



Schlussbericht zum Vorhaben

Streetmoves4iCity

FH-Impuls 2016 Intensivierungsphase:

Streetmoves für die Intelligente Stadt

Das Projekt „Streetmoves4iCity“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „FH-Impuls: Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region“ unter dem Förderkennzeichen FH9I07IA gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH für das BMBF betreut.

Stuttgart, Dezember 2024

Ein Projekt der

**Hochschule
für Technik
Stuttgart**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FORSCHUNG AN
FACHHOCHSCHULEN



Beteiligte

Hochschule für Technik Stuttgart

Alfakhori, Muhammad
Bäumer, Thomas
Coors, Volker
Dastageeri, Habiburrahman
Huber, Stephanie
Ort, Jan-Timo
Ruff, Andreas
Schneider, Martin
Silberer, Jan
Simon-Philipp, Christina
Zeitler, Berndt

Kooperationspartner

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg
Landeshauptstadt Stuttgart
M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH



Schlussbericht – Eingehende Darstellungen

Streetmoves4iCity

FH-Impuls 2016 Intensivierungsphase:
Streetmoves für die Intelligente Stadt

Projektlaufzeit	01.09.2022 bis 30.06.2024
Förderkennzeichen	FH9I07IA
Fördersumme BMBF	281.030,74 €
Drittmittel gesamt	22.250 €
Stichworte	Stadtentwicklung, Intelligente Stadt, nachhaltige Mobilität, nachhaltige Stadtentwicklung, Mobilitätswende, öffentlicher Raum, Partizipation und Akzeptanz, Augmented Reality, Virtual Reality, Mixed Reality, Informations- und Kommunikationstechnologien, Lärm, Schalldämmung
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Christina Simon-Philipp
Beteiligte Professoren	Prof. Dr.-Ing. Christina Simon-Philipp, Prof. Dr.-Ing. Volker Coors, Prof. Dr. Thomas Bäumer, Prof. Dr. Stephanie Huber, Prof. Dr. Berndt Zeitler
Geförderte Maßnahme	Forschung an Fachhochschulen
Förderbereich	Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region
Fachhochschule	Hochschule für Technik Stuttgart (HFT Stuttgart), Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart

Das Projekt „Streetmoves4iCity“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „FH-Impuls: Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region“ unter dem Förderkennzeichen FH9I07IA gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH für das BMBF betreut.

Hochschule für Technik Stuttgart, Dezember 2024

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Leonhardsplatz in der Leonhardsvorstadt. (Eigene Darstellung)</i>	10
<i>Abbildung 2: Verkehrsversuch Mannheim. (Eigene Darstellung)</i>	10
<i>Abbildung 3: VR-Szenario vom Leonhardsplatz vor und nach Reduzierung des Autoverkehrs. (Eigene Darstellung)</i>	12
<i>Abbildung 4: Einsatz des AR-Szenarios am Leonhardsplatz. (Eigene Darstellung)</i>	12
<i>Abbildung 5: Straßenraum vor Intervention</i>	15
<i>Abbildung 6: Straßenraum nach Intervention</i>	15
<i>Abbildung 7: Straßenraum vor Intervention</i>	15
<i>Abbildung 8: Straßenraum nach Intervention</i>	15
<i>Abbildung 9: Straßenraum vor Intervention</i>	15
<i>Abbildung 10: Straßenraum nach Intervention</i>	15
<i>Abbildung 11: Straßenraum vor Intervention</i>	16
<i>Abbildung 12: Straßenraum nach Intervention</i>	16
<i>Abbildung 13: Darstellung möglicher stadtplanerischer Szenarien zur Umgestaltung des Leonhardsplatzes. (Eigene Darstellung)</i>	20
<i>Abbildung 14: Visualisierung von Lärm im öffentlichen Raum (Eigene Darstellung)</i>	20
<i>Abbildung 15: AR Intervention am Leonhardsplatz. (Eigene Darstellung)</i>	21
<i>Abbildung 16: Infostand vor dem Züblin-Parkhaus (links) und Vorführung der akustischen Kamera (rechts) beim IBA-Festival</i>	21
<i>Abbildung 17: Aufnahme von vorbeifahrenden Fahrzeugen mittels akustischer Kamera</i>	23
<i>Abbildung 18: Lärmsensor mit Steuerungsplatine</i>	24
<i>Abbildung 19: Karten-Darstellung von der Homepage „sensor.community“ mit Einzahl-Messwerten von einem Lärmsensor in Stuttgart</i>	25
<i>Abbildung 20: Fassade des Parkhauses mit Position des Lärmsensors (roter Punkt)</i>	25
<i>Abbildung 21: Lärmsensor im Schutzgehäuse mit mobilem WLAN-Router und Stromversorgung über zwei Powerbank-Akkus an der Parkhaus-Brüstung</i>	26
<i>Abbildung 22: Am 05. und 06.02.2024 gemessene Außenpegel (Bild oben) und Pegel im Innenraum (Bild unten). Die A-bewerteten Schalldruckpegel (Max., Min. und L_{eq} Werte) sind jeweils oben dargestellt, das zugehörige Spektrogramm dieser Werte ist darunter (zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung)</i>	28
<i>Abbildung 23: Über den Tagzeitraum gemittelter A-bewerteter Außenlärmpegel (schwarz, linke Achse) und Schalldämm-Maß der Fassade (rot, rechte Achse)</i>	29
<i>Abbildung 24: A-bewerteter Innenpegel über einen Tag berechnet aus den gemessenen Außenlärmspektren und dem frequenzabhängigen Schalldämm-Maß der Fassade</i>	30
<i>Abbildung 25: Histogramme des A-bewerteten Innenpegels für den Nachtzeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr (oben) und für den Tagzeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr (unten)</i>	30
<i>Abbildung 26: Gemessene A-bewertete Außen- und Innenpegel in der Schlossstraße und aus diesen Messungen ermittelten scheinbare bewertete Schalldämm-Maße</i>	31
<i>Abbildung 27: Verlauf des Schalldämm-Maßes über der Frequenz, ermittelt aus den gemessenen Außenlärm- und Innenlärmspektren zu unterschiedlichen Zeiten</i>	32

Abbildung 28: Verlauf der Lästigkeit (linke Achse) und der A-bewerteten Pegel im Innenraum (rechte Achse) für die 14 Hörbeispiele 33

II. Eingehende Darstellungen

II.1 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

II.1.1 TP 1: Stadtraum in Bewegung

II.1.1.1 AP 1.1: Konzeption von Zukunftsszenarien

Im Projekt wurden beispielhafte Partizipationsansätze gesammelt und analysiert, anzuwendende Methoden identifiziert und bewertet, eine Augmented- und Virtual-Reality-Anwendung (AR-/VR) entwickelt und die AR- und VR-Anwendung hinsichtlich der Erlebbarkeit verglichen.

Auf Grundlage einer räumlichen Analyse wurde ein Standortscouting für räumlich-programmatische Experimente im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Mittels planbasierter Analyse, Video- und Fotografie-dokumentierter Beobachtungen zu Nutzungs- und Aneignungsverhalten, konnten geeignete Experimentorte identifiziert werden. Zentral waren hierbei der Leonhardsplatz und die angrenzenden Straßen in der Leonhardsvorstadt in Stuttgart, einem historischen Quartier in der Stuttgarter Innenstadt. Der Ort verfügt über große Potenziale, die Aufenthaltsqualität für die Anwohner:innen durch die Reduzierung des ruhenden und fahrenden Autoverkehrs zu verbessern.

Orte späterer Interventionen waren bei lokalen Beschäftigten, Anwohnerschaft und Besucher:innen von Quartier und Stadt bereits als Treffpunkte und Aufenthaltsorte etabliert. Dieser Nutzungsanspruch spiegelte sich nicht in der Gestaltung und Ausstattung des öffentlichen Raumes wider. Vorhandene Elemente wurden umgenutzt, wie Beton-Palisaden als improvisierte Ablageflächen und Sitzgelegenheiten. Diese festgestellten Bedarfe und Defizite flossen in die Szenario-Konzeption räumlich-programmatischer Interventionen ein.

Diese Interventionen sollten auch in den digitalen Simulationen Anwendung finden. Im Projekt „Mobility4iCity“ wurde bereits ein experimentelles Szenario mithilfe eines Augmented Reality (AR) Tools umgesetzt. Allerdings war hier die Qualität der Darstellung bei Sonnenlicht nicht zufriedenstellend und daher der positive Effekt auf die Akzeptanz zur Reduzierung des Autoverkehrs nicht so stark wie erhofft. Daher wurde eine Literaturrecherche mit dem Fokus auf Virtual Reality (VR) als alternative Darstellungsoption durchgeführt. VR Tools können beispielsweise programmierte 3D-Umgebungen sein, in denen sich Nutzer:innen im Quartier umsehen können oder auch Gamification-Ansätze wie „Stadtplanungs-Minecraft“. Bei VR-Technologien hat sich gezeigt, dass derartige Tools Menschen helfen, sich besser in die Änderungsvorschläge aus der Stadtplanung hineinversetzen zu können (Johansen & Pedersen, 2019; Tomarchio et al., 2019). Zudem können diese Technologien die Gesamtmotivation erhöhen, sich zu beteiligen (Thiel & Fröhlich, 2017) und auch kurzfristig zur Partizipation motivieren (Thiel, 2016). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich

VR Tools – ähnlich wie AR-Tools – sehr gut eignen, um den Bürger:innen geplante Interventionen zu vermitteln und diese auch erlebbar zu machen.

Um einen Vergleich zwischen Augmented und Virtual Reality zu ermöglichen, wurde eine VR-basierte Simulation erstellt, die entweder auf einer VR-Brille oder auf einem Smartphone dargestellt werden konnte. In einer weiteren Variante wurde ein realer Verkehrsversuch aus einer anderen Stadt mittels 360-Grad Kamera aufgezeichnet und über eine VR-Brille erlebbar gemacht. Die Ergebnisse sind im folgenden Kapitel AP 1.2 dargestellt.

Das Vorhaben sah zusätzlich die Planung und Umsetzung einer realen Intervention am ausgewählten Standort in Kooperation mit Bürger:innen vor. Die Bereitschaft zur Beteiligung an der Planung nahm im Prozess aufgrund der notwendigen Planungszeit ab. Bei der praktischen Umsetzung räumlich-programmatischer Interventionen wurden lokale Gewerbetreibende und Bürger:innen erfolgreich beteiligt. Auch bei den experimentellen digitalen Interventionen wurden so weit wie möglich Bürger:innen aus dem Quartier zur Teilnahme eingeladen und stellten zumindest in einer der Studien die Mehrheit der Teilnehmenden.

II.1.1.2 AP 1.2: Digitale und physische räumliche Interventionen

Dieses Arbeitspaket behandelt eines der Hauptziele des Forschungsvorhabens. Es wurden Experimente als temporäre, räumlich-programmatische Interventionen mit digitalen Partizipationstools umgesetzt. Hierbei ging es darum, die spezifische Wirksamkeit unterschiedlicher Mixed Reality (MR) Ansätze (VR und AR) auf die Akzeptanz zur Reduzierung des Autoverkehrs im Quartier zu untersuchen. Neben den digitalen Ansätzen wurde auch eine reale Intervention umgesetzt und mit vergleichbaren Methoden evaluiert. Eine vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse ist im Kapitel AP 1.3 dargestellt.

