

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Klangbewusste Gestaltung von Gebäuden: Akustische Modellierung von Gebäudearchitektur und Aussenraumgestaltung – Schlussbericht

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5211.01616

Anzahl Seiten (ohne Beilagen): 56

Mitarbeit:

Kurt Eggenschwiler, Arnthrudur Gísladóttir, Kurt Heutschi, Beat Schäffer, Armin Taghipour, Reto Pieren

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa
Dübendorf, 10. August 2021

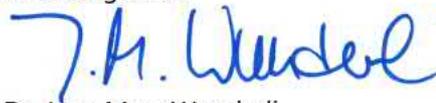
Projektleiter



Kurt Eggenschwiler

Abteilung Akustik / Lärminderung

Abteilungsleiter



Dr. Jean Marc Wunderli

Leiter Abteilung Akustik / Lärminderung

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Auftrag	6
3	Einleitung	7
4	Akustische Simulation und Auralisation	9
4.1	Akustische Simulation, Auralisation und Signal Processing	9
4.2	AuraLab Labor für Hörversuche an der Empa	10
5	Simulierte Szenarien	11
5.1	Das modellierte urbane Quartier	11
5.2	Szenarien	22
6	Hörversuche	24
6.1	Einleitung	24
6.2	Experiment 1	24
6.3	Experiment 2	28
7	Ergebnisse	31
7.1	Auswertung verschiedener Pegelgrößen	31
7.2	Hörversuche	37
8	Diskussion	43
8.1	Schallpegel	43
8.2	Hörversuche	44
8.3	Verwendeten Verfahren	45
9	Schlussfolgerung und Ausblick	46
10	Anhänge	48
10.1	Literaturverzeichnis	48
10.2	Karte Zwicky Areal	50
10.3	Konferenzbeitrag [26]	51

1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Siedlungsverdichtung entstehen vermehrt grossvolumige Gebäude mit hohen Fassaden, und es bilden sich mehr oder weniger geschlossene Strassenschluchten und Innenhöfe. Die Akustik in diesen Umgebungen ist geprägt durch verschiedenartige Schallreflexionen, welche zu einer generellen Erhöhung der Lärmbelastung und Lärmbelästigung führen. Auch kann eine negative Wirkung auf die akustische Aufenthaltsqualität resultieren, wie z. B. in einer Untersuchung der Empa zur akustischen Qualität in Innenhöfen gezeigt wurde. Dort wurde die akustische Umgebung simuliert und Probanden bei kontrollierten Hörversuchen präsentiert. Die Schallquellen waren unbewegt und entsprachen üblichen Geräuschen in Innenhöfen von Kindern oder Erwachsenen.

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU soll in der hier vorgestellten Untersuchung der Einfluss der Gebäudearchitektur auf die Lärmbelastung und Klangqualität bezüglich Strassenverkehr untersucht werden. Dabei besteht einerseits ein Interesse daran, Gebäude so zu planen und zu bauen, dass in der Umgebung möglichst tiefe Lärmbelastungswerte resultieren. Andererseits soll ein möglichst hohes akustisches Wohlbefinden im Aussenraum erreicht werden.

Um verschiedene Fassadengestaltungen und Gebäudeanordnungen bezüglich Wirkung auf die Lästigkeit untersuchen und vergleichen zu können, wurden die akustischen Umgebungen eines grösseren Quartiers mit Hilfe einer raumakustischen Software simuliert. Als geometrisches Ausgangsbeispiel diente dazu das Zwicky Areal in Dübendorf/Wallisellen. Die eingesetzte Software entspricht dem Stand der Technik und verwendet den Ansatz der geometrischen Akustik. Wellentheoretische Phänomene werden dabei in der Software zum Teil auf der Basis von empirischen Ansätzen berücksichtigt. Da die Software nur die Schallabstrahlung unbewegter Quellen berechnen kann, wurde zur Simulation einer Einzeldurchfahrt eines Autos eine Reihe von Punktquellen verwendet. Mit Hilfe eines im Rahmen dieser Untersuchung entwickelten Verfahrens wurden bei der Auralisation diese Punktquellen so verarbeitet, dass Einzelfahrten von Personenkraftwagen im Labor hörbar gemacht werden konnten.

Es wäre durchaus möglich, eine ganze Sammlung unterschiedlicher Einzelfahrten zu einem Verkehrsmix zu mischen. Allerdings erschien es sinnvoll, die Untersuchung vorerst auf Einzelfahrten zu beschränken, auch weil diese in solchen Quartieren oft zu Lärmklagen führen.

Um den Rahmen der für diese Untersuchung geplanten Hörversuche nicht zu sprengen, musste die Anzahl auralisierter Szenarien beschränkt werden. Es wurden in einem ersten Experiment für zwei Fahrwege und drei Hörpositionen Simulationen für folgende Typen von Gebäudefassaden durchgeführt: schallreflektierend, schallabsorbierend, schallstreuend. Weiter wurden für ein zweites Experiment zwei Gebäude leicht gedreht. Zudem wurden Stimuli aus dem ersten Experiment und Stimuli aus den eben erwähnten Hörversuchen in ihren Pegeln angeglichen.

Die Stimuli der oben erwähnten Situationen wurden in einer ambisonischen Wiedergabe über fünf Lautsprecher im Labor für Hörversuche AuraLab der Empa präsentiert. In einem ersten Hörversuch von Experiment 1 wurden die Probanden gebeten, die Lästigkeit/Störung mit Hilfe einer standardisierten Skala zu beurteilen. Im zweiten Hörversuch von Experiment 1 brachten sie drei Hörbeispiele in eine Rangfolge bezüglich Lästigkeit, welche jeweils für eine Hörposition der reflektierenden, absorbierenden und streuenden Fassadentypen entsprachen. Im Experiment 2 wurden durchwegs Paarvergleiche gemacht. Die Probanden gaben dort an, welches Stimuli sie mehr belästigt.

Bezüglich der **Fassadentypen** reflektierend/absorbierend/streuend ergaben sich die die folgenden Ergebnisse:

Die simulierten Einfahrten zeigten an den untersuchten Hörpositionen für die absorbierenden Fassaden im Vergleich zu den reflektierenden Fassaden Verminderungen um 1–7 dB(A) für den Ereignispegel und 1–6 dB(A) für den Maximalpegel. Die Pegel wurden auch bei den streuenden Fassaden im Vergleich zu den reflektierenden vermindert, aber sowohl für Ereignis- als auch Maximalpegel nur zwischen 0–1 dB(A).

Der erste Hörversuch von Experiment 1 zeigte, dass tendenziell die Lästigkeitsurteile gemäss IC BEN 11 Punkte-Skala am geringsten sind, wenn die Fassaden absorbierend sind. Die Lästigkeit korrelierte stark mit den gemessenen Schallpegeln. Statistisch können die Lästigkeitsurteile damit zu einem grossen Teil mit der Lautstärke erklärt werden. Ein durch die verschiedenen Fassadentypen zu erwartender unterschiedlicher zeitlicher oder spektraler Charakter der Hörereignisse scheint gemäss diesen Ergebnissen im Vergleich zum Pegel eine geringere Rolle zu spielen.

Im zweiten Hörversuche von Experiment 1 (Rangierung der Fassadentypen) lagen die absorbierenden Fassaden bezüglich Lästigkeit am häufigsten auf Rang 1 (geringste Lästigkeit), jene aus den Simulationen mit reflektierenden Fassaden am häufigsten auf Rang 3 (stärksten Lästigkeit). Die streuenden Fassaden erreichten am häufigsten einen mittleren Rang.

Schliesslich wurden in Experiment 2 zwei Paarvergleiche mit zwei Stimuli Paaren durchgeführt, welche im Pegel (ursprüngliche Pegelunterschiede: rund 6 dB(A)) angeglichen wurden. In den beiden untersuchten Situationen wurden im Gegensatz zu Experiment 1 die absorbierenden Fassaden als signifikant lästiger beurteilt. Es könnte sein, dass im Fall von reflektierenden Fassaden das Geräusch der Durchfahrt weniger unerwartet wahrgenommen wird als bei den schallabsorbierenden Fassaden, weil durch die Reflexionen an den reflektierenden Fassaden bereits früher Schall zur Hörposition reflektiert wird. Dieser Effekt wäre bei der ursprünglichen Situation durch die Verminderung des Pegels im Fall der absorbierenden Fassaden verdeckt resp. kompensiert worden.

Bei den Hörversuchen (Experiment 2) zu den **leicht gedrehten Gebäuden**, zeigte sich folgendes: Die simulierten Einfahrten für die leicht gedrehten Gebäuden an den untersuchten Hörpositionen ergaben nur leichte Pegelveränderungen. Für die gedrehten Gebäude waren die Ereignispegel zwischen 0 und 1.5 dB(A) geringer. Die Maximalpegel waren im Vergleich zur Originalsituation zwischen 0.1–1.0 dB(A) höher und 1.0–1.5 dB(A) geringer. Bei den Hörversuchen (Paarvergleiche) ergab die Drehung eines Gebäudes allerdings einen signifikanten Einfluss auf die Lästigkeitsbewertung im Sinne einer Rangierung. Die Hörbeispiele mit gedrehten Gebäuden wurden als weniger lästig beurteilt, obwohl die Pegelverminderung durch die Drehung gering ist. Auch mit einer Angleichung der Pegel der beiden Stimuli, wurden die Situationen mit gedrehten Gebäuden tendenziell als weniger lästig beurteilt. Damit zeigt sich, dass bei diesen Stimuli Paaren die Beurteilung der Lästigkeit nicht nur vom Pegel abhängt, sondern vom Geräuschcharakter bei der Durchfahrt eines Fahrzeugs, z.B. einer verminderten Halligkeit bei nicht parallelen Flächen.

Für die untersuchte urbane Situation hat sich gezeigt, dass Durchfahrten einzelner Personenwagen als am wenigsten lästig beurteilt werden, wenn die Ereignispegel an den Hörpositionen durch schallabsorbierende Fassaden an den Gebäuden verringert werden. Die stärkste Wirkung zeigt sich dabei an denjenigen Hörpositionen, wo keine oder nur wenig Direktschallanteile bestehen; beispielsweise in lärmabgeschirmten Innenhöfen oder auf strassenabgewandten Gebäudeseiten. Die

Versuche haben ebenfalls bestätigt, dass schallstreuende Fassaden im Vergleich zu schallreflektierenden die Lästigkeit leicht vermindern können. Schliesslich konnte auch gezeigt werden, dass bereits ein leichtes Drehen von Gebäuden, damit Fassaden nicht parallel zueinander stehen, die Lästigkeit vermindert

Nebst der Fassadengestaltung (absorbierend, streuend, reflektierend), die über Materialwahl und Fassadenabwicklung ihre akustische Wirkung bestimmt und damit die Lästigkeitsurteile beeinflusst, sind auch Formgebung und Anordnung der Gebäude wesentlich an der akustischen Qualität des Aussenraums beteiligt. Vor allem wegen der Fensterflächen können Gebäudefassaden nur bis zu einem gewissen Grad schallabsorbierend wirken, resp. reflektieren in jedem Fall auch Schall. Sie sind daher sorgfältig zu planen und gestalten; sowohl bezüglich ihrer materiellen Eigenschaften als auch bei der Fassadenausrichtung und Gebäudestellung.

2 Auftrag

Das Bundesamt für Umwelt BAFU erteilte der Empa den Auftrag, den Einfluss der Gebäudearchitektur entlang eines Strassenabschnittes auf die Lärmbelastung und Klangqualität wie folgt zu untersuchen:¹

Das Umweltschutzgesetz und die Lärmschutzverordnung des Bundes geben vor, dass keine Wohngebäude in Gebieten mit erhöhter Lärmbelastung erstellt werden dürfen. Die raumplanerische Zielsetzung fokussiert hingegen auf eine bauliche Entwicklung gegen innen und auf die Verdichtung bestehender Siedlungsgebiete.

Im Rahmen der Siedlungsinnenentwicklung entstehen vermehrt grossvolumige Gebäude mit hohen Fassaden, die den Schall je nach umliegenden Gebäuden, Bodenflächen und Terrain ungünstig reflektieren. Solche Gebäudeeigenschaften sind in doppelter Hinsicht ungünstig und daher möglichst zu vermeiden. Einerseits besteht ein Interesse daran, Gebäude so zu planen und bauen, dass in der Umgebung möglichst tiefe Lärmbelastungswerte resultieren. Andererseits soll durch den Bau von Gebäuden eine möglichst hohe (raum-)akustische Aufenthaltsqualität (momentanes Wohlbefinden) im Aussenraum erreicht werden.

Das BAFU möchte den Einfluss der Gebäudearchitektur entlang einer Strasse unter Berücksichtigung der Aussenraumgestaltung für Lärmbelastung und Klangqualität näher untersuchen. Das BAFU benötigt insbesondere Aussagen darüber,

- mit welchen Bauweisen Lärmbelastungen reduziert und das momentane Wohlbefinden (Klangqualität im Aussenraum) erhöht werden können;
- welchen Einfluss Materialien von Fassaden und Bodenflächen haben;
- welchen Einfluss Geometrie und Strukturierung von Fassaden haben;
- welchen Einfluss Fassadenausrichtung und Gebäudestellung haben;
- in welchen Fällen resp. unter welchen Bedingungen die untersuchten Einflüsse relevant sind für Lärmbelastung und momentanes Wohlbefinden.

Allgemeines Ziel der Untersuchung ist es, Gebäudetypologien, Baumaterialien und Bauweisen zu erkennen, die gute Bedingungen für tiefe Lärmbelastungswerte und hohes Wohlbefinden aufweisen.

¹ Vertrag 00.0425.PZ / R463 1381 Klangbewusste Gestaltung von Gebäuden: Akustische Modellierung von Gebäudearchitektur und Aussenraumgestaltung

3 Einleitung

Die Lärmbelastung ist in vielen Städten hoch, und Wirkungen des Lärms auf Belästigung und Gesundheit sind vielschichtig und erwiesen

Lärm beeinträchtigt die Lebensqualität der Menschen. Er belästigt, er wirkt auf Körper und Psyche. Er mindert aber auch die Standortattraktivität ganzer Gebiete. Lärm kann krank machen, mit gesundheitlichen Langzeitfolgen. Besonders in der Nacht reagieren die Menschen empfindlich auf Lärm.²

Vor diesem Hintergrund hat der Schweizerische Bundesrat am 28. Juni 2017 einen nationalen Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung verabschiedet [1]. Darin geht es in einem ersten Schwerpunkt um die vermehrte Bekämpfung von Lärm an der Quelle. Weiter sollen im zweiten Schwerpunkt Ruhe- und Erholungsräume in der Siedlungsentwicklung gefördert werden. Schliesslich soll das Monitoring ausgebaut und das Verständnis für die Lärmproblematik in der Öffentlichkeit gestärkt werden.

Im zweiten Schwerpunkt sind Massnahmen gemeint, welche in der vorliegenden Untersuchung thematisiert werden: Es werden raumplanerische Instrumente und Rahmenbedingungen vorgeschlagen, um bei der Gestaltung von urbanen Lebensräumen künftig auch akustische Kriterien miteinzubeziehen.

Die Ausgangslage wird in der Auftragsbeschreibung und Pflichtenheft zu diesem Projekt wie folgt beschrieben:³

Mit Blick auf den mobilitätsintensiven und flächenzehrenden Lebensstil, der nicht nur das räumliche Wachstum verstärkt, sondern auch das Freizeitverhalten grundlegend verändert, treffen Städte zusehends Vorkehrungen, um auf die Herausforderungen angemessen reagieren zu können. Die bauliche Entwicklung soll gegen innen erfolgen und auf die Verdichtung bestehender Siedlungsgebiete fokussieren. Diese Entwicklung wird durch das Raumplanungsgesetz festgeschrieben.

Im Rahmen der Siedlungsinnenentwicklung entstehen vermehrt grossvolumige Gebäude mit hohen Fassaden, die den Schall je nach umliegenden Gebäuden, Bodenflächen und Terrain ungünstig reflektieren können. Solche Gebäudeeigenschaften sind in doppelter Hinsicht ungünstig und daher möglichst zu vermeiden: Einerseits besteht ein Interesse daran, Gebäude so zu planen und bauen, dass in der Umgebung möglichst tiefe Lärmbelastungswerte resultieren. Andererseits soll durch den Bau von Gebäuden eine möglichst hohe (raum-)akustische Aufenthaltsqualität (momentanes Wohlbefinden) im Aussenraum erreicht werden.

Die akustische Umgebung in urbanen Räumen wird einerseits geprägt durch Lärmimmissionen, welche in der Lärmbekämpfung meistens mit einem Beurteilungspegel L_r bewertet werden, z.B. in der Schweizerischen Lärmschutz Verordnung LSV [2]. In der LSV entspricht er beim Strassenlärm er dem A bewerteten Mittelungspegel Leq (energetisch gemittelter Schalldruckpegel), welcher vergleichsweise einfach gemessen und berechnet werden kann. Auch wenn diese Beurteilung grob ist und deren Mängel bekannt sind, ist aktuell keine brauchbare Alternative in Sicht. Andererseits weist ein urbaner Raum auch

² https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/auswirkungen_des_laerms.html, Download 30.6.2020

³ BAFU: Auftragsbeschreibung und Pflichtenheft: Klangbewusste Gestaltung von Gebäuden Akustische Modellierung eines Strassenabschnitts zur Untersuchung des Einflusses der Gebäudearchitektur und der Aussenraumgestaltung für Lärmbelastung und Klangqualität im Aussenraum Auftragsbeschreibung und Pflichtenheft Referenz/Aktenzeichen: O262 1414, Trond Maag, 16.05 2018

eine (raum)akustische Aufenthaltsqualität auf. Diese kann erlebt und daher auch qualitativ beschrieben werden (siehe z.B. [3], [4]). Eine messtechnische Beschreibung, z.B. mit Hilfe raumakustischer Parameter, ist heute jedoch erst in Ansätzen möglich (siehe z.B. [5]). Akustische Parameter zu messen oder in einer Simulation zu berechnen und mit Anforderungen (Richtwerte/Toleranzbereiche) zu vergleichen, ist Gegenstand aktueller Forschungen. Bereits heute gibt es auf der Grundlage von Beobachtungen geübter Fachleute deutliche Hinweise auf Massnahmen und Strategien, um die akustische Aufenthaltsqualität verbessern zu können (z.B. in der Schweiz: [3], [6] [11]).

Ziel dieses Projekts ist es, einen Beitrag auf der Basis von akustischen Simulationen und Hörversuchen zu geben.

Die Schallausbreitung innerhalb der städtischen Umgebung wird unter anderem durch Schallreflexion an Oberflächen, Beugung an Kanten, Streuung an rauen Oberflächen und Schallabsorption der Materialien beeinflusst [12], [13]. Diese Entwurfsparameter werden bei der akustischen Gestaltung von Räumen (Raumakustik) heute weitgehend berücksichtigt. Der Einfluss dieser Parameter auf die urbane akustische Umgebung im Hinblick auf den Schalldruckpegel oder die akustische Wahrnehmung von Außenräumen wird aber erst seit kurzem untersucht.

Es hat sich dabei gezeigt, dass schallabsorbierende Oberflächen in urbanen Räumen wie Strassenschluchten [14], [15] und Plätzen [16] [18] den Schalldruckpegel vermindern. Schallstreuende Fassaden führen in einer Strassenschlucht unter bestimmten Umständen zu einer Abnahme des Schalldruckpegels [19], haben oft aber auch keinen nennenswerten Effekt auf den Pegel [15], [20]. Auch für andere Geräuschquellen als Strassenverkehr zeigen Untersuchungen Pegelreduktionen durch schallabsorbierende Fassaden [21].

Weiter kann sowohl Streuung als auch Absorption von Fassaden auf einem städtischen Platz die akustische Qualität des Raumes beeinflussen [21]. In einer Forschungsarbeit der Empa [22] wurde festgestellt, dass mit schallabsorbierenden Fassaden der akustische Komfort in einer Hofsituation erhöht werden kann.

In vielen bebauten Gebieten, einschliesslich Wohngebieten, ist Strassenlärm die Hauptlärmquelle. Strassen werden bei Berechnungen der Immissionen (Mittelungspegel *Leq*) normalerweise als akustische Linienquellen behandelt. Die Hörerfahrung – zumindest während Phasen geringer Verkehrsdichte – wird durch Vorbeifahrten einzelner Fahrzeuge bestimmt. Es wird erwartet, dass bei diesen Einzelwagenvorbeifahrten Änderungen des Reflexionsmusters aufgrund einer unterschiedlichen Fassadenoberflächen gut wahrzunehmen sind. Zudem ist bekannt, dass Lärmklagen sich in solchen Quartieren häufig auf Einzelfahrten beziehen.

Für die Berechnung des Pegelverlaufs von Einzelvorbeifahrten eignen sich im Prinzip Verfahren wie sonROAD [23] oder [24]. Für eine Auralisation der Vorbeifahrten sind diese Verfahren nicht geeignet. Für diesen Zweck wurde hier [25] ein Simulationstool vorgestellt. Allerdings ist dieses Verfahren noch nicht zur praktischen Anwendung geeignet.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Ergebnisse von Simulationen mit einer raumakustischen Software, einer Empa-eigenen Synthese von Autogeräuschen, einem neuen Verfahren der Empa zur Auralisation sowie von darauf aufbauenden Hörversuchen vorgestellt, in denen die Lästigkeitsreaktionen von Durchfahrten in einer urbanen Situation untersucht wurden. Dabei wurden die Schallausbreitung ausgehend von einer bewegten Schallquelle in einer urbanen Umgebung für verschiedene Typen von Gebäudefassaden simuliert und auralisiert.

Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits publiziert [26].

4 Akustische Simulation und Auralisation

4.1 Akustische Simulation, Auralisation und Signal Processing

Die Akustische Simulation und die Auralisation erfolgten mit der Software ODEON v 15 15 (Odeon A/S, Kgs. Lyngby, Dänemark) [27]. Für die ambisonische Wiedergabe der auralisierten fahrenden Autos wurde die 2D Surround Sound Option von ODEON zur Wiedergabe von Mehrkanal Impulsantworten verwendet, die im Nachbearbeitungsprozess zur Auralisation eines fahrenden Autos verwendet wurden. Die Fahrwege wurden in ODEON als Reihen von omnidirektionalen Punktquellen definiert. Die Quellen wurden in Abständen von 10 m in 1 cm Höhe über dem Boden platziert. Die Wahl einer Minimalhöhe von 1 cm musste getroffen werden, um Probleme in der Nachbearbeitung zu vermeiden. Zudem wurde die Strasse entlang der Punktquellen vollständig schallabsorbierend definiert, um eine Bodenreflexion zu unterdrücken, welche in der Auralisation unnatürliche zeitabhängige Kammfilter-/Flanging Effekte verursachen würde. In der Realität sind diese Interferenzeffekte sehr schwach, weil die Schallquelle eine beträchtliche Ausdehnung hat und nicht auf einen Punkt konzentriert ist, wie in der Simulation angenommen.

Für die Berechnung in ODEON wurde die Transition-Order auf 0 gesetzt, d.h., dass nur mit dem Ray Tracing Verfahren gearbeitet wurde. Eine Sensitivitäts Analyse in Bezug auf den Schalldruckpegel zeigte, dass eine Anzahl Schallstrahlen von 8'000'000 notwendig waren um stabile Ergebnisse zu erhalten. Es wurde dabei für jede Quelle-Empfänger-Beziehung eine einzelne ambisonische Impulsantwort (2D Surround Sound) erzeugt. Das im "2D Surround Sound Setup" von ODEON definierte "speaker rig", basiert auf dem Labor für Hörversuche AuraLab der Empa.

