

## Untersuchungen zur Wahrnehmung projizierter Schallquellen

Tom Wühle, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

TU Dresden, Lehrstuhl Kommunikationsakustik, 01062 Dresden, Deutschland, Email: tom.wuehle@tu-dresden.de

### Einleitung

Die gezielte Wiedergabe von Schall aus bestimmten Richtungen ist eine wiederkehrende Aufgabe in modernen Kfz-, Multimedia- und Smart-Home-Anwendungen. In vielen Fällen ist jedoch eine Beschallung über verteilte Lautsprecher aufgrund der räumlichen Gegebenheiten, oder schlicht wachsender Designansprüche, nicht möglich. Ein Lösungsansatz ist die Projektion von Schall auf reflektierende Flächen (z. B. Raumbegrenzungsflächen) durch stark richtende Schallquellen. Dabei gelangt nur ein geringer Schallanteil direkt von der Quelle zum Nutzer, welcher durch den später eintreffenden Schall verdeckt wird. Dadurch verschiebt sich die wahrgenommene Richtung des Hörereignisses vom Ort der realen Quelle auf den Ort der projizierten Schallquelle. Abbildung 1 veranschaulicht ein solches Szenario. Reale Quellen weisen eine derart stark fokussierende Richtwirkung jedoch nur in einem bestimmten Frequenzbereich auf. Außerhalb dieses Bereiches verringert sich der erreichbare Pegelunterschied zwischen direktem und projiziertem Schallanteil und es verringert sich die wahrgenommene Qualität der Projektion bzw. bleibt der Effekt der Projektion völlig aus. Um die Eignung verschiedener Wiedergabesysteme zur Schallquellenprojektion zu beurteilen oder ein entsprechend geeignetes System zu entwickeln, ist die Kenntnis des erforderlichen Pegelunterschiedes daher von entscheidender Bedeutung.

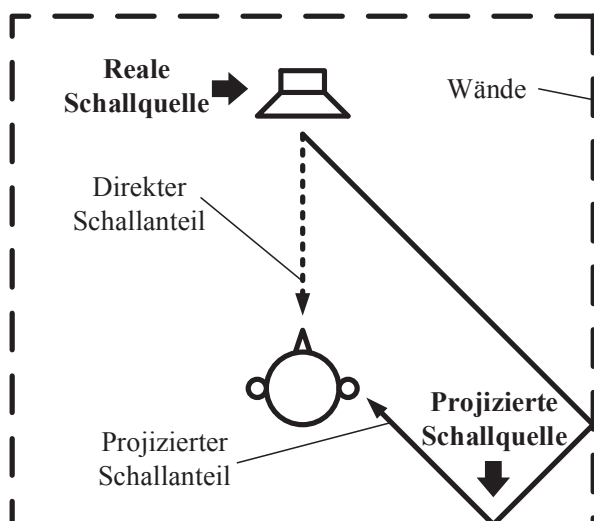


Abbildung 1: Grundsätzliche Schallanteile und Quellpositionen bei der Schallquellenprojektion.

Der betrachtete Ansatz zur Schallquellenprojektion beruht auf der Verdeckung des früher am Hörerort eintreffenden direkten Schallanteils durch den später eintreffenden