Die unterschiedlichen MR-Ansätze wurden anhand einer vergleichbaren Methodik mit Bürger:innen in einem experimentellen Design mit Messwiederholung evaluiert. Dabei wurde zunächst das Quartier der Leonhardsvorstadt (mit einem Fokus auf den Leonhardsplatz) in seinem heutigen Zustand gezeigt bzw. erlebt. Danach wurde ein Szenario mittels VR- oder AR-Technologie als Intervention vorgestellt, das den Platz nach einer Umgestaltung mit erhöhter Aufenthaltsqualität (durch Grünflächen, Bäume, Büsche und Sitzgelegenheiten) zeigte. Jeweils vor und nach der Intervention wurde die Akzeptanz zur Reduzierung des ruhenden und fließenden Autoverkehrs im Quartier erfasst. Die Akzeptanz der Bürger:innen gegenüber der Umsetzung verkehrspolitischer Maßnahmen zur Reduzierung des ruhenden und fließenden Autoverkehrs ist eine relevante psychologische Kenngröße, da Widerstände vor oder während solcher Projekte auftreten können, wenn keine Akzeptanz gegeben ist (Huber, Wicki & Bernauer, 2020). Gleichzeitig stehen Bürger:innen verkehrspolitischen Maßnahmen aufgeschlossener gegenüber, wenn diese Lebens- und Aufenthaltsqualität schaffen (Wicki & Kaufmann, 2022). Solche positiven Effekte sind aber in der Regel nicht

vorstellbar, wenn lediglich über die Reduzierung des Autoverkehrs gesprochen wird. Im Gegensatz dazu scheinen eventuelle negative Auswirkungen auf die Mobilität vergleichsweise gut vorstellbar zu sein. Die digitalen Interventionen sollten dazu beitragen, die positiven Auswirkungen auf die Aufenthaltsqualität erlebbar zu machen und letzten Endes die Akzeptanz zu steigern. Um diese Vermutung zu untersuchen, wurden drei experimentelle Studien im Quartier durchgeführt. Im Fokus stand dabei insbesondere die Frage, welche digitalen Partizipationsmethoden die Erlebbarkeit eines autoarmen Quartiers am effektivsten herstellen können, um so die Akzeptanz einer nachhaltigen Mobilitätskultur zu befördern.

Studie 1:

Die erste Studie machte sich einen parallel durchgeführten, realen Verkehrsversuch in Mannheim zur Reduzierung des Autoverkehrs zunutze¹, bei dem am Rande der Fressgasse und der Kunststraße zusätzliche Aufenthaltsbereiche (Parklets mit Sitzgelegenheiten, Fahrradparkplätze und Grün) errichtet wurden. Von den Aufenthaltsbereichen wurden herkömmliche 2D Aufnahmen sowie 360 Grad Aufnahmen (für VR-Brille) gemacht und den Teilnehmenden in unterschiedlichen Experimentalgruppen gezeigt. Zunächst sahen die Teilnehmenden Bilder vom Untersuchungsort in der Leonhardsvorstadt. Als Intervention wurde im Anschluss (je nach Experimentalgruppe) in 2D oder als 360 Grad Video gezeigt, wie eine Reduzierung des Autoverkehrs aussehen könnte. Die 2D-Bilder wurden an einem normalen Computerbildschirm gezeigt. In der VR-Bedingung wurde die Brille Meta Quest 2 verwendet. Die Akzeptanz einer Reduzierung des Autoverkehrs wurde vor und nach der experimentellen Intervention mittels eines Fragebogens erfasst. Die Stichprobengröße der 2D-Bild Bedingung lag bei N=38, in der VR 360 Grad Bedingung bei N= 30 Teilnehmenden. In der 2D-Bild Gruppe ergab sich bei einseitiger Testung nur eine signifikante positive Veränderung hinsichtlich der Akzeptanz zur Reduzierung des fließenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 3.39$ vs. $M_{\text{nachher}} = 3.71$ auf einer Skala von 1=negativ bis 5=positiv, $t(37)=-2.407$, $p=.011$), aber nicht des ruhenden Autoverkehrs ($p=.115$). In der VR 360 Grad Gruppe zeigte sich hingegen sowohl eine signifikante positive Veränderung der Akzeptanz zur Reduzierung des fließenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 3.70$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.43$, $t(29)=-3.717$, $p<.001$) als auch

1 <https://www.mannheim.de/de/service-bieten/umwelt/stadtraumservice-mannheim/planung-und-bau/grossprojekte-und-aktuelle-planungen/lebenswerte-innenstadt>

des ruhenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 3.13$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.03$, $t(29)=-4.642$, $p<.001$). Nachträgliche Analysen zeigen einen (marginal) signifikanten Interaktionseffekt zwischen Messzeitpunkt und Testgruppe. Zusammengenommen zeigt sich, dass die Darstellung der Auswirkungen verkehrsberuhigender Maßnahmen in Bezug auf den fließenden und ruhenden Autoverkehr via 360 Grad Video mit einer VR-Brille die Akzeptanz gegenüber diesen Maßnahmen erhöhen kann.



Abbildung 1: Leonhardsplatz in der Leonhardsvorstadt (Eigene Darstellung)

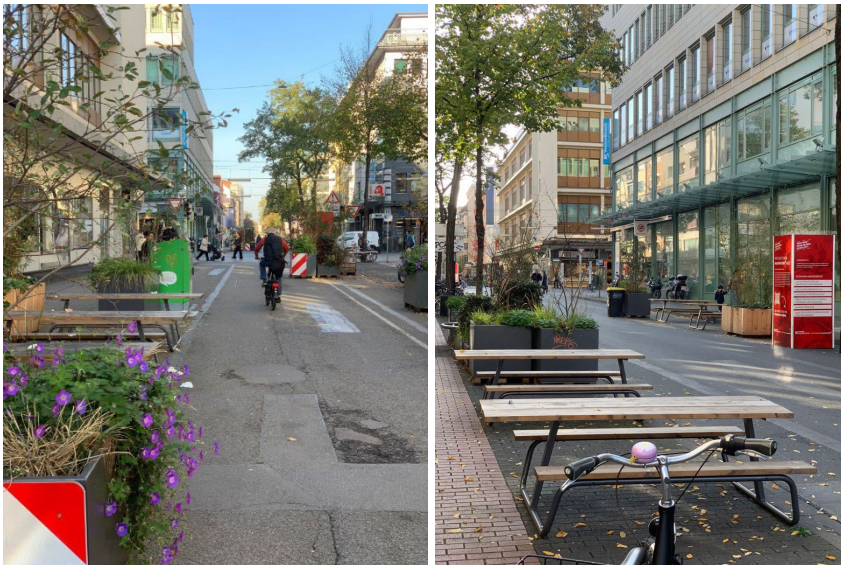


Abbildung 2: Verkehrsversuch Mannheim (Eigene Darstellung)

Studie 2:

In der zweiten Studie wurde ein im Rahmen des Projekts entworfenes VR-Szenario des Leonhardsplatzes genutzt. Dieses zeigte in einer virtuellen Simulation den Leonhardsplatz vor und nach einer möglichen Umgestaltung zur Erhöhung der Aufenthaltsqualität durch die

Reduzierung des Autoverkehrs. In dem Szenario wurden Grünflächen, Bäume, Büsche und Sitzgelegenheiten implementiert. Dieses Szenario wurde den Teilnehmenden in einer von drei Varianten präsentiert: Entweder in Form eines Videos auf dem Smartphone, in Form eines Videos über eine VR-Brille (Meta Quest 2) oder als interaktiv erlebbare Darstellung über eine VR-Brille. Die Vermutung war, dass die Immersion und damit auch der positive Effekt auf die Erlebbarkeit und Akzeptanz in der letzten Bedingung am höchsten sind. Den Teilnehmenden wurde zunächst der Leonhardsplatz in der jetzigen Form gezeigt, sowohl real bei einem Quartiersspaziergang als auch im Anschluss in virtueller Form. Anschließend wurde das Szenario nach einer möglichen Umgestaltung gezeigt. Die Akzeptanz einer Reduzierung des Autoverkehrs wurde vor und nach der experimentellen Intervention mittels eines Fragebogens erfasst. Die Stichprobengröße war in allen drei Bedingungen bei $N=30$. In den beiden Video-Bedingungen, d.h. sowohl in der Darstellung auf dem Smartphone als auch über die VR-Brille, ergab sich bei einseitiger Testung keine positive Veränderung hinsichtlich der Akzeptanz zur Reduzierung des fließenden oder ruhenden Autoverkehrs (alle $p>.09$). Lediglich in der interaktiven VR-Bedingung zeigte sich der erwartete positive Effekt sowohl hinsichtlich der Akzeptanz zur Reduzierung des fließenden ($M_{\text{vorher}} = 4.30$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.50$ auf einer Skala von 1=negativ bis 5=positiv, $t(19)=-2.179$, $p=.021$), als auch des ruhenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 3.80$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.15$, $t(19)=-3.199$, $p=.002$). Nachträgliche Analysen zeigen einen (marginal) signifikanten Interaktionseffekt zwischen Messzeitpunkt und Testgruppe für die Akzeptanz zur Reduzierung des ruhenden (aber nicht des fließenden) Autoverkehrs.

Zusammengenommen zeigt sich, dass ein interaktiver VR-Ansatz zur Darstellung der Auswirkungen verkehrsberuhigender Maßnahmen die Akzeptanz gegenüber diesen Maßnahmen erhöhen kann. Der immersive Effekt könnte noch gesteigert werden, wenn im programmierten VR-Szenario interne Datenfehler beseitigt und mehr bewegliche Elemente wie der Stadthorizont, Menschen und Autos hinzugefügt würden.



Studie 3:

Während des Projektverlaufs wurde eine mögliche Lösung für das Problem gefunden, AR-Anwendungen bei Sonnenlicht im Feld einzusetzen. Um die Sichtbarkeit des AR-Modells insbesondere bei hellem Tageslicht zu optimieren, wurde der Kontrast für die HoloLens AR-Brille durch das System HoloTint verbessert. HoloTint verdunkelt das Umgebungslicht, um den digitalen Inhalt deutlich ablesbarer zu machen. In einer dritten Studie wurde das AR-Szenario aus dem Projekt „Mobility4iCity“ daher erneut genutzt und dem VR-Szenario „360 Grad“ aus der ersten Studie aus dem vorliegenden Projekt gegenübergestellt. Dieses VR-Szenario wurde ausgewählt, weil es mit einem vergleichsweise geringen zeitlichen Aufwand und technologischem Know-How auf andere Szenarien übertragbar ist. Man braucht lediglich eine 360-Grad Kamera, um ein Modellprojekt aus einer anderen Stadt aufzeichnen zu können. Diese Videos können dann mittels einer VR-Brille Bürger:innen in immersiver und realistischer Form vorgespielt werden. Zudem zeigte das VR-Szenario „360 Grad“ bisher die größte Effektstärke über alle getesteten Darstellungsvarianten hinweg (vgl. AP 1.3).