Notwendiger Input für die Auralisation einer sich bewegenden Quelle ist das von der Quelle abgestrahlte Audiosignal und quellenpositionsspezifische Impulsantworten h_i für die Faltungsoption. Bei einfachen Geometrien könnten die Impulsantworten von Quelle zu Empfänger für jede beliebige Quellposition schnell bestimmt werden. Die bei dieser Untersuchung ermittelten Impulsantworten sind allerdings das Ergebnis einer aufwändigen Simulation der Ausbreitung. Dies führt zu Herausforderung der richtigen Interpolation zwischen den verschiedenen Quellpositionen. Einer der Ansätze besteht darin, einzelne Emissionssignalsegmente mit den repräsentativen Impulsantworten h_i zu falten und dann alle Schnipsel zu überblenden, um ein geglättetes Empfängersignal zu erhalten [25]. Hier wurde allerdings ein anderer Ansatz gewählt, indem eine Interpolation zwischen Impulsantworten h_i und h_{i+1} durchgeführt wurde, um eine angemessene Impulsantwort h_{i+f} ($f = 0 \dots 1$) für ein bestimmtes Emissions-Sample zu erhalten. Dies wurde erreicht durch eine energieerhaltende Umwandlung jeder Impulsantwort h_i in eine generische Version h'_i , welche sich aus einer Direktschallkomponente, der stärksten Reflexion und einem Nachhallschwanz zusammensetzt. Der Vorteil der generischen Versionen ist, dass die drei Komponenten auf der Zeitachse mit konstanten Zeitverzögerungen ausgerichtet sind. Dies ermöglichte eine einfache und geradlinige Überblendung zwischen h'_i und h'_{i+1} um h'_{i+f} ohne hörbare Artefakte. Durch diese Manipulation geht allerdings die Information zur Zeitdauer der Schallausbreitung verloren, welche zur Berechnung des Dopplereffekts notwendig ist. Da die Geometrie aber bekannt ist, kann der Dopplereffekt auf Basis dieser Daten nachträglich einberechnet werden.

Die Quellsignale für die virtuellen Autos wurden durch spektrale Modellsynthese unter Verwendung des in [28] beschriebenen parametrischen Emissionssynthesemodells der Empa berechnet. Mit dem Modell können für eine bestimmte Kombination an Automotoren, Reifen- und Strassentypen, Fahrstile und Fahrgeschwindigkeiten, Emissionsschalldrucksignale getrennt für das Reifen-/Fahrbahn- und das Antriebsgeräusch erzeugt werden. Das Synthesemodell verwendet schliesslich den Abstrahlwinkel als

Eingangsparameter Hier wurden die beiden Beiträge für die zeitabhängige, zum Empfänger gerichtete Abstrahlrichtung gerendert und aufsummiert.

Vor der Wiedergabe im Labor für Hörversuche der Empa, AuraLab, wurden die resultierenden Signale der fünf Kanäle schliesslich einer weiteren Nachbearbeitung unterzogen. Zu Erzeugung der Stimuli wurden 20 s resp. 15 s Abschnitte aus den Signalen geschnitten. Die Abschnitte wurden auf der Grundlage des A bewerteten Schalldruckpegels L_{AF} bestimmt, d h es wurden symmetrisch zum Maximalpegel $L_{AF,max}$ entsprechende Abschnitte ausgewählt. Weiter wurden die Frequenzbereiche unter 20 Hz und über 10 kHz weggefiltert. Schliesslich wurden die Signale der fünf Kanäle entsprechend den fünf Satellitenlautsprechern im Labor zugewiesen. Die Signale wurden mit einem Raised Cosine Filter ein- und ausgeblendet.

4.2 AuraLab – Labor für Hörversuche an der Empa

Die Hörversuche wurden im AuraLab der Empa durchgeführt (vgl. z.B. [22]). Das AuraLab erfüllt die akustischen Anforderungen bezüglich Hintergrundgeräusche und Nachhallzeit, welche für eine hochwertige Audiowiedergabe notwendig sind. Darüber hinaus verfügt das AuraLab über einen separaten Kontrollraum mit der Möglichkeit der audiovisuellen Überwachung der Versuche. Für die Hörversuche wurde der Boden des Labors mit zusätzlichen porösen Absorbern belegt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, sassen die Probanden auf der zentralen Hörposition (sweet spot). Der Bildschirm für die Anzeigen und Bedienen der Hörversuchssoftware und die Eingaben der Probanden befand sich vor ihnen. Die Wiedergabe erfolgte über fünf Lautsprecher (KH 120 A, Georg Neumann GmbH, Berlin, D) in einer 2D Surround Pentagon Anordnung auf Ohrhöhe in 2 m Hörabstand sowie im ersten Experiment über zwei Subwoofer (KH 805, Georg Neumann GmbH, Berlin, D). Diese Anordnung wurde deshalb gewählt, weil die ODEON Software Ambisonic Impulsantworten erster Ordnung für eine 2D Surround Sound Anordnung liefern kann [27]. Zwischen Experiment 1 und 2 wurde das AuraLab leicht umgebaut, wobei zwei weitere Subwoofer in Betrieb genommen wurden. Dieser Umbau hatte kein Zusammenhang mit den beiden Experimenten. Ziel war es, die Wiedergabe im Tieftonbereich allgemein zu verbessern. Da in beiden Experimente das Schwergewicht im Frequenzspektrum im Mittel- und Hochtonbereich lag, ist der erwähnte Umbau bezüglich der Wiedergabe der Audiosignale der entsprechenden Hörversuche praktisch bedeutungslos.



Abbildung 1 Der Versuchsaufbau im AuraLab: Der Proband befindet sich an zentraler Hörposition. Stimuli wurden über fünf Satellitenlautsprecher und zwei Subwoofer wiedergegeben.

5 Simulierte Szenarien

5.1 Das modellierte urbane Quartier

5.1.1 Geometrisches Modell

Es wurde als sinnvoll erachtet, für die Simulation kein fiktives Areal zu entwerfen, sondern von einer realen Überbauung auszugehen, damit das Projekt bis zu einem gewissen Grad einen nachvollziehbaren Charakter aufweist. Es wurde ein neues Stadtquartier gewählt, welches die Ausgangslage und die damit verbundenen akustischen Herausforderungen gut wiedergibt und gleichzeitig in der Nähe der Empa liegt: das Zwicky Areal in Dübendorf/Wallisellen im Kanton Zürich (https://zwicky_areal.ch/). Das Quartier umfasst mehrere grosse Wohn- und Gewerbegebäude. Es gibt zwei stark befahrene Strassen, eine Strassenbahn in Nord-Süd-Richtung und eine S-Bahnlinie auf einer Brücke in Ost-West-Richtung.

Ein geometrisches Modell der Umgebung wurde mit Hilfe der Software SketchUp (Trimble Inc., Sunnyvale, CA, USA) ausgearbeitet, weil die später verwendete raumakustische Software ODEON über eine gut funktionierende Schnittstelle zu SketchUp verfügt. In Abbildung 37 im Anhang (Abschnitt 10.2, Seite 50) findet sich ein Situationsplan des Geländes, in Abbildung 2 ein Ansicht des SketchUp-Modells.

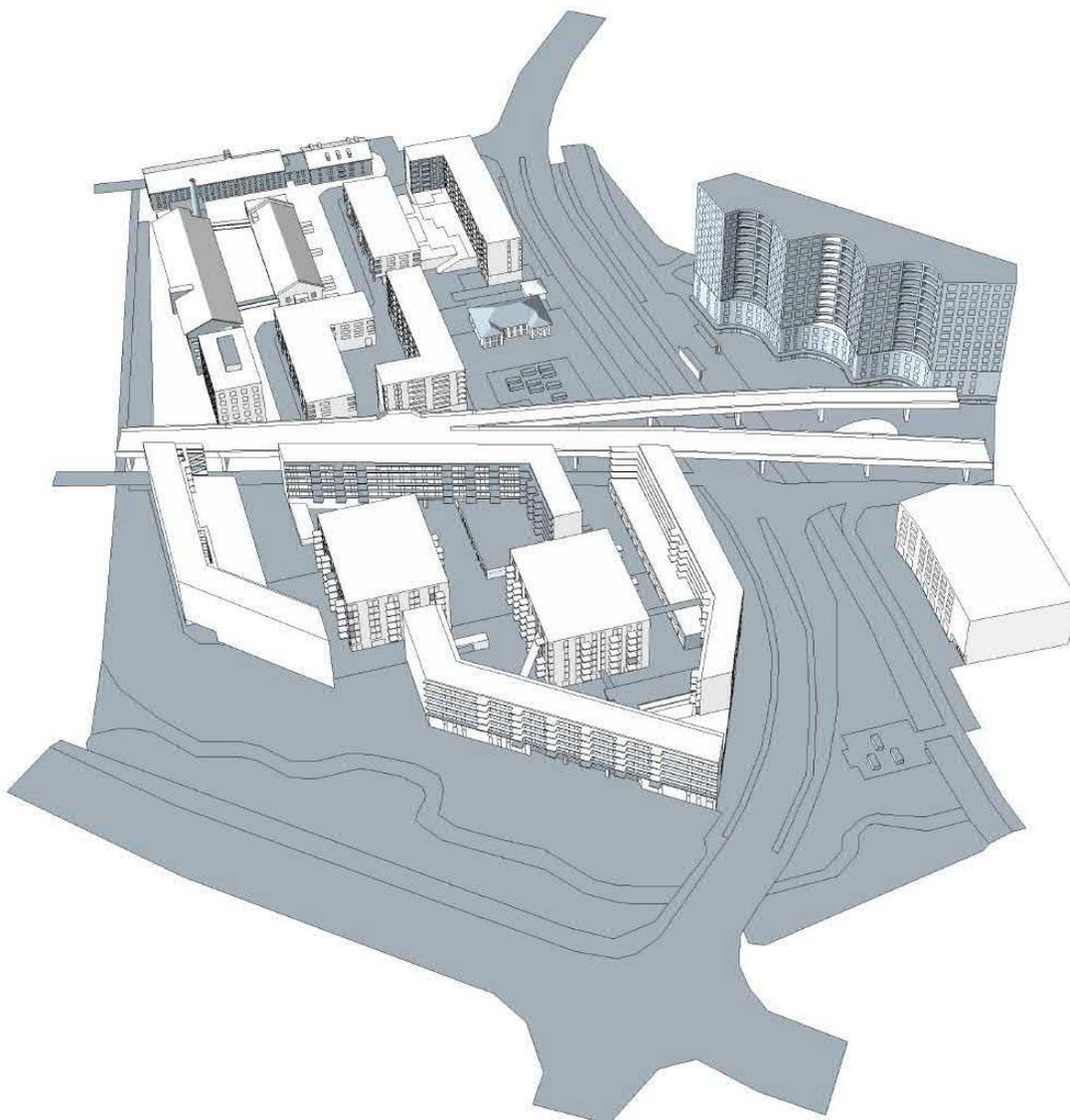


Abbildung 2 SketchUp Modell des Zwicky-Areals in Dübendorf

Weil das Zwicky-Areal lediglich als Ausgangsbeispiel diente, ging es nicht darum, das Quartier exakt zu modellieren. Im Modell wurden deshalb einige Vereinfachungen vorgenommen. Das Gelände, in Wirklichkeit mit einem kleinen Höhenunterschied von 3 m, ist im Modell völlig flach. Dies trifft auch für das Terrain der Strassenbahn zu. Kleine Vorsprünge, Briefkästen und Türen sowie Jalousien an Fenstern und Balkonen wurden weggelassen. Schliesslich wurden Spielplatzeinrichtungen nicht modelliert, jedoch einige parkierte Autos. Weiter wurden die Tramhäuschen entfernt, welche im Modell vor dem grossen Hochhaus stehen, sowie einige wenige Brückenpfeiler, welche in Abbildung 2 noch sichtbar sind. Die vorgängigen Auralisationen zeigten nämlich, dass die von den Tramhäuschen und Pfeilern verursachte Abschirmung der Strasse zu stark hörbaren Effekten führten, welche aber keineswegs Gegenstand der Untersuchung sind. Immerhin konnten bei einer Begehung im Zwicky Areal das rasche laut und leiser Werden des Fahrgeräusches samt klanglichen Veränderungen bei Einzelfahrten nachvollzogen werden. Dank der existierenden Überbauung konnten die Auralisationen zumindest in qualitativer Art auch validiert werden.

Schliesslich wurde das SketchUp-Modell über das Plug In SU2 Odeon 2 00 in die ODEON Software importiert (Beispiel siehe Abbildung 3). Als raumakustische Software arbeitet ODEON mit geschlossenen Räumen. Das Modell der Quartiers wurde daher in ODEON mit einer Box aus vollständig schallabsorbierenden Oberflächen umgeben

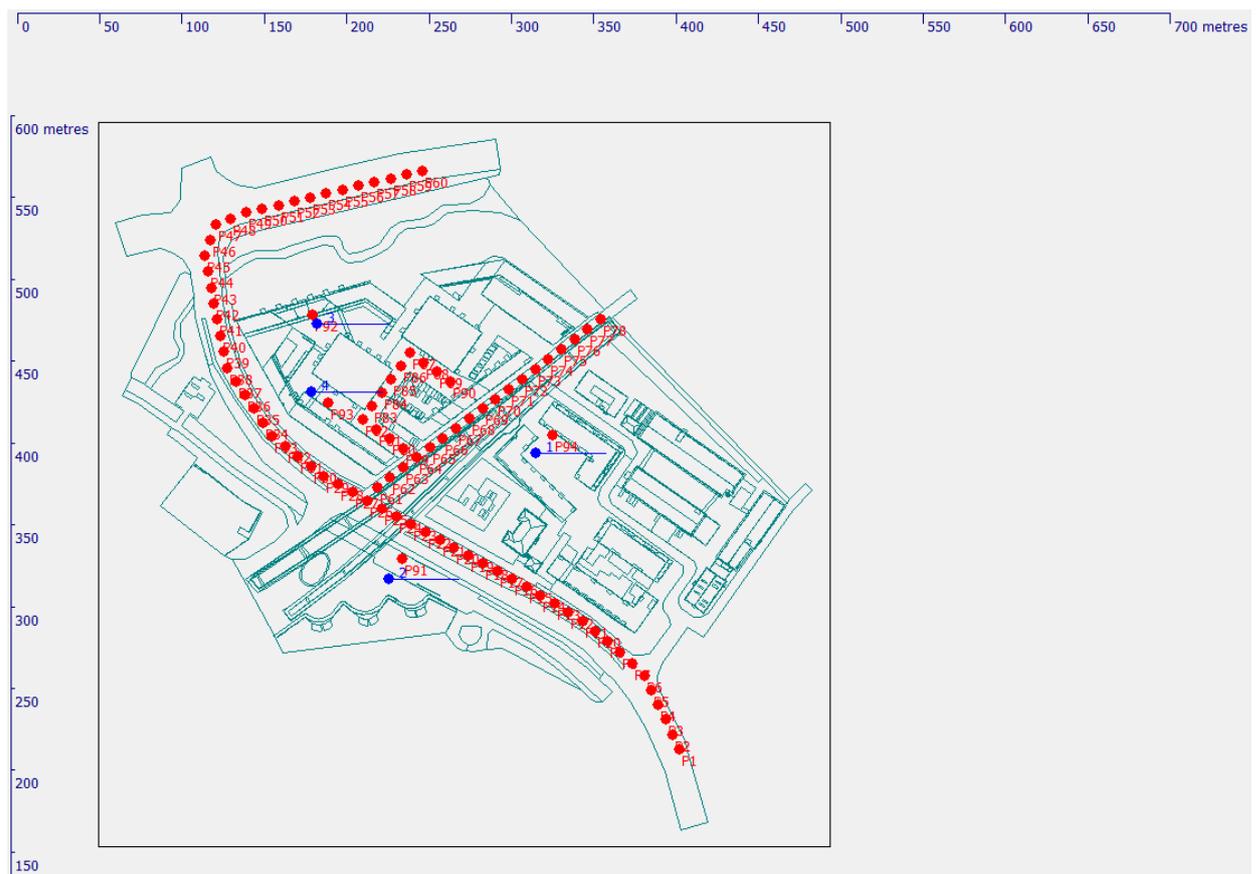


Abbildung 3 Beispiel einer Situation des geometrischen Modells in ODEON mit Quellenpunkten für die drei Fahrwege und allen Hörpositionen (hier mit gedrehtem L förmigem Gebäude).

5.1.2 Fassadentypen: Schallabsorption / Schallstreuung der Oberflächen

Im ODEON Modell sind für alle Flächen Werte für die Schallabsorption in Oktavbänder und für die Schallstreuung als Einzahlwert einzusetzen. Es wurden möglichste plausible Werte gewählt. Für die schallharten Oberflächen wie Strassen, Wege, Wände aus Beton und Ziegelstein etc. wurden die Kennwerte der ODEON Datenbank entnommen. Es sind durchwegs tiefe Werte unter 0.10, mit leichten Unterschieden zwischen den Materialien. Für die Wiesen, Rasenflächen etc. wurden die Werte gemäss Tabelle 1 angenommen

Tabelle 1 Schallabsorptionsgrad, wie er bei den Simulationen mit ODEON für Wiesen-, Rasenflächen etc. eingesetzt wurde.

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Absorptionsgrad	0.15	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60	0.60

In der Untersuchung ging es schliesslich darum, die Wirkung von drei unterschiedlicher Fassadentypen zu untersuchen:

- reflektierend
- schallabsorbierend
- streuend

Dabei wurden für die Simulation mit ODEON die folgenden Werte für Schallabsorption und Schallstreuung angenommen:

Reflektierend:

Dies entspricht normalen, relativ wenig strukturierten Fassaden. Wie oben beschrieben, wurden für die Schallabsorption plausible Werte aus der Materialdatenbank von ODEON eingesetzt. Für die Schallstreuung wurden je nach Oberfläche die von ODEON empfohlenen Werte zwischen 0.005 und 0.1 angenommen.

Absorbierend:

Für die Fassaden und Flächen der Eisenbahnbrücke wurden für den Schallabsorptionsgrad die Werte von Tabelle 2 eingesetzt. Sie werden als plausible Annahme für ein relativ hohes Schallabsorptionsvermögen angesehen. Es ist zu berücksichtigen, dass schallabsorbierende Fassaden für den Wohnungsbau sich bislang nicht durchsetzen konnten. Die gewählten Werte beruhen auf wenigen Beispielen, unter anderem von auf dem Markt erhältlichen schallabsorbierenden Verkleidungen von Lärmschutzwänden

Tabelle 2 Schallabsorptionsgrad wie er bei den Simulationen mit ODEON für die absorbierenden Fassaden und andere schallabsorbierende Verkleidungen angenommen wurde.

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Absorptionsgrad	0.25	0.25	0.55	0.85	0.90	0.80	0.75	0.75

Es wäre grundsätzlich interessant, die Schallabsorptionsgrade für Fassaden nicht einheitlich zu setzen, sondern diese zu variieren, wie dies in einer früheren Untersuchung der Empa gemacht wurde [22]. Darauf wurde jedoch bei dieser ersten Untersuchung mit bewegten Quellen verzichtet, weil man einerseits mit einfachen und klaren Fällen beginnen wollte, aber besonders auch, weil die Anzahl der Hörversuche begrenzt war.

Für die Schallstreuung wurden die Werte der Variante "Reflektierend" belassen.

Streuung:

Für die Fassaden und Flächen der Eisenbahnbrücke wurden für den Schallabsorptionsgrad die Werte der Berechnungsvariante "Reflektierend" eingesetzt.

Für die Schallstreuung wurde der "scattering coefficient" für die entsprechenden Flächen auf 0.5 gesetzt. Odeon verlangt nur einen Einzahlwert, welcher bei der hier gewählten Default-Einstellung dem Wert der Streuung von 707 Hz entspricht. Basierend darauf weist ODEON den Frequenzbändern je einen Wert zu, wobei eine typische Frequenzabhängigkeit verwendet wird, welche bei tiefen Frequenzen eine geringere Schallstreuung annimmt als bei hohen. Ein Wert von 0.5 entspricht etwa einer Fassade, welche in der Tiefe und in der Breite um etwa maximal 0.5 Meter variiert. Es ist eine plausible Annahme für eine architektonisch "strukturiert" gestaltete Gebäudefassade. Die Strukturweiten, resp. Strukturbreiten sind dabei etwa ähnlich wie bei den häufig in Innenstädten anzutreffenden Barockfassaden. Ein Beispiel für eine digital entworfene und maschinell hergestellte Fassade aus Ziegelstein findet sich bei Keller Robmade (<https://robmade.com/>).

5.1.3 Leicht gedrehte Gebäude

Zwei Gebäude, welche zum Nachbargebäude parallele Fassaden aufweisen wurden um etwa 7° leicht gedreht (Abbildung 4). Damit soll untersucht werden, wie es sich auswirkt, wenn parallele Gebäudefassaden, welche erfahrungsgemäss zu störenden Reflexionsphänomenen führen können, vermieden werden

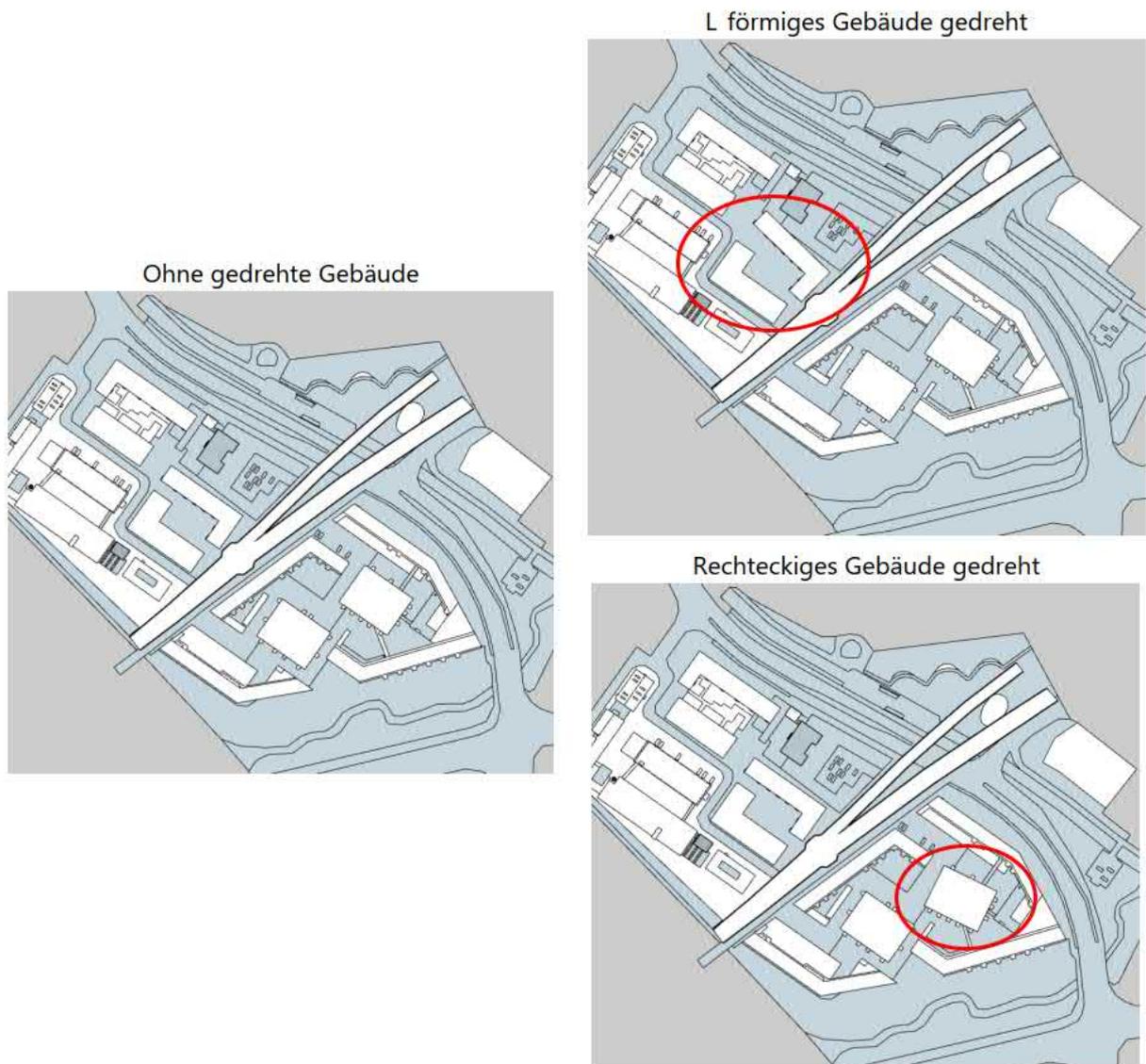


Abbildung 4 SketchUp Modelle Links: Gebäude nicht gedreht; Rechts: Gebäude gedreht

5.1.4 Fahrwege

Für die Simulationen wurden drei verschiedene Fahrwege verwendet (Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7). Die simulierten Geschwindigkeiten waren 50 km/h auf Fahrweg 1 und 25 km/h auf den Fahrwegen 2 und 3.

