

# Untersuchungen zur raumakustischen Aufenthaltsqualität in Innenhöfen von Wohnbauten

Tessa Sievers<sup>1,2</sup>, Kurt Eggenschwiler<sup>1</sup>, Armin Taghipour<sup>1</sup>, Matthias Blau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, CH-8600 Dübendorf (Schweiz) Email: kurt.eggenschwiler@empa.ch

<sup>2</sup> Jade Hochschule Oldenburg, Inst. f. Hörtechnik u. Audiologie, 26129 Oldenburg Email: matthias.blau@jade-hs.de

## Einleitung

Im Rahmen des verdichteten Bauens werden im urbanen Raum häufig neue grosse Wohngebäude mit Innenhöfen erstellt. Verkehrslärm von aussen sowie Nachbarschaftslärm und technische Lärmquellen im Innenhof sind bei solchen Gebäuden wesentliche Lärmfaktoren, die zur Aufenthaltsqualität im Innenhof beitragen. Bei der hier vorgestellten Laboruntersuchung steht die raumakustische Aufenthaltsqualität bzw. das momentane Wohlbefinden im Innenhof im Zentrum [1].

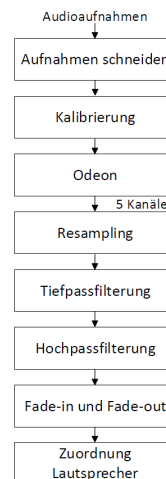
Die Fragestellung steht im Zusammenhang mit den Intentionen zur Klangraumgestaltung, wie sie z.B. in der Schweiz als *Ergänzung zur herkömmlichen Lärmekämpfung* angestrebt wird: *Klangraumgestaltung umfasst architektonische, freiraumplanerische und stadtplanerische Massnahmen, die vielstimmige Stadt- und Siedlungsräume von hoher Klangqualität entwickeln* [2]. Zur Zeit wird die Idee, z.B., in einem Projekt „Stadtklang“ an der Hochschule Luzern HSLU aus der Perspektive von Architektur, Städtebau, Stadtplanung, Landschaftsplanung, Baustoffkunde, Akustik und Sozialwissenschaften bearbeitet [3]. Es werden dabei Fallbeispiele von Innenhöfen und ähnlichen Situationen untersucht, mit dem Ziel konkrete Handlungsempfehlungen für eine Klangraumgestaltung zu erarbeiten.

Die hier vorgestellte Arbeit möchte einen Beitrag zur Frage eines guten „Stadtklangs“ leisten, indem im Sinne eines Vorprojekts Hörversuche zu verschiedenen Innenhofsituationen im Labor durchgeführt und ausgewertet werden.

## Hypothesen

In dieser Studie wurden die folgenden  $H_0$ -Hypothesen formuliert:

- $H_{01}$ : Die Veränderung der Fassade in Innenhöfen hat keinen Einfluss auf das momentane Wohlbefinden.
- $H_{02}$ : Bei gleicher Quelle hat die Empfängerposition keinen Einfluss auf das momentane Wohlbefinden.
- $H_{03}$ : Durch verschiedene Innenhof-Geräusche wird kein unterschiedliches Wohlbefinden ausgelöst.
- $H_{04}$ : Die raumakustischen Parameter sind nicht geeignet das Schallfeld in einem Innenhof bezüglich Wohlbefinden zu beschreiben



