

Untersuchung von Absorptionsgraden und raumakustische Simulation einer Straßenschlucht

Matthäus Jarzabek¹, Korbinian Krapf¹, Steffi Reinhold¹ und Berndt Zeitler¹

¹ Hochschule für Technik Stuttgart, 70174 Stuttgart, Email: steffi.reinhold@hft-stuttgart.de

Einleitung

In innerstädtischen Straßenschluchten wird die Schallausbreitung maßgeblich von den beiden physikalischen Effekten der Reflexion des Schalls an Oberflächen und Beugung des Schalls an Kanten beeinflusst. Die raumakustische Simulation und die Untersuchung der Absorption von Fassadenelementen in städtisch dicht bebauten Gebieten ist Inhalt dieser Arbeit, die das Ziel hat, die physikalischen Effekte der Schallausbreitung in einer Straßenschlucht durch Reflexionen an Fassaden und Beugung an Gebäudekanten, besser zu verstehen. Die hier vorgestellte Arbeit ist der erste Teil einer studentischen Projektarbeit, die im Masterstudiengang Gebäudephysik an der Hochschule für Technik Stuttgart entstanden ist. Der zweite Teil, vorgestellt in einem anderen Beitrag [3], befasst sich mit der Wahrnehmung von Verkehrslärm im Innenraum.

Mit einem raumakustischen Schallteilchenmodell wurde eine vereinfachte Simulation einer zentral gelegenen Stuttgarter Straßenschlucht simuliert. Das erste Ziel ist es die Anregung durch eine Punktschallquelle und der Absorption der Fassaden in die raumakustische Simulation zu berücksichtigen, um ein besseres Verständnis für die Schallausbreitung und die Beurteilung bzw. Optimierung von Lärminderungsmaßnahmen in innerstädtischen Straßenschluchten zu erlangen. Das zweite Ziel ist es zu untersuchen, ob der Straßenverkehr als Linienschallquelle für in-situ Messungen der Absorption geeignet ist und zuverlässige Daten für raumakustische Simulationen liefern kann. Für die Absorptionsmessungen von einem porösen Absorber wurden drei verschiedene Messverfahren mit dem Hallraum nach DIN EN ISO 354 [2], Verfahren der Übertragungsfunktionen nach DIN EN ISO 10534-2 [1] und Local-Plane-Wave (LPW) Methode [5, 4] im Akustik-Labor der Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart durchgeführt. Die Untersuchungen der Absorption im Labor dienen dazu die Eignung von Punkt- und Linienschallquellen für in-situ Messungen nach der LPW-Methode festzustellen, um die Güte/Detailgrad der Simulationen verbessern zu können.

Raumakustik Modell Straßenschlucht

Die raumakustischen Simulationen wurden für einen Teilabschnitt der Schloßstraße von Kienestraße bis Büchsenstraße in Stuttgart erstellt (siehe Abb. 1). Dieser Teilabschnitt der Schloßstraße wird von vier Gebäuden begrenzt. Auf der Nordseite der Straße befinden sich drei Gebäude (Gebäude A, B und C), welche zu dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung gehören. Davon wird Gebäude A anteilig von der HFT Stuttgart

genutzt. Auf der Südseite der Straße befindet sich das Gebäude D, welches eine durchgehende Fassade besitzt. Die Straße ist vierspurig mit zwei Fahrstreifen pro Richtung, die durch zwei Stadtbahngleisen voneinander getrennt sind.



Abbildung 1: Straßenschlucht: 3D-West-Ansicht eines Teilabschnitts der Schloßstraße in Stuttgart [7].

Das Gebäude D, welches sich in mehrere Gebäudeteile mit unterschiedlicher Nutzung aufteilt, hat bauspezifische Details. Dazu zählen eine Durchfahrt in den Innenhof und die unterschiedlichen Höhen der Gebäudeteile. Diese beiden Gebäudemerkmale sind auch in den Simulationsmodellen berücksichtigt. Die vor Ort durchgeführten Messungen der Vorbeifahrten von Fahrzeugen und Schienenverkehr dienen als Grundlage für die verwendeten Schallemissionsquelle in den Simulationen. Diese Emissionsquelle wurde aus mehreren Vorbeifahrten der Stadtbahn erstellt.

