Validierung von Schallteilchen-Raumakustik-Simulationen mit Beugung mittels Messungen an verschiedenen Schirmaufbauten im Halbfreifeldraum

Stefan Weigand[1,2], Uwe Stephenson[1], Jochen Schaal[2]
[1] *HafenCity Universität Hamburg, 20457 Hamburg, Deutschland*
[2] *SoundPLAN GmbH, 71522 Backnang, Deutschland, Email: stefan.weigand@soundplan.de*

Einleitung

Raumakustische Software hat sich als ein Standard-Werkzeug bei der raumakustischen Planung und Ertüchtigung etabliert. Es gibt eine breite Palette an Software-Produkten, die eine Berechnung der wesentlichen raumakustischen Parameter ermöglichen. Dabei haben sich verschiedene Berechnungsprinzipien herauskristallisiert. Eine weit verbreitete Berechnungsart sind die energetischen Strahlenverfahren. Diese Verfahren beruhen auf einer hochfrequenz-Näherung und betrachten nur energetische Ergebnisse. Das Schallteilchenverfahren (SP) ist eine Untergruppe dieser Verfahren. Hier ist es in den letzten Jahrzehnten gelungen die Palette der berücksichtigten physikalischen Ausbreitungsphänomene um Beugung zu erweitern. Dies geschieht mittels unschärfebasierter Schallteilchenbeugung (SPD) [1]. Dies erweitert die Anwendbarkeit der Berechnungen hin zu tieferen Frequenzen und komplexeren Geometrien.

Bisher erfolgte die Validierung von SPD durch Vergleiche zu anderen numerischen Verfahren. Diese waren zum einen Wellen-basierte Methoden wie Svenssons SSM [2, 3] oder die Nord2000 [4], zum anderen die Umwegmethode nach ISO 9613-2. Dabei zeigte sich gute Übereinstimmungen mit wellen-theoretischen Verfahren und das SPD-Verfahren schnitt besser ab als die Umwegmethode. Jedoch sind diese numerischen Referenzen nur auf einen begrenzten Kreis an Fällen anwendbar, da sie entweder nur bestimmte Rahmenbedingungen zulassen oder grundsätzlich auf andere Annahmen aufbauen. Daher entstand der Wunsch eine Validierung durch einen Vergleich mit Messungen unter kontrollierten Bedingungen mit einer Vielzahl an Schirmaufbauten und Varianten zu unternehmen. Zwar gibt es in der Literatur schon gute Untersuchungen zur Akustik um Schirmaufbauten, z.B. [5, 6, 7], jedoch sind diese in den Publikationen oftmals nicht ausreichend dokumentiert um die Szenarien zu reproduzieren oder die Ergebnisdaten liegen nicht oder nur graphisch vor. Das erschwert oder verhindert eine Validierung neuer Methoden mittels dieser publizierten Studien.

Studienkonzept

Ziel der Untersuchung ist es das Einfügedammmaß (englisch: insertion loss, IL) für die verschiedenen Aufbauten zu bestimmen und mit den Ergebnissen der Simulation zu vergleichen. Das Einfügedammmaß berechnet sich aus der Pegeldifferenz aus einem Aufbau mit Schirm ($L_{\mathrm{p,mS}}$) und ohne Schirm ($L_{\mathrm{p,oS}}$):

$$IL(f) = L_{\mathrm{p,i,mS}}(f) - L_{\mathrm{p,i,oS}}(f) \quad i = 1...31 \qquad (1)$$

Hierfür müssen sowohl in der Messung als auch in der Simulation bei ansonsten möglichst unveränderten Bedingungen Messwerte mit und ohne Schirm erhoben werden. Die Bilder in Abbildung 1 zeigen dieses Vorgehen beispielhaft für den Fall mit einem Schirm der Breite 5,52 m und absorbierend belegtem Boden.

Abbildung 1: Zur Berechnung der Ziel-Vergleichsgröße Einfügedämmmaß wird jeweils ein Aufbau mit (links) und ohne (rechts) Schirm unter ansonsten gleichen Bedingungen vermessen. Aus der Differenz der so gemessenen Oktavband-Schalldruckpegel berechnet sich das Einfügedämmmaß.