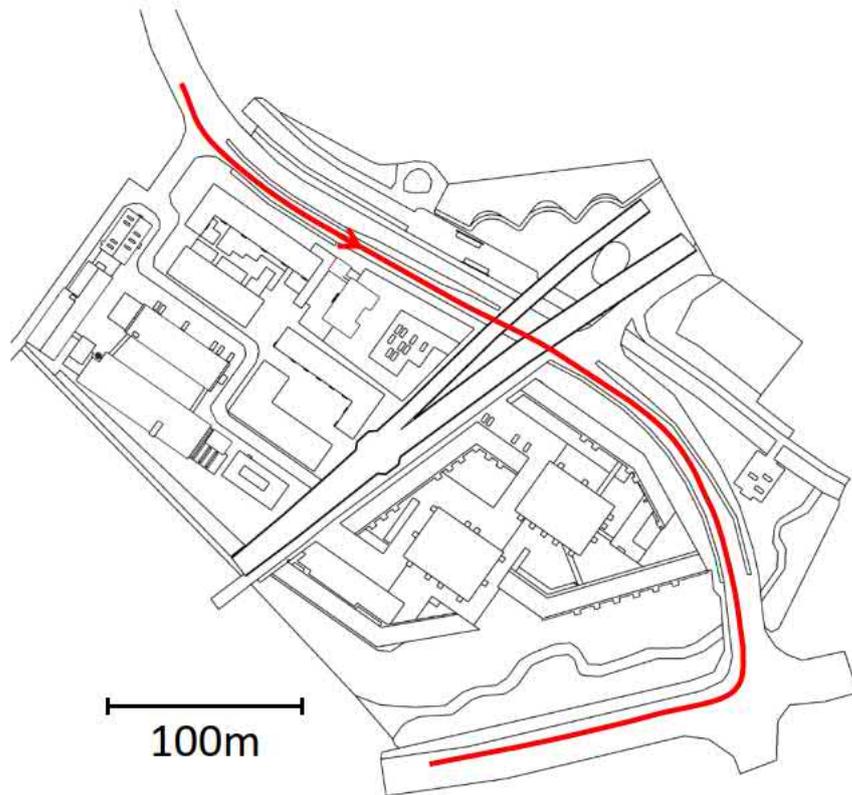


Abbildung 5 Fahrweg 1

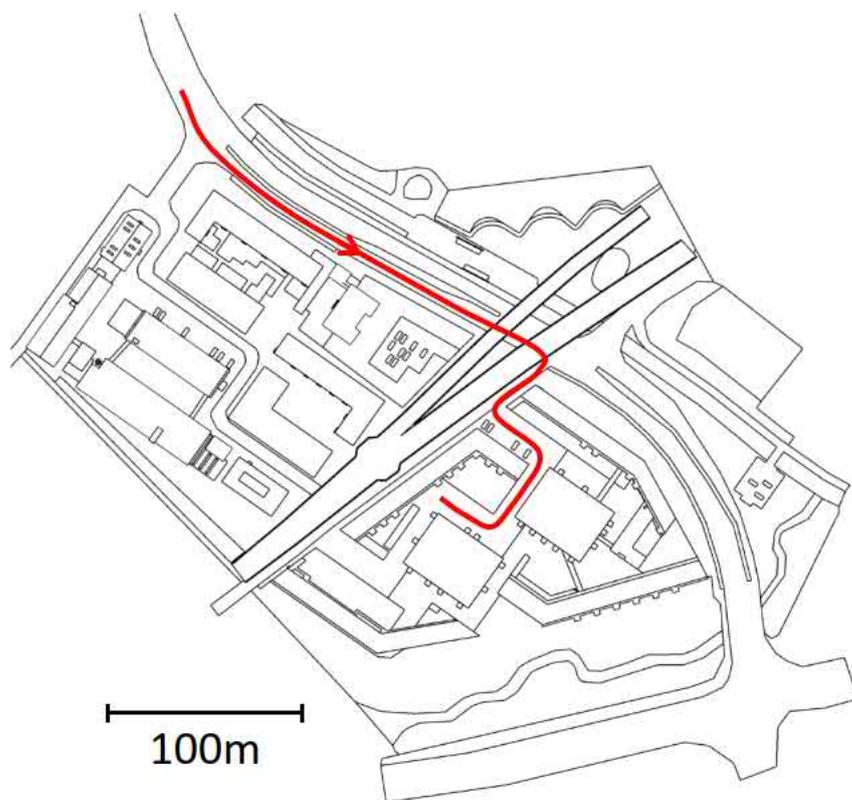


Abbildung 6 Fahrweg 2.

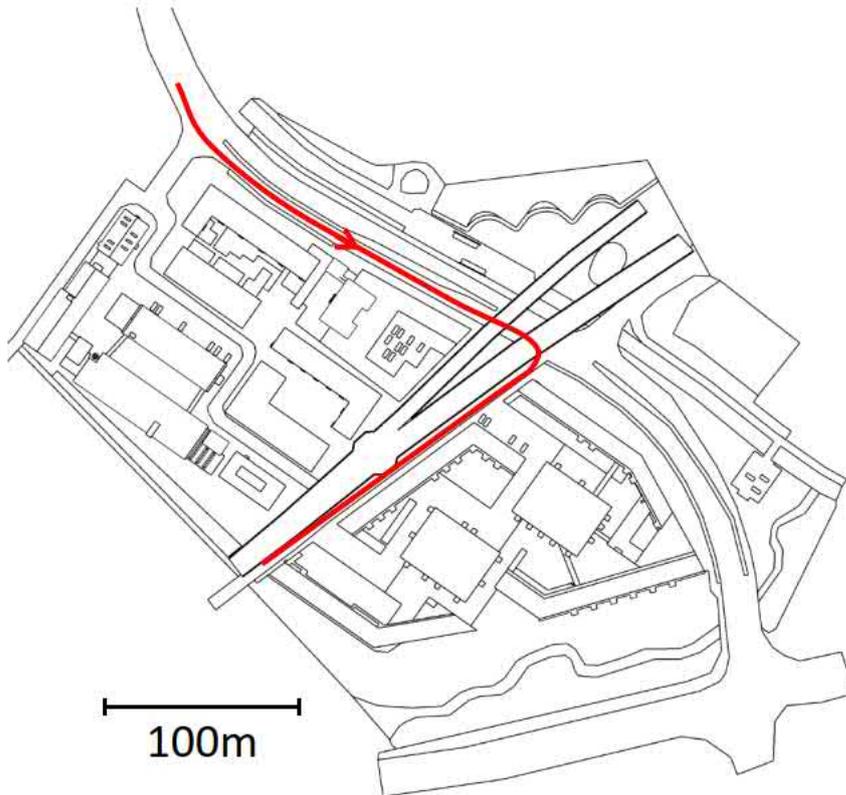


Abbildung 7 Fahrweg 3.

5.1.5 Hörpositionen

In den Hörversuchen wurde mit vier unterschiedlichen Hörpositionen gearbeitet (siehe Abbildung 8). In Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 sind diejenigen Kombinationen von Fahrwegen und Hörpositionen abgebildet, welche bei den Hörversuchen verwendet wurden. Weiter sind in Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 die Aspektwinkel eingezeichnet, unter denen von den Hörpositionen aus die Strasse sichtbar ist. In diesem Winkelbereich erreicht Schall auf direktem Weg die Hörpositionen.

- **O1** befindet sich nahe an der grossen Strasse auf einem Platz vor dem höchsten Gebäude. O1 ist bezüglich Fahrweg 1 relativ exponiert, erhält also viel Direktschall. Diese Position wurde nur für Fahrweg 1 simuliert, weil mit Fahrweg 2 ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind. Der Blick geht in Richtung Strasse, und die Empfängerhöhe beträgt entsprechend einer stehenden Person 1.6 m
- **O2** befindet sich auf einem Spielplatz innerhalb eines Gebäudekomplexes. Durch eine grosse Öffnung ist der Fahrweg 1 zu einem kleinen Teil sichtbar. Der Blick geht in Richtung Innenhof. Fahrweg 2 ist abgeschirmt. Entsprechend einer sitzenden erwachsenen Person, resp einem stehenden Kind wurde eine Empfängerhöhe von 1.2 m gewählt.
- **O3** befindet sich in einer kleinen Häuserschlucht, die gegenüber Fahrweg 1 abgeschirmt ist. Fahrweg 2 und 3 sind aber zu einem kleinen Teil einsehbar. Die Blickrichtung ist ungefähr gegen Fahrweg 2, die Empfängerhöhe wurde wieder mit 1.6 m angenommen, entsprechend einer stehenden Person
- **O4** befindet sich zwischen den L-förmigen Gebäuden. Die Blickrichtung geht gegen den Innenhof. Der Fahrweg ist nicht einsehbar. Die Empfängerhöhe wurde wieder mit 1.6 m angenommen, entsprechend einer stehenden Person

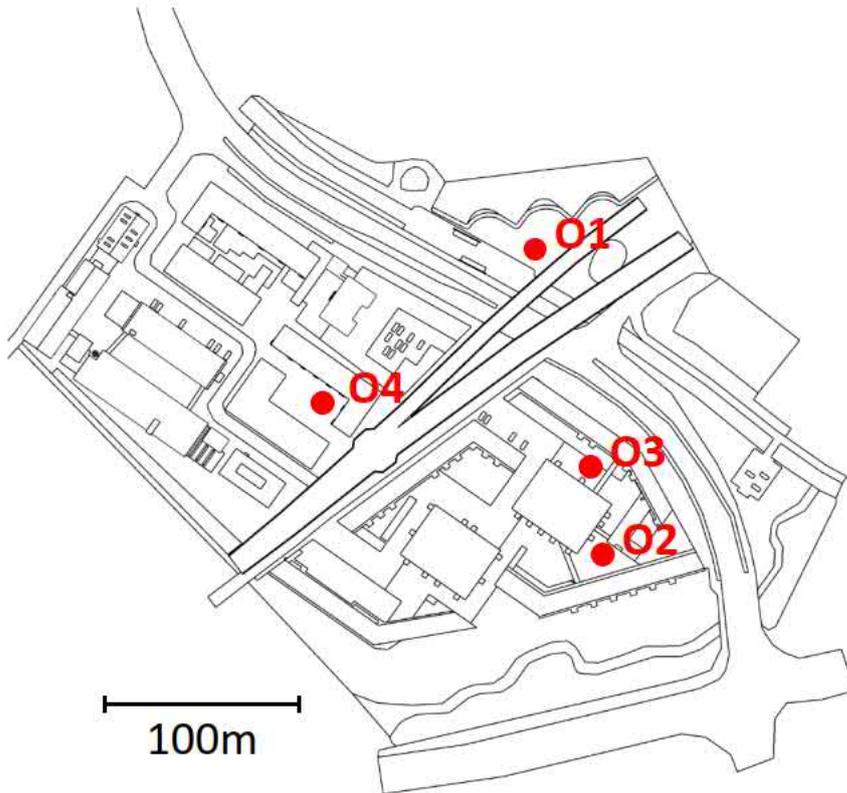


Abbildung 8 Hörpositionen: O1, O2, O3 und O4.

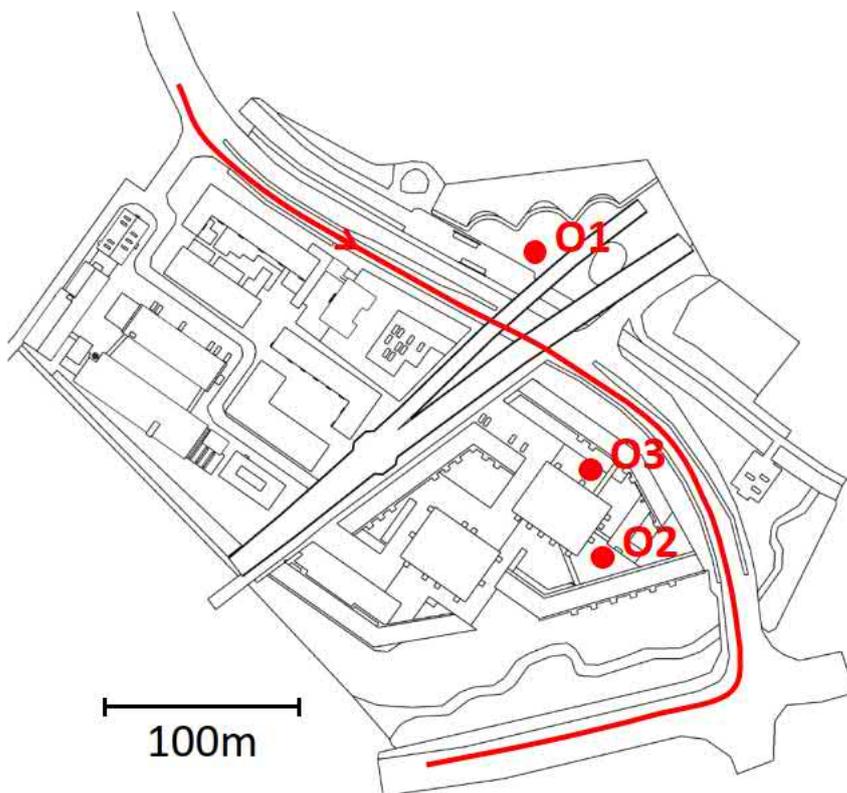


Abbildung 9 Fahrweg 1 und die drei Hörpositionen: O1, O2, und O3.

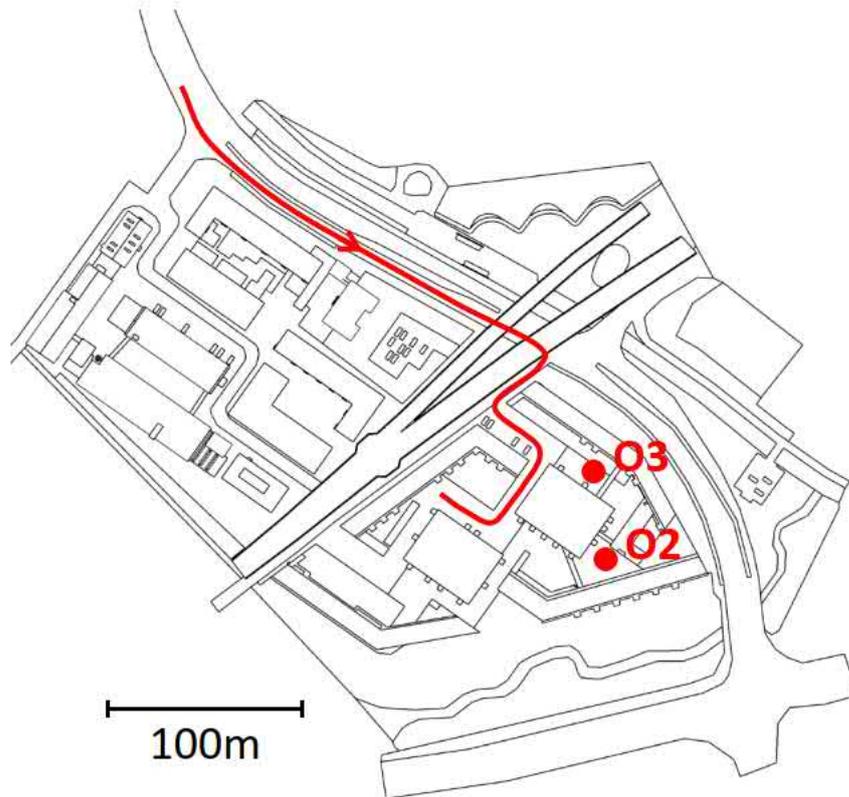


Abbildung 10 Fahrweg 2 und die drei Hörpositionen: O2, und O3.

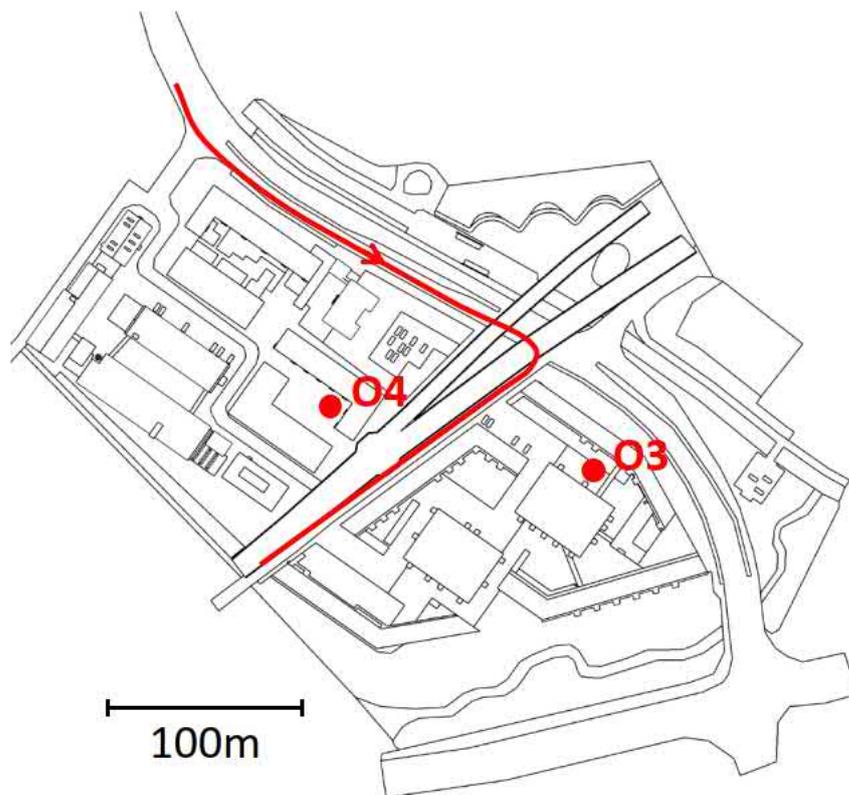


Abbildung 11 Fahrweg 3 und die drei Hörpositionen O3 und O4.

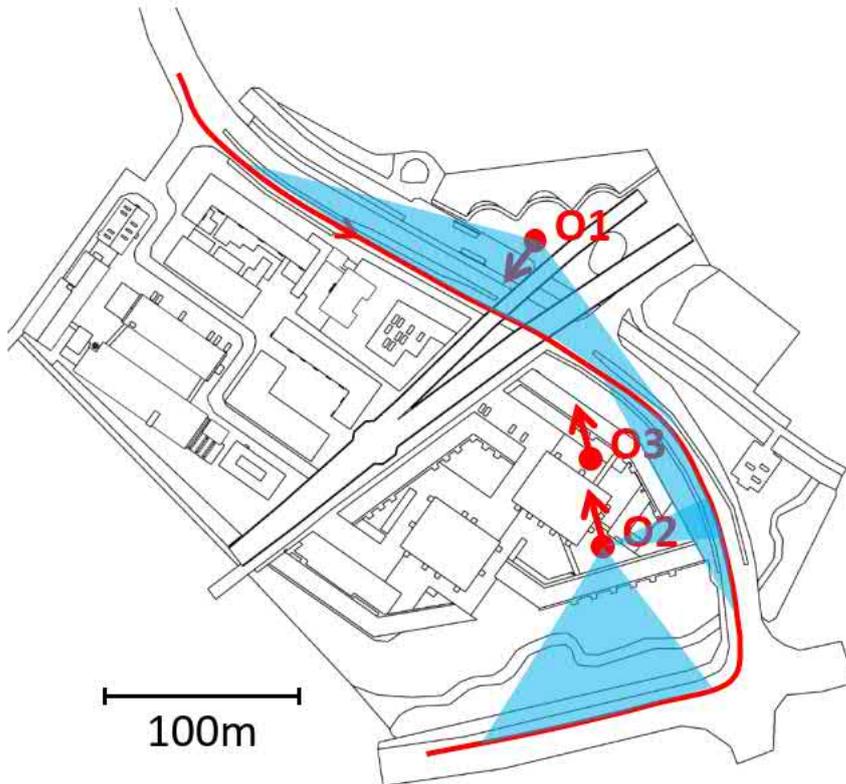


Abbildung 12 Fahrweg 1 und die drei Hörpositionen: O1, O2, und O3 mit den Blickrichtungen (rote Pfeile) Die blauen Flächen zeigen den Aspektwinkel für Direktschall vom Fahrweg

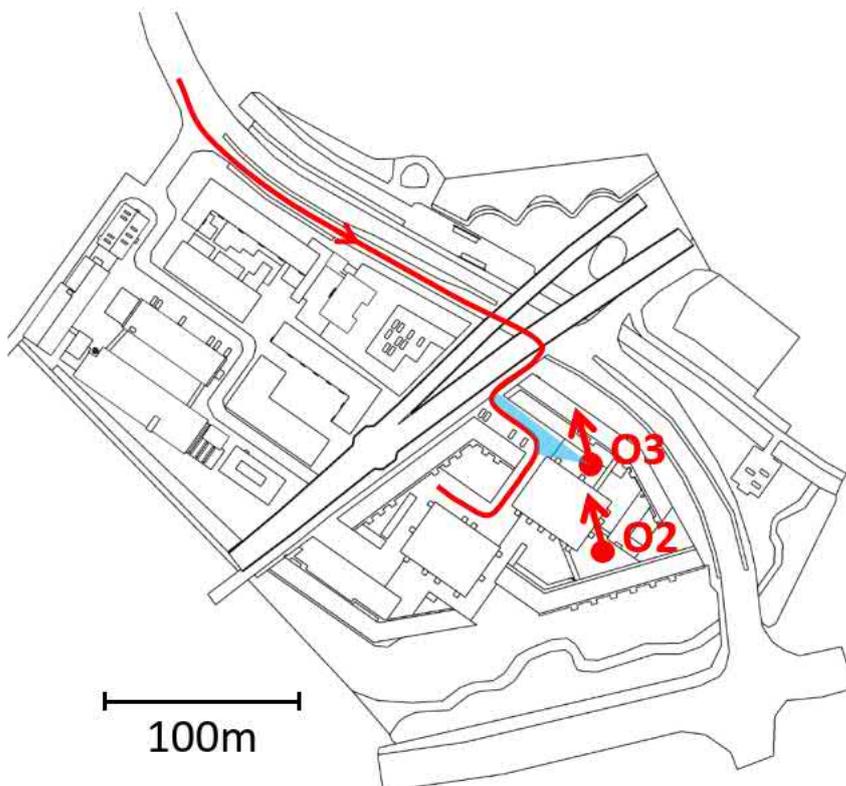


Abbildung 13 Fahrweg 2 und die zwei Hörpositionen: O2, und O3 mit den Blickrichtungen (rote Pfeile) Die blauen Flächen zeigen den Aspektwinkel für Direktschall vom Fahrweg.

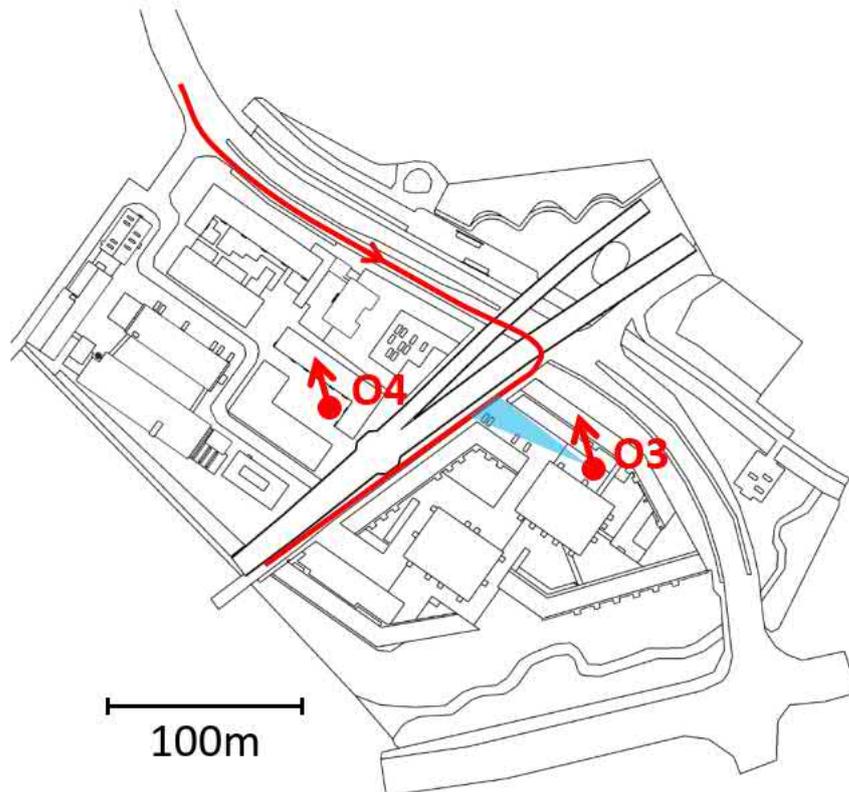
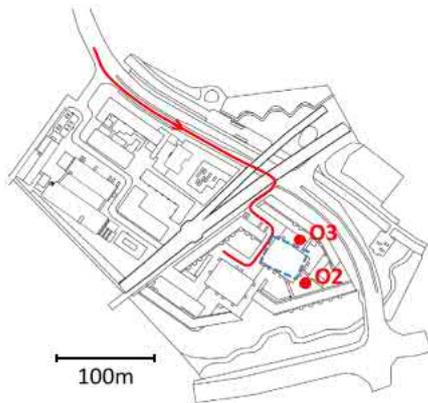


Abbildung 14 Fahrweg 3 und die zwei Hörpositionen O3 und O4 mit den Blickrichtungen (rote Pfeile) für die Situation ohne gedrehte Gebäude. Die blauen Flächen zeigen den Aspektwinkel für Direktschall vom Fahrweg.

