Realisierung eines Schallprojektors mit verbessertem Abstrahlverhalten im hohen Frequenzbereich

Tom Wühle, Friedrich Beyer, Lukas Bulla, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy
TU Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik, 01069 Dresden, Deutschland, Email: tom.wuehle@tu-dresden.de

Einleitung

Moderne Multimedia-, VR- oder AR-Produktionen weisen immer häufiger immersive akustische Szenen auf. Dies erfordert räumliche Audiowiedergabesysteme, die effizient und einfach realisierbar sind. Insbesondere im VR- und AR-Bereich, sollten diese Wiedergabesysteme zudem die Umgebung des Hörers möglichst minimal beeinflussen. Die räumliche Audiowiedergabe in einer 3D-CAVE stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, da hier die um den Nutzer angeordneten Begrenzungsflächen üblicherweise zur gleichzeitigen Wiedergabe visueller Szenen genutzt werden. Die Platzierung verteilter Lautsprecher im Raum um dem Nutzer, sowie auf den Begrenzungsflächen selbst, würde die visuelle Wiedergabe stören und ist damit unmöglich.

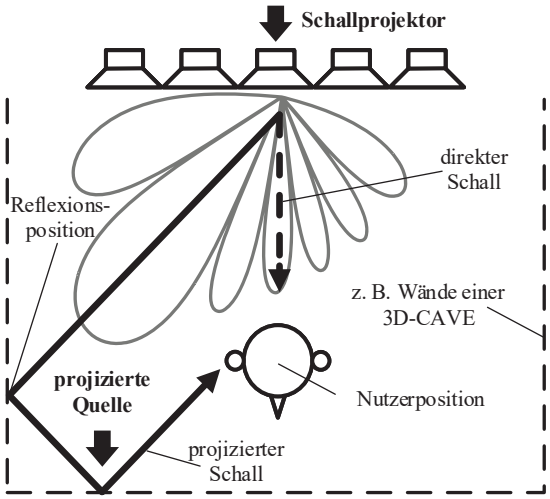

Abbildung 1: Schallanteile und Quellpositionen bei der Schallprojektion am Bsp. einer hinten offenen 3D-CAVE. Das Richtdiagramm gilt schematisch für eine mittlere Frequenz.

Eine Methode zur räumlichen Audiowiedergabe, die ohne die Platzierung verteilter Lautsprecher auskommt, ist die Projektion von Schall. Dabei wird Schall gebündelt in gezielte Raumreflexionspfade abgestrahlt um den Nutzer aus Richtung dieser Reflexionen zu erreichen. Abbildung 1 veranschaulicht dies beispielhaft für den Fall einer hinten offenen 3D-CAVE und der gewünschten Reflexionsrichtung vorne rechts. Um auf diese Weise Hörereignisse in den zugehörigen Richtungen zu erzeugen, müssen Schallprojektoren jedoch möglichst wenig Schall direkt in Richtung des Nutzers abstrahlen. Andernfalls kann es durch den Präzedenzeffekt zur Lokalisation in Richtung des früher eintreffenden Direktschalls und damit des Schallprojektors kommen (z. B. [1]). Konventionelle Schallprojektoren bestehen daher meist aus stark richtenden, linienartig oder flächenmäßig angeordneten Lautsprecherarrays.

In der Praxis ist die Bündelungsleistung von Lautsprecherarrays jedoch prinzipiell sowohl zu tiefen Frequenzen, als auch zu hohen Frequenzen beschränkt. Die untere Grenzfrequenz wird dabei durch die Arraygröße bestimmt. Dies stellt im Hinblick auf die Handhabbarkeit entsprechender Wiedergabesysteme jedoch nur einen eingeschränkten Optimierungsparameter dar. Die obere Grenzfrequenz wird hingegen durch den Lautsprecherabstand bestimmt. Ist dieser Abstand größer als die Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz, so kommt es zu Spatial Aliasing wodurch die Bündelungsleistung zusammenbricht. Einen Lösungsansatz um möglichst weit zu hohen Frequenzen hin zu bündeln stellt die Verwendung einer großen Anzahl kleiner Lautsprecher dar, die dicht nebeneinander angebracht werden (z. B. [2, 3]). Die große Lautsprecheranzahl bedeutet in der Regel jedoch eine entsprechend hohe Anzahl an erforderlichen DSP- und Verstärkerkanälen. Die kleine Lautsprechergröße bedeutet zudem Begrenzungen hinsichtlich Belastbarkeit und Frequenzgang. Abhängig von der konkreten Anwendung können diese Randbedingungen unerwünscht sein.