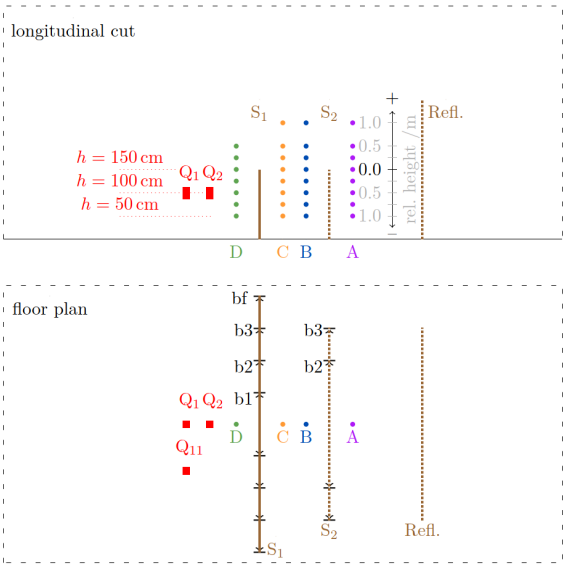

Abbildung 2: Skizze zur Übersicht eines Teils der untersuchten Szenarien: Zu sehen sind die 31 Empfänger, angeordnet in 4 Mikrofon-Linienarrays (*A*-*D*), 3 Quellpositionen mit drei verschiedenen Höhen. In der Aufsicht sind die verschiedenen Schirmbreiten (b1,b2,b3,bf) zu sehen.

Um eine möglichst allgemeingültige Validierung des Algorithmus zu erlauben wurde ein Vielzahl an Szena-

rien untersucht. Dabei wurden folgende Eigenschaften variiert: Anzahl, Form und Anordnung der Schirme, Schirmbreite, Kombination von Schirmen mit Reflektoren, Quellposition, Quellhöhe sowie Reflexionseigenschaften des Bodens und des Schirms (absorbierend/ reflektierend). Einen skizzenhaften Überblick über die Szenarien gibt Abbildung 2. Eine detaillierte Beschreibung aller Szenarien ist im Rahmen dieses Manuskripts nicht möglich. Stattdessen können hier nur Auszüge der untersuchten Szenarien samt Ergebnissen dargestellt werden. Andere Auszüge wurden bereits veröffentlicht [8],[9]. Eine Gesamtübersicht aller Messungen und Simulationen ist unter [10] zu finden.

Die Szenarien lassen sich in drei Kategorien eingruppieren: Einschirm-, Zweischirm- sowie komplexere Szenarien. Es gilt zu beachten, dass auch bei den ein Schirmaufbauten mit endlicher Schirmbreite mehrere Beugungspfade über verschiedene Kanten zum Pegel am Empfangsort beitragen.

Ein Modell ist immer nur ein begrenztes Abbild der Realität. Demzufolge gibt es einige prinzipieller und grundlegenden zu erwartenden systematisch Abweichungen bei Vergleich zwischen Messung und Simulation. Die wesentlichsten sind:

- Bei der Messung findet durch Mikrofone (Druckempfänger) eine amplitudengetreue Erfassung des Schalldruckpegels an einem kleinen Punkt statt. In der Simulation hingegen kommen räumlich ausgedehnte Energieempfänger zum Einsatz. Interferenzeffekte können daher prinzipiell nicht abgebildet werden.
- Die reale Schallquelle ist ausgedehnt und besteht aus zwei Lautsprechern, in der Simulation wird dies als eine punktförmige Quelle mit entsprechender Richtwirkung modelliert.
- Im Labor ist nur eine Annäherung an die Halb-Freifeldbedingungen möglich (besonders bei tiefen Frequenzen), in der Simulation wurden diese jedoch als ideal angenommen.
- Gewisse Phänomene der realen physischen Welt (z.B: Resonanzen in den Schirmen, Streukörper wie Stative etc.) können im Modell nicht nachgebildet werden.

