

Zum Einfluss von Reflexionen und Nachhall auf die Abstandswahrnehmung in Konzertsälen

Winfried Lachenmayr¹, Cristina Zamorano², Eckard Mommertz¹, Malte Kob²

¹ Müller-BBM, 82152 Planegg, Deutschland, Email: winfried.lachenmayr@mbbm.com

² Hochschule für Musik Detmold, 32756 Detmold, Deutschland, Email: kob@hfm-detmold.de

Einleitung

Als akustische Qualitätskriterien für Konzertsäle werden Deutlichkeit und Klarheit, Halligkeit und Umhüllung, Lautstärke sowie ausreichend Bassfrequenzen genannt. In den letzten Jahren wurde auch die gefühlte akustische Nähe als wichtige Größe gefunden [1], [2]. Sich nah am musikalischen Geschehen zu fühlen, wird, ähnlich wie in anderen Bereichen der Unterhaltung, auch in Konzertsälen als überwiegend positiv gewertet. Bei Präsentation von verschiedenen Plätzen eines Konzertsales im Hörversuch tendiert die Mehrheit zu den „näher-klingenden“ Plätzen.

Vorausgesetzt, akustische Nähe ist in der Tat erstrebenswert, stellt sich die Frage, wie dies in der Praxis architektonisch umgesetzt werden kann. Als erstes wäre hier der reale Abstand zur Schallquelle zu nennen. Da jedoch nicht alle Zuhörer beliebig nahe angeordnet werden können, bleiben folgende, in der Literatur auch als „Cues“ bekannte, wesentliche Erkennungsgrößen für das Abstandshören: 1) Je leiser der Schall, desto weiter weg wird dieser eingeschätzt (dies gilt uneingeschränkt nur für den Direktschall). Messbar ist dies in der Raumakustik durch das Stärkemaß G oder den Schallpegel. 2) Je weniger hohe Frequenzen vorhanden sind, desto entfernter wird ein Hörereignis sein, in der Messung sichtbar durch spektrale Differenzen. 3) Als letzter Cue sei hier das Direktschall-zu-Nachhall-Verhältnis genannt (Direct/Reverberation- oder D/R-Ratio) – je halliger das Signal, desto weiter weg erscheint das Hörereignis.

Frühe Reflexionen

Oft ist je nach Hörsituation und Variablen ein anderer Cue besser mit dem Abstandsempfinden korreliert. Das Wahrnehmungssystem scheint sich jeweils auf die verfügbare und/oder dominante Größe zu verlassen – für das Hören in Räumen bei mittleren Distanzen war das in mehreren Studien das D/R-Verhältnis. Anders in großen Konzertsälen: beim Vergleich von Plätzen in verschiedenen Sälen mit gleichem, eher großen Abstand, scheinen stärkere, frühe Seitenreflexionen dagegen die Distanz zu verringern [3]. Es zeigt sich bereits, dass sich für die frühen Reflexionen eine etwas widersprüchliche Situation ergibt: Einerseits gehören diese per Definition zum Teil „Reverberation“ im D/R-Verhältnis, d. h. mehr bzw. stärkere frühe Reflexionen sollten den Klang entfernter erscheinen lassen. Dies widerspricht Erfahrungen aus der Praxis, in der über Reflektoren gezielt Schallenergie auf Publikumsbereiche geleitet wird. Neben dem o. g.

Test für Konzertsäle [3] gibt es auch weitere Hinweise, dass sich beim Hinzufügen bestimmter früher Reflexionen zum Direktschall eine bessere Übereinstimmung mit dem Abstandsempfinden ergibt [5]. Des Weiteren muss noch hinsichtlich der Einfallsrichtung unterschieden werden: Demnach würden Reflexionen aus der Median-Ebene, etwa Deckenreflexionen, anders als Seitenreflexionen keine Nähe erzeugen [4].