In der dritten Studie wurde also das VR-Szenario „360-Grad“ aus der ersten Studie einer optimierten Variante eines AR-Szenarios aus dem Projekt „Mobility4iCity“ gegenübergestellt. Bei dem AR-Szenario standen die Teilnehmenden am Untersuchungsort Leonhardsplatz und sahen mithilfe einer AR-Brille (Microsoft HoloLens 2) über virtuelle Einblendungen, wie der Platz nach der Umgestaltung aussehen könnte. Die Umgestaltung entsprach dabei von den Elementen her dem VR-Szenario aus der zweiten Studie.

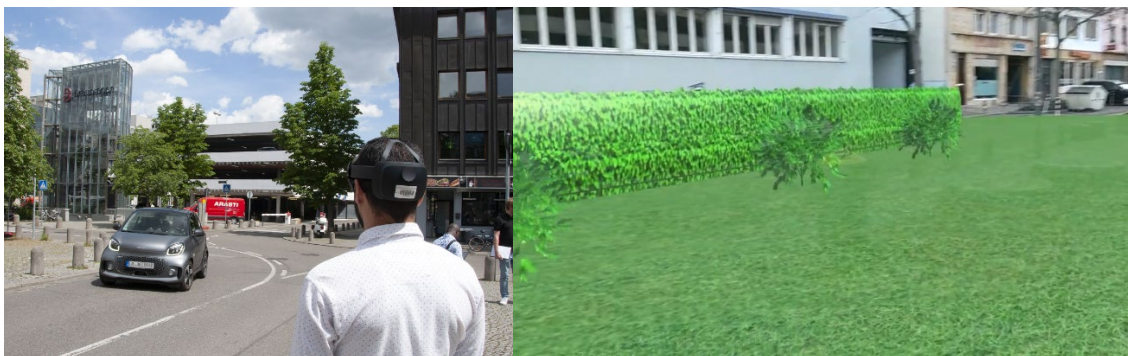


Abbildung 4: Einsatz des AR-Szenarios am Leonhardsplatz (Eigene Darstellung)

Den Teilnehmenden wurde zunächst der Leonhardsplatz in der jetzigen Form bei einem Quartiersspaziergang gezeigt. Anschließend wurde das Szenario nach einer möglichen Umgestaltung präsentiert. Je nach Experimentalgruppe bekamen die Teilnehmenden dann als Intervention via AR- oder VR-Szenario (360 Grad) gezeigt, wie eine Umgestaltung des Platzes nach Reduzierung des Autoverkehrs aussehen könnte. Die Akzeptanz einer Reduzierung des Autoverkehrs wurde vor und nach der experimentellen Intervention mittels eines Fragebogens erfasst. Die Stichprobengröße in der AR-Bedingung lag bei N=21, in der

VR-Bedingung bei N=23 Teilnehmenden. In der AR Gruppe zeigte sich bei einseitiger Testung nur ein signifikant positiver Effekt auf die Akzeptanz zur Reduzierung des ruhenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 3.75$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.16$ auf einer Skala von 1=negativ bis 5=positiv, $t(20)=-2.592$, $p=.009$), aber nicht des fließenden Autoverkehrs ($p=.15$). In der VR Gruppe zeigte sich ebenfalls nur eine signifikante positive Veränderung der Akzeptanz zur Reduzierung des ruhenden Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 4.22$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.41$, $t(22)=-2.614$, $p=.008$), aber nicht des fließenden Autoverkehrs ($p=.13$). Nachträgliche Analysen zeigen keinen Hinweis auf einen Interaktionseffekt zwischen Messzeitpunkt und Testgruppe. Zusammengenommen zeigt sich, dass beide Ansätze (AR und VR) zur Darstellung der Auswirkungen verkehrsberuhigender Maßnahmen zumindest die Akzeptanz gegenüber Maßnahmen zur Reduzierung des ruhenden Autoverkehrs erhöhen können.

Reallabor „Parklet“:

Anlässlich zweier Veranstaltungen (IBA'27-Festival, „Urban Future“-Konferenz) zu urbanen Transformationsprozessen in Stuttgart während des Untersuchungsraums wurden öffentliche Verkehrsflächen temporär umgenutzt. Die Umgestaltung wurde durch Informationsangebote begleitet. Das Team erläuterte den Forschungsbedarf, die Zwischenergebnisse und die neuartige Methodik mit digitalen Partizipationswerkzeugen (vgl. AP 1.4).

Mit Parklets wurde eine räumlich-programmatische Intervention im Projektquartier umgesetzt. In einem stark durch motorisierten Verkehr beeinträchtigten Straßenabschnitt am Leonhardsplatz wurden straßenbegleitende Stellplätze temporär umgenutzt. Mittels räumlicher Elemente wurden eine andere räumliche Struktur und Gestaltung innerhalb der Abmessungen der vorhandenen Kfz-Stellplätze dargestellt.

Die Bürger:innen nutzten die Angebote der Parklet-Intervention umgehend; dies hielt im Experimentzeitraum an. Im Verlauf hielten die Nutzer:innen die Ausstattungselemente selbständig in Ordnung. Angehörige lokaler Taxiunternehmen äußerten sich kritisch zur Umnutzung der Stellplatzfläche, ebenso lokale Gewerbetreibende.

Um den Einfluss der Parklet-Intervention auf die Akzeptanz der Reduzierung des Autoverkehrs im Vergleich mit den digitalen Interventionen untersuchen zu können, wurde auch hier eine experimentelle Studie durchgeführt. Hier ging es um das reale Erleben des Parklets in der Nähe des Leonhardsplatzes. Die Teilnehmenden erkundeten zunächst das Umfeld des Leonhardsplatzes, ohne dass das Parklet zu sehen war. Danach wurde das Parklet gezeigt und die Teilnehmenden konnten es nutzen. Die Akzeptanz einer Reduzierung des Autoverkehrs wurde vor und nach der experimentellen Intervention mit einem Fragebogen erfasst. Die Stichprobengröße lag bei N=52. Es zeigte sich bei einseitiger Testung nur ein signifikant positiver Effekt auf die Akzeptanz zur Reduzierung des ruhenden

Autoverkehrs ($M_{\text{vorher}} = 4.01$ vs. $M_{\text{nachher}} = 4.15$ auf einer Skala von 1=negativ bis 5=positiv, $t(51)=-1.793$, $p=.039$), aber nicht des fließenden Autoverkehrs ($p=.09$). Somit kann angenommen werden, dass auch die Intervention mittels Parklet einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz bezüglich der Reduzierung des (ruhenden) Autoverkehrs hat.

Die Öffentlichkeitsarbeit zum Vorhaben erfolgte begleitend über die Website der Hochschule, sozialen Plattformen (LinkedIn, Instagram) und Medien kooperierender Akteur:innen (IBA'27 Stadtregion Stuttgart, Urban Future-Konferenz).

Weitere Studie:

Zusätzlich zu den hier dargestellten Studien wurde in einer weiteren Abschlussarbeit aus der Wirtschaftspsychologie die persönliche Freiheit der Verkehrsmittelwahl als Einflussfaktor auf die Einstellung zu verkehrsreduzierten Innenstädten untersucht. Hier zeigte sich, dass eine wahrgenommene Einschränkung in der Verkehrsmittelwahl zu einer Abwertung des verantwortlichen Verkehrskonzeptes führt (was u.a. von der Wichtigkeit des Autos abhängt).



Abbildung 5: Leonhardstraße vor Intervention



Abbildung 6: Straßenraum mit Parklet (linke Seite)



Abbildung 7: Parkplatzfläche vor Intervention



Abbildung 8: Parkplatzfläche mit Parklet



Abbildung 9: Ungenutzter Straßenraum



Abbildung 10: Parklet mit angrenzenden Nutzungen



Abbildung 11: Wenig lebendiger Stadtraum



Abbildung 12: Parklet als Ort der Kommunikation

Abb. 1 – Abb. 8: eigene Darstellungen

II.1.1.3 AP 1.3: Zusammenfassung und Evaluation

Die Studien und Interventionen wurden abschließend summarisch evaluiert und die verschiedenen Partizipationsansätze vergleichend bewertet. In AP 1.2 wurde der Effekt unterschiedlicher digitaler und realer Interventionen auf die Erlebbarkeit der Auswirkungen und damit Akzeptanz von fließendem und ruhendem Autoverkehr untersucht. Im Folgenden werden die Effekte noch einmal im Vergleich für eine abschließende, summative Evaluation und vergleichende Bewertung dargestellt.

Ruhender Autoverkehr:

In der folgenden Tabelle werden für die unterschiedlichen Interventionen folgende Kennwerte für die Akzeptanz des ruhenden Autoverkehrs dargestellt: Der Mittelwertsunterschied der Akzeptanz (nach der Intervention – vor der Intervention, auf einer 5-stufigen Skala), der einseitige p-Wert (auf Basis eines abhängigen t-Tests), die Effektstärke d (ab 0.2 klein, ab 0.5 mittel, ab 0.8 groß; vgl. Cohen, 1988), inkl. Unter- und Obergrenze des zugehörigen Konfidenzintervalls.

Intervention	Mittelwerts-Differenz	p-Wert	Effektstärke d	Konfidenzintervall d
2D Bilder (Verkehrsversuch)	0.237	.115	0.198	-0.124; 0.518
VR 360 Grad (Verkehrsversuch)	0.900	<.001	0.848	0.424; 1.261
VR-Smartphone (Video)	0.150	.093	0.307	-0.146; 0.752
VR-Brille (Video)	-0.050	.358	-0.083	-0.521; 0.357
VR-Brille (Interaktiv)	0.350	.002	0.715	0.215; 1.201

AR-Brille	0.413	.009	0.566	0.098; 1.021
VR 360 Grad (Verkehrsversuch)	0.189	.008	0.545	0.101; 0.979
Parklet	0.144	.039	0.249	-0.029; 0.523

Fließender Autoverkehr

In der folgenden Tabelle werden für die unterschiedlichen Interventionen dieselben Kennwerte für die Akzeptanz des fließenden Autoverkehrs dargestellt.

Intervention	Mittelwerts-Differenz	p-Wert	Effektstärke d	Konfidenzintervall d
2D Bilder (Verkehrsversuch)	0.316	.01	0.390	0.058; 0.718
VR 360 Grad (Verkehrsversuch)	0.733	<.001	0.679	0.276; 1.072
VR-Smartphone (Video)	0.050	.333	0.098	-0.343; 0.536
VR-Brille (Video)	0.150	.210	0.185	-0.260; 0.624
VR-Brille (Interaktiv)	0.200	.021	0.487	0.017; 0.946
AR-Brille	0.142	.150	0.232	-0.204; 0.663
VR 360 Grad (Verkehrsversuch)	0.130	.133	0.238	-0.179; 0.650
Parklet	0.087	.091	0.188	-0.088; 0.461

Betrachtet man die Effektstärken der unterschiedlichen Interventionen im Vergleich auf beide Maße der Akzeptanz, so sticht vor allem die VR-Intervention „360 Grad“ positiv hinsichtlich Effektivität und Effizienz hervor. Effektivität bedeutet, dass es zumindest in der ersten Studie die Effektstärke auf beiden Maßen am höchsten war und sich ein großer, signifikant positiver Effekt auf beiden Akzeptanzmaßen zeigte. Bezüglich der Effizienz lässt sich anmerken, dass das Filmen eines bereits bestehenden Verkehrsversuchs mittels 360 Grad Kamera und das Abspielen mittels VR-Brille vom zeitlichen Aufwand und technischen Know-How deutlich einfacher umzusetzen sind als in den anderen VR- und AR-Varianten, wo die jeweiligen Szenarien mit großem Aufwand im Vorfeld programmiert werden mussten. Dies erhöht die Einsatzmöglichkeit der Variante „VR 360 Grad“ als partizipatives Tool im kommunalen Kontext.

