

Untersuchung zum Einfluss des direkten Schallanteils auf die Richtung von Hörereignissen in Wiedergabeszenarios mit projizierten Schallquellen

Tom Wühle, Maria Mareen Maravich, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

TU Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik, 01069 Dresden, Deutschland, Email: tom.wuehle@tu-dresden.de

Einleitung

Die richtungsbezogene Wiedergabe von Schall ist ein wichtiger Bestandteil der Implementierung akustischer Szenen. Die Nutzung verteilter Lautsprecher ist jedoch in vielen Fällen, aufgrund räumlicher Gegebenheiten, nicht möglich. Ein Lösungsansatz ist die Erzeugung virtueller Quellen in den entsprechenden Richtungen durch die Projektion von Schall auf reflektierende Flächen (z.B. Wände eines 3D-CAVE) mit Hilfe stark richtender Schallquellen. Das Ziel ist hierbei die Verschiebung der wahrgenommenen Richtung des Hörereignisses weg von der Richtung der realen Quelle hin zur Richtung der jeweiligen virtuellen Quelle. Reale Quellen zur Projektion von Schall (z.B. [1, 2]) werden meist von Lautsprecherarrays gebildet. Diese weisen, aufgrund physikalischer Begrenzungen durch z.B. Arraygröße oder Lautsprecherabstand [3], die erforderliche starke Richtwirkung jedoch nicht gleichförmig und nicht über den gesamten Audiofrequenzbereich auf. Die Wahrnehmung des Nutzers wird daher nicht nur von projiziertem Schall sondern auch von Schall direkt aus Richtung der realen Quelle beeinflusst.

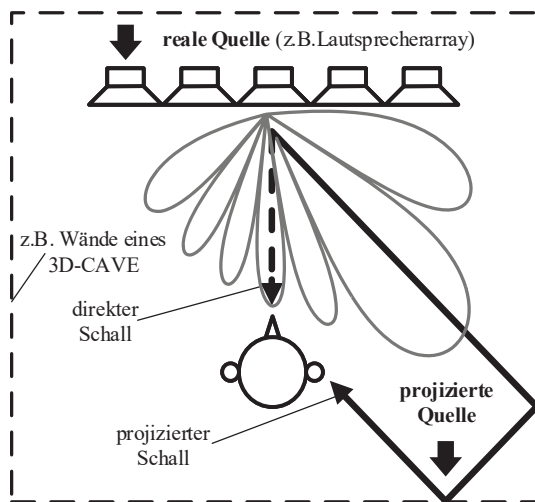


Abbildung 1: Schallanteile und Quellpositionen in einem Wiedergabeszenario mit projiziertem Schall. Für die reale Quelle ist ein exemplarisches Richtdiagramm bei einer mittleren Frequenz dargestellt.

Abbildung 1 veranschaulicht das beschriebene Szenario am Beispiel einer realen Quelle und einer virtuellen Quelle in Einfallsrichtung des projizierten Schalls. Aufgrund des kürzeren direkten Schallpfades erreicht der direkte Schall den Nutzer früher als der projizierte Schall. Darüber hinaus kann der direkte Schall, je nach frequenzabhängiger Richtwirkung der realen Quelle, eine frequenzabhängige Pegeldämpfung im Vergleich zum pro-

projizierten Schall erfahren. Abhängig von seinen Eigenschaften kann der entstehende direkte Schall den wahrgenommenen Effekt der Projektion verschlechtern oder vollständig verhindern [4, 5, 6]. Das Richtverhalten der realen Quelle stellt damit einen entscheidenden Parameter [7] bei der Entwicklung von Wiedergabesystemen zur Projektion von Schall dar. Ein tieferes Verständnis darüber, wie der direkte Schall die auditive Wahrnehmung der Nutzer in derartigen Wiedergabeszenarios beeinflusst, kann die Definition von Minimalanforderungen an das Richtverhalten vereinfachen oder als Grundlage zur Erarbeitung komplexer Signalverarbeitungsansätze dienen. Nach Kenntnis der Autoren wird dies bisher jedoch nur selten betrachtet [8].