den projizierten Schallanteil. Beträgt der Zeitversatz beider Schallanteile mehr als 10 ms, so deuten allgemeine Erkenntnisse zur Primärschallunterdrückung [1] bzw. Vorverdeckung [2] an, dass ein Pegelunterschied von bereits mehr als 40 dB erforderlich ist, um die absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle des direkten Schallanteils nicht zu überschreiten. Die zugrundeliegenden Studien basieren jedoch meist auf monotonischer Stimuluspräsentation über Kopfhörer und nutzen synthetische Signale. Sie lassen sich damit nicht vollständig auf das beschriebene Szenario der Schallquellenprojektion anwenden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die intendierte räumliche Separierung der beiden Schallanteile. Weiterführende Studien betrachten synthetische Signale auch mit dichotischer Stimuluspräsentation über Kopfhörer [3] bzw. mit Wiedergabe über Lautsprecher und der unabhängigen Variation der Einfallsrichtung beider Schallanteile [4]. Es zeigte sich, dass die Vorverdeckungsleistung bei dichotischer Kopfhörerwiedergabe gegenüber dem monotonischen Fall sinkt. Weiterhin ist sie bei Einfall beider Schallanteile aus gleicher bzw. gegenüberliegender Richtung am stärksten ausgeprägt. Diese erweiterten Kenntnisse deuten die Komplexität der zugrundeliegenden Wahrnehmungsvorgänge in einem Wiedergabeszenario mit projizierten Schallquellen an. Eine umfassendere Interpretationen hinsichtlich des erforderlichen Pegelunterschiedes zwischen beiden Schallanteilen ist dennoch nicht möglich. Insbesondere über dessen Frequenzabhängigkeit können weiterhin keine Aussagen getroffen werden. Um diesbezüglich weiterführende Kenntnisse zu erlangen, wurde am Lehrstuhl Kommunikationsakustik die vorliegende Pilotstudie zur Wahrnehmung projizierter Schallquellen durchgeführt.

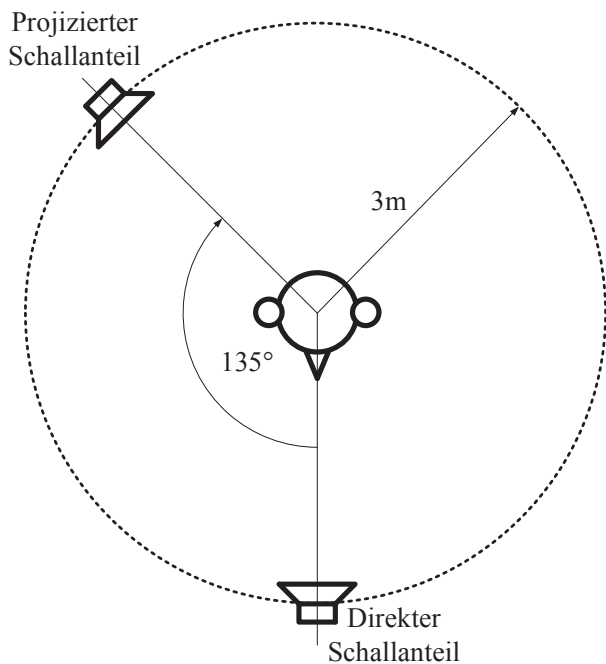
### Experiment

Ziel des Wahrnehmungsexperimentes ist die Quantifizierung des Pegelunterschiedes  $\Delta L$  zwischen direktem und projiziertem Schallanteil, der bei der Schallquellenprojektion zur Verschiebung der Hörereignisrichtung auf den Ort der projizierten Schallquelle erforderlich ist. Als Einflussfaktoren werden dabei die spektrale Zusammensetzung des direkten Schallanteils, sowie dessen zeitlicher Versatz zum später eintreffenden projizierten Schallanteil betrachtet.

### Versuchsaufbau

Das Experiment wurde mit Hilfe des synthetischen Schallfeldes im reflexionsfreien Raum der TU Dresden durchgeführt. Es sollte das Szenario der Schallquellenprojektion möglichst praxisnah, jedoch unter reproduzierbaren Bedingungen abbilden. Die Präsentation der beiden

Schallanteile erfolgte über separat in der Horizontalebene angeordnete Studiolautsprecher (Event 20/20 bas). Für den direkten Schallanteil wurde die Richtung vor den Probanden ( $0^\circ$ ), für den projizierten Schallanteil die Richtung rechts hinter den Probanden ( $135^\circ$ ) gewählt. Abbildung 2 verdeutlicht den beschriebenen Versuchsaufbau. Die Signalaufbereitung und Ansteuerung der Lautsprecher erfolgte rechnergestützt (Pure Data) über eine Soundkarte (RME Fireface UCX).