Einschränkend ist anzumerken, dass die erste Studie mit der VR-Intervention „360 Grad“ unter Laborbedingungen stattgefunden hat, während die anderen Studien als Feldversuche

umgesetzt wurden. Letztere haben in der Regel einen stärkeren Einfluss von Störvariablen und dadurch im Vergleich kleinere Effektstärken.

Unter den Interventionen im Feld sticht das interaktive VR-Szenario hervor, in welchem die Teilnehmenden frei explorieren konnten. Auch hier zeigte sich ein mittlerer bis großer positiver signifikanter Effekt auf beiden Akzeptanzmaßen. Der Vorteil der VR-Simulation im Vergleich zur AR-Simulation ist die Unabhängigkeit von Ort und Wetterbedingungen. Außerdem zeigte die VR-Simulation noch Optimierungspotential, um die Effektivität potenziell zu steigern (z.B. durch Hinzufügen interaktiver Elemente, wie Passanten oder Geräusche wie Vögel). Dieser Ansatz sollte aus unserer Sicht daher weiterverfolgt werden, wobei aber auch auf die Effizienz bei der Programmierung geachtet werden sollte.

Die Anwendbarkeit der untersuchten Partizipationswerkzeuge in Stadtentwicklungsprozessen ist aus planerischer Sicht stark von der Darstellbarkeit von Planungsszenarien abhängig. Im Vorhaben wurden Umgestaltungen ausschließlich anhand statischer, gegenständlicher, räumlicher Elemente gezeigt.

Die Darstellung übergeordneter, strategischer Vorhaben und stadtplanerischer Szenarien ohne klar definierte bauliche und gestalterische Eingriffe, erfordert im Fall der untersuchten Partizipationswerkzeuge eine entsprechende Transferleistung.

Die Möglichkeit einer multisensorisch erfassbaren Szenariodarstellung erlaubt sowohl bei den eingesetzten digitalen Werkzeugen (visuell, auditiv), als auch bei physisch-räumlichen Interventionen (visuell, olfaktorisch, taktil) einen großen Umfang darstellbarer Veränderungen.

Hinsichtlich der Potenziale einer Kombination bzw. hybriden Einsatzes o.g. Werkzeuge ergibt sich ein über das Vorhaben hinausgehender Forschungsbedarf.

II.1.1.4 AP 1.4: Dokumentation und Vermittlung

Die Streuung der Erkenntnisse in die Praxis kollaborativer Stadtentwicklungsprozesse und die aktuellen Planungen im Projektquartier im Rahmen der IBA`27 waren ein wichtiger Baustein des Arbeitspakets „Dokumentation und Vermittlung“. Wie bereits in AP 1.3 kurz beschrieben, waren die Interventionen in zwei Veranstaltungen (IBA`27-Festival, „Urban Future“-Konferenz) zu urbanen Transformationsprozessen in Stuttgart eingebunden. Das Projektteam vermittelte die Projekthalte und die Methodik anschaulich an interessierte Bürger:innen und Expert:innen, Fragen wurden beantwortet und diskutiert.

Urban Future Konferenz:

Im Rahmen der Urban Future Konferenz – einer der wichtigsten Konferenzen für nachhaltige Städte in Europa – veranstalteten die Forscher:innen des iCity-Teilprojekts Streetmoves4iCity am 23. Juni 2023 einen Field Trip in der Leonhardsvorstadt mit zwölf

Teilnehmenden. Ziel dieses Field Trips war es, den Teilnehmenden einen Einblick in mögliche Szenarien zur Reduzierung von Autoverkehr und -lärm sowie zur Erhöhung der Aufenthaltsqualität in diesem Quartier zu geben. Auf einem Weg vom Altstadtkern durch einen beispielhaften, neuartigen Straßentyp und eine innerstädtische Bundesstraße wurde der räumlich-programmatische Umgang mit Verkehr in Stuttgart aufgezeigt und diskutiert. Die Fallstudie Leonhardsplatz wurde hierbei eingeordnet, um den Status quo als Grundlage von Experimenten offenzulegen. Mittels VR- und AR-Anwendungen (vgl. Kapitel AP 1.2) wurden die Auswirkungen einer Reduzierung des Autoverkehrshabens erlebbar gemacht. Zusätzlich beleuchtete das Team der Bauphysik akustische Aspekte (vgl. TP2). Die Teilnehmenden erlebten auf dem kurzen Weg vom Treffpunkt am Hans-im-Glück-Brunnen über die Eberhardstraße und die Hauptstätter Straße (B14) zum Leonhardsplatz ganz unterschiedliche akustische Szenarien der Stadt. Hierbei wurde das Konzept „Soundwalk“ (entsprechend DIN ISO/TS 12913-2 [11]) vorgestellt. Durch entsprechende Hinweise rückten auf dem Spaziergang die sonst nur peripher wahrgenommenen Geräusche zumindest zeitweise in den Mittelpunkt der Wahrnehmung. Am Leonhardsplatz befragte das Team die Teilnehmenden zur akustischen Wahrnehmung der dortigen Umgebung, um die gegenwärtige "Sound"-Situation vor Ort zu analysieren. Im Vorfeld wurden entsprechende Fragebögen erstellt. Da die Befragungen stationär an einem Ort stattfanden, wurden die "Soundwalks" eher als „Sound Perception“ für diesen Ort betrachtet. Eine akustische Kamera zeigte den Teilnehmenden, wie Schallquellen (in der Regel vorbeifahrende Fahrzeuge) lokalisiert und deren Geräusche visualisiert werden können.



Abbildung 13: Erläuterung stadtplanerischer Szenarien zur Umgestaltung des Leonhardsplatzes (Eigene Darstellung)



Abbildung 14: Visualisierung von Lärm im öffentlichen Raum (Eigene Darstellung)



Abbildung 15: AR-Intervention am Leonhardsplatz (Eigene Darstellung)

IBA'27-Festival:

Zusätzlich war das Forschungsprojekt am 20. und 21.07.23 Teil des IBA'27-Festivals. Auch hier wurde einer interessierten Öffentlichkeit gezeigt, wie mit digitalen Tools (AR und VR) der Mehrwert einer Reduzierung des Autoverkehrs erlebbar gemacht werden kann. Ein Stadtpaziergang und Soundwalk wurden nicht angeboten, ansonsten entsprachen der Aufbau und das Angebot an beiden Tagen im Wesentlichen dem der Urban Future Konferenz.



Abbildung 16: Infostand vor dem Züblin-Parkhaus (links) und Vorführung der akustischen Kamera (rechts) beim IBA-Festival

Weitere Veröffentlichung:

Nach Projektabschluss ist es geplant, einen Fachbeitrag in einem Sonderheft im Magazin „Transforming Cities“ zum Thema „Urbane Transformation“ zu veröffentlichen. Das Heft

sichtet sich vorrangig an Praktiker:innen in Städten und Kommunen. Die Veröffentlichung ist für 2025 geplant.

II.1.2 TP2: Schallschutz bei Fassaden im innerstädtischen Raum

Im Bereich Akustik wurde das Themengebiet verändert bzw. erweitert. Ursprünglich war es geplant, hauptsächlich die tieffrequente Schalldämmung von Fassadenbauteilen bis hin zur Analyse der tatsächlich im Projektquartier vorliegenden Außenlärm-Situation und den daraus resultierenden Innenpegeln zu betrachten. Eine 6-spurige Hauptverkehrsstraße (mit ca. 60.000 Kfz/Tag) direkt hinter der Leonhardskirche verursacht einen relativ hohen Verkehrsglärmpegel im untersuchten Stadtgebiet, was zu einer Beeinträchtigung der Aufenthaltsqualität im Gebiet führt.

II.1.2.1 AP 2.1: Schalltechnische Untersuchung der Außenlärmsituation im Projektquartier

Zuerst erfolgte eine messtechnische Bestandsaufnahme der Außenlärm-Situation im Quartier im Rahmen einer Begehung mit den Projektbeteiligten. Dabei wurden sowohl Messungen mit einem Schallpegelmesser (XL 2) durchgeführt, als auch Aufnahmen mit einer akustischen Kamera (SoundCam) erstellt. Die Visualisierung der Lärmquellen - insbesondere des rollenden Verkehrs mittels akustischer Kamera diente auch dazu, die anderen Forschungsdisziplinen für den Bereich Akustik zu sensibilisieren. In Abbildung 17 ist die Aufnahme von vorbeifahrenden Fahrzeugen mittels akustischer Kamera beispielhaft dargestellt. An einigen Orten, an denen Aufnahmen mit der akustischen Kamera erstellt wurden, erfolgten zusätzlich auch gehörrichtige Aufnahmen des Außenlärmpegels mit einem tragbaren Messgerät (SQuadriga II). Die spätere Wiedergabe dieser Aufnahmen mittels Kopfhörer entspricht sehr gut dem tatsächlichen Höreindruck vor Ort und kann beispielsweise für Hörversuche oder Simulationen verwendet werden. Zusätzlich wurde im Nachgang eine fachliche Analyse der bestehenden Lärmkartierungen des Stadtgebiets durchgeführt.

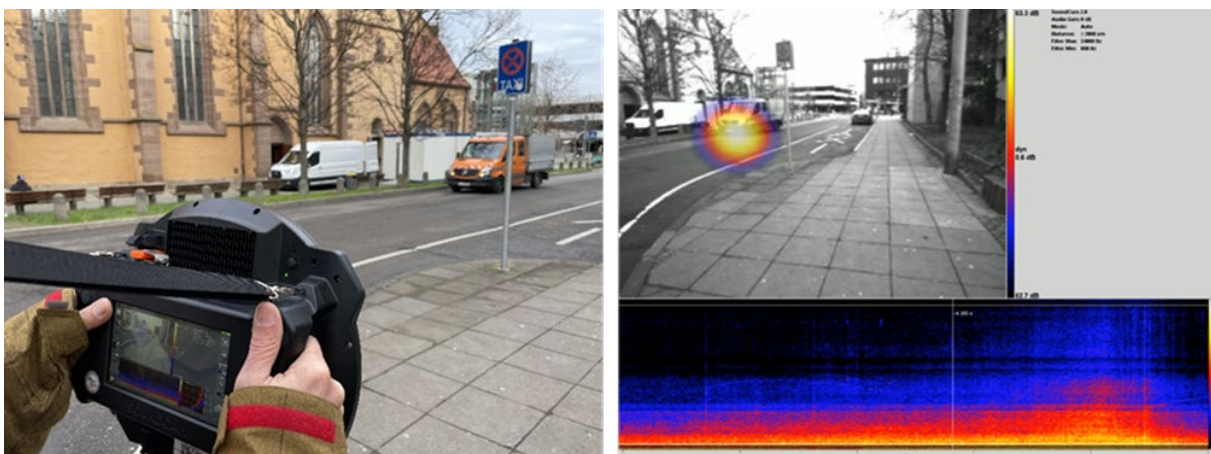


Abbildung 17: Aufnahme von vorbeifahrenden Fahrzeugen mittels akustischer Kamera (Eigene Aufnahmen)