5.2.3 Fahrweg 2 – O2, O3 für gedrehtes rechteckiges Gebäude



Quelle:

- **Fahrweg 2 mit 25 km/h**

Hörpositionen:

- **O2**
- **O3**

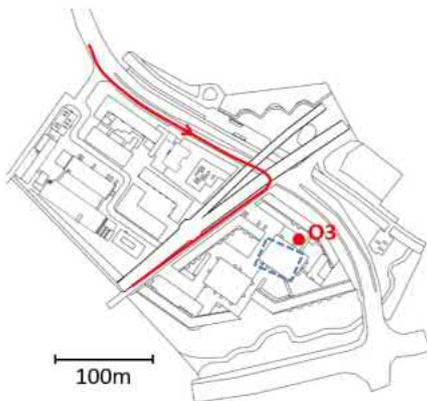
rechteckförmiges Gebäude

- **nicht gedreht**
- **leicht gedreht**

Fassadentypen:

- **reflektierend**

5.2.4 Fahrweg 3 – O3 für gedrehtes rechteckiges Gebäude



Quelle:

- **Fahrweg 3 mit 25 km/h**

Hörpositionen:

- **O3**

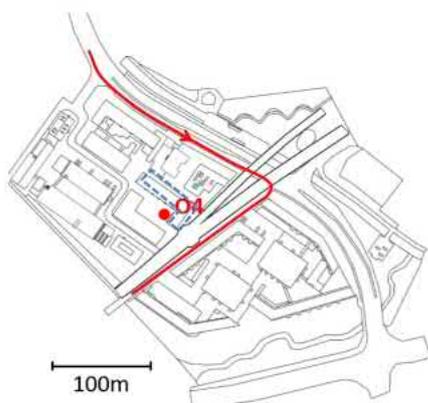
rechteckförmiges Gebäude

- **nicht gedreht**
- **leicht gedreht**

Fassadentypen:

- **reflektierend**

5.2.5 Fahrweg 3 – O4 für gedrehtes L-förmiges Gebäude



Quelle:

- **Fahrweg 3 mit 25 km/h**

Hörpositionen:

- **O4**

L förmige Gebäude

- **nicht gedreht**
- **leicht gedreht**

Fassadentypen:

- **reflektierend**

6 Hörversuche

6.1 Einleitung

Es wurden zwei Experimente durchgeführt. Das zweite Experiment wurde fast ein Jahr nach Auswertung des ersten Experiments absolviert. Der Grund liegt hauptsächlich in der Pandemie. Wegen der Regelungen der Empa durften während längerer Zeit keine Hörversuche durchgeführt werden. Zudem musste ein seit längerem geplanter kleiner Umbau des AuraLab abgewartet werden, was zu zusätzlichen Verzögerungen führte.

Die bereits früher erwähnten Anpassungen des AuraLab betrafen vor allem den Tieftonbereich und Aspekte der Signalübertragung. Die Anpassungen führten zu einer Verbesserung der Raumakustik unter rund 100 Hz. Dieser Frequenzbereich ist für die im Rahmen der Hörversuche dieses Projekts nicht wesentlich. Das AuraLab konnte für den zweiten Hörversuch so eingerichtet werden, dass die akustische Situation sich nicht von derjenigen für die ersten Hörversuche unterschied.

Die Hörversuche wurden von der Ethikkommission der Empa genehmigt: Experiment 1: Genehmigung Empa Ethikkommission (CMI 2019_295), Brief vom 29.10.2019; Experiment 2: Genehmigung Empa Ethikkommission (CMI 2020_063), Brief vom 13.03.2020.

6.2 Experiment 1

6.2.1 Überblick

In den Hörversuchen von Experiment 1 wurden für die in Abschnitte 5.2.1 und 5.2.2 dargestellten Szenarien die Lästigkeitsurteile der Probanden erfasst. Die variierten Parameter sind damit:

- Typ von Gebäudefassaden (3)
- Fahrweg (2)
- Hörposition (3)

Insgesamt ergeben sich also 15 Stimuli aus der Kombination von drei Fassadentypen, zwei Fahrwegen und drei Hörpositionen: (3x2x3) (1x1x3).

In einem ersten Hörversuch (Experiment 1_1) wurden die Lästigkeitsurteile der Probanden für die in Tabelle 3 aufgeführten Stimuli gemäss ICBEN 11 Punkte Skala [29] ermittelt.

Im zweiten Hörversuch (Experiment 1_2) wurden die Rangfolgen von drei Stimuli (derselbe Fahrweg und derselben Hörposition, aber mit unterschiedlichen Fassadentypen) erfragt (Tabelle 4).

6.2.2 Ablauf

Die Hörversuche wurden in Form von fokussierten Hörtests durchgeführt. Die Probanden führten die Hörversuche einzeln durch. Vor Beginn von Hörversuch 1 wurden die Probanden angewiesen, Informationen über das Experiment zu lesen. Zudem unterzeichneten sie eine Einverständniserklärung zur Teilnahme an den Versuchen. Anschliessend erhielten die Probanden einen Fragebogen, in dem sie über ihr Gehör und ihre Gesundheit als Ein- bzw. Ausschlusskriterien befragt wurden. Schliesslich erhielten die Probanden schriftlich Informationen, die sie über den Versuchsablauf und ihre Aufgaben für den Hörversuch 1 instruierten. Nach Abschluss des ersten Hörversuchs erfolgte nach einer kurzen Pause eine entsprechende Einführung zu Hörversuch 2. Am Schluss erhielten die Probanden den Fragebogen erneut, zum Ausfüllen des zweiten Teils zu Alter, Geschlecht und Wohnsituation (ländlich-städtisch, laut/leise). Die Hörversuche wurden in englischer Sprache durchgeführt.

Tabelle 3 Stimuli für Experiment 1 1 (Beurteilung der Lästigkeit nach ICBEN 11 Punkte-Skala)

Fahrweg	Hörposition	Gebäudefassade
1	O1	reflektierend
1	O1	absorbierend
1	O1	streuend
1	O2	reflektierend
1	O2	absorbierend
1	O2	streuend
1	O3	reflektierend
1	O3	absorbierend
1	O3	streuend
2	O2	reflektierend
2	O2	absorbierend
2	O2	streuend
2	O3	reflektierend
2	O3	absorbierend
2	O3	streuend

Tabelle 4 Stimuli für Experiment 1 2 (Ermittlung Rangfolge von drei Stimuli)

Stimuli 1 <i>reflektierend</i>		Stimuli 2 <i>absorbierend</i>		Stimuli 3 <i>streuend</i>	
Fahrweg	Hörposition	Fahrweg	Hörposition	Fahrweg	Hörposition
1	O1	1	O1	1	O1
1	O2	1	O2	1	O2
1	O3	1	O3	1	O3
2	O2	2	O2	2	O2
2	O3	2	O3	2	O3

6.2.3 Versuchslayout Experiment 1 - 1

Damit sich die Probanden mit den Stimuli von 20 Sekunden Dauer und der Testsoftware vertraut machen konnten, wurden vor Beginn des Hauptversuchs zwei Orientierungs- und zwei Trainingsbeispiele präsentiert. Im Hauptversuch mussten schliesslich die Probanden die Lästigkeit der Autogeräusche für die 15 oben beschriebenen Stimuli einstufen. Während oder nach der Wiedergabe jedes Stimulus konnten die Testpersonen ihre Bewertungen auf einer 11-Punkte-ICBEN-Skala [29] in einer grafischen Oberfläche der Testsoftware angeben (Abbildung 15). 0 Punkte entspricht bei dieser Skala gar keiner Lästigkeit/Störung, 10 Punkte äusserster Lästigkeit/Störung. Die Frage an die Probanden lautete dabei:

"When you imagine that this is the sound situation in your outdoor living environment, what number from 0 to 10 represents best how much you would be bothered, disturbed or annoyed by it?"

Die Stimuli wurden in zufälliger Reihenfolge nacheinander abgespielt. Nach der Wiedergabe der Stimuli und der Eingabe der Beurteilung durch die Probanden wurde nach einer Pause von zwei Sekunden der nächste Stimulus wiedergegeben.

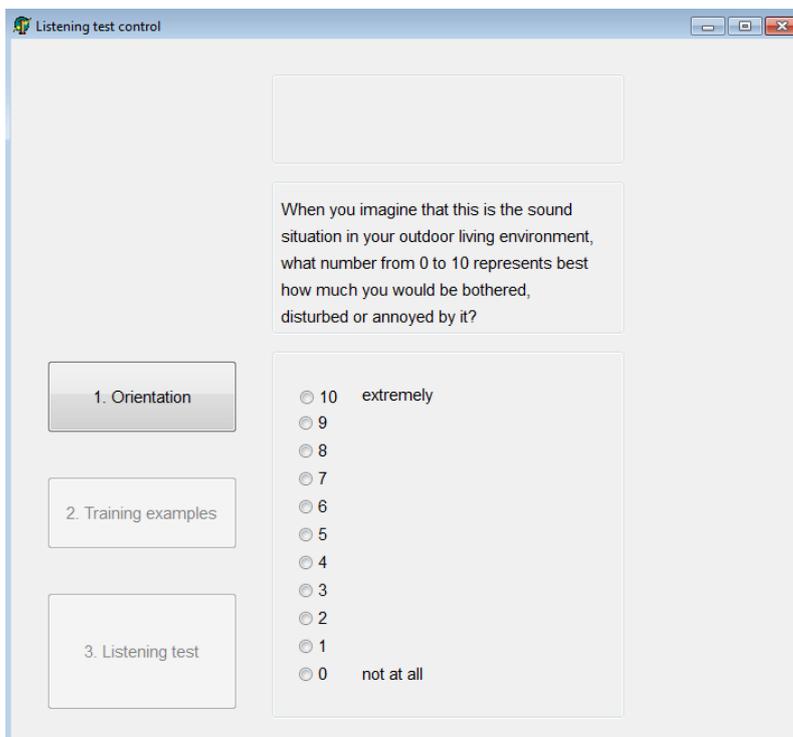


Abbildung 15 Grafische Oberfläche für die Probanden Hörversuch 1.

6.2.4 Versuchslayout Experiment 1 - 2

Weil der zweite Hörversuch unmittelbar nach dem ersten stattfand, und die Probanden damit bereits mit den Geräuschen vertraut waren, konnte der Hörversuch 2 direkt ohne Orientierungs- und Trainingsphase durchgeführt werden. Dabei wurden die Stimuli aus dem ersten Versuch mit jeweils 15 Sekunden Dauer verwendet. Die Aufgabe für die Probanden war, unter jeweils drei zusammen präsentierten Stimuli A, B und C (jeweils Situationen mit demselben Fahrweg und derselben Hörposition, aber mit unterschiedlichen Fassaden [reflektierend, absorbierend, streuend]) das am geringsten und das am stärksten störende resp. belästigende Geräusch auszuwählen. Die Abspielmöglichkeiten für jedes Geräusch wurden nebeneinander auf einer der grafischen Oberflächen angeboten (Abbildung 16). Die Probanden konnten sich jedes Geräusch A, B und C zweimal anhören und nach der Wiedergabe des ganzen

Szenarios wählen, welcher Stimulus als nächstes abgespielt werden sollte. Die Probanden erhielten folgende Anweisung:

"Imagine that this is the sound situation in your outdoor living environment. Please choose the least annoying, disturbing or bothering and most annoying, disturbing or bothering sounds."

Nachdem die Probanden jedes der drei Geräusche A, B und C mindestens einmal gehört und ihre Feedback gegeben hatten, konnten sie zur nächsten Seite weitergehen, wo drei neue Geräusche präsentiert wurden. Die Reihenfolge der Seiten mit den 3 Stimuli sowie die Reihenfolge der Stimuli auf jeder Seite wurde randomisiert

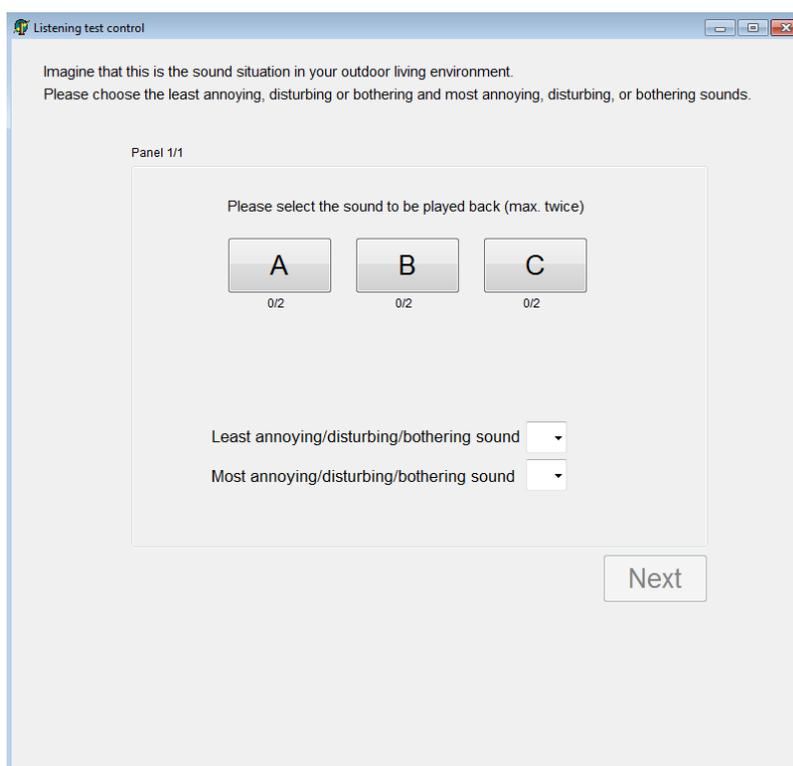


Abbildung 16 Grafische Oberfläche für die Probanden von Experiment 1 Hörversuch 2

6.2.5 Probanden

Es nahmen 32 Probanden (14 weibliche und 18 männliche) an den Hörversuchen teil. Alle beendeten beide Teile des Hörversuchs, und alle erklärten als Selbstbeurteilung, ein normales Gehör zu haben und sich gesund zu fühlen. Die Probanden waren zwischen 19 und 62 Jahre alt (Median 30.5 Jahre).

6.3 Experiment 2

6.3.1 Überblick

Die Hörversuche des Experiments 2 wurden nach Auswertung des Experiments 1 geplant. Es wurden wiederum für unterschiedliche Szenarien die Lästigkeitsurteile der Probanden erfasst, und zwar in einem Paarvergleich. Dabei wurden die folgenden Stimuli präsentiert

– Experiment 2 1: Einfluss der gedrehten Häuser

Bei den ersten vier Stimuli Paare ging es um den **Einfluss der gedrehten Häuser** (siehe Abschnitte 5.2.3–5.2.5). Für die beiden Fahrwege 2 und 3 wurde die Situation mit und ohne Drehung von zwei Gebäuden verglichen (Tabelle 5)

Tabelle 5 Stimuli von Experiment 2 1 (Paarvergleich) zum Einfluss der gedrehten Häuser.

Stimuli 1 <i>keine Gebäude gedreht</i>		Stimuli 2 <i>Gebäude gedreht</i>		
Fahrweg	Hörposition	Fahrweg	Hörposition	gedrehtes Gebäude
2	O2	2	O2	R
2	O3	2	O3	R
3	O3	3	O3	R
3	O4	3	O4	L

R = rechteckförmiges Gebäude

L = L förmiges Gebäude

– Experiment 2 2: Einfluss der gedrehten Häuser mit angeglichenen Pegeln

Mit diesen Stimuli Paaren sollte die Frage beantwortet werden, wie die Lästigkeitsurteile beim Paarvergleich ausfallen, wenn bei zwei Stimuli Paaren aus Tabelle 5 die Pegel so angeglichen werden, dass beide den gleichen A bewerteten Ereignispegel L_{AE} haben. Dabei wurde der Stimulus mit dem niedrigeren L_{AE} so verstärkt, dass es dem L_{AE} des anderen Stimulus entsprach. Die präsentierten Stimuli finden sich in Tabelle 6:

Tabelle 6 Stimuli von Experiment 2 2 (Paarvergleich) zum Einfluss der gedrehten Häuser bei angeglichenen Ereignispegeln.

Stimuli 1 <i>keine Gebäude gedreht</i>		Stimuli 2 <i>Gebäude gedreht</i>			Ursprünglicher Pegelunterschied L_{AE} siehe 7.1.2
Fahrweg	Hörposition	Fahrweg	Hörposition	gedrehtes Gebäude	
2	O2	2	O2	R	1,3 dB
3	O4	3	O4	L	1,5 dB

R = rechteckförmiges Gebäude

L = L förmiges Gebäude

– **Experiment 2 3: Einfluss Fassaden reflektierend/absorbierend mit angeglichenen Pegeln**

Schliesslich wurden aus dem Experiment 1 zwei Paare von Stimuli mit reflektierenden bzw. absorbierenden Fassaden ausgewählt welche grosse Pegelunterschiede aufwiesen. Es wurden wiederum bei den zwei Paaren die Stimuli bezüglich L_{AE} angeglichen und den Probanden dargeboten (Tabelle 7)

Tabelle 7 Stimuli von Experiment 2 3 (Paarvergleich) zum Einfluss der gedrehten Häuser bei angeglichenen Ereignispegeln Stimuli

Stimuli 1 <i>reflektierend</i>		Stimuli 2 <i>absorbierend</i>		Ursprünglicher Pegelunterschied L_{AE} siehe Tabelle 10
Fahrweg	Hörposition	Fahrweg	Hörposition	
1	O3	1	O3	8.2 dB
2	O2	2	O2	5.4 dB

Alle Stimuli von Tabelle 5 Tabelle 7 wurden im gleichen Experiment randomisiert dargeboten.

6.3.2 Ablauf

Die Hörversuche wurden in Form von fokussierten Hörtests durchgeführt. Die Probanden führten die Hörversuche einzeln durch. Vor Beginn wurden die Probanden angewiesen, Informationen über das Experiment zu lesen. Zudem unterzeichneten sie eine Einverständniserklärung. Anschliessend erhielten die Probanden einen ersten Teil eines Fragebogens, in dem sie über ihr Gehör und ihre Gesundheit als Ein- bzw. Ausschlusskriterien befragt wurden. Schliesslich erhielten die Probanden schriftlich Informationen, wo sie über den Ablauf der Versuche und ihre Aufgabe darin instruiert wurden. Am Schluss erhielten die Probanden den weiter oben erwähnten Fragenbogen zum Ausfüllen des zweiten Teils zu Alter, Geschlecht und Wohnsituation. Die Hörversuche wurden in englischer Sprache durchgeführt.

6.3.3 Versuchslayout

Damit sich die Probanden mit den Stimuli von 15 Sekunden Dauer und der Testsoftware vertraut machen konnten, wurden vor Beginn zwei Trainingsbeispiele präsentiert (auf eine Orientierung wurde verzichtet). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, von den zwei präsentierten Stimuli dasjenige zu bezeichnen, welches stärker stört resp. belästigt.

Die Abspielmöglichkeiten für die beiden Geräusche wurden nebeneinander auf einer grafischen Oberfläche angeboten (Abbildung 17). Die Probanden konnten sich beide Geräusche in beliebiger Reihenfolge maximal zweimal anhören. Sie erhielten folgende Anweisung:

"Imagine that this is the sound situation in your outdoor living environment. Please choose which sound is more annoying, disturbing or bothering to you."

Nachdem die Probanden jedes der beiden Stimuli mindestens einmal gehört und ihre Feedback gegeben hatten, konnten sie zur nächsten Seite weitergehen, wo zwei neue Geräusche präsentiert wurden. Die Reihenfolge der Seiten mit den zwei Stimuli sowie die Reihenfolge der Stimuli auf jeder Seite wurde randomisiert.

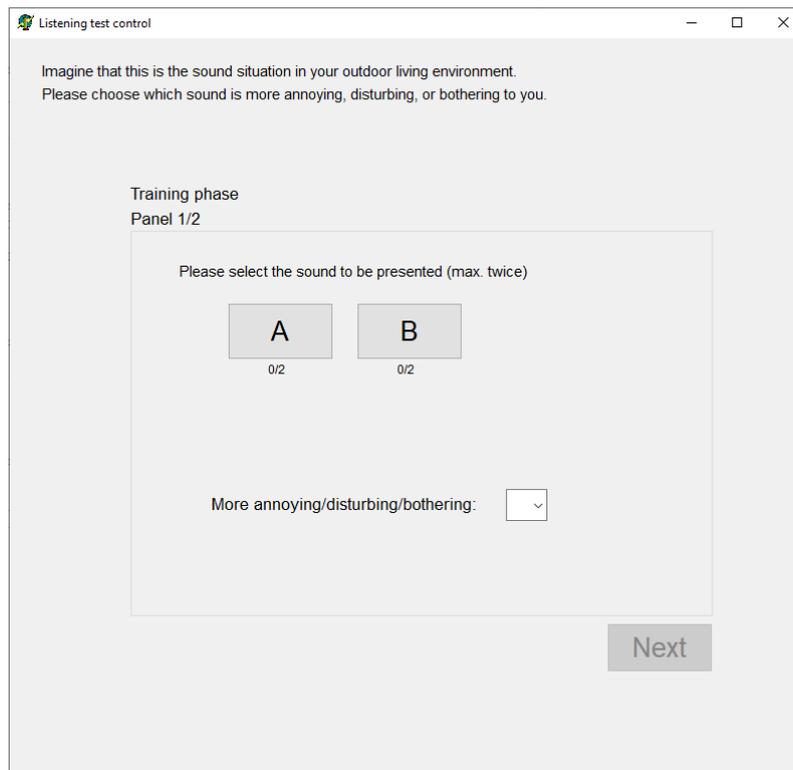


Abbildung 17 Grafische Oberfläche für die Probanden von Experiment 2

6.3.4 Probanden

Es nahmen 22 Probanden (13 weibliche und 9 männliche) an den Hörversuchen teil. Alle beendeten den Hörversuch, und alle erklärten als Selbstbeurteilung, ein normales Gehör zu haben und sich gesund zu fühlen. Die Probanden waren zwischen 19 und 61 Jahre alt (Median 32,0 Jahre).

7 Ergebnisse

7.1 Auswertung verschiedener Pegelgrössen

7.1.1 Ermittelte Schallpegelgrössen

Der A bewertete Schallereignispegel L_{AE} entspricht der energetischen Summe des Schalldruckpegels über eine gewisse Dauer T , resp. dem über ein Ereignis zeitlich gemittelten und auf die Dauer von 1s energetisch umgerechneten Schalldruckpegel. Die A Bewertung berücksichtigt die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs abhängig von der Frequenz

$$L_{AE} = 10 \cdot \frac{1}{1s} \lg \int_0^T \frac{p^2}{p_0^2}, \text{ wobei } p = \text{Schalldruck in Pa, } p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

Wegen der konstanten Dauer T der Stimuli gilt für den A bewerteten Mittelungspegel L_{Aeq} :

$$L_{Aeq} = L_{AE} - 10 \cdot \lg\left(\frac{T}{1s}\right). \text{ Mit } T = 20 \text{ s ergibt sich somit } L_{Aeq} = L_{AE} - 13 \text{ dB}$$

Schliesslich ist auch der A bewertete Maximalpegel, Zeitkonstant FAST $L_{AF,max}$ innerhalb der Zeitdauer der Stimuli angeben.

7.1.2 Experiment 1-1 (Lästigkeit ICBEN-Skala für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden)

In Tabelle 8 und Tabelle 9, sowie in Abbildung 18 bis Abbildung 21, sind die Schallpegel der verschiedenen Szenarien des Hörversuch 1 von Experiment 1 ausgewiesen und miteinander verglichen.