**Abbildung 2:** Versuchsaufbau im synthetischen Schallfeld im reflexionsfreien Raum der TU Dresden.

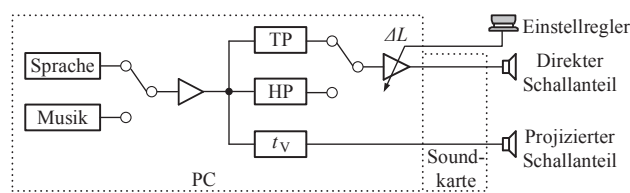
## Versuchsgestaltung und Stimuli

Werden zusätzliche raumakustische Effekte vorerst vernachlässigt, so stellt der direkte Schallanteil eine früher am Hörerort eintreffende, spektral abgewandelte Variante des projizierten Schallanteils dar. Die Art der Abwandlung hängt dabei vom frequenzabhängigen Richtverhalten der realen Quelle ab. In Frequenzbereichen mit hoher Richtwirkung ist der resultierende Pegel des direkten Schallanteils entsprechend gering. Um den Einfluss der resultierenden spektralen Zusammensetzung des direkten Schallanteils auf  $\Delta L$  zu untersuchen, musste zunächst eine geeignete Strategie zu dessen Filterung entwickelt werden. Da hierbei eine große Anzahl von Freiheitsgraden besteht und die bisherigen Erkenntnisse keine einschränkenden Aussagen zulassen, wurde zunächst ein allgemeiner Ansatz verfolgt – die separate Hochpass- (*HP*) bzw. Tiefpassfilterung (*TP*) mit verschiedenen Eckfrequenzen  $f_g$ . Dabei kamen Butterworth-Filter 2. Ordnung zum Einsatz. Die Stufung der Eckfrequenzen erfolgte in Oktaven zwischen 200 Hz und 12,8 kHz. Um die erhöhte Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs im mittleren Frequenzbereich zu berücksichtigen, wurde die Auflösung zwischen 800 Hz und 3,2 kHz verdoppelt. Zur

Untersuchung des Einflusses des Zeitversatzes zwischen beiden Schallanteilen, wurden drei Verzögerungszeiten  $t_V$  von 10 ms, 20 ms bzw. 30 ms berücksichtigt. Diese repräsentieren typische Wegunterschiede zwischen den beiden Schallanteilen in kleinen, mittelgroßen bzw. großen Räumen. Als Stimuli kamen reale Signale wie Sprache und Musik zum Einsatz. Bei Sprache wurden sowohl weibliche als auch männliche Sprecher gewählt, die mit einer mittleren Sprechgeschwindigkeit Nachrichten aus Politik und Wirtschaft vortragen. Bei Musik wurden Stücke aus verschiedenen Genres wie z. B. Pop, Jazz oder Blues gewählt. Die Stimuli weisen damit breit gefächerte spektrale und temporale Signaleigenschaften auf und decken eine Vielzahl praxisrelevanter Szenarios ab.

Der Versuch wurde in insgesamt zwei Durchläufe (Sprache, Musik) mit je drei Teilen (1:  $t_V = 10$  ms, *HP*, *TP*; 2:  $t_V = 20$  ms, *HP*, *TP*; 3:  $t_V = 30$  ms, *HP*, *TP*;) gegliedert. Innerhalb eines jeden Teils erfolgten *HP* bzw. *TP*, sowie die Wahl der zugehörigen  $f_g$  randomisiert und es wurden entsprechende Wiederholungen vorgesehen. Sprach- bzw. Musikdurchläufe wurden abwechselnd bearbeitet. Die Abfolge der einzelnen Versuchsteile ( $t_V$ ) wurde zwischen den Probanden permutiert. Als Versuchsmethode wurde das Herstellungsverfahren gewählt. Die Einstellung von  $\Delta L$  erfolgte mit einem stufenlosen Drehregler ohne Endanschlag (Griffin Powermate). Zu Beginn eines jeden Einstellvorganges wurde der Betrag von  $\Delta L$  in einem Bereich von 0 dB bis 40 dB randomisiert vorgegeben. Vor Versuchsbeginn erfolgte eine Kalibrierung des Wiedergabesystems, sodass während des Versuchs ein mittlerer Wiedergabepegel von 70 dB am Hörerort herrschte. Abbildung 3 fasst die beschriebene Versuchsgestaltung in einem Blockschaltbild zusammen.

Aufgabenstellung der Probanden war es  $\Delta L$  so einzustellen, dass ihr Hörereignis gerade eben noch in Richtung des Ortes der projizierten Schallquelle entsteht. Die abgefragte Schwelle lässt sich damit als Diskriminationsschwelle bezüglich der wahrgenommenen Richtung auffassen. Die Instruktion aller Probanden erfolgte mit Hilfe einer schriftlichen Versuchsanleitung.



**Abbildung 3:** Versuchsgestaltung: (v.l. n. r.) Auswahl des Stimulus, Kalibration des Gesamtwiedergabepegels, Filterung des direkten und Verzögerung des projizierten Schallanteils, Signalausgabe und Schnittstelle zur Manipulation des Pegelunterschiedes zwischen beiden Schallanteilen.

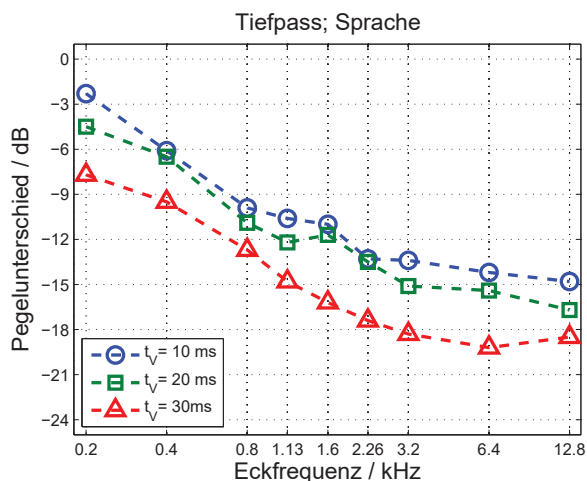
## Probanden

An diesem Experiment nahmen 10 Versuchspersonen teil (9 männlich und 1 weiblich). Das Alter der Probanden lag zwischen 20 und 33 Jahren (Mittelwert 26 Jahre). Alle gaben an, keine bekannten Gehörschäden zu haben.

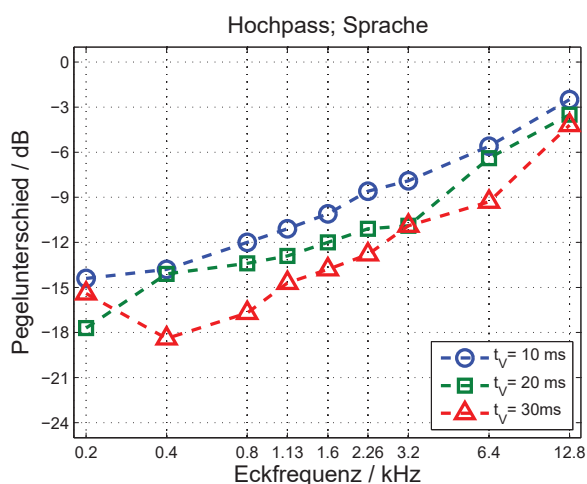
## Training der Probanden

Vor Beginn des Versuches absolvierten die Probanden ein Training, um sich mit dem Versuchsaufbau und ihrer Aufgabe vertraut zu machen. Es bestand aus je einem Einstellvorgang ( $TP$ ;  $f_g = 3,2 \text{ kHz}$ ;  $t_V = 20 \text{ ms}$ ) für Sprache und Musik.

## Ergebnisse und Diskussion



(a)

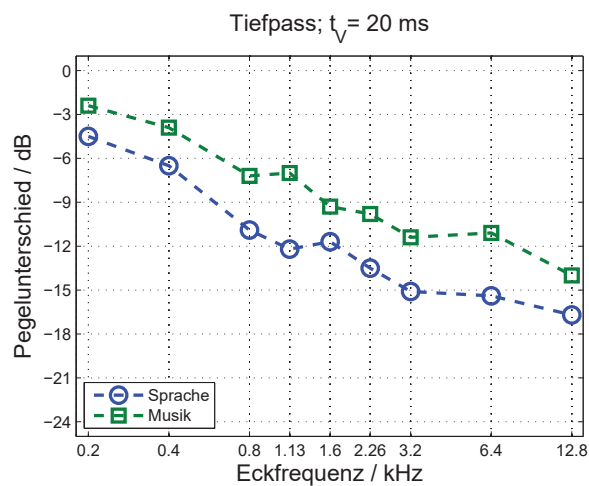


(b)

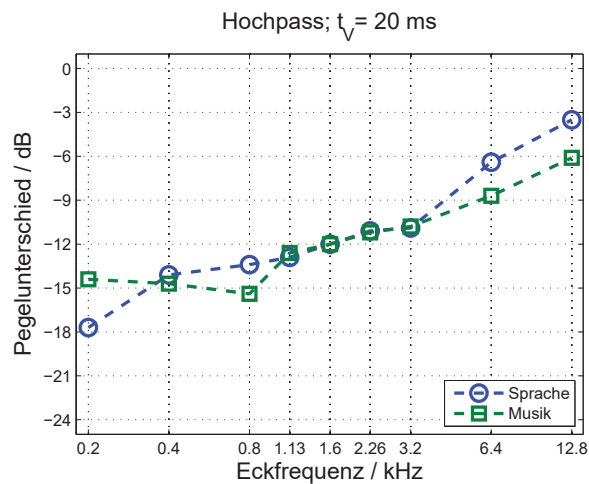
**Abbildung 4:** Erforderlicher Pegelunterschied zwischen direktem und projiziertem Schallanteil zur Verschiebung der Hörereignisrichtung auf den Ort der projizierten Schallquelle für den Stimulus Sprache. Der direkte Schallanteil unterlag einer Hochpass- (a) bzw. Tiefpassfilterung (b) mit variablen Eckfrequenzen.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Wahrnehmungsuntersuchungen für den Fall Sprache. Pegelunterschiede kleiner 0 dB bedeuten dabei einen entsprechend geringeren Pegel des direkten Schallanteils am Hörerort. Es ist zu erkennen, dass der Betrag von  $\Delta L$  mit zunehmender Verzögerungszeit steigt. Ein solches Verhalten wird bereits von bestehenden Erkenntnissen zum Verlauf der temporalen Maskierung [2] angedeutet. Im Vergleich zum Übergang von 10 ms zu 20 ms Verzögerungszeit, tritt beim Übergang von 20 ms zu 30 ms Verzögerungszeit je-

doch ein größerer Anstieg des Betrages von  $\Delta L$  auf, was auf einen Einfluss des Überschreitens der Echschwelle [1] hindeutet. Die festgestellten Zusammenhänge gelten dabei unabhängig von der spektralen Zusammensetzung des direkten Schallanteils (Eckfrequenz des Hoch- bzw. Tiefpassfilters) und ebenso für den Fall Musik. Die Ergebnisse in Abbildung 4 zeigen weiterhin, dass der Betrag von  $\Delta L$  unabhängig von der Verzögerungszeit steigt, je breitbandiger der direkte Schallanteil wird.



(a)



(b)

**Abbildung 5:** Erforderlicher Pegelunterschied zwischen direktem und projiziertem Schallanteil zur Verschiebung der Hörereignisrichtung auf den Ort der projizierten Schallquelle für eine Verzögerung zwischen beiden Schallanteilen von 20 ms. Der direkte Schallanteil unterlag einer Hochpass- (a) bzw. Tiefpassfilterung (b) mit variablen Eckfrequenzen.

Abbildung 5 stellt die Fälle Sprache und Musik am Beispiel der Verzögerungszeit von 20 ms gegenüber. Es ist ein abweichendes Verhalten bei Hochpass- und Tiefpassfilterung des direkten Schallanteils zu erkennen. Bei Tiefpassfilterung ist  $\Delta L$  für Sprache betragsmäßig größer als für Musik und stellt damit den kritischeren Fall im Szenario der Schallquellenprojektion dar. Bei Hochpassfilterung ist  $\Delta L$  jedoch für Sprache und Musik ähnlich. Hier scheinen hochfrequente bzw. transiente Signalanteile die Wahrnehmung in beiden Fällen

gleichermaßen zu dominieren. Die eben geschilderten Zusammenhänge lassen sich auch bei den übrigen untersuchten Verzögerungszeiten beobachten.

Insgesamt zeigt eine vergleichende Betrachtung aller Ergebnisse, dass der maximal gefundene Betrag von  $\Delta L$  bei 20 dB liegt. Im geschilderten Szenario der Schallquellenprojektion ist damit für den direkten Schallanteil im worst case ein um 20 dB niedriger Pegel, als für den projizierten Schallanteil erforderlich.

Zur Beurteilung der Unsicherheit der individuellen Probandenentscheidungen wurden Wiederholungen durchgeführt. Die resultierende maximale, über alle betrachteten Stimuli, Verzögerungszeiten und Eckfrequenzen arithmetisch gemittelte Abweichung von  $\Delta L$  beträgt dabei 2,5 dB. Dieser Wert übersteigt den eben wahrnehmbaren Schalldruckpegelunterschied von 0,5 dB [2] (für breitbandige Signale bei einem mittleren Schalldruckpegel von ca. 70 dB). In Anbetracht der breit gefächerten spektralen und temporalen Eigenschaften der in dieser Studie verwendeten realen Signale, erscheint die gefundene Unsicherheit dennoch akzeptabel. Sie kann zugleich als Maß zur Dimensionierung eines Sicherheitszuschlags für zukünftige reale Anwendungen verwendet werden.

Durch den zugrundeliegenden allgemeinen Filteransatz fehlt bei einigen der betrachteten Eckfrequenzen ein maßgeblicher hoch- bzw. tieffrequenter Anteil des direkten Schallanteils. Gemäß der einleitenden Beschreibung des Szenarios der Schallquellenprojektion ist dies in der praktischen Situation jedoch anders. Betrachtet man z. B. Lautsprecherarrays als reale Quellen, so ist deren Richtwirkung nur in einem mittleren Frequenzbereich ausgeprägt. Bei tiefen bzw. hohen Frequenzen wird durch die begrenzte Arrayausdehnung bzw. durch den Lautsprecherabstand [5] keine ausgeprägte Richtwirkung erreicht, wodurch der erreichbare Pegelunterschied in diesen Frequenzbereichen begrenzt ist. Eine entsprechende Bandsperrenfilterung des direkten Schallanteils würde die reale Situation daher vermutlich praxisnäher repräsentieren.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie zeigen, dass der erforderliche Pegelunterschied zwischen direktem und projiziertem Schallanteil bei der Schallquellenprojektion sowohl von der spektralen Zusammensetzung des direkten Schallanteils, als auch von der Verzögerungszeit des Eintreffens beider Schallanteile am Hörerort abhängt. Die gefundenen Ergebnisse fordern für den Pegelunterschied einen maximalen Betrag von 20 dB. Damit wird der eingangs, anhand allgemeiner Studien, abgeleitete Bereich von bis zu 40 dB deutlich reduziert, was im Hinblick auf die Realisierbarkeit eines potentiellen Wiedergabesystems zur Schallquellenprojektion positiv zu bewerten ist. Die vorliegende Pilotstudie dient als Ausgangspunkt zur fortführenden Untersuchung des Pegelunterschiedes. Auf Basis der gefundenen Ergebnisse können detailliertere Ansätze zur Filterung des direkten Schallanteils entwickelt werden. Diesbezüglich finden am Lehrstuhl Kommunikationsakustik der TU Dresden derzeit Voruntersu-

chungen mit einer praxisnäheren Bandsperrenfilterung statt. Weiterhin sind breit angelegte Studien geplant, die insbesondere auch den Einfluss der Einfallsrichtung beider Schallanteile am Hörerort berücksichtigen.

## Literatur

- [1] Blauert, J.: Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1997
- [2] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psycho-Acoustics Facts and Models. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [3] Elliot, L. L.; Backward Masking: Monotic and Dicothic Conditions, Journal of the Acoustical Society of America 34, No. 8 (1962), 1108-1115
- [4] Burgtorf, W.: Zur subjektiven Wirkung von Schallfeldern in Räumen (Rückverdeckung, Phantomschallquellen). Acustica 13, No. 2, (1963), 86-91
- [5] Olson, H.: Acoustical Engineering. D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey, Toronto, New York, London, 1957