Fallbeispiel

Um die Relevanz der frühen Reflexionen zu zeigen, werden exemplarisch Mess- und Hörversuchsdaten eines klassischen Rechtecksales, dem Konzerthaus Wien, und eines aufgefächerten Veranstaltungsraumes, dem Festspielhaus Salzburg, verglichen. Das Material wurde bereits früher gezeigt [2], jedoch hierfür mittels Zeit/Energie-Analyse neu ausgewertet. An je fünf Empfänger-Punkten rechts der Saal-Mittelachse wurden in beiden unbesetzten Räumen Impulsantworten gemessen und Aufnahmen eines echten Orchesters erstellt, welche über einen Hörversuch mit 21 Expertenhörern per direkter Skalierung auf verschiedene Merkmale hin abgefragt wurden, darunter das Abstandsempfinden. Es zeigt sich, dass im Rechtecksaal (Abb. 1, orange) eine gleichförmige Einschätzung des Abstandes besteht (8 m, 16 m, 22 m, 25 m, 27 m), ähnlich im hier nicht gezeigten Musikverein. Dies ist im anderen Saal nicht der Fall (Abb. 1, violett): Entferntere Plätze (e03: 21 m, e04: 19 m) werden „näher gehört“, Empfänger 2 dagegen als entfernter (13 m).

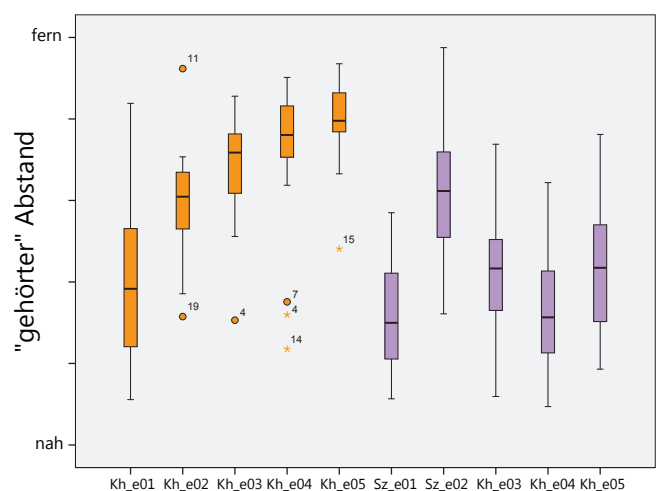


Abbildung 1: Gehörter Abstand für je fünf Empfänger entlang der Mittelachse von vorne (e01) nach hinten (e05) im Konzerthaus (links, orange) und in Salzburg (rechts, violett).

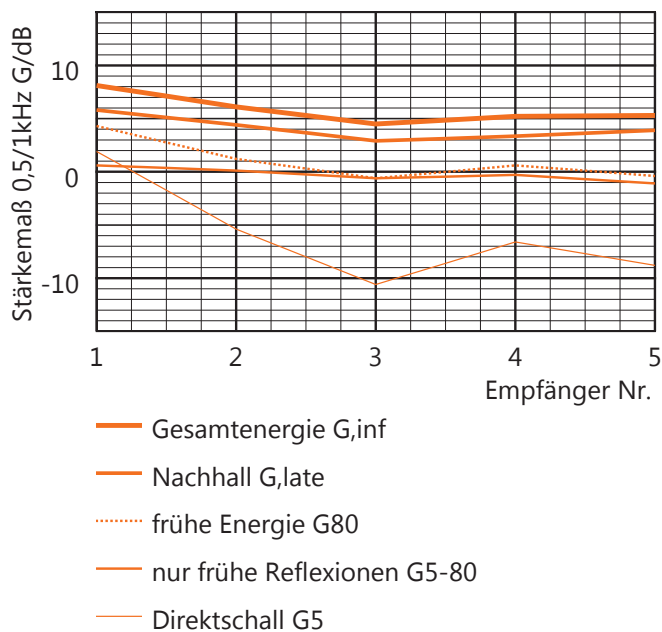


Abbildung 2: Zeit-Energie-Analyse für die fünf Empfänger im Konzerthaus Wien (über die Distanz: Empfänger 1 vorne, bis Empfänger 5 hinten auf 2. Balkon)

Eine Betrachtung der Schallenergie der verschiedenen Zeit-Abschnitte der Impulsantwort (ähnlich der Time-Energy-Analysis [6]) offenbart, dass im Fall des Rechtecksaals ein gleichmäßiges Absinken der Schallenergie mit zunehmender Entfernung vorliegt (Abb. 2, Empfänger 1-3). Bei Empfänger 4, auf dem 1. Balkon gelegen, kommt aufgrund der erhöhten Position etwas mehr Energie an. Der Direktschall wird bereits ab dem 2. Empfänger von Reflexionen und Nachhall dominiert. Anders ist dies im großen Festspielhaus Salzburg (Abb. 3): Hier sind bei Empfänger 1+2 deutlich weniger frühe Reflexionen vorhanden, die Kurven kreuzen sich erst bei Empfänger 3 (gerade unterhalb des Balkons) durch eine Zunahme der Reflexionsenergie um ca. 6 dB. Ohne fein unterteilte Betrachtung getrennt für Direktschall und frühe Energie kann dieser Informationsgehalt nicht ersichtlich werden.