Versuchsdurchführung

Messung

Die Messungen fanden im Halbfreifeldraum des Instituts für technische Akustik (ITA) der RWTH Aachen statt. Es wurden Impulsantworten mittels Sinus-Sweeps gemessen (je vier Mittlungen). Anschließend wurde eine Oktavband-Filterung und dann die Berechnung der weiteren Größen bis hin zur Zielgröße nach Gleichung (1) berechnet.

Die modularen Schirme bestehen aus MDF-Platten mit einer Dicke von 25 mm und einem Flächengewicht von $m^{'} = 18,56\,\mathrm{kg/m^2}$. Die Einzelmodule haben die Abmessung $1,38\,\mathrm{m}$ (B) auf $1,50\,\mathrm{m}$ (H). Als Quelle wird ein Zwei-Wege Studiomonitor vom Typ Genelec 8020 C verwendet. Für diesen Lautsprecher liegt eine hoch aufgelöste (1° Auflösung in Azimuth und Elevation) Vermessung der Richtwirkung vor. Er eignet sich somit besser für den Vergleich mit Simulationen, als ein als idealer Rundstrahler angenommener Dodekaeder, der diese Annahme in der Praxis nicht erfüllt. Um die Durchführung effizient zu gestalten, wurde jede Messung gleichzeitig mit 31 Mikrofonen vom Typ Sennheiser KE4 gemessen. Diese 31 Empfänger wurden entzerrt, kalibriert und waren in vier Linien-förmigen Arrays (A-D) angeordnet.

Simulation

Die Simulationen wurden mit SoundPLANnoise durchgeführt. Um eine möglichst realitätsnahe Modellierung zu gewährleisten, wurde die Absorption der Oberflächen nach ISO 354 im Hallraum vermessen. Die Streugrade wurden aufgrund der Rauigkeit abgeschätzt. Es wurde eine Punktquelle mit Richtwirkung (Auflösung: 5°) verwendet, das Leistungsspektrum war konstant, der Absolutwert ist gemäß Gleichung (1) nicht relevant. Die Empfängerkugeln hatten den Radius $r = 10\,\mathrm{cm}$. Das Schalldämmaß der Schirme wurde mittels Bergerschen Massengesetz berechnet. Die Wände und Decke des Halbfreifeldraums wurden als ideale Absorber angenommen. Details zur Modellierung sind [9] zu entnehmen.

Ergebnisdiskussion

Im Rahmens dieses Manuskripts kann nur ein kleiner Auszug der Ergebnisse dargestellt werden. Diese Einschränkung gilt sowohl bezüglich der vorgestellten Szenarien als auch bzgl. der exemplarischen Diskussion der Ergebnisse für das 1kHz-Oktavband. Weitere Ergebnisse sind [9, 10] zu entnehmen.

Einschirm-Szenarien

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für das Szenario mit einem Schirm der Breite $5,52\,\mathrm{m}$ mit absorbierendem Boden. Die Simulation (gestrichelt) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen (durchgezogen). Für bodennahe Empfänger, die weiter vom Schirm entfernt sind, zeigen sich leicht größere Abweichungen.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für das identische Szenario jetzt mit reflektierendem Boden. Wieder zeigt die Simulation (gestrichelt) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen (durchgezogen). Für einzelne Empfänger, insbesondere in Bodennähe werden wieder leicht größere Abweichungen registriert. Es ist aber kein genereller Unterschied zwischen den beiden Fällen erkennbar, sodass Beugung auch in Kombination mit Reflexionen korrekt berechnet wird. Zusätzlich sind hier noch die Ergebnisse der ISO 9613-2 (Umwegmethode) gepunktet dargestellt. Hier zeigen sich deutlich größere Abweichungen und diese Methode kann den gemessenen Verlauf auch qualitativ nicht abbilden.

