

Ein Messapparat zur Abtastung von Schallfeldern in Räumen

Ingo B. Witew, Michael Vorländer

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 52066 Aachen, E-Mail: Ingo.Witew@akustik.rwth-aachen.de

Array-Messungen in der Raumakustik

Aus einigen Fragestellungen in der Raumakustik ergibt sich der Wunsch, ein untersuchtes Schallfeld nicht nur an ausgewählten Einzelpunkten zu diskutieren, sondern auch über Daten zu verfügen, die eine Auswertung ganzer Raumbereiche zulässt. Je nach zu untersuchendem Aspekt unterscheidet sich der verfolgte Ansatz.

In der Arbeit von de Vries *et al.* [1] wurden Raumimpulsantworten entlang einer Linienanordnung gemessen, um einen Datensatz zu schaffen, der für eine Zerlegung des Schallfelds in ebene Wellen geeignet ist. In dem speziellen Fall wurde erstmals beobachtet, dass sich raumakustische Kenngrößen über relativ kurze örtliche Distanzen deutlich verändern. Um die Ursachen für diese Fluktuationen der Einzahlkennwerte von Schallfeldern besser zu verstehen, würde man sich jedoch eine mehr als eindimensionale Abtastung des Schallfeldes wünschen.

Der von Akama *et al.* [2] vorgestellte Datensatz umfasst sogar bis zu knapp 1900 Raumimpulsantworten, die in verschiedenen Räumen gesammelt wurden. In wiederholten Messungen wurde die Übertragungsfunktion von einer Quelle zu jedem Sitzplatz in drei Auditorien vermessen, indem ein Messmikrofon schrittweise von Sitz zu Sitz bewegt wurde. Die gesammelten Daten wurden mit dem Ziel statistisch ausgewertet, um herauszufinden, wie groß eine sinnvolle Messstichprobe in einem Konzertsaal sein muss, um die örtlichen Unterschiede im Schallfeld gerade noch abdecken zu können.

Im Modellmaßstab sind die Messungen von Xiang *et al.* [3] hervorzugeben: In einem um den Faktor 8 verkleinerten Aufbau wurde die akustische Kopplung zweier Volumina untersucht, indem ein Mikrofon durch einen motorisch gesteuerten Roboter in drei Dimensionen durch das Schallfeld bewegt wurde.

Aus eigenen Untersuchungen können die Vor- und Nachteile der jeweils verfolgten Ansätze verdeutlicht werden. Mit dem Ziel, die Ortsabhängigkeit der akustischen Gegebenheiten in verschiedenen Konzertsälen zu untersuchen, wurden durch Witew *et al.* [4] Messungen an ca. 100 Positionen durchgeführt, die große Teile der Publikumsbereiche in verschiedenen Auditorien abdeckten. Obwohl es mit diesem Ansatz möglich ist, mit vertretbarem Aufwand zahlreiche Impulsantworten in einem Auditorium zu sammeln, wird deutlich, dass sich die Messposition des Mikrophons nur ungenau bestimmen lässt. Im besten Fall lässt sich der Messort relativ zum Sitzplatz, an dem gemessen wurde, angeben. Abgesehen von der verbleibenden Ungenauigkeit dieser Ortsangabe lässt sich der Messort z.B. in kartesischen Koordinaten nicht einfach aus dem Grundriss des Auditoriums ablesen, besonders wenn berücksichtigt wird, dass Publikumsbereiche in Auditorien nur selten in

einer einzigen Ebene liegen. In der zitierten Untersuchung wurde versucht, die Messorte der Mikrophone durch eine Trilateration zu bestimmen. Dabei wurden die Abstände der Messmikrophone durch Laser-Interferometrie zu bekannten Markierungen gemessen. Allerdings muss erstens festgestellt werden, dass die Positionsbestimmung der Referenzmarkierungen wegen der erforderlichen Genauigkeit sehr zeitintensiv ist, und dass sich zweitens, trotz recht plausibler Schätzung der Mikrofonpositionen, eine Unsicherheit dieser Positionsschätzung nicht ohne weiteres ermitteln lässt.