Die vorliegende Studie behandelt einen alternativen Lösungsansatz zur Verbesserung des Abstrahlverhaltens bei hohen Frequenzen, der ohne die Verwendung einer Vielzahl kleiner Lautsprecher und die damit verbundenen Randbedingungen auskommt.

Konzept

Der alternative Lösungsansatz basiert voranging auf dem zusätzlichen Einsatz einer Schallbarriere. Diese wird so zwischen Array und Nutzer platziert, dass sie hochfrequenten Direktschall möglichst stark verringert und gleichzeitig den projizierten Schall möglichst minimal beeinflusst. In Bezug auf den Nutzer sind die Lautsprecher am Schallprojektor damit indirekt platziert. Durch die Barriere sinken die Anforderungen an das hochfrequente Bündelungsverhalten des Arrays. Grundsätzlich kann damit ein Array mit größerem Lautsprecherabstand bzw. auch mit größeren Lautsprechern eingesetzt werden. Unter Umständen kann dadurch auch die Anzahl der erforderlichen Lautsprecher verringert werden.

Unabhängig von der Nutzung in einem Array, strahlen die einzelnen Arraylautsprecher höhere Frequenzen stärker in Richtung ihrer Hauptachse ab. Die so entstehende Richtwirkung setzt ein, sobald die Wellenlängen der abgestrahlten Frequenzen die Größenordnung des Membrandurchmessers unterschreiten und nimmt mit steigender Frequenz zu. Im Hinblick auf die Schallprojektion kommt es dadurch zu einem ungünstigen Ef-

fekt im Übertragungsverhalten des gesamten Arrays. Der Betrag der hochfrequenten Schallanteile außerhalb der Hauptachse des Arrays verringert sich proportional zur Richtwirkung der einzelnen Arraylautsprecher [4]. Im projizierten Schall werden die hochfrequenten Anteile damit umso geringer, je weiter die Hauptkeule durch Beamforming in eine gewünschte Reflexionsrichtung außerhalb der Hauptachse des Arrays geschwenkt wird (vgl. Abbildung 1). Die hochfrequenten Anteile im Direktschall werden dadurch im Verhältnis zum projizierten Schall größer, was umso stärker ausgeprägt ist, je näher sich der Nutzer in Richtung der ursprünglichen Hauptachse des Arrays befindet.
Zusätzlich zur Verwendung einer Schallbarriere beinhaltet der alternative Lösungsansatz daher die bestmögliche Ausrichtung der Hauptachse des Arrays in Richtung eines gewünschten Reflexionspfades. Sind variable Reflexionspfade erforderlich, wird dies weiterhin mittels Beamforming realisiert. Dabei wird das Array so ausgerichtet, dass sich die gewünschten Reflexionspfade möglichst nah um seine Hauptachse befinden. Besteht die Möglichkeit die Reflexionspfade in separate Richtungsbereiche zu gruppieren, können dafür separate Arrays genutzt werden. Dabei kommen sowohl eine gemeinsame Barriere, als auch separate Barrieren in Betracht.

Entwurf

Für den Entwurf eines Schallprojektors nach dem alternativen Konzept wurde als Nutzungskontext ein 3D-CAVE Szenario nach Abbildung 1 mit einem mittig positionierten Nutzer ausgewählt. Davon ausgehend ergaben sich zunächst einige allgemeine Randbedingungen. Um einen problemlosen Zugang zu gewährleisten, sollte die maximale Seitenlänge des Projektors auf ca. 1 m beschränkt werden. Für die Anregung der Reflexionspfade in den Richtungen rechts bzw. links vom Nutzer sollten jeweils separate Arrays vorgesehen werden. Diese sollten sich sich hinter einer gemeinsamen Schallbarriere befinden. Zusätzlich sollte die Barriere einen Lautsprecher zur Wiedergabe tiefer Frequenzen beinhalten, die aufgrund der konstruktionsbedingten Größenbeschränkung des Projektors nicht gerichtet von den Arrays abgestrahlt werden können. Abbildung 2 fasst den schematischen Aufbau des Schallprojektors zusammen.

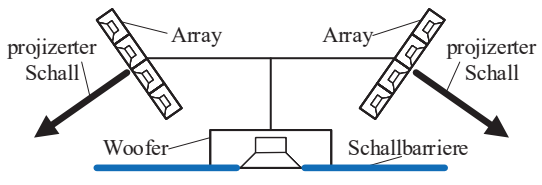

Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Schallprojektors.

Schallbarriere

Im Rahmen der festgelegten Randbedingungen hinsichtlich Größe und Transportierbarkeit wurde eine quadratische MDF-Platte mit einer Seitenlänge von 90 cm und einer Dicke von 12 mm als Basis für die Schallbarriere gewählt. Weitere Parameter zur Optimierung der Barriere stellen Absorberbelag und Kantendesign dar [5]. Diese wurden anhand von Messungen in reflexionsfreier Umgebung festgelegt. Für mehrere Kombinationen aus verschiedenen Absorbern und Kantendesigns wurden Übertragungsfunktionen zu Punkten in Richtung einer potentiellen Reflexions- und Nutzerposition (vgl. Abbildung 1) im Abstand von etwa 2 m von der Barriere gemessen. Die Anregung erfolgte zunächst nicht über ein Array, sondern über einen einzelnen 2-Zoll Breitbandlautsprecher (*Tangband W2 800-SL*) in einem geschlossenen Gehäuse. Dieser befand sich in einem Abstand von 20 cm zur Rückseite und Seitenkante der Barriere. Er war damit in Bezug auf die Nutzerposition vollständig verdeckt und in Bezug auf die Reflexionsposition vollständig sichtbar. Seine Hauptachse war auf die Reflexionsposition ausgerichtet.

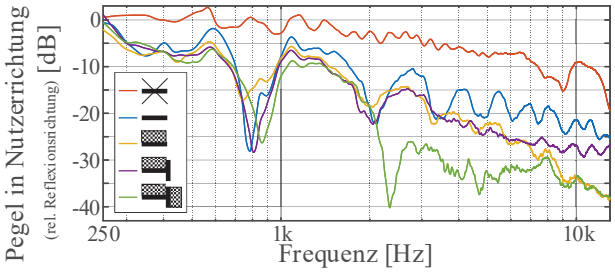

Abbildung 3: Einfluss von Absorberbelag und Kantendesign auf das akustische Abschattungsvermögen der Schallbarriere.

Abbildung 3 fasst die Messergebnisse verschiedener Konditionen zusammen. Dargestellt ist jeweils die Differenz der gemessenen Übertragungsfunktionen in Nutzer- und Reflexionsrichtung. Negative Werte bedeuten, dass der Schall in Nutzerrichtung im Verhältnis zum Schall in Reflexionsrichtung einen entsprechend geringeren Pegel aufweist. Bereits die Verwendung der einfachen Platte (blau) führte gegenüber dem ursprünglichen Richtverhalten des Lautsprechers (rot) zu einer Verringerung des Pegels in Nutzerrichtung. Dieser Effekt nimmt mit steigender Frequenz zu und kann mit Reflexion und Beugung an der Barriere begründet werden. Die ungleichen Abstände der gewählten Lautsprecherposition zu den Seitenkanten der Barriere verursachen ungleiche Weglängen für die entstehenden Beugungspfade. Dadurch können Kammfiltereffekte in Nutzerrichtung auftreten, die zu einer Welligkeit der zugehörigen Übertragungsfunktion führen. Das Aufbringen eines porösen Absorbers (Dicke: 8 cm) auf die Platte (gelb), führte ab ca. 3 kHz zu einer weiteren Verringerung des Pegels in Nutzerrichtung um bis zu ca. 10 dB. Das zusätzliche Anbringen einer Kante (T-Profil, 10 cm) an die Platte (violett) reduzierte den Effekt des Absorbers oberhalb 7 kHz. Offenbar begünstigt das entstandene scharfe Kantenprofil die Beugung hoher Frequenzen um die Platte. Wurde auch auf die Kante ein poröser Absorber aufgebracht (grün), glich das den negativen Effekt der Kante ab ca. 7 kHz wieder aus. Darüber hinaus kam es dadurch zu einer zusätzlichen Verringerung des Pegels an der Nutzerposition ab ca. 2 kHz. Dies kann sowohl auf die vergrößerte wirksame Absorptionsfläche, aber auch auf die Interaktion des Absorbers auf der Kante mit den um die Kante gebeugten Schallanteilen zurückzuführen sein.

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde in dieser Kondition die stärkste Verringerung des Pegels in der Nutzerposition erreicht. Beim Aufbau der Schallbarriere wurden daher Absorber und Kanten entsprechend gestaltet.

Lautsprecher

Die Arrays wurden linienförmig aus jeweils vier Lautsprechern (*Tangband W2 800-SL*) aufgebaut. Diese befanden sich in einzelnen geschlossenen Gehäusen (ca. 0,1 l) mit einem Abstand von 8 cm zwischen ihren Mittelpunkten. Das Bündelungsverhalten der resultierenden 32 cm langen Arrays setzte damit bei ca. 1 kHz ein und war durch Spatial Aliasing auf ca. 4,5 kHz begrenzt. Um in diesem Frequenzbereich eine möglichst gute Bündelung des Schalls an der Reflexionsposition zu erzielen, wurde die Amplitude der Arraylautsprecher zum Rand des Arrays hin gedämpft (z. B. [2]). Die Gewichtung basierte auf einem Hanning-Fenster und betrug maximal -9 dB. Im Richtverhalten des Arrays konnten dadurch Nebenkeulen zwischen 1 kHz und 3 kHz um mehr als 10 dB reduziert werden. Der Tieftonlautsprecher (*Peerless HDS-P830875*) wurde mit einem geschlossenen Gehäuse (ca. 10 l) in der Mitte der Barriere angebracht. Die Aufteilung der Wiedergabefrequenzbereiche von Array und Tieftonlautsprecher erfolgte mit einer Linkwitz-Riley Frequenzweiche bei ca. 1 kHz. Die Hauptachsenfrequenzgänge von Array und Tieftonlautsprecher wurden mit parametrischen Equalizern entzerrt.

Ansteuerung

Die Lautsprecher wurden über eine Mehrkanalsoundkarte (*RME Madiface USB*), DA-Wandler (*Ferrofish A16 MK-II*) und Verstärker (*AUDAC DPA616, the t.amp S100 MK II*) angesteuert. Routing, Amplitudengewichtung, Equalizer und Frequenzweiche erfolgten softwaremäßig (*RME Totalimix, Pure Data*). Es wurde auch eine Verzögerung und Pegelanpassung vorgesehen, um den Einfluss des Wegunterschieds zwischen Hoch- und Tieftonzweig im realen Wiedergabeszenario zu kompensieren.

Messtechnische Evaluierung

Abbildung 5 zeigt den aufgebauten Schallprojektor. Zur Beurteilung seiner Effektivität wurde sein Richtverhalten im Abstand vom 2 m gemessen. Dafür wurde das Array, gemäß der vorab durchgeführten Messung zur Optimierung der Schallbarriere, auf eine potentielle Reflexionsposition ausgerichtet. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Der dargestellte Pegel wurde auf den Pegel in Nutzerrichtung normiert.

Ab etwa 1 kHz wurde der Schall gebündelt in die Richtung der Reflexion abgestrahlt. Durch die Überlagerung der Bündelungsleistung des Arrays mit dem Abschattungseffekt der Schallbarriere, war der Pegel in Nutzerrichtung dabei zum Teil um mehr als 40 dB reduziert. Bei etwa 5,5 kHz ging die Bündelungsleistung des Arrays durch Spatial Aliasing zurück. Durch den anhaltenden Abschattungseffekt der Barriere war der entsprechende Pegel in Nutzerrichtung jedoch weiterhin um ca. 30 dB geringer als der Pegel in Reflexionsrichtung. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung gegenüber der alleinigen Nutzung eines Lautsprecherarrays ohne Barriere dar.

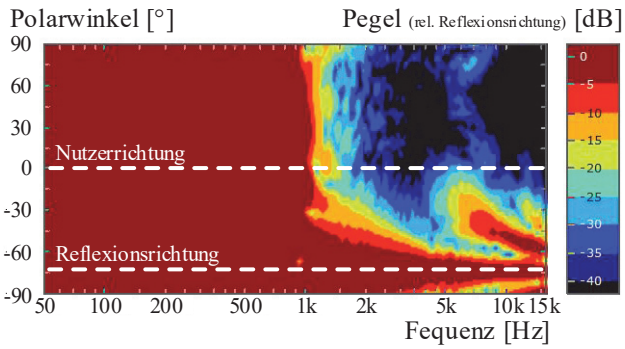

Abbildung 4: Richtverhalten des aufgebauten Schallprojektors im Abstand von 2 m.