Raumakustik

Die Simulationen der Straßenschlucht wurden mit der Software SoundPLAN Raumakustik umgesetzt. Das Raumakustikmodul dieser Software basiert auf einem Schallteilchenmodell, bei dem die Schallwellen als Teilchen dargestellt und deren Flugwege anschließend verfolgt werden. Damit lassen sich frequenzabhängige Schallpegel an vorher festgelegten Empfängerpunkten ermitteln.

Für die raumakustischen Simulationen muss in der Software eine Halle angelegt werden, in der ein Modell der Straßenschlucht erstellt wird. Die Wände und die Decke der Halle sind mit 100%iger Absorption versehen. Die Simulationen der Straßenschlucht wird nur als grobe Darstellung modelliert. Als Vorlage für die 3D-Modelle der Gebäude dient eine Strömungssimulation des Gebiets rund um die Straßenschlucht. Aus den zugrundeliegenden Gelände- und Gebäudedaten wurde das in Abb. 2 gezeigte Simulationsmodell erstellt. Dabei wurden folgende Vereinfachungen angewendet, dass

- die Geländeneigung vernachlässigt wird,
- den Fassaden Absorptionsgrade von Beton zugewiesen werden,
- die Fensterflächen nicht berücksichtigt werden und
- nur eine Punktschallquelle für die Schallerzeugung verwendet wird.

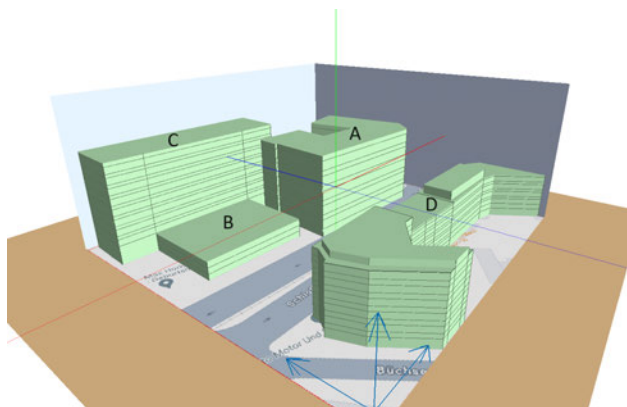


Abbildung 2: Straßenschlucht: 3D-Simulationsmodell eines Teilabschnitts der Schloßstraße in Stuttgart.

Auf Grundlage des 3D-Simulationsmodells wurden neun Varianten erstellt, die sich in der Position der Schallquelle (mitten in der Fahrbahn zu Gebäude A hin) und der absorbierenden Flächen unterschieden. Es wurden drei Höhen für die Schallquelle gewählt. Die Erste befand sich auf 0,6 m ungefähr in der mittleren Höhe für Fahrzeuge. Die zweite Höhe orientierte sich an der Traufkante des Gebäudes D mit 15 m Höhe. Für die dritte Position der Quelle wird die Höhe der Traufkante des Gebäudes A mit 30 m gewählt. Für die drei Schallquellenpositionen wurden jeweils Absorber mit etwa 4 m Spanne auf die mittlere Höhe der Quelle auf allen Gebäuden platziert. Die A-bewerteten Summen Schallpegel werden in einem Abstand von etwa X m vor der Fassade von Gebäude A ermittelt.

Simulationsergebnisse

Anhand der Simulationsergebnisse in Abb. 3 kann erkannt werden, dass die A-bewertete Summenpegel über die Höhe abnehmen, außer in dem Fall wo die Quelle ganz oben ist. Die deutlichste Abnahme ist für die Schallquellenposition auf 0,6 m zu erkennen. Hier sinkt der Pegel insgesamt um ca. 8 dB(A) ab. Das Einbringen von Absorptionsmaterial an Höhen, wo keine Quelle vorhanden ist, hat wenig Einfluss auf die Pegel (± 1 dB in der Fehler-toleranz der Simulation – jedoch hier nicht dargestellt). Im Gegensatz dazu ist der Einfluss größer, wenn Absorber und Quelle auf der gleichen Höhe sind. Die Pegelminderung durch Absorber ist bei der niedrigsten Quelle mit -3 dB am größten und nimmt ab, je höher die Quelle in der Simulation berücksichtigt wird. So betragen die Pegelminderung bei mittlerer Anbringung der Quelle -2 dB(A) und näherungsweise bei höheren Anbringungen der Quelle 0 dB(A).

D.h., dass die Pegel bei niedrigeren Quellen lauter sind, da sich die gesamte Energie in der Straßenschlucht ausbreitet, so dass näherungsweise ein Diffusfeld mit langen

Nachhallzeiten angenommen werden kann. Hingegen werden die Pegel bei höheren Quellen leiser, weil die Energie nach oben aus der Schlucht direkt ausgestrahlt wird. Hier sind nur noch wenige Reflexionen vorhanden, so dass sich das Schallfeld einem Freifeld mit kurzen Nachhallzeiten annähert. Der Hallradius der untersuchten Straßenschlucht liegt bei ungefähr 10 m. Der Pegel bei allen drei Quellen ist im tiefen Frequenzbereich konstant und fällt zu hohen Frequenzen ab.

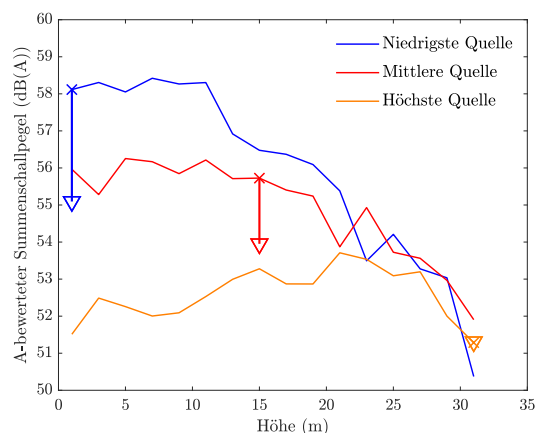


Abbildung 3: Straßenschlucht: A-bewertete Summenschallpegel vor der Fassade von Gebäude A ohne Absorber wenn die Quellen auf den Höhen 1 m (niedrigste), 15 m (mittlere) und 31 m (höchste) platziert sind. Reduzierung der Pegel durch Einbringen von Absorber auf Höhe der Quelle dargestellt durch ∇ .

Bestimmung des Absorptionsgrades Labormessungen

Die Bestimmung des Absorptionsgrades, α , eines 100 mm dicken porösen Absorbers (geringe Oberflächenimpedanz) wurden mit den normativen Verfahren im Hallraum nach DIN EN ISO 354 [2] und Kundtschen Rohr nach DIN EN ISO 10534-2 [1] (siehe Abb. 4) sowie im Hallraum und Freifeldraum mit einem handgehaltenen sphärischen Mikrofonarray (SonoCat) von 4Silence [5] (siehe Abb. 5) für in-situ Messungen durchgeführt.

Die Ermittlung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 354 (Hallraumverfahren) [2] erfolgt durch Nachhallzeitmessungen mit unterschiedlichen Hallraumkonfigurationen in einem ausreichend diffusen Schallfeld. Die Bestimmung des Absorptionsgrades im Kundtsches Rohr erfolgt über das Verfahren mit Übertragungsfunktionen bei senkrechten Schalleinfall einer ebenen Welle nach DIN EN ISO 10534-2 [1].

Die Absorptionsgradmessungen mit der SonoCat wird das lokale Schallfeld mit der LPW-Verfahren angewendet. Das Verhältnis von aktiven Schalleistung, W_{ac} , und einfallender Schalleistung, W_{in} , ergibt den Absorptionsgrad einer Fläche, S , und es gilt

$$\alpha = \frac{W_{in} - W_{refl}}{W_{in}} = \frac{W_{ac}}{W_{in}} \quad (1)$$

wobei W_{refl} die reflektierte Schalleistung ist.