Diese Messungen und Aufnahmen stellen immer nur eine Momentaufnahme der Außenlärmsituation dar. Um auch die zeitlichen Schwankungen des Lärmspektrums zu erfassen, sollten Langzeitmessungen im Quartier erfolgen. Dazu wurde ein so genannter

Lärmsensor (siehe Abbildung 18) verwendet. Die Lärmsensoren wurden ursprünglich auf Basis von MEMS-Mikrofonen im Rahmen eines Citizen-Science-Projekts entwickelt. Die HFT-Akustikgruppe war an diesem Projekt beratend und mit verschiedenen Vergleichsmessungen beteiligt, um die messtechnische Qualität der Sensoren sicherzustellen. Ziel war es, möglichst einfache, kostengünstige (< 100 €) und zuverlässige Sensoren für die Erfassung von Außengeräuschen zu entwickeln. Die Sensoren wurden und werden kontinuierlich weiterentwickelt. So konnten beispielsweise die ersten Versionen nur Einzahlwerte erfassen, während die aktuellen Sensoren auch frequenzabhängige Werte im Bereich von 20 Hz bis 20 kHz ermitteln können. Zusätzlich wurden beispielsweise auch die Wetterfestigkeit der Mikrofone und die Dauerhaftigkeit der Komponenten schrittweise verbessert. Insgesamt konnte durch die Auswahl geeigneter Bauteile sowie durch Software-Anpassungen des Lärmsensors eine gute Übereinstimmung zu kommerziellen Klasse 1 Messgeräten erreicht werden.

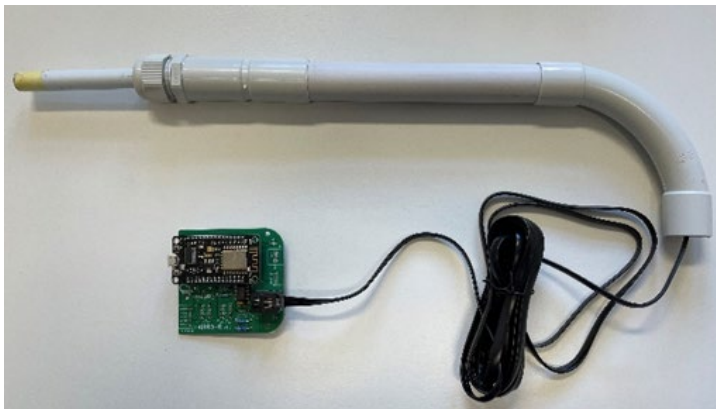


Abbildung 18: Lärmsensor mit Steuerungsplatine (Eigene Aufnahme)

Üblicherweise werden die Lärmsensoren an einer Hausfassade oder an einem Balkongeländer angebracht. Eine (Außen-)Steckdose dient zur Stromversorgung und die Messdatenübertragung an das Sensor-Netzwerk erfolgt über das (i.d.R. meist vorhandene) heimische WLAN-Netz. Aktuell sind gut 200 Lärmsensoren vorwiegend in Deutschland, aber auch in anderen europäischen Ländern verteilt. Die Messergebnisse der verschiedenen (aktiven) Lärmsensoren werden als Einzahlwerte (nahezu) in Echtzeit online gestellt und können z.B. über die Internet-Plattformen „Sensor.Community“ [12] (siehe Abbildung 19) und „laerm.citysensor“ [13] abgerufen werden.

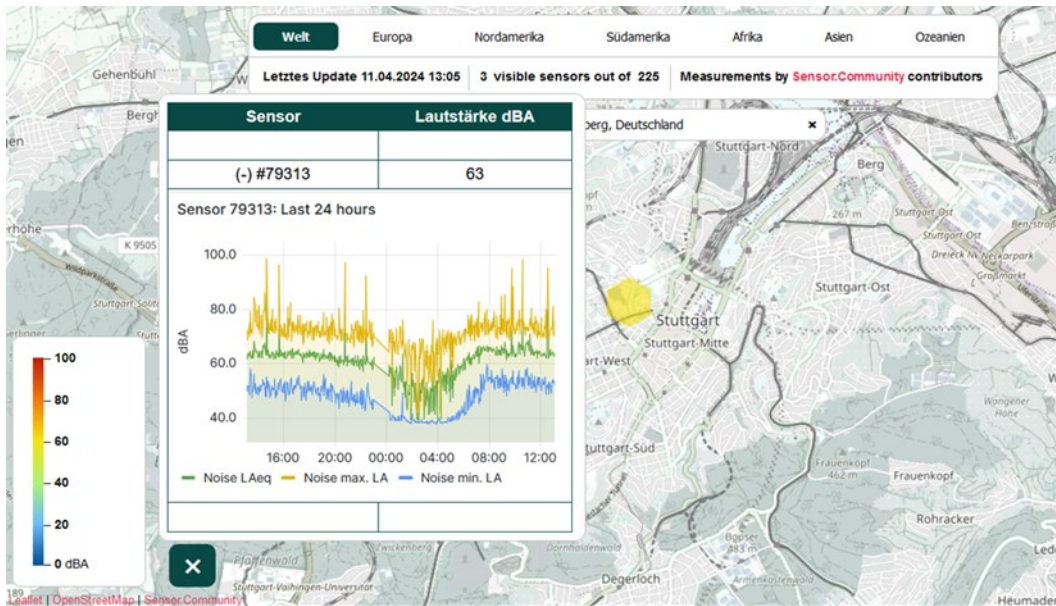


Abbildung 19: Karten-Darstellung von der Homepage „sensor.community“ mit Einzahl-Messwerten von einem Lärmsensor in Stuttgart (Eigene Aufnahme)

Für die Langzeit-Messungen des Forschungsvorhabens wurde ein Lärmsensor an der Fassade des Züblin-Parkhauses (gegenüber der Leonhardskirche) angebracht (siehe Abbildung 20) und über einen Zeitraum von insgesamt rund zwei Monaten (im Juli / August 2023 und im November / Dezember 2023) rund um die Uhr betrieben.



Abbildung 20: Fassade des Parkhauses mit Position des Lärmsensors (roter Punkt) (Eigene Aufnahme)

Da im Parkhaus kein Stromanschluss und kein ausreichend starkes WLAN-Signal zur Verfügung standen, mussten hierfür Alternativen gefunden, der Lärmsensor entsprechend modifiziert und erprobt werden. Die Anbindung an das Internet erfolgte mit einem mobilen WLAN-Router, die Stromversorgung von Sensor und Router mit zwei größeren Powerbank-Akkus (mit einer Kapazität von je 50.000 mAh). Damit war ein autarker Betrieb für vier Tage möglich. Eine Stromversorgung über Solarpaneele konnte u.a. wegen möglichem

Vandalismus (das Parkhaus ist öffentlich zugänglich) nicht realisiert werden. Für die Steuerungsplatine, den Router und die Akkus war zusätzlich noch ein Wetterschutz erforderlich. Die Komponenten wurden in einen wasserdichten Transportkoffer als Schutzgehäuse eingebaut, aus dem nur der vordere Teil des Mikrofons (mit Schaumstoff-Windschirm) herausschaute. Der Lärmsensor-Koffer wurde an die Parkhaus-Brüstung montiert (siehe Abbildung 21) und mit einer Kette gesichert.



Abbildung 21: Lärmsensor im Schutzgehäuse mit mobilem WLAN-Router und Stromversorgung über zwei Powerbank-Akkus an der Parkhaus-Brüstung (Eigene Aufnahme)

Von den in das Sensor-Netzwerk eingebundenen aktiven Lärmsensoren werden standardmäßig die Einzahl-Messwerte L_{Aeq} (A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel), L_{Amax} (A-bewerteter Maximalschallpegel) und L_{Amin} (A-bewerteter äquivalenter Minimalschallpegel) mit einem recht langen Zeitintervall von 145 s auf „sensor.community“ und „laerm.citysensor“ online gestellt. Die Messergebnisse der jeweiligen Lärmsensoren sind öffentlich abrufbar.

Bei der Konfiguration der Lärmsensoren ist es aber auch möglich, die frequenzabhängigen Werte von 20 Hz bis 20 kHz in kürzeren Zeitintervallen - im vorliegenden Fall in Intervallen von 5 s - zu erfassen und an eine sog. Influx-Datenbank zu senden. Diese Datenbank ist derzeit noch nicht öffentlich zugänglich. Sie konnte jedoch zur internen Speicherung der frequenzabhängigen Daten des Lärmsensors im Projektquartier verwendet werden. Damit ist beispielsweise die Darstellung der Messwerte eines Tages oder auch eines kürzeren Zeitraums als Pegel-Zeit-Verlauf und Spektrogramm möglich. Für einige ausgewählte Messtage des Lärmsensor-Erfassungszeitraums wurden die frequenzabhängigen Messwerte von 20 Hz bis 20 kHz exportiert und für weitere Auswertungen aufbereitet. Aus den Messdaten wurden unterschiedliche standardisierte Außenlärm-Größen - L_{AFmax} , L_{Am} , L_{day} , $L_{evening}$, L_{night} sowie L_{DEN} - bestimmt, um daraus die zu erwartenden Innenpegel in Abhängigkeit von der Schalldämmung der Fassade zu berechnen. Mit den genannten

Außenlärm-Größen werden verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt, z.B.: die A-Bewertung, das Hörempfinden des menschlichen Ohrs, der maximal vorhandene oder der gemittelte Pegel sowie bestimmte Zeiträume eines Tages.

Bei den Messungen am Parkhaus ergab sich einerseits ein kontinuierlicher erhöhter Pegel aufgrund der nahegelegenen sechsspürigen Hauptverkehrsstraße. Andererseits werden aber auch Spitzenpegel von fast 90 dB(A) beim Läuten der Kirchenglocken der gegenüberliegenden Leonhardskirche, vor allem um 12 Uhr und um 19 Uhr, sowie auch bei Einsatzfahrten von Feuerwehrfahrzeugen mit Martinshorn der nahegelegenen Feuerwache 1 gemessen. Das Läuten der Kirchenglocken zu anderen vollen Stunden während eines Tages ist im Pegel-Zeitverlauf auch erkennbar, allerdings mit deutlich weniger ausgeprägten Pegelspitzen.

II.1.2.2 AP 2.2: Berechnung von Innenpegeln auf Basis von Langzeitmessungen

Um zum Außenpegel zeitgleich auch den Innenpegel messtechnisch ermitteln zu können, wurden zusätzlich an einer zweiten Messsituation an einem Bürogebäude der HFT Stuttgart in der Schlossstraße zwei Lärmsensoren angebracht. Ein Sensor wurde außen vor dem Fenster im 1. OG angebracht, ein zweiter im Innenraum. Eine solche Anordnung war am Parkhaus im Projektquartier aufgrund der offenen Fassade nicht möglich.

