

# Schallfelder in Innenhöfen im Vergleich zwischen Simulation, Berechnung und Maßstabsmodellversuch

Alexander Lee<sup>1</sup>, Jean Marc Wunderli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> E-Mail: alexanderlee@outlook.de

<sup>2</sup> Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, CH-8600 Dübendorf,  
E-Mail: jean-marc.wunderli@empa.ch

## Einleitung

Städtebaulich wird mit der Blockrandbebauung eine Erhöhung der Bevölkerungsdichte im urbanen Raum realisiert. Die dabei um einen Innenhof angeordneten Gebäude schirmen diesen unter anderem vor Schall ab, der vom angrenzenden Straßenverkehr ausgeht. Dadurch kann im Innenhof eine lärmgeschützte Zone entstehen, die der zum Hof angrenzenden Gebäudeseite die Möglichkeit zu einer Quiet façade bietet.

Im städtischen Umfeld ist die Schallausbreitung von der Straße in einen Innenhof sehr komplex. Neben Mehrfachbeugungen und -reflexionen haben die Gebäude verschiedenste Fassaden mit Öffnungen zum Innenhof, die ebenfalls unterschiedliche Geometrien besitzen. In den Daten, die im Geoinformationssystem hinterlegt sind, werden jedoch die Gebäude nur mit Grundfläche und Höhe abgespeichert. Hieraus lassen sich lediglich einfache geometrische Körper wie Quader für die Berechnung von Lärmkarten abbilden.

Zukünftig werden diese Gebäudedaten als detailgetreue 3D-Modelle zur Verfügung stehen, die ersten Datensätze mit Dachgeometrien liegen im swissBUILDINGS3D 2.0 der swisstopo bereits vor [1].

Welchen Einfluss detailliertere Gebäudemodelle bei Fassadenöffnungen haben können, wird am Beispiel von Schallfeldern in Innenhöfen gezeigt. Für verschiedene Varianten von Innenhofmodellen werden in einem Vergleich Ergebnisse aus Simulation, Berechnung und Maßstabsmodellmessung gegenübergestellt. Gezeigt werden soll, wie die Beugungs- und Reflexionsmodelle der Programme mit den unterschiedlichen Geometrien umgehen und zu welchen Ergebnissen dies führt.

## Innenhofmodell

Für den Vergleich diente ein Modell eines Innenhofes in einer vereinfachten Blockrandbebauung. Die Höhe wurde als unveränderbare Größe bei 12 m festgelegt, da sich hierbei der Effekt der Schirmwirkung deutlich zeigte und gleichzeitig eine repräsentative Bauhöhe im urbanen Raum abgebildet wurde.

Als Varianten für die Fassaden wurde eine geschlossene Variante wie in Abbildung 1, eine Fassade mit Hofeinfahrt in einer typischen Abmessung von 4 m Breite und 3 m Höhe wie in Abbildung 2, und einer offenen Fassade mit einer Breite des Fassadenspaltes von 4 m, wie in Abbildung 3 dargestellt, ausgewählt.