Psychoakustische Evaluierung

Zur weiteren Beurteilung der Effektivität des aufgebauten Schallprojektors wurde ein Wahrnehmungsexperiment durchgeführt. Dazu wurde ein Szenario gemäß Abbildung 1 in einem akustisch optimierten Besprechungsraum nachgebildet. Als Reflexionsflächen wurden hölzerne Panele in den erforderlichen Positionen platziert. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach einer vergleichbaren Methodik wie in einer vorangegangenen Studie [1]. Aufgabe der Versuchspersonen war es auf einer GUI einen Marker in der Richtung des Hörereignisses zu platzieren. Falls sich das Hörereignis in mehrere Richtungen auftrennte (vgl. [1]) war die Hauptrichtung anzugeben. Als Stimuli wurden natürliche Wiedergabesignale ausgewählt. Dabei handelte es sich zum Teil um breitbandige Signale mit transienten Stukturen (z.B. Musik [6] oder Snare [7]), die sich im Vorfeld als kritisch für die Schallprojektion erwiesen haben. Darüber hinaus wurden weniger komplexe Signale ausgewählt, deren spektrale Komponenten sich maßgeblich im Bündelungsfrequenzbereich des Projektors befanden (z.B. Violine [7]). Für die Projektion wurden die Richtungen vorn rechts bzw. hinten rechts in der Horizontalebene ausgewählt. Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau. An dem Experiment nahmen zehn Personen (1 weiblich / 9 männlich) im Alter von 24 bis 63 Jahren (Mittelwert 33,9 Jahre) teil.

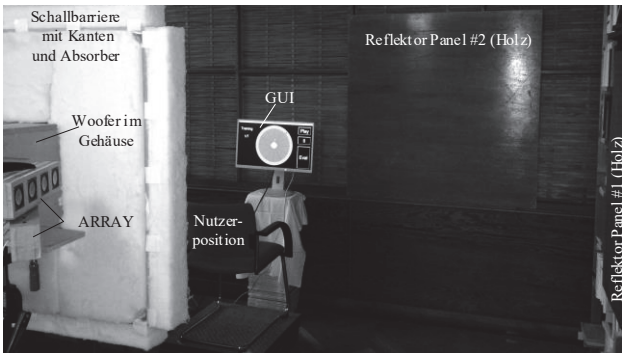

Abbildung 5: Schallprojektor (Rückansicht) und Aufbau des Experiments. Zur Vereinfachung wurden separate Arrays für Ansteuerung der beiden Projektionsrichtungen genutzt.

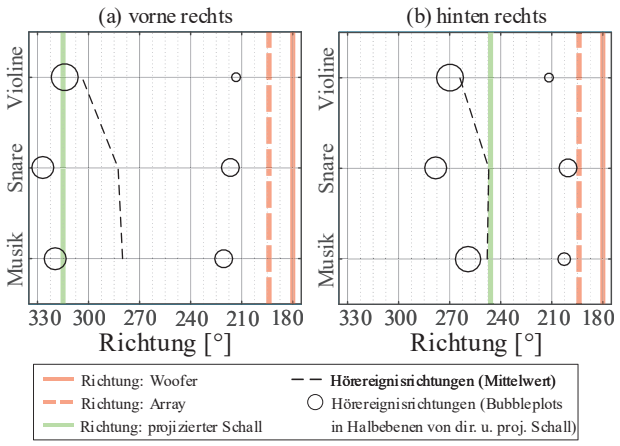

Abbildung 6: Angegebene Hörereignisrichtungen bei der Schallprojektion in Richtung (a) vorne rechts bzw. (b) hinten rechts (vgl. [6] zur Erläuterung der Darstellungsform).