7.1.3 Experiment 1-2 (Rangierung der Lästigkeit für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden)

Für die Stimuli von Hörversuch 1 2 wurden wie erwähnt die Stimuli von Hörversuch 1 1 verwendet, allerdings gekürzt auf 15 Sekunden. Die Maximalpegel sind die gleichen. Die Ereignispegel haben sich dagegen durch diese Manipulation auch untereinander im Vergleich leicht verändert. Sie sind dargestellt und verglichen in Tabelle 10, sowie in Abbildung 22 und Abbildung 23.

7.1.4 Experiment 2-1 (Rangierung der Lästigkeit für gedrehte Gebäude)

In Tabelle 11 und Tabelle 12, sowie in Abbildung 24 Abbildung 27, finden sich die Schallpegel der Stimuli des Experiments 2 mit entsprechenden Vergleichen.

7.1.5 Experimente 2-2 und 2-3 (Rangierung der Lästigkeit für angegliche Pegel)

Die Pegel der Stimuli werden nicht nochmal aufgeführt, dabei nur, wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, die Ereignispegel angeglichen wurden.

Tabelle 8 Experiment 1 1 A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

Fahrweg	Hörposition	reflektierend	absorbierend	streuend	$L_{AE,r}$	$L_{AE,a}$	$L_{AE,s}$
		$L_{AE,r}$	$L_{AE,a}$	$L_{AE,s}$			
1	O1	66.8	65.9	66.8	0.9		0.0
1	O2	59.1	57.1	58.9	2.1		0.3
1	O3	58.0	51.2	57.3	6.8		0.7
2	O2	61.2	55.6	60.5	5.6		0.7
2	O3	67.8	63.0	66.8	4.8		1.0

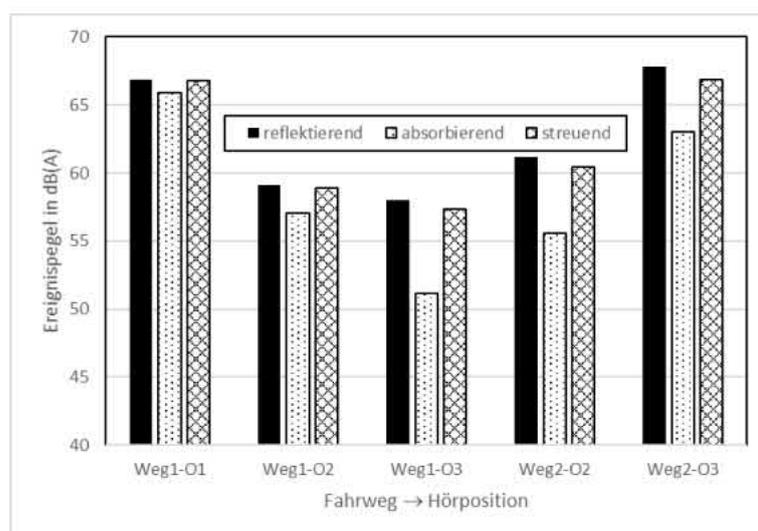


Abbildung 18 Experiment 1 1. A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli, gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen

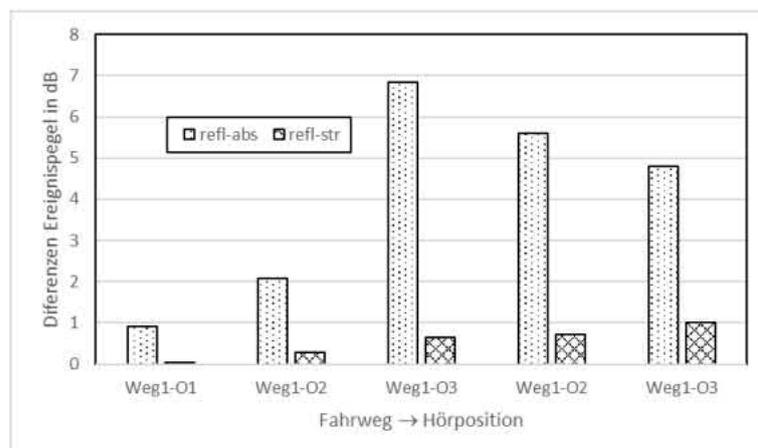


Abbildung 19 Experiment 1 1. Pegeldifferenzen $L_{AE,r} - L_{AE,a}$ und $L_{AE,r} - L_{AE,s}$ der A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

Tabelle 9 Experiment 1 1 A bewertete Maximalpegel mit Zeitkonstant FAST $L_{AF,max}$ der Stimuli, gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

Fahrweg	Hörposition	reflektierend	absorbierend	streuend	$L_{AF,max,r}$	$L_{AF,max,r}$
		$L_{AF,max,r}$	$L_{AF,max,a}$	$L_{AF,max,s}$	$L_{AF,max,a}$	$L_{AF,max,s}$
1	O1	59.1	58.0	58.7	1.1	0.4
1	O2	51.5	50.6	51.0	0.9	0.5
1	O3	55.5	49.3	54.1	6.2	1.4
2	O2	54.7	50.7	54.5	4.0	0.2
2	O3	63.6	58.7	62.5	4.9	1.1

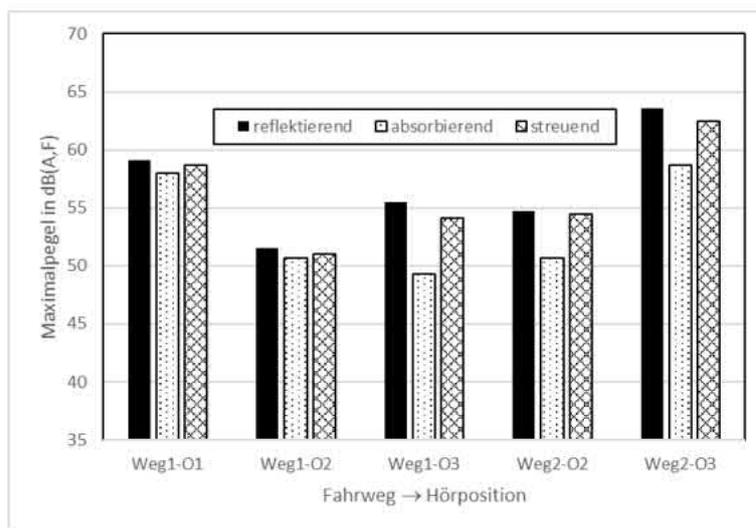


Abbildung 20 Experiment 1 1. A bewertete Maximalpegel, Zeitkonstante FAST $L_{AF,max}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

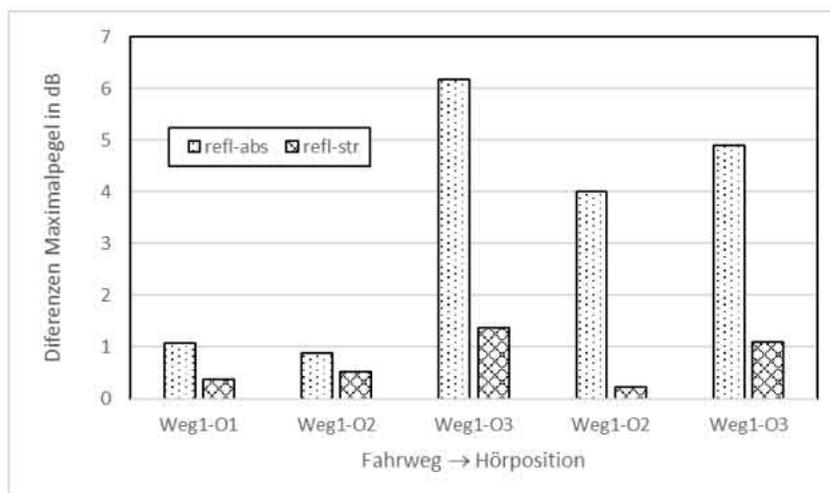


Abbildung 21 Experiment 1 1 Pegeldifferenzen $L_{AF,max,r}$ $L_{AF,max,a}$ und $L_{AF,max,r}$ $L_{AF,max,s}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

Tabelle 10 Experiment 1 2 A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

Fahrweg	Hörposition	reflektierend	absorbierend	streuend	$L_{AE,r}$	$L_{AE,a}$	$L_{AE,s}$
		$L_{AE,r}$	$L_{AE,a}$	$L_{AE,s}$			
1	O1	66.4	65.5	66.3	0.9		0.0
1	O2	58.2	57.0	58.3	1.2		0.0
1	O3	55.8	47.6	55.0	8.2		0.8
2	O2	60.7	55.3	60.0	5.4		0.7
2	O3	67.6	62.9	66.6	4.7		1.0

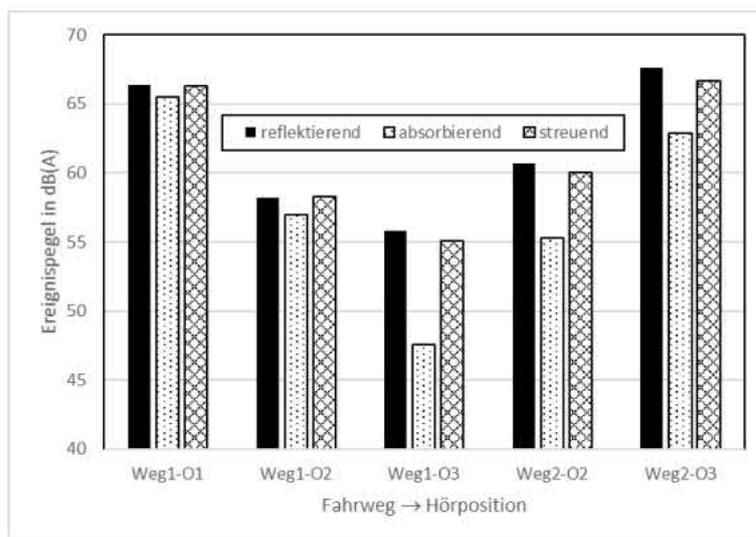


Abbildung 22 Experiment 1 2. A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli, gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen.

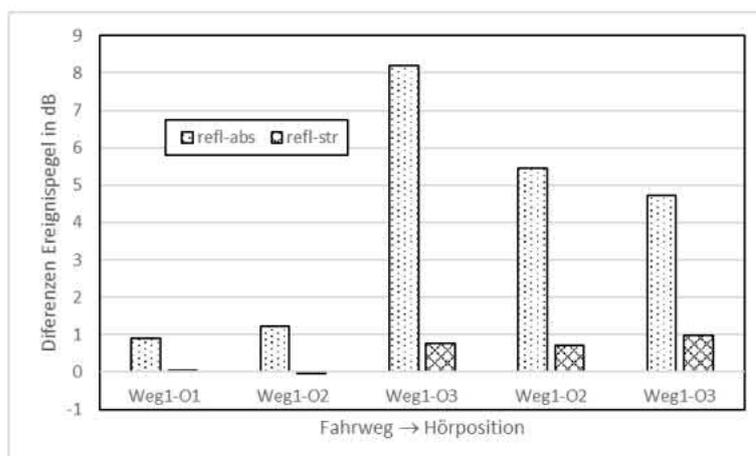


Abbildung 23 Experiment 1 2. Pegeldifferenzen $L_{AE,r}$ $L_{AE,a}$ und $L_{AE,r}$ $L_{AE,s}$ der A bewerteten Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Fassadentypen

Tabelle 11 Experiment 2 1 Stimuli für leicht gedrehte Gebäude A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Gebäudedrehungen

Fahrweg	Hörposition	nichts gedreht L_{AE}	Rechteckförmiges Gebäude gedreht $L_{AE,R}$	L-förmiges Gebäude gedreht $L_{AE,L}$	L_{AE} , $L_{AE,R}$	L_{AE} , $L_{AE,L}$
3	O4	61.8		60.3		1.5
3	O3	56.2	55.9		0.3	
2	O2	60.7	59.4		1.3	
2	O3	67.6	67.6		0.0	

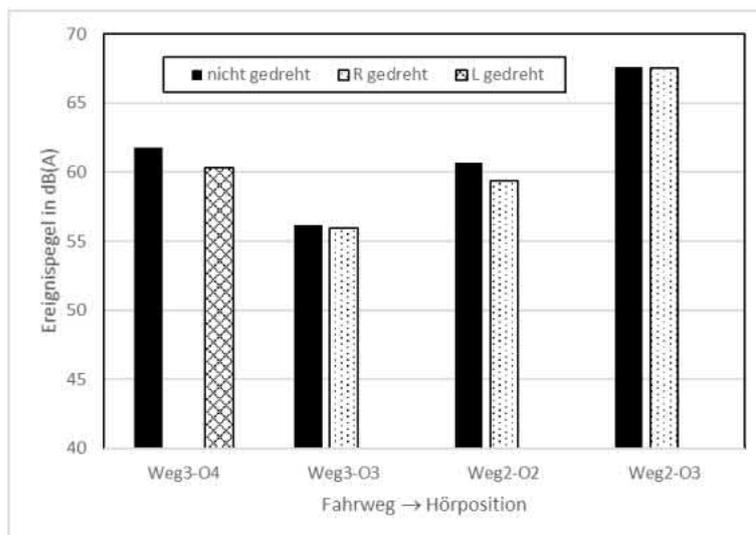


Abbildung 24 Experiment 2 1. Stimuli für leicht gedrehte Gebäude. A bewertete Ereignispegel L_{AE} der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen

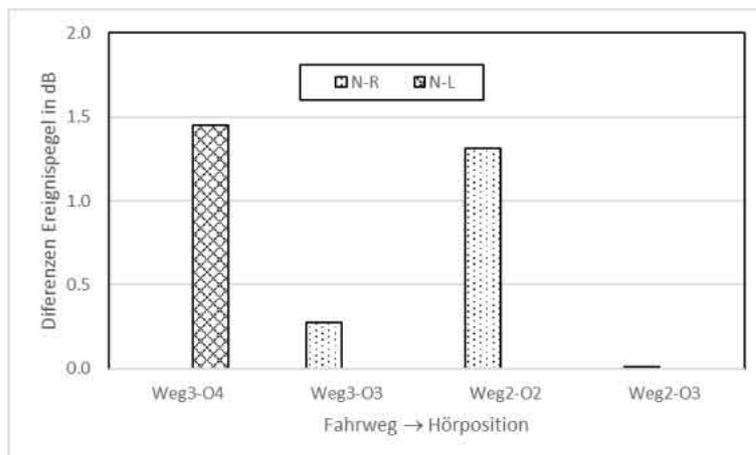


Abbildung 25 Experiment 2 - Stimuli für leicht gedrehte Gebäude. Pegeldifferenzen $L_{AE} - L_{AE,R}$ und $L_{AE} - L_{AE,L}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen

Tabelle 12 Experiment 2 1 Stimuli für leicht gedrehte Gebäude A bewertete Maximalpegel, Zeitkonstante FAST $L_{AF,max}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen und Gebäuderotationen sowie Pegelunterschiede

Fahrweg	Hörposition	nicht gedreht $L_{AF,max}$	Rechteckförmiges Gebäude gedreht $L_{AF,max,R}$	L-förmiges Gebäude gedreht $L_{AF,max,L}$	$L_{AF,max} - L_{AF,max,R}$	$L_{AF,max} - L_{AF,max,L}$
3	O4	55.6		54.9		0.8
3	O3	51.9	52.0		0.1	
2	O2	54.7	54.3		0.4	
2	O3	63.6	62.5		1.0	

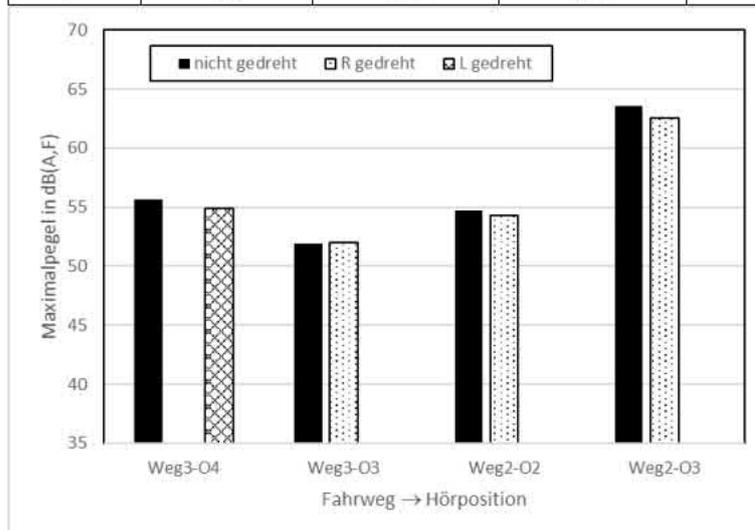


Abbildung 26 Experiment 2 1. Stimuli für leicht gedrehte Gebäude. A bewertete Maximalpegel, Zeitkonstante FAST $L_{AF,max}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen.

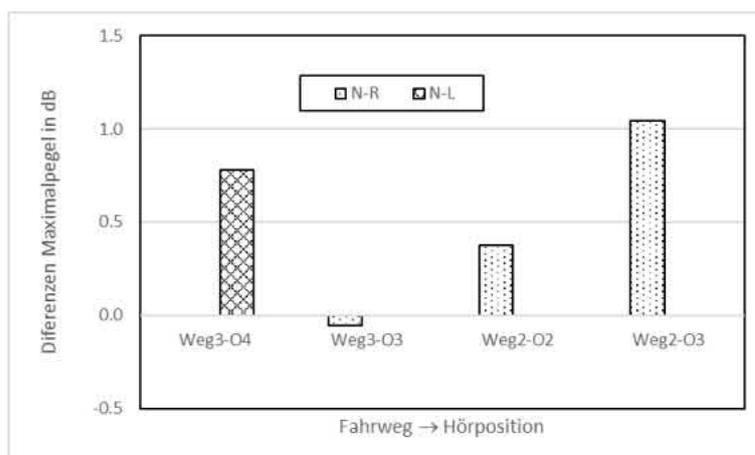


Abbildung 27 Experiment 2 1. Stimuli für leicht gedrehte Gebäude. Pegeldifferenzen $L_{AF,max} - L_{AF,max,R}$ und $L_{AF,max} - L_{AF,max,L}$ der Stimuli gemessen an der Hörposition im Labor für Hörversuche AuraLab für die verschiedenen Fahrwege, Hörpositionen.

7.2 Hörversuche

7.2.1 Experiment 1-1 (Lästigkeit ICBEN-Skala für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden)

Abbildung 28 zeigt die mittleren Lästigkeitsurteile (11 Punkte ICBEN Skala) für die drei Fassadentypen reflektierend, absorbierend, streuend. 0 Punkte entspricht bei dieser Skala keiner, und 10 Punkte einer äusserst hohen Lästigkeit/Störung. Es zeigt sich tendenziell, dass die Lästigkeit am geringsten ist, wenn die Fassaden schallabsorbierend sind.

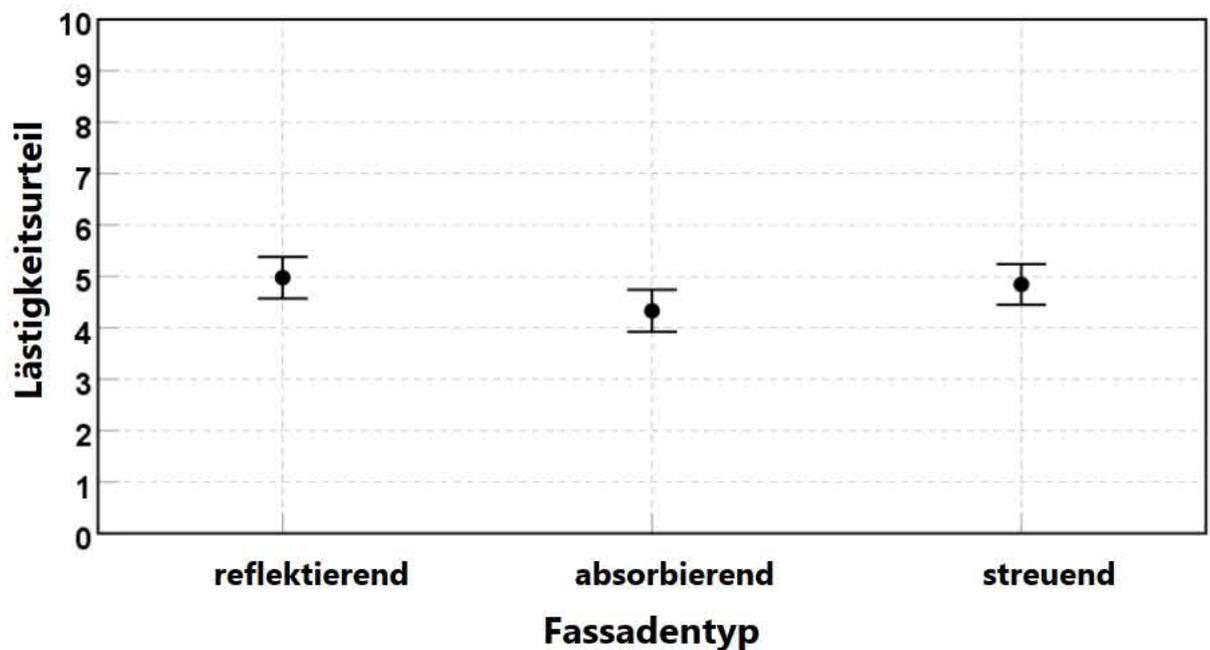


Abbildung 28 Mittlere Lästigkeit (auf der 11 Punkte ICBEN Skala) und ihre 95% Konfidenzintervalle als Funktion des Fassadentyps.

Abbildung 29 zeigt die mittlere Lästigkeit als Funktion des A bewerteten Ereignispegels L_{AE} , wie er an den Hörpositionen im AuraLab gemessen wurde (Tabelle 8). Das Lästigkeitsurteil korreliert positiv und signifikant mit dem L_{AE} ($r = 0,57$; $p < 0,01$). Das Lästigkeitsurteil wächst also mit steigendem L_{AE} . In Abbildung 30 sind die Daten von Abbildung 29 nach den Fassadentypen aufgeschlüsselt. Die zu einer Kombination Fahrweg Hörposition gehörenden Datenpunkte sind miteinander verbunden.

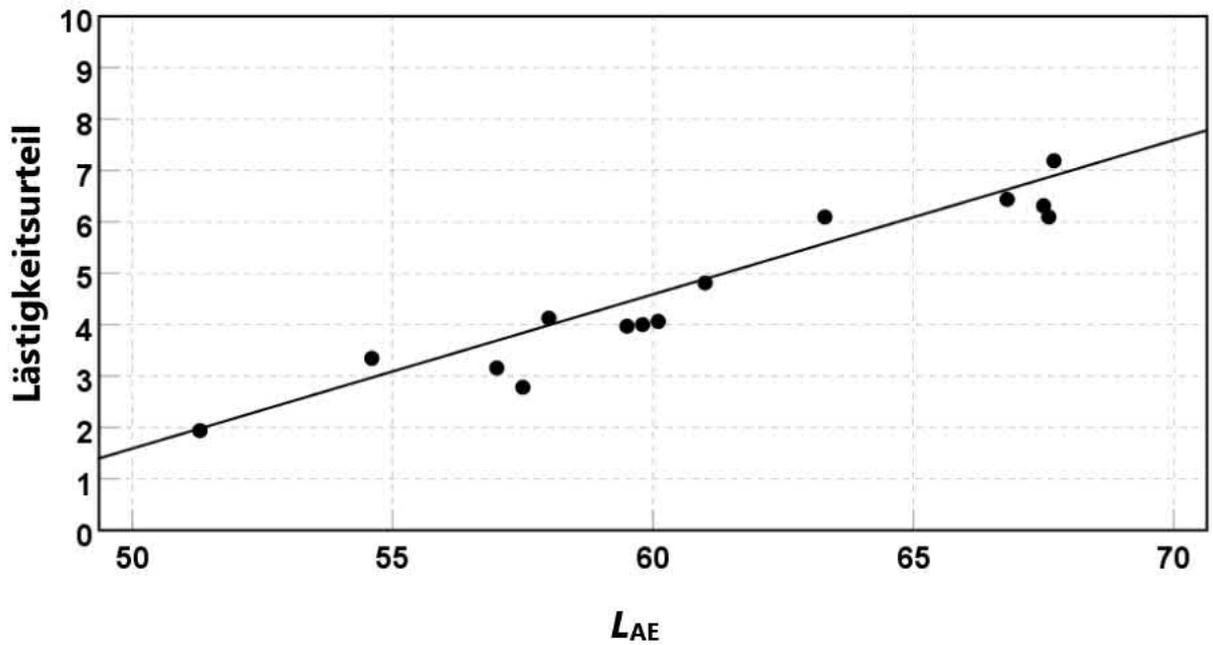


Abbildung 29 Mittlere Lästigkeit (auf der 11-Punkte-ICBEN-Skala) als Funktion des A-bewerteten Ereignispegels L_{AE} .