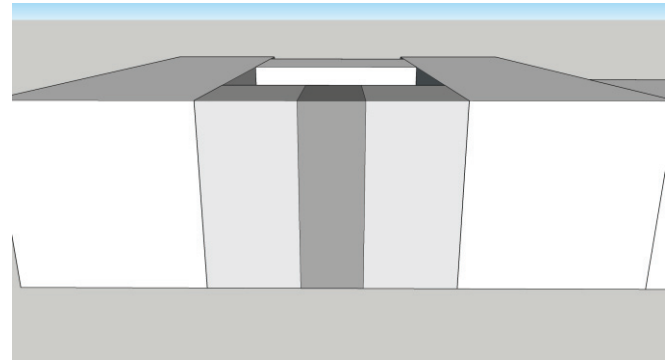


Abbildung 1: Geschlossene Fassade

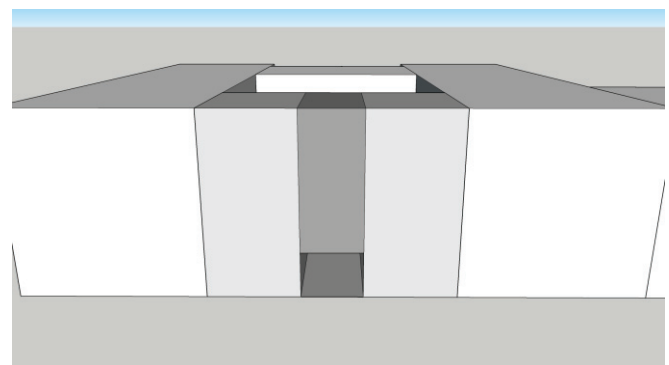


Abbildung 2: Fassade mit Toreinfahrt

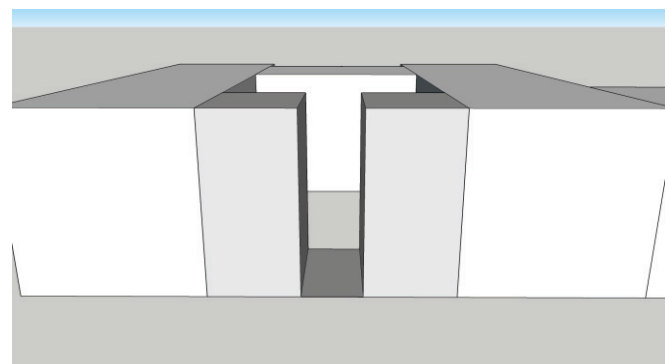
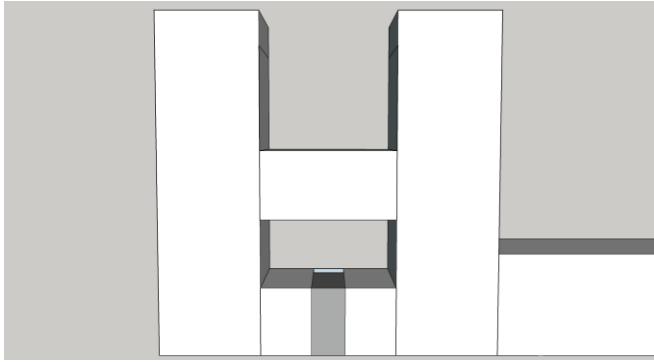


Abbildung 3: Fassade mit geschlitzter Öffnung

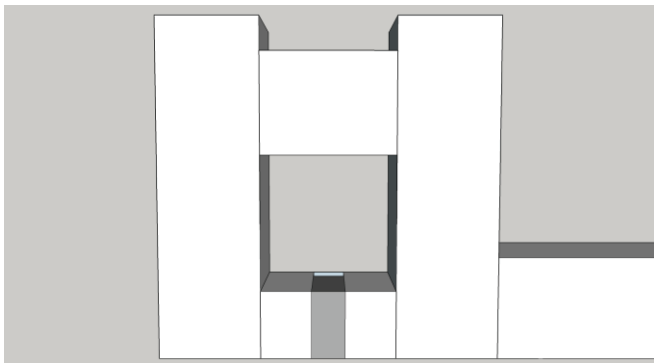
Bei der Innenhofgrundflächen wurde bei einer Hofbreite von 16 m die Innenhoftiefe verändert. Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die drei verschiedenen Varianten des Innenhofs.

Der Verkehr auf der angrenzenden Straße wurde als Linienquelle in drei Entfernungen modelliert. Die Abstände der Straße zur Fassade betragen 4 m, 8 m und 20 m. Wie in Abbildung 7 dargestellt, wurden die halben Linienabschnitte in 14 Segmente unterteilt. Anwendung fand hierbei eine Art Gleichwinkelprinzip, wobei die Abschnitte vor dem Tor mit

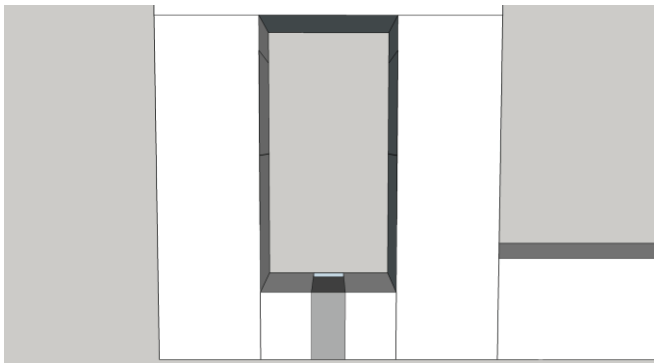
einen Winkel von 4° und in größerer Entfernung zur Einfahrt mit dem doppelten Winkel von 8° unterteilt wurden.



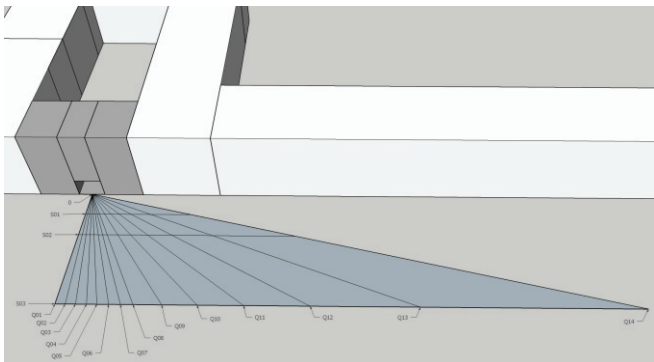
**Abbildung 4:** Kleiner Innenhof mit einer Grundfläche von 8 m x 16 m



**Abbildung 5:** Quadratischer Innenhof mit einer Grundfläche von 16 m x 16 m



**Abbildung 6:** Großer Innenhof mit einer rechteckigen Grundfläche von 32 m x 16 m



**Abbildung 7:** Diskretisierte Linienquellen in den Abständen 4 m, 8 m und 16 m zur Hausfassade

### Pegeldifferenz

Im Maßstabsmodell wurde für jedes Sender- und Empfängerpaar bei jeglicher Fassaden- und Innenhofkombination die Impulsantwort in vier Oktavbändern entsprechend Tabelle 1 gemessen. Anschließend wurden für einen Empfängerpunkt im Innenhof, Abbildung 10 zeigt die acht Positionen, die Impulsantworten für eine Linienquelle bei einer bestimmten Fassaden- und Innenhofkonfiguration zu einem Pegel als Einzahlwert zusammengefasst. Die Messungen wurden dabei mit dem standardisierten Verkehrslärmspektrum aus Tabelle 1 bewertet.

Bei den Programmen wurde analog zum Auswertschema der Modellmessung die Pegel für die Empfängerpunkt in Abhängigkeit von Fassade, Innenhof und Straßendistanz berechnet.

**Tabelle 1:** Zusammengefasstes standardisiertes Verkehrslärmspektrum für die gemessenen Oktavbänder nach [2]

		Mittenfrequenzen des Oktavbandes			
Originalmaßstab	in Hz	250	500	1000	2000
Maßstab 1:16	in Hz	4000	8000	16000	32000
Bewertung	in dB	-8.9	-7.3	-4.0	-5.3

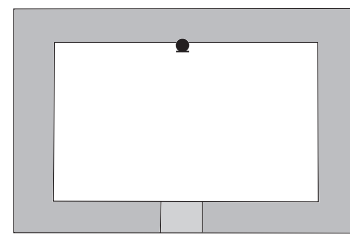
Um die Pegel  $L_{cy}$  aus dem Innenhof zu vergleichen, wurde entsprechend Gleichung (2) eine Pegeldifferenz  $\Delta L$  mit einem Referenzpegel  $L_{ref}$  gebildet. Diese Pegeldifferenz beschreibt eine Form der Schalldämmung  $A_{cy}$  für die Schallausbreitung in den Innenhof.

$$A_{cy} = \Delta L \quad \text{in dB} \quad (1)$$

$$\Delta L = L_{ref} - L_{cy} \quad \text{in dB} \quad (2)$$



**Abbildung 8:** Referenzmessung im Halbfreifeld für  $L_{ref}$



**Abbildung 9:** Messung bei umbauten Innenhof für  $L_{cy}$

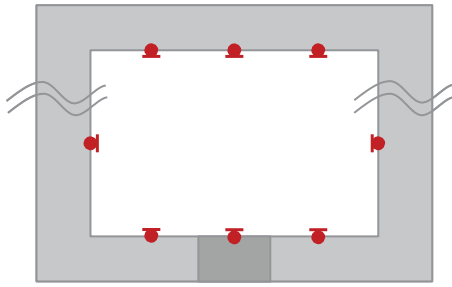


Abbildung 10: Acht Positionen der Empfänger in der Innenhoffassade

### Maßstabsmodellmessung

Im Maßstabsmodellversuch wurde dieser Anordnung mit einem Modell aus Spanplatten im Maßstab 1:16 nachgebaut und in einem semi-reflexionsarmen Raum vermessen.

### Lärmprognoseberechnung

Die Berechnung wurde mit dem Programm CadnaA erstellt, welches zur Ausbreitung des Schalls die Berechnungsformeln nach ISO 9613-2 [3] anwendet. Hierfür wurde die Blockrandbebauung mitsamt der diskretisierten Linienquelle nachgebildet.

Da die Gebäude nur als einfache Quader erstellt werden können, dienten schwebende Schilder als Fassadenelemente für das Gebäude mit Toröffnung.

### Schallausbreitungssimulation

Eingesetzt wurde das Programm CATT-Acoustics mit dem ausführlichen Algorithmus für einen offenen Raum und den mittleren Beugungsmodellen.

### Randbedingungen

Mit einer Lufttemperatur von  $t = 20^\circ \text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $\phi = 50\%$  konnte in den Programmen die ähnlichsten Bedingungen zum reflexionsarmen Raum eingestellt werden. Ferner waren Luftabsorption und schallharte Oberflächen eingestellt.

### Vergleich der Ergebnisse

Für den Vergleich wurden die Pegeldifferenzen aus dem Modellversuch über die Ergebnisse aus Simulation bzw. Berechnung aufgetragen. Ein Punkt im Diagramm steht für die Pegeldifferenz eines Empfängerpunktes bei einer bestimmten Konfiguration aus Fassade, Innenhofgröße und Straßenentfernung. Liegt ein Punkt auf der Diagonalen, so haben Messung und Programm die gleiche Pegeldifferenz als Ergebnis.

### Geschlossene Fassade

In Abbildung 11 ist eine Gruppierung im Bereich auf der Diagonalen auffällig. Es stellte sich, hervorgehoben durch kreisrunde Marker, heraus, dass es sich um die Pegeldifferenzen für die 20 m entfernte Linienquelle handelte. Hier konnte nochmals das Beugungsmodell der ISO 9612-2 [2] validiert werden. Allerdings zeigte dieses Modell mit abnehmender Distanz der Quelle zur Barriere eine zunehmende Abweichung. Die berechneten Pegeldifferenzen

lagen unterhalb der Werte aus der Modellmessung, die eine höhere Pegeldifferenz auswies.

Bei der Simulation gab es keine Ergebnisse, da die eingestellten Parameter nicht ausreichen, um eine Situation mit reiner Beugung zu simulieren.

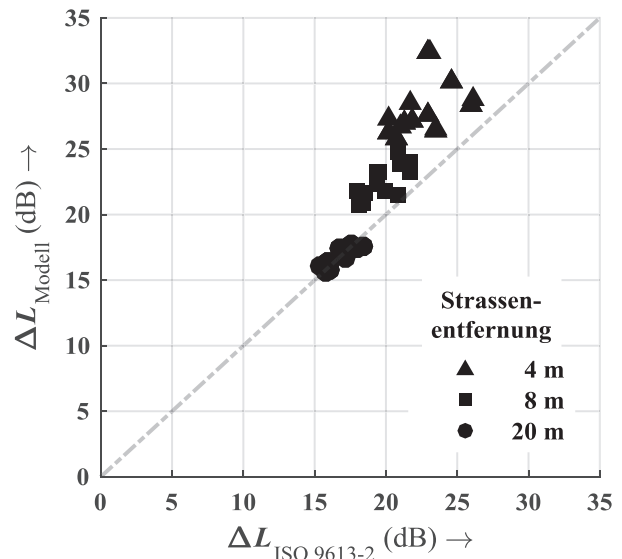


Abbildung 11: Vergleich der Pegeldifferenzen aus Modellmessung und Berechnung für die geschlossenen Fassaden