Soweit die Messorte der Mikrophone sehr genau bestimmt werden müssen, erscheinen Ansätze, wie der von Witew *et al.* [5], mit Messrobotern vielversprechend. In diesem Beispiel wurden 24 Mikrophone auf einem fahrbaren xy -Tisch und einer Tragvorrichtung verfahren, so dass das Schallfeld in einer Ebene über eine Fläche von $2.1\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ abgetastet werden konnte. Verglichen mit den typischen Abmaßen eines Konzertsaals erscheint ein abgetastetes Schallfeld dieser Größe recht klein und der Wunsch nach größeren Abtastvorrichtungen plausibel. Bei großen Messaufbauten wird es wegen relativer mechanischer Fertigungstoleranzen zunehmend schwierig eine (absolut) genaue Positionierung der Messmikrophone sicher zu stellen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das Schallfeld bei großen Aufbauten zunehmend durch Schallbeugung und Streuung an tragenden Elementen des Aufbaus beeinträchtigt wird.

Auf Basis der hier vorgestellten Erfahrungen wurde ein Messapparat entwickelt, mit dem das Schallfeld in Räumen automatisiert abgetastet werden kann.

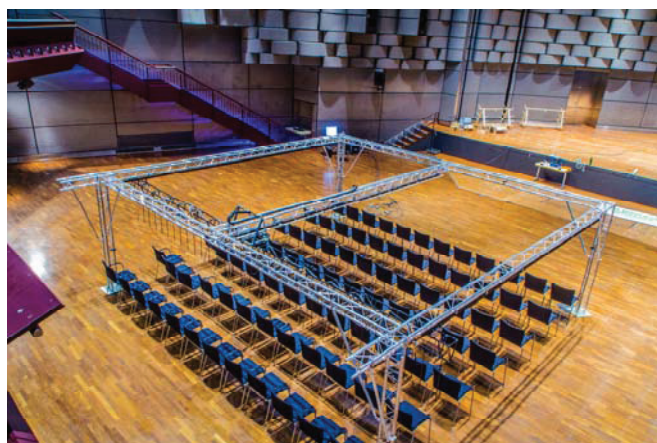


Abbildung 1: Messaufbau im großen Saal des Eurogress Aachen.

Funktionsweise des Messaufbaus

Mit dem in Abbildung 1 gezeigten Aufbau kann ein Schallfeld in Räumen über eine Fläche von ca. $8.00\text{ m} \times 5.30\text{ m}$ abgetastet werden. Der Aufbau besteht aus

handelsüblichen Aluminium-Traversen, wie sie in der Veranstaltungstechnik verbreitet sind. Diese verwendeten Profile haben einen dreieckigen Querschnitt mit einer Höhe von 195 mm und einer Breite von 220 mm . Die drei Tragrohre einer Traverse haben einen Durchmesser von jeweils 35 mm . Der gesamte Aufbau besteht aus einer Rahmenkonstruktion und einer mittleren Quer-Traverse, die von vier 2 m hohen Standfüßen getragen wird. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 2 gezeigt.

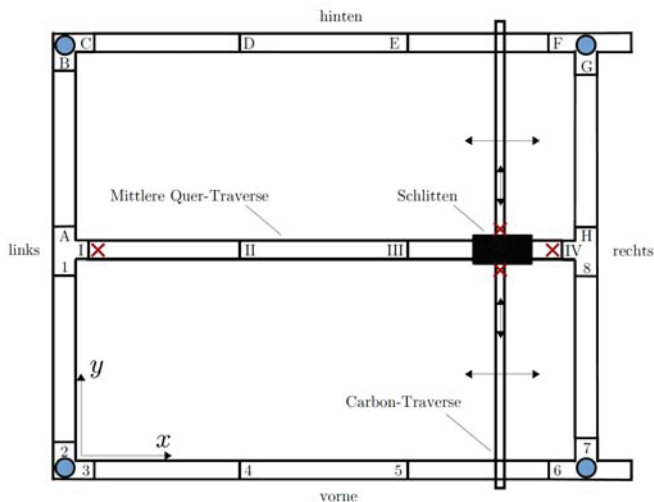


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Abtastung von Schallfeldern in Räumen.

Zentraler Bestandteil des Aufbaus ist ein Schlitten, der an einer Schiene an der mittleren Quer-Traverse eingehangen ist und durch einen Zahnstangenantrieb motorisch (entlang der eingezeichneten x -Achse) verfahren werden kann (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Zahnstangenantrieb des fahrbaren Schlittens.

An dem Schlitten ist entlang der y -Achse eine Carbon-Traverse angebracht, die an der vorderen und hinteren Quer-Traverse gelagