie z.B. wave-Format ausgegeben. Neben Audiodateien im wave-Format können direkt die Pegel-Zeit-Verläufe und Terzspektren ausgegeben werden. Abbildung 34 zeigt den Ablaufplan des Programmes.

Abbildung 34 Ablaufdiagramm der automatisierten Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten



Quelle: Yvonne Büdding

Die Zuverlässigkeit der automatisierten Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten wurde getestet, indem die Messdaten von 57 Messungen in der innerstädtischen Messkampagne von 2021 in das Programm eingelesen und die ausgegebenen Vorbeifahrten durch Anhören und durch Sichtung der Pegel-Zeit-Verläufe auf ihre Vergleichbarkeit untersucht wurden. Insgesamt wurden dabei 466 Vorbeifahrten erkannt, von denen 79,2 % vergleichbar waren. Trotz der hohen Zuverlässigkeit ist demnach eine anschließende manuelle Überprüfung der ausgegebenen Daten notwendig.

Durch die Automatisierung der Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten konnte der zeitliche Aufwand für die Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten um 90 % gesenkt werden. Diese Zeitersparnis ist darauf zurückzuführen, dass die Datenbereitstellung und das Erkennen der Vorbeifahrten automatisiert ablaufen und

lediglich die Anpassung der Eingangsparameter und die abschließende Kontrolle der ausgegebenen Vorbeifahrten manuell erfolgen müssen.

Durch die Aufwandsersparnis und die einfache Handhabung des erstellten Programmes wird die Ermittlung eines auf vergleichbaren Vorbeifahrten basierenden Planungsparameters erleichtert, was wiederum zu einer simplen Anwendung und guten Etablierungschance des Planungsparameters führt.

## Entwicklung des akustischen Planungsparameters

Nach der Aufbereitung der Messdatensätze der Feldmessungen stehen als Eingangsgröße die maximalen Vorbeifahrtpegel ( $L_{AF,max}$ ) und Mittelungspegel gemittelt über zehn Vorbeifahrten oder 10 min fließenden Verkehr ( $L_{eq,Vorbeifahrt}$  und  $L_{eq,fließenderVerkehr}$ ), sowie zusätzlich Terzspektren der Vorbeifahrten und des laufenden Verkehrs bereit. Der betrachtete Frequenzbereich der Eingangsgrößen reicht stets von 100 bis 4000 Hz. Diese Daten bilden die Grundlage für die Bestimmung der gesuchten Parameter zur Bewertung urbaner akustischer Qualitäten. Sie basiert auf der grundlegenden Idee, die Differenz zwischen straßennaher und straßenferner Lärmmessung zu nutzen. Zur Bewertung der akustischen Qualität des städtischen Raumes wurden verschiedene Ansätze zur Berechnung des Parameters betrachtet, wie der äquivalente Dauerschallpegel, die Steigung der Terzen innerhalb des Frequenzspektrums, NDSI-Index, Faltung und Impulsantwort (vgl. Tabelle 4). Zudem wurde auch untersucht, ob Kenngrößen der Psychoakustik Aufschluss über die akustische Qualität des städtischen Raumes geben können. Psychoakustische Kennwerte können über Schallpegelwerte hinaus die spezifischen Eigenschaften von Schallereignissen viel detaillierter darstellen. Im Rahmen der Auswertungen wurden die psychoakustischen Parameter Lautheit und Schärfe auf ihre Aussagekraft untersucht, ob sie in der Lage sind urbane Räume akustisch zu charakterisieren.

Tabelle 4 Betrachtete Ansätze zur Entwicklung eines Planungsparameters

Ansatz zur Entwicklung des Planungsparameters
Äquivalenter Dauerschallpegel
Steigung der Terzen innerhalb des Frequenzspektrums
NDSI-Index
Faltung
Impulsantwort
Lautheit
Schärfe

Um die aus den verschiedenen Ansätzen gebildeten Parameter hinsichtlich ihrer Stimmigkeit zu untersuchen, wurden alle Messdatensätze, außer den nach Abbildung 17 ausgeschlossenen herangezogen. Um im folgenden die Charakterisierung von akustischen Qualitäten bewerten zu können wurde eine akustische Qualität im städtischen Raum definiert. In Abhängigkeit zu den umgebenden Flächen eines urbanen Ortes im Hinblick auf die Reflexionsfähigkeit und damit einhergehenden Pegelerhöhungen durch Mehrfachreflexionen wurde eine rein begriffliche Bewertung definiert. Orte mit größtenteils absorbierenden Oberflächen wie Wald, Wiese oder Büschen wurden als hohe urbane akustische Qualität definiert. Die akustische Qualität von Orten mit einem hohen Anteil von reflektierenden schallharten Flächen, wie etwa

Glasfassaden, Asphaltoberflächen oder glatten Betonwänden wurden als niedrige urbane akustische Qualität definiert. Die Beobachtung während der Messungen zeigte, dass städtische Räume von hoher urbaner akustischer Qualität Räume sind, in denen sich Menschen gerne länger aufhalten. Hohe urbane akustische Qualität tritt beispielsweise an Messorten auf, die aufgrund der fehlenden Fassaden und des absorbierenden Untergrundes wenig Schallreflexionen aufweisen. Messorte mit mäßiger akustischer Qualität hingegen weisen viele reflektierende Flächen und einen kleinen straßenfernen Raum auf. Das geht einher mit geringer Aufenthaltsqualität und Verweildauer der Passanten. Zur Visualisierung und Erklärung im Folgenden wurden ganz verschiedene, aber in der Ausprägung und damit auch Bewertung klare städtebaulichen Qualitäten herangezogen. Es wurden Datensätze verwendet, die Orte hohe, mittlere oder geringe Qualität aufweisen. Zum weiteren Vergleich wurden je zwei Messorte mit guter und mittlerer akustischer Qualität und ein Messort mit geringer akustischer Qualität betrachtet. Daran lässt sich ablesen, inwiefern die Kennwerte die urbane akustische Qualität des städtischen Raumes widerspiegeln. Zu beachten ist, dass die Abstände zwischen straßennahem und straßenfernen Mikrofon variieren (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5 Informationen zu den Messorten, deren Daten zur Veranschaulichung von potenziellen Parameteransätzen genutzt wurden**

Benennung	Akustische Qualität	Messort	Mikrofonabstand [m]
<b>Gut1</b>	Hohe Messortqualität	Mo_01	10
<b>Gut2</b>	Hohe Messortqualität	Mo_02	10
<b>Mittel1</b>	Mittlere Messortqualität	Fr_15	5
<b>Mittel2</b>	Mittlere Messortqualität	De_04	10
<b>Mäßig</b>	Mäßige Messortqualität	Mo_05	5

### Steigungsbetrachtung und Faltungsoperationen als Grundlage der Parameterbildung

Weder die Steigung der Pegelwerte der Terzen innerhalb des Frequenzspektrums noch eine Faltungsoperation der Datensätze von straßennahem zu straßenfernen Mikrofon lieferten Ergebnisse, die einen eindeutigen Rückschluss auf die akustische Qualität der Messorte zuließen.

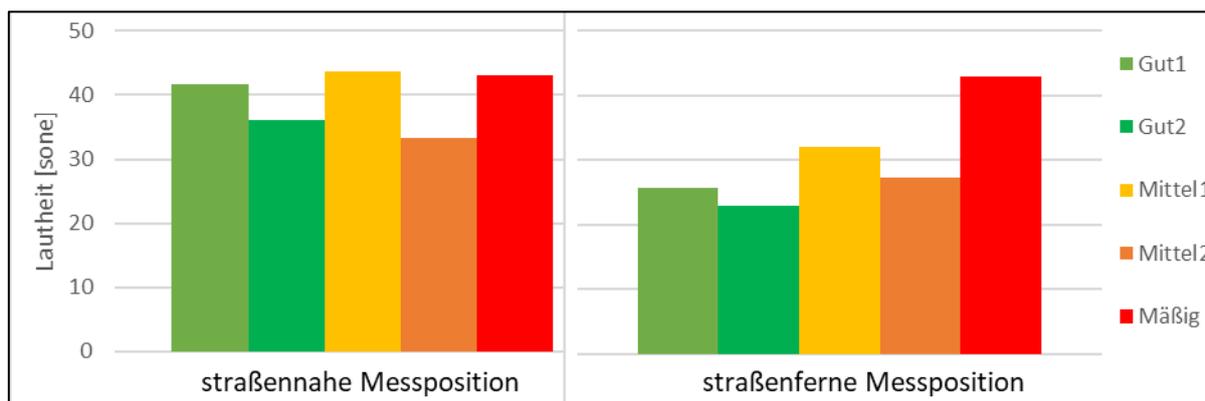
### Impulsantworten als Grundlage der Parameterbildung

Die Impulsantwort sollte auf Basis der maximalen Vorbeifahrtpegel berechnet werden, sodass die Vorbeifahrt als Schallimpuls diene. Es stellte sich heraus, dass die Vorbeifahrten keinen ausreichend starken Impuls darstellten, um zuverlässige Daten zu erzeugen.

### Psychoakustische Kennwerte als Grundlage der Parameterbildung

Bezüglich der Psychoakustik wurde die Lautheit und die Schärfe untersucht. Die straßenferne und straßennahe Messpositionen wiesen für die unterschiedlichen Messorte nahezu gleiche Schärfewerte auf. Bei Betrachtung der Lautheit stellte sich heraus, dass je höher die Differenz der Lautheit vom straßennahen zum straßenfernen Mikrofon war, desto höher war auch die akustische Qualität des Messortes. Die Lautheiten der einzelnen Messpositionen hingegen ließen keinen Rückschluss auf die Qualität des Messortes zu (vgl. Abbildung 35).

Abbildung 35 Lautheit des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons

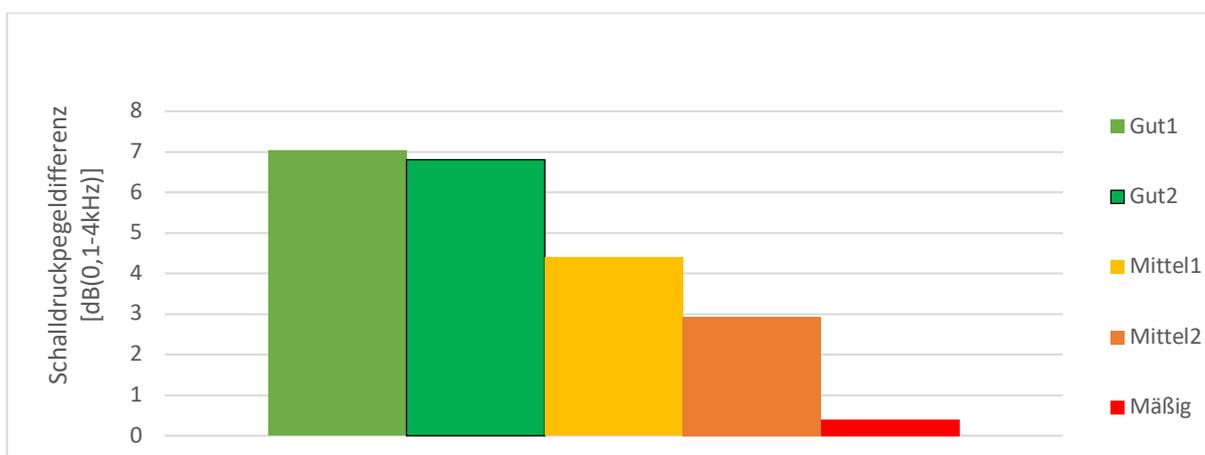


Quelle: Yvonne Büdding

### Äquivalente Dauerschallpegel als Grundlage der Parameterbildung

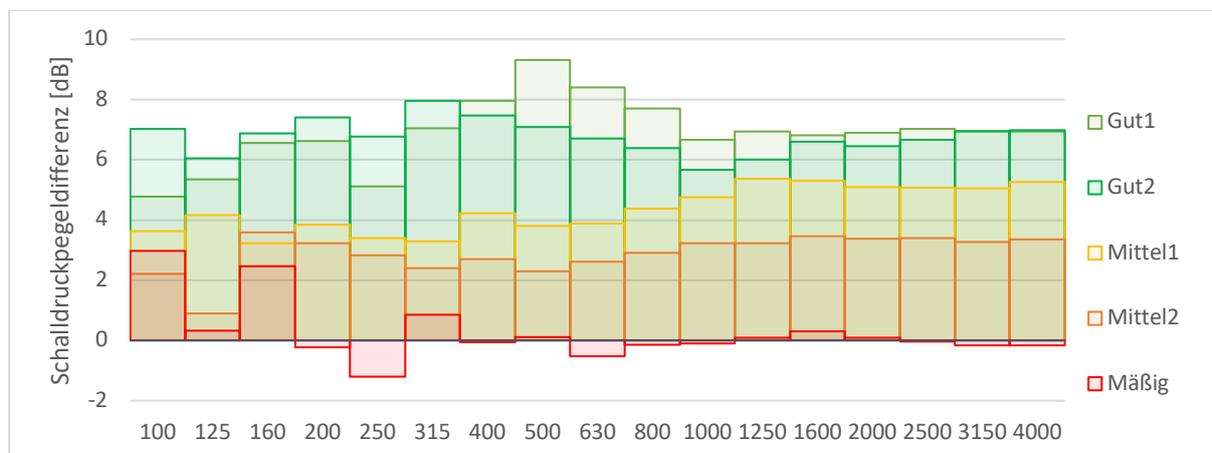
Zunächst wurde der äquivalente Dauerschallpegel ( $L_{eq}$ ) über den gesamten Messzeitraum für jeden der fünf Messwerte herangezogen. Durch diese Betrachtung wird anstelle von einzelnen Vorbeifahrten der fließende Verkehr betrachtet. Abbildung 36 zeigt die Pegeldifferenzen zwischen dem straßennahen Mikrophon und dem straßenfernen Mikrophon. Es ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der akustischen Qualität des Raumes und der Pegeldifferenz zu erkennen: Je höher die Pegeldifferenz, desto besser die akustische Qualität des Raumes. Auch die Betrachtung der einzelnen Terzen in Abbildung 37 zeigt diesen Effekt. Eine Ausnahme bildet die 100 Hz Terz, bei der die Pegeldifferenz vom Messort mit der geringsten Qualität größer ist als die eines Messortes mit mittlerer Qualität.

Abbildung 36 Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

**Abbildung 37** Differenz-Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

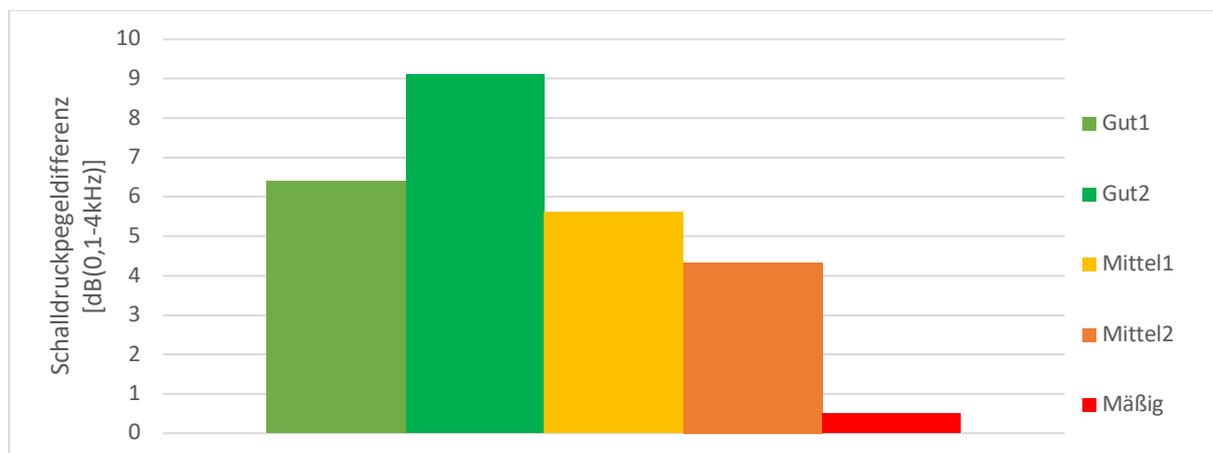
Es zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen dem erwarteten Messwert nach der akustischen Qualität des Raumes und den Differenzen der äquivalenten Dauerschallpegel.

Zur Nutzung von Vorbeifahrten als Eingangsgröße werden Mittelwerte aus zehn vergleichbaren Vorbeifahrten pro Messort gebildet. Betrachtet werden zum einen die äquivalenten Dauerschallpegel über die 4 s jeder Vorbeifahrt und zum anderen die maximalen Pegel der Vorbeifahrten. Damit ergeben sich die in

Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellten Pegeldifferenzen zwischen dem straßennahen und dem straßenfernen Mikrophon. Es ist sowohl bei den Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel als auch der Pegelmaxima zwischen der akustischen Qualität des Raumes und den Pegeldifferenzen der Vorbeifahrten zu erkennen. Bei Betrachtung der Pegeldifferenzen pro Terz zeigt sich dieser Zusammenhang ebenfalls. Eine Ausnahme bilden vereinzelt Terzen im Frequenzbereich unterhalb von 200 Hz (vgl. Abbildung 40).

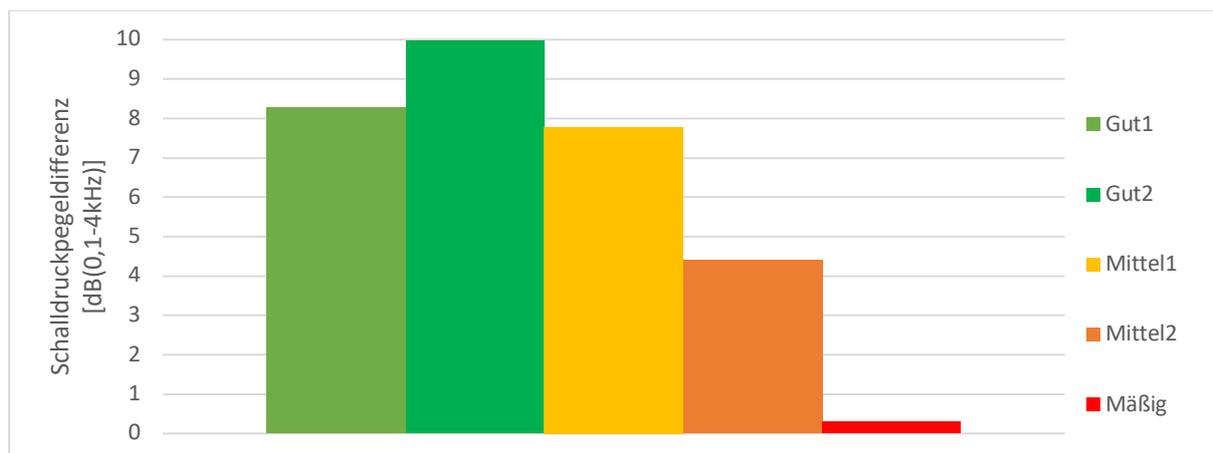
Im Vergleich zum äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs ist die Übereinstimmung mit der akustischen Qualität des Raumes für die Daten der Vorbeifahrten geringer. Aufgrund der nahezu akustischen Umgebung bei den Messorten Gut1 und Gut2, werden nahezu gleiche Parameterwerte für diese Messorte erwartet. Bei der Nutzung von vergleichbaren Vorbeifahrten tritt eine Differenz von über 0,1 zwischen den Parameterwerten der Messorte auf. Dahingegen zeigen die Parameterwerte mit dem konstanten Verkehr als Eingangsgröße für die Messorte Gut1 und Gut2 nahezu gleiche Werte auf, was die Ähnliche akustische Qualität der Messorte bestätigt.

Abbildung 38 Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel der Mittelwerte über zehn vergleichbare Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons



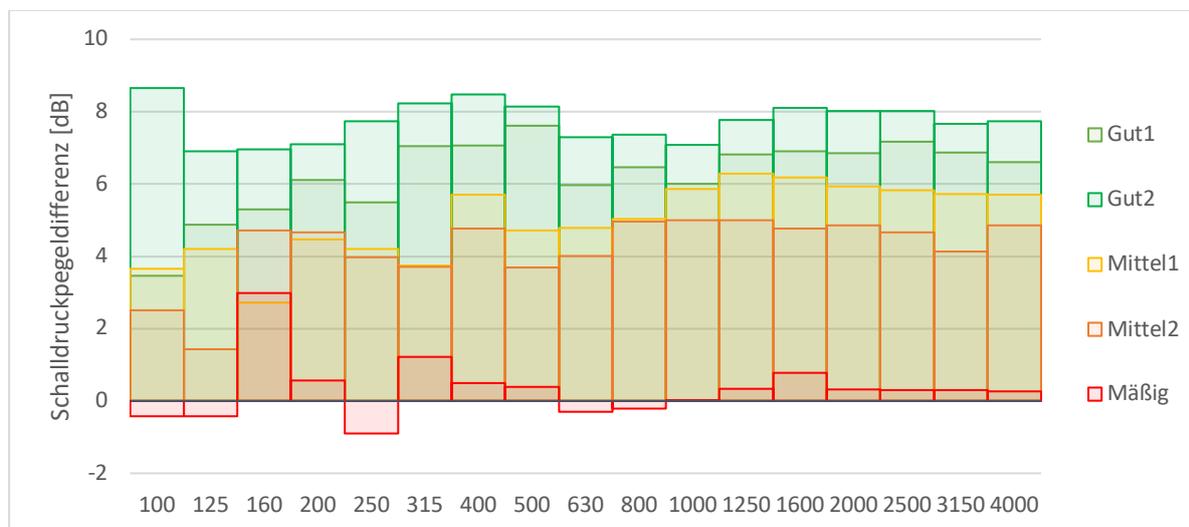
Quelle: Yvonne Büdding

Abbildung 39 Pegeldifferenzen des Mittelwertes über zehn Maximalpegel vergleichbarer Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

**Abbildung 40** Differenz-Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel von Mittelwerten über zehn vergleichbare Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons



Quelle: Yvonne Büdding

## NDSI-Index als Grundlage der Parameterbildung

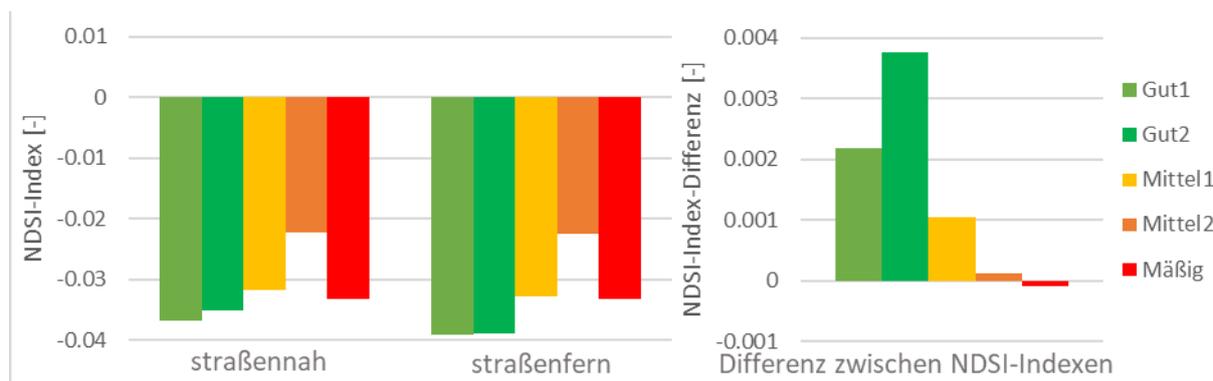
Als weiteren Ansatz wurde der NDSI-Index herangezogen. [12] Es werden zwei Frequenzbereiche betrachtet: zum einen der Bereich von 1 bis 2 kHz, in dem verstärkt anthropone, d.h. künstliche, Signale auftreten, zum anderen der Frequenzbereich von 2 bis 8 kHz, mit verstärkt biophonen, d.h. natürlichen, Signalen. Der Index NDSI beschreibt das Verhältnis zwischen dem Schalldruckpegel des anthroponen ( $L_{\alpha}$ ) und dem des biophonen Frequenzbereiches ( $L_{\beta}$ ). Der Index NDSI wird über folgende Formel berechnet:

$$NDSI = \frac{L_{\beta} - L_{\alpha}}{L_{\beta} + L_{\alpha}}$$

Durch den Index soll das Verhältnis von auftretenden Schallquellen zu den Schallsignalen, die durch Menschen künstlich erzeugt werden, dargestellt werden. Der NDSI-Index kann Werte von -1 bis 1 annehmen. Negative Werte beschreiben einen höheren Anteil an anthroponen gegenüber biophonen Anteilen. Bei den hier betrachteten Messungen wird als Eingangssignal eine anthropone Quelle genutzt und im städtischen Raum ist zu erwarten, dass der anthropone Anteil höher als der biophone Anteil ist. Im Folgenden wird demnach die Einteilung des betrachteten Frequenzbereichs an die innerstädtische Situation angepasst.

Als Eingangsdaten wurden zunächst die äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs genutzt. Die NDSI-Indexe sind für alle Messorte und Kanäle negativ, mit Werten zwischen -0,04 und -0,02. Weder bei den NDSI-Indexen für die einzelnen Messpositionen noch bei den Differenzen der NDSI-Indexe von straßennaher und straßenferner Mikrofonsposition ist ein Zusammenhang zwischen der akustischen Qualität des Raumes und den NDSI-Indexen zu erkennen (vgl. Abbildung 41). Der größte Unterschied liegt bei den NDSI-Indexen von Mo01 und Mo02 vor, die zugleich eine fast identische akustische Qualität aufweisen. Zudem herrscht der geringste Unterschied zwischen den NDSI-Indexen des zweiten Messortes mit mittlerer akustischer Qualität und dem der geringsten akustischen Qualität.

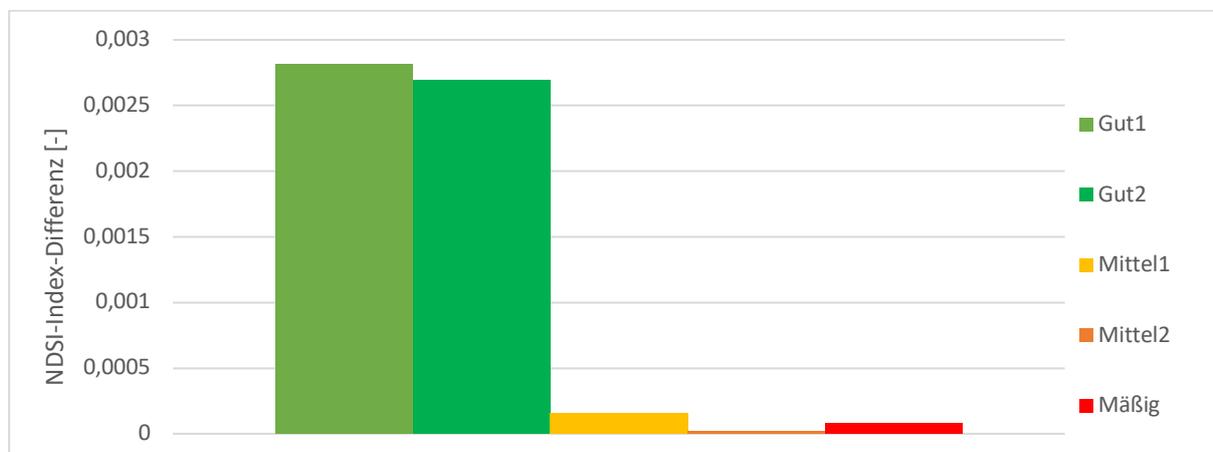
Abbildung 41 NDSI-Indexe berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs



Quelle: Yvonne Büdding

Werden als Eingangsdaten die Mittelwerte der äquivalenten Dauerschallpegel von zehn vergleichbaren Vorbeifahrten pro Messort genutzt, treten für jeden Messort und jeden Kanal negative NDSI-Indexe im Bereich von -0,035 und -0,02 auf. Die errechneten Differenzen zwischen den NDSI-Indizes der verschiedenen Mikrofonpositionen zeigen keinen Zusammenhang zu der akustischen Qualität des Raumes. Zwar sind die Messorte mit höchster akustischer Qualität auch die mit den höchsten NDSI-Indizes, jedoch zeigen die Messorte mit mittlerer und geringer akustischer Qualität keinen Zusammenhang zum NDSI-Index (vgl. Abbildung 42).

Abbildung 42 NDSI-Indexe berechnet aus den Mittelwerten der äquivalenten Dauerschallpegeln von zehn Vorbeifahrten pro Messort



Quelle: Yvonne Büdding

Durch die Betrachtung des Straßenverkehrs als anthropone Schallquelle, wurde getestet, ob eine andere Teilung des Frequenzspektrum zu aussagekräftigeren Ergebnissen führen kann. Es wurde ein alpha-Frequenzbereich von 100 bis 1250 Hz und ein beta-Frequenzbereich von 1250 bis 4000 Hz definiert. Die Frequenzbereiche decken so den gesamten Frequenzbereich ab, indem sich Vorbeifahrten vergleichbar verhalten. Die Schnittstelle zwischen den Frequenzbereichen wurde so gewählt, dass das prägnante Reifenabrollgeräusch im alpha-Frequenzbereich liegt. Die Ergebnisse zeigen keinen Zusammenhang zu der akustischen Qualität des Raumes.

Für die Ansprüche, die der Planungsparameter stellt, ist der NDSI-Index nicht anwendbar. Es zeigt sich kein erkennbarer Zusammenhang zwischen den berechneten NDSI-Werten und der akustischen Qualität des

Raumes. Der variierende Abstand zwischen den Messpositionen wird nicht mit einbezogen, sodass Messungen mit unterschiedlichen Abständen nicht miteinander verglichen werden können. Auch in diesem Projekt wird das Verhältnis zwischen straßennahem und straßenfermem Raum betrachtet. Als Ansatz für einen Planungsparameter könnte daher die Berechnung des Verhältnisses zwischen straßennahen und straßenfernen Messdaten gemäß der NDSI-Berechnung dienen.

## Berechnung des akustischen Planungsparameters

Für die Berechnung eines Planungsparameters aus den Messdaten eignen sich nach der vorherigen Untersuchung zwei Ansätze:

1. Differenz der äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  von straßennahen zu straßenfernen Messposition des fließenden Verkehrs,
2. Spezifische Lautheit.

Ein Verfahren, das eine Bestimmung des NDSI-Index als Eingangsgröße hat, wird im Weiteren nicht verfolgt, da die Bildung dieses Indexes eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt und einer einfachen Umsetzbarkeit im Wege steht. Zur Messung der Lautheit sind spezifische Softwarelösungen und Messgeräte notwendig, um den Parameter in der Einheit Sone zu bestimmen. Aufgrund des Zusatzaufwandes und der Schwierigkeit eine zusätzliche Einheit für Lautheit in Planungsprozesse einzuführen, wurde dieses Verfahren nicht weiterverfolgt. Im weiteren Verlauf wurde als Eingangsgröße die Differenz der äquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{eq}$ ) des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons, gemessen im fließenden Verkehr, den Untersuchungen zugrunde gelegt. Diese Variante weist durch die einfache Anwendbarkeit und Verständlichkeit Vorteile gegenüber den Varianten Lautheit und NDSI-Index auf. Bei der Entwicklung des Messaufbaus war die Einbindung des Abstandes zwischen den Messpunkten entscheidend. Durch die Einbindung des Abstandes in die Bildung des Planungsparameters sollten Messungen mit unterschiedlichen Messpositionsabständen möglich sein, sodass der Messaufbau an den jeweils vorliegenden Ort angepasst werden kann und trotzdem zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

### Erster Ansatz: $P_{refl}$

Ausgehend von der vereinfachten Annahme, dass das straßennahe Mikrofon ausschließlich den Direktschall des Straßenverkehrs und das straßenferne Mikrofon ausschließlich die Schallreflexionen durch den städtischen Raum misst, wurde folgende These aufgestellt:

Der Einfluss des städtischen Raumes auf die akustische Qualität kann analog zur Berechnung der Pegelabnahme gemäß dem Abstandsgesetz berechnet werden. Dazu wurde folgende Formel zur Berechnung des reflektierten Schalldruckpegels  $L_{refl}$  entwickelt:

$$L_{refl} = L_1 - L_2 + dL$$

$$\text{mit } dL = 20 * \log\left(\frac{s+a}{a}\right)$$

$L_{refl}$ : angenommener Schalldruckpegel der Reflexionen [dB];

$L_1$ : Schalldruckpegel des straßennahen Mikrofons [dB];

$L_2$ : Schalldruckpegel des straßenfernen Mikrofons [dB];

$dL$ : Pegeldifferenz aufgrund des Abstandes zwischen den beiden Mikrofonen [dB];

$a$ : Abstand von Mitte der Schallquelle zum straßennahen Mikrofon [m];

$s$ : Abstand zwischen den beiden Mikrofonen [m].

Der Abstand  $a$  zwischen der Schallquelle und der straßennahen Messposition wird auf 3 m festgelegt. Diese Definition basiert darauf, dass die Breite von Fahrstreifen bei Hauptstraßen zwischen 5,5 und 7,5 m vorgeschrieben ist. Innerstädtisch sind die Straßen häufig schmal, daher wird vom Minimum mit 5,5 m

ausgegangen. Die Mitte des Fahrstreifens zuzüglich eines Sicherheitsabstandes zur Fahrbahn von 0,25 m ergibt demnach einen Abstand  $a$  von 3 m. Als Beispiel wird der erste Messort in der Mörfelder Landstraße (Mo01) betrachtet, mit einem Mikrofonabstand  $s$  von 10 m und den äquivalenten Dauerschallpegeln von  $L_1 = 61,81$  dB und  $L_2 = 54,90$  dB ergibt sich damit folgende Berechnung:

$$L_{refl} = 61,81 \text{ dB} - 54,90 \text{ dB} + 13,81 \text{ dB} = 20,98 \text{ dB}$$

Als Eingangsgrößen wurden die  $L_{eq}$  des fließenden Verkehrs, sowie die  $L_{eq}$  der Vorbeifahrten und die Maximalpegel der Vorbeifahrten genutzt. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der akustischen Qualität des Raumes und den Ergebnissen festgestellt. Demnach bildet die aufgestellte These die Realität nicht ausreichend ab.

## Zweiter Ansatz: $P_{3m}$

Ein weiterer Ansatz nutzt das Abstandsgesetz, indem das Verhältnis aus der erwarteten Pegelabnahme nach dem Abstandsgesetz und der vorliegenden Pegelabnahme nach den Messdaten betrachtet wird. Durch das Abstandsgesetz lässt sich die Pegeldifferenz berechnen, die unter optimalen Freifeldbedingungen auftreten würde. Durch die Pegeldifferenz der Messdaten des straßennahen und des straßenfernen Mikrofons wird die Pegelabnahme beschrieben, die bei dem jeweiligen Messort tatsächlich auftritt. Die Pegelabnahme wird bei der in situ Messung durch den Einfluss der Fassaden und der weiteren Eigenschaften des städtischen Raumes verringert. Durch die Betrachtung des Verhältnisses aus der in situ-Pegelabnahme und der Freifeld-Pegelabnahme, lässt sich der Einfluss des städtischen Raumes auf die Pegelabnahme darstellen. Das Abstandsgesetz berechnet die Pegelabnahme  $dL$  über die zuvor genannte Formel (s. S. 49). Da der Abstand zwischen MP1 und dem Verkehr aufgrund des wechselnden städtischen Raumes und der verschiedenen Fahrspuren variiert, wird wie bei der Berechnung von  $L_{refl}$  der Abstand  $a$  auf 3 m definiert. Dieser Abstand wurde gewählt, da dies in etwa dem Abstand zwischen der Mitte der nächsten Fahrspur zum Gehweg und einem direkt an der Fahrspur aufgestellten Mikrofons entspricht.

Das Verhältnis der In situ-Pegelabnahme zur Freifeldpegelabnahme wird im Folgenden  $P_{3m}$  genannt und folgendermaßen berechnet:

$$P_{3m} = \frac{L_1 - L_2}{dL}$$

mit  $dL = 20 * \log\left(\frac{s + a}{a}\right)$

$P_{3m}$ : Parameter zur Bewertung der akustischen Qualität, basierend auf  $a=3$  m [-];

$L_1$ : Schalldruckpegel des straßennahen Mikrofons [dB];

$L_2$ : Schalldruckpegel des straßenfernen Mikrofons [dB];

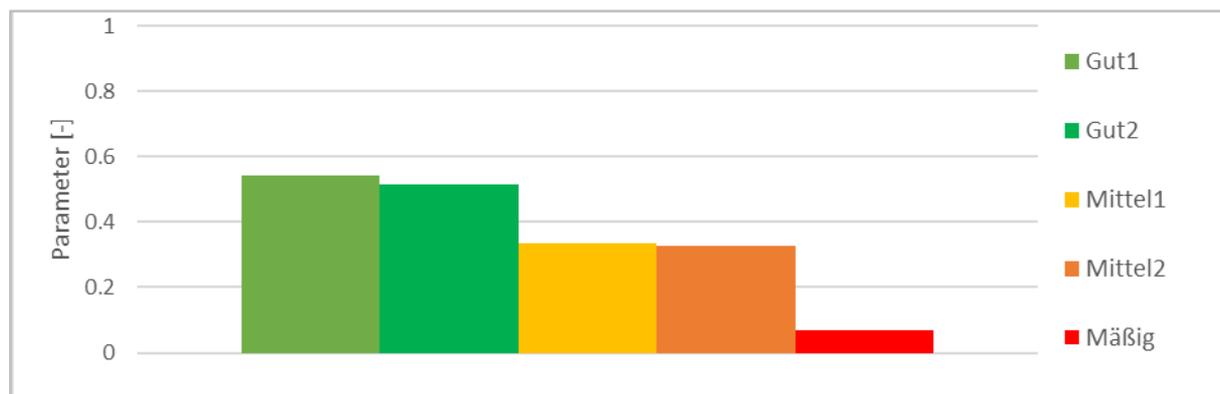
$dL$ : Pegeldifferenz aufgrund des Abstandes zwischen den beiden Mikrofonen [dB];

$a$ : Abstand von Mitte der Schallquelle zum straßennahen Mikrofon [m];

$s$ : Abstand zwischen den beiden Mikrofonen [m].

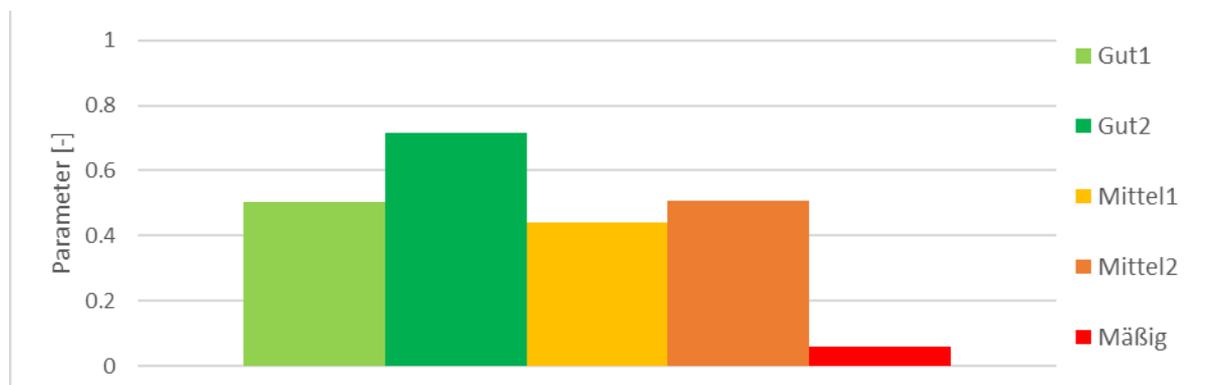
Der Parameter  $P_{3m}$ , berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs, zeigt einen eindeutigen Zusammenhang der akustischen Qualität des Raumes. Je höher der Parameter, desto höher die akustische Qualität des städtischen Raumes (vgl. Abbildung 43). Wählt man anstelle der Daten des fließenden Verkehrs die äquivalenten Dauerschallpegel von vergleichbaren Vorbeifahrten oder die Maximalpegel von vergleichbaren Vorbeifahrten, ist ebenfalls ein Zusammenhang zwischen der akustischen Qualität des Raumes und Parameterwerten zu erkennen (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 45). Die Parameterwerte spiegeln die akustische Qualität des Raumes aber nicht so eindeutig wider, wie bei Nutzung der Daten des fließenden Verkehrs. Im Folgenden werden aufgrund der valideren Ergebnisse lediglich die äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs als Eingangsdaten genutzt.

Abbildung 43 Parameter  $P_{3m}$  berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs



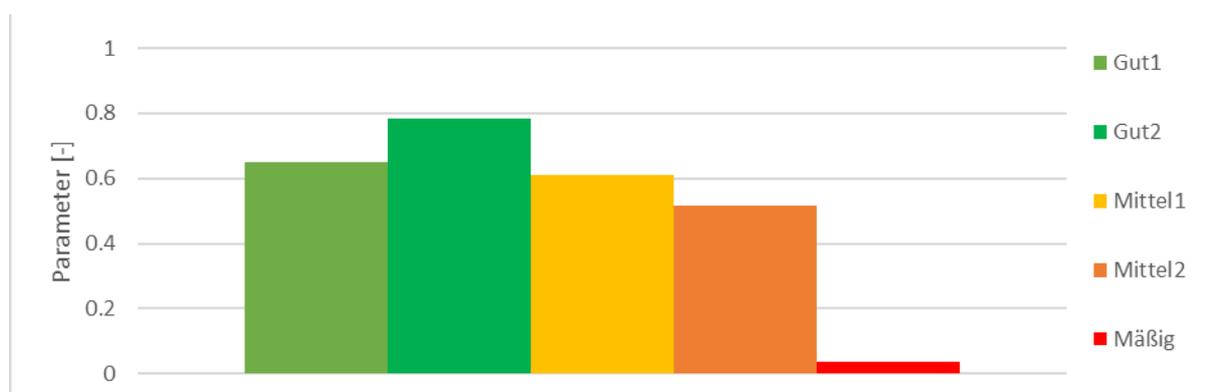
Quelle: Yvonne Büdding

Abbildung 44 Parameter  $P_{3m}$  berechnet aus den Mittelwerten äquivalenter Dauerschallpegeln von zehn vergleichbaren Vorbeifahrten



Quelle: Yvonne Büdding

Abbildung 45 Parameter  $P_{3m}$  berechnet aus den Mittelwerten der Pegelmaxima von zehn vergleichbaren Vorbeifahrten



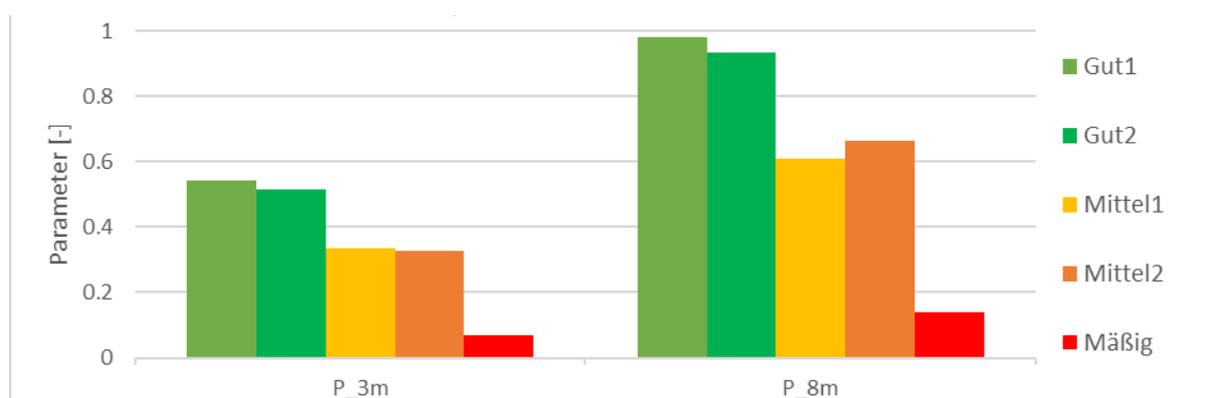
Quelle: Yvonne Büdding

Dass der Messort mit geringer akustischer Qualität einen Parameterwert nahe 0 erzielt, verdeutlicht die Aussagekraft des Parametes: Je geringer die akustische Qualität des Raumes ist, desto höher ist der Einfluss der Reflexionen, was zu einer geringen Pegelabnahme über den Abstand zur Schallquelle führt. Zu erwarten

war, dass die Parameterwerte für Messorte mit nahezu Freifeldbedingungen gegen 1 streben. Die betrachteten beiden Messorte von hoher Qualität erfüllen durch die Umgebungsbedingungen nahezu Freifeldbedingungen, weisen aber Parameterwerte für den fließenden Verkehr von etwa 0,5 auf. Das bedeutet, der Bezugswert der Freifeld-Pegelabnahme wurde zu hoch gewählt. Dies ist auf den gewählten Abstand  $a$  von 3 m zwischen der ersten Messposition und dem Verkehr zurückzuführen. Da der Verkehr von allen vorhandenen Fahrbahnen betrachtet wird und nicht ausschließlich der Verkehr der mikrofonnahen Fahrbahn, muss ein Abstand gewählt werden, der die Mitte der Schallquelle also aller Fahrbahnen beschreibt.

Um einen ersten Ausgangswert für die Pegeldifferenz aufgrund des Abstandes zwischen den beiden Mikrofonen (dL) zu erhalten, der einen normierten Parameter zwischen 0 und 1 ergibt, werden die Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel der Messorte mit nahezu Freifeldbedingungen als Referenzwert genutzt. Es ist zu beachten, dass in Sonderfällen Parameterwerte von über 1 und unter 0 erreicht werden können. Ist beispielsweise eine signifikante Schallquelle im städtischen Raum hinter dem straßenfernen Mikrofon vorhanden, kann die Pegeldifferenz der Mikrofone und damit der Parameterwert negativ werden. Liegt hingegen im städtischen Raum ein Freifeld vor und zugleich wird das straßenferne Mikrofon durch Objekte, wie bspw. parkende Pkws, vom Verkehr abgeschirmt, kann die real vorhandene Pegeldifferenz größer sein, als die für Freifeldbedingungen berechnete Pegeldifferenz und der Parameterwert steigt über 1. In den zu erwartenden Regelsituationen der städtischen Umgebung sind solche Sonderfälle nicht zu erwarten. Die Messorte mit nahezu Freifeldbedingungen sind Mo01 und Mo02 und weisen Pegeldifferenzen von 7,02 dB und 6,8 dB auf. Es wird angenommen, dass 7 dB die maximal zu erreichende Pegeldifferenz bei einem Messpositionsabstand  $s$  von 10 m während einer in situ Messung des fließenden Verkehrs ist. Dann beträgt nach dem Abstandsgesetz der Abstand  $a$  zwischen der straßennahen Messposition und der Mitte der Schallquelle von 8 m. Nutzt man diese 8 m als definierten Abstand zwischen der Mitte der Schallquelle und der straßennahen Messposition ergeben sich die in Abbildung 46 dargestellten Werte für  $P_{8m}$ . Die Parameterwerte von  $P_{8m}$  für die Messorte mit hoher Qualität erreichen Werte über 0,90. Der Messort mit geringer Qualität erzielt einen Parameterwert  $P_{8m}$  von 0,14. Damit zeigt sich, dass ein Abstand zwischen straßennaher Messposition und der Mitte der Schallquelle von etwa 8 m ein nutzbarer Referenzwert ist. Im Folgenden soll der Abstand zur Fahrbahn, sowie die Anzahl der Fahrbahnen während der Messungen aufgenommen werden und somit anstelle eines einheitlichen Abstandes  $a$ , ein auf den jeweiligen Messort angepasster Abstand  $a$  ermittelt werden.

**Abbildung 46** Parameter  $P_{3m}$  und  $P_{8m}$  berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs



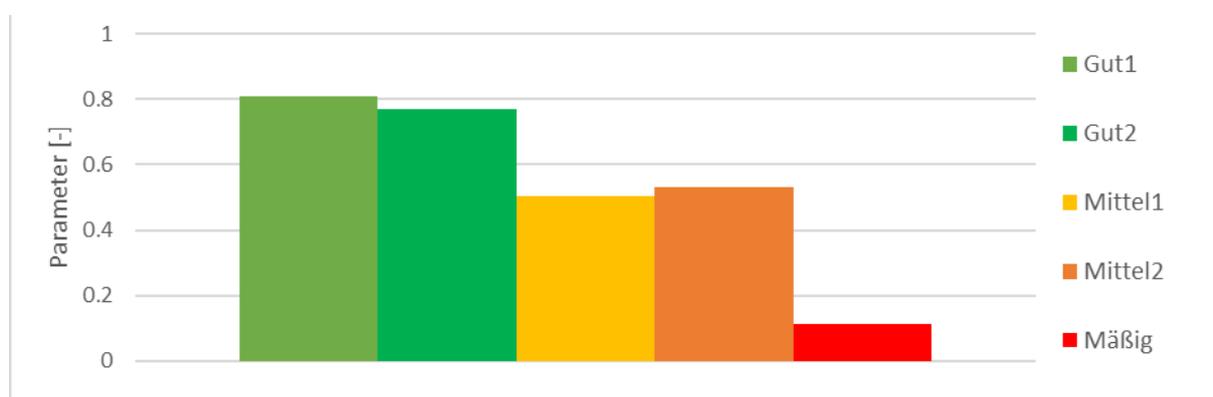
Quelle: Yvonne Büdding

Zur Definierung des Abstandes  $a$  zwischen straßennaher Messposition und der Mitte der Schallquelle wurden zunächst die verschiedenen baulichen Gegebenheiten der Messorte von der Messkampagne 2021 betrachtet. Neben zwei-, vier- oder sechsspurigen Straßen traten Radwege oder Parkzonen zwischen Gehweg und Straße auf. Auch wurden die Straßen ortsweise durch Straßenbahnlinien oder Begrünung

durchteilt. All diese Faktoren haben einen Einfluss auf den Abstand  $a$ . Der Abstand  $a$  soll für die Berechnung fest gewählt werden. Daher wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die straßennahe Mikrofonposition 0,5 m vom Rand der Straße aufgestellt wird. Zudem werden als Schallquelle lediglich die dem Mikrofon nächsten zwei Fahrspuren betrachtet. Sollten mehr als zwei Fahrspuren auftreten, wird davon ausgegangen, dass der Beitrag zum  $L_{eq}$  aufgrund des hohen Abstandes zur Messposition keinen ausschlaggebenden Effekt hat. Demnach wird der Abstand  $a$  zwischen straßennaher Messposition und der Mitte der Schallquelle auf 6 m festgelegt. Dadurch entspricht der Abstand  $a$  der vorgeschriebenen Mindestbreite eines Fahrstreifens von 5,5 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes zur Straße von 0,5 m.

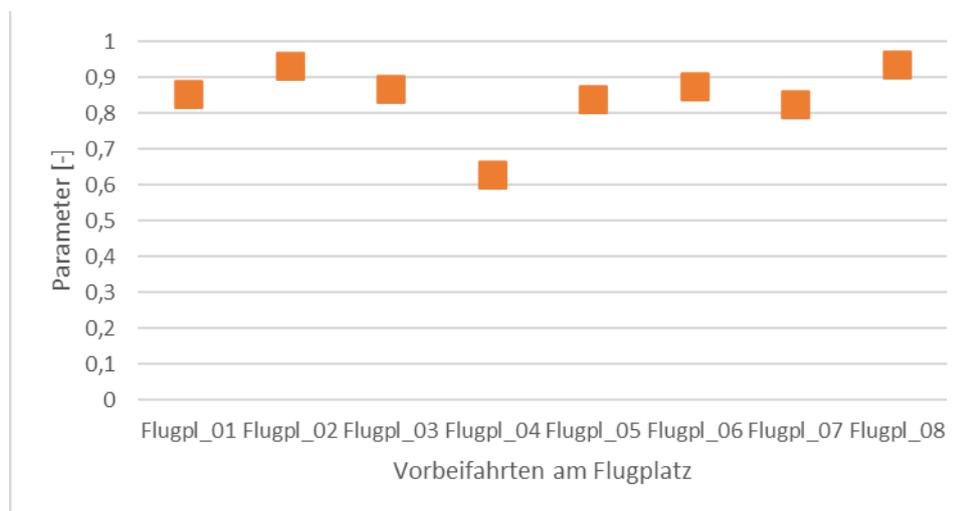
Berechnet man nun für die fünf zuvor betrachteten Messorte den Parameter  $P_{6m}$  mit dem Abstand  $a$  von 6 m so erhält man Parameterwerte für die zwei Messorte mit hoher akustischer Qualität von etwa 0,80 (vgl. Abbildung 47). Die Messorte mit mittlerer akustischer Qualität erzielen Parameterwerte von etwa 0,50 und der Messort mit geringer akustischer Qualität 0,11.

**Abbildung 47** Parameter  $P_{6m}$  berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs



Quelle: Yvonne Büdding

Zur Verifizierung des Parameters wurden die äquivalenten Dauerschallpegel von Vorbeifahrten der Messungen unter Freifeldbedingungen als Eingangsgröße genutzt. Der Abstand  $a$  betrug jeweils 5,5 m, der Abstand  $s$  zwischen den Mikrofonen 5,0 m. Für die Berechnung des Parameters wurde der Abstand  $a$  auf 5,5 m angepasst. Die Fahrgeschwindigkeit, sowie der Fahrzeugtyp können Tabelle 6 entnommen werden. Abbildung 48 zeigt, dass mit Ausnahme eines Ausreißers alle Werte zwischen 0,82 und 0,93 liegen. Die Abweichung der berechneten Parameterwerte zum erwarteten Optimalen Wert 1 und der Ausreißer, sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Zudem zeigten bereits die in situ Messungen, dass äquivalente Dauerschallpegel von Vorbeifahrten als Eingangsgröße weniger aussagekräftige Parameterwerte erzielen als die vom fließenden Verkehr. Dass Parameterwerte nahe 1 bei Freifeldmessungen erzielt werden können, legt nahe, dass der Parameter anwendbar ist.

Abbildung 48 Parameter  $P_{5,5m}$  der Vorbeifahrten im Freifeld zur Verifizierung der Parameterberechnung

Quelle: Yvonne Büdding

Tabelle 6 Informationen zu den Vorbeifahrten im Freifeld, die für die Verifizierung der Parameterberechnung genutzt wurden

Messung	Pegel-Diff [dB]	Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit [km/h]
Flugpl_01	4.80	E-Auto Kleinwagen	50
Flugpl_02	5.24	E-Auto Kleinwagen	50
Flugpl_03	4.89	E-Auto Kleinwagen	70
Flugpl_04	3.53	E-Auto Kleinwagen	70
Flugpl_05	4.73	Diesel-Kombi	50
Flugpl_06	4.93	Diesel-Kombi	50
Flugpl_07	4.63	Diesel-Kombi	70
Flugpl_08	5.26	Diesel-Kombi	70

### Kategorisierung der Messorte

Neben der messtechnischen Erfassung stellt die Kategorisierung und Bewertung der Messorte eine besondere Herausforderung dar, da ohne eine präzise Kategorisierung der Parameter an sich kaum eine Aussagekraft in sich birgt. In einem ersten Ansatz zur Bewertung der Messorte wurden diese zunächst systematisch in fünf Zonen unterteilt. Als Hauptzonen betrachten wir Straße, Gehweg und den städtischen Raum. Diese wurden durch zwei Übergangszonen zwischen den Hauptzonen ergänzt. Tabelle 7 zeigt beispielhaft die Bewertung einiger Messorte. Während bei den Hauptzonen Straße und Gehweg lediglich die Materialien der Oberflächen betrachtet wurden, wurde der straßenferne Raum in drei Unterkategorien, die Einfluss auf die Akustik des Ortes haben, eingeteilt. Neben dem Untergrund wird die Gebäudegeometrie und die Fassadenstruktur betrachtet.

Die Übergangszonen definieren weitere reflektierende oder absorbierende Flächen, wie parkende Fahrzeuge oder Begrünung.

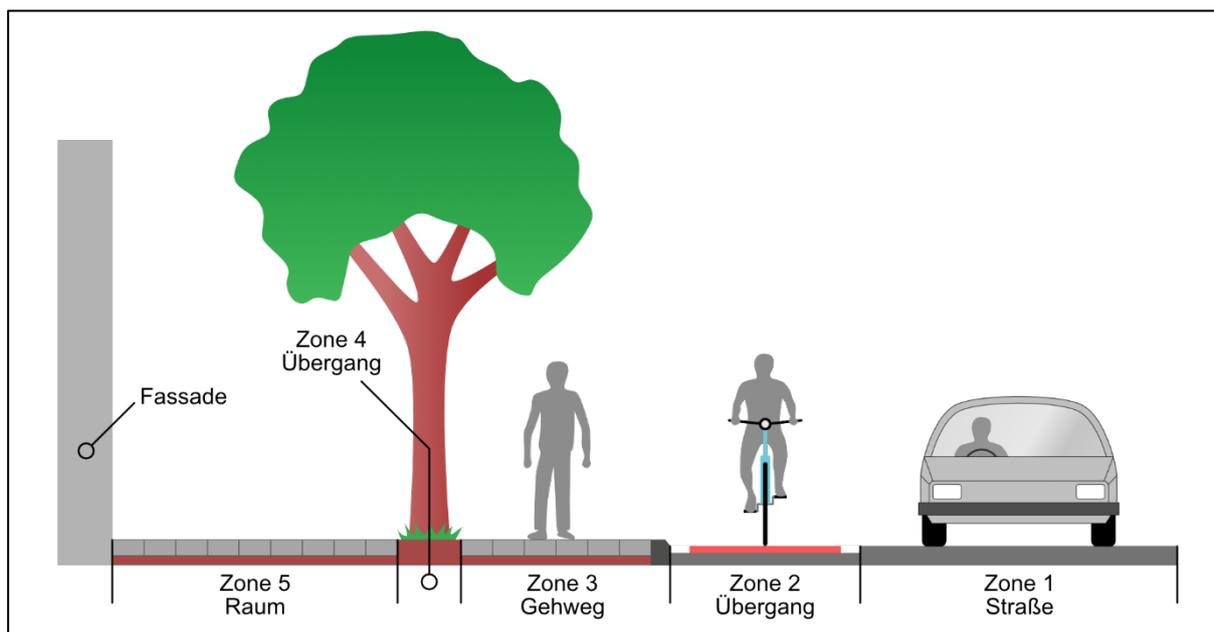
Die Messorte werden durch diese Bewertung genau beschrieben, sind zugleich aber schwer miteinander zu vergleichen. Um die Vergleichbarkeit der Messorte zu verbessern, wurden weitere Anpassungen an der Messortbewertung vorgenommen.

**Tabelle 7 Erster Entwurf einer Messortbewertung durch fünf Zonen an dem Beispiel zweier Messorte**

Messort	Zone						
	1	2	3	4	5		
	Straße	Übergang	Gehweg	Übergang	straßenferner Raum		
					Untergrund	Gebäudegeometrie	Fassadenstruktur
<b>Mo_01</b>	Kopfstein/Asphalt	Parken, Baum Hochstamm	Begrünung	Begrünung, Baum	Erde	Wald	-
<b>Mo_05</b>	Asphalt	-	Pflaster	-	Pflaster	Geschlossene Fassade	Glatt

Zur Präzisierung der Messortbewertung werden die Bereiche von der Straße bis hin zur Gebäudefassade genauer untersucht und benannt (Abbildung 49). Die erste Zone ist die Straße, die samt der vorbeifahrenden Fahrzeuge als Quelle der Schallabstrahlung zu sehen ist. Es folgt die zweite Zone, die den Übergang von der Straße zum Gehweg darstellt. In dieser Zone können sich Radwege, Grünstreifen, Bäume oder geparkte Fahrzeuge befinden. Die Zone 3 bildet der Gehweg, der meist aus Pflastersteinen besteht, aber auch ein Schotterweg sein kann. In der Zone 4 folgt dann ein weiterer Übergang zwischen dem Gehweg und dem dahinter befindlichen Raum. Hier können sich Hecken, Bäume, Stufen oder geparkte Fahrräder befinden. Die Zone 5 besteht aus dem Raum, der vor der Fassade entsteht. In diesem finden sich Vorgärten, gepflasterte Flächen, Wiesen, Bäume oder Gastronomie. Dahinter folgt die Fassade, die häufig als strukturierte schallharte Fläche den Schall des Straßenverkehrs reflektiert.

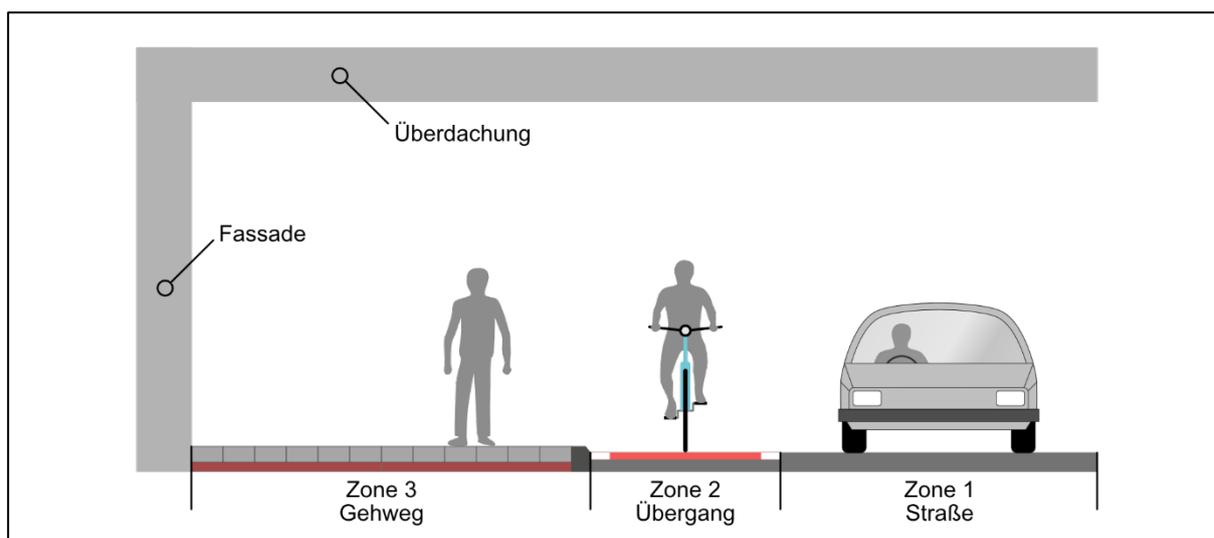
Abbildung 49 Unterteilung des Bereichs von der Straße zur Fassade in Zonen



Quelle: Ralf Fiedler

Die Zonen können sich je nach Messort stark voneinander unterscheiden, besonders in der Länge im Querschnitt, dem Bodenbelag oder der darin sich befindenden Objekte. An manchen Messorten sind nicht alle Zonen vorhanden, wenn z.B. die Straße direkt an den Gehweg grenzt, oder sich hinter dem Gehweg kein weiterer Raum mehr befindet. Ein solches Beispiel stellt eine Unterführung dar (Abbildung 50), bei der neben der Straße nur ein Radweg (Zone 2) und ein Gehweg (Zone 3) verläuft. Dies ist am Messort Mo\_05 in der Mörfelder Landstraße unter der Eisenbahnbrücke gegeben. Durch kurze Wege der Schallausbreitung und die schallharten Flächen am Boden durch Asphalt und Pflaster, der Betonwand (Fassade) und der Überdachung wird der Schall reflektiert, weshalb mit hohen Schalldruckpegeln im Bereich des Gehwegs zu rechnen ist. Dieser Messort stellt damit ein Negativbeispiel für die Schallausbreitung im urbanen Raum dar und zeigt die Wirkung vieler eng angrenzender Begrenzungsflächen.

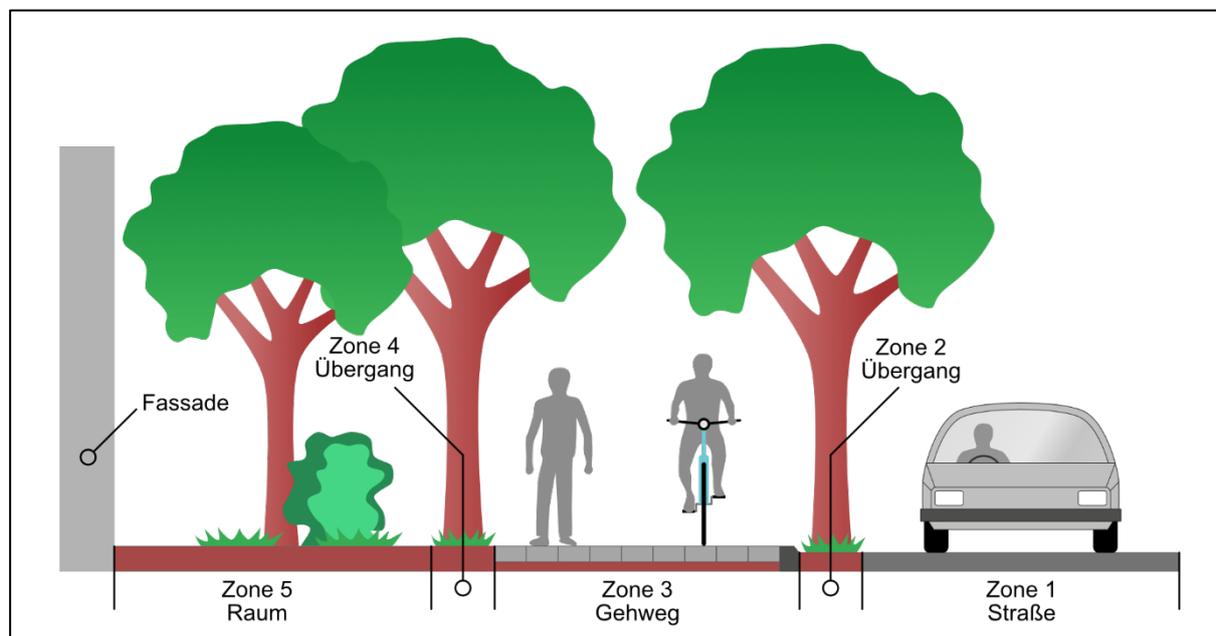
Abbildung 50 Messort in einer Unterführung, ohne die Zonen 4 und 5



Quelle: Ralf Fiedler

Ein Beispiel mit positivem Einfluss auf eine gedämpfte Schallausbreitung im Urbanen Raum ist in der Abbildung 51 dargestellt. Ein Grünstreifen mit Hochstamm-bäumen besitzt leicht absorbierende Bodeneigenschaften in den Zonen zwei und vier. Auch im Raum vor der Fassade sind Bäume und Büsche auf einem absorbierenden Erdboden vorhanden.

Abbildung 51 Messort mit Grünstreifen in den Zonen 2, 4 und 5



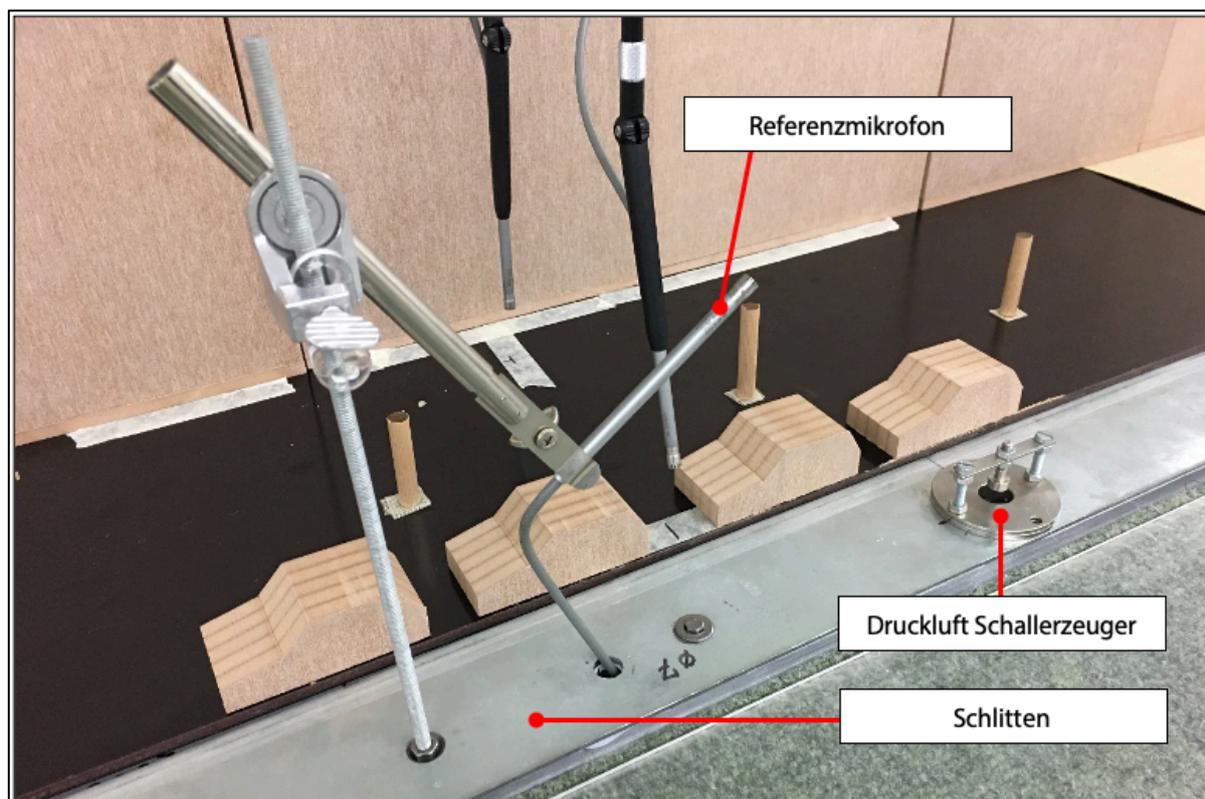
Quelle: Ralf Fiedler

Indem alle verschiedenen Messorte in Zonen kategorisiert wurden, kann der Stadtraum entlang Straßen in Regelsituationen aufgeteilt werden, die anschließend miteinander verglichen werden können.

### Skalierte Messungen im Maßstab 1:50 in der Halle für akustische Modelltechnik der BAST

Die Messung im Modellmaßstab bietet die Möglichkeit, verschiedene Varianten einfach zu testen. Dabei können einzelne Einflüsse identifiziert und isoliert durch Vergleichsmessungen in der Wirkung bestimmt werden. Die skalierten Messungen wurden in der Bundesanstalt für das Straßenwesen (BAST) durchgeführt. Um akustische Messungen an einer Straße im Modellmaßstab durchführen zu können, hat die BAST eine Halle für akustische Modelltechnik errichtet [13]. In der 4,30 m hohen Halle können auf der Grundfläche von etwa 120 m<sup>2</sup> verschiedene Verkehrs- oder Wohnbebauungen im verkleinerten Maßstab aufgestellt werden. Die Wände und die Decke sind mit schallabsorbierendem Material ausgekleidet. Für Messungen von so hohen Frequenzen ist eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit erforderlich, da mit steigender Luftfeuchtigkeit höhere Frequenzen besonders stark bei der Ausbreitung gedämpft werden. Über eine Klimatisierung wird die relative Luftfeuchtigkeit auf 5 % bei einer Temperatur von 20 °C geregelt. Als Modellschallquelle wird ein Druckluftschallerzeuger eingesetzt, der an einem Schlitten angebracht auf einer Schiene fährt (Abbildung 52). Für die Messungen der stadträumlichen Situationen im Rahmen dieses Projektes wurden auf einer 3 m langen Bodenplatte die Gebäudemodelle in verschiedenen Aufbauvarianten platziert. Vier Mikrofone sind an einem Stativ befestigt, sodass mit dem entwickelten Versuchsaufbau bei einer Durchfahrt der Quelle zwei urbane Situationen gleichzeitig gemessen werden können. Ein fünftes Mikrofon wird eingesetzt, um die bewegliche Druckluftschallquelle zu referenzieren.

Abbildung 52 Druckluftschallerzeuger auf einem Schlitten – Halle für akustische Messtechnik (BAST)

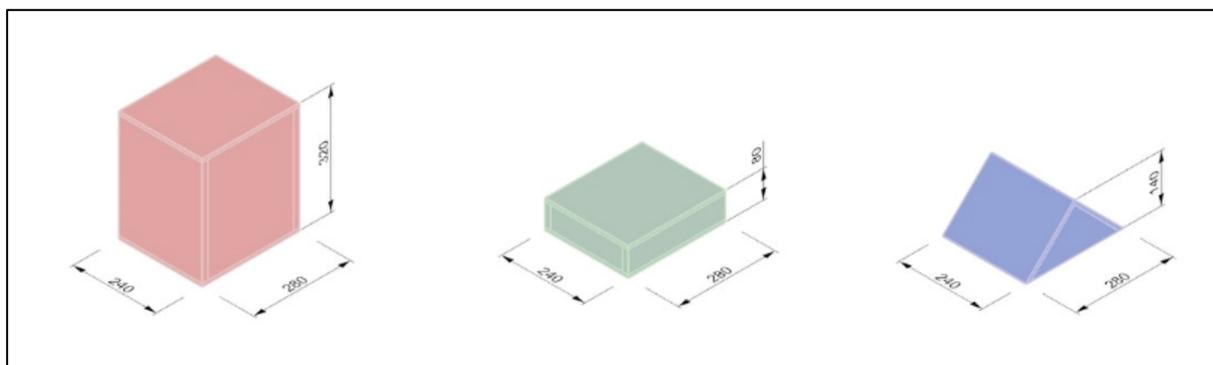


Quelle: Ralf Fiedler

Der Vorteil der Modellmessungen ist, dass die Quelle im Vergleich zu einer statistischen Vorbeifahrt genau bekannt ist und sich keine weiteren Schallquellen im Stadtraum auf die Messergebnisse auswirken. Für die skalierten Messungen wird der Maßstab von 1:50 gewählt.

Die Modellgebäude werden mit Hilfe von „Building Blocks“ aufgebaut. Das modulare System, das im Projekt „Urban acoustics and architectural façade design implementation“ für akustische Messungen von James Douglas konzipiert wurde, besteht aus Quadern in zwei verschiedenen Größen. Die größeren Quader haben die Abmaße 280 mm x 240 mm x 320 mm (LxBxH), bei den kleineren Quadern sind es 280 mm x 240 mm x 80 mm (Abbildung 53). Prismen dienen als Dächer, deren Grundfläche identisch zu den Quadern ist, mit der Höhe von 140 mm [14]. Werden diese hochkant aufgestellt, können auch Hausecken nachgebildet werden, die nicht rechtwinklig sind. Die Module sind hohl und bestehen aus Reisfaserwerkstoff-Platten. Die Platten sind verklebt und verschraubt. Das Plattenmaterial entspricht in Dichte und Werkstoffeigenschaften handelsüblichen MDF-Platten. Aus demselben Plattenmaterial wurden auch zusätzliche Module, für die Darstellung von Arkaden und Fahrzeugen gefertigt.

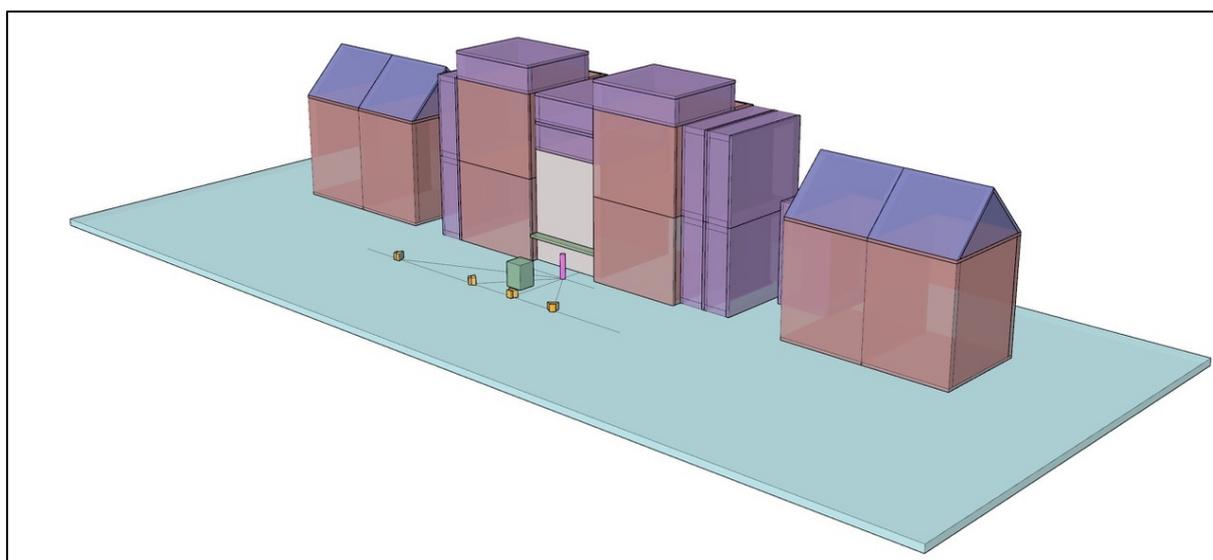
Abbildung 53 Building Blocks für die Gebäudemodelle der skalierten Messungen



Quelle: James Douglas

Durch die Kombination mehrerer Module lassen sich auch komplexere Gebäude modulieren, wie es das Beispiel in der Abbildung 54 zeigt. Die Fassade wird dabei als glatte Fläche vereinfacht.

Abbildung 54 Beispiel einer Gebäudeanordnung aus den Building Blocks

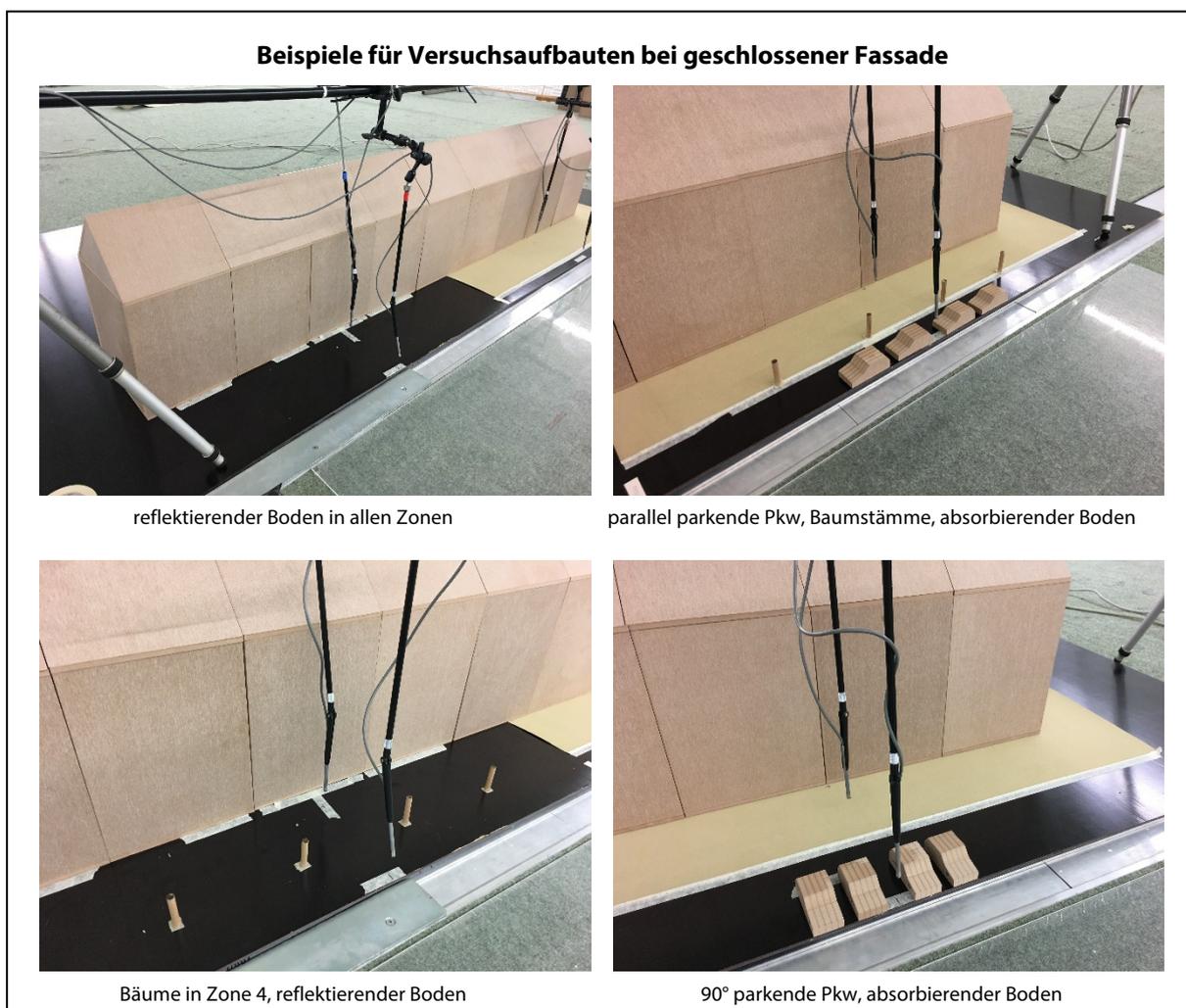


Quelle: James Douglas

Es wird der entwickelte Versuchsaufbau wie bei den in situ Messungen im verkleinerten Maßstab eingesetzt. Die Mikrofone befinden sich in der Höhe von 36 mm. Das erste Mikrophon ist 50 mm von der Quelle entfernt, das zweite befindet sich 200 mm hinter dem ersten. Im Maßstab von 1:50 muss die Wellenlänge skaliert werden. Die zu messenden Frequenzen werden demnach um den Faktor 50 größer. Es wird ein Terz-Band mit den Mittelfrequenzen von 1.000 Hz bis 80.000 Hz am Modell im Maßstab 1:50 gemessen. Dies entspricht umgerechnet einem Frequenzbereich von 16 Hz bis 1783 Hz im Maßstab 1:1.

Die Versuchsaufbauten repräsentieren Gebäudekonstellationen, die den innerstädtischen Situationen der in situ Messungen entsprechen. Vor einer geschlossenen Fassade aneinandergereihter Gebäude werden die Zonen variiert, um die Einflüsse genauer untersuchen zu können. Ein dünner Teppich dient als absorbierendes Material, was eine Grünfläche nachstellen soll. Pkw-Modelle und Baumstämme können in den Zonen platziert werden. In der Abbildung 55 werden verschiedene Versuchsaufbauten vor einer geschlossenen Fassade gezeigt. Die Abbildung 56 zeigt Gebäudekonstellationen aus der Messreihe.

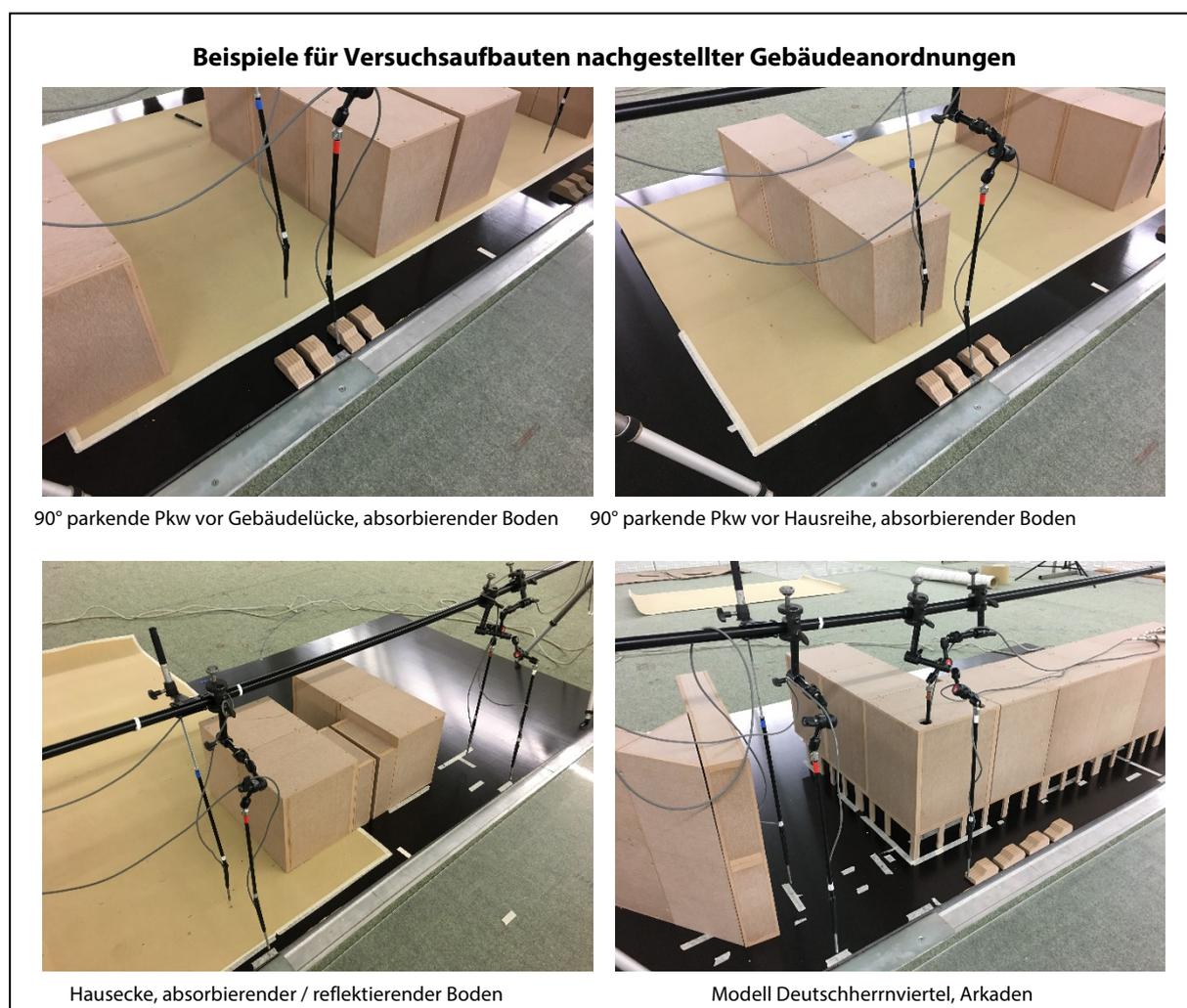
Abbildung 55 Versuchsaufbauten vor Häuserreihe mit geschlossener Fassade



Quelle: Ralf Fiedler

Bei den Messungen vor geschlossener Fassade stehen die Gebäudemodelle 300 mm von der Quelle entfernt, dies entspricht einem Abstand von 15 m. Nur in dem Sonderfall, wenn Pkw im Winkel von 90° zur Straße parken, wurde der Abstand um 60 mm verlängert. Dies entspricht den Beobachtungen realer Situationen, bei denen Parkplätze häufig senkrecht zur Straße angelegt sind, wenn die Distanz zur Fassade größer ausfällt.

Abbildung 56 Versuchsaufbauten nachgestellter Gebäudeanordnungen



Quelle: Ralf Fiedler

## Auswertung der skalierten Messungen

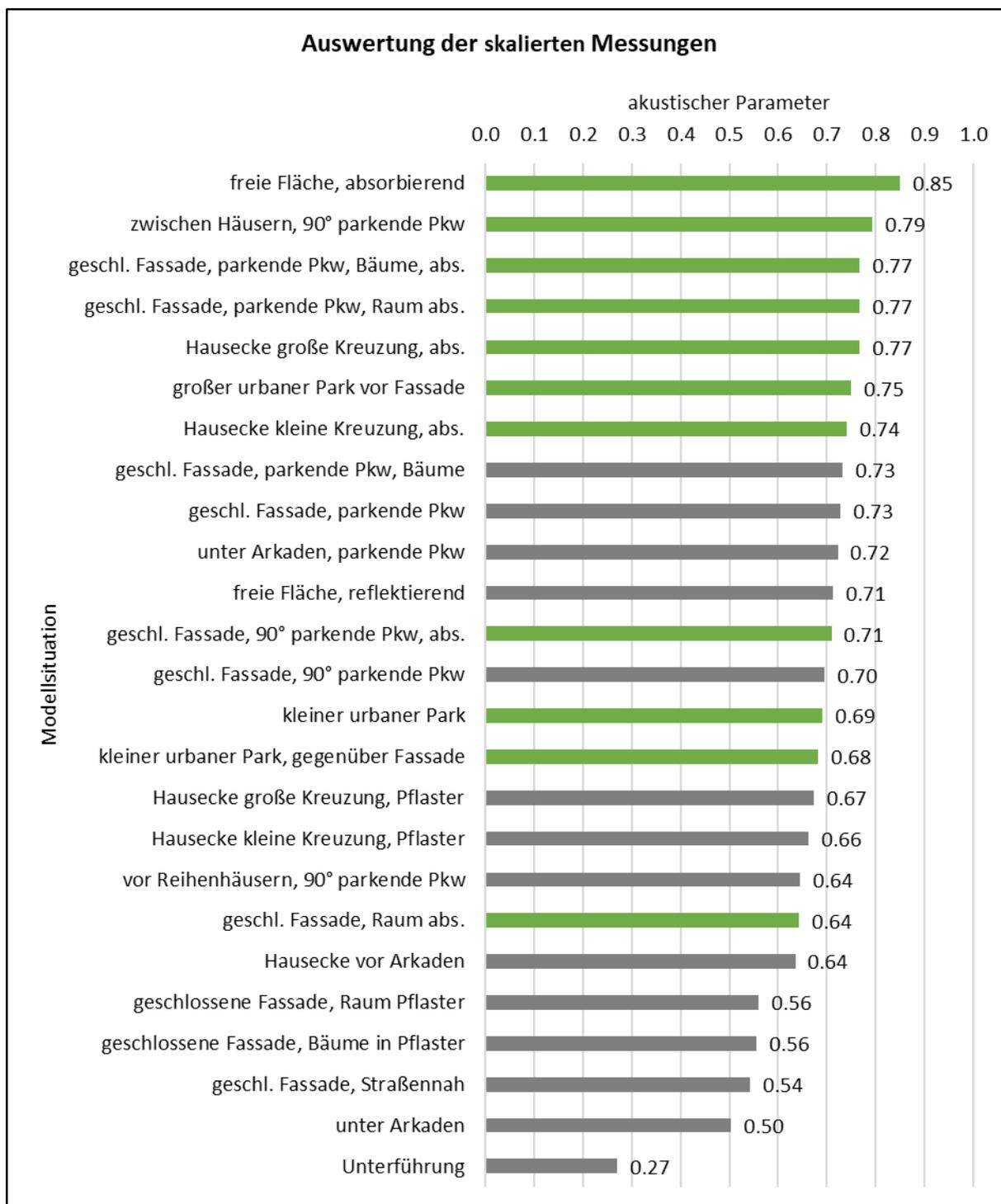
Bei realen Straßenfahrzeugen werden typischerweise Frequenzen im Bereich von 100 Hz bis 4.000 Hz abgestrahlt. Dieser Bereich kann bei den skalierten Messungen nicht komplett abgedeckt werden. Somit wird der umgerechnete Frequenzbereich von 90 Hz bis 1783 Hz ausgewertet. Die Schallquelle bewegt sich während der Messungen mit konstanter Geschwindigkeit von 0,01 m/s. Es wird der gemittelte Schalldruck bei der Vorbeifahrt von 500 mm vor den Mikrofonen bis 500 mm nach den Mikrofonen betrachtet und es wird der Dauerschallpegel  $L_{eq}$  für die Vorbeifahrt je Terz bestimmt. Die Ergebnisse wurden uns im csv-Dateiformat als Zahlendatensätze für Pegelzeitverläufe einzelner Vorbeifahrten über die Distanz des Versuchsaufbaus von 3000 mm mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 1 mm je s zur weiteren Verwendung im Projekt von Dr. Wolfram Bartholomaeus (BAST) zur Verfügung gestellt.

## Bewertung der Messorte aufgrund der Ergebnisse der skalierten Messungen

Aus den  $L_{eq}$  Werten beider Mikrofone wird der akustische Parameter  $P_{x,m}$  aus der Pegeldifferenz und dem Bezug auf das Abstandsgesetz der Schallausbreitung im Freifeld berechnet. Die Ergebnisse für die Modellsituationen

sind grafisch in Abbildung 57 dargestellt. Die grünen Balken symbolisieren einen absorbierenden Bodenbelag im Stadtraum, die grauen Balken einen reflektierenden Bodenbelag wie z.B. eine Pflasterung

Abbildung 57 Auswertung der skalierten Messungen im Maßstab 1:50



Quelle: Ralf Fiedler

Eine freie Fläche mit absorbierendem Untergrund dient als Referenzmessung. Die Ergebnisse zeigen, dass am Straßenrand parkende Pkw einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung haben. Nahe an der Quelle schirmen Pkw's den, in den bodennahen Stadtraum einfallenden Schall ab und sorgen für eine deutliche Pegelabnahme zwischen den beiden Mikrofonpositionen. Die Pegeldifferenz steigt von 7,83 dB bei einer geschlossenen Fassade und gepflastertem Untergrund auf 10,18 dB, wenn Pkw Modelle am Straßenrand platziert werden, der errechnete Parameterwert steigt von 0,56 auf 0,73 an. Pkw's, die parallel an der Straße parken, zeigen in den durchgeführten Messungen einen größeren abschirmenden Einfluss als Pkw, die im 90° Winkel zur Straße parken. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass immer nur vier Pkw-Modelle vor den baulichen Situationen aufgestellt wurden. Die Länge vor der Fassade, die abgeschirmt wird, ist daher größer bei parallel zur Fahrbahn parkenden Pkw. Für eine genauere Bestimmung des Einflusses der Parkposition müsste eine gleiche Länge mit Pkw-Modellen besetzt werden.

Im Gegenteil zu den Pkw-Modellen haben Baumstämme im Übergangsbereich von Gehweg zum dahinterliegenden Raum keinen messbaren Einfluss auf die Schallausbreitung. Deutlicher ist der Einfluss des Bodenmaterials. Wird der Raum vor einer geschlossenen Fassade mit absorbierendem Material versehen, steigt die Pegeldifferenz im Vergleich zu der reflektierenden Bodenplatte von 7,83 dB auf 9,00 dB an, wodurch sich der Parameterwert um 0,08 erhöht.

Unter einer Unterführung ist die Pegelabnahme bei den skalierten Messungen aufgrund der zusätzlichen Deckenreflexionen am geringsten, mit dem Parameterwert von 0,27. Dieser Wert könnte noch geringer ausfallen, wenn die Decke bis über die Schallquelle hinausragen würde. Durch den Aufbau der Halterung für das Referenzmikrofon konnte die Überdachung erst am Straßenrand beginnen. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich, wenn das hintere Mikrofon unter Arkaden platziert ist, wie am Beispiel des Gebäudekomplexes im Frankfurter Deutschherrnviertel. Auch wenn die rechteckigen Säulen einen geringen Teil des einfallenden Schalls abschirmen und für ein diffuseres Schallfeld sorgen, liegt der Parameterwert durch die zusätzliche Deckenreflektion bei 0,50, dem zweitniedrigsten Wert der Messreihe der skalierten Messungen und 0,06 niedriger als vor einer geschlossenen Fassade.

Bei den untersuchten Versuchsaufbauten ist der Einfluss einer auf der anderen Straßenseite befindlichen geschlossenen Fassade im Vergleich zu den anderen Einflüssen eher gering und führt nur zu einer Verschlechterung des Parameterwerts von 0,01 bis 0,04. Im deutlichsten Fall, wenn die Fassade auf beiden Straßenseiten geschlossen ist, hat die Pegeldifferenz einen Wert von 9,18 dB, anstatt bei freier Fläche auf der gegenüberliegenden Straßenseite einen Wert von 9,73 dB.

Die Schallausbreitung auf einer Freifläche mit absorbierendem Untergrund wird in der Messreihe in Annäherung abgebildet durch eine große Hauslücke mit einem Abstand von 600 mm (entspricht 30 m in realer Größe), mit absorbierendem Untergrund im Zwischenraum und senkrecht zur Straße parkenden Pkw. Der Parameterwert liegt hier 0,06 unter der Ausbreitung auf der freien Fläche. Wird diese Lücke im Falle einer Restplatzbebauung geschlossen, sinkt der Parameterwert von 0,79 auf 0,71. Die Pegeldifferenz zwischen den beiden Mikrofonpositionen sinkt dann von 11,10 dB auf 9,73 dB.

## **Bewertungsmethode für die Messorte**

Bei der Planung neuer Gebäude kann eine Messung vor der Errichtung nicht durchgeführt werden. Ebenso ist die Möglichkeit für skalierte Messungen nicht immer gegeben. Daher wird eine Bewertungsmethode entwickelt, um die Messorte anhand der einzelnen Zonen nach ihren akustischen Eigenschaften bewerten zu können. Die Gewichtung der einzelnen Zonen wurde vorgenommen aufgrund der Ergebnisse der Feldmessungen und den Erkenntnissen aus den skalierten Messungen. In einem mehrere Überprüfungs Schleifen durchlaufenden Prozess wurde der gemessenen Parameter mit dem errechneten Parameter verglichen und damit die Gewichtung der einzelnen Zonenbestandteile präziser gefasst.

Für die Bewertung wird ein Punktesystem gewählt, dass in Anlehnung an die VDI 2225 Blatt 3: 1998-11 "Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliche Bewertung" von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut oder ideal) in ganzzahligen Schritten reicht (Tabelle 8) [15]. Gegebenheiten in den Zonen, die zu kurzen

Schallausbreitungswegen bis zur Fassade führen, oder besonders glatte schallharte Oberflächen aufweisen, die zu einer Reflexion in den Raum (Zone 5) führen, werden mit einer geringeren Punktzahl bewertet. Lange Schallausbreitungswege und absorbierende Materialien z.B. den Böden, erhalten eine höhere Punktzahl. Die Straße als Quelle wird dabei nicht bewertet, hier wird angenommen, dass die Vorbeifahrten je Messort vergleichbar sind.

**Tabelle 8 Werteskala nach VDI 2225**

unbefriedigend	gerade noch tragbar	ausreichend	gut	sehr gut (Ideal)
0	1	2	3	4

In der Messreihe ist die Wirkung geparkter Pkw in der Zone 2 beim Übergang zwischen Straße und Gehweg besonders auffällig. Diese reflektieren den abgestrahlten Schall des Straßenverkehrs zurück und schirmen den dahinter liegenden Raum ab und wirken sich daher positiv auf die Schallausbreitung in den Raum hinein aus. In der Bewertung erzielen 90° zur Straße parkende Pkw in der Zone 2 daher die Maximalpunktzahl. Für die weiteren Zonen ist besonders die Beschaffenheit des Bodenbelags entscheidend und damit die Eigenschaft, ob der Schall zu einem großen Teil reflektiert oder absorbiert wird. Objekte mit absorbierender Wirkung wie z.B. dichte Hecken führen dabei zu einer sehr guten Bewertung.

Die Fassade beeinflusst sehr stark die Schallreflexion zurück in die davor liegende Zone 5. An Hausecken oder bei Fassadenlücken ist der Effekt geringer als bei ebenen, parallel zur Straße verlaufenden Fassaden. Der Effekt der Fassade nimmt mit steigender Entfernung zur Straße ab. Bei überdachten Messorten kommt die Reflexion über die Decke hinzu. Arkaden besitzen im Bereich der Überdachung ebenfalls eine weitere reflektierende Fläche, aber in vielen Fällen auch Säulen, die den Schall abschirmen und für ein diffuseres Schallfeld sorgen. Die Länge des Überhangs der Arkaden ist dabei ausschlaggebend. Lange Überhänge führen zu deutlich steigenden Reflexionen, während kurze Überhänge mit einer planen durchgehend geschlossener Fassade gleichgesetzt werden können.

Bei sehr engen Messstellen fallen Zonen weg. Dies führt zu einer Wertung von 0 Punkten, da die Schallausbreitungswege dann gering sind. Ist die Strecke von Bordsteinkante bis zur Fassade größer als 10 m, wird der Bodenbelag jeder Zone bewertet, auch wenn der Übergang fließend ist und die Übergangszone nicht ausgeprägt ist.

Die Tabelle 9 enthält die Wertungszahlen je Zone, entsprechend den Eigenschaften der Messorte. Die Punktevergabe je Eigenschaft wurde dabei in mehreren Iterationsschritten angepasst, indem die Messwerte aus den vor Ort erzielten Messungen mit den Ergebnissen der Bewertungsmethode abgeglichen wurden. Auch die skalierten Messungen im Modellmaßstab 1:50 wurden für die Anpassung herangezogen.

**Tabelle 9 Bewertung der einzelnen Zonen nach Eigenschaften**

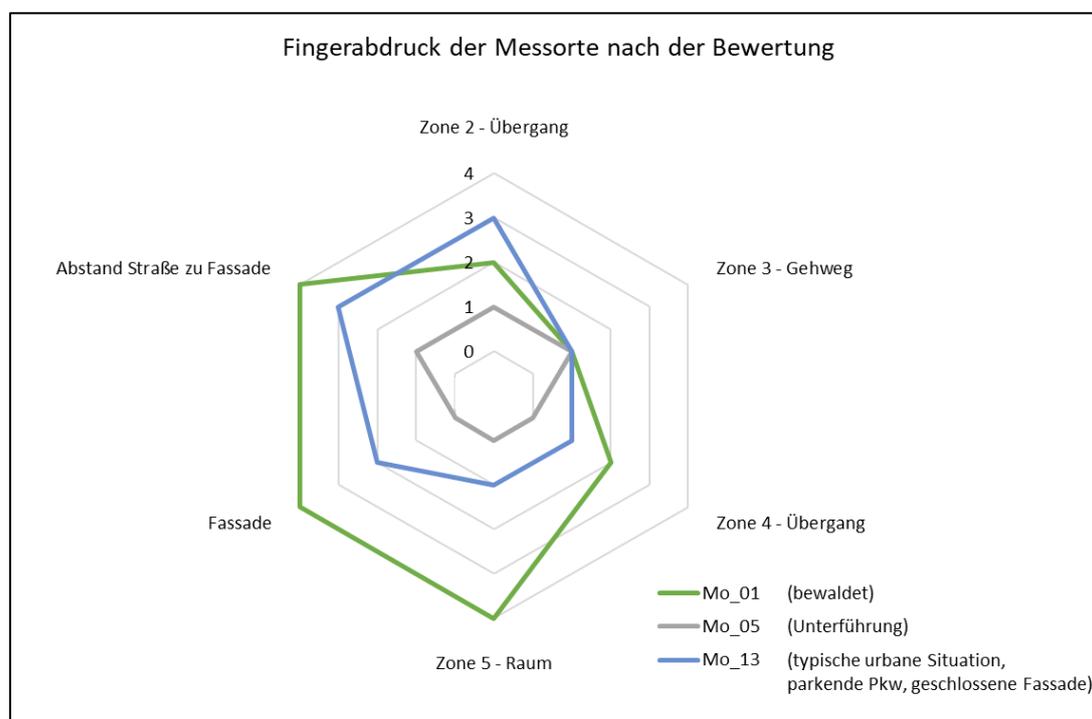
Zone	Wertungszahl $w$ in Anlehnung an VDI 2225				
	0	1	2	3	4
2) Übergang	kein Übergang	Weg mit schallhartem Belag (Asphalt)	absorbierender Bodenbelag (z.B. Wiese)	parallel zur Straße parkende Pkw,	90° zur Fahrbahn parkende Pkw

Zone	Wertungszahl $w$ in Anlehnung an VDI 2225				
	0	1	2	3	4
		oder Pflaster) z.B. Radweg	(ggf. Pfosten, Bäume, Hecke)	ggf. Bäume im Zwischenraum	(ggf. Bäume im Zwischenraum) oder hohe Stufe zur Straße
3) Gehweg	sehr schmaler Gehweg, Pflaster oder Asphalt ( $< 1,5$ m)	Gehweg Pflaster oder Asphalt	Gehweg Pflaster gemischt mit absorbierenden Bereichen	Gehweg aus verdichtetem Schotter	absorbierender Bodenbelag (z.B. Erde, Rasen)
4) Übergang	kein Übergang (nur wenn kein Raum in Zone 5 anschließt)	Pflaster oder Asphalt  (ggf. Zäune, Pfosten, geparkte Fahrräder)	absorbierender Boden  (ggf. Bäume, Säulen, niedrige Hecke)	Treppenstufen, Stufen, flache Mauer, ggf. mit Bäumen oder Hecken	absorbierender Boden, hohe dichte Hecke ( $>$ $1,8$ m) / abschirmende Objekte
5) Raum	kein Raum	Pflaster oder Asphalt	platzierte Gegenstände auf Pflaster oder Asphalt  z.B. Gastronomie	teilweise absorbierender Untergrund  z.B. Rasengitter- steine	absorbierender Boden oder Objekte  z.B. Vorgärten mit Hecken, Büschen, Bäumen
Fassade	glatt, schallhart, Messstelle überdacht (Unterführung, Tunnel)	geschlossene glatte schallharte Fassade  oder Arkaden mit langem Überhang	geschlossene strukturierte Fassade;  oder mit Arkaden mit kurzem Überhang	Fassade längs zur Messstelle;  Fassadenlücke;  Hausecke;  Mauer $< 2$ m	akustisch wirksame Fassade, oder Abstand zur Straße ( $> 20$ m), Entfernung zu Hausecke ( $> 10$ m)
Abstand Straße zu Fassade	$< 2,5$ m	$< 5$ m	$< 10$ m	$< 20$ m oder Fassade nicht geschlossen	$\geq 20$ m oder Hausecke

Von den untersuchten Messorten lassen sich 47 auf diese Weise kategorisieren und bewerten. Die bewerteten Messorte können nach der Punktevergabe in Netzdiagrammen miteinander verglichen werden. So lassen sich Ähnlichkeiten direkt graphisch ablesen und jeder Messort erhält damit seinen eigenen akustischen Fingerabdruck. In Abbildung 58 ist das Netzdiagramm dargestellt, das den Unterschied in der Messreihe zwischen dem Messort Mo\_05 in der Mörfelder Landstraße unter der Eisenbahnbrücke und dem Messort

Mo\_01 in der Mörfelder Landstraße im bewaldeten Gebiet zeigt, sowie einer typischen urbanen Situation am Messort Mo\_13 mit an der Straße parkenden Pkw und einem Gebäude mit geschlossener Fassade.

Abbildung 58 Netzdiagramm als Fingerabdruck der Messorte nach Vergabe der Wertungszahlen



Quelle: Ralf Fiedler

Es wird ein Ansatz gewählt, bei dem die Gewichtung der einzelnen Zonen pauschal für alle Messorte anwendbar ist, um das Bewertungsverfahren zu vereinfachen. Dies ist für typische Messorte im innerstädtischen Raum möglich. Sonderfälle können mit dem Bewertungsverfahren nicht korrekt ausgewertet werden, wenn z.B. eine hohe Lärmschutzwand zwischen Gehweg und Raum in der Zone 4 (Übergang) platziert ist. Für solche Gegebenheiten wäre die Gewichtung individuell anzupassen.

Bei vielen Orten in der Messreihe variiert der Gehweg in der dritten Zone kaum und der Übergang in der vierten Zone ist häufig fließend oder dort platzierte Objekte lassen nur eine geringe Auswirkung vermuten. Der Übergang in der zweiten Zone kann, wenn ein Radweg und parkende Autos vorhanden sind, einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung haben. Daraus ergibt sich die Gewichtung, die den Raum, die Fassade und den Abstand zwischen Straße und Fassade mit jeweils 20 % berücksichtigt. Die verbleibenden Prozentpunkte werden gleichermaßen auf die Zone 3 (Gehweg) und Zone 4 (Übergang) verteilt (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10 Gewichtung der Zonen

Zone	2) Übergang	3) Gehweg	4) Übergang	5) Raum	Fassade	Abstand Straße zu Fassade
Gewichtung $g$	20 %	10 %	10 %	20 %	20 %	20 %

Für alle Messorte wird die gewichtete Gesamtwertigkeit  $G_{wg}$  nach Formel 1 aus der Gewichtung  $g$  und der Wertungszahl  $w$  je Zone berechnet:

$$G_{wg} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot w_i$$

Das Ergebnis für die gewichtete Gesamtwertigkeit kann im Wertebereich zwischen 0 (unbefriedigend) und maximal 4 (ideal) liegen. Um die Gesamtwertigkeit der Messorte mit dem akustischen Parameter vergleichen zu können, wird das Ergebnis normiert, indem durch den Höchstwert von 4 geteilt wird, um die akustische Wertigkeit des Ortes zu erhalten:

$$\text{akustische Wertigkeit} = \frac{G_{wg}}{4}$$

Die theoretische Wertespanne der akustischen Wertigkeit reicht nun von 0 (unbefriedigend) bis 1 (ideal) und kann in direktem Bezug zu dem einheitenlosen akustischen Parameter gesetzt werden.

Als Beispiel wird der Messort EC\_08 in der Eckenheimer Landstraße in Abbildung 59 betrachtet

**Abbildung 59** Messort Ec\_08 in der Eckenheimer Landstraße



Quelle: Jochen Krimm

Hier parken in Pkw parallel zur Straße in der zweiten Zone und es folgt ein gepflasterter Gehweg in der dritten Zone. Im Übergang zum Raum befindet sich eine Stufe mit einem Zaun, der mit Grünpflanzen bewachsen ist. Der Raum besteht aus teilweise reflektierendem Boden mit Rasengittersteinen und vereinzelt Grünpflanzen. Die Fassade ist geschlossen und 10,5 m von der Straße entfernt. Die Bewertung für diesen Messort ist in der Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11 Bewertung des Messorts Ec\_08 in der Eckenheimer Landstraße

Zone	2) Übergang	3) Gehweg	4) Übergang	5) Raum	Fassade	Abstand Straße zu Fassade
Bauliche Situation	parallel parkende Pkw	Gehweg, Pflaster	Stufe, Zaun, Grünpflanzen	Rasengittersteine, teilweise absorbierender Untergrund	geschl. Fassade	10,5 m
Wertungszahl	3	1	3	3	2	3

Mit der Gewichtung der Zonen aus der Tabelle 10 berechnet sich die Gesamtwertigkeit nach der folgenden Formel:

$$G_{wg\ Ec_{08}} = 0,2 \cdot 3 + 0,1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3$$

$$G_{wg\ Ec_{08}} = 2,6$$

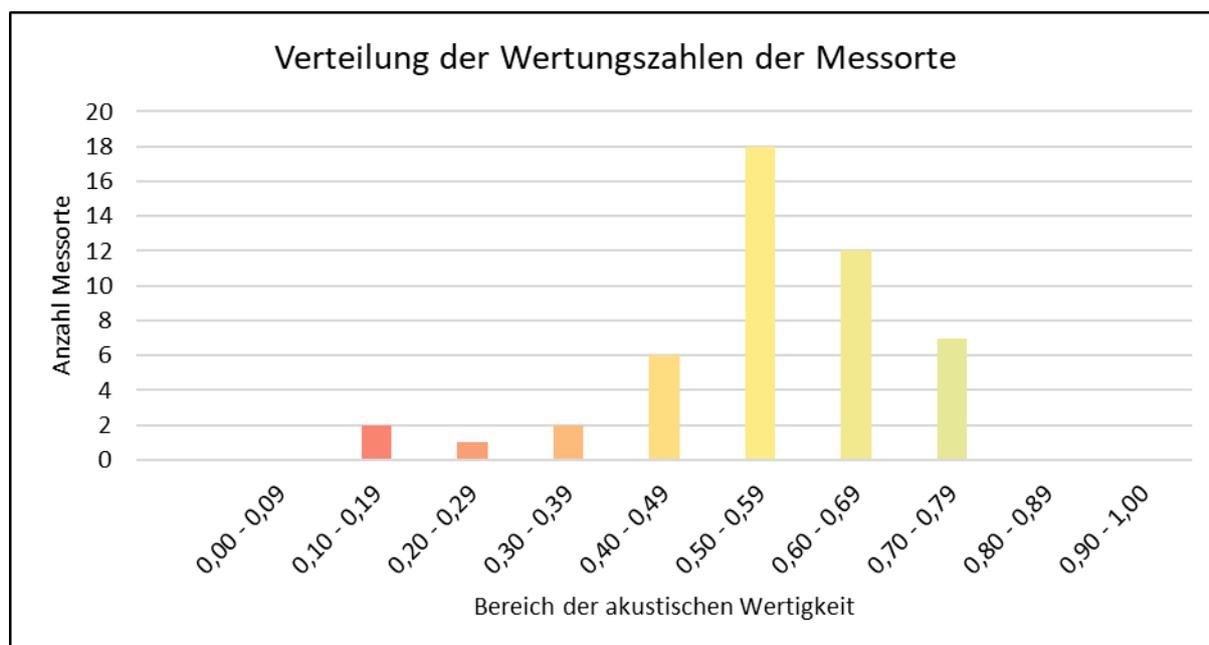
Mit der anschließenden Normierung ergibt sich die akustische Wertigkeit für den betrachteten Messort unter Verwendung folgender Formel:

$$akustische\ Wertigkeit_{Ec_{08}} = \frac{2,6}{4} = 0,65$$

Mit der akustischen Wertigkeit von 0,65 liegt der Messort Ec\_08 über dem Durchschnitt in der durchgeführten Messreihe.

In der Messreihe werden akustische Wertigkeiten im Bereich von 0,13 unter der Unterführung bis 0,78 im bewaldeten Gebiet erreicht. Die meisten betrachteten urbanen Orte in der Messreihe erhalten bei der Bewertungsmethode eine akustische Wertigkeit im Bereich von 0,50 bis 0,59. Die Verteilung der Wertungszahlen ist in der Abbildung 60 dargestellt.

Abbildung 60 Verteilung der akustischen Wertigkeit der untersuchten urbanen Orte



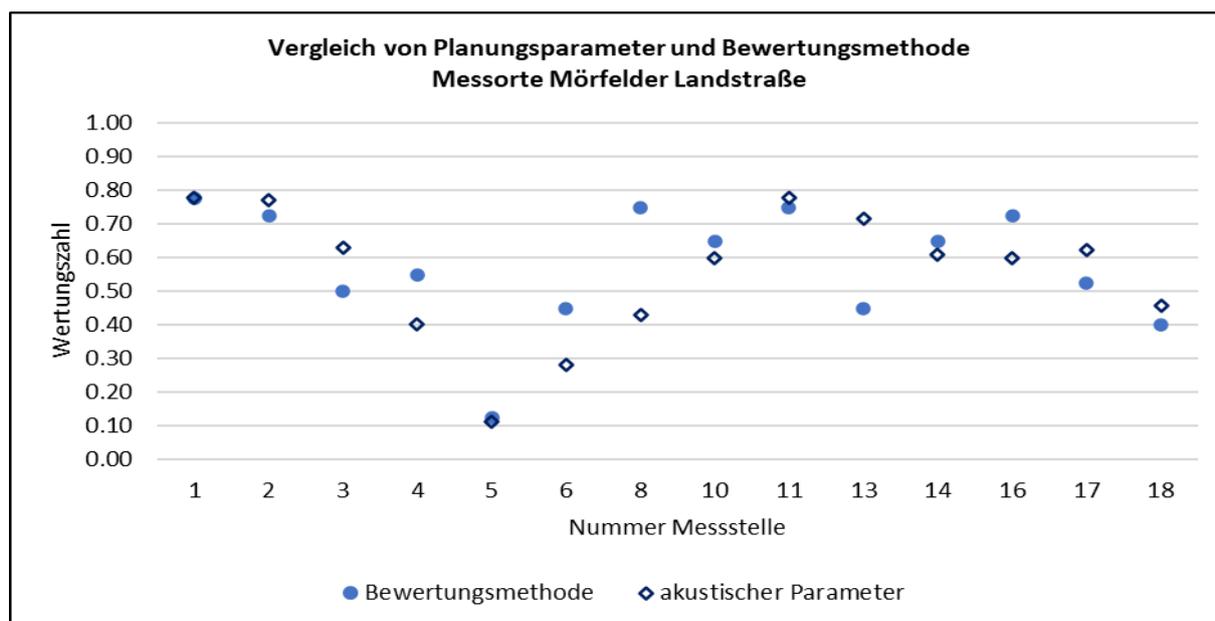
Quelle: Ralf Fiedler

Eine Tabelle mit Fotos der Messorte und den zugeordneten Wertungszahlen kann dem Anhang entnommen werden.

## Feldmessungen - Vergleich des akustischen Planungsparameters mit der Bewertungsmethode

Die bewerteten urbanen Situationen werden mit dem akustischen Planungsparameter verglichen, um zu prüfen, wie gut sich die akustische Situation anhand der Gegebenheiten vor Ort vorhersagen lässt. In der Abbildung 61 ist der Vergleich für die untersuchten Messstellen M0\_01 bis Mo\_18 in der Mörfelder Landstraße in Frankfurt dargestellt.

Abbildung 61 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Mörfelder Landstraße



Quelle: Ralf Fiedler

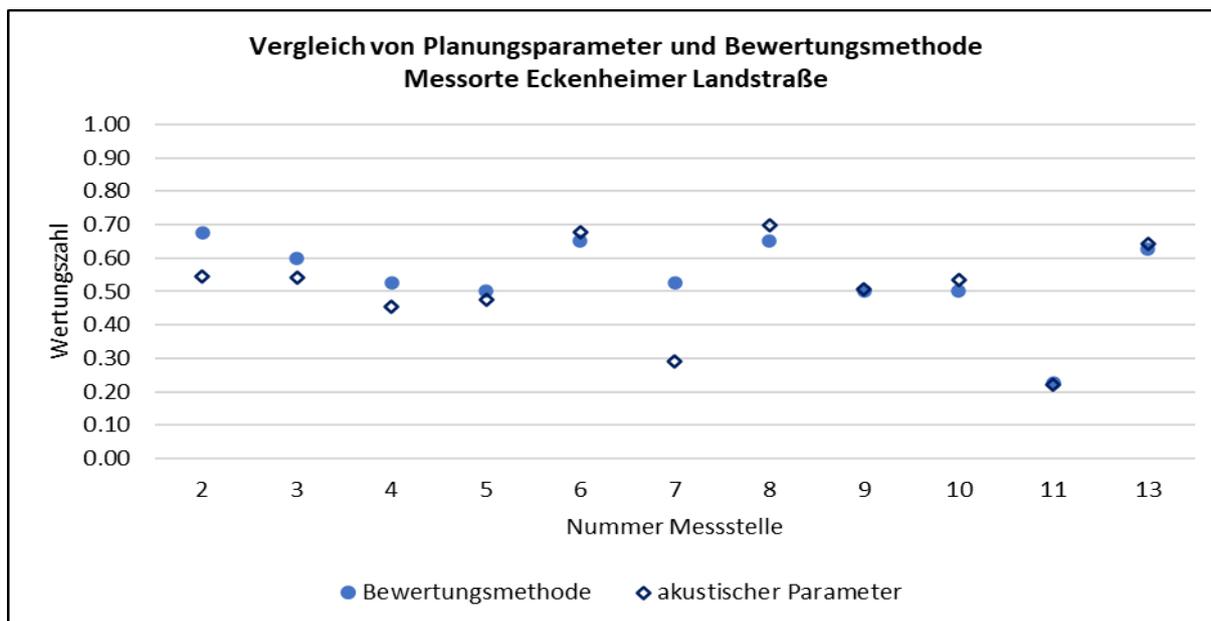
Der erste Vergleich zeigt, dass die Bewertungsmethode in 7 von 14 auswertbaren Messungen in der Mörfelder Landstraße kaum Abweichungen zu dem akustischen Parameter aufweist. Besonders die Fälle der freien Schallausbreitung bei absorbierendem Untergrund (Messort Mo\_01) und bei vielen Begrenzungsflächen unter einer Unterführung (Messort Mo\_05) stimmen die Bewertungsmethode und der Wert des Parameters sehr genau überein. Bei den restlichen Messstellen liegt die Bewertung teilweise deutlich über oder unter dem akustischen Parameter, eine Tendenz ist aber nicht erkennbar, dass Messorte durchgehend besser oder schlechter bewertet werden.

An der Messstelle Mo\_08, die sich zwischen zwei weit voneinander entfernten Häusern befindet, liegt der Parameter-Messwert deutlich unter den Erwartungen, denn bei den skalierten Messungen erzielte diese Situation sehr hohe Werte. Dieses Beispiel zeigt, dass an bestimmten Orten weitere Faktoren einen Einfluss auf die Schallausbreitung haben als die für die Bewertung herangezogenen Kriterien. Weitere Schallquellen im Stadtraum hinter diesen Gebäuden haben einen größeren Einfluss auf die Messwerte, da diese nicht wie bei einer geschlossenen Fassade abgeschirmt werden.

Der Wert des akustischen Parameters fällt am Messort Mo\_13 deutlich besser aus, als durch die geometrischen Gegebenheiten erwartet. Zwar schirmen an dieser Stelle parallel parkende Pkw ein Teil des eintreffenden Schalls ab, dennoch befindet sich das Mikrofon vor einer geschlossenen Fassade mit weiteren seitlichen Begrenzungsflächen, die eine kurze Distanz zur Straße aufweist.

Bei den Messorten in der Eckenheimer Landstraße trifft die Bewertungsmethode den ermittelten Parameter Wert größtenteils sehr genau, nur an den Messorten Ec\_02 und Ec\_07 sind größere Abweichungen zu erkennen (Abbildung 62).

Abbildung 62 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Eckenheimer Landstraße

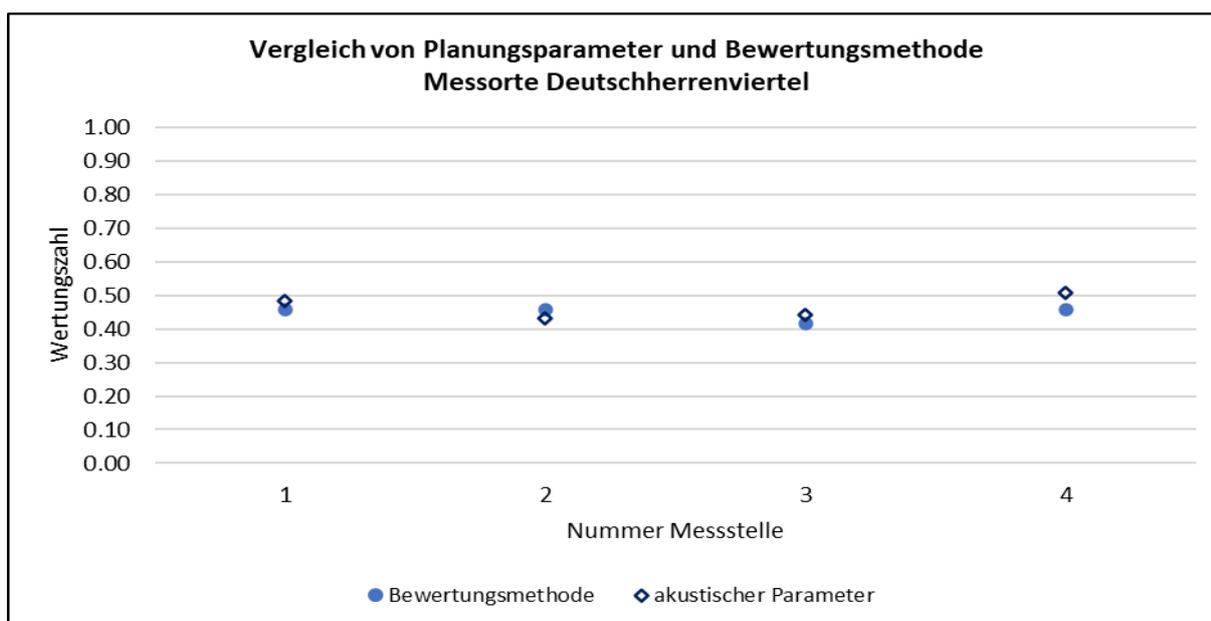


Quelle: Ralf Fiedler

Die Abweichung am zweiten Messort Ec\_02, der an einer Hausecke liegt, lässt sich durch den Einfluss der Seitenstraße erklären. Während der Messungen sorgen vereinzelt abbiegende Fahrzeuge für hohe Schallpegel beim hinteren Mikrofon.

In der Abbildung 63 wird der akustische Parameter mit der Bewertungsmethode an den Messorten De\_01 bis De\_04 im Deutschherrnviertel verglichen, die sich um einen Gebäudekomplex mit Arkaden befinden.

Abbildung 63 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Deutschherrnviertel

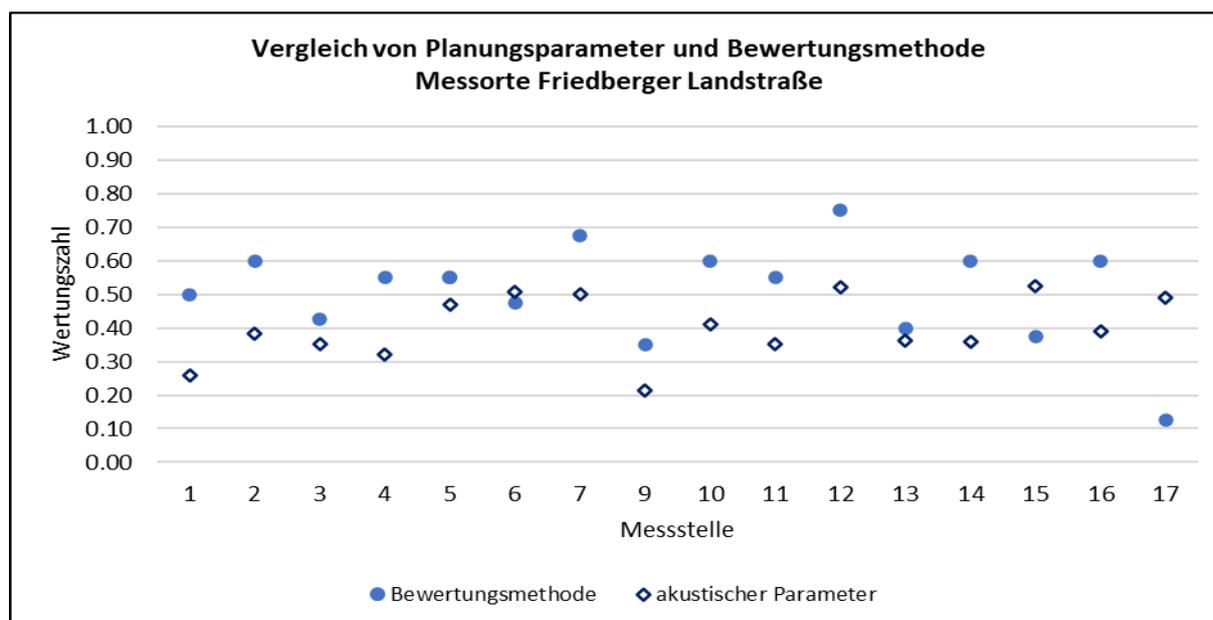


Quelle: Ralf Fiedler

Parameter und Bewertungsmethode liegen an diesen vier Messorten sehr nahe beieinander, woraus abgeleitet werden kann, dass Arkaden bei der Bewertungsmethode passend bewertet werden.

Abschließend folgt der Vergleich an den Messorten Fr\_01 bis Fr\_17 in der Friedberger Landstraße (Abbildung 64). Die Abweichungen von dem akustischen Planungsparameter und der Bewertungsmethode fällt dabei deutlich größer aus. Nur an 4 von 16 Messorten ist eine hohe Übereinstimmung gegeben.

Abbildung 64 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Friedberger Landstraße



Quelle: Ralf Fiedler

Die Abweichung an den ersten zwei Messorten lässt sich durch den Einfluss der Nebenstraße erklären, da sich diese sehr nah an einer großen Kreuzung befinden. Auf der Nebenstraße fahrende Pkw strahlen dabei zu beiden Mikrofonen gleichermaßen Schall ab und reduzieren damit die Pegeldifferenz zwischen den beiden Mikrofonen bei der Messung des Dauerschallpegels.

Generell fallen die Werte des akustischen Planungsparameters in der Friedberger Landstraße geringer aus als erwartet, auch verglichen mit den Ergebnissen der skalierten Messungen, bei denen ähnliche bauliche Situationen untersucht wurden. Am Messort Fr\_16 lässt sich dies durch einen Springbrunnen in der Zone 5 erklären. Hinzu kommt, dass der Stadtraum während der Messung sehr belebt war. Auch hier reduzieren weitere Quellen die Pegelabnahme zwischen den Mikrofonen. Solche Gegebenheiten werden in der Bewertungsmethode nicht berücksichtigt.

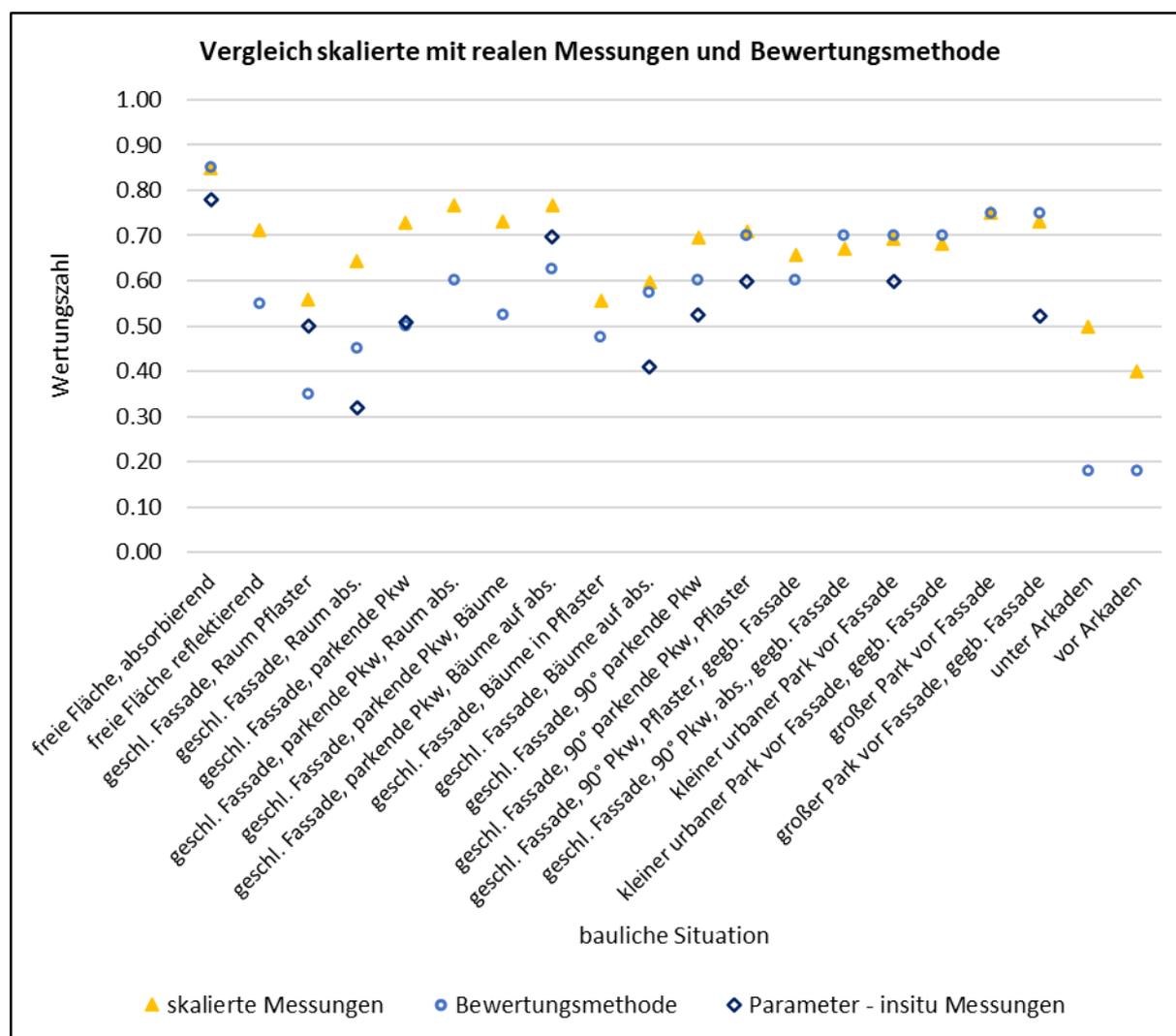
Große Unterschiede gibt es auch am Friedberger Platz, einem urbanen Park mit größerem Abstand zur anschließenden geschlossenen Fassade, an den Messorten Fr\_11 und Fr\_12. Die Werte des Parameters liegen dabei kaum über den Werten, die vor geschlossenen Fassaden mit kurzer Distanz zur Straße gemessen wurden. Die Abweichung zu der Bewertung beträgt dabei etwa 0,20. Möglicherweise sorgen dabei weitere Quellen im hinteren Stadtraum für eine geringere Pegelabnahme, die jedoch bei den Messungen nicht deutlich wahrnehmbar waren.

Umgekehrt ist es am Messort Fr\_17, wo der Messaufbau vor einer straßennahen reflektierenden Glasfassade platziert wurde. Der Parameterwert liegt dabei deutlich über den Erwartungen und der Bewertungsmethode, die eine solche bauliche Situation sehr negativ einstuft. Auch das subjektive Empfinden der akustischen Situation ist an dieser Stelle als unbefriedigend zu bewerten.

## Skalierte Messungen - Vergleich des akustischen Planungsparameters mit der Bewertungsmethode

Die Bewertungsmethode wird auch auf die Versuchsaufbauten der skalierten Messungen angewendet, um zu überprüfen, ob die verschiedenen Einflüsse korrekt bewertet werden. Bei der Feinabstimmung der Bewertungsmethode wurden bereits Erkenntnisse aus den skalierten Messungen miteinbezogen. Das Hauptziel besteht aber in der Vorhersage der Messwerte bei realen Gegebenheiten unter Verwendung des entwickelten Messaufbaus. In Abbildung 65 wird die Bewertungsmethode mit den Messwerten aus den skalierten Messungen bei freier Fläche und vor geschlossener Fassade verglichen. Im Diagramm sind dabei vergleichbare bauliche Situationen aus den in situ Messungen eingetragen.

Abbildung 65 Vergleich Bewertungsmethode mit skalierten Messungen im Maßstab 1:50 – geschlossene Fassade

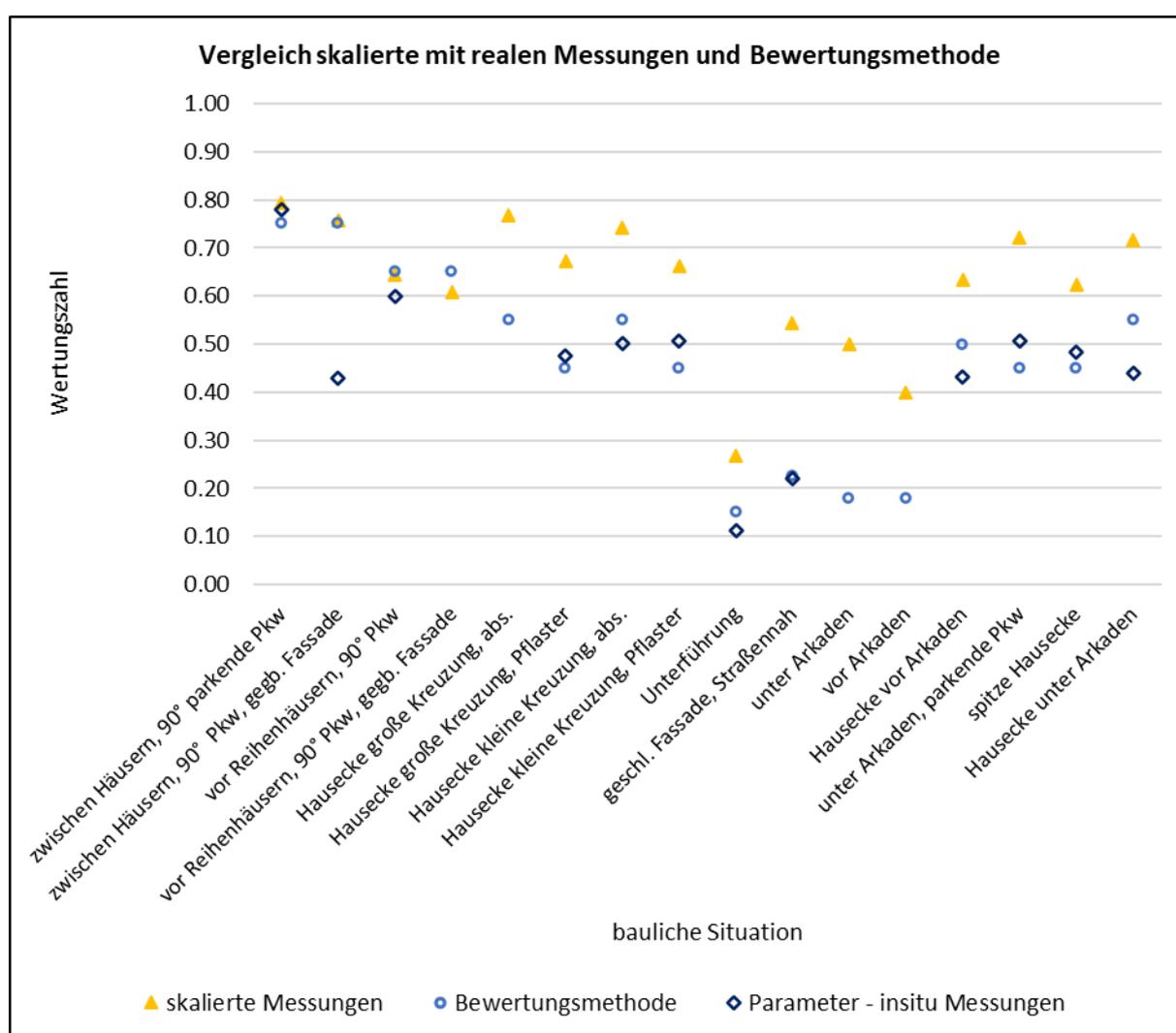


Quelle: Ralf Fiedler

Auf freier Fläche mit absorbierendem Untergrund stimmt die Bewertungsmethode mit dem Wert des Parameters für die skalierten Messungen überein. Gleiches gilt für größere absorbierende Flächen vor einer geschlossenen Fassade, wie an den Beispielen der urbanen Parks zu erkennen ist. Bei Versuchsaufbauten mit reflektierendem Untergrund in der zweiten Zone, fällt die Bewertung deutlich geringer aus als die Messwerte mit einem Unterschied von etwa 0,20. Dennoch verlaufen die Werte aus der Bewertungsmethode etwa parallel zu den Messwerten der skalierten Messungen, wodurch eine Korrelation zu erkennen ist. Sollte die

Bewertungsmethode für die skalierten Messungen optimiert werden, wären reflektierende Flächen in der Bewertungsmatrix aufzuwerten. Der Vergleich mit Beispielen aus den in situ Messungen zeigt, dass diese in der Realität häufig zu geringeren Parameter-Werten führen. Dies kann auch aus der Abbildung 66 entnommen werden, die den weiterführenden Vergleich für nachgestellte urbane Situationen enthält. Hier deckt sich die Bewertungsmethode besser mit den Ergebnissen der in situ Messungen. Den Erwartungen entsprechend fallen die Werte bei den skalierten Messungen unter idealen Bedingungen immer größer aus, wie bei den in situ Messungen. Zusätzliche Quellen im Stadtraum neben den Straßen oder hinter den Gebäuden führen zu einer geringeren Pegelabnahme zwischen den beiden Mikrofonpositionen, die bei den skalierten Messungen ausgeschlossen werden können. Auch ist die Position der Quelle bei den skalierten Messungen genau bekannt, während diese bei den in situ Messungen nur annähernd bestimmt werden kann und davon abhängig ist, welche Fahrbahnsuren während der Messung überwiegend genutzt werden.

Abbildung 66 Vergleich Bewertungsmethode mit skalierten Messungen im Maßstab 1:50 – urbane Situationen



Auch wenn die Messergebnisse zu höheren Werten als bei den in situ Messungen führen, sind skalierte Messungen hilfreich für die Untersuchung einzelner Effekte auf die Schallausbreitung und bei der Planung neuer Gebäude an stark befahrenen Straßen. Die in skalierten Messungen ableitbaren hohen Werte des akustischen Planungsparameters können als konservativer Indikator gesehen werden, da diese in der Realität aufgrund von weiteren Faktoren des Stadtraumes deutlich geringer ausfallen.

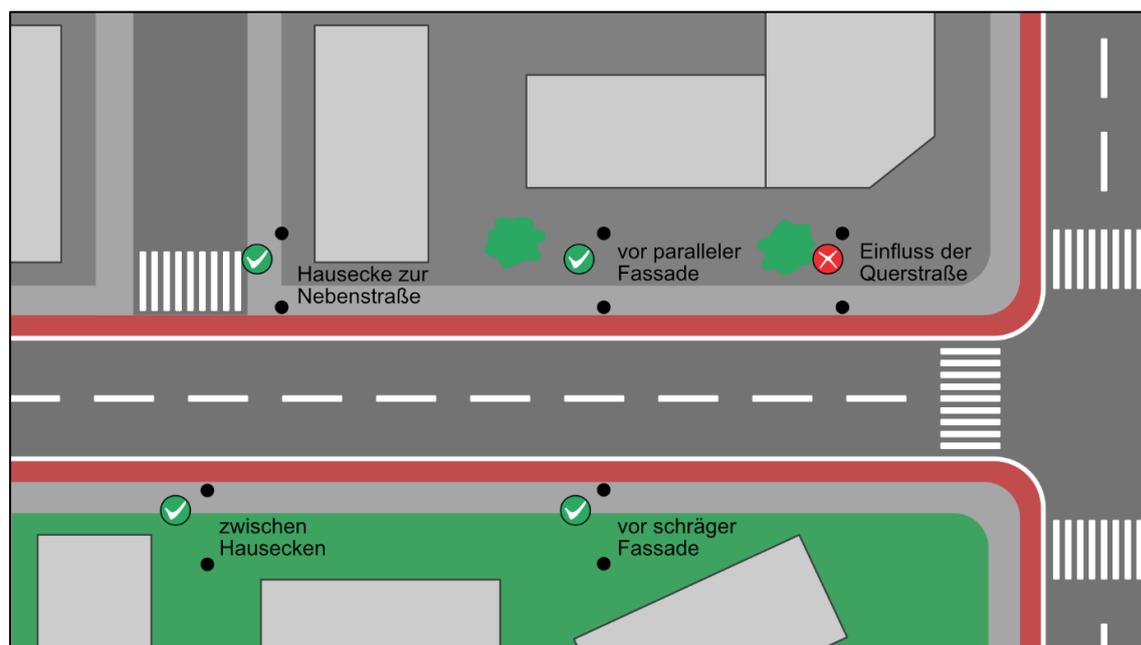
## Der urbane akustische Planungsparameter $P_{xm}$

Nach der Auswertung der Messdaten und den Erkenntnissen aus der Erprobung verschiedener Ansätze zur Entwicklung eines akustischen Planungsparameters wurden die Zwischenergebnisse zum Endergebnis zusammengeführt. Eine Beschreibung des Messaufbaus, die Bildung des endgültigen Parameters, und die vereinfachte Bewertungsmethode werden im Folgenden zusammengefasst.

### Geeignete Messorte des urbanen akustischen Parameters

Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass der Messaufbau für viele bauliche Situationen entlang Straßen wie geplant eingesetzt werden kann (vgl. Abbildung 67). Jedoch gibt es auch Einschränkungen an Orten mit starken Nebenquellen. Nahe an Kreuzungen mit stärker befahrenen Nebenstraßen kann der Versuchsaufbau nicht eingesetzt werden, da der Straßenverkehr auf diesen Fahrspuren den Schall gleichermaßen zum ersten und zweiten Mikrofon abstrahlt. Dies verfälscht das Messergebnis bei längeren Messintervallen, da die Pegelabnahme zwischen den Mikrofonen durch den seitlichen Schalleintrag geringer ausfällt. Diese Stellen können nur dann ausgewertet werden, wenn eine einzelne Vorbeifahrt betrachtet wird und sichergestellt ist, dass auf der Nebenstraße während der Messung keine Fahrzeuge fahren.

Abbildung 67 Einsatzbereiche für den Versuchsaufbau bei Dauerschallmessungen



Quelle: Ralf Fiedler

## Bildung des urbanen akustischer Planungsparameter

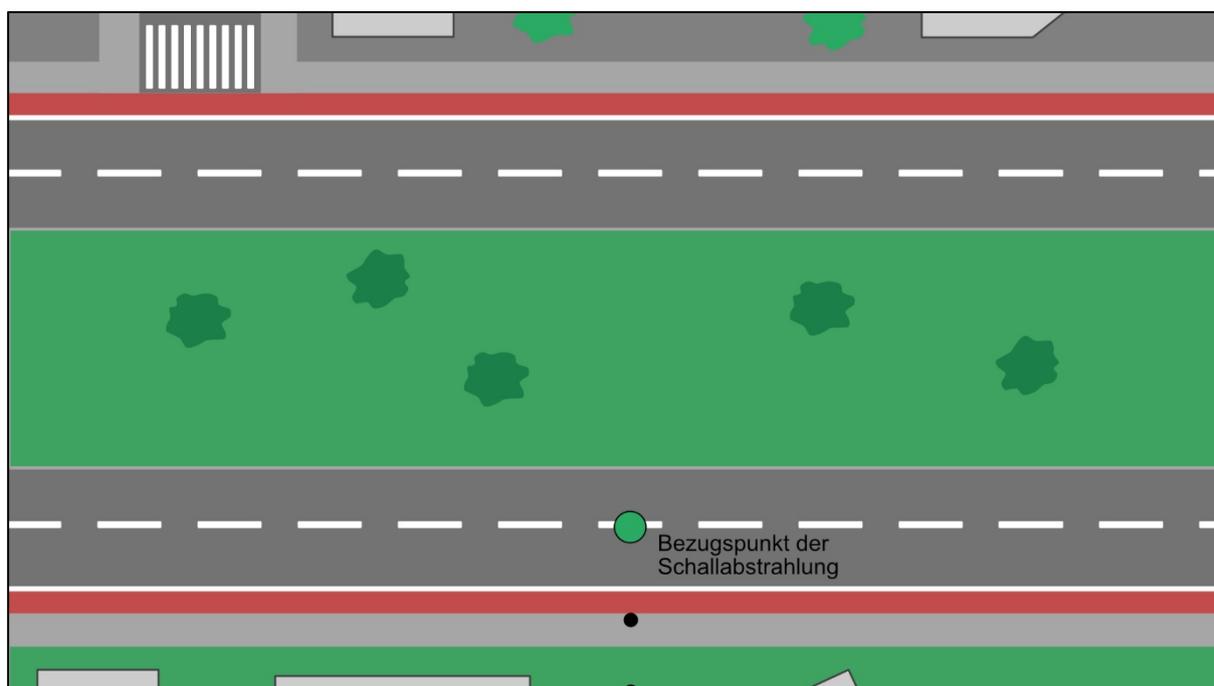
Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nur mit dem Parameteransatz  $P_{xm}$  sich plausible Rückschlüsse auf die akustische Situation im urbanen Raum bei in situ-Messungen ziehen lassen. Die Pegeldifferenz zwischen dem straßennahen Mikrofon und dem entfernteren Mikrofon wird dabei berechnet und mit der Schallausbreitung im Freifeld verglichen nach der Formel:

$$P_{xm} = \frac{L_1 - L_2}{20 \cdot \log\left(\frac{s+a}{a}\right)}$$

Das Ergebnis ist ein dimensionsloser Parameter zwischen den Werten 0 und 1, der aussagt, wie die urbane bauliche Situation die freie Schallausbreitung verhindert und wie stark die Rückreflektionen in den Raum sind. Bei einem Parameterwert von 1,00 entspricht die Schallausbreitung einer Ausbreitung im Freifeld. Bei einer geringeren Pegeldifferenz aufgrund steigender Rückreflektionen durch Begrenzungsflächen, sinkt der Parameterwert ab. Theoretisch lassen sich auch Parameterwerte über 1,00 erreichen, wenn der hintere Raum vom durch den Straßenverkehr abgestrahlten Schall durch Objekte wie Schallschutzwände abgeschirmt wird.

Die Berechnung des Parameters lässt zu, dass die Mikrofone in gewissen Grenzen in einem beliebigen Abstand  $s$  voneinander entfernt aufgestellt werden können. So ist eine Platzierung des zweiten hinteren Mikrofons genau an der Stelle möglich, die zum längeren Aufenthalt von Personen bei der Stadtplanung vorgesehen wurde, z.B. an Parkbänken oder Außenbereichen der Gastronomie. Das erste Mikrofon ist dabei immer an der Bordsteinkante aufzustellen, ein spezielles Raster festgelegter Messpositionen entfällt dabei.

Abbildung 68 Bezugspunkt der Schallabstrahlung bei baulich getrennten Fahrspuren



Quelle: Ralf Fiedler

Der Abstand  $a$ , der die Entfernung zur Schallquelle beschreibt, ist für jede bauliche Situation zu bestimmen. Bei einspurigen oder zweispurigen Straßen ist die Straßenmitte als Abstand zur Quelle zu wählen. Bei mehrspurigen Straßen lässt sich der Abstand zur Quelle nicht pauschal bestimmen und ist von weiteren Faktoren abhängig, z.B. ob die Fahrbahnen voneinander getrennt werden und ob Hindernisse zwischen den Straßen einen Einfluss auf die Schallausbreitung besitzen. Auch das Verhältnis, welche Fahrstreifen während

der Messung am meisten befahren werden, hat dabei einen großen Einfluss. In diesen Fällen ist eine gesonderte Betrachtung erforderlich, in welcher Distanz die Bezugsquelle lokalisiert ist, die über dieses Projekt hinaus geht. Bei der Auswertung der untersuchten Messorte wurde bei mehrspurigen Straßen, die baulich voneinander getrennt waren (siehe Abbildung 68), z.B. durch Bahngleise oder Haltestellen, immer die Straßenmitte der zum Messort näher liegenden Fahrstreifen gewählt.

Da der Straßenverkehrsfluss einen starken Einfluss auf den Parameter hat, ist es nicht ausreichend nur einen  $L_{eq}$ -Wert über einen bestimmten Zeitraum zu messen, der als Eingangsgröße zur Berechnung der Pegeldifferenz dient. Denn fahren nur vereinzelt Fahrzeuge am Messort vorbei, messen beide Mikrofone nur den Hintergrundpegel der Geräusche aus anderen städtischen Quellen, weshalb der Parameterwert gering ausfällt, da die Pegeldifferenzen dann in den Zeiträumen zwischen den Vorbeifahrten gegen 0 dB tendieren. Im Gegenzug führen dicht aufeinander fahrende Fahrzeuge zu einer permanent hohen Pegeldifferenz, die zu einem hohen Parameterwert führt. Gerade im letzteren Fall würde der Parameterwert an einer stark befahrenen Straße suggerieren, dass dort die akustische Qualität tendenziell höher ist, was der Realität zumeist nicht der Fall ist.

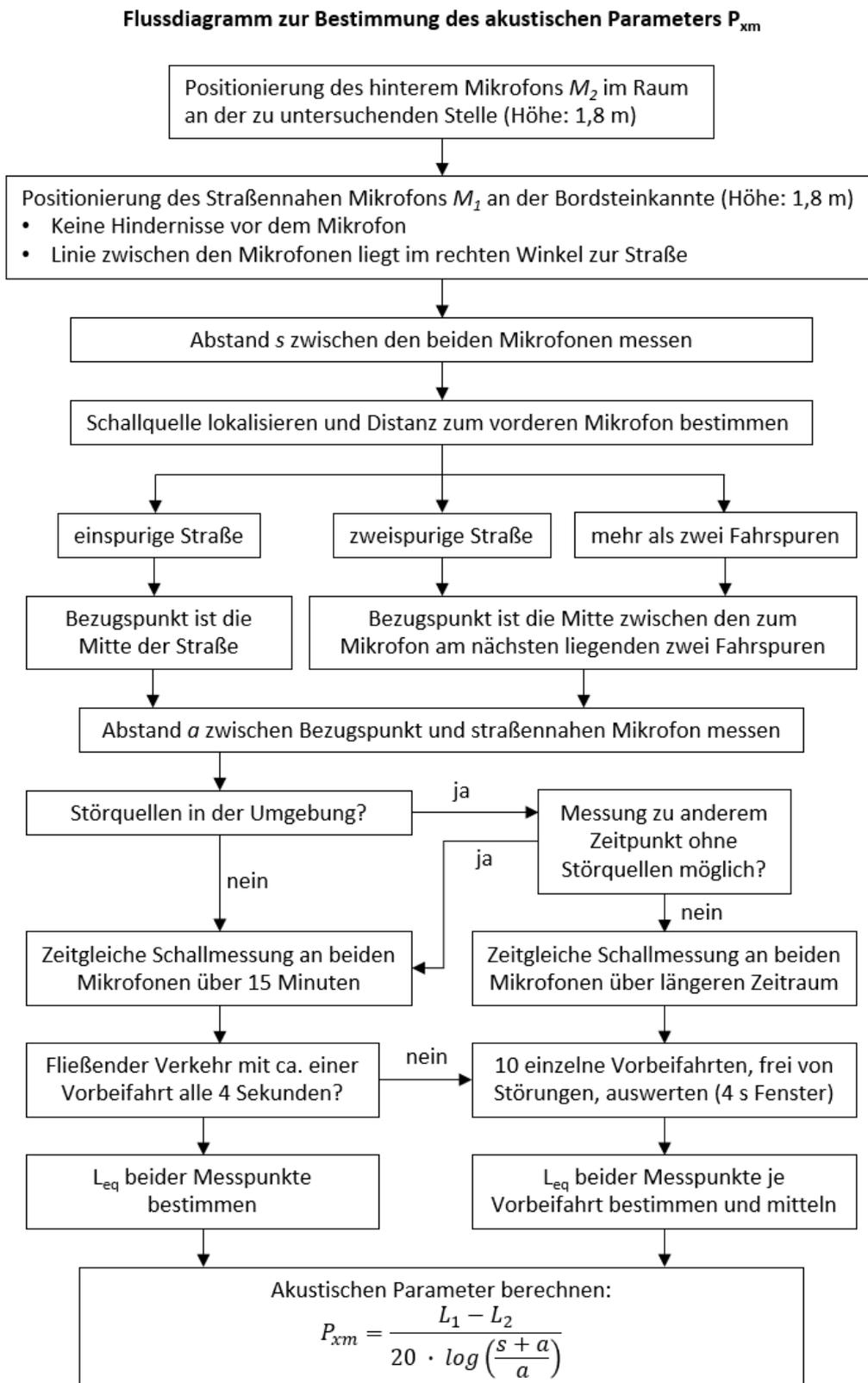
Die Eingangsgrößen für die Messung müssen daher auf einen bestimmten Bereich festgelegt werden, der eine gültige Anzahl von Fahrzeugen in einem Messzeitraum definiert, um unabhängig von der Verkehrsdichte vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Hier ist es durchaus möglich, nur einzelne Vorbeifahrten zu betrachten, jedoch kann dies bei mehrspurigen Straßen zu großen Abweichungen führen, je nach Auslastung der weiteren Fahrstreifen während des Messzeitraums, da die Distanz der Quelle dann für die einzelnen Vorbeifahrten wieder individuell zu bestimmen wäre. Abhilfe schafft dabei den  $L_{eq}$  über einen längeren Messzeitraum, z.B. 15 Minuten zu messen und nur einen Ausschnitt auszuwerten, in dem der Straßenverkehr kontinuierlich fließt. Hierfür bieten sich Intervalle nach Ampelschaltungen an, bei denen die Fahrzeuge häufig in zeitlich vergleichbaren Abständen fahren. Befinden sich die Messorte an Stellen, an denen der Verkehr nicht durch Ampelschaltungen geregelt wird, kann auf einen kurzen Zeitraum zurückgegriffen werden, in dem Fahrzeuge im Abstand von etwa 4 s fahren. Bei sehr gering befahrenen Straßen in Wohngebieten sind einzelne Vorbeifahrten auszuwerten.

Der Messaufbau mit den beiden auf einer Linie orthogonal zur Straße aufgebauten Mikrofonen lässt sich leicht durch weitere Schallquellen im hinteren Stadtraum beeinflussen. Dazu zählen unter anderem Fußgänger, die beim Vorbeilaufen Gespräche führen, bellende Hunde oder Springbrunnen im hinteren Stadtraum. Diese führen zu einem höheren Schallpegel, der am hinteren Mikrofon gemessen wird, der nicht durch die bauliche Situation verursacht ist. Während des Messzeitraums ist daher darauf zu achten, dass diese Störquellen so gering wie möglich ausfallen und nicht im Auswertungszeitraum liegen. Ein kleiner Einfluss durch im weiten Stadtraum auftretenden Geräuschquellen wird sich jedoch kaum verhindern lassen. Wichtig ist hierbei den Messaufbau nur an geeigneten Orten oder zu geeigneten Zeiträumen einzusetzen, wenn der Einfluss durch weitere seitliche oder hintere Quellen gering ausfällt.

Ein möglichst hoher Wert des akustischen Parameters bedeutet, dass sich der Schall größtenteils frei ausbreiten kann. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es an den Orten entsprechend leise ist, oder keine große Pegelschwankungen auftreten, die als besonders störend wahrgenommen werden können. Dafür müssten weitere Betrachtungen der Schalldruckpegel am Immissionsort und weitere psychoakustische Faktoren untersucht werden.

Der Ablauf zur Bestimmung des akustischen Planungsparameters ist in der Abbildung 69 dargestellt:

Abbildung 69 Ablaufschema zur Bestimmung des akustischen Planungsparameters



Quelle: Ralf Fiedler

## Skalierte Messung des urbanen akustischen Planungsparameters

Skalierte Messungen in einem Raum für akustische Messtechnik bieten ideale Bedingungen, um die Wirkung einzelner Faktoren auf die Schallausbreitung zu bestimmen. Störquellen, die das Messergebnis verfälschen könnten, sind dabei ausgeschlossen und es können rein die Schallemissionen der definierten Quelle betrachtet werden. So eignen sich die Messungen im kleineren Maßstab besonders für die Planung neuer Gebäudekonstellationen, an denen keine vergleichbaren Messungen im realen Stadtraum durchgeführt werden können. Modelle lassen sich untereinander gut vergleichen und die Effekte durch Variationen im Bereich zwischen Straße und Fassade lassen sich gut erkennen.

Der für die Messreihe genutzte Maßstab von 1:50 ermöglicht die Untersuchung ganzer Gebäudekomplexe, bringt aber die Nachteile mit sich, dass sehr hohe Frequenzen über 80.000 Hz erzeugt werden müssen. Dafür sind Räumlichkeiten mit einer leistungsstarken Klimatisierung notwendig, um die Luftfeuchtigkeit gering zu halten und die Dämpfung der hohen Frequenzen zu reduzieren. Kleine Ungenauigkeiten bei der Platzierung der Gebäude führen in dem kleinen Maßstab zu großen Abweichungen, weshalb die Messgenauigkeit sinkt. Bei der Betrachtung des bodennahen Bereichs zwischen Straße und Fassade ist ein so kleiner Maßstab nicht unbedingt erforderlich und es würden sich daher Modelle im Maßstab von 1:25 anbieten.

Die besondere Herausforderung ist, dass auch die Dämpfungseigenschaften der eingesetzten Materialien mit skaliert werden müssen. Es ist sicherzustellen, dass die Schallabsorption eines gewählten Materials auch mit den realen Eigenschaften vergleichbar ist und beispielsweise ein gewählter Teppich auch einer Wiese entspricht. Daher bietet es sich an, die Messungen unter fachlicher Betreuung durchzuführen.

Die skalierten Messungen haben kurze Durchlaufzeiten, wenn die Modelle erstellt sind und so lassen sich die Einflüsse vieler kleiner Änderungen mit geringem Zeitaufwand untersuchen. Dies setzt aber voraus, dass der Raum für akustische Messtechnik über eine Schiene verfügt, auf der sich die Quelle bewegt. Ein manueller Versatz der Quelle ist ebenfalls möglich.

Trotz aller Limitierungen ist das skalierte Messverfahren in der Akustik ein sehr gut anwendbares Verfahren in Bau- und Planungsprozessen, das leider bisher so gut wie nie zur Anwendung kommt. Eine Integration skalierten Messungen in Designprozesse, wie sie zum Beispiel im Bereich der Aerodynamik für Hochhäuser schon üblich ist, wäre sehr zu begrüßen.

## Bewertungsmethode des urbanen akustischen Planungsparameters

Mit der entwickelten Bewertungsmethode kann der Wert des akustischen Parameters auch ohne eine Messung grob vorhergesagt werden. Die hier vorgestellte Messreihe hat gezeigt, dass eine Bestimmung der Parameterwerte an etwa 50 % der Messorte mit einer hohen Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit möglich ist. Da die Grundlage der Bewertungsmethode aus dem Unterschied zwischen den beiden Mikrofonpositionen besteht, ist die Anwendung nur in städtebaulichen Situationen möglich an denen sich ein Unterschied in den akustischen Werten an den Messpositionen darstellen könnte. Das heißt, Situationen mit Schall aus unterschiedlichen Richtungen, wie etwa Kreuzungsbereiche lassen sich messtechnisch nicht präzise erfassen, da zum Beispiel ein um die Kreuzungsecke fahrendes Fahrzeug seitlich an beiden Mikrofonpositionen zeitgleich annähernd gleiche Pegel erzeugt. Es ist natürlich möglich diese Bereiche auch zu bewerten, jedoch lassen diese sich dann nicht auf Messungen zurückführen. Nach Einschätzung der Autoren kann aber auch für eine nicht messbare städtische Situationen eine einschätzende Aussage getroffen werden, da zum Beispiel städtische Räume mit stark absorbierenden Fassaden oder Begrünung in der Bewertung zu einem positiven Wert führen und auch einen städtischen Raum in der Benutzung darstellen, der positiv zu bewerten ist.

Für eine Einschätzung anhand der Bewertungsmethode müssen nur die beschriebenen Zonen der städtischen Regelsituationen zwischen der Straße und der Fassade richtig zugeordnet werden. Für eine noch genauere Einstufung und geringere Abweichungen zu den gemessenen Werten müssten bei der Bewertung noch mehr Faktoren hinzugezogen werden, wodurch die Komplexität für den Nutzer steigen würde.

Mit der Bewertungsmatrix (s. Tabelle 9) können nicht nur bestehende Situationen auf akustische Eigenschaften untersucht werden, sondern es lassen sich bei der Planung neuer Gebäude gewisse Eigenschaften gezielt auswählen, um reduzierte Schallreflektionen zu erhalten. So ist es möglich, durch die Kombination verschiedener Zonen samt deren Eigenschaften einen bei der Planung vorgegebenen Wert zu erzielen. Der Parameterwert aus der Bewertungsmethode sollte jedoch entweder durch skalierte Messungen oder durch in situ Messungen an vergleichbaren Gebäudesituationen überprüft werden, da diese Methoden zwar aufwendiger sind, aber eine höhere Genauigkeit aufweisen. Dennoch erhalten Architekten mit der Bewertungsmatrix eine Auswahl von Kombinationsmöglichkeiten, die zu einer besseren akustischen Qualität in Städten führen und Hinweise geben welche städtebaulichen Situationen verbessert werden könnten

## Die Praxis – ein Fazit

Der hier vorgestellte urbane akustische Planungsparameter  $P_{xm}$  stellt einen neuen Beurteilungswert vor, der nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Aussagen über die akustischen Bedingung von urbanen Räumen entlang Straßen ermöglicht. Die quantitative Aussage von Lautstärkepegeln, wie sie aus der Lärmkartierung bekannt ist, wird damit durch eine Information zu den Oberflächen und wie sich daraus eine akustische Qualität bildet, ergänzt. In Messungen vor Ort wird der Parameter  $P_{xm}$  aus der Differenz der Meswerte von zwei Mikrofonpositionen im untersuchten Stadtraum bestimmt. Als Grundlage zur Anwendung, auch ohne Messungen, wurde eine Bewertungsmethode entwickelt, die davon ausgeht, dass ein urbaner Raum, der sich aus absorbierenden Begrenzungsflächen ergibt, eine hohe akustische Qualität aufweist. Im Gegensatz dazu steht ein urbaner Raum, der sich innerhalb stark reflektierender Flächen bildet, für eine niedrige akustische Qualität. Über die Bildung eines gewichteten Verhältnisses der umgebenden Flächenanteile und ihrer Absorptionsfähigkeit, wird ein Einzahlwert gebildet, der eine sehr gute Übereinstimmung zu messtechnisch ermittelten Werten des Planungsparameters  $P_{xm}$  aufzeigt. Durch die kontextuelle Bildung des Parameters wird der urbane akustische Raum als Planungsgegenstand eingeführt.

Grundlage der hier vorgestellten Untersuchungen ist die städtische Bebauung entlang von Straßen, die einen Großteil der Bebauungssituationen unserer Städte abbildet. In der Weiterentwicklung des Planungsparameters sollte die Ausweitung der Anwendbarkeit auf komplexe räumliche Konfigurationen, wie z.B. Kreuzungsbereiche und nicht parallele Verläufe von Fassade und Straße vertieft untersucht werden. Der Parameter wird zwar ausschließlich im Kontext der umgebenden Begrenzungsflächen eines urbanen Raumes entwickelt, jedoch wird durch die Differenzbildung zwischen zwei Mikrofonpositionen die Quelle nicht im Wert des Planungsparameters ablesbar. Pegelmindernde Maßnahmen, wie Flüsterasphalt oder Elektroantriebe im Bereich der Straße werden durch den Parameter  $P_{xm}$  bisher nicht wiedergespiegelt, da sich der urbane akustische Planungsparameter ausschließlich auf die baulichen Gegebenheiten der Gebäude und die Oberflächenqualitäten bezieht. In weiteren Untersuchungen könnte der Parameter  $P_{xm}$  durch einen Eingangspegelbeiwert ergänzt werden um die Themen der Lärminderung an der Quelle mitzuerfassen.

In der Anwendung der beiden Ansätze von Messung und Bewertungsmethode ist der urbane akustische Planungsparameter in gleicher Weise geeignet für die kleinteilige akustische Planung urbaner Räume, sowie für eine akustische Gesamtbetrachtung von Städten. Besonders hier müssen neue Wege beschritten werden, da eine Stadt nicht insgesamt leiser werden kann. Es wird immer Bereiche im städtischen Raum geben, die durch Bündelung von notwendiger Infrastruktur eine akustisch unangenehme, laute Umgebung bedingen. In diesem Kontext kann das Potential für akustische Interventionen durch eine Ermittlung des Planungsparameters nach der Bewertungsmethode niederschwellig, auch ohne Messungen identifiziert werden und die Planung frühzeitig gesteuert werden. Eine Möglichkeit der Anwendung der Bewertungsmethode kann der Parameter  $P_{xm}$  als Qualitäts- bzw. Bewertungsmerkmal im Immobiliensektor für eine akustisch angenehme Wohn- oder Büroumgebung sein. Weitere Möglichkeiten der Anwendung bietet die Implementierung in Software zur Berechnung von Schallimmissionen oder in Augmented Reality Systemen (AR Brillen), mit den sich die Umgebung erfassen, untersuchen und dokumentieren lässt.

Die Beispiele machen deutlich, dass der urbane akustische Planungsparameter  $P_{xm}$  in seiner intialen Version großes Entwicklungspotential zeigt und niederschwellig in Prozesse der Bewertung und Planung von urbanen Räumen eingeführt werden kann. Um den Planungsparameter  $P_{xm}$  der Zielgruppe der Planenden von leiseren Städten vorzustellen und in der Praxis zu etablieren, wird im Nachgang des Forschungsvorhabens nach Pilotprojekten gesucht.

Mit den hier vorgestellten Forschungsergebnissen, wird die Lücke zwischen den Schallpegeleinzahlwerten und den komplexen Anforderungen von Planungsbelangen im Kontext von Nachverdichtung und Bevölkerungswachstum, durch den urbanen akustischen Planungsparameter  $P_{xm}$  geschlossen. Die Forschenden, sowie die Autorinnen und Autoren sind der Überzeugung, dass mit einer breiten Anwendung des Planungsparameters  $P_{xm}$  die Planung leiserer Städte schon jetzt ohne komplexe Berechnungen möglich ist.

---

## Mitwirkende

### Autorinnen und Autoren

Krimm, Jochen	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 1)
Techen, Holger	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 1)
Marschner, Holger	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 2)
Büdding, Yvonne	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 1 und 2)
Fiedler, Ralf	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 2)

### Weitere Mitwirkende

Bartolomaeus, Wolfram	(Bundesanstalt für Straßenwesen)
Douglas, James	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 1)
Thomas Steigler	(Frankfurt University of Applied Sciences, Fachbereich 1)

### Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

BRÜGGEMANN KISSELER INGENIEURE

i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

## Kurzbiographien



### **Prof. Dr.-Ing. Holger Techen**

ist seit 2006 Professor an der Frankfurt UAS. Er lehrt im Studiengang Architektur Tragwerklehre und Baukonstruktion und forscht seit 2011 am Frankfurter Forschungsinstitut für Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik (FFin). Die Forschungsschwerpunkte sind: Akustik im Stadtraum; Entwicklung akustisch wirksamer Fassaden, die den Stadtraum leiser werden lassen. Entwicklung praxisnaher Messmethoden, die der Evaluierung derartiger Fassadenentwicklungen dienen. Bestimmung von Planungsparametern für das akustisch wirksame Bauen im urbanen Kontext. Grünfassadensysteme als Maßnahme der energetischen Fassadenertüchtigung.



### **Prof. Dipl.-Ing. Holger Marschner**

Prof. Dipl.-Ing. Holger Marschner ist seit März 2015 an der Frankfurt UAS zuständig für Lehre und Forschung auf den Gebieten Kraftfahrzeugtechnik und Noise Vibration Harshness (NVH) sowie für die Leitung der Kfz- und NVH-Labore. Er ist als Autor zahlreicher Publikationen und Fachvorträge und als Chairman internationaler Tagungen bekannt. Neben seinen universitären Tätigkeiten ist Prof. Marschner Fachgremiumsmitglied „Straßenverkehrsunfälle“ der IHK Darmstadt Rhein Main Neckar und Arbeitskreisleiter „Fahrzeug- und Verkehrstechnik (FVT)“ des VDI-Bezirksvereins Frankfurt-Darmstadt.



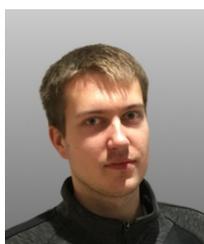
### **Dr. Jochen Krimm**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich 1 der Frankfurt UAS. Neben Lehraufträgen im Bereich Konstruktion und Entwurf sowie im Bereich Barrierefreie Systeme forscht er seit 2011 am Frankfurter Forschungsinstitut für Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik (FFin) sowie am interdisziplinären Lärm und Schall Kompetenzzentrum Fachbereich 1 und Fachbereich 2 der Frankfurt UAS. Die Forschungsschwerpunkte sind urbane Akustik und Gebäudebegrünungssysteme



### **B. Eng. Yvonne Büdding**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Fachbereichs 1 Architektur und Bauingenieurwesen und Masterandin des allgemeinen Maschinenbaus an der Frankfurt University of Applied Sciences mit dem Schwerpunkt im Bereich Akustik.



### **M. Eng. Ralf Fiedler**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Frankfurt University of Applied Sciences. Absolvent des Masterstudienganges allgemeiner Maschinenbau mit den Studienschwerpunkten Automobiltechnik und Produktentwicklung.



---

## Literaturverzeichnis

- [1] N. u. N. S. Bundesministerium für Umwelt, „Umwelt im Unterricht, Aktuelle Bildungsmaterialien, Stadt, Schall, Lärm,“ 28.05.2014. [Online]. Available: <https://www.umwelt-im-unterricht.de/hintergrund/stadt-schall-laerm/>. [Zugriff am 11.2022].
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN ISO 362-1:2017-10 Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 - Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [3] Frankfurt University of Applied Sciences, Stadt Frankfurt am Main. Der Magistrat Dezernat X: Umwelt und Gesundheit, „Akustische Wirksamkeit von Fassadenoberflächen und -strukturen im Hinblick auf eine akustische Bewertung des Außenraumes/Stadtraumes an der Empfängerposition – Bestimmung von Transformationseffekten,“ Forschungsinitiative Zukunft Bau, Projekt-Nr.:10.08.18.7-16.26, 2019.
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 45642:2004-06 Messung von Verkehrsgeräuschen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V., *EN ISO 11819-1:2002-05 Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 1: statistisches Vorbeifahrtverfahren*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [6] ISO Internationale Organisation für Normung, *ISO 11819-4:2013-03 Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 4: Statistisches Vorbeifahrtverfahren unter Verwendung einer Abschirmplatte (backing board)*, 2013.
- [7] Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission für die Bewertung von Lärmbelastigungen (WG-AEN), „Positionspapier - Leitfaden zu den Best Practices für die strategische Lärmkartierung und die Zusammenstellung entsprechender Daten zu Lärmexposition,“ Brüssel Belgien, 2006.
- [8] A. Enderich et al., *Handbuch Fahrzeugakustik*, P. Zeller, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012.
- [9] W. B. J. Krimm, „Vergleich von verschiedenen Messverfahren für Fassadenoberflächen,“ DAGA - Jahrestagung für Akustik, Rostock, 2019.
- [10] S. U. e. Al., „Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen,“ BASt, 1996. [Online]. Available: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/887/file/S11end.pdf>. [Zugriff am 11.2022].
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 16283-3:2016-09 Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 3: Fassadenschalldämmung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [12] B. S.-F. S. M. D. S. R. W. André Fiebig, „Wie klingt die Stadt der Zukunft?,“ *Akustik Journal*, p. 12, Februar 2021.
- [13] BASt, „bast.de - Verkehrstechnik,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, [Online]. Available: <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Technik/Akustikhalle.html?nn=1820336>. [Zugriff am 28.09.2022].
- [14] J. Douglas, „Urban acoustics and architectural façade design implementation,“ Frankfurt University of Applied Sciences, 2022.

- [15] VDI, VDI 2225 Blatt 3: 1998-11 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Beuth Verlag, 1998.
- [16] CEN/TS 1793-5 "Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 5: Intrinsic characteristics - In-situ values of sound reflection and airborne sound insulation", 2003, CEN

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Messpositionen bei den Insitu-Messreihen an der Friedberger Landstraße zur Entwicklung einer Messanordnung (Draufsicht).....	15
Abbildung 2: Schalldruckpegeldifferenzen zwischen der straßennahen Normposition NP und In3 bzw. In4 bei einer Breite von 0 m .....	16
Abbildung 3: Schalldruckpegeldifferenzen zwischen der straßennahen Normposition NP und In3 bzw. In4 und NP1 bei einer Breite von 3 m .....	16
Abbildung 4: Schalldruckpegeldifferenzen zwischen IN3 bzw. In4 und NP1 bei einer Breite von 6 m .....	16
Abbildung 5: Differenzen der Mittelwerte zwischen den Terzspektren von In3 bzw. In4 zu In1 bei Vorbeifahrten einer Messanordnung .....	17
Abbildung 6: In situ Messungen mit der Anordnung von einem Mikrofon vor einem Backingboard an der Friedberger Landstraße in Frankfurt.....	18
Abbildung 7: Vorbeifahrtmessung eines Elektro-Kleinwagens während der Freifeldmessung auf dem ehemaligen August-Euler-Flugplatz 2021 .....	19
Abbildung 8: Messanordnung der Freifeldmessung auf dem ehemaligen August-Euler-Flugplatz 2021 .....	19
Abbildung 9: Terzspektren gemittelt über 4 s einer Vorbeifahrt von verschiedenen Fahrzeugen bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition).....	20
Abbildung 10: Pegel-Zeit-Verläufe der Vorbeifahrten verschiedener Fahrzeuge bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition) .....	21
Abbildung 11 Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten bei verschiedener Fahrgeschwindigkeit bei der Freifeldmessung 2021 in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle des E-Autos (Normposition).....	21
Abbildung 12 Terzspektren gemittelt über 4 s einer Vorbeifahrt des E-Autos von verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten bei der Freifeldmessung in 7,5 m Entfernung zur Schallquelle (Normposition) .....	22
Abbildung 13: Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten unterschiedlicher Messpositionen bei der Freifeldmessung 2021 .....	22
Abbildung 14: Pegelzeit-Verläufe der Vorbeifahrten unterschiedlicher Messpositionen bei der Freifeldmessung 2021 .....	22
Abbildung 15: Vergleich zwischen der geometrischen Anordnung für Material/Oberflächen bezogenen Messungen (Schnittzeichnung oben) und Quellen bezogene Messungen (Schnittzeichnung unten).....	24
Abbildung 16 Anordnung der Mikrofone für die Messung der Schallausbreitung.....	25
Abbildung 17 Differenzen der Messdaten von 2021 und 2022 anhand der Differenzen äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs von straßennahen zur straßenfernen Messposition.....	29
Abbildung 18 Darstellung der aus den Messdaten gewonnenen Kennwerte zur Erfassung von Vorbeifahrten .....	30
Abbildung 19: Unbewerteter Pegel-Zeit-Verlauf der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung	32
Abbildung 20: Ergebnis Pegel Zeit Verlauf $L_{AF(Fast)}$ mit einer Zeitbewertung Fast (125 ms) und einem A-bewerteten Filter.....	32
Abbildung 21: Ergebnis Pegel Zeit Verlauf $L_{AS(Slow)}$ mit einer Zeitbewertung Slow (1s) und einem A-bewerteten Filter .....	33

---

Abbildung 22: Terzspektrum mit Maximalpegel bei 1 kHz der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung .....	33
Abbildung 23: LAS-Zeit-Verlauf mit Hoch- und Tiefpassfilter mit Grenzwerten von 1 kHz der In situ-Messung zur Entwicklung einer Messanordnung .....	34
Abbildung 24: Darstellung einzelner Vorbeifahrten durch triggern lokaler Maxima im LAS-Zeit-Verlauf .....	34
Abbildung 25: 10 Sekunden-Abschnitte mit einzelnen Vorbeifahrten im LAS-Zeit-Verlauf .....	35
Abbildung 26: Einzelne Vorbeifahrten nach Trigger-Auswertung im LAS-Zeit-Verlauf .....	35
Abbildung 27: Pegel-Zeit-Verlauf in MatLab.....	36
Abbildung 28: Anwendung des Gauß'schen Filters auf den Pegel-Zeit-Verlauf in MatLab .....	36
Abbildung 29: Ausgabe der lokalen Maxima in MatLab.....	37
Abbildung 30: Differenz-Schalldruckpegel-Zeit-Verläufe von sieben Vorbeifahrten am Messort Ec08 des straßennahen Mikrofons .....	37
Abbildung 31 Differenz-Terzspektren von zehn sieben Vorbeifahrten am Messort Ec08 des straßennahen Mikrofons .....	38
Abbildung 32: Pegel-Zeit-Verläufe der 1 kHz Terz der automatisiert erkannten akustischen Signale durch Filterung lokaler Maxima.....	39
Abbildung 33: Darstellung der benötigten Größen zur Filterung nach signifikanten Pegelanstiegen im Pegel-Zeit-Verlauf eines akustischen Signals .....	40
Abbildung 34: Ablaufdiagramm der automatisierten Erkennung von vergleichbaren Vorbeifahrten.....	41
Abbildung 35: Lautheit des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons .....	44
Abbildung 36: Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons .....	44
Abbildung 37 Differenz-Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel des fließenden Verkehrs des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons .....	45
Abbildung 38 Pegeldifferenzen der äquivalenten Dauerschallpegel der Mittelwerte über zehn vergleichbare Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons .....	46
Abbildung 39 Pegeldifferenzen des Mittelwertes über zehn Maximalpegel vergleichbarer Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons .....	46
Abbildung 40 Differenz-Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel von Mittelwerten über zehn vergleichbare Vorbeifahrten des straßennahen Mikrofons und des straßenfernen Mikrofons.....	47
Abbildung 41 NDSI-Indexe berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs.....	48
Abbildung 42 NDSI-Indexe berechnet aus den Mittelwerten der äquivalenten Dauerschallpegeln von zehn Vorbeifahrten pro Messort .....	48
Abbildung 43 Parameter $P_{3m}$ berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs ..	51
Abbildung 44 Parameter $P_{3m}$ berechnet aus den Mittelwerten äquivalenter Dauerschallpegeln von zehn vergleichbaren Vorbeifahrten .....	51
Abbildung 45 Parameter $P_{3m}$ berechnet aus den Mittelwerten der Pegelmaxima von zehn vergleichbaren Vorbeifahrten .....	51

---

Abbildung 46 Parameter P3m und P8m berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs.....	52
Abbildung 47 Parameter P <sub>6m</sub> berechnet aus den äquivalenten Dauerschallpegeln des fließenden Verkehrs ..	53
Abbildung 48 Parameter P <sub>5,5m</sub> der Vorbeifahrten im Freifeld zur Verifizierung der Parameterberechnung .....	54
Abbildung 49 Unterteilung des Bereichs von der Straße zur Fassade in Zonen .....	56
Abbildung 50 Messort in einer Unterführung, ohne die Zonen 4 und 5 .....	56
Abbildung 51 Messort mit Grünstreifen in den Zonen 2, 4 und 5 .....	57
Abbildung 52 Druckluftschallerzeuger auf einem Schlitten – Halle für akustische Messtechnik (BAST) .....	58
Abbildung 53 Building Blocks für die Gebäudemodelle der skalierten Messungen .....	59
Abbildung 54 Beispiel einer Gebäudeanordnung aus den Building Blocks.....	59
Abbildung 55 Versuchsaufbauten vor Häuserreihe mit geschlossener Fassade.....	60
Abbildung 56 Versuchsaufbauten nachgestellter Gebäudeanordnungen .....	61
Abbildung 57 Auswertung der skalierten Messungen im Maßstab 1:50 .....	62
Abbildung 58 Netzdiagramm als Fingerabdruck der Messorte nach Vergabe der Wertungszahlen .....	66
Abbildung 59 Messort Ec_08 in der Eckenheimer Landstraße.....	67
Abbildung 60 Verteilung der akustischen Wertigkeit der untersuchten urbanen Orte .....	69
Abbildung 61 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Mörfelder Landstraße .....	70
Abbildung 62 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Eckenheimer Landstraße .....	71
Abbildung 63 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Deutschherrnviertel .....	71
Abbildung 64 Vergleich Planungsparameter mit Bewertungsmethode – Friedberger Landstraße .....	72
Abbildung 65 Vergleich Bewertungsmethode mit skalierten Messungen im Maßstab 1:50 – geschlossene Fassade .....	73
Abbildung 66 Vergleich Bewertungsmethode mit skalierten Messungen im Maßstab 1:50 – urbane Situationen .....	74
Abbildung 67 Einsatzbereiche für den Versuchsaufbau bei Dauerschallmessungen .....	75
Abbildung 68 - Bezugspunkt der Schallabstrahlung bei baulich getrennten Fahrspuren .....	76
Abbildung 69 Ablaufschema zur Bestimmung des akustischen Planungsparameters .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der Untersuchungsgebiete	12
Tabelle 2: Beschreibung der Fahrzeuge bei der Freifeldmessung	20
Tabelle 3 Gemessene Orte im Rahmen der In situ-Messungen 2021 sowie 2022, und den skalierten Messungen in der Bundesanstalt für das Straßenwesen (BAST), die im weiteren Verlauf als Datengrundlage verwendet wurden.	26
Tabelle 4 Betrachtete Ansätze zur Entwicklung eines Planungsparameters	42

---

Tabelle 5 Informationen zu den Messorten, deren Daten zur Veranschaulichung von potenziellen Parameteransätzen genutzt wurden	43
Tabelle 6 Informationen zu den Vorbeifahrten im Freifeld, die für die Verifizierung der Parameterberechnung genutzt wurden	54
Tabelle 7 Erster Entwurf einer Messortbewertung durch fünf Zonen an dem Beispiel zweier Messorte	55
Tabelle 8 Werteskala nach VDI 2225	64
Tabelle 9 Bewertung der einzelnen Zonen nach Eigenschaften	64
Tabelle 10 Gewichtung der Zonen	66
Tabelle 11 Bewertung des Messorts Ec_08 in der Eckenheimer Landstraße	68
Tabelle 12 Ergebnisse und Fotos der Messorte der in situ Messungen	92
Tabelle 13 Ergebnisse und versuchsaufbauten skalierte Messungen	105

## Anlagen

- Anhang 1 – Ergebnisse und Fotos der Messorte der in situ Messungen
- Anhang 2 – Ergebnisse und Versuchsaufbauten skalierte Messungen

## Anhang 1 – Ergebnisse und Fotos der Messorte der in situ Messungen

In der Tabelle 12 sind die Messorte der in situ Messungen aufgeführt mit einem Foto des Messorts und den GPS-Koordinaten. Der Wert der Bewertungsmethode ist zum Vergleich angegeben.

Tabelle 12 Ergebnisse und Fotos der Messorte der in situ Messungen

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Mo_01	50°05'09.5"N 8°39'52.1"O	0,78	0,78	
Mo_02	50°05'10.0"N 8°39'51.9"O	0,77	0,73	
Mo_03	50°05'14.8"N 8°40'00.5"O	0,63	0,50	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Mo_04	50°05'17.9"N 8°40'07.3"O	0,40	0,55	
Mo_05	50°05'18.7"N 8°40'08.1"O	0,11	0,13	
Mo_06	50°05'20.8"N 8°40'11.6"O	0,28	0,45	
Mo_08	50°05'32.7"N 8°40'35.5"O	0,43	0,75	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Mo_10	50°05'33.0"N 8°40'36.4"O	0,60	0,65	
Mo_11	50°05'34.6"N 8°40'39.6"O	0,78	0,75	
Mo_13	50°05'35.2"N 8°40'37.5"O	0,71	0,50	
Mo_14	50°05'43.3"N 8°40'54.2"O	0,61	0,65	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Mo_16	50°05'43.6"N 8°40'55.4"O	0,60	0,73	
Mo_17	50°05'55.1"N 8°41'14.8"O	0,62	0,53	
Mo_18	50°05'55.7"N 8°41'51.6"O	0,46	0,40	
Ec_01	50°07'53.4"N, 8°41'01.3" O	0,10	0,45	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Ec_02	50°07'48.2"N, 8°41'01.8" O	0,54	0,68	
Ec_03	50°07'48.7"N, 8°41'03.4" O	0,54	0,60	
Ec_04	50°07'42.2"N, 8°41'04.8" O	0,46	0,53	
Ec_05	50°07'41.8"N, 8°41'03.7" O	0,48	0,50	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Ec_06	50°07'38.6"N, 8°41'07.7" O	0,68	0,65	
Ec_07	50°07'35.5"N, 8°41'09.3" O	0,29	0,53	
Ec_08	50°07'32.1"N, 8°41'10.2" O	0,70	0,65	
Ec_09	50°07'31.5"N, 8°41'10.4" O	0,51	0,50	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Ec_10	50°07'30.7"N, 8°41'10.9" O	0,53	0,50	
Ec_11	50°07'27.9"N, 8°41'11.4" O	0,22	0,23	
Ec_12	50°07'16.9"N, 8°41'10.5" O	-	0,70	
Ec_13	50°07'16.9"N, 8°41'09.8" O	0,64	0,63	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
De_01	50°06'16.1"N 8°42'11.5"O	0,48	0,50	
De_02	50°06'16.0"N 8°42'10.8"O	0,43	0,50	
De_03	50°06'16.0"N 8°42'10.6"O	0,44	0,45	
De_04	50°06'16.0"N 8°42'10.2"O	0,51	0,50	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
De_09	50°06'16.5"N 8°41'59.3"O	0,17	0,50	
Fr_01	50°07'06.7"N 8°41'21.3"O	0,26	0,50	
Fr_02	50°07'07.0"N 8°41'21.3"O	0,38	0,60	
Fr_03	50°07'08.7"N 8°41'21.3"O	0,35	0,43	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Fr_04	50°07'10.8"N 8°41'22.9"O	0,32	0,55	
Fr_05	50°07'10.8"N 8°41'22.9"O	0,47	0,55	
Fr_06	50°07'14.8"N 8°41'25.0"O	0,51	0,48	
Fr_07	50°07'17.0"N 8°41'27.2"O	0,50	0,68	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Fr_09	50°07'20.4"N 8°41'27.3"O	0,21	0,35	
Fr_10	50°07'23.3"N 8°41'29.2"O	0,41	0,60	
Fr_11	50°07'23.3"N 8°41'31.1"O	0,35	0,55	
Fr_12	50°07'24.0"N 8°41'30.8"O	0,52	0,75	

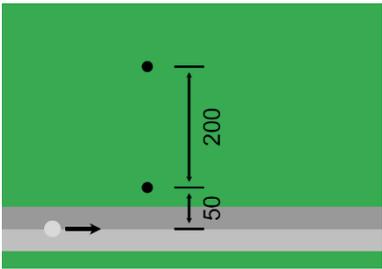
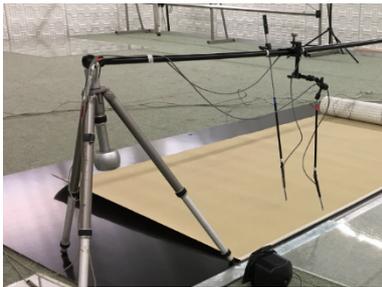
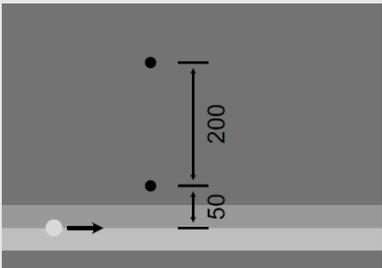
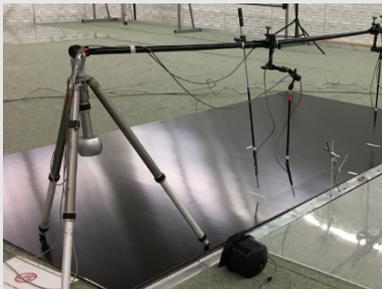
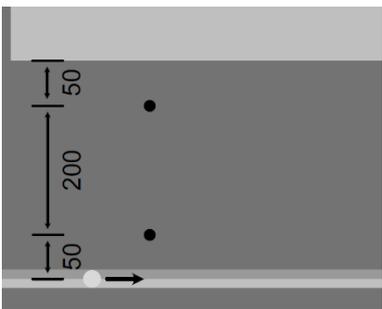
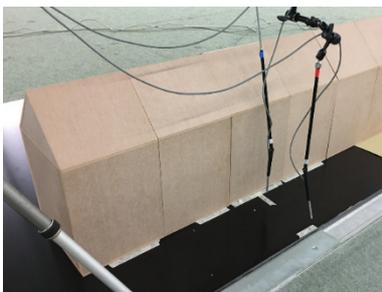
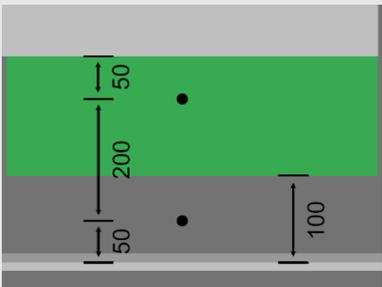
Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Fr_13	50°07'31.2"N 8°41'31.2"O	0,36	0,40	
Fr_14	50°07'32.7"N 8°41'30.2"O	0,36	0,60	
Fr_15	50°07'33.3"N 8°41'31.4"O	0,52	0,38	
Fr_16	50°07'43.4"N 8°41'31.9"O	0,39	0,60	

Messort	GPS-Koordinaten	Akustischer Planungsparameter	Bewertungsmethode	Foto Messort
Fr_17	50°07'48.2"N 8°41'38,1"O	0,49	0,13	

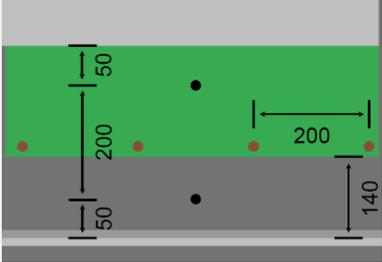
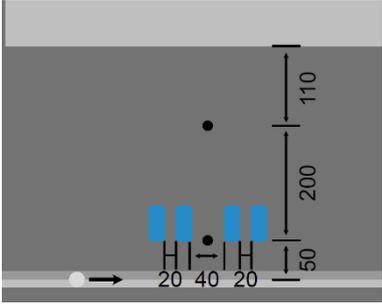
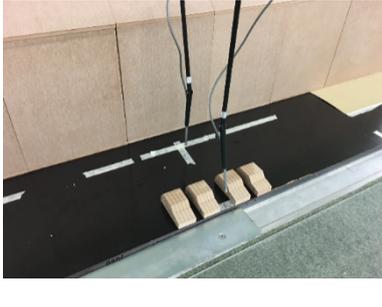
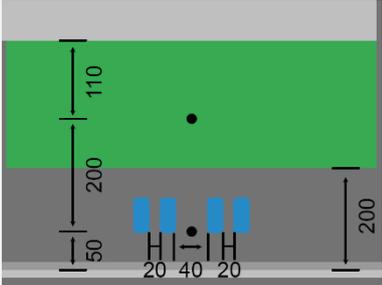
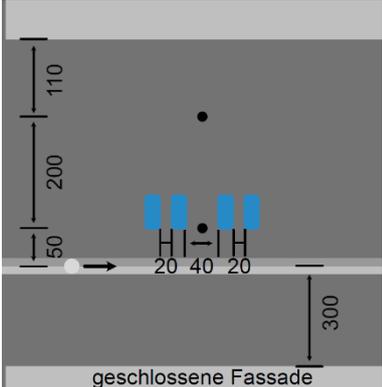
## Anhang 2 – Ergebnisse und Versuchsaufbauten skalierte Messungen

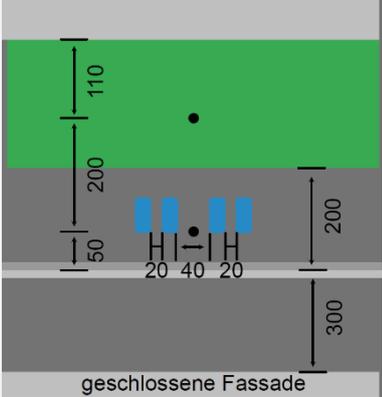
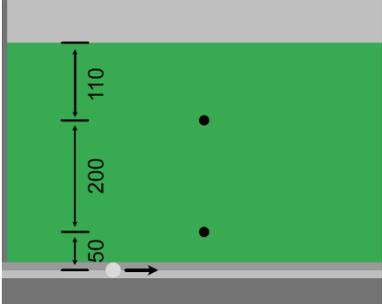
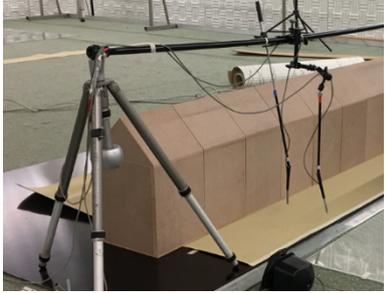
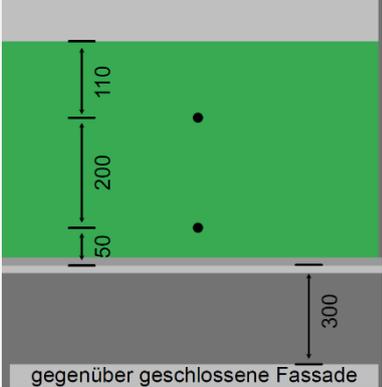
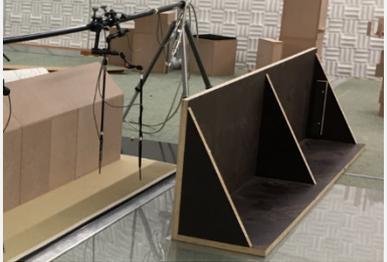
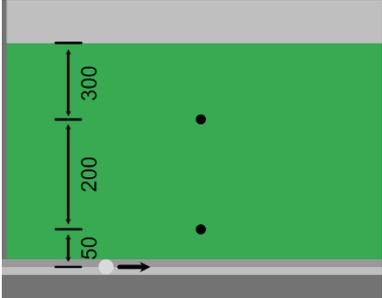
Die Tabelle 13 enthält die Versuchsaufbauten, die bei den skalierten Messungen im Maßstab von 1:50 durchgeführt wurden. Die Tabelle enthält dabei ein Foto des Versuchsaufbaus, sowie eine Skizze mit Bemaßungen. Die Mikrofone sind dabei als schwarze Punkte dargestellt, Bäume als braune Punkte und Pkw Modelle als blaue Rechtecke. Die Sortierung entspricht der Versuchsdurchführung.

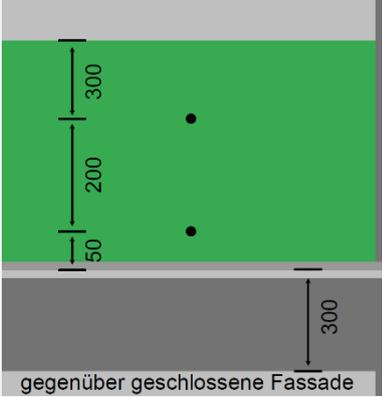
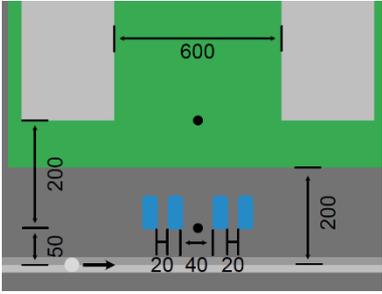
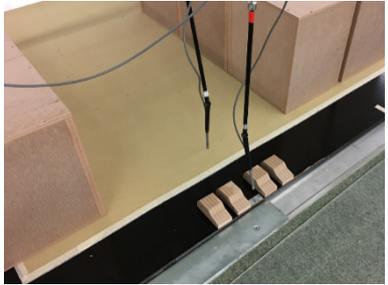
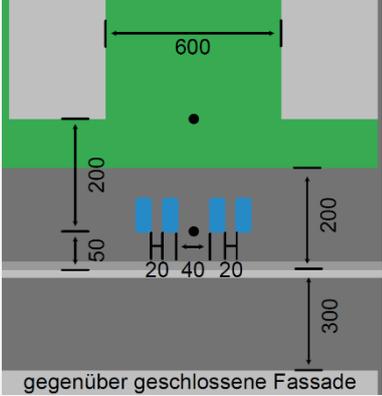
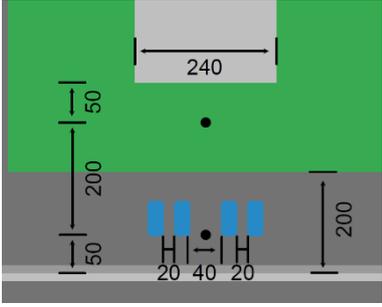
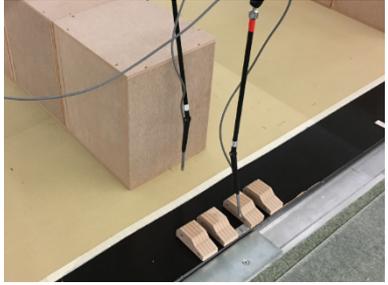
**Tabelle 13 Ergebnisse und versuchsaufbauten skalierte Messungen**

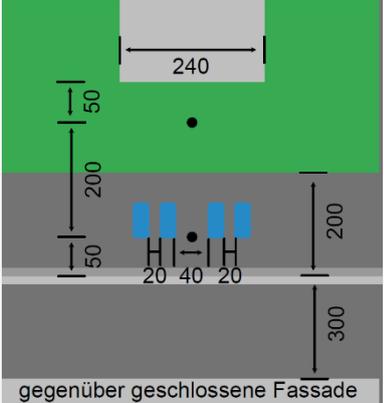
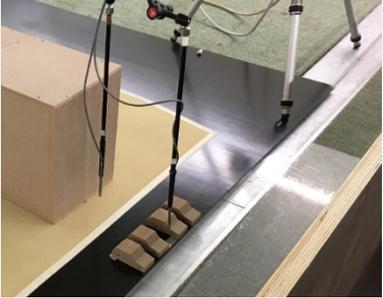
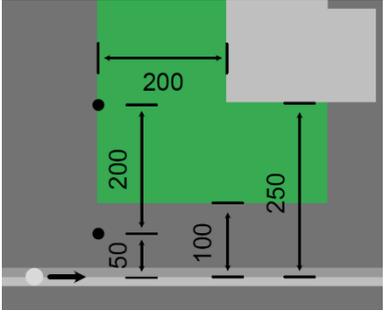
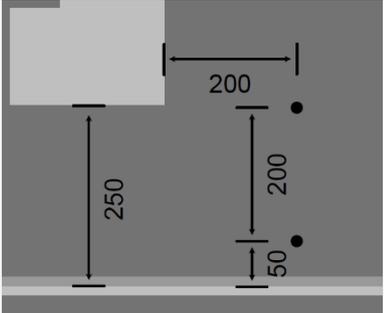
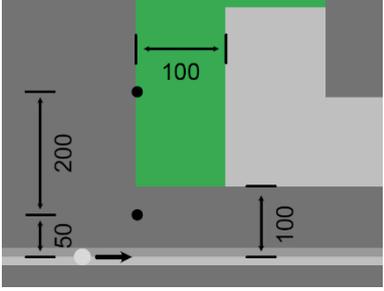
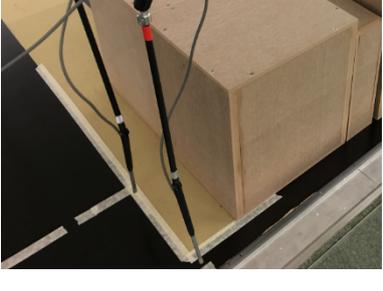
Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Freie Fläche absorbierender Boden	0,79		
Freie Fläche absorbierender Boden	0,71		
Geschlossene Fassade, reflektierender Boden	0,56		
Geschlossene Fassade, Grünfläche im Raum	0,64		

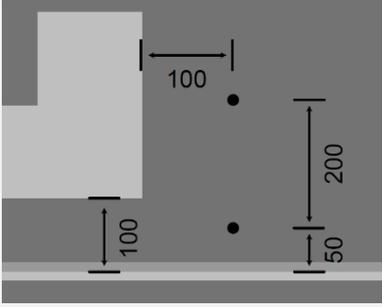
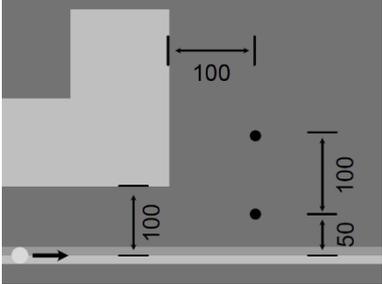
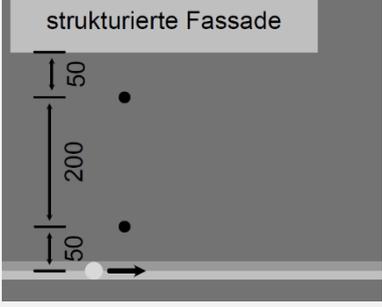
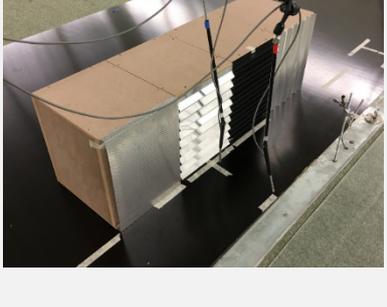
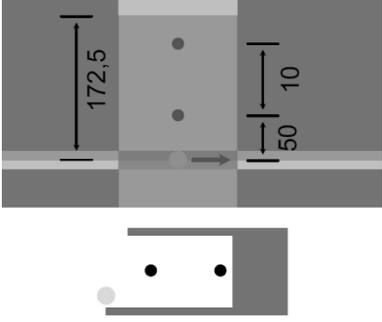
Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Geschlossene Fassade, parallel parkende Pkw	0,73		
Geschlossene Fassade, parallel parkende Pkw, Grünfläche im Raum	0,77		
Geschlossene Fassade, parallel parkende Pkw, Bäume im Übergang	0,73		
Geschlossene Fassade, parallel parkende Pkw, Bäume auf Grünfläche	0,77		
Geschlossene Fassade, Bäume im Übergang	0,56		

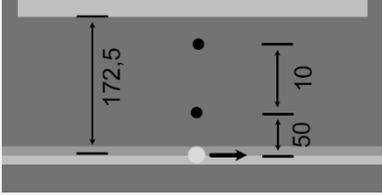
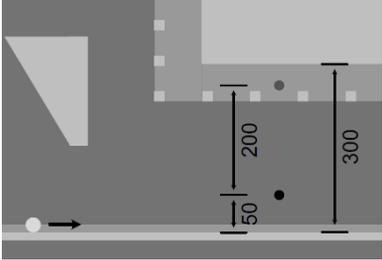
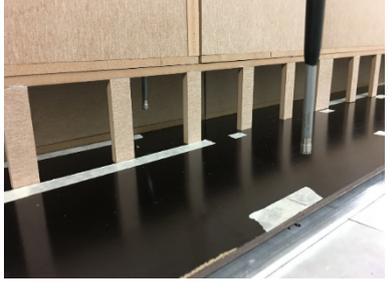
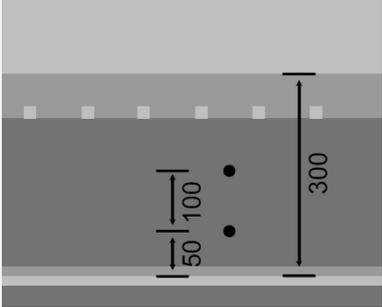
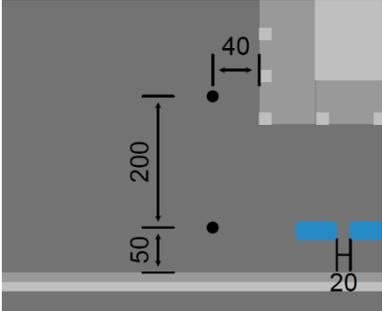
Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Geschlossene Fassade, Bäume auf Grünfläche	0,60		
Geschlossene Fassade, senkrecht parkende Pkw	0,70		
Geschlossene Fassade, senkrecht parkende Pkw, Grünfläche im Raum	0,71		
Geschlossene Fassade, senkrecht parkende Pkw, geschlossene Fassade gegenüber	0,66	 <p style="text-align: center;">geschlossene Fassade</p>	

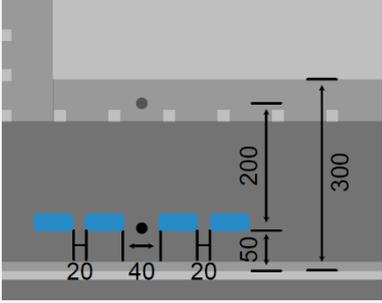
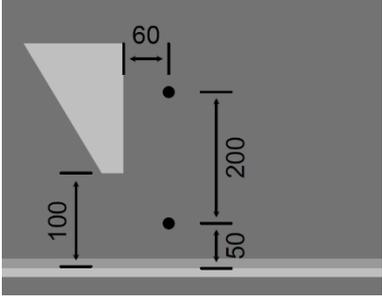
Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Geschlossene Fassade, senkrecht parkende Pkw, Grünfläche im Raum, geschlossene Fassade gegenüber	0,67	 <p>geschlossene Fassade</p>	
Geschlossene Fassade, kleiner urbaner Park	0,69		
Geschlossene Fassade, kleiner urbaner Park, geschlossene Fassade gegenüber	0,68	 <p>gegenüber geschlossene Fassade</p>	
Geschlossene Fassade, großer urbaner Park	0,75		

Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Geschlossene Fassade, großer urbaner Park, geschlossene Fassade gegenüber	0,73	 <p>gegenüber geschlossene Fassade</p>	
Zwischen Häusern, senkrecht parkende Pkw	0,79		
Zwischen Häusern, senkrecht parkende Pkw, geschlossene Fassade gegenüber	0,76	 <p>gegenüber geschlossene Fassade</p>	
Vor Reihenhäusern, senkrecht parkende Pkw	0,64		

Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Vor Reihenhäusern, senkrecht parkende Pkw, geschlossene Fassade gegenüber	0,61	 <p>gegenüber geschlossene Fassade</p>	
Hausecke an großer Kreuzung, Grünfläche im Raum	0,77		
Hausecke an großer Kreuzung, Pflaster im Raum	0,67		
Hausecke an kleiner Kreuzung, Grünfläche im Raum	0,74		

Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Hausecke an kleiner Kreuzung, Pflaster im Raum	0,66		
Hausecke an kleiner Kreuzung, Pflaster im Raum, kleinere Distanz zwischen Mikrofonen	0,61		
Geschlossene strukturierte Fassade, Pflaster im Raum	0,45		
Unter einer Unterführung	0,27		

Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Geschlossene Fassade, geringer Abstand zur Straße	0,54		
Modell Deutschherrnviertel, unter Arkaden	0,50		
Modell Deutschherrnviertel, vor Arkaden	0,40		
Modell Deutschherrnviertel, Hausecke mit Arkaden	0,64		

Bezeichnung Versuchsaufbau	Parameter	Versuchsaufbau mit Maßen [mm]	Foto des Versuchsaufbaus
Modell Deutschherrnviertel, unter Arkaden, parallel parkende Pkw	0,72		
Modell Deutschherrnviertel, Hausecke gegenüber	0,62		
Modell Deutschherrnviertel, Hausecke unter Arkaden, parallel parkende Pkw	0,72	