### Fassade mit Toreinfahrt

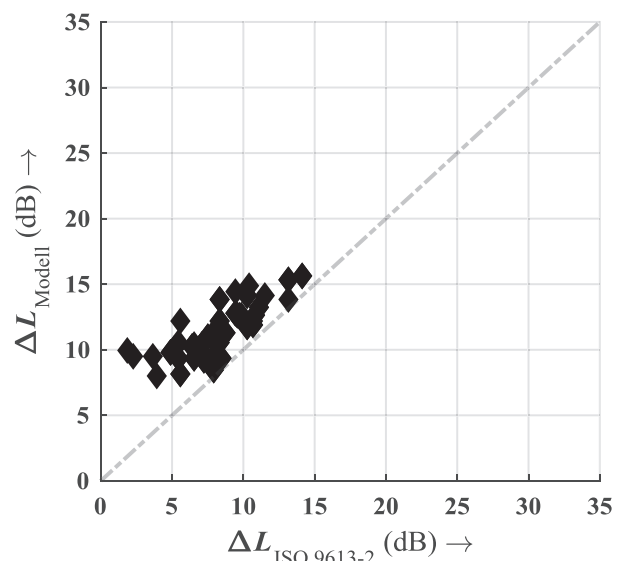


Abbildung 12: Vergleich der Pegeldifferenzen aus Modellmessung und Berechnung für die Fassaden mit Toreinfahrt

Die Pegeldifferenzen bei einer Fassade mit Tordurchfahrt zeigen in Abbildung 12, dass die Berechnung im Allgemeinen diese unterschätzte, weil ein zu großer Schalleintrag in den Innenhof eingebracht wurde. Während in Abbildung 12 keine Gruppierungen zu erkennen sind, deshalb die neutralen Marker, zeigte der Vergleich zur Simulation in Abbildung 13 eine Abhängigkeit von der Distanz bei den Pegeldifferenzen. Da es bei der Simulation keine Beugung über das Gebäude gab, trug nur der Schallanteil durch die Öffnung zur Pegeldifferenz bei.

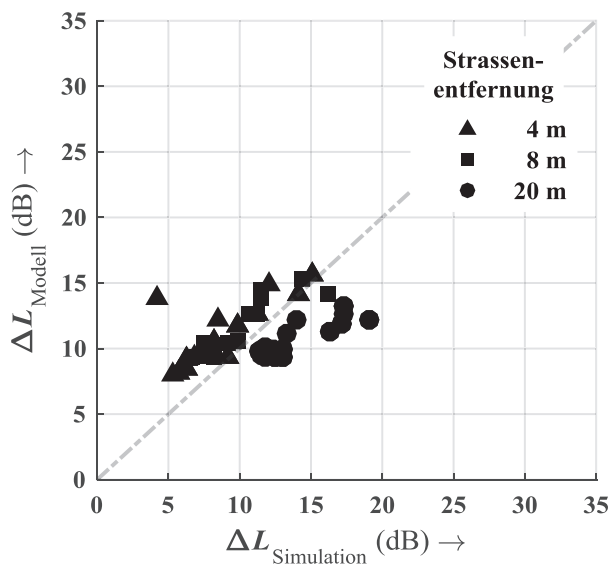


Abbildung 13: Vergleich der Pegeldifferenzen aus Modellmessung und Simulation für die Fassaden mit Toreinfahrt

Bereits in [4] wurde gezeigt, dass der Hauptbeitrag zum Schallfeld im Innenhof durch eine Öffnung in der Fassade eingetragen wird und der Beugungsanteil über das Gebäude dann vernachlässigbar ist. Bei der 20 m entfernten Straße zeigte sich ein zu geringer Schalleintrag in den Innenhof, weshalb eine größere Pegeldifferenz als bei der Messung vorlag.

#### Geschlitzte Fassade

Die Ähnlichkeit der Abbildungen 12 und 14 bestätigt die These aus [5], dass Toreinfahrt und offene Fassade Varianten für den direkten Schalleintrag in den Innenhof sind. Die Variable hierbei ist über die Öffnungshöhe die Öffnungsfläche. Oberhalb des weiteren offenen Fassadenabschnitts dissipiert der Schall über den Innenhof hinweg in den freien Himmel.