Abbildung 6 zeigt ausgewählte Ergebnisse des Wahrnehmungsexperiments. Dargestellt sind die Einfallsrichtungen von projiziertem (grün) und direktem (rot) Schall aus der Nutzerperspektive und die mittleren Hörereignisrichtungen in den Halbebenen von projiziertem und direktem Schall als Blasendiagramme. Die Größe der Blasen repräsentiert die zugrundeliegende Anzahl der Urteile. Zur Veranschaulichung der globalen Antworttendenz ist zusätzlich der Mittelwert der Hörereignisrichtungen in der gesamten Horizontalebene (Strichlinie) dargestellt (vgl. [6]). Die angegebenen Hörereignisrichtungen lagen hauptsächlich um die Richtungen des projizierten Schalls bzw. des Projektors. Die Angaben in Richtung Projektor lagen mehr in Richtung des Arrays als des Tieftöners. Die Angaben in Richtung des projzierten Schalls stimmen im Fall vorne rechts besser mit der gewünschten Projektionsrichtung überein als im Fall hinten rechts. Diese Abweichung kann durch die größere Lokalisationsunschärfe für Quellen im seitlichen bzw. hinteren Bereich verursacht worden sein. Für das Wiedergabesignal Violine lagen beinahe alle Urteile in Richtung des projizierten Schalls. Bei den breitbandigen Signalen Musik und Snare traf dies ebenfalls für mehr als die Hälfte Urteile zu. Die Pegelreduktion zu hohen Frequenzen durch die Barriere kann hierfür eine entscheidende Rolle gespielt haben.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde ein Schallprojektor mit zusätzlicher Schallbarriere realisiert. Gemäß eines definierten VR-Nutzungskontexts wurde die Barriere für eine bestmögliche Pegelreduktion in Nutzerrichtung ab etwa 1 kHz ausgelegt. Im Richtverhalten des aufgebauten Systems zeigte sich, selbst bei Spatial Aliasing, eine Verbesserung dieser Pegelreduktion um bis zu 30 dB gegenüber der alleinigen Nutzung eines Lautsprecherarrays. Ein Wahrnehmungsexperiment in einem realen Raum bestätigte die prinzipielle Wirkungsweise des Projektors. Die Lokalisationsurteile lagen mehrheitlich in Richtung des projizierten Schalls - sogar im Falle breitbandiger Wiedergabesignale.
Gegenstand zukünftiger Untersuchungen ist die Nutzung einzelner Lautsprecher statt Lautsprecherarrays. Ebenso, die Nutzung mehrerer Barrieren und Tieftonlautsprecher zur Optimierung des Abstrahlverhaltens über einen weiteren Frequenzbereich oder die Untersuchung des Einflusses von Raum, Reflexionsflächen und der Positionierung des Projektors.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Projektnummer: AL 1473/6-1) und der europäische Union gemeinsam mit dem Freistaat Sachsen (Projekt: PRESENCE) für die Förderung dieses Beitrags. Darüber hinaus danken sie den Probanden für die Teilnahme am Wahrnehmungsexperiment und blue planet acoustic für die Vergünstigung der Arraylautsprecher.

Literatur

[1] Wühle, T. ; Merchel, S. ; Altinsoy, M. : The Precedence Effect in Scenarios with Projected Sound. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 67 (2019), Nr. 3, S. 1–9

[2] Hooley, T. : Single box surround sound. In: *Acoustical Science and Technology* 27 (2006), Nr. 6, S. 354–360.

[3] Katayama, M. ; Takumai, S. ; Imaoka, K. : *Speaker Device and Audio Signal Processing Method.* US Patent 9,674,609 B2, 2017

[4] Beyer, F. ; Wühle, T. ; Merchel, S. ; Altinsoy, M. : Vergleich von Lautspechermodellen zur Simulation von linearen Arrays unter Berücksichtigung des Richtverhaltens realer Quellen. In: *DAGA 2020 - 46th German Annual Conference on Acoustics*, 2020

[5] Möser, M. : *Technische Akustik.* 8. Aufl., Springer, 2005

[6] Wühle, T. ; Merchel, S. ; Altinsoy, M. : Perception of auditory events in scenarios with projected and direct sound from various directions. In: *Audio Engineering Society 146th Convention*, 2019

[7] EBU - Tech 3253: *Sound Quality Assesment Material recordings for subjective tests.* EBU, 2008

Gefördert durch DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
Europäische Union
Europa fördert Sachsen. ESF Europäischer Sozialfonds
Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.