Abbildung 6 zeigt die Absorptionsgrade in Terzbändern aus den drei unterschiedlichen Messverfahren (Hallraum-



Abbildung 4: Poröser Absorber: Messungen im Hallraum nach DIN EN ISO 354 (rechts) und Kundtschen Rohr nach DIN EN ISO 10534-2 (links).



Abbildung 5: Poröser Absorber: Messungen mit der SonoCat im Hallraum (rechts) und im Halbfreifeldraum (links).

verfahren, Verfahren mit Übertragungsfunktionen und LPW-Verfahren). Es ist zu sehen, dass der gemessene Absorptionsgrad im Diffusfeld größer als der Absorptionsgrad bei senkrechten Schalleinfall ist. Aufgrund der unterschiedlichen Messbedingungen im Hallraum und Kundtschen Rohr können diese beiden Verfahren nicht direkt miteinander verglichen werden. Eine Umrechnung des Absorptionsgrades aus senkrechten Schalleinfall ins Diffusfeld kann nach [[1]] vorgenommen werden. Im Gegensatz dazu, weisen die Absorptionsgrade der SonoCat, die sich in einem Abstand von 30 mm zur Absorberoberfläche im Hallraum (Punktschallquelle: unabhängige LS-Positionen in Raumecken) und Halbfreifeldraum (Punktschallquelle: LS in 1,50 m Abstand – orthogonale Schallanregung = 90° zur Absorberoberfläche) befand, im Vergleich zu den Absorptionsmessungen mit den Kundtschen Rohr eine sehr gute Übereinstimmung auf. Die erhöhten tiefrequenten Absorptionsgrade der SonoCat deuten darauf hin, dass die Schallabstrahlung durch den LS-Position einen Einfluss auf die Absorptionsmessung der SonoCat hat.

In Abbildung 7 sind die Differenzen zwischen der winkelabhängigen Absorptionsgraden in 10°-Schritten bei orthogonaler LS-Schallanregung von 90° bis streifender LS-Schallanregung von 0° (1.50 m LS-Abstand zu SonoCat) und Messung im Kundtschen Rohr in Terzbändern dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Messungen mit der SonoCat eine Richtcharakteristik aufweisen. Die winkelabhängige Anregung zeigt, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen eine Erhöhung der Absorptionsgrade (effektiv dickerer Absorber) und bei hohen Frequenzen eine Abnahme der Absorptiongrade (Messunsicherheiten

???) mit kleiner werdenden Winkel zur Materialoberfläche vorhanden ist.

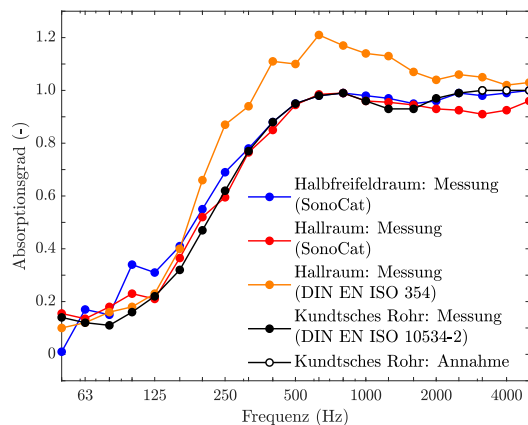


Abbildung 6: Poröser Absorber: Messungen des Absorptionsgrades mit LPW-Methode (SonoCat) im Halbfreifeldraum und Hallraum sowie nach DIN EN ISO 354 [2] (Hallraumverfahren) und DIN EN ISO 10534-2 [1] (Verfahren mit Übertragungsfunktionen - Kundtsches Rohr).