In Abbildung 22 sind beispielhaft für 24 Stunden die Ergebnisse der Messungen mit den Lärmsensoren für die Messsituation 2 dargestellt. Im oberen Bild ist das Außengeräusch aufgrund des reduzierten Straßen- und Straßenbahnverkehrs mit einer deutlichen Absenkung in der Zeit von 0.00 Uhr bis 5.00 Uhr zu erkennen. Der Mittelungspegel liegt im Tagzeitraum bei $L_{A,eq} = 65$ dB, im Nachtzeitraum bei ca. $L_{A,eq} = 55$ dB. Die einzelnen Spitzen mit Maximalpegeln bis 85 dB sind vermutlich auf Warnsignale von vorbeifahrenden Rettungsfahrzeugen zurückzuführen. Im Spektrogramm, das den zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrums abbildet, ist zu erkennen, dass die wesentlichen spektralen Anteile des Straßenverkehrs (A-bewertet) hier im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 4 kHz liegen.

Im unteren Bild von Abbildung 22 sind die Innenpegel dargestellt. Zeiten mit relativ hohen Pegeln (z.B. vor 10.00 Uhr, gegen 12.30 Uhr, 16.20 Uhr) ergeben sich durch die zeitweilige Nutzung des Raumes als Besprechungsraum. Im Nachtzeitraum fallen die Raumpegel auf $L_{A,eq} = 30 - 35$ dB ab. Hier werden die Pegel durch einen Server, der im Vorraum des Besprechungsraumes steht, bestimmt. Dieses Grundgeräusch wird durch einen, vor allem nachts zu erkennenden, kontinuierlichen Pegel mit einem Maximum in der 630 Hz Terz gekennzeichnet. Spektral ergeben sich die höchsten A-bewerteten Pegel im Innenraum aufgrund der Übertragung aus dem Außenraum im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz sowie zwischen 800 Hz und 2 kHz. Der tieffrequente Anteil ist dabei vermutlich auf die geringe Schalldämmung des Fensters (Zweifach-Fenster mit einer Vakuumisolier-

glasscheibe) in diesem Frequenzbereich zurückzuführen, der mittel- und hochfrequente Anteil dagegen auf das Anregespektrum des Außenlärms.



Abbildung 22: Am 05. und 06.02.2024 gemessene Außenpegel (Bild oben) und Pegel im Innenraum (Bild unten). Die A-bewerteten Schalldruckpegel (Max., Min. und L_{eq} Werte) sind jeweils oben dargestellt, das zugehörige Spektrogramm dieser Werte ist darunter (zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung)

Aufgrund der Bestrebungen, das Parkhaus in ein Wohnquartier zu überführen, können aus den am Messort 1 gemessenen Außenpegeln mit den normativ gesetzlich vorgeschriebenen erforderlichen Schalldämm-Maßen der Außenbauteile die zu erwartenden Innenpegel berechnet werden. Mit den beispielsweise am 27.07.2023 mit dem Lärmsensor gemessenen Außenlärmspektren kann der maßgeblichen Außenlärmpegel von $L_a = 67,8$ dB bestimmt werden. Mit den Vorgaben nach DIN 4109-1 [14] für Wohnräume (erf. $R'_w = L_a - 30$ dB) ergibt sich ein erforderliches bewertetes Schalldämm-Maß von erf. $R'_w \geq 38$ dB. Dabei wurde ein hypothetischer Wohnraum angenommen mit einer Fassadenfläche von 10 m^2 , einer Raumtiefe von $3,125 \text{ m}$ ($K_{AL} = 0$ dB) und einer äquivalenten Absorptionsfläche von $A = 10 \text{ m}^2$. Für die Fassade wurde eine massive Außenwand sowie eine Mehrscheiben-Isolierverglasung angesetzt, deren bewertetes Schalldämm-Maß diese Anforderung gerade so erfüllt. Der sich aus dem maßgeblichen Außenlärmpegel L_a und dem bewerteten Bau-Schalldämm-Maß der Fassade ergebende Innenpegel liegt dementsprechend bei $L_i = 29,8$ dB. Mit den spektral und

zeitlich ermittelten Außenlärmpegeln und den Terzwerten des Schalldämm-Maßes der Fassade kann nun auch frequenzabhängig, z.B. über den Tagzeitraum, der Innenpegel bestimmt werden. Die Messwerte des Schalldämm-Maßes des Fensters und der Wandkonstruktion im Frequenzbereich von 50 Hz - 5 kHz wurden auf den mit dem Lärmsensor gemessenen Frequenzbereich von 20 Hz - 20 kHz extrapoliert. In nachfolgender Abbildung 23 sind der A-bewertete ermittelte Außenlärmpegel sowie das Schalldämm-Maß der Fassade dargestellt.

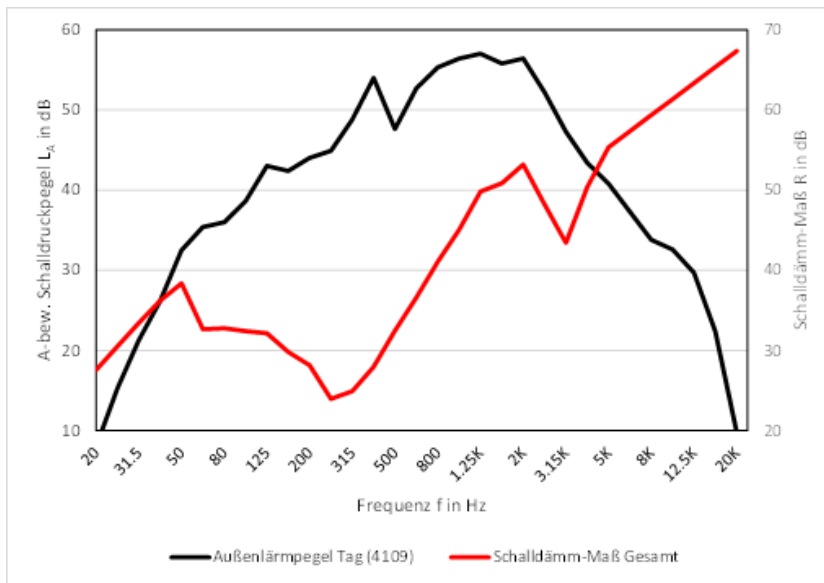


Abbildung 23: Über den Tagzeitraum gemittelter A-bewerteter Außenlärmpegel (schwarz, linke Achse) und Schalldämm-Maß der Fassade (rot, rechte Achse)

In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die größten Differenzen zwischen Außenlärm und Schalldämm-Maß, diese entsprechen den zu erwartenden Innenpegeln, im Frequenzbereich zwischen 160 Hz bis 1 kHz auftreten. Aus dem maßgeblichen Außenlärmpegel und der Anforderung an das Schalldämm-Maß ist ein A-bewerteter Innenpegel von im Mittel $L_i = 27$ dB zu erwarten. Die tatsächliche Schwankung des A-bewerteten Innenpegels aufgrund der zeitlichen und spektralen Unterschiede im Außenlärm ist in nachfolgender Abbildung 24 dargestellt. Hier zeigt sich, dass im Nachtzeitraum die A-bewerteten Innenpegel meist zwischen $L_i = 10$ dB und 20 dB schwanken, während tagsüber Pegel von 20 dB bis 30 dB zu erkennen sind. Gleichzeitig wird deutlich, dass aufgrund einzelner Spitzen beim Außenlärm tags aber auch nachts deutlich höhere Pegel auftreten können.

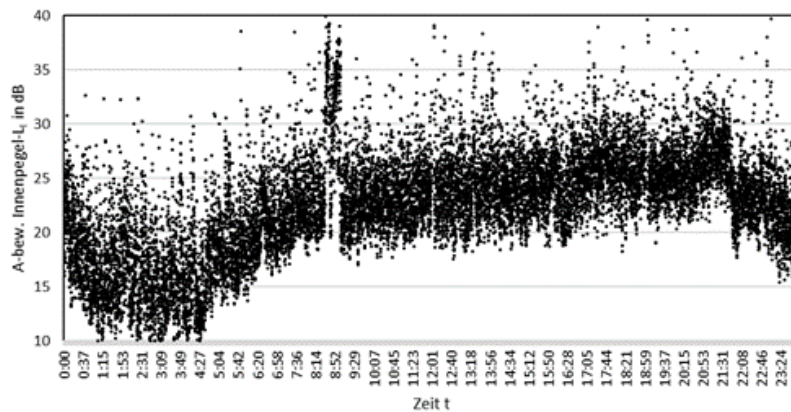


Abbildung 24: A-bewerteter Innenpegel über einen Tag berechnet aus den gemessenen Außenlärmspektren und dem frequenzabhängigen Schalldämm-Maß der Fassade

Die sich aus Abbildung 24 ergebende Verteilung des A-bewerteten Innenpegels ist in Abbildung 25 getrennt für den Tag- und Nachtzeitraum als Histogramm dargestellt.

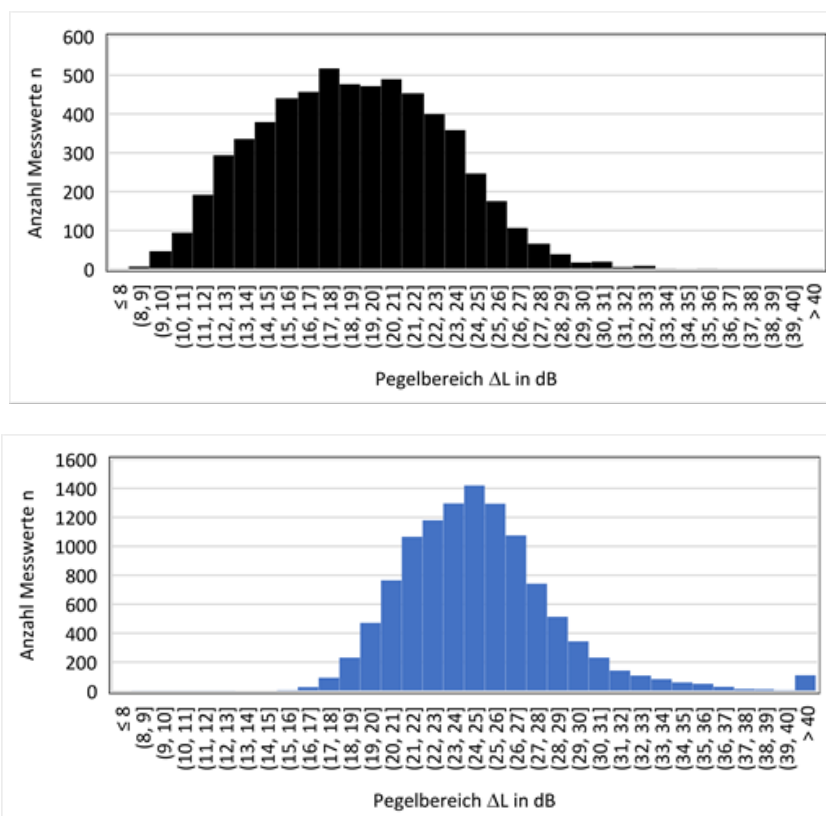


Abbildung 25: Histogramme des A-bewerteten Innenpegels für den Nachtzeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr (oben) und für den Tagzeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr (unten)

Wie zu erwarten, ergeben sich Verläufe, die ähnlich einer Gaussverteilung sind. Für den Nachtzeitraum von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr liegt dabei der am häufigsten auftretende Pegel bei 17 dB und für den Tagzeitraum bei 24 dB. Tagsüber treten dabei jedoch auch relativ häufig A-bewertete Innenpegel deutlich über 30 dB auf. Aufgrund der Vorgabe der DIN 4109-1 kann im untersuchten Fall mit einem über den Tagesverlauf energetisch gemittelten A-bewerteten Innenpegel von $L_i = 27$ dB gerechnet werden. Aus den spektral und zeitabhängig

berechneten Innenpegeln ergibt sich ein Wert von $L_i = 28,4$ dB. Aus dem zeitlich gemittelten Außenlärm und dem frequenzabhängigen Schalldämm-Maß der Fassade würde sich dagegen ein Innenpegel von $L_i = 29,9$ dB ergeben.