In vorangegangenen Studien [5, 6] haben wir verschiedene Aspekte der wahrnehmungsbeeinflussenden Rolle der direkten Schalls bei Wiedergabe von Musik-, Sprach-, oder Rauschsignalen in einem Szenario gemäß Abbildung 1 untersucht. Bei steigendem Pegel des direkten Schalls wurde u. a. beobachtet, dass sich die Hörereignisse in Teile auf trennten, die sich in verschiedenen Richtungen befanden. Die Auftrennung erfolgte dabei meist in Richtung der projizierten Quelle (*hinten rechts*) und in Richtung der realen Quelle (*vorn*). In ausgewählten Fällen, in denen der direkte Schall durch Tiefpassfilterung des Wiedergabesignals gebildet wurde, konnte bei hohen Direkt schallpegeln jedoch eine abweichende Beobachtung gemacht werden: Statt der Auftrennung in Richtung der realen Quelle (*vorn*) kam es zu einer Auftrennung in Richtung *hinten*, also der entgegengesetzten Richtung der realen Quelle in der Horizontalebene und Medianebene. Ein möglicher Erklärungsansatz [6] für das beobachtete Phänomen sind Blauerts richtungsbestimmende Bänder [9]. Danach wird die Lokalisation breitbandiger Signale in der Medianebene, von derjenigen Klasse der richtungsbestimmenden Bänder bestimmt, in der im Vergleich zu den anderen Klassen die größte Signalleistung vorhanden ist [9]. Der betroffene tiefpassgefilterte direkte Schall umfasste zum großen Teil eine Hinten-Klasse der Blauertschen Bänder.

Allerdings weichen die vergleichsweise lang andauernden, z.T. realen, Wiedergabesignale, sowie die Anwesenheit eines zusätzlichen, verzögerten Schallerereignis außerhalb der Medianebene (projizierter Schall) stark von Blauerts [9] Versuchsbedingungen ab. Die vorliegende Studie untersucht daher weiterführend, ob und in welchem Ausmaß eine Variation der spektralen Zusammensetzung des direkten Schalls in Anlehnung an die Blauertschen Bänder [9] einen systematischen Einfluss auf die Richtung der Hörereignisse bzw. der Hörereignisauf trennung in einem Wiedergabeszenario mit projiziertem Schall hat.

Experiment

Versuchsaufbau

Der Versuch wurde im abgedunkelten, reflexionfreien Raum des Lehrstuhls für Akustik und Haptik durchgeführt. Direkter und projizierter Schall wurden dabei über separate Lautsprecher (Event 20/20 bas) wiedergegeben, die sich in der Horizontalebene in einem Abstand von je 3 m von den Versuchsteilnehmern befanden. Die Versuchsteilnehmer wurden, nach vorn orientiert, auf einem Stuhl platziert. Der Kopf der Versuchsteilnehmer war nicht fixiert, sie wurden jedoch instruiert Kopfbewegungen während des Versuchs zu vermeiden. Signalgenerierung und Datenerfassung erfolgten mittels PC und MATLAB Software. Die Ansteuerung der Lautsprecher erfolgte über eine digitale Soundkarte (RME Madiface) in Kombination mit einem DA-Wandler (Ferrofish A16 Mk2).

Versuchsgestaltung und Stimuli

Die Festlegung des Wiedergabeszenarios und der Wiedergabesignale folgte weitgehend den vorangegangenen Studien [5, 6]. Die Richtungen für den direkten bzw. projizierten Schall waren *vorn* (0°) bzw. *hinten rechts* (225°). Der Wiedergabepiegel des projizierten Schalls am Hörerort betrug 65 dB(A). Seine Verzögerungszeit gegenüber dem direkten Schall betrug 10 ms. Als Wiedergabesignale wurden die Musiksequenz und das breitbandige (10 Hz ... 10 kHz) rosa Rauschen aus [5, 6] ausgewählt. Diese hatten eine Gesamtlänge von jeweils 4,6 s.

Trotz der Instruktion Kopfbewegungen zu vermeiden, verbleibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit unbewusster Bewegungen des Kopfes. Blauert [10] fasst Studien zusammen, wonach dies für Signaldauern zwischen 200 ms und 300 ms keinen nennenswerten Einfluss auf die Lokalisationsleistung hat. Um eventuelle unbewusste Kopfbewegungen als Einflussfaktor auf das beobachtete Phänomen der abweichenden Hörereignisauftrennung zu untersuchen, wurde als zusätzliches Wiedergabesignal das rosa Rauschen mit einer Gesamtlänge von 220 ms einbezogen. Alle Wiedergabesignale wurden linear mit einer Länge von je 100 ms (Musik) bzw. 10 ms (Rauschen) ein- und ausgeblendet.