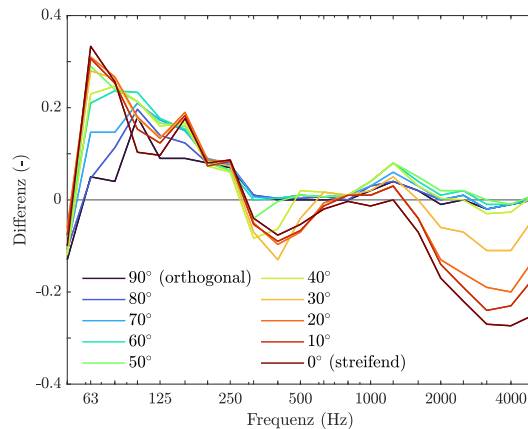


Abbildung 7: Poröser Absorber: Differenz zwischen Messungen des winkelabhängigen Absorptionsgrades mit der SonoCat im Halbfreifeldraum und des Absorptionsgrades im Kundtschen Rohr.

In-situ Messungen

Dadurch dass die LPW-Methode für Messungen des Absorptionsgrades eines porösen Absorbers im Labor gut funktioniert hat, wurden in einem nächsten Schritt in-situ Messungen der Absorption von schallharten Fassadelementen (hohe Oberflächenimpedanz) in einer Straßenschlucht (Freifeld) durchgeführt. Die in-situ Messungen der Absorptionsgrade wurden für schallharte Fassadelemente (Sandstein-Außenwand und Fensterverglasung) des Gebäudes A (siehe Abb. 1 und 2) durchgeführt. Dadurch dass die Messungen der Absorptionsgrade mit der SonoCat eine Richtcharakteristik aufweisen (siehe Abb. 7), wurde anstatt der LS-Anregung (Punktschallquelle) der Verkehrslärm (Linienquelle) als Schallanregung für die Absorptionsmessungen genutzt. Während der Messungen auftretende Verkehrslärm setzte sich aus Vorbeifahrten von Personenkraftwagen, Lastkraftwagen und Stadtbahn zusammen.

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Absorptionsgrade der

Sandstein-Außenwand und Fensterverglasung. In einigen Terzbändern insbesondere bei hohen Frequenzen hatten die Absorptionsgrade von der Sandstein-Außenwand und der Fensterverglasung negative Werte von $-0,01$ bis $-0,06$. Eine negative Absorption kann durch die diffusen Oberflächenreflexionen bei schallharten Materialien verursacht werden, da das LPW-Verfahren diese Oberflächenreflexionen der vom spärlichen Mikrofonarray der SonoCat gestreuten Wellen nicht berücksichtigt. Die stärker auftretende Streuung im hohen Frequenzbereich kann bei geringer Materialabsorption vermieden werden, in dem der Abstand der SonoCat zur Materialoberfläche vergrößert wird [5]. Da negative Absorptionswerte nicht physikalisch sind sowie messtechnische Einschränkungen und Fehler vorhanden waren, wurden diese Absorptionsgrade in Abb. 8 auf null gesetzt.

Um einen Vergleich mit Literaturwerten zu ermöglichen, wurden die gemessenen Terzwerte der Absorptionsgrade der beiden Fassadenelemente zusätzlich in Oktavwerte in Abb. 8 umgewandelt. Für Oktavwerte <2000 Hz sind die gemessenen Absorptionsgrade im Trend ähnlich der Absorptionswerte aus der Literatur. Die Absorptionswerte der in-situ Absorptionswerte über den Frequenzverlauf sind weniger glatt als die Literaturwerte der Absorption. Dies liegt daran, dass für die LPW-Methode eine messtechnische Einschränkung bezüglich der Anzahl der Messpositionen und der Größe der abgetasteten Oberfläche auftreten können. Dem kann entgegengewirkt werden, indem eine ausreichend große Anzahl an Messpositionen und/oder eine große abgetastete Oberfläche gewählt wird, welches zu einer Glättung der Kurve führt [4].

