

Psychoakustische und messtechnische Detektion von Echos in Räumen

Sebastian Frey^{1,3}, Hugo Fastl¹, Hinrich Schmoch², Eckard Mommertz²

¹ AG Technische Akustik, MMK, TU München, 80333 München, Deutschland, Email: fastl@ei.tum.de

² Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, Deutschland, Email: hinrich.schmoch@mbbm.com, eckard.mommertz@mbbm.com

³ Jetzt: Imakum GmbH, 82110 Germering, Deutschland, Email: sebastian.frey@imakum.de

Einleitung

In großen Räumen, in denen es zu erheblichen Streckendifferenzen zwischen Direktschall und Reflexionen kommen kann, interessiert besonders im Planungsprozess, ob mit der geplanten Geometrie des Raumes und den vorgesehenen Wandeigenschaften ein Echo hörbar und störend sein wird. Um den Planer mit einem objektiven Kriterium zu unterstützen, existieren Echokriterien, die aufzeigen sollen, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine späte Reflexion zu dem Höreindruck einer Wiederholung des Direktschalls führen wird. Mit dem Ziel, die Planungssicherheit zu erhöhen, sollte ein neues Echokriterium entwickelt werden, das auf Basis der Idee von Damaske [1] und Fastl und Zwicker [3] mithilfe der Lautheit Echos detektiert und in den Planungsprozess integriert werden kann.

Grundlagen

Neben dem in der Raumakustik weitbekannten Echokriterium von Dietsch und Kraak [2] existieren noch einige weitere Kriterien sowie grundlegende Überlegungen zur Detektion von Echos. 1971 beispielsweise postulierte Damaske [1] die Lautheits-Zeit-Funktion als Echoschwelle. Er beschrieb wie eine Reflexion dann wahrgenommen werden kann, wenn ihre Lautheit jene, die der Direktschall alleine besitzen würde, zu irgendeinem Zeitpunkt t überschreiten würde. Zu diesem Zeitpunkt setzt eine erneute Richtungsanalyse ein, die durch den Rückwurf bestimmt ist. Ein Echo soll dann hörbar sein, wenn die Lautheitsfunktion einen gewissen Schwellwert überschreitet.

Fastl und Zwicker [3] weisen ebenfalls darauf hin, dass ein Lesen der Lautheits-Zeit-Funktion der RIR schnellere Schlüsse auf etwaige Echos zulässt als eine reine Betrachtung der Raumimpulsantwort (RIR). Es wird auch darauf hingewiesen, dass Echos, die nur ein Zehntel der Lautheit des Direktschalls besitzen, für Sprachwahrnehmung zu vernachlässigen sind. Aufgrund dieser Hinweise in der Literatur wurden Versuche mit dem Dynamischen Lautheitsmodell (DLM) durchgeführt.

Versuchsdurchführung

Um bestehende Echokriterien zu testen und ein neues Modell zu entwickeln, mussten subjektive Bewertungen von kritischen sowie von unkritischen Schallfeldern auf ihre Störanfälligkeit durch Echos durchgeführt werden. Da im Rahmen einer praxisgerechten Prognose mit Kopfhörerdarbietungen simulierter RIRs gear-

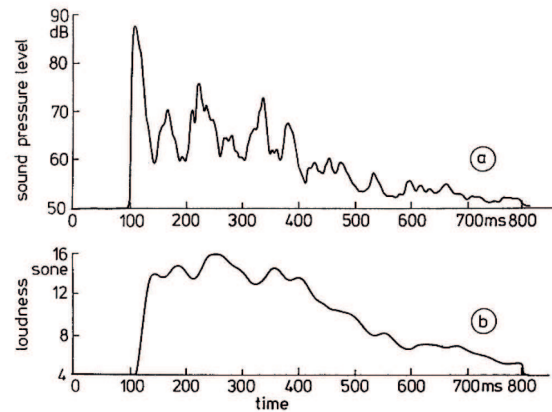


Abbildung 1: Impulsantwort eines halligen Raumes in zwei Darstellungsweisen: Schalldruckpegel als Funktion der Zeit (a) und Lautheits-Zeit-Funktion (b) [3]

beitet werden sollte, wurde im Vorfeld die Tauglichkeit der Kopfhörerdarbietung untersucht. In einem Vergleich zwischen der Darbietung im synthetischen Schallfeld und der Wiedergabe über Kopfhörer wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Bewertungen der Versuchspersonen festgestellt.