Zur Erzeugung des direkten Schalls wurden die Wiedergabesignale unterschiedlich gefiltert (Butterworth-Charakteristik, 96 dB/oct). Um die Reproduzierbarkeit des Phänomens der abweichenden Hörereignisauftrennung zu untersuchen, wurde erneut ein entsprechender Tiefpass [5, 6] (*TP*) verwendet. Außerdem fünf Bandpässe (*BP*), deren Durchlassbänder sich hauptsächlich auf den Durchlassfrequenzbereich des Tiefpasses verteilen. Sie enthielten verschiedene Klassen der richtungsbestimmenden Bänder [9]. Zusätzlich wurde der Fall ohne Direktschallfilter (*Flat*) berücksichtigt. Die direkten Schalle wurden mit dem gleichen A-bewerteten Pegel wiedergegeben, wie er im Falle der ursprünglichen Tiefpassfilterung vorlag (Musik: 65 dB(A); Rauschen: 61 dB(A)). Abbildung 2 stellt die Anordnung von Versuchsteilnehmer und Lautsprechern

dar und fasst ausgewählte Versuchsparameter zusammen. Tabelle 1 gibt die Eckfrequenzen der verwendeten Filter und zusätzlich die jeweils enthaltenen Klassen der richtungsbestimmenden Bänder [9] an.

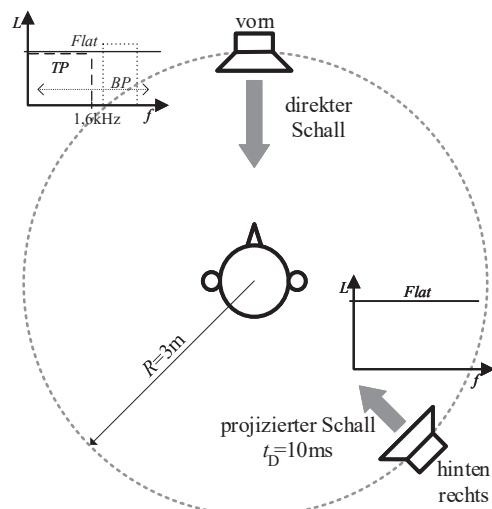


Abbildung 2: Versuchsaufbau und -parameter.

Tabelle 1: Eckfrequenzen der Filter zur Erzeugung des direkten Schalls sowie die im Durchlassband enthaltene(n) Klasse(n) der richtungsbestimmenden Bänder (nach aufsteigender Frequenz sortiert, mit (*) gekennzeichnete Klassen: 90% Signifikanzniveau, restliche: wahrscheinlichster Fall)[9].

Kürzel	f_u [Hz]	f_o [Hz]	enthaltene Klasse(n) [9]
<i>Flat</i>	-	-	vorne-hinten*- vorne*-vorne-oben*
<i>TP</i>	-	1600	vorne-hinten*
<i>BP1</i>	891	1413	hinten*
<i>BP2</i>	708	1778	hinten*
<i>BP3</i>	708	5632	hinten*-vorne*-vorne
<i>BP4</i>	224	562	vorne
<i>BP5</i>	224	5632	vorne-hinten*- vorne*-vorne

Der Versuch umfasste 21 Basiszustände (3 Wiedergabesignale, 7 Direktschallfilter). Diese wurden je zweimal wiederholt, sodass sich insgesamt 63 zu beurteilende Zustände ergaben. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, die Richtung ihres Hörereignisses auf einer Skizze zu markieren. Diese war vergleichbar mit Abbildung 3, enthielt jedoch nur einen Kreisring in neutraler Farbe. Falls erforderlich, durften die Versuchsteilnehmer mehrere Richtungen markieren. Diese mussten dann jedoch zusätzlich anhand von Rangnummern ihrer Dominanz nach geordnet werden. Ist die Signalleistung ungünstig auf die verschiedenen Klassen der richtungsbestimmenden Bänder verteilt, kann u. U. eine Hörereignisauftrennung in Richtung *vorn* und *hinten* auftreten [9]. Für den vorliegenden Versuch wurde daher, im Gegensatz zu den vorangegangenen Studien [5, 6], eine maximale Anzahl von drei Richtungen zugelassen. Während eines Beurteilungsvorganges konnten die

Versuchsteilnehmer das jeweilige Wiedergabesignal beliebig oft abspielen. Die Erfassung der Daten erfolgte mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche. Die markierten Richtungen wurden nach Beendigung eines jeden Beurteilungsvorganges gelöscht. Die Reihenfolge der zu beurteilenden Zustände wurde für jeden Versuchsteilnehmer randomisiert.