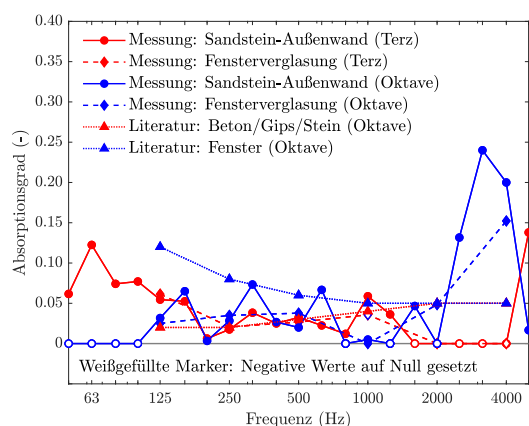


Abbildung 8: Schallharte Absorber: In-situ Absorptionsgrade der Fassade (Außenwand aus Sandstein und Fenster) aus Verkehrslärm anregung im Vergleich mit Literaturwerten [6].

Zusammenfassung und Ausblick

Raumakustischen Simulationen von dicht bebauten Gebieten (Straßenschlucht) mit einem Schallteilchenmodell ergaben, dass für ein Punkt-schallquelle der Pegel in EG-Höhe am lautesten ist und sich um etwa 1 dB pro 4 m in dieser Straßenschlucht reduziert. Die Berücksichtigung von Absorption in der Simulation erzielt eine Verringerung der Pegel um 3 dB auf der Höhe der Quelle im EG jedoch nur 2-0 dB auf der Höhe der Quellen in den OGs. - (Pegel weichen um xx dB vom gemessenen ab)

Die SonoCat (hangehaltenes sphärisches Mikrofonarray) kann im Außenraum für Absorptionsmessungen verwendet werden, auch wenn der Absorptionsgrad des Materials gering ist. Die Verwendung von Verkehrslärm (Linienschallquelle) als Anregung gibt vertrauenswürdige Absorptionswerte und berücksichtigt die winkelabhängige Charakteristik der SonoCat.

Als nächster Schritt ist für die raumakustischen Simulationen mit SoundPlan Raumakustik geplant, das prognostizierten Nachhallzeiten mit Nachhallzeitmessungen in der Straßenschlucht zu validieren, um den Effekt der geometrischen Dämpfung weiter untersuchen zu können. Außerdem sollen weitere Untersuchungen für Absorptionsmessungen mit dem handgehaltenen spärlichen Mikrofonarray (SonoCat) unter Verwendung der LS-Schallanregung von 90° zur Absorberoberfläche im Hallraum erfolgen. Auch soll der Einfluss der hochfrequenten Reflexionen in Abhängigkeit vom Abstand zur schallharten Oberfläche des Materials sowie die ausreichende Größe der Oberfläche und Anzahl der Messpositionen untersucht werden, um eine bessere Messgenauigkeit mit der SonoCat zu erreichen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt *iCity: Intelligente Stadt* wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 13FH9I011A gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH für das BMBF betreut. Auch Danken wir den Projektpartner SoundPLAN, der Rat und Software zur Verfügung gestellt hat.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 10534-2:2023. Akustik – Bestimmung der akustischen Eigenschaften in Impedanzrohren – Teil 2: 2-Mikrofontechnik für Schallabsorptionsgrad und Oberflächenimpedanz bei senkrechtem Einfall. Standard, International Committee for Standardization, 2023.
- [2] DIN EN ISO 354:2003. Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Standard, International Committee for Standardization, 2003.
- [3] M. Sharif und A. Fiebig B. Zeitler, J-P. Kirch. Wahrnehmung von verkehrslärm im innenraum. In *Proceedings of DAGA 2024*, 2024.
- [4] Y. Wijnant und A. de Boer E. Kuipers. A numerical study of a method for measuring the effective *in situ* sound absorption coefficient. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(3):236–242, 2012.
- [5] A. de Jong und Y. Wijnant N. Consten. Application of the local plane wave method to measure in-situ sound absorption using a spherical microphone array. In *Proceedings of ICSV24*, 2017.
- [6] H. Kuttruff und E. Mommertz. *Room Acoustics*. In G.Müller und M. Möser. Handbook of Engineering Acoustics. Springer, 2013. ISBN: 978-3-540-24052-5.
- [7] Google Maps Street View. Kreuzung schloßstraße und büchsenstraße in stuttgart (zugegriffen: 01.11.2023).