**Abbildung 1:** Blockschaftbild der Stimuli-Aufbereitung.

## Audioaufnahmen

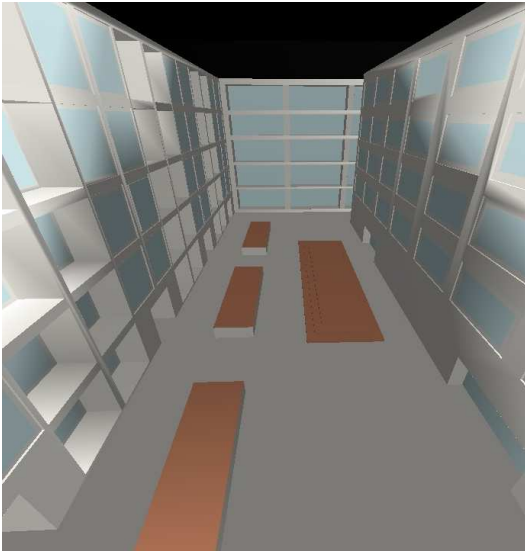
Für die Untersuchungen mussten verschiedene Signalverarbeitungsschritte durchgeführt werden, welche in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden. In Abb. 1 ist die Signalverarbeitungskette dargestellt. Die Eingangssignale dieser Verarbeitungskette sind Audioaufnahmen, um welche es in diesem Abschnitt geht.

In einem halb-reflexionsarmen Raum der Empa wurden folgende Aufnahmen alltäglicher Innenhof-Situationen aufgenommen: Ein rollender Baby Born Wagen, ein prelender Ball, ein Gespräch und zwei verschiedene Kindergeräusche. Dabei war ein Mikrofon (BK 4006, Brüel Kjaer, Nærum, Denmark) auf dem Boden positioniert, um Bodenreflexionen zu vermeiden. Für die weitere Verwendung der Aufnahmen wurden vorweg 8-Sekunden-Audioabschnitte aus den Aufnahmen entnommen. Um die Audiosignale untereinander zu kalibrieren wurde das Audiosignal mit der höchsten Betragsamplitude als Referenz festgelegt. Danach wurden die originalen Zeitsignale untereinander kalibriert, sodass alle Audiosignale an die mittlere A-bewertete Leistung des Referenzsignals angepasst wurden.

## Raumakustische Simulation und Auralisation verschiedener Innenhof-Situationen

Mit der raumakustischen Software Odeon wurde ein virtueller Innenhof (100m x 20m x 20m) modelliert, welcher sich eng an einem realen Gebäude orientiert. Die Materialisierung wurde wie folgt variiert:

**Innenhof A** Referenz-Innenhof: schallhart wie im Originalgebäude. Auf einer Seite Balkone (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Innenhof A (Referenz) in einer 3-D Ansicht der Software Odeon. Schwarze Fläche: Aussenraum (100% absorbierend). Die Farbe von Wänden und Böden kodieren den Schallabsorptionsgrad.

**Innenhof B** Innenhof mit Glasfront: wie A, aber ebene Glasfassaden statt Balkone.

**Innenhof C** Innenhof schallabsorbierend: wie A, aber alle Wände und Balkonuntersichten schallabsorbierend. Im Erdgeschoss keine schallharten Fenster und Türen, sondern nur schallabsorbierende Verkleidungen.

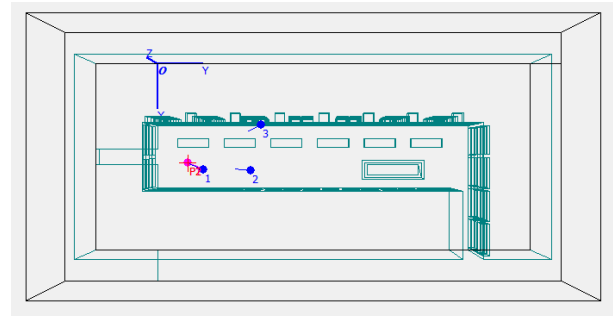
**Innenhof D** Innenhof halbabsorbierend: wie C, aber im Erdgeschoss Fenster und Türen nicht schallabsorbierend.

Wie oben erwähnt, wurde die raumakustische Simulation und Auralisation mit der Software Odeon Vers. 14.03 [4] durchgeführt. Die Simulation wurde anhand einer Quellenposition (omnidirektionale Schallquelle) in der Höhe von 1.2 m im Innenhof und drei Empfängerpositionen durchgeführt. Zwei Empfängerpositionen waren ebenfalls auf 1.2 m Höhe, und zwar in 5, bzw. 20 m Entfernung. Die dritte Empfangsposition befand sich auf einem Balkon in 9 m Höhe etwas mehr als 20 m entfernt; siehe Abb. 3.

Die Eingangssignale der Odeon-Simulation waren die kalibrierten 8-Sekunden-Aufnahmen. Die Simulationen wurden für das 3D-Audio-Labor „AuraLab“ der Empa auralisiert, in welchem ein Mehrkanal-Lautsprechersystem installiert ist. Es wurde eine 2D-Auralisation für fünf Lautsprecher realisiert.

Aus der raumakustischen Simulation wurden die folgenden raumakustischen Parameter berechnet:

- Sprachübertragungsindex  $STI$  gemäss DIN EN 60268-16 [5]
- Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  (Mittelwert der Oktavbänder 500 und 1000 Hz) gemäss ISO 3382-1 [6]
- Klarheitsmass  $C_{80}$  (Mittelwert der Oktavbänder 500 und 1000 Hz) gemäss ISO 3382-1 [6]



**Abbildung 3:** Sende- und Empfangspositionen im Innenhof (Omnidirektionale Quelle, Empfängerpositionen: 1 = 5m, 2 = 20m, 3 = Balkon).

- Seitenschallgrad  $J_{LF}$  (Mittelwert der Oktavbänder 125 und 1000 Hz) gemäss ISO 3382-1 [6]

Die aus der Auralisation resultierten Odeon-Outputs hatten je nach Nachhallzeit eine Länge bis zu 11 s. Sie wurden auf eine einheitliche Länge von 9 s geschnitten. Um die Odeon-Outputs den fünf Lautsprechern im AuraLab zuzuordnen, wurde ein Resampling auf 48 kHz vorgenommen. Außerdem fand eine Tiefpassfilterung (10 kHz, 48 dB/oct) und eine Hochpassfilterung (20 Hz, 36 dB/oct) sowie ein Fade-in (200 ms) und -out (600 ms) statt.

## Stimuli

Wie bisher erläutert, wurden für den Versuch vier verschiedene Innenhöfe verwendet. Von der Quellenposition heraus wurden fünf verschiedene Quellenaufnahmen (ein rollender Baby Born Wagen, ein prellender Ball, ein Gespräch und zwei verschiedene Kindergeräusche) für drei verschiedene Empfängerpositionen (5 m, 20 m und Balkon) auralisiert. Daraus ergaben sich 60 verschiedene Geräuschsituationen: 4 (Innenhöfe)  $\times$  5 (Quellensignale)  $\times$  3 (Empfängerpositionen) = 60. Alle Stimuli hatten eine Auflösung von 16 bit und eine Samplingfrequenz von 48 kHz.

## Setup

Für die Hörversuche wurden, wie schon beschrieben, fünf Lautsprecher auf horizontaler Ebene verwendet. In der Mitte der Lautsprecher befand sich ein Stuhl welcher frontal zum Center-Lautsprecher positioniert war. Der Proband saß mit seinem Kopf genau in der Mitte und ebenfalls frontal zum Center-Lautsprecher. Der  $L_{Aeq}$  wurde vor dem Versuch für alle 60 Geräuschsituationen gemessen und lag zwischen 42 dB(A) und 59 dB(A). Das Hintergrundgeräusch im Labor (AuraLab der Empa) lag bei  $\leq 16$  dB(A).

## Versuchskonzept

Das Experiment wurde in Form einzelner Hörversuche (individuelle Teilnahme einzelner Probanden) durchgeführt. Vor dem Versuch wurden die Probanden begrüßt und bezüglich ihres Hörvermögens und ihres allgemeinen Wohlbefindens befragt. Anhand 13

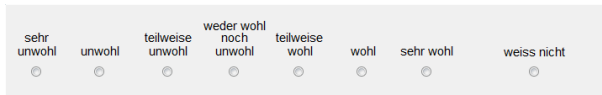


Abbildung 4: Die verwendete 7-Punkte-Skala.

Orientierungs- bzw. Übungsbeispielen wurden die Probanden mit den Stimuli und der Benutzeroberfläche der Versuchssoftware vertraut gemacht. Danach wurden 60 Stimuli in randomisierter Reihenfolge vorgespielt. Dabei sollten sie nach ihrem momentanen Wohlbefinden die Aussage „In diesem virtuellen Innenhof und bei dieser Geräuschsituation fühle ich mich ...“ mit Hilfe einer 7-Punkte-Skala bewerten (siehe Abb. 4). Nach dem Hörversuch haben die Probanden einen kurzen Fragebogen ausgefüllt, in dem einige Personenvariablen abgefragt wurden. Das Experiment dauerte insgesamt ca. 30 Minuten.

## Probanden

An dem Hörversuch nahmen 27 Personen (7 Frauen und 20 Männer) teil, deren Alter zwischen 19 und 57 Jahre lag (Median = 38). Alle Probanden waren laut Selbsteinschätzung normalhörend und hatten sehr gute Deutschkenntnisse. Die meisten Probanden waren Mitarbeiter der Empa.

## Statistische Analyse

Die bei den Hörversuchen gewonnenen Wohlbefinden-Daten wurden in Bezug auf die Designparameter (Innenhof, Quelle und Empfängerposition) und ihre Interaktionen ausgewertet:

- Dreifaktorielle ANOVA (mit Messwiederholungen), korrigiert mit Greenhouse-Geisser
- Post-hoc-Vergleiche anhand Fishers LSD mit Bonferroni-Korrektur
- Darstellung der Mittelwerte und ihrer 95%-Konfidenzintervalle

Das momentane Wohlbefinden wurde in Bezug auf die raumakustischen Parameter wie folgt ausgewertet:

- Korrelationsanalyse
- Darstellung anhand Streudiagramme inkl. Regressionsgerade

## Ergebnisse der Hörversuche

Die Varianzanalyse zeigte signifikante Haupteffekte aller drei Designparameter, was ebenfalls in der Abb. 5 beobachtet werden kann.

- Innenhof [ $F(2,2; 57,2) = 49,6; p < 0,001$ ]
- Quelle [ $F(3,1; 79,3) = 33,1; p < 0,001$ ]
- Empfängerposition [ $F(1,2; 31,9) = 25,8; p < 0,001$ ]

Paarweise Post-hoc-Vergleiche haben gezeigt, dass sich die Wohlbefinden-Bewertungen des Referenz-Innenhofs

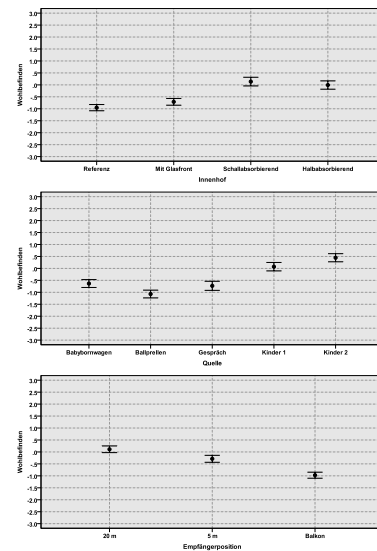


Abbildung 5: Mittelwerte der Wohlbefinden-Bewertungen und ihre 95%-Konfidenzintervalle in Bezug auf Innenhof (oben), Quelle (Mitte) und Empfängerposition (unten).

und des Innenhofs mit Glasfront nicht signifikant unterschieden ( $p > 0,05$ ). Ebenfalls gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bewertungen für den schallabsorbierenden Innenhof und den halbabsorbierenden Innenhof ( $p > 0,05$ ). Allerdings wurde im Vergleich zu dem Referenz-Innenhof sowie dem Innenhof mit Glasfront das Wohlbefinden in virtuellen Innenhöfen mit Absorption signifikant höher bewertet ( $p < 0,001$ ).

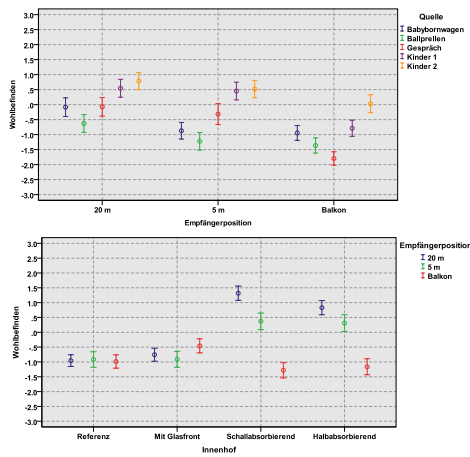
Kindergeräusche wurden signifikant höher bewertet als die anderen drei Quellen ( $p < 0,001$ ). Keine weiteren signifikanten Unterschiede gab es zwischen den Bewertungen für verschiedene Quellen ( $p > 0,05$ ).

Die Bewertungen aller drei Empfängerpositionen waren signifikant unterschiedlich ( $p < 0,001$ ). Die Empfängerpositionen „20 m“ und „Balkon“ wurden am höchsten und am niedrigsten bewertet.

Somit konnten die Null-Hypothesen  $H_{01}$ ,  $H_{02}$  und  $H_{03}$  verworfen werden. Die Ergebnisse haben unsere Vermutungen bekräftigt.

Die ANOVA zeigte signifikante Interaktionen zwischen der Empfängerposition und der Quelle ( $[F(6,0; 155,4) = 11,5; p < 0,001]$ ) sowie zwischen dem Innenhof und der Empfängerposition ( $[F(3,8; 97,5) = 52,8; p < 0,001]$ ). In Abb. 6 (oben) ist zu beobachten, dass das Gespräch nur am Balkon sehr niedrig bewertet wurde. Die untere Abbildung zeigt, dass sich die Empfängerpositionen in der Wohlbefinden-Bewertung nur in den schallabsorbierenden Innenhöfen deutlich unterscheiden, obwohl der Balkon bei allen vier Innenhöfen niedrig bewertet wurde.

Abbildung 7 zeigt Streudiagramme für die Wohlbefinden-Bewertungen in Bezug auf die raumakustischen Parameter. Das Wohlbefinden weist eine starke signifikante positive Korrelation mit dem  $C_{80}$  auf ( $r = 0,338; p < 0,001$ ). Eine signifikante positive Korrelation gab es ebenfalls



**Abbildung 6:** Mittelwerte der Wohlbefinden-Bewertungen und ihre 95%-Konfidenzintervalle für die Interaktionen zwischen Empfängerposition und Quelle (oben) und Innenhof und Empfängerposition (unten).

mit dem  $D_{50}$  ( $r = 0,274; p < 0,001$ ) und dem STI ( $r = 0,297; p < 0,001$ ). Das Wohlbefinden weist hingegen eine schwache aber signifikante negative Korrelation mit dem LF auf ( $r = -0,236; p < 0,001$ ). Das heisst, dass das Wohlbefinden höher bewertet wurde, umso höher  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  und STI waren und umso niedriger LF war (d. h. weniger räumlich bzw. mehr Freifeld-ähnlich). Anhand der Ergebnisse konnte auch die  $H_{04}$ -Hypothese verworfen werden.