In einem Fall wird die Distanz also unterschätzt, der Hörer fühlt sich näher als er tatsächlich ist – ein positives Merkmal?

Zuspielung einer frühen Decken-Reflexion

Als möglichst klare Fragestellung wurde folgende, für die raumakustische Planungspraxis absolut relevante und nach bisherigen Erkenntnissen ungeklärte Fragestellung formuliert:

Erhöhen oder verringern einzelne frühe Deckenreflexionen den „gehörten“ Abstand? Dies wurde zunächst in zwei Räumen untersucht, einem Hörsaal und einem trockenen Hörlabor. Nach bestätigenden, jedoch nicht ganz eindeutigen Ergebnissen in diesen Räumen (nachzulesen in Masterarbeit C. Zamorano [7]), wurden die Tests für einen größtmöglichen Realitätsbezug im Konzertsaal der Hochschule Detmold wiederholt.

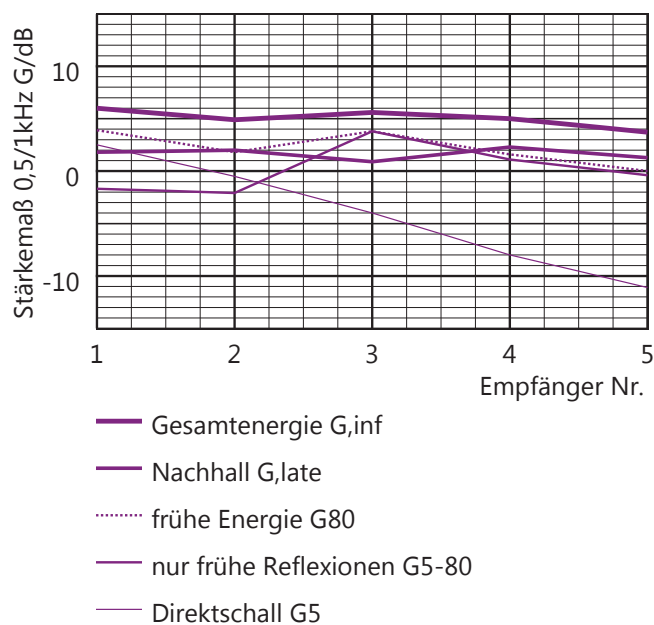


Abbildung 3: Zeit-Energie-Analyse für die fünf Empfänger im Festspielhaus Salzburg (über die Distanz: Empfänger 1 vorne, bis Empfänger 5 hinten auf Balkon)

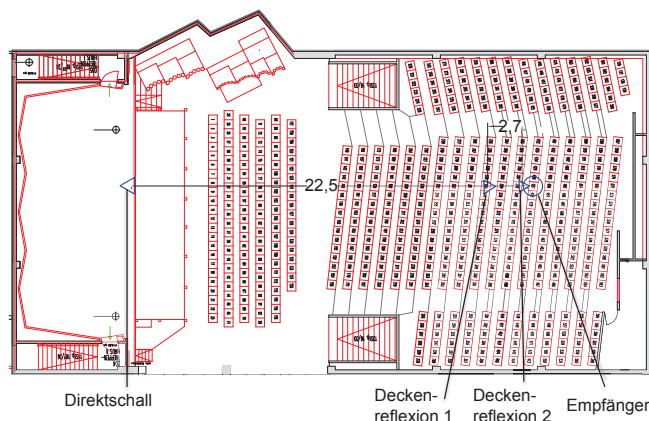


Abbildung 4: Grundriss Konzerthaus Detmold mit Sender- und Empfängerposition.

Setup

Mit einem Volumen von rund 4150 m³ kann das Konzerthaus Detmold als kleinerer Konzertsaal eingeordnet werden, der für sämtliche kammermusikalische Besetzungen genutzt wird und in der Praxis auch das Hochschulorchester fasst. Mit den Abmessungen 34 m x 18 m x 6 bis 9 m sind auch Distanzen wie in größeren Sälen nachstellbar, die Nachhallzeit liegt im unbesetzten Zustand bei ca. 1,6 s. Zur besseren Wiederholbarkeit wurde statt einer realen Schallquelle ein gerichteter Lautsprecher auf der Bühne verwendet (Neumann KH120A, h = 1,5 m), über den ein Geigen-Musikbeispiel abgespielt wurde. Das Sample war ein ca. 18 Sekunden langer, anechoisch und mittels Piezo-Aufnehmer aufgenommener Ausschnitt eines Bach-Solostückes (Verwendung gestattet durch Prof. Mores, HAW Hamburg). Von den 64 über das elektronische Raumakustiksystem Vivace ansteuerbaren Kanälen