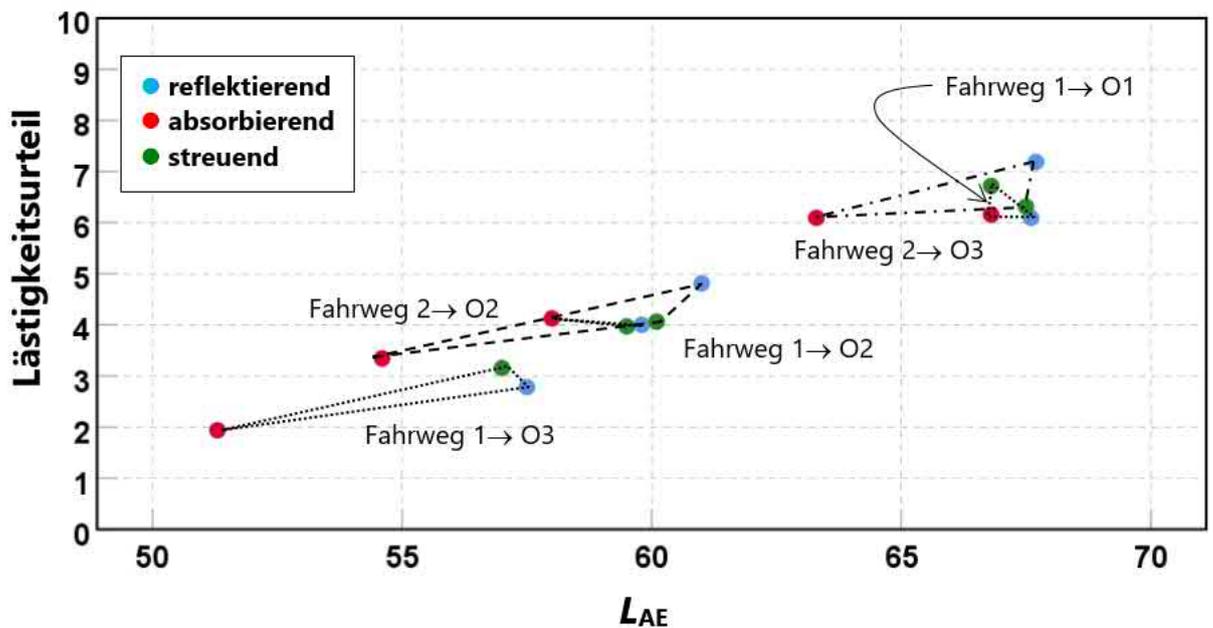


Abbildung 30 Mittlere Lästigkeit (auf der 11 Punkte ICBEN Skala) als Funktion des A bewerteten Ereignispegels L_{AE} aufgeschlüsselt nach Fassadentyp (reflektierend, absorbierend, streuend). Die gestrichelten Linien zeigen die für Fahrweg und Hörposition zusammengehörigen Punkte.

7.2.2 Experiment 1-2 (Rangierung der Lästigkeit für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden)

Beim zweiten Hörversuch von Experiment 1 wählten die Probanden aus drei Stimuli das mit der höchsten und das mit der geringsten Lästigkeit aus, woraus sich eine Rangfolge ergab. Die Stimuli unterschieden sich dabei jeweils nur bezüglich Fassadentyp (reflektierend, absorbierend, streuend).

Abbildung 31 zeigt die Rangfolge der Stimuli von geringster (1), mittlerer (2) zu höchster (3) Lästigkeit. Es zeigte sich, dass der Fassadentyp eine signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat ($\chi^2(2) = 100.39; p < 0.001$). Die Stimuli aus den Simulationen mit absorbierenden Fassaden erreichten am häufigsten Rang 1, jene aus den Simulationen mit reflektierenden Fassaden am häufigsten auf Rang 3. Diejenigen, welche dem schallstreuenden Fassadentyp entsprachen, erreichten am häufigsten einen mittleren Rang 2.

In Abbildung 32 ist der mittlere Rang aufgetragen, der die drei Fassadentypen erreicht wurde.

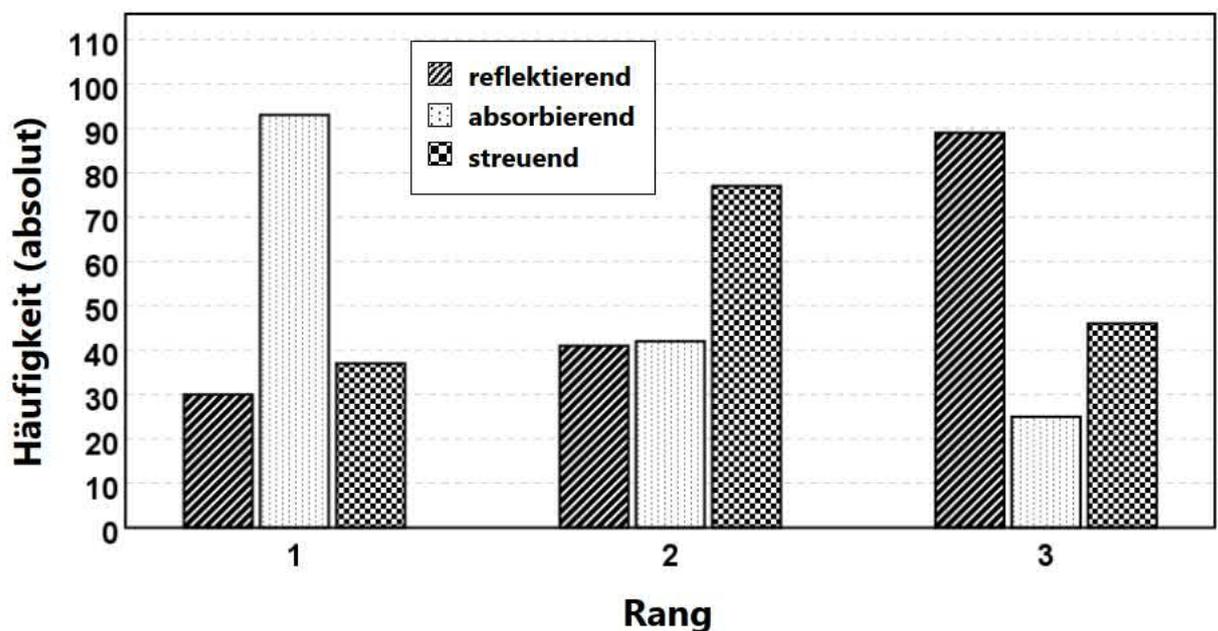


Abbildung 31 Ergebnisse des Hörversuchs 1 2: Häufigkeit der Ränge der einzelnen Fassadentypen. Rang 1 entspricht der geringsten, Rang 2 der mittleren, Rang 3 der stärksten Lästigkeit

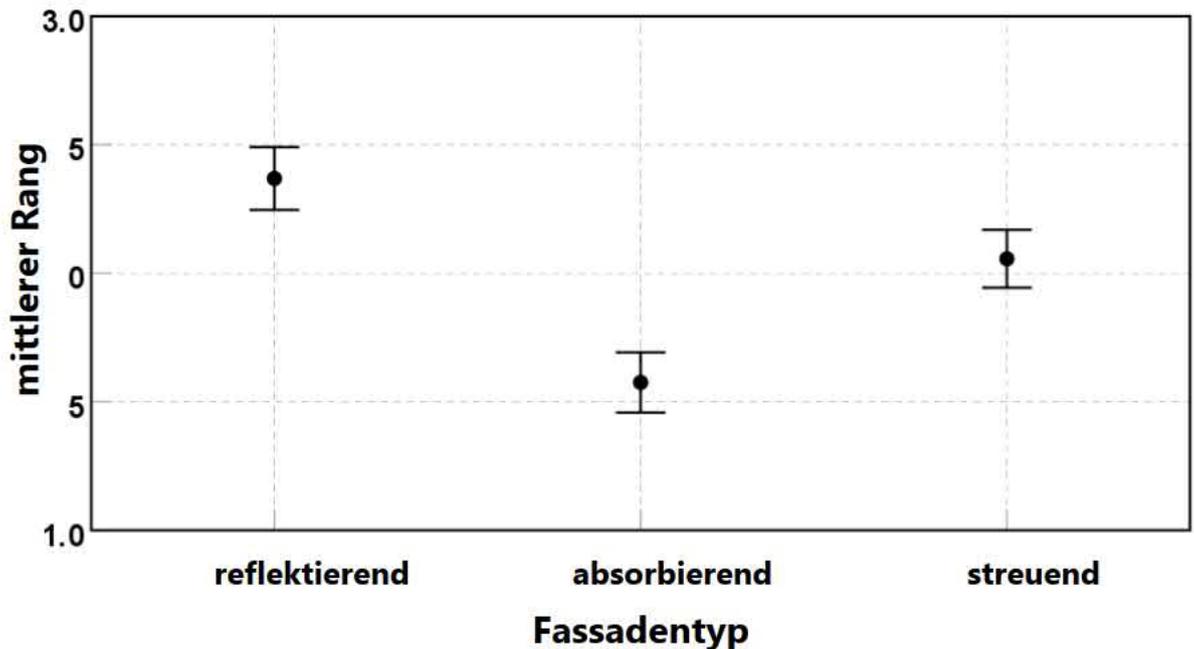


Abbildung 32 Mittlerer Rang der im Hörversuch 2-1 für die drei Fassadentypen erreicht wurde.

7.2.3 Experiment 2-1 (Rangierung der Lästigkeit für gedrehte Häuser)

Die Probanden wählten aus zwei Stimuli jenes mit der höheren Lästigkeit aus, wobei sich die Stimuli jeweils nur bezüglich der Drehung eines Gebäudes zur Vermeidung paralleler Gebäudefassaden unterschieden.

Abbildung 33 links zeigt die Häufigkeit der Ränge der nicht gedrehten/gedrehten Gebäude. Es zeigte sich, dass die Drehung eine signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat ($\chi^2(2) = 15.36; p < 0.001$). In Abbildung 33 rechts ist wie in Abschnitt 7.2.2 der mittlere Rang aufgetragen.

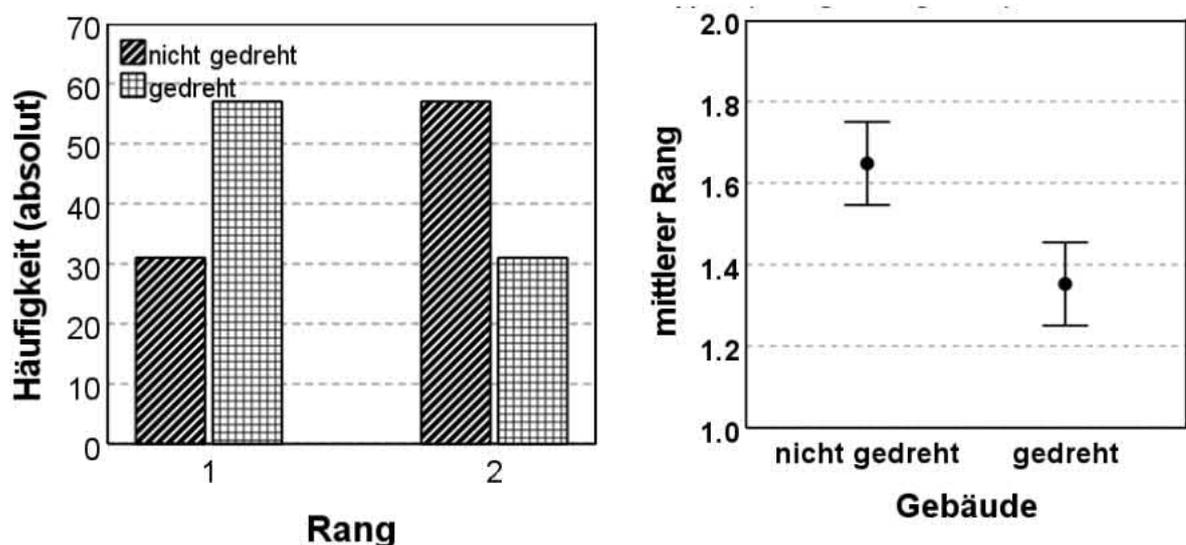


Abbildung 33 Einfluss der gedrehten Häuser; gepoolte Daten des L-förmigen und rechteckförmigen Gebäudes: Häufigkeit der Ränge der nicht gedrehten/gedrehten Gebäude (links) und des mittleren Ranges der Gebäude (rechts). Rang 1 entspricht der geringeren und Rang 2 der höheren Lästigkeit

7.2.4 Experiment 2-2 (Rangierung der Lästigkeit für angegliche Pegel für gedrehte Gebäude)

Hier wählten die Probanden wiederum aus zwei Stimuli jenes mit der höheren Lästigkeit aus, wobei hier die Rangierung der Lästigkeit für angegliche Pegel für gedrehte Gebäude ermittelt wurde.

Abbildung 34 links zeigt die Häufigkeit der Ränge der nicht gedrehten/gedrehten Gebäude mit pegelangepassten Stimuli. Es zeigte sich, dass die Drehung hier nur eine nicht signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat ($\chi^2(2) = 1.64$; $p < 0.201$).

In Abbildung 34 rechts ist wie in Abschnitt 7.2.2 der mittlere Rang aufgetragen.

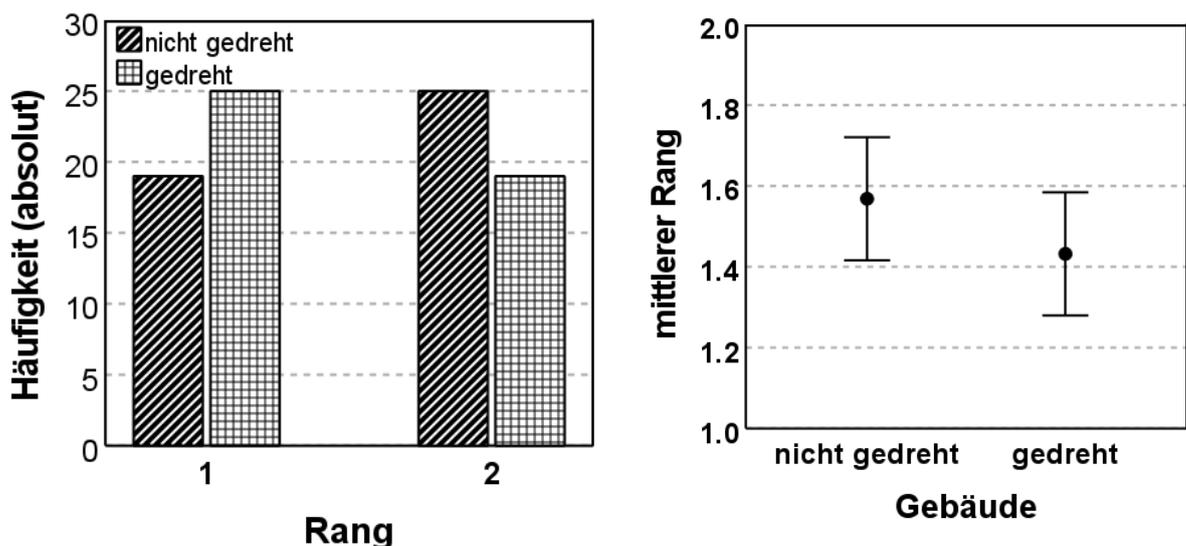


Abbildung 34 Einfluss der gedrehten Häuser, bezüglich L_{AE} angeglichen; gepoolte Daten des L förmigen und rechteckförmigen Gebäudes: Häufigkeit der Ränge der nicht gedrehten/gedrehten Gebäude (links) und mittlerer Rang der Gebäude (rechts) Rang 1 entspricht der geringeren und Rang 2 der höheren Lästigkeit.

7.2.5 Experiment 2-3 (Rangierung der Lästigkeit für angegliche Pegel für reflektierende und absorbierende Fassaden)

Die Probanden wählten wiederum aus zwei Stimuli jenes mit der höheren Lästigkeit aus, wobei die Rangierung der Lästigkeit für angegliche Pegel für reflektierende und absorbierende Fassaden ermittelt wurde.

Abbildung 35 links zeigt die Häufigkeit der Ränge der reflektierenden/absorbierenden Fassaden mit pegelangepassten Stimuli. Es zeigte sich, dass der Fassadentyp eine signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat ($\chi^2(2) = 6.55$; $p < 0.02$): Bei angepasstem Pegel wirkt die absorbierende Fassade lästiger als die reflektierende Fassade

In Abbildung 35 rechts ist wie in Abschnitt 7.2.2 der mittlere Rang aufgetragen.

Abbildung 36 zeigt zum Vergleich die Häufigkeit der Ränge der reflektierenden/absorbierenden Fassaden **ohne** pegelangepassten Stimuli (gleiche zwei Situationen wie in Abbildung 35, Resultate aus Experiment 1 2, wo die Rangfolge aus 3 Stimuli ermittelt wurden). Es zeigt sich, dass der Fassadentyp (absorbierend vs. reflektierend) eine signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat ($\chi^2(2) = 80.15$;

$p < 0.001$): Bei nicht angepasstem Pegel wirkt die absorbierende Fassade somit deutlich weniger lästig als die reflektierende Fassade.

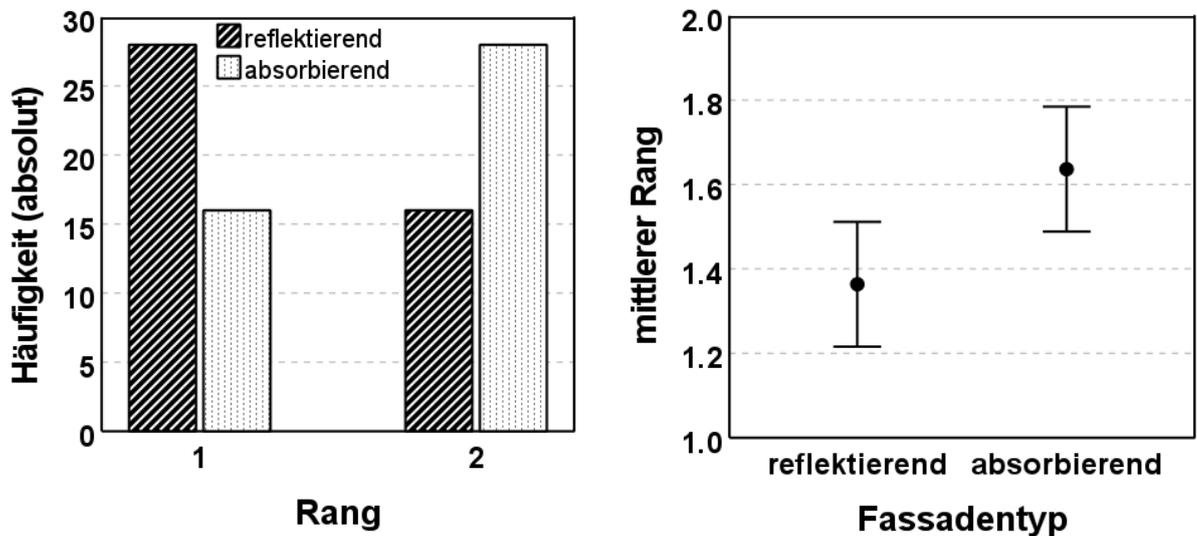


Abbildung 35 Einfluss reflektierend/absorbierende Fassaden, zwei Paare (Fahrweg 1 → Hörposition O3 und Fahrweg 2 → Hörposition O2) aus Experiment 1, bezüglich L_{AE} angeglichen: Häufigkeit der Ränge der reflektierenden/absorbierenden Fassaden (links) und mittlerer Rang der Fassaden (rechts) Rang 1 entspricht der geringeren und Rang 2 der höheren Lästigkeit

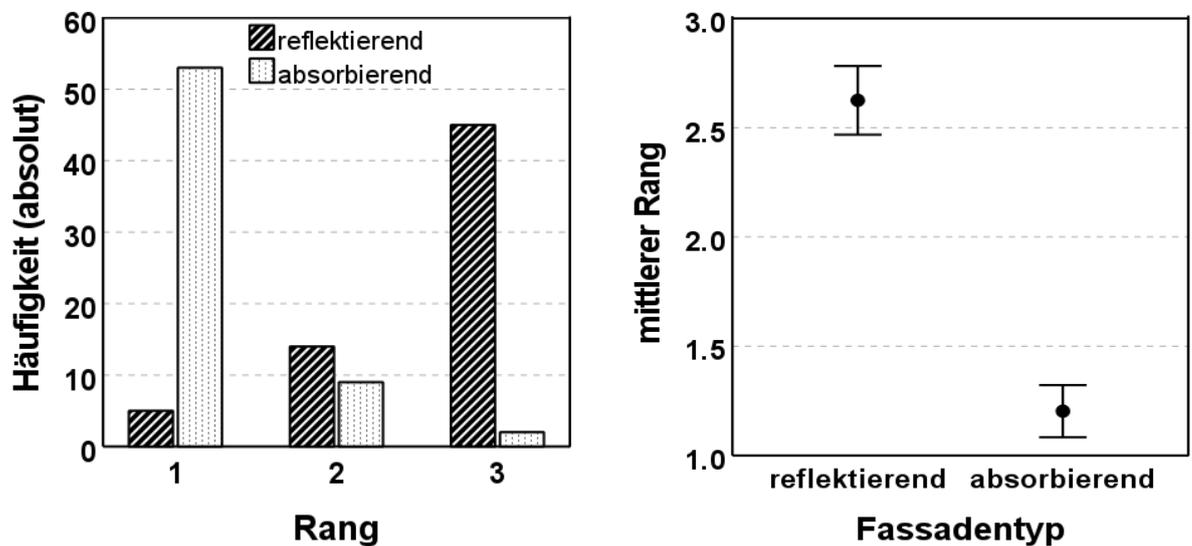


Abbildung 36 Einfluss reflektierend/absorbierende Fassaden, zwei Paare (Fahrweg 1 → Hörposition O3 und Fahrweg 2 → Hörposition O2) aus Experiment 1, gleiche Situationen wie Experiment 2 Gruppe 3, aber original Stimuli und Rangfolge aus Experiment 1: Häufigkeit der Ränge der reflektierenden/absorbierenden Fassaden (links) und mittlerer Rang der Fassaden (rechts). Rang 1 entspricht der geringsten und Rang 3 der höheren Lästigkeit.

8 Diskussion

8.1 Schallpegel

8.1.1 Experiment 1

Die Diskussion erfolgt für die Ereignispegel L_{AE} und Maximalpegel $L_{AF,max}$ von Hörversuch 1. Die Pegel von Hörversuch 2 unterscheiden sich nicht wesentlich.

Wie in Tabelle 8 und Tabelle 9 sowie in den Diagrammen in Abbildung 18 bis Abbildung 21 ersichtlich, ergaben sich bei den schallstreuenden im Vergleich zu den schallreflektierenden Fassaden nur geringe Verminderungen der Pegel von 0–1 dB(A). Offensichtlich wird der Schall insgesamt zu wenig von den Hörposition weg gestreut, um einen grossen Einfluss auf den Ereignispegel haben zu können. Allerdings ist auch zu erwähnen, dass sich immerhin keine Pegelerhöhung ergab, was grundsätzlich als Wirkung von Schallstreuung möglich wäre.

Beim Vergleich der schallabsorbierenden zu den schallreflektierenden Fassaden zeigen sich meistens grössere Pegelverminderungen.