In Abbildung 5 sind die mittleren Abweichungen des IL (Simulation-Messungen) aller Ein-Schirm-Szenarien gegenüber der Frequenz dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Ergebnisse ab 500 Hz in guter Übereinstimmung ($\pm 1,5\,\mathrm{dB}$) sind, lediglich zwei Szenarien (sehr schmaler Schirm und Quelle knapp über dem Boden) zeigen höhere

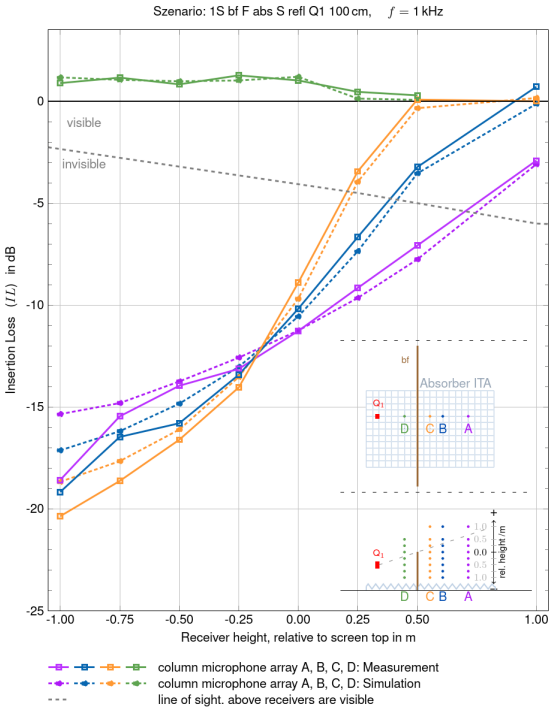

Abbildung 3: Ergebnisse des Szenarios mit einem Schirm mit der Breite 5, 52 m und absorbierendem Boden. Auf der x-Achse ist die Höhe des Empfängers in Metern relativ zur Schirmhöhe, auf der y-Achse das Einfügedämmmaß in dB aufgetragen. Farbcodiert sind die vier Mikrofon-Linienarrays.

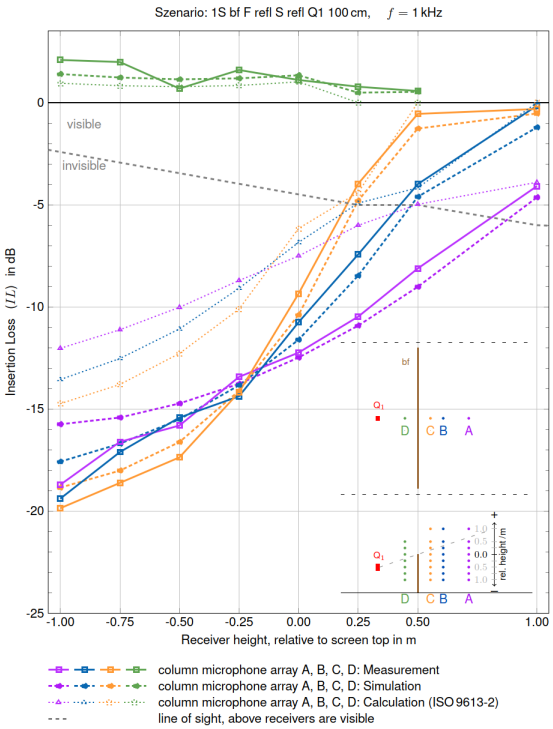

Abbildung 4: Ergebnisse des Szenarios mit einem Schirm mit der Breite 5, 52 m und reflektierendem Boden.

Abweichungen. Im tieffrequenten Bereich nehmen die Abweichungen u.a. aufgrund von Interferenzeffekten, die das energetische Simulationsverfahren nicht abbilden kann, zu. Auch zu hohen Frequenzen hin nehmen die Abweichungen geringfügig zu.

Zweischirm-Szenarien

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für ein Szenario mit zwei Schirmen der Breite 4, 14 m mit reflektierendem Boden. Wieder zeigen die Simulationen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Für bodennahe Empfänger, insbesondere hinter dem zweiten Schirm nehmen die Abweichungen bei einzelnen Empfängern zu, während der generelle Verlauf der Messungen sehr gut nachgebildet werden. Auch hier kann dies für die Umwegmethode nicht gesagt werden, die für alle Empfänger hinter dem zweiten Schirm deutlich zu viel Energie prognostiziert.