Um sich mit der Aufgabe vertraut zu machen absolvierten die Versuchsteilnehmer ein Training, das ausgewählte Basiszustände beinhaltete. Darüber hinaus absolvierten die Versuchsteilnehmer vorab einen kurzen Richtungshörtest. Dabei wurde aus verschiedenen definierten Richtungen ein Rauschsignal wiedergegeben und anschließend die entsprechende Hörereignisrichtung verbal abgefragt. Die durchschnittliche Dauer des gesamten Versuchs betrug ca. 45 min.

Versuchsteilnehmer

An den Experiment nahmen 15 normal hörende Personen teil (13 männlich / 2 weiblich). Das Alter der Versuchsteilnehmer lag zwischen 23 und 32 Jahren (Mittelwert 27 Jahre). Alle waren Studenten oder Mitarbeiter der TU Dresden. Neun von ihnen waren bereits vorher an verschiedenen auditiven Wahrnehmungsexperimenten beteiligt.

Ergebnisse und Diskussion

Die angegebenen Hörereignisrichtungen lagen im Wesentlichen in Richtung der projizierten Quelle (*hinten rechts*), der realen Quelle (*vorn*) und ihrer entgegengesetzten Richtung (*hinten*). Wie in den vorangegangenen Studien [5, 6] wurden die angegebenen Richtungen entsprechend ihrer Lage innerhalb der Horizontalebene kategorisiert:

v - Hörereignis in der vorderen Halbebene

h - Hörereignis in der hinteren Halbebene

Mit ein bis maximal drei Hörereignisrichtungen pro Beurteilung ergeben sich insgesamt 14 mögliche Urteilkategorien: (*h, hh, hv, vh, v, vv, hhh, hhv, hvh, hvv, vhh, vhv, vvh, vvv*). Als Urteil eine Basiszustandes wurde diejenige Urteilkategorie festgelegt, welche innerhalb der Wiederholungen am häufigsten aufgetreten ist. Trat keine Beurteilungskategorie mehrfach auf, wurde das Urteil stattdessen als *unsicher* kategorisiert. Der resultierende Datensatz umfasste 315 Urteile (15 Versuchsteilnehmer, 21 Basiszustände).

Urteile mit drei Hörereignisrichtungen traten nur einzeln (ca. 3,5%) auf. In diesen Fällen wurde der direkte Schall mittels Bandpassfilterung erzeugt. Die zugrundeliegenden Beurteilungen zeigten dabei im Wesentlichen Hörereignisauftrennungen, die neben der Richtung der projizierten Quelle gleichzeitig in Richtung vorn und hinten erfolgten. Aufgrund der vergleichsweise geringen Häufigkeit wurden diese Urteile den übergeordneten Urteilkategorien mit zwei Hörereignisrichtungen zugeordnet. Es verblieben fünf Urteilkategorien (*h, hh, hv, vh, v*) und ca. 3,5% unsichere Urteile. Abbildung 3 fasst die Kategorisierung der Richtungsangaben zusammen. Die schwarzen Marker kennzeichnen dabei die

Hörereignisrichtung(en) innerhalb der jeweils durch verschiedenfarbige Kreisringe symbolisierten Urteilkategorien. Die Ziffer innerhalb der Marker kennzeichnet die Rangfolge der Dominanz der zugehörigen Hörereignisse (1-Haupttrichtung, 2-Nebenrichtung).

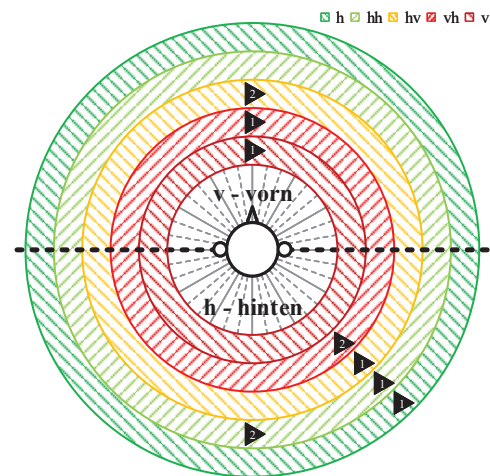


Abbildung 3: Kategorisierung der von den Versuchsteilnehmern angegebenen Hörereignisrichtungen. Kreisringe symbolisierten die aufgetretenen Urteilkategorien. Marker kennzeichnen die zugehörige(n) Hörereignisrichtung(en) und ihre Dominanz (1-Haupttrichtung, 2-Nebenrichtung).

Abbildung 4 zeigt die relative Häufigkeit der aufgetretenen Urteilkategorien für das Wiedergabesignal Musik in Abhängigkeit der verschiedenen Direktschallfilter. Im Fall *Flat* wird die Dominanz des direkten Schalls durch das frühere Eintreffen am Hörerort besonders deutlich. Es kam zur Hörereignisauftrennung mit der Richtung der realen Quelle (*vorn*) als Haupttrichtung. Häufig traten sogar ausschließlich Hörereignisse in Richtung *vorn*, was die Wirkung des Präzedenzeffekts (z. B. [10]) zeigt. Dieser wurde, im Gegensatz zu den vorangegangenen Studien [5, 6], stärker begünstigt, da der hier ungefilterte direkte Schall eine hohe Kohärenz mit dem projizierten Schall aufwies. Im Fall *TP* trat das Phänomen der abweichenden Hörereignisauftrennung erneut auf. Dies kam in den Fällen mit Direktschall in den Hinten-Klassen der Blauertschen Bänder [9] (*BP1* und *BP2*) häufiger vor. Dabei wurde die Richtung der realen Quelle (*vorn*) außerdem nie als Haupttrichtung angegeben. Umfasste der direkte Schall die Hinten-Klasse vollständig (*BP2*), traten überhaupt keine Hörereignisse mehr in Richtung *vorn* auf. Beinhaltete der direkte Schall nun zusätzlich die im höheren Frequenzbereich angrenzende Vorn-Klasse, kam es zu entgegengesetzten Urteilen. Es trat hauptsächlich Hörereignisauftrennung in Richtung der realen (*vorn*) und projizierten Quelle *hinten rechts* auf. Zum Teil wurde *vorn* dabei bereits als Haupttrichtung genannt. Lag der Direktschall in der im tieferen Frequenzbereich angrenzenden Vorn-Klasse (*BP4*) traten fast ausschließlich Hörereignisse in der hinteren Halbebene der Horizontalebene auf. Zunächst kam es damit zu keiner Begünstigung der Hörereignisauftrennung in Richtung der realen Quelle (*vorn*), wobei das verhältnismäßig tief liegende Durchlassband von *BP4*, die Anwesenheit des

breitbandigen projizierten Schalls in der Horizontalebene, sowie die vergleichsweise höhere Unsicherheit der Urteile in der zugehörigen Vorn-Klasse bei Blauerts Experimenten [9] berücksichtigt werden muss. Vergleicht man die Ergebnisse von *BP2* und *TP* sowie von *BP3* und *BP5* lässt sich jedoch erkennen, dass die Dominanz der Richtung *vorn* durch die Anwesenheit der Vorn-Klasse von *BP4* innerhalb eines breitbandigeren direkten Schalls verstärkt wurde. Die Ergebnisse für das Wiedergabesignal Rauschen zeigen vergleichbare Tendenzen. Das gilt sowohl für den Fall von 4,6 s, als auch für den Fall von 220 ms Signallänge. Aufgrund des beschränkten Umfangs, kann an dieser Stelle jedoch keine detaillierte Darstellung und Diskussion erfolgen.