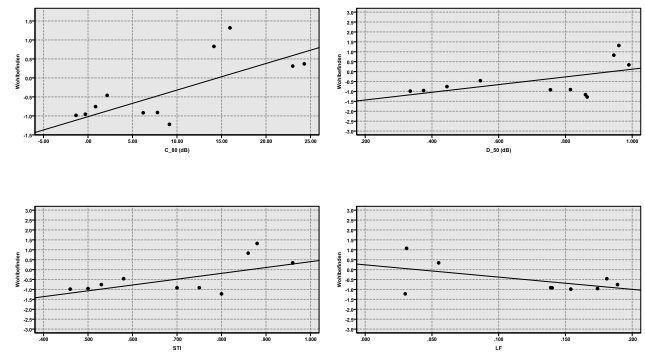
## Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich der Einsatz schallabsorbierender Fassaden in Innenhöfen vorteilhaft auf das momentane Wohlbefinden auswirkt. Da vor allem auf dem Balkon Flatterechos zu hören waren, ist eine weitere Schlussfolgerung dieser Studie, dass anhand des Zusammenspiels der Geometrie und der Absorption solche Flatterechos in Innenhöfen vermieden werden sollten. Weitere Hörversuche für andere Geometrien und Materialisierungen von Innenhöfen wären interessant.

Zu den raumakustischen Parametern kann allgemein gesagt werden, dass es Anhaltspunkte gibt, dass sie für die Beschreibung der akustischen Aufenthaltsqualität in Innenhöfen verwendet werden können. Wegen der teilweise starken Korrelation der raumakustischen Parameter (untereinander) wird es notwendig sein, zu untersuchen, welche Parameter am stärksten berücksichtigt werden müssten. Schliesslich könnte getestet werden, ob weitere raumakustischen Parameter, wie z.B. das Echo-Kriterium nach Dietsch [7] eine gute Korrelation mit den Antworten der Probanden zeigen.

Es wäre außerdem sinnvoll Hintergrundgeräusche wie Verkehrslärm oder Vogelgezwitscher zu verwenden. So könnte z.B. eine Simulation und Auralisation des ereignisarmen Verkehrslärms von ausserhalb des Innenhofs zur Empfängerposition im Innenhof durchgeführt werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse das im Labor gemessene momentane Wohlbefinden der Pro-



**Abbildung 7:** Mittleres (momentanes) Wohlbefinden in Bezug auf die raumakustischen Parameter  $C_{80}$  (oben links),  $D_{50}$  (oben rechts), STI (unten links) und LF (unten rechts). In den Diagrammen ist ebenfalls die Regressionsgerade eingezeichnet, berechnet über alle Daten.

banden in virtuellen Innenhöfen zeigen. Da es einen Unterschied zwischen Feld- und Laborstudien gibt, können die Ergebnisse nur einen kleinen Teil einer Feldstudie (Innenhof draussen) abdecken. Das **momentane** Wohlbefinden in einem Labor kann ebenfalls nicht mit einem **langfristigen** Wohlbefinden in einem realen Innenhof verglichen werden, denn das Letztere wird durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst.

Auch wenn die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Untersuchung sich nur auf wenige Teilaspekte beschränkte, bildet sie eine gute Grundlage für weitere Studien.

## Literatur

- [1] Sievers, T.: Untersuchungen zur raumakustischen Aufenthaltsqualität in Innenhöfen von Wohnbauten, Bachelorarbeit, Jade Hochschule Oldenburg 2018.
- [2] Maag T., Kocan T., Bosshard A.: Klangqualität für öffentliche Stadt- und Siedlungsräume, Kanton Zürich, 2015.
- [3] Sturm U., Bürgin M., Bosshard A., Maag T., Nägeli B., Steiner T.: Stadtklang Wege zu einer hörenswerten Stadt. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2016.
- [4] Odeon A/S: ODEON Room Acoustics Software User's Manual, Lyngby July 2016.
- [5] DIN EN 6028-16 Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2011)
- [6] DIN EN ISO 3382-1: Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009).
- [7] Dietsch L. und Kraak W.: Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen. ACUSTICA Vol. 60, 1986.