Komplexere Szenarien

Hier wird als ein Beispiel für komplexere Schirmformen und Anordnungen exemplarisch ein Fall mit einem „Zickzack“-Schirm untersucht, siehe Abbildung 7. Eine solche Geometrie ist praxisrelevant (z.B. Durchgänge zwischen Schirmwänden) und ist für Umwegmethoden problematisch, aufgrund des Mittelpfads mit Wendepunkt. Es zeigt sich, dass der Mittelpfad dominant ist (Vgl. zu Abb.6). Während die Abweichung bei einzelnen Empfangspunkten deutlich größer wird als bei den bisher betrachteten Szenarien, kann die Simulation dennoch den qualitativen Verlauf und auch die Dominanz des Mittelpfads gut abbilden. Der mittlere Fehler ist im selben Intervall wie bisher.

Somit zeigt dieses Beispiel gut, dass das SPD-Verfahren auch mit komplexen Geometrien umgehen kann und noch immer befriedigende Ergebnisse liefert, wo andere Verfahren versagen.

Zusammenfassung

In einer breit angelegten Untersuchung wurde an einer Vielzahl von Szenarien mit Schirmen unter kontrollierten Bedingungen Messungen des Einfügedämmmaß durchgeführt und mit Simulationen verglichen. Es zeigt sich, dass das Schallteilchen Simulationsverfahren mit Beugung (SPD) in der Lage ist Beugung, auch mehrfach und in Kombination mit Reflexionen, korrekt zu berechnen. Das Verfahren zeigt gute Übereinstimmung (mittler-

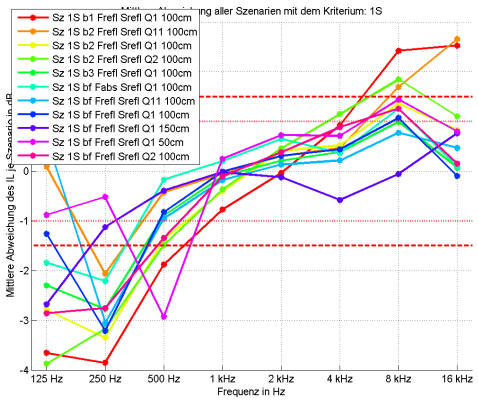

Abbildung 5: Mittlere Abweichung der IL-Ergebnisse (Simulation-Messung) aufgetragen über der Frequenz für alle Ein-Schirm-Szenarien. Frefl steht für reflektierenden und Fabs für absorbierenden Boden.

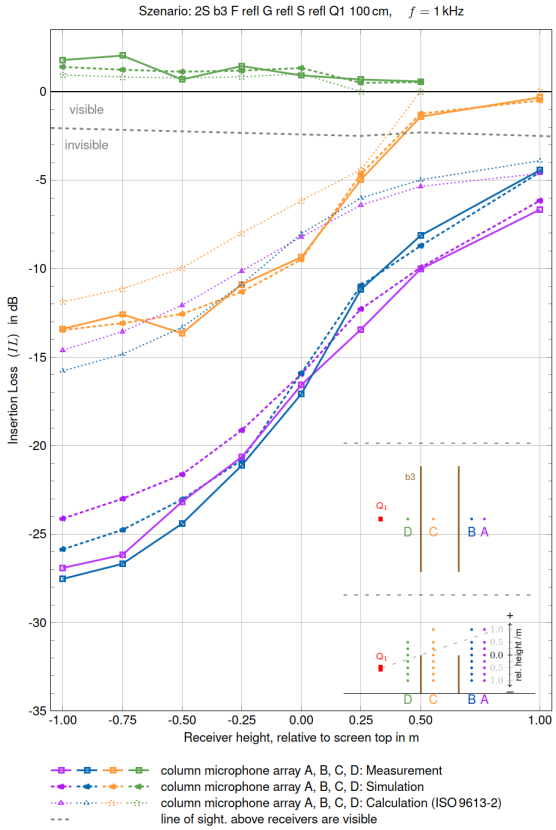

Abbildung 6: Ergebnisse des Szenarios mit 2 Schirmen mit der Breite 4, 14 m und reflektierendem Boden.

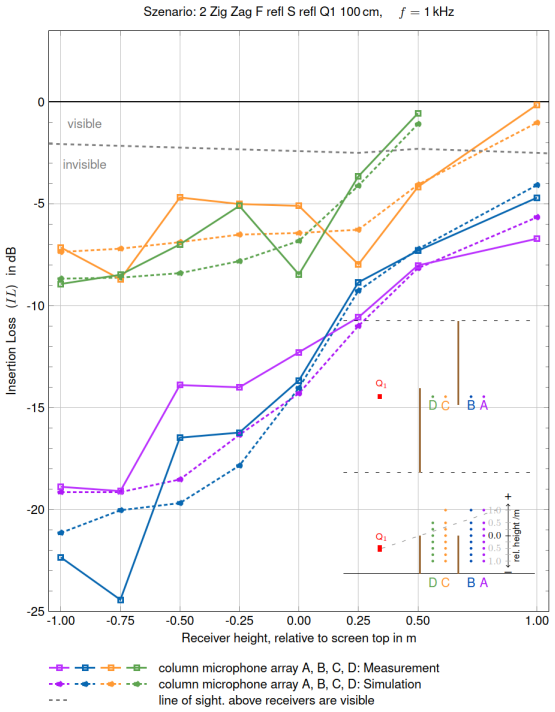

Abbildung 7: Ergebnisse eines komplexeren Szenarios mit 2 Schirmen, die im „Zickzack“ auf reflektierendem Boden stehen.

er Fehler $\leq \pm 1,5$ dB) mit den Messungen ab 500 Hz. Darunter fallen Abweichungen auf, insbesondere aufgrund von Wellenphänomenen wie Interferenz die von einem energetischen Verfahren nicht abgebildet werden können. Einzelne Empfangspunkte, insbesondere in Bodennähe, weißen gelegentlich größere Abweichungen gegenüber den Messungen auf. Auch komplexere Schirmgeometrien oder Anordnungen können von dem Verfahren ad hoc beherrscht werden. In Zukunft werden weitere Parameter, bei denen auch die zeitliche Struktur relevant ist (Nachhallzeit und Deutlichkeit) validiert werden müssen.

Danksagung

Der Autor möchte sich bei den Mitarbeitern des ITA für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen bedanken. Insbesondere sind hier Herr Aspöck und Herr Stienen zu nennen.

Literatur

[1] Stephenson, U.: An energetic approach for the simulation of diffraction within ray tracing based on the uncertainty relation, Acta Acoustica united with Acustica 96 (2010)

[2] Svensson, P. et al.: An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses, JASA 106 (1999)

[3] Pohl, A., Stephenson, U.: Extension of the Uncertainty relation based diffraction to polygonal holes, Forum Acusticum, Krakow, 2014

[4] Schaal, J.; Judd, T.: A 3D Sound Particle Model with Uncertainty-Based Diffraction for general Geometries, ICSV 24, London, 2017

[5] Kawai, T.: Sound Diffraction by a many-sided Barrier or Pillar, Journal of Sound and Vibration 79 (1981)

[6] N. Tsingos, I. Carlbom, et al.: Validating acoustical simulations in the Bell Labs Box, in IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 22, no. 4 (2002)

[7] Hübelt, J., Sarradi, E.: Schallschirmversuchsstand, Fortschritte der Akustik, DAGA, 1997

[8] Weigand, S.: Evaluation of sound particle simulation diffraction with full scale measurements around finite sized screens in a semi-anechoic chamber, Proceedings of Acoustics, Boston, 2017

[9] Weigand, S.; Stephenson, U.; Schaal, J.: Simulation of multiple Sound Particle Diffraction based on the Uncertainty Relation - a revolution in noise immision prognosis; Part II: Evaluation by Measurements, Proceedings of EuroNoise, Kreta, 2018

[10] Repositorium der Messdaten, URL: `http://www.audioandacoustics.de/diffraction`