wurden zwei Deckenlautsprecher ausgewählt und das Violinsignal wiedergeben. Die Empfängerposition war 22,5 m entfernt vom „Direktschall-Lautsprecher“ und 4,8 bzw. 5,8 m von den Deckenreflexions-Lautsprechern mit Verzögerung 8 und 10 ms, entsprechend einem für die vorliegende Geometrie real möglichen Wegunterschied (siehe Abb. 4). Sowohl der Klang des „Direktschalls“ als auch der „Deckenreflexionen“ wurden durch Filterung nach Gehör optimiert und vier Settings A-C und C', mit geringerem Pegel der Reflexionen, eingerichtet.

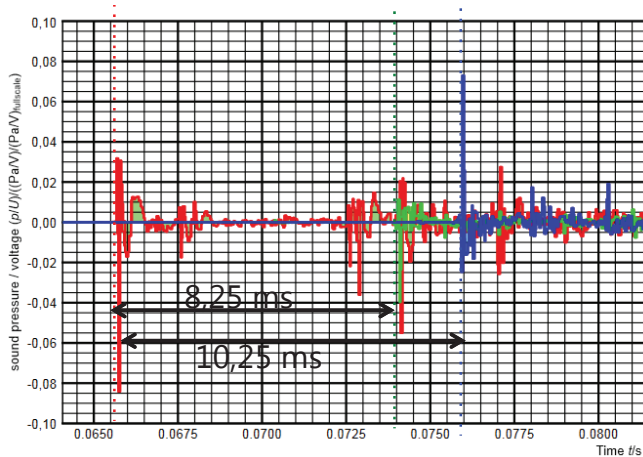


Abbildung 5: Impulsantwort ohne künstliche Reflexionen (rot) und mit zusätzlichen Decken-Reflexionen (grün, blau).

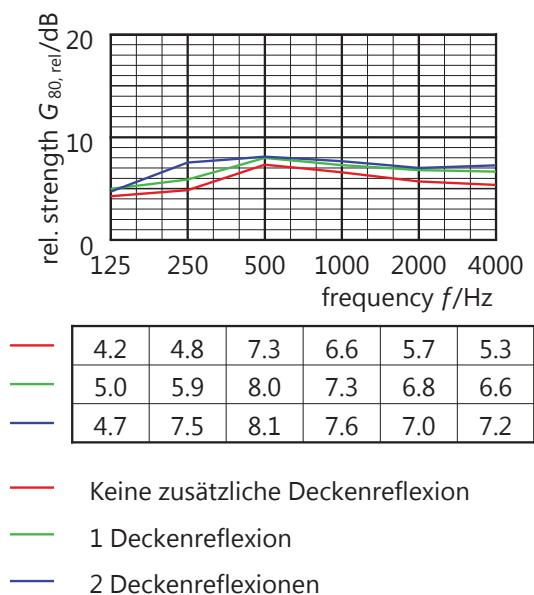


Abbildung 6: Frühes Stärkemaß (early strength) G_{80} ohne künstliche Reflexionen (rot) und mit zusätzlichen Decken-Reflexionen (grün, blau).

Messung

Impulsantworten wurden über den gleichen Signalweg mittels Sweep gemessen. Weitere binaurale Aufnahmen wurden zusätzlich mit der Matlab-Bibliothek Pysound nach psychoakustischen Kriterien analysiert. In Abb. 5 ist ersichtlich, dass die am Empfängerplatz eintreffenden

Reflexionen regelmäßig in der Größenordnung des Direktschalls liegen. Die erste künstliche Reflexion (grün) überlagert sich dabei unbeabsichtigt mit einer bereits vorhandenen Reflexion, die Auswirkungen hiervon sind unklar. Am Beispiel des frühen Stärkemaß (Abb. 6) ist zu sehen, dass die Pegeländerungen durch die Reflexionen in der Größenordnung von 1,5 dB liegen. Das D/R-Verhältnis (nicht gezeigt) sinkt um denselben Wert ab.