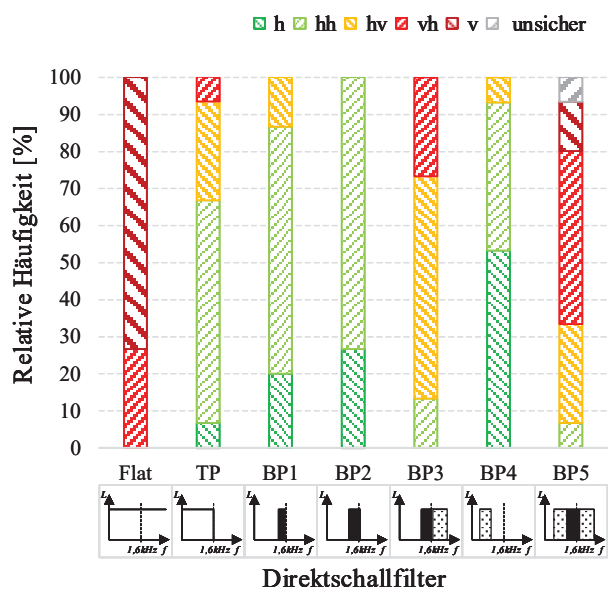


Abbildung 4: Relative Häufigkeit der aufgetretenen Urteilkategorien (vgl. Abbildung 3) für das Wiedergabesignal Musik in Abhängigkeit der verschiedenen Direktschallfilter (vgl. Tabelle 1). Schwarze bzw. schraffierte Frequenzbereiche in den Piktogrammen von *BP1* bis *BP5* kennzeichnen Hinten- bzw. Vorn-Klassen nach [9].

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat den Einfluss der spektralen Zusammensetzung des direkten Schalls auf die Richtung von Hörereignissen in einem Wiedergabeszenario mit projiziertem Schall (reale Quelle *vorn*, projizierte Quelle *hinten rechts*) untersucht. Für den direkten Schall wurden entsprechend hohe Pegel gewählt, sodass es zur Auftrennung von Hörereignissen [5, 6] in verschiedene Richtungen kam. Trotz der Anwesenheit des breitbandigen und verzögerten projizierten Schalls in der Horizontalebene konnte folgendes festgestellt werden: Liegt der direkte Schall innerhalb bestimmter Klassen der richtungsbestimmenden Bänder [9], werden die zugehörigen Richtungen bei der Hörereignisauftrennung begünstigt. Umfasste der direkte Schall ausschließlich Hinten-Klassen, kam es zur Hörereignisauftrennung in Richtung *hinten* und *hinten rechts*. Es trat somit keine Lokalisation mehr in Richtung der realen Quelle (*vorn*) auf. Betrachtet man

das Ziel der Projektion nur ein Hörereignis in Richtung der projizierten Quelle zu erreichen, ist auch diese Art der Hörereignisauftrennung nicht ideal. Die verbleibenden Hörereignisrichtungen liegen jedoch zumindest nahe um die ursprüngliche Einfallsrichtung des projizierten Schalls. Das gezielte Verstärken bzw. Abschwächen verschiedener richtungsbestimmender Bänder im direkten Schall kann damit eine unerwünschte Lokalisation in Richtung der realen Quelle bei der Projektion von Schall verhindern.

Danksagung

Diese Studie wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projektnummer: AL 1473/6-1) gefördert. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, sowie den Versuchsteilnehmern für die Teilnahme an dieser Studie.

Literatur

- [1] KATAYAMA, M. ; TAKUMAI, S. ; IMAOKA, K. : *Speaker Device and Audio Signal Processing Method*. July US Patent 9,674,609 B2, 2017
- [2] *IKO - by IEM and Sonible*. <http://iko.sonible.com/>, accessed: Nov. 24th, 2017
- [3] OLSON, H. : *Acoustical Engineering*. D. Van Nostrand Company INC., Princeton, New Jersey, Toronto, New York, London, 1957
- [4] WÜHLE, T. ; MERCHEL, S. ; ALTINSOY, M. : Untersuchungen zur Wahrnehmung projizierter Schallquellen. In: *DAGA 2016 - 42nd German Annual Conference on Acoustics*, 2016
- [5] WÜHLE, T. ; MERCHEL, S. ; ALTINSOY, M. : Evaluation of auditory events with projected sound sources using perceptual attributes. In: *Audio Engineering Society 142nd Convention*, 2017
- [6] WÜHLE, T. ; ALTINSOY, M. : Investigation of auditory events with projected sound sources. In: *173rd Meeting of Acoustical Society of America and 8th Forum Acusticum*, 2017
- [7] SCHMEDER, A. : An exploration of design parameters for human-interactive systems with compact spherical loudspeaker arrays. In: *AMBISONICS SYMPOSIUM, Graz*, 2009
- [8] ZAGALA, F. ; LINKE, J. ; ZOTTER, F. ; FRANK, M. : Amplitude Panning between Beamforming-Controlled Direct and Reflected Sound. In: *Audio Engineering Society Convention 142*, 2017
- [9] BLAUERT, J. : Sound Localization in the Median Plane. In: *ACUSTICA 22* (1969), November, Nr. 4, S. 205 – 213
- [10] BLAUERT, J. : *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1997