Beim Messort 2 (Schlossstraße) konnte, wie zuvor beschrieben, der Außen- und Innenpegel parallel gemessen werden. Das Schalldämm-Maß der Fassade (Fenster und massives Mauerwerk mit $m' > 400$ kg/m²) wird dabei durch die Verglasung (Zweifach-Fenster mit einer Vakuumisolierglasscheibe) bestimmt. Bei hohen Außenlärmpegeln kann aus den gemessenen Pegeldifferenzen auf die Schalldämmung der Fassade bzw. der Fenster geschlossen werden. Im nachfolgender Abbildung 26 sind für den Zeitraum 8.30 Uhr bis 11.30 Uhr die A-bewerteten Außen- und Innenpegel sowie die aus den dazugehörigen Spektren ermittelten bewerteten Schalldämm-Maße dargestellt.

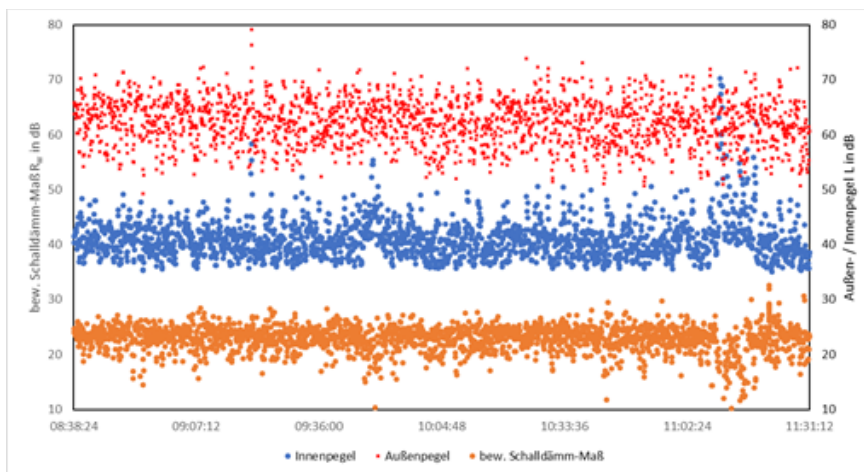


Abbildung 26: Gemessene A-bewertete Außen- und Innenpegel in der Schlossstraße und aus diesen Messungen ermittelten scheinbare bewertete Schalldämm-Maße

Bei relativ hohen Grundgeräuschen im Innenraum (zusätzliche Nutzung des Raumes ab 11.10 Uhr zu einer Besprechung) und geringem Außenlärm sind die berechneten bewerteten Schalldämm-Maße natürlich nicht verwendbar. Bei höheren Außengeräuschen ergeben sich bewertete Schalldämm-Maße von $R_w = 25$ bis 30 dB. Diese sind für unterschiedliche Messzeiten in nachfolgender Abbildung 27 dargestellt.

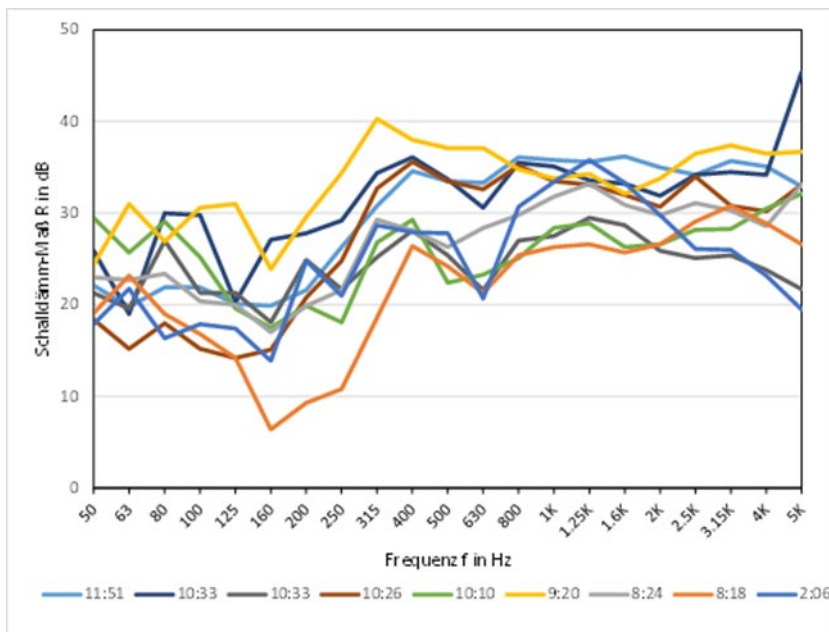


Abbildung 27: Verlauf des Schalldämm-Maßes über der Frequenz, ermittelt aus den gemessenen Außenlärm- und Innenlärmspektren zu unterschiedlichen Zeiten

Aufgrund des hohen Grundgeräuschs im Besprechungsraum, unter anderem durch den im Vorraum stehenden Server, ergibt sich oberhalb von 500 Hz nicht der erwartete Anstieg des Schalldämm-Maßes. Die insgesamt geringe Schalldämmung ist hauptsächlich auf den im Rahmen einer denkmalgerechten Sanierung durchgeführten Austausch der Fensterscheiben zurückzuführen. In Verbindung mit den vorhandenen (alten) Fensterrahmen (Holzrahmen mit einer nachträglich eingebauten umlaufenden Dichtung) wird eine geringe Schalldämmung bei höheren Frequenzen vermutet.

II.1.2.3 AP 2.3: Einfluss von psychoakustischen Effekten

Eine weitere Fragestellung, die beantwortet werden sollte, ist, ob diese A-bewerteten Innenraumpegel, für die es Höchstanforderungen gibt, auch mit der empfundenen Lästigkeit der Geräusche übereinstimmen. Um den Einfluss von Verkehrslärm auf die empfundene Belästigung zu bewerten, wurden Hörversuche durchgeführt [15]. Geräuschmessungen von 14 Vorbeifahrten unterschiedlicher Verkehrsmittel (Auto, Tram, LKW) wurden mit gekipptem und offenem Fenster im Innenraum aufgenommen und im Hörversuch nach [16] insgesamt 19 Teilnehmenden (9 Frauen, 10 Männer) im Alter von 20 bis 60 Jahren vorgespielt. Jedem Teilnehmenden wurde gesagt, man solle sich vorstellen, dass man im eigenen Wohnzimmer sitze und sich entspanne. Die Teilnehmenden wurden dann gebeten, die verschiedenen Hörbeispiele auf einer Skala von 0 (überhaupt nicht) bis 10 (extrem) hinsichtlich der Lärmbelästigung zu bewerten (siehe *Abbildung 28*).

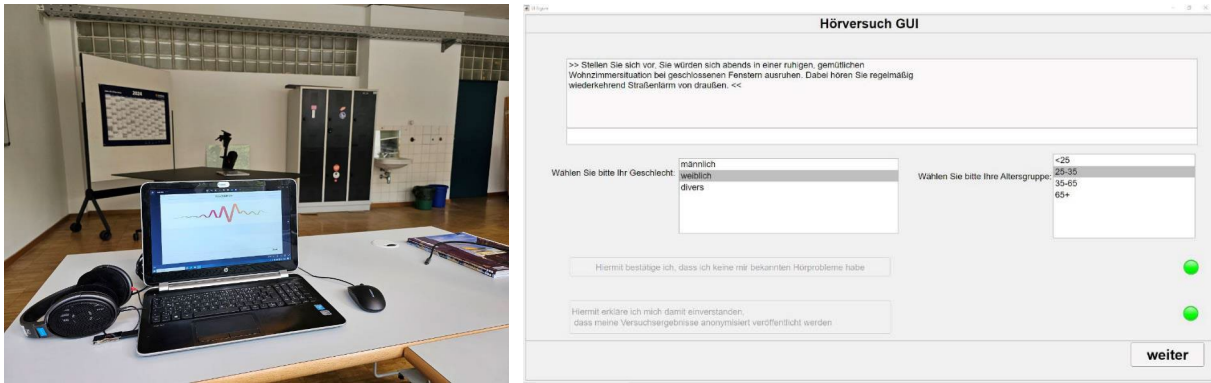


Abbildung 28: Hörversuche – Audio Set-up (links), digitaler Fragebogen (rechts)

Abbildung 29 zeigt die mittlere Lästigkeit der Innengeräusche und die A-bewerteten Pegel.

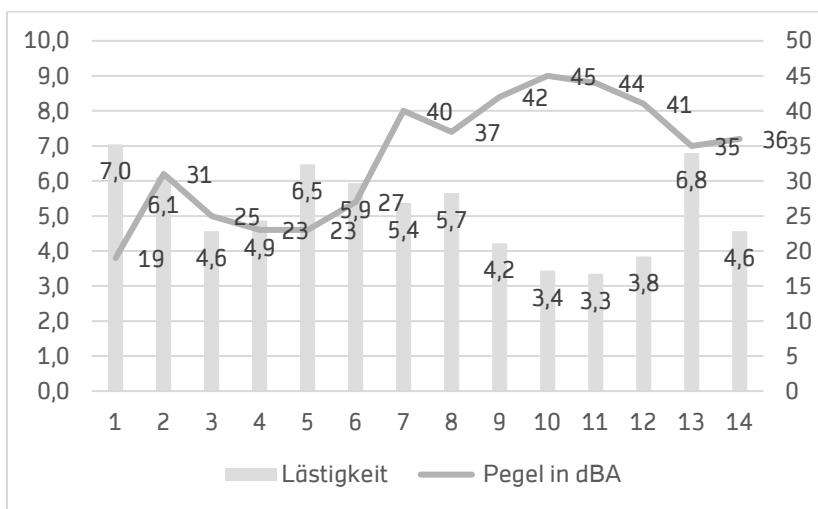


Abbildung 29: Verlauf der Lästigkeit (linke Achse) und der A-bewerteten Pegel im Innenraum (rechte Achse) für die 14 Hörbeispiele

Hier kann sofort gesehen werden, dass nur in etwa der Hälfte der Fälle die A-bewerteten Pegel der Lästigkeit folgen. Diese Aussage unterstützt die Vermutung, dass es sehr wichtig ist, durch weitere Untersuchungen neue schalltechnische Anforderungen zu entwickeln, die psychoakustische Größen mitberücksichtigen.