Hörversuch

Am Hörversuch nahmen 32 Probanden teil, von denen ca. 1/3 TonmeisterInnen waren, die übrigen Teilnehmer Musiker oder Laien. Die Teilnehmer wurden blind in den abgedunkelten Saal auf den Empfängerplatz geführt. Die 4 Stimuli wurden mittels Dominanz-Paarvergleich dargeboten (12 Paare), d. h. die Teilnehmer hörten immer zwei Stimuli nacheinander und mussten dann ein Urteil abgeben welcher der beiden „näher“ klang. Beide Hälften der Stimuli-Matrix wurden abgefragt. Als Maß der Verlässlichkeit der Probanden kann die Anzahl der sog. Triaden, widersprüchlicher Urteile, herangezogen werden. Triaden können neben Fehlern und Konzentrationschwäche auch auf mehrdimensionale Effekte hinweisen, d. h. dass zwischen zwei Stimuli-Paaren unterschiedliche Cues und Entscheidungs-Maßstäbe herangezogen werden und sich die für das BTL-Modell postulierte eindimensionale Wahrnehmung zwischen Paaren ändert.

Abbildung 7 zeigt die Mittelwerte nach Auswertung der Präferenzmatrizen. Es ist ersichtlich, dass sich mit Hinzufügen der Reflexionen (Stimuli B, C) der gefühlte Abstand gegenüber der Präsentation ohne Reflexion (A) verringert. Die Resultate sind die aller Probanden (N=32) ohne Ausschluss von Triaden sowie mit 21 Teilnehmern nach Ausschluss der „inkonsistenten“ Versuchspersonen ($T = 1$, d. h. kein widersprüchliches Paar erlaubt). Zwischen beiden Gruppen ändert sich die Reihenfolge nicht, die Unterschiede werden etwas deutlicher. Bei Absenken des Pegels der Reflexionen (C') geht der Effekt wieder verloren. Anzumerken ist noch, dass Stimulus C nicht als uneingeschränkt „nahe“ bewertet (Diagramm-Balken). Mögliche Gründe hierfür werden unten diskutiert.

Wiederholungsversuch

Zur Überprüfung der Resultate wurden mit einer anderen Stichprobe (Raumakustik-Kollegen, N=14) binaurale Aufnahmen von den vor Ort präsentierten Stimuli abgehört, diesmal mittels direkter Skalierung bewertet. Die Stimuli waren dabei alle parallel zugänglich bzw. vergleichbar und zwischen zwei Extrema anzuordnen. Die Hörbeispiele konnten schneller gewechselt werden als im vorangegangenen Test.

Das Ergebnis ist das gleiche, auch hier verhelfen die Decken-Reflexionen zu mehr Nähe. Wird der Lautstärkeunterschied eliminiert (C', hier die ganze Aufnahme abgesenkt um 3 dB) wird das Gehörte als „entfernter“ beurteilt.

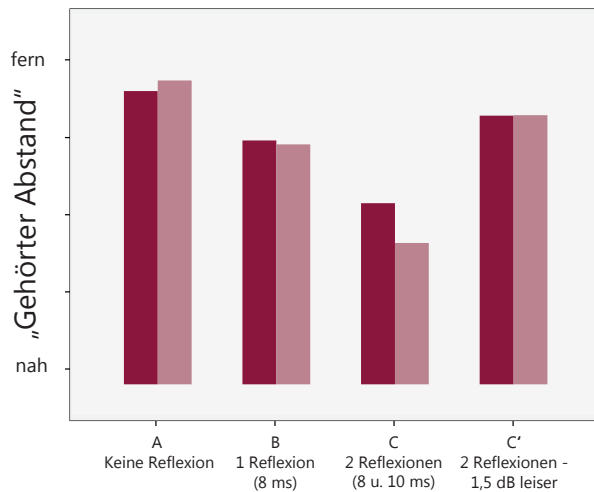


Abbildung 7: Gehörter Abstand bei Zuspielden von 1-2 Deckenreflexionen im Konzerthaus Detmold (dunkelrot: alle 32 VPN, hellrot: 21 konsistente VPN), Paarvergleich in situ.

Diskussion

Die für die raumakustische Praxis relevante Aussage, dass diskrete, frühe Reflexionen Nähe erzeugen können, wurde bekräftigt. Durch das Hinzufügen der Reflexionen erhöht sich der Pegel am Hörplatz – gleichermaßen verringert sich das D/R-Verhältnis um 1,5 dB, was jedoch innerhalb des JNDs von 5 dB liegt. Der Pegel einfluss dominiert also, da sich das D/R-Verhältnis nicht wesentlich ändert. Es deutet sich damit eine Korrelation mit den Pegelgrößen an, in der Raumakustik etwa G und G80, jedoch nicht mit dem D/R-Verhältnis. Es stellt sich die Frage, ob frühe Reflexionen aus der Medianebene ähnlich dem Präzedenzeffekt zum Direktschall „fusioniert“ werden. Außerdem wird wie bei dem Präzedenzeffekt eine Signal-, Pegel-, und Delayabhängigkeit zu finden sein.