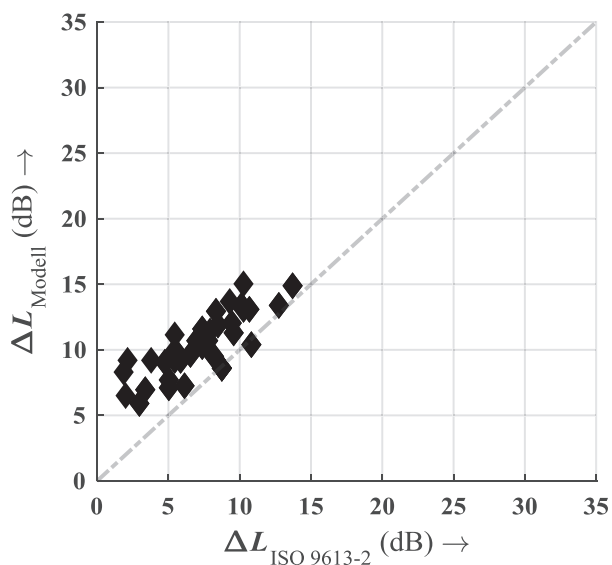


Abbildung 14: Vergleich der Pegeldifferenzen aus Modellmessung und Berechnung für die geschlitzte Fassade

Der Vergleich in Abbildung 14 zeigte ebenfalls die tendenzielle Unterschätzung der Pegeldifferenzen durch die Berechnung. In Abbildung 15 ist der Unterschied durch den

Einfluss der Straßenentfernungen deutlicher als in Abbildung 13, dieser wurde hier jedoch häufiger unterschätzt.

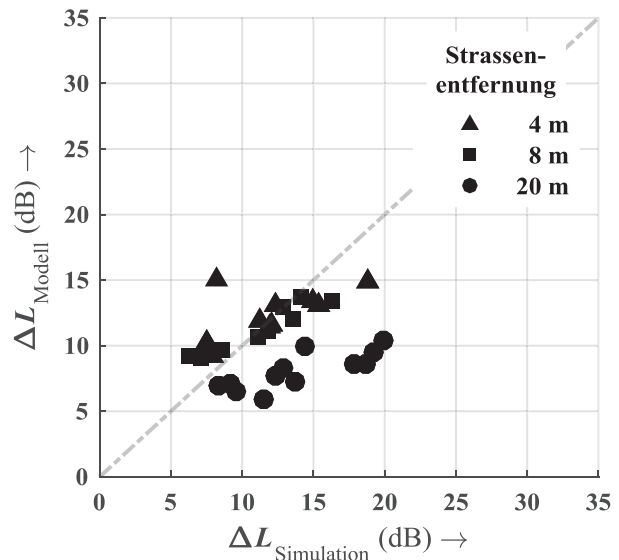


Abbildung 15: Vergleich der Pegeldifferenzen aus Modellmessung und Simulation für die geschlitzte Fassade

#### Erkenntnisse und Ausblick

Das Beugungsmodell der ISO 9612-2 zeigt gerade für weite Entfernungen eine gute Genauigkeit. Jedoch wird die Schirmwirkung bei großen Beugungen von diesem Modell unterschätzt. Generell wird bei der Lärmprognose der Schalleintrag in den Innenhof überschätzt.

Mit dem mittleren Diffraktionsmodell ist die Simulation von Beugung über Kanten nicht möglich. Das ausführliche Modell ist zu rechenintensiv, so dass Genauigkeit der Ergebnisse und Zeitaufwand in keinem vernünftigen Verhältnis mehr stehen.

Weitere Parameterstudien mit der vorhandenen Software und der Einbezug anderer Programme zur Lärmprognose und Simulation werden den Vergleich vervollständigen.

#### Danksagung

Die Grundlagen des Projekts wurden gefördert durch Mittel des Bundesamtes für Umwelt – BAFU der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Empa.

#### Literatur

- [1] swissBUILDINGS3D 2.0, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, URL: <https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/landscape/build3D2>
- [2] ISO 9613-2: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: A general method of calculation. Oct. 1999
- [3] SN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Strassen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärm-spektrum. Nov. 1997
- [4] Lee A., Wunderli J. M., Heutschi K.: Sound field estimation in courtyards. Proceedings InterNoise Hamburg (2016), pp. 1880-1889