Für die Hörversuche wurden neun binaurale Raumimpulsantworten mit der PC-Software CATT-Acoustic detailliert simuliert. Das nachhallfreie Programmmaterial, das mit den Impulsantworten gefaltet den Probanden als Stimuli zur Bewertung vorgespielt wurde, bestand aus einem Sprachstück (Männlicher Sprecher, „S“), einem Gitarrenstück („M“) und einer Variation aus fünf in-die-Hände-Klatschen („K“). Die Darbietung erfolgte über diffusfeldentzerrte Kopfhörer.

Die Hörversuche wurden nach dem Prinzip der Kategorienskalisierung durchgeführt (siehe Abbildung 2). Eine fünfstufige Skala sollte eine Lautheitsänderung der RIR mit der direktesten Auswirkung auf den Hörer vergleichen und somit bestimmen, wie groß die Lautheitsänderung sein muss und wie gering die Lautheit der Reflexion im Vergleich zum Direktschall sein darf, um eine Störung einer bestimmten Kategorie zu erzeugen. Sie wurde per grafischer Schnittstelle am Monitor den Probanden vorgelegt.

Nach einem Trainingsdurchlauf mit allen randomisierten Stimuli erfolgten insgesamt 3 Wiedergaben pro Stimulus, ebenfalls für jeden Probanden zufällig in ihrer Reihenfolge.

Ergebnisse

Am Hörversuch nahmen insgesamt 20 Personen teil, jeweils zehn raumakustische Planer (Experten) sowie raumakustische Laien. Abbildung 2 sind die Ergebnisse des Hörversuchs zu entnehmen. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse ergab, dass die Ergebnisse für beide Gruppen hochsignifikant sind ($p < 0,0005$). Es existieren signifikante Unterschiede in der Bewertung der Räume, der Bewertung der Signale sowie ein Interaktionseffekt zwischen Räumen und Signalen.

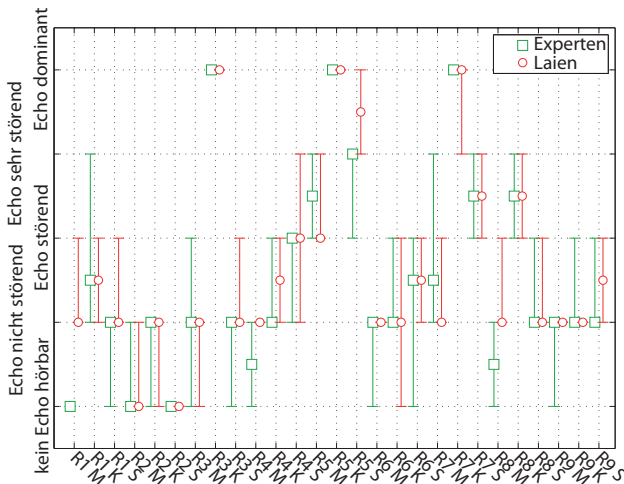


Abbildung 2: Ergebnis des Hörversuchs zur Störung durch Echos. Dargestellt sind die Mediane der intraindividuellen Mediane mit Quartilbereich, grün für die Gruppe der Experten, rot für die Gruppe der Laien.

Für die Entwicklung des neuen Echokriteriums wurden im weiteren Verlauf die Ergebnisse der Expertengruppe betrachtet. Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass durch das vollständige Ausnutzen der Bewertungsskala durch die Probanden dem Aufbau des Echokriteriums eine fein unterteilte Abstufung hinsichtlich der Störung durch Echos zugrunde lag.

Eine Kalibrierung der für das DLM benötigten einkanaligen und daher energetisch addierten BRIR erfolgte auf $L_{eq} = 85$ dB. Raumübergreifend ließen sich bei diesem Pegel störende Änderungen in der Lautheit sehr gut feststellen. Um das Kriterium möglichst einfach zu halten, wird die RIR vor der psychoakustischen Analyse für alle Signaltypen mit dem Programmfilter nach IEC 60268-1 vorverarbeitet. Eine detailliertere Aussage brächte ein für jeden Signaltyp unterschiedliches Filter, das hier verwendete gilt daher für eine erhöhte Einfachheit als bestmöglicher Kompromiss.

Ein Lautheitsanstieg äußert sich erst störend als Echo nach einer Mindestzeit $t \geq 90$ ms: Innerhalb der ersten 90 ms fand auch bei den als echounkritisch eingestuften Räumen eine teils recht hohe Schwankung der Lautheit statt. Für Klatschen ist bereits eine Lautheitsänderung von $\Delta N \geq 0,5$ sone ausreichend, um zu einem störenden Echo zu führen. Für Sprache sind hierzu Anstiege um $\Delta N \geq 1$ sone, für Musik Anstiege um $\Delta N \geq 1,5$ sone nötig. Für Sprache und Musik ergibt sich auch eine minimale, zur Lautheit des Direktschalls relative Lautheit

von $\frac{N(t_{Echo})}{N(t_{Direkt})} \geq 30\%$, die nötig ist, um ein störendes Echo hervorzurufen. Bei Klatschen existiert diese untere Grenze nicht, selbst späte schwache Reflexionen werden als störend empfunden. Ein Grenzbereich zwischen 10% und 30% Lautheit des Direktschalls ergibt sich durch die Betrachtung der oberen Quartile in der Bewertung der Experten: Einige wenige hören hier störende Echos, die im Median als nicht störend beurteilt wurden.

Das anhand simulierter binauraler RIRs hergeleitete Echokriterium wurde in einem Kinosaal, in dem Echostörungen bekannt waren, auf seine Praxistauglichkeit mit monauralen Impulsantworten getestet. In Abbildung 3 ist zu sehen, dass das Kriterium hier ein bei Sprache störendes Echo (richtig) erkennt.

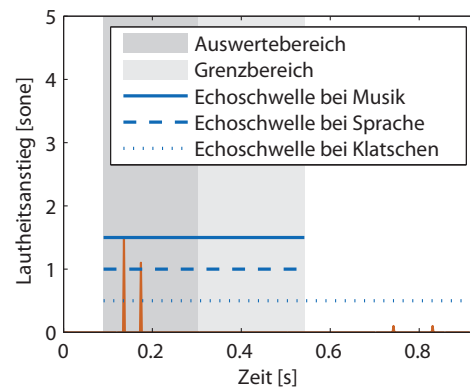


Abbildung 3: Auswertung einer monauralen RIR eines realen Raums mit dem hier vorgestellten Echokriterium

Fazit und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Echokriterium steht in der raumakustischen Planung und für Messungen ein Werkzeug zur Verfügung, das es ermöglicht, störende Echos für Sprach- und Musikdarbietung sowie für impulsförmige Anregung aufzuzeigen. Es bietet im Vergleich mit bestehenden Echokriterien eine sehr hohe Sicherheit in der Detektion. Die hier diskutierten Schwellwerte sollen in Zukunft verifiziert werden. Im Rahmen der Versuche lieferte zudem die Rauigkeit erste gute Ergebnisse in der Detektion von Flatterechos, welche ebenfalls weiter untersucht werden sollen, um in Zukunft ein ganzheitliches Instrument zur Hand zu haben, um störende Echos ziel sicher zu vermeiden.

Literatur

- [1] Damaske P.: Die psychologische Auswertung akustischer Phänomene. In Proc. of the 7th International Congress on Acoustics (ICA), Bd. 1 (21 G 2) (Budapest 1971)
- [2] Dietsch L., W. Kraak: Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik und Sprachdarbietungen. In Acustica, Bd. 60, 205–216 (1986)
- [3] Fastl H., E. Zwicker: Psychoacoustics. Facts and Models. 3. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2007