Die Aufgabe war nicht immer leicht, da der Stimulus mit ca. 15–20 s fast zu lange gewählt war, um dann nach Pause und Präsentation des zweiten Stimulus ein Urteil im Bezug auf den ersten zu fällen. Die Unterschiede waren gerade für Laien teils klein; um zielführender zu testen sollte die Darbietung kürzer sein – gerade beim Paarvergleich so kurz wie nötig. Einige Probanden merkten an, eine Elevation zu verspüren, d. h. ein Anheben der Schallquelle. Dies könnte durch eine Art Phantomschallquelle zu Stande kommen. Des Weiteren wurde angemerkt, dass der gefühlte Abstand je nach gespielten Tönen, also Frequenzbereichen variierte. Schließlich war der hier gewählt Stimulus durch seine Aufnahmeart (Piezo) fast zu direkt – einige technische Geräusche des Geigenspiel seien manchmal unnatürlich deutlich zu hören gewesen.

Zusammenfassung

Anhand eines Fallbeispiels wurde die Wichtigkeit früher Reflexionen für die Wahrnehmung von Nähe in Konzertsälen demonstriert. In einem Versuch mittels virtueller Akustik wurde gezeigt, dass frühe Einzel-Reflexionen Nähe erzeugen können. Der Einfluss des damit erhöhten Pegels überwiegt das veränderte D/R-Verhältnis.

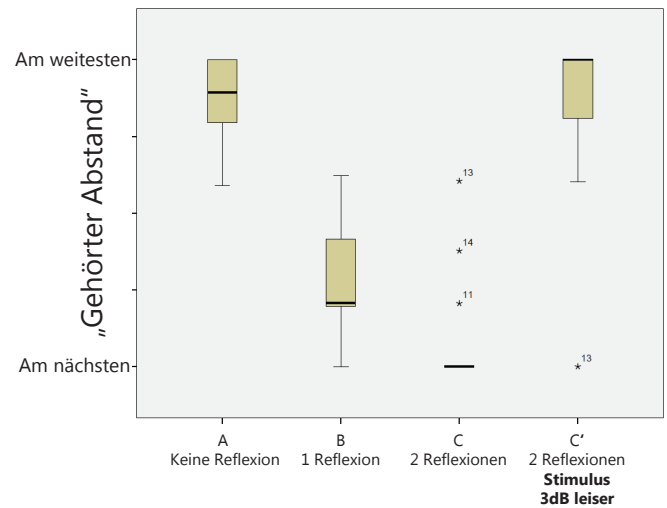


Abbildung 8: Gehörter Abstand bei Zuspielden von 1-2 Deckenreflexionen im Konzerthaus Detmold, direkte Skalierung und Beurteilung der in situ-Aufnahmen im Labor.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert von der Europäischen Kommission im Rahmen des ITN Marie Curie-Projektes Batwoman unter dem 7. Framework Programm (EC grant agreement no. 605867).

Literatur

- [1] Lokki, T. et al: Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *Acoust. Soc. Am.* 132(5), November 2012
- [2] Lachenmayr, W.: Höreindruck und raumakustische Kriterien in Konzertsälen. Diplomarbeit, Institut für Komposition und Elektroakustik. Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, 2012.
- [3] Kuusinen, A. et al: Relationships between preference ratings, sensory profiles, and acoustical measurements in concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (1), Januar 2014.
- [4] Lokki, T. et al: Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (6), Juni 2011
- [5] Bronkhorst, A: Modeling Auditory Distance Perception in Rooms. *Proc. EAA Forum Acusticum Sevilla, Sevilla, Spanien, 2002*
- [6] Bradley, J.S.: Using ISO3382 measures to evaluate acoustical conditions in concert halls. In: *International Symposium on Room Acoustics Design and Science, Hyogo, Japan, Seiten 1–10, 2004.*
- [7] Zamorano, C.: Experimental Investigations on Proximity Perception manipulating Reflections in Virtual and Real Room Acoustical Environments. Masterarbeit, Musikhochschule Detmold, 2014.