II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der wesentliche Kostenfaktor war die Beschäftigung des wissenschaftlichen Personals und der wissenschaftlichen Hilfskräfte. Um Teilnehmende für die experimentellen Studien im Quartier zu gewinnen, wurden Flyer gedruckt und die Teilnahme mit Incentives belohnt. Die Kosten der Lärmsensoren waren sehr gering. Die anderen verwendeten Akustik-Messgeräte standen bereits zur Verfügung.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Forschungsvorhaben stellte die Chance dar, Kommunen bei neuen und partizipativ-gestützten Transformationsprozessen zu begleiten, die durch soziale und technische Innovationen unterstützt werden. Ziel war es, modellhafte und wirtschaftlich tragfähige Entwicklungsperspektiven aufzuzeigen, die aber insbesondere für die Kommunen keine wirtschaftlichen Gewinnaussichten darstellen. Vielmehr konnte der Umgang mit neuen Kommunikationsmitteln, -wegen und Messmethoden erprobt werden, die einen Wandel von Mobilitätsverhalten und -mustern der Menschen vor Ort fördern sollen. Das gewonnene Praxis- und Erfahrungswissen soll auf andere Standorte übertragen werden. Der Einsatz technischer Innovationen unterstützt diesen partizipativen Prozess.

Die Umsetzung in einem exemplarischen Quartier und die Durchführung von digitalen und realen Interventionen zur Umgestaltung des Stadtraums erfordern eine intensive Forschungsbegleitung im interdisziplinären Team und die Einbindung der relevanten Stakeholder. Dies wäre ohne Zuwendung nicht möglich gewesen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse zum Schutz gegen Außenlärm wurden im Normungsfachausschuss zur DIN 4109 (Schallschutz im Hochbau) zur Aufnahme diskutiert. Somit kann hoffentlich der Schutz der Bürger:innen vor Schall sichergestellt werden.

Tabelle 1: Verwertungsplan

Teilprojekt	Verwertung
-	Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse haben dazu beigetragen, die Sichtbarkeit der HFT in der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu erhöhen, bspw. durch Beiträge aus den dem Projekt bei internen und externen Veranstaltungen, und die Expertise in den beiden beteiligten Forschungsschwerpunkten auszubauen.
1	Einbindung in Stadtentwicklungsvorhaben <ul style="list-style-type: none">- integriertes städtebauliches Entwicklungskonzept Leonhardsvorstadt- Stadterneuerung Bohnenviertel/ Leonhardsviertel, Stuttgart 33 Katharinenplatz- Projekte „Neue Mitte Leonhardsvorstadt“ und Planungen im öffentlichen Raum rund um das „Haus für Film und Medien Stuttgart“
1	Öffentliche Vermittlung von Forschungsinhalten und Zwischenergebnissen im Rahmen der „Stuttgarter Mobilitätswoche“
1	Forschungs-/Lehrtransfer in Studien-/Entwurfs-Projekten des Bachelor- und Masterstudienganges Stadtplanung

1	Öffentlichkeitsarbeit und Transfer auch gemeinsam mit anderen Forschungsprojekten der HFT Stuttgart, insbesondere MobiQ, Reallabor Klima, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
1	Wirtschaftlich: Forschungsergebnisse werden als Open-Source-Projekt über das Transferportal der HFT Stuttgart auch KMUs zugänglich gemacht.
1	Wissenschaftlich/technisch: Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse soll unsere Forschung dazu beitragen, Hinweise darauf zu erhalten, inwiefern das Thema „autoarmes Quartier“ durch den Einsatz unterschiedlicher virtueller Tools (VR, AR, etc.) besser erlebbar und damit vorstellbar wird und welche Auswirkungen sich auf die Akzeptanz der Stakeholder ergeben.
1	Nutzung der entwickelten AR-Umgebung in der Lehre z.B. im Masterstudiengang Photogrammetry & Geoinformatics und im Bachelorstudiengang Informationslogistik
1	Veröffentlichung von Ergebnissen auf www.acceptancelab.com
1	Beitrag in der Zeitschrift transforming cities
2	Die Ergebnisse zum Schutz gegen Außenlärm wurden im Normungsfachausschuss zur DIN 4109 (Schallschutz im Hochbau) zur Aufnahme diskutiert

II.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

An der Hochschule Erfurt läuft aktuell das Projekt „XR-Partizipationsräume zur erweiterten sozialen Teilhabe in urbanen Transformationsprozessen“ (2021-2025). Hier werden ebenfalls AR- und VR-Tools als digitale Partizipationsinstrumente verwendet. Allerdings steht hier nicht die Akzeptanz der dargestellten Maßnahmen im Fokus, sondern die Frage, mit welchen partizipativen Angeboten eine möglichst breite Öffentlichkeit erreicht werden kann. Das Projekt verdeutlicht ebenfalls die Nützlichkeit von VR- und AR-Anwendungen in der partizipativen Stadtentwicklung und bestätigt den Mehrwert für die Vorstellbarkeit von stadtplanerischen Vorhaben mittels XR-Technologien (Sinning et al., 2023).

II.6 Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

1. Alfakhori, Muhammad; Sardi Barzallo, Juan Sebastian; Coors, Volker (2023): Occlusion Handling for Mobile AR Applications in Indoor and Outdoor Scenarios. *Sensors*, 2023 (9). 15 Seiten. DOI: 10.3390/s23094245
2. Alfakhori, M.; Ort, J. Ruff, A.; Schneider, M.; Silberer, J.: Streetmoves4iCity: Partizipative Stadtraumuntersuchung. Öff. Veranstaltung, IBA'27-Festival; 20.-21.07.2023

3. Alfakhori, M.; Ort, J. Ruff, A.; Schneider, M.; Silberer, J.: Streetmoves4iCity: Mobilitätswende im Quartier. Field Trip bei der Urban Future Konferenz; 23.06.2023
4. Simon-Philipp, C. (2023): Projektpräsentation Streetmoves4iCity. Bei "iCity-Midterm"; 16.11.2023
5. Ort, J. (2023): Projektpräsentation Streetmoves4iCity. Bei "Lipscomb University meets iCity"; 24.05.23
6. Abschlussarbeit „Virtuelle Realität als partizipative Methode zur Erhöhung der Akzeptanz nachhaltiger Mobilität in Stadtquartieren – Eine empirische Studie im Rahmen des Forschungsprojektes Streetmoves4iCity“ von Tobias Reulein im Studiengang Wirtschaftspsychologie (2022)
7. Abschlussarbeit „Zukunft erlebbar machen mit digitalen Tools“ von Jasmina Rückle im Studiengang Wirtschaftspsychologie (2023)
8. Abschlussarbeit „Die persönliche Freiheit der Verkehrsmittelwahl als Einflussfaktor auf die Einstellung zu verkehrsreduzierten Innenstädten“ von Tobias Feck im Studiengang Wirtschaftspsychologie (2023).
9. Abschlussarbeit „Virtuelle und erweiterte Realität als immersive Methoden zur Steigerung der Akzeptanz nachhaltiger Mobilität in Stadtquartieren – Eine empirische Studie im Rahmen des Forschungsprojektes Streetmoves4iCity“ von Joshua Klein im Studiengang Wirtschaftspsychologie (2024)
10. Ort, J. (2024): Projektpräsentation Mobility4iCity. Sitzung Bezirksbeirat Stuttgart-Mitte, 11.03.2024.
11. Ort, J.; Walter, H.; Hefner, B. (2024): Workshops "Stadtraum in Bewegung: Routen der Transformation". Bei "KIT Frühlingsakademie Nachhaltigkeit"; 19.-20.03.2024
12. Ruff, A., Schneider, M., Drechsler, A., Zeitler, B.: Lärmsensoren - Teil 1: Einsatz bei der Umgestaltung von Quartieren, DAGA 2024, Hannover
13. Schneider, M., Ruff, A., Drechsler, A., Zeitler, B.: Lärmsensoren - Teil 2: Berechnung von Innenpegeln aus Dauermessungen, DAGA 2024, Hannover
14. Kirch, J.-P., Zeitler, B., Sharif, M., Fiebig, A.: Wahrnehmung von Verkehrslärm im Innenraum, DAGA 2024, Hannover
15. Müller, P. & Bäumer, T. (2024). Workshop „VR in der Technologieakzeptanz am Beispiel innovativer Mobilitätskonzepte“, „Tag der Forschung“, 18.06.2024
16. Zeitler, B., Schneider, M., Reinhold, S., Ruff, A., Batista Da Cunha, I., Müller-Trapet, M.: Are synthesized indoor noise signals using the sound reduction index of the facade sufficient to predict the annoyance of outdoor noise? Internoise 2024, Nantes
17. Ruff, A., Schneider, M., Drechsler, A., Zeitler, B.: Noise Sensors - Part 1: Usage for the redesign of neighbourhoods, Internoise 2024, Nantes
18. Schneider, M., Ruff, A., Drechsler, A., Zeitler, B.: Noise Sensors - Part 2: Calculation of indoor levels from continuous measurements, Internoise 2024, Nantes

II.7 Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

Anhang 1: Liste der verwendeten Fachliteratur

1. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, KBA, DLR, DIW (2023): Verkehr in Zahlen 2022/2023. Selbstverlag.
2. Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt (2020): Liegenschaftskataster Landeshauptstadt Stuttgart.
3. Johansen, A. G. & Pedersen, C. B. (2019). Gamified participation. Challenging the current participation methods in urban development with Minecraft. Master's Thesis, Aalborg University. https://projekter.aau.dk/projekter/files/305416660/Gamified_participation.pdf.
4. Thiel, S.-K. (2016). Gamers in public participation. In J. Häkkilä (Hrsg.), Proceedings of the 15th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (S. 229–240). New York, NY: ACM.
5. Thiel, S.-K. & Fröhlich, P. (2017). Gamification as Motivation to Engage in Location-Based Public Participation? Progress in Location-Based Services 2016, 399–421. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47289-8_20
6. Tomarchio, L., Hasler, S., Herthogs, P., Müller, J., Tunçer, B. & He, P. (2019). Using an online participation tool to collect relevant data for urban design the construction of two participation exercises. Proceedings of the 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2019, 747–756.
7. Huber, R. A., Wicki, M. L. & Bernauer, T. (2020). Public support for environmental policy depends on beliefs concerning effectiveness, intrusiveness, and fairness. *Environmental Politics*, 29(4), 649–673. <https://doi.org/10.1080/09644016.2019.1629171>
8. Wicki, M. & Kaufmann, D. (2022). Accepting and resisting densification: The importance of project-related factors and the contextualizing role of neighbourhoods. *Landscape and Urban Planning*, 220, 104350. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104350>
9. Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
10. Sinning, H., Brandenburger, Y., Kruse, R. & Rogoll, S. (2023). Partizipative Stadtentwicklung mit XR-Technologien. XR-Partizipationsräume als Beitrag zur erweiterten Teilhabe in urbanen Transformationsprozessen. *Forum Wohnen und Stadtentwicklung*, 2023(2), 88-92.
11. DIN ISO/TS 12913-2: Akustik - Soundscape -Teil 2: Anforderungen an die Datenerhebung und die Dokumentation, 11-2020
12. Homepage, URL: <https://sensor.community/de/>
13. Homepage, URL: <https://laerm.citysensor.de/>
14. DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen, 2018
15. Kirch, J.-P., Zeitler, B., Sharif, M., Fiebig, A.: Wahrnehmung von Verkehrslärm im Innenraum, DAGA 2024, Hannover
16. ISO/TS 15666: Acoustics - Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, 2021