Wenn die Ereignispegel L_{AE} verglichen werden, zeigt sich kein Pegelunterschied auf dem akustischen Übertragungsweg von Fahrweg 1 zu Hörposition O1. Dies kann damit erklärt werden, dass dort der durch die Fassaden unbeeinflusste Direktschall überwiegt. Dies wird in Abbildung 12 deutlich, welche den grossen Aspektwinkelbereich für den Direktschall zeigt. Auch für den Übertragungsweg Fahrweg 1 zu Hörposition O2 ergab sich nur geringe Differenzen für den Ereignispegel L_{AE} . Der in Abbildung 12 dargestellte Aspektwinkelbereich des Direktschalls ist geringer als im vorherigen Fall, aber im Vergleich zu allen anderen Hörpositionen trotzdem bedeutend. Bei den anderen Szenarios ergaben sich für den Ereignispegel L_{AE} zwischen rund 5 resp. 7 dB Pegelverminderung. Die Kombination Fahrweg 2 Hörposition 3 verzeichnet eine geringere Pegelverminderung als in den beiden anderen Szenarien. Dies hängt wieder mit der direkten Sicht auf den Fahrweg zusammen, auch wenn der Aspektwinkel klein ist. Bei den Szenarien Fahrweg 1 O3 und Fahrweg 2 O2, beide ohne Direktschall, ergab sich durch die schallabsorbierenden Fassaden eine deutliche Pegelreduktion von rund 6 resp. 7 dB. Die stärkste Wirkung der absorbierenden Fassaden ergibt sich also, wenn der Einfluss des direkten Schalls nicht überwiegt.

Die Verminderung der Maximalpegel $L_{AF,max}$ ergab ein nicht wesentlich anderes Bild.

8.1.2 Experiment 2

Bei Experiment 2 sind die Pegel Auswertungen für die gedrehten Gebäude zu diskutieren (Experiment 2.1). Bei den Experimenten 2.2 und 2.3 wurden ja die Pegel angeglichen und sind damit zumindest bezüglich Ereignispegel L_{AE} exakt gleich.

Die in Tabelle 11 und Tabelle 12 sowie in Abbildung 24–Abbildung 27 dargestellten Pegel der Stimuli von Experiment 2.1 zeigen, dass die Pegelunterschiede zu den Varianten mit gedrehten Gebäuden klein sind (L_{AE} : 0–1.5 dB; $L_{A,max}$: 0.1–1 dB). Erwähnenswert ist, dass die Hörposition O3 die Strasse sieht, also Direktschall von der Strasse empfängt, was bei O2 und O4 nicht der Fall ist. Der Anteil von reflektiertem Schall ist aber bei allen Positionen gross.

8.2 Hörversuche

8.2.1 Experiment 1

Lästigkeit ICBEN-Skala für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden

Die Auswertung über alle Stimuli (Abbildung 28) zeigen, dass bei Einzelvorbeifahrten der Fassadentyp eine signifikante Auswirkung auf die Rangfolge hat. Mit schallabsorbierenden Fassaden ergab sich die geringste mittlere Lästigkeit, mit reflektierenden Flächen die höchste, schallstreuenden Fassaden lagen dazwischen, aber näher bei den reflektierenden Fassaden.

Abbildung 29 zeigt, die erfragte Lästigkeit für alle Stimuli in Funktion des Ereignispegel L_{AE} (entspricht hier wie weiter oben erwähnt $L_{Aeq} + 13$ dB). Es zeigt sich eine vergleichsweise hohe Korrelation, womit die Rangfolge weitgehend mit den Ereignispegel L_{AE} erklärt werden kann.

Die relativ grossen Pegelunterschiede der verschiedenen Stimuli ergeben sich durch die Kombination von Hörpositionen, Fahrwegen und Fassadentypen, wie dies in Abschnitt 8.1.1 diskutiert wurde. In Abbildung 30 sind die Datenpunkte entsprechend den Fassadentypen eingefärbt. Zusammengehörende Punkte (gleicher Fahrweg und Hörposition) sind miteinander verbunden, so dass die in Abschnitt 8.1.1 diskutierten Pegelunterschiede auch hier sichtbar werden. Es zeigt sich aus dieser Darstellung, dass für die Kombinationen Fahrweg 2 – O3, Fahrweg 2 – O2 und Fahrweg 1 – O3 die Lästigkeit im Falle der schallabsorbierenden Fassaden vermindert wird. In den anderen Fällen ist sowohl die Pegelverminderung als auch die Verminderung der Lästigkeit sehr gering.

Um den Einfluss des Ereignispegels auf das Lästigkeitsurteil zu eliminieren, wurden in Experiment 2 die Stimuli derart manipuliert, dass die Pegelunterschiede ausgeglichen werden. Dadurch kann der Einfluss des Geräuschcharakters (zeitlicher und spektraler Unterschiede) der Stimuli auf die Lästigkeit untersucht werden. Man könnte zusätzlich versuchen, diese Frage durch das Bilden von statistischen Modellen weiter zu klären, was aber im Rahmen dieser Untersuchung nicht realisiert werden konnte.

Rangierung der Lästigkeit für reflektierende, absorbierende und streuende Fassaden

Der zweite Hörversuch zeigt, dass der Fassadentyp einen signifikanten Einfluss auf die Lästigkeitsbewertung in Sinne einer Rangierung hat. Übereinstimmend mit Hörversuch 1 zeigt sich, dass die absorbierende Fassade dabei als am wenigsten und die reflektierende Fassade als am stärksten belästigend beurteilt wurde.

8.2.2 Experiment 2

Leicht gedrehte Gebäude Original Stimuli und angegliche Stimuli

Im Experiment 2.1 ging es darum, den Einfluss der Drehung von je einem Gebäude auf die Lästigkeit zu untersuchen. Abbildung 33 zeigt, dass für die Einzelvorbeifahrten bei den Paarvergleichen die Drehung eines Gebäudes einen signifikanten Einfluss auf die Lästigkeitsbewertung in Sinne einer Rangierung hat. Die Hörbeispiele mit gedrehten Gebäuden wurden als weniger lästig beurteilt. Dies ist bemerkenswert, da durch die Drehung die Pegel zwar vermindert werden, allerdings nur sehr gering (≤ 1.5 dB(A)).

Auch mit einer Angleichung der Pegel der beiden Stimuli im Paarvergleich (Experiment 2.2) wird die Situation mit leicht gedrehten Gebäuden tendenziell als weniger lästig beurteilt (Abbildung 34), aber weniger deutlich (nicht signifikante Unterschiede) und mit grösserer Streuung.

Die Durchfahrt eines entfernten Fahrzeugs – also nicht zwischen den betreffenden Fassaden – wird bei *parallelen* Fassaden also als unangenehmer empfunden, obwohl die Pegelunterschiede klein resp. angeglichen waren. Ursache dafür sind kaum Flatterechos, welche typisch sind für parallele Fassaden,

denn bei Fahrt entstanden keine impulshaltige Emissionen. Ob Resonanzen zwischen den parallelen Fassaden eine Rolle spielen ist fraglich. Sie entstehen einerseits in den simulierten Situationen in einem Frequenzbereich, welcher im Vergleich zum Fahrzeuggeräusch sehr tief ist. Andererseits können die Resonanzen mit dem geometrischen Ansatz der raumakustischen Simulation von ODEON gar nicht simuliert werden. Möglich wäre, dass eine verminderten Halligkeit bei nicht parallelen Flächen im Vergleich zu parallelen eine Rolle spielt.

Reflektierende, streuende Fassaden / Stimuli pegelangepasst

Schliesslich wurden in Experiment 2 noch zwei Paarvergleiche mit zwei Stimuli-Paaren aus Experiment 1 durchgeführt, welche ebenfalls im Pegel angeglichen waren. Die angepassten Pegelunterschiede betragen wie aus Tabelle 5 ersichtlich 8.2 und 5.4 dB(A). Abbildung 35 zeigt, dass für diese beiden Fälle im Gegensatz zu Experiment 1 die absorbierenden Fassaden als signifikant lästiger beurteilt wurden. Zu bemerken ist, dass die Vertrauensintervalle deutlich grösser sind, als im ursprünglichen Hörversuch (siehe Abbildung 32), wo die reflektierenden Fassaden schlechter rangierten. Zudem überlappen sie. Das Ergebnis muss also vorsichtig interpretiert werden.

Es könnte sein, dass im Fall von reflektierenden Fassaden das Geräusch der Durchfahrt weniger unerwartet wahrgenommen wird als bei den schallabsorbierenden Fassaden, weil durch die Reflexionen an den reflektierenden Fassaden bereits früh Schall zur Hörposition reflektiert wird. Dieser Effekt wäre bei der ursprünglichen Situation durch die Verminderung des Pegels im Fall der absorbierenden Fassaden verdeckt resp. kompensiert worden.

Ein Blick auf die Auswertung von einzelnen Paarvergleichen (einzelne Fahrweg-Empfängerposition-Kombinationen) zeigt übrigens, dass die Resultate konsistent sind und das Poolen der Daten berechtigt und unproblematisch ist. Die Resultate können somit als zuverlässig erachtet werden.

8.3 Verwendeten Verfahren

Es wurde die raumakustische Software ODEON verwendet, um die Schallausbreitung in der Nachbarschaft zu simulieren. Es musste dabei in Kauf genommen werden, dass ODEON den Ansatz der geometrischen Akustik verfolgt und dabei wellentheoretische Phänomene nicht einbeziehen kann. Ein alternatives numerisches Verfahren zur Berechnung solcher komplexer und grosser Umgebungen ist allerdings nicht in Sicht.

Die Arbeit mit ODEON zeichnete sich durch eine relativ mühelose Geometrie-Eingabe und Zuordnung von Materialeigenschaften aus. Weiter konnte die 2D-Surround-Option von ODEON verwendet werden, um Mehrkanal-Impulsantworten ambisonisch bereitzustellen. Die Anzahl Flächen der simulierten Umgebung war im Vergleich zu normalen raumakustischen Situationen recht gross. Dies verursachte gewisse Probleme bei grossen Quelle-Empfänger-Abständen, bei denen die Richtungsinformation im Mehrkanal-Wiedergabeverfahren verloren ging. Dies hatte keinen Einfluss auf die Stimuli des hier vorgestellten Experiments, da dort die jeweiligen Quellen-Empfänger-Abstände nicht so gross waren. Der Umstand sollte bei weiteren Anwendungen aber in Betracht gezogen werden. Weiter mussten, wie in Abschnitt 4.1 erwähnt, gewisse Anpassungen bei der Modellierung der Fahrwege vorgenommen werden.

Insgesamt ergaben sich aber plausible Stimuli, was auch bei Begehungen im realen Zwicky-Areal zumindest für die Variante "Reflektierend" nachvollzogen werden konnte.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Nach früheren Hörversuchen mit festen Übertragungstrecken von Schallquelle zu Hörposition wurde in diesem Projekt die Lästigkeit eines *fahrenden* Autos in der unmittelbaren Nachbarschaft eines dicht überbauten Quartiers in einem zweiteiligen psychoakustischen Laborexperiment untersucht. Die Stimuli wurden aus Auralisationen gewonnen, welche mit Hilfe einer raumakustischen Simulation und einer vollständigen Synthese der Fahrgeräusche berechnet wurden

Es zeigte sich, dass es in der für die Untersuchung gewählten Umgebung sinnvoll ist, Fassaden schallabsorbierend zu verkleiden, um damit die Ereignispegel und in der Folge die Lästigkeit zu vermindern. Die Wirkung ist dann gross, wenn der Einfluss des direkten Schalls nicht überwiegt.

Neben dem Ereignispegel beeinflussen auch weitere Faktoren das Lästigkeitsurteil. So führen schallstreuende Fassaden, trotz einem kleinen Einfluss auf den Pegel, im Vergleich zu reflektierenden Fassaden ebenfalls zu einer Verminderung der Lästigkeit. Bemerkenswert ist auch, dass bereits eine leichte Drehung von Gebäuden zur Vermeidung ursprünglich paralleler Fassaden die Lästigkeit reduziert.

Bezüglich Fassadengestaltung wurden damit die Ergebnisse früherer Studien mit statischen Übertragungstrecken in ähnlichen urbanen Umgebungen nun für Einzelvorbeifahrten von Personenwagen bestätigt. Naturgemäss können in Hörversuchen nur wenige Situationen untersucht werden. Trotzdem ergibt diese "Stichprobe" wertvolle Hinweise darauf, wie dichte Überbauungen gestaltet werden können, so dass die Belästigung durch Verkehr vermindert und die akustische Aufenthaltsqualität verbessert werden kann.

Im Rahmen des Projekts konnten nicht alle wünschbaren Auswertungen durchgeführt werden. Allenfalls können sie zumindest zum Teil nachgeholt werden, wenn die geplante wissenschaftliche Publikation geschrieben wird.

Zusatzauswertungen zu den Hörversuchen wurden nicht durchgeführt. Die Resultate zu den Versuchen sind noch rein deskriptiv. Eine Auswertung mit statistischen Modellen könnte aussichtsreich sein. Es könnte z.B. für den Hörversuch 1 ein Modell erstellt werden, um zu überprüfen, ob der L_{AE} alleine die Lästigkeit bestimmt, bzw. welche Rolle andere Einflussfaktoren spielen. Zudem könnte bei Hörversuch 2 die Auswertung des mittleren Rangs pro Fassade (Abbildung 32) noch überprüft, resp. vertieft werden.

Stichprobenweise wurden gewisse Auswertungen zu den Einzeldurchfahrten durchgeführt, ohne dass sich dabei allerdings besondere Hinweise ergaben. Trotzdem könnten folgende Analysen zweckmässig sein:

- Pegel Zeit-Verlauf des A bewerteten Schalldruckpegels (Zeitkonstante FAST) $L_{AF}(t)$
Aufschlussreich wäre eine Vergleich der Pegel Zeit-Verläufe für eine Vorbeifahrt bei den drei unterschiedlichen Fassadentypen.
- Spektrale Auswertung im Pegel Zeit Verlauf, Ev. Spektrogramme, insbesondere auch im Hinblick auf die Frage, ob die eingesetzten porösen Absorber eine unangenehme Balance von Höhen/Mitten zu Tiefen ergeben, auch z.B. bei Durchfahrten von Lastwagen.
- Zeitlicher Verlauf verschiedener raumakustischer Parameter sowie auch der Einfallrichtungen des Schalls, gewonnen aus den Impulsantworten für die Reihe von Punktquellen der Fahrbahn. Diese Darstellung könnte als Zusatzinformation aufschlussreich sein.
- Berechnungen für weitere ausgewählte Hörpositionen auf dem Gelände und auf den Fassaden.

Sinnvoll wären zukünftige umfangreichere Untersuchungen, bei denen mit Hörversuchen abgeklärt würde, welchen Einfluss der Pegelanstieg an der Hörposition bei einer Einzeldurchfahrt auf die Lästigkeit hat. Daraus könnten weitere Hinweise auf die Gestaltung der Gebäudegeometrie und Materialisierung gewonnen werden. Auch eine Analyse der Wichtigkeit des spektralen Verlaufs der Absorption und der Einfallrichtung des Schalls etc. mit Hörversuchen wäre aufschlussreich.

Weiter erscheint es zweckmässig, für die Simulation von Innenhöfen oder verdichteten Überbauungen eine Methodik zu entwickeln, wie die Kombination von möglichst vielen Schallquellen/Hörpositionen simuliert und bewertet werden können.

Jedenfalls leisten bereits die vorliegenden Ergebnisse einen wichtigen Beitrag dazu, wie im verdichteten Bauen die Lästigkeit vermindert und die Aufenthaltsqualität verbessert werden können. Es wird eine zukünftige Arbeit sein, solche Ergebnisse mit bekannten Angaben zur Klangraumgestaltung zu kombinieren. Wünschenswert wäre dabei auch eine Aussage darüber, für welche Gebäudetypen und -grössen Faustregeln und Erfahrungswissen genügen, und für welche Situationen von Beginn weg eine raumakustische Simulation angezeigt wäre.

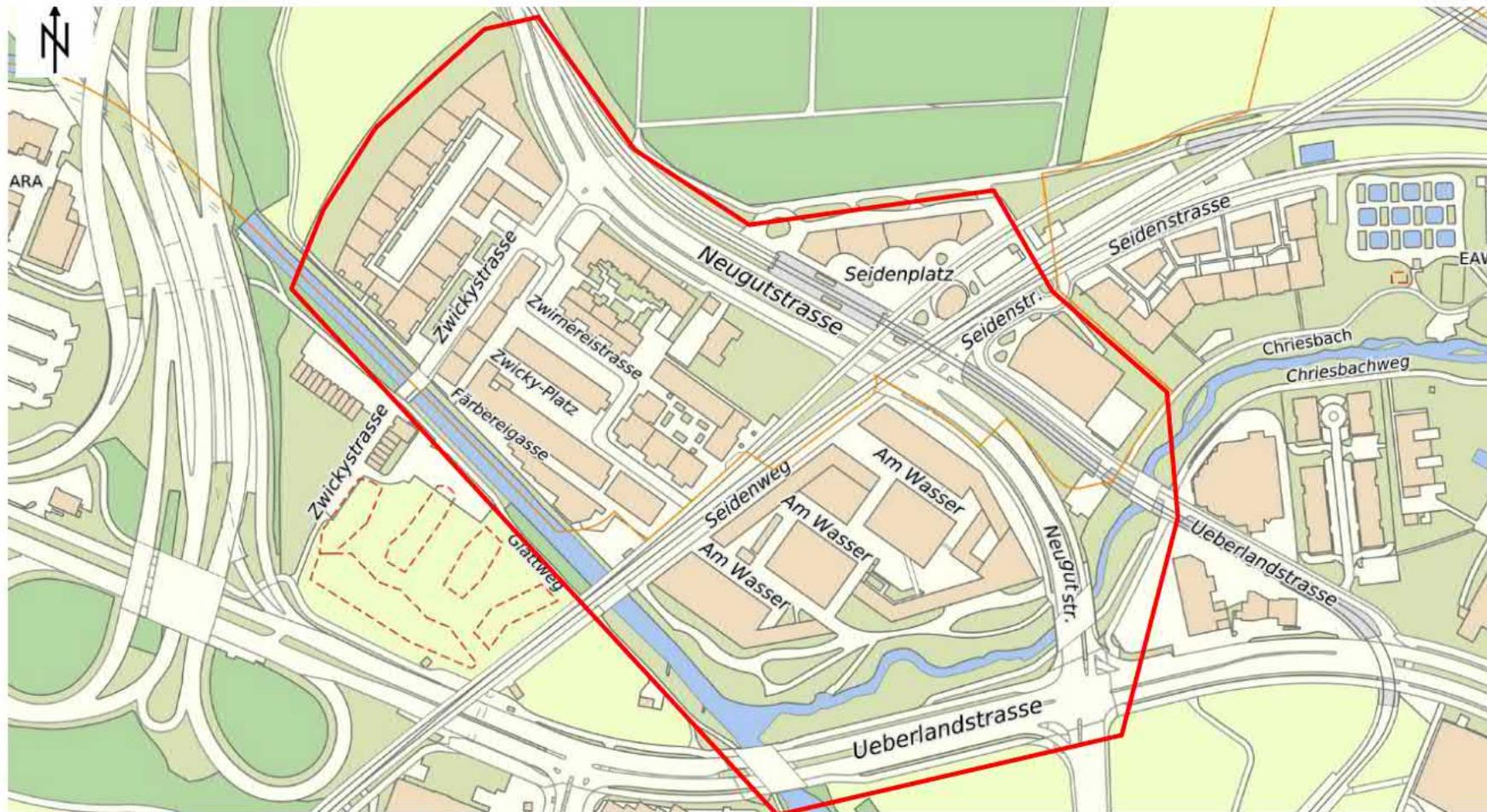
10 Anhänge

10.1 Literaturverzeichnis

- [1] Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Barazzone 15 3840 vom 14. September 2015: "Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung", [PDF](#)
- [2] Lärmschutz Verordnung vom 15. Dezember 1986, SR 814.41.
- [3] T Maag, K Tamara und A Bosshard, Klangqualität für öffentliche Stadt und Siedlungsräume Eine Planungshilfe für das Ohr. Publikationsreihe „Chancen im Lärm Klangraumgestaltung. 1. Auflage Juli 2016. ([PDF](#))
- [4] Cercle Bruit, Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks im Siedlungsraum - Vorgehen Beurteilungsblatt Klangwahrnehmung Beispiele 2020 ([PDF](#))
- [5] A. Taghipour, S. Athari, A. Gisladdottir, T. Sievers, Eggenschwiler, K., Room acoustical parameters as predictors of acoustic comfort in outdoor spaces of housing complexes. *Frontiers in Psychology*, 11, 344 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344>
- [6] A. Bosshard, T. Maag Trond : Klangraumgestaltung Chancen im Lärm. Lärminfo 17 der Fachstelle Lärmschutz, Baudirektion Kanton Zürich. 1. Auflage Mai 2012. ([PDF](#))
- [7] A Bosshard, Maag T : Frag die Fledermaus: Fünf Werkzeugkästen zur Klangraumgestaltung Lärminfo 19 der Fachstelle Lärmschutz, Baudirektion Zürich 1 Auflage März 2013 ([PDF](#))
- [8] I. Neuhaus, F. Neuhaus: Akustisch gute Architektur für Strassenräume. Publikationsreihe „Chancen im Lärm – Klangraumgestaltung. 2016. ([PDF](#))
- [9] T Maag, K Tamara und A Bosshard: Vom Lärmschutz zur hörenswerten Stadt Fallbeispiele zur Entwicklung der akustischen Raumqualitäten in der Stadt Basel. AUE Basel. Januar 2015. ([PDF](#))
- [10] U. Sturm, M. Bürgin, Stadtklang Wege zu einer hörenswerten Stadt 1, Band 1: Perspektiven, mit Beiträgen von Andreas Bosshard, Trond Maag, Bettina Nägeli, Thomas Steiner vdf 2016
- [11] Stadtklang Wege zu einer hörenswerten Stadt 2, Band 2: Klangraumgestaltung von Aussenräumen, Instrumentarium, mit Beiträgen von: Andres Bosshard, Kurt Eggenschwiler, Meike Müller, Christian Popp, Timo J Walker, vdf, 2019
- [12] M Hornikx, "Ten questions concerning computational urban acoustics," *Build Environ* , vol 106, pp. 409–421, 2016.
- [13] W. Yang, J. Y. Jeon Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment, *Building and Environment* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121>
- [14] M. Hornikx and J. Forssén, "Noise abatement schemes for shielded canyons," *Appl. Acoust.*, vol. 70, no 2, pp 267–283, 2009
- [15] E. Badino, R. Manca, L. Shtrepi, C. Calleri, and A. Astolfi, "Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyons," *Build. Environ.*, vol. 157, pp. 242–256, 2019
- [16] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Arnmando, and A. Astolfi, "On the influence of different facade materials on the auditory perception of a urban space," in *Proc. of the INTER Noise and Noise.Con Congress and Conference*, (Hong Kong, China), pp. 2919–2928, 2017.
- [17] C Calleri, L Shtrepi, A Armando, and A Astolfi, "Evaluation of the influence of building facade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces," *Build. Acoust*, vol. 25, no. 1, pp. 77–95, 2018.
- [18] J Kang, "Numerical modelling of the sound fields in urban spaces," *J Acoust Soc Am* , vol 117, no. 6, pp. 3695–3706, 2005.

-
- [19] J Kang, "Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 3, pp. 1394–1404, 2000.
- [20] H. Onaga and J. H. Rindel, "Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades," *Appl. Acoust.*, vol. 68, pp. 310–325, 2002.
- [21] E Badino, R Manca, L Shtrepi, C Calleri, A Astolfi, "Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon", *Building and Environment*, vol. 157 pp 242–256
- [22] A Taghipour, T Sievers, and K Eggenschwiler, "Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 2, p. 249, 2019.
- [23] K. Heutschi, B. Locher, M. Gerber "sonROAD18: Swiss implementation of the CNOSSOS EU road traffic noise emission mode", *Acta Acustica United with Acustica*, 104(4), 697–706
<https://doi.org/10.3813/AAA.919209>
- [24] S. Baclet, S. Venkataraman, R. Rumpler, "Assessing the impact of driving noise from individual vehicles in an urban environment", *Poster Urban Sound Symposium 2021*
- [25] F Georgiou, M Hornikx, and A Kohlrausch, "Auralization of a car pass by using impulse responses computed with a wave based method," *ACTA ACUST. UNITED AC.*, vol. 105, pp. 381–391, 2019.
- [26] A. Gísladóttir, K. Heutschi, A. Taghipour, R. Pieren, K. Eggenschwiler, Influence of façade characteristics on perceived annoyance from moving cars in urban living environments, *Forum Acusticum 2020*, Lyon, December 7th–11th 2020
- [27] Odeon, ODEON Room Acoustics Software, Version 15, User's Manual. Kgs. Lyngby, Denmark: Odeon A/S, 2018
- [28] R. Pieren, T. Büttler, and K. Heutschi, "Auralization of accelerating passenger cars using spectral modeling synthesis," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 5, 2016.
- [29] ISO/TS 15666 (2003) "Technical specification: Acoustics assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys" (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland).

10.2 Karte Zwicky Areal



© GIS-ZH, Kanton Zürich, 30.06.2020 14:13:08

Diese Karte stellt einen Zusammenschluss von amtlichen Daten verschiedener Stellen dar. Keine Garantie für Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität. Rechtsverbindliche Auskünfte erteilen allein die zuständigen Behörden.

Masstab 1:3046

0 20 40 60m

Zentrum: [2687940.54,1251038.05]

Abbildung 37 Karte Zwicky Areal (GIS Kanton Zürich). Rot eingezeichnet: modellierter Bereich.

10.3 Konferenzbeitrag [26]

INFLUENCE OF FACADE CHARACTERISTICS ON PERCEIVED ANNOYANCE FROM MOVING CARS IN URBAN LIVING ENVIRONMENTS

Arnthrudur Gísladóttir^{1,2} Kurt Heutschi² Armin Taghipour²
Reto Pieren² Kurt Eggenschwiler²
¹ Aarhus University, Aarhus, Denmark
² Empa Laboratory for Acoustics/Noise Control, Dübendorf, Switzerland
arg@eng.au.dk

ABSTRACT

Due to increased awareness of negative effects of noise exposure, distinct measures are applied to mitigate the sound immission from road traffic in urban areas. This includes strategic planning of road traffic, design of noise mitigating infrastructure, and efforts to reduce the sound emission of the sources. An increased effort has also been aimed at investigating how architectural features of urban areas, such as material properties and texture, affect perception of the local outdoor sound environment. This paper presents a psychoacoustic laboratory experiment investigating the effect of facade absorption and scattering properties on short-term noise annoyance from moving passenger car sounds in outdoor living environments. A virtual acoustic environment was designed based on a newly constructed housing area in Switzerland. Sound propagation was simulated with the ray tracing software ODEON. Car paths were modeled by spatially distributed source points along the roads for which multichannel impulse responses were ambisonically rendered for static receiver locations. The impulse responses were then converted to generic ones that allowed for a crossfading interpolation to estimate an impulse response for an arbitrary position between two source points. Subsequently, synthesized car emission signals were convolved with the position specific impulse responses to auralize moving cars. The sounds were reproduced via five satellite loudspeakers and two subwoofers in the laboratory. This paper presents the experimental results and discusses the possible influence of the facade's properties.

1. INTRODUCTION

Noise pollution is of concern in many cities and long term exposure to significant noise sources, such as road traffic, has been related to several health implications and disturbances [1]. This has brought increased attention to the importance of considering how noise can be mitigated within the urban layout, both in form of traditional measures such as noise barriers, but also with architectural design and planning ini-

tiatives. The propagation of sound within the urban environment is influenced, among other, by sound reflection from surfaces, diffraction at edges, scattering from rough surfaces and sound absorption by materials [2]. While those design parameters are widely considered within the field of architectural acoustics, it is more recent that their effect on the urban acoustic environment has been investigated with respect to eventual increase in sound pressure level (SPL) or change in acoustic perception of outdoor spaces.

Increased absorption has been shown to reduce the SPL in urban spaces such as street canyons [3, 4] and squares [5, 6]. Similarly, diffusely reflecting boundaries in a street canyon can lead to decrease in SPL [7] while studies have also shown non significant effect on SPL with increased scattering [4, 8]. On the other hand scattering, as well as absorption ability of facade material in an urban square can influence the acoustic characteristics of the space [9]. Similarly, use of moderate facade absorption has been found to increase the acoustic comfort in a courtyard situation [10]. This is in the context of a more subjective evaluation of the sound environment which has gained more attention over the last decades. Annoyance reactions have among other been used to evaluate various situations exposed to environmental sounds [11].

Road traffic noise is the main source of noise in many built-up environments, including residential areas. Although roads are usually treated as acoustic line sources for energy evaluations, the sonic experience at a receiver location during low traffic density phases is determined by single vehicle pass-by events. Changes in the reflection pattern due to a specific treatment of the facade surfaces are expected to be most easily heard in case of these single car passings.

With this background the present paper presents the results from a psychoacoustic laboratory experiment where annoyance reactions to car sounds in a neighborhood environment were investigated. Sound propagation from a moving car was simulated in a virtual room with distinct materials on building facades and pillars of overhead train lines. This enabled the investigation of different annoyance reactions to the

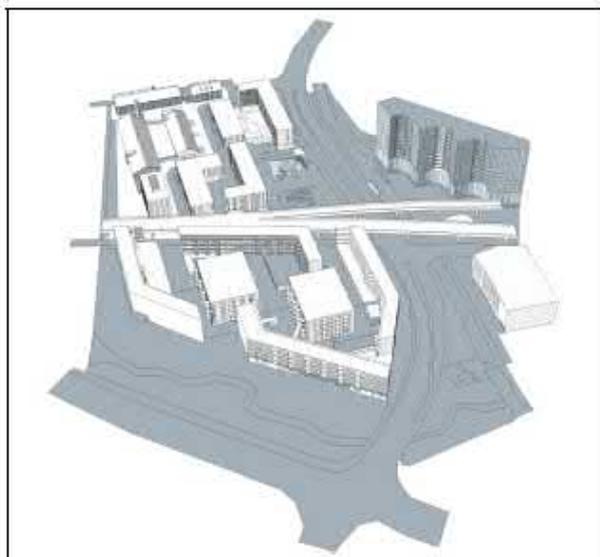


Figure 1. Overview of the reference neighborhood modeled in the Sketch up software environment.

applied building material.

2. SOUND SYNTHESIS AND REPRODUCTION

2.1 Reference neighborhood

The virtual room tested in the experiment was based on an existing, newly constructed neighborhood in Dübendorf, Switzerland. The neighborhood is constructed of several housing complexes, bounded by a relatively busy road and divided by a less busy road with an overhead train line. A geometric model of the neighborhood was created in the Sketch up Software environment (Trimble Inc., Sunnyvale, CA, USA), see Figure 1. Some simplifications were done. The terrain was assumed a flat plane, in reality there is a height difference of up to 3 m within the neighborhood. Similarly, an overhead tram track at the edge of the model was modeled flat although it does overlap in reality. Small ledges, mailboxes and doors were omitted, as well as blinds on windows and balconies. Finally, playground facilities were not modelled.

2.2 Simulation, auralization and signal processing

The Plugin SU2Odeon 2.00 was used to transfer the Sketchup model to the room acoustical software ODEON v. 15.15 (Odeon A/S, Kgs. Lyngby, Denmark). The 2D Surround sound option of ODEON was used to ambisonically render multichannel impulse responses, which were used in the post process to auralize the sound of a moving car.

As a room acoustical software, ODEON considers bounded/closed models. Thus, the neighborhood geometry was placed in a bounded box with fully absorptive surfaces towards the inside. This box represented the free field. Three receivers were placed at

different locations within the ODEON neighborhood model, see Figures 3 and 4, with various heights as will be described later. An array of omni-directional point sources was placed along two routes, representing the paths of the moving car. The sources were placed with 10 m intervals at 1 cm above ground, as placing them in plan with the road surface, which was preferred for post processing, caused problems when choosing the directivity of the receivers. The road surface closest to the sources was made fully absorptive in order to suppress a ground reflection that would cause unnatural time-dependent comb-filter / flanging effects. Indeed in nature these interference effects are very weak as the source has a substantial extension and is not concentrated at one point which is assumed in the simulation.

For the calculation setup in ODEON, the transition order was set to 0 (only using ray-based methods) with a number of late rays set to 8,000,000. A single point ambisonic impulse response (2D Surround sound) was generated for each source receiver relation. The speaker rig defined in the 2D Surround sound setup of ODEON was based on the setup of the listening test facility used in the experiment.

Necessary input for the auralization of a moving source is the audio signal emitted by the source and source position specific impulse responses h_i for the convolution operation. In simple geometries the source-receiver-impulse response can be quickly determined for any arbitrary source position. In this case, the impulse responses were obtained by an expensive propagation simulation and therefore they could be determined for a limited set of source locations only. This brought up the fundamental challenge of interpolation between the different source positions. One approach is to convolve individual emission signal segments with the representative impulse responses h_i and then cross-fade all snippets to obtain a smooth receiver signal [12]. Here, another approach was chosen where an interpolation between impulse responses h_i and h_{i+1} was determined in order to obtain an appropriate impulse response h_{i+f} ($f = 0 \dots 1$) for an arbitrary emission sample. This was achieved by an energy-conserving transformation of every impulse response h_i into a generic version h'_i that is composed of a direct sound component, the strongest reflection and a reverberant tail. The advantage of the generic versions is the fact that the three components can be aligned on the time axis with constant time delays. This allowed for a simple and straight-forward cross-fade interpolation between h'_i and h'_{i+1} to obtain h'_{i+f} without causing audible artefacts. As the suppression of information about the travel times makes the Doppler frequency shift vanish, this effect had to be included by manipulation of the emission signal based on information about the situation geometry.

Source signals for the virtual cars were synthesised by spectral modeling synthesis using the parametric

emission synthesis model described in [13]. For a selected car engine, tyre and road type, driving style and the respective driving speed, emission sound pressure signals were separately generated for tyre/road noise and propulsion noise. The synthesis model takes the radiation angle as an input parameter. As an interface to the omnidirectional source description, both source signal contributions were rendered for the time-dependent radiation direction pointing towards the receiver and summed up.

The 5-channel signals underwent further postprocessing before playback in the listening test facility. In order to have equal stimuli duration for all stimuli within each part of the experiment, 20-s and 15-s extracts were cut from signals related to Parts 1 and 2, respectively. This was done based on the L_{AF} and level-symmetrical to the maximum level (L_{AFmax}); i.e., around the L_{AFmax} . Furthermore, signals' spectral portions beyond 20 Hz and 10 kHz were filtered out. Finally, the signals of the five channels were allocated to the corresponding five satellite loudspeakers in the listening test facility and gated (i.e., faded in and out) with raised cosine ramps.

2.3 Listening test facility

The experiment was performed in AuraLab, the listening test facility of Empa Laboratory for Acoustics/Noise Control. AuraLab satisfies room acoustical requirements on background noise and reverberation time, which allows for high-quality audio reproduction. Furthermore, AuraLab has a separate listening and control room with the possibility of audio-visual supervision [10].

In the course of the experiment presented here, the floor was covered with additional porous absorbers. As shown in Figure 2, subjects were (individually) seated in the central listening spot with the test software in a screen in front of them. The sound was played back over five loudspeakers (KH 120 A, Georg Neumann GmbH, Berlin, Germany) in a 2D surround pentagon arrangement on the ear level at 2 m listening distance and over two subwoofers (KH 805, Georg Neumann GmbH, Berlin, Germany) [10]. This setup was chosen as ODEON can provide first-order ambisonics impulse responses for a 2D Surround sound setup [14].

3. EXPERIMENT

The experimental session consisted of two parts, part 1 and part 2, both in form of focused listening tests. Subjects did the tests individually. Before part 1, the subjects read information about the experiment and signed a consent form. Subsequently, the participants answered the first part of a questionnaire, where they were asked about their hearing and well-being. Finally, the subjects read information about part 1 of the experiment and were introduced to the listening



Figure 2. The experimental setup in AuraLab: the subject was seated in the central listening spot. The stimuli were played back through five satellite loudspeakers and two subwoofers.

test software designed for the experiment. After the subjects finished part 1, they were instructed to read the introduction to part 2. After finishing part 2 of the experiment, the subjects answered the second part of the questionnaire about their demographic data and living situation.

3.1 Design parameters

The same set of sound scenarios was used in both parts of the experiment, although with different stimuli durations. The following design parameters were varied: material of building facades and pillars of overhead train line (3 levels), driving path (2 levels) and observer position (3 levels). Three neighborhood models were constructed in ODEON: the reference model with original reflecting building facades and pillars of overhead train, one with increased absorption of the respective surfaces and one with increased scattering. The original surfaces were chosen from ODEON material library and were mainly constructed of smooth concrete, smooth painted or glazed concrete and smooth bricks. The absorption coefficients applied for increased absorption are listed in Table 1. For increased scattering, the scattering coefficient was set to 0.5, which accounts for the material roughness at mid frequencies (707 Hz). ODEON expands this scattering to other frequency bands by default [14].

Two car paths were defined: Car path 1 along the road bounding the neighborhood (50 km/h) and Car path 2 bounding and then entering the neighborhood (25 km/h). Three observer positions were chosen: Observer 1 highly exposed to Car path 1 looking towards the road, Observer 2 at a playground within a building complex, looking through an opening towards Car path 1 but rather shielded from Car path 2, and Observer 3 in a canyon like space, rather shielded from Car path 1 but highly exposed to and looking towards

Frequency (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Absorption (α)	0.25	0.25	0.55	0.85	0.90	0.80	0.75	0.75

Table 1. Frequency-dependent absorption coefficients of facades and overhead train line pillars for facade design with increased absorption.

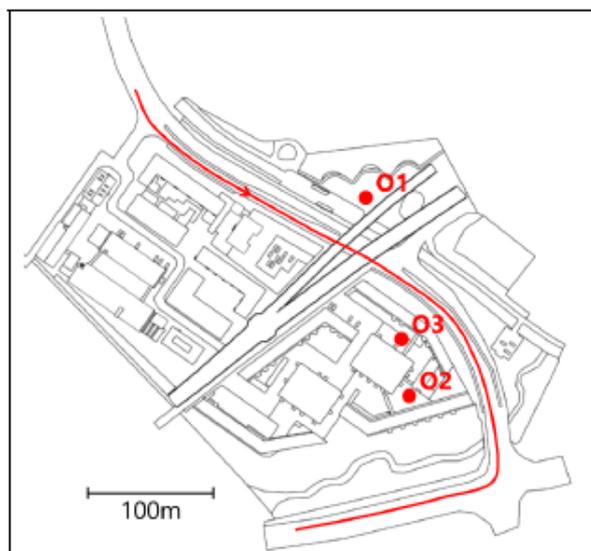


Figure 3. Car path 1 and the three observer positions: O1 (Observer 1), O2 (Observer 2) and O3 (Observer 3).

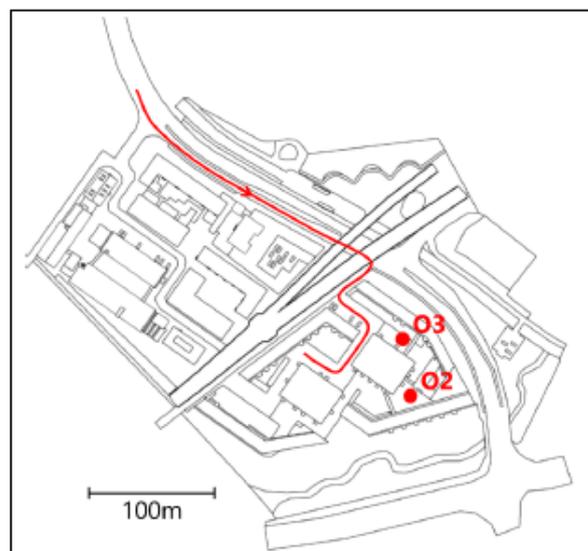


Figure 4. Car path 2 and the two observer positions: O2 (Observer 2) and O3 (Observer 3).

Car path 2. The Observer positions and car paths are illustrated in Figures 3 and 4. The height of the receiver representing the observers was 1.6 m above ground (ear height of a standing adult) for Observer 1 and Observer 3 and 1.2 m above ground (ear height of a sitting adult or standing child in the playground) for Observer 2. All in all, 15 sound scenarios were prepared from the combination of three facade types, two car paths, and three observer positions: $(3 \times 2 \times 3) - (1 \times 1 \times 3)$. No stimuli were prepared for the situation of Observer 1 responding to Car path 2 as it was very similar to the same observer responding to Car path 1.

3.2 Part 1

Part 1 initiated with two orienting and two training examples to familiarize with the sounds and the test software, before the main listening test started. In the main listening test, the subjects rated their level of annoyance to car sounds for the 15 stimuli described above. Each stimulus was 20-s long. During or after the playback of each stimulus, the subjects entered their ratings on an 11-point ICBEN scale considering the following question: "When you imagine that this is the sound situation in your outdoor living environment, what number from 0 to 10 represents best how much you would be bothered, disturbed or annoyed by it?" The subjects used a graphical interface of the test

software to enter their annoyance ratings. The stimuli were played back one after another in a random order. After each stimulus was played back and the subject's response was registered, the next stimulus played back automatically after a 2-s break.

3.3 Part 2

Part 2 of the experiment consisted only of a main listening test, as the subjects were already familiar with the sounds and the test software. The subjects had to choose the least and the most annoying / disturbing / bothering sounds among three sounds (A, B and C). Playback options for each sound were offered side by side in one page in the graphical interface. The subjects could listen to each sound (A, B, and C) twice and could choose which sound to play next, after the previous sound had finished playing back. The subjects were required to compare the three sounds considering the following: "Imagine that this is the sound situation in your outdoor living environment. Please choose the least annoying, disturbing or bothering and most annoying, disturbing or bothering sound." After listening to each of the three sounds (A, B, and C) at least once and giving their feedback, the subjects could move further to the next page where three new sounds were presented. A total of five pages were tested, with the same fifteen stimuli as described above (5×3) . In part 2, each stimulus was 15-s long. The three stimuli (sound situations) offered on each page were in the

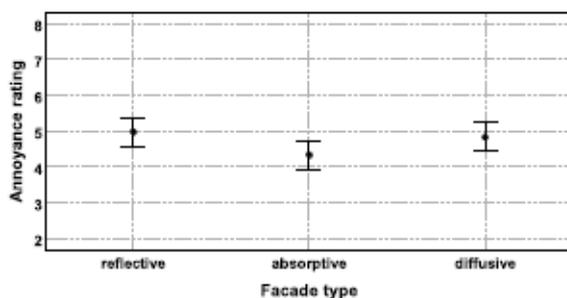


Figure 5. Results of part 1: mean acoustic comfort ratings across subjects and their 95% confidence intervals as a function of facade type.

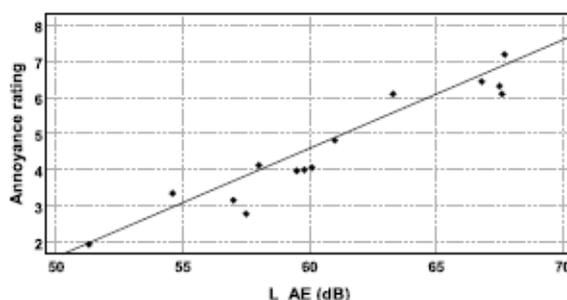


Figure 6. Results of part 1: mean acoustic comfort ratings across subjects as a function of L_{AE} .

same observer location with the same path. Only the material of the facade and the pillars of the overhead train line varied on each page. The order of pages and order of stimuli on each page were randomized.

3.4 Subjects

Thirty-two subjects (14 females and 18 males) participated in the experiment and finished both parts. All subjects declared having normal hearing (self judgment) and to feel well. They were aged between 19 and 62 yr (median 30.5 yr).

4. RESULTS

4.1 Part 1

Figure 5 shows mean annoyance ratings (on the 11-point ICBEN scale) and their 95% confidence intervals as a function of facade type. The absorbing facade type tended to be associated with lower annoyance ratings than the two other facade types.

Figure 6 illustrates mean annoyance ratings as a function of stimulus' A-weighted sound exposure level L_{AE} . Annoyance rating correlated positively and significantly with L_{AE} ($r = 0.57, p < 0.01$). That is, annoyance increased with increasing L_{AE} .

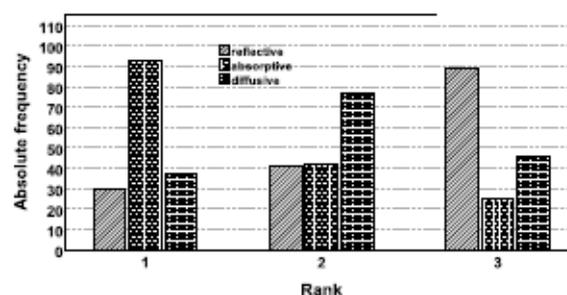


Figure 7. Results of part 2: counts of how many times each facade type was ranked as the least annoying (i.e., 1), the most annoying (i.e., 3) or was consequently ranked in between (i.e., 2).

4.2 Part 2

Figure 7 shows how often the stimuli associated with each facade type were ranked as the least or the most annoying stimuli in forced choices. The responses are coded as ranks 1, 2, and 3 from the least to the most annoying stimuli. The facade type had a significant effect on the annoyance ranking ($\chi^2(2) = 100.39, p < 0.001$). Stimuli corresponding to the absorptive and the reflective facade types were associated with the least and the most annoying rankings, respectively. The diffusive facade type was ranked in between.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

The annoyance reactions to car sounds from a moving car in a neighborhood environment were investigated in a two part psychoacoustic laboratory experiment. Three facade design parameters were investigated at three observer positions within the neighborhood. Of the three facade types, original (reflective), absorbing and scattering, the absorbing facade type was related with lower annoyance ratings. In Part 2 of the experiment the facade type had a significant effect on the annoyance ranking, where the absorptive facade was found to be the least annoying while the original facade was the most annoying. This result endorses the consideration of architectural features, such as facade properties, in relation to the urban sound environment.

The room acoustical software ODEON was used to simulate the sound propagation within the neighborhood layout. This was found beneficial as it allowed for a relatively effortless geometry input and assignment of material properties. Moreover, the 2D Surround option provided by ODEON could be used to ambisonically render multichannel impulse responses for each source-receiver relation. The area of the neighborhood simulated was quite large compared to normal room acoustical situations. This caused some problems at large source - receiver distances, where directional information in the multichannel IR was lost. This did not have effect on the stimuli of the experi-

ment presented here as the respective source - receiver distances were not too long, but should be taken into consideration for further applications.

The data from the experiment could be analyzed further, among other the effect of observer positions on annoyance ratings. The observers were placed in quite distinct situations within the neighborhood. The investigation of other architectural features such as material properties of ground surfaces and building placement as well as other observer positions could also be of interest in future experiments.

6. REFERENCES

- [1] WHO, Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen, Denmark: WHO regional office for Europe, 2018.
- [2] M. Hornikx, "Ten questions concerning computational urban acoustics," *Build. Environ.*, vol. 106, pp. 409–421, 2016.
- [3] M. Hornikx and J. Forssén, "Noise abatement schemes for shielded canyons," *Appl. Acoust.*, vol. 70, no. 2, pp. 267–283, 2009.
- [4] E. Badino, R. Manca, L. Shtrepi, C. Calleri, and A. Astolfi, "Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyons," *Build. Environ.*, vol. 157, pp. 242–256, 2019.
- [5] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Armando, and A. Astolfi, "On the influence of different facade materials on the auditory perception of a urban space," in *Proc. of the INTER-Noise and Noise.Con Congress and Conference*, (Hong Kong, China), pp. 2919–2928, 2017.
- [6] J. Kang, "Numerical modelling of the sound fields in urban spaces," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 6, pp. 3695–3706, 2005.
- [7] J. Kang, "Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 3, pp. 1394–1404, 2000.
- [8] H. Onaga and J. H. Rindel, "Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades," *Appl. Acoust.*, vol. 68, pp. 310–325, 2002.
- [9] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Armando, and A. Astolfi, "Evaluation of the influence of building facade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces," *Build. Acoust.*, vol. 25, no. 1, pp. 77–95, 2018.
- [10] A. Taghipour, T. Sievers, and K. Eggenschwiler, "Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 2, p. 249, 2019.
- [11] R. Guski, D. Schreckenber, and R. Schuemer, "Who environmental noise guidelines for the european region: A systematic review on environmental noise and annoyance," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 12, p. 1539, 2016.
- [12] F. Georgiou, M. Hornikx, and A. Kohlrausch, "Auralization of a car pass-by using impulse responses computed with a wave-based method," *ACTA ACUST. UNITED AC.*, vol. 105, pp. 381 – 391, 2019.
- [13] R. Pieren, T. Bütler, and K. Heutschi, "Auralization of accelerating passenger cars using spectral modeling synthesis," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 5, 2016.
- [14] Odeon, ODEON Room Acoustics Software, Version 15, User's Manual. Kgs. Lyngby, Denmark: Odeon A/S, 2018.

ACKNOWLEDGMENTS The authors are very grateful to the participants of the experiment of this study. They would also like to thank Alen Salihovic for his considerable work in creating the geometric model. The project was financed by the Swiss Federal Office of the Environment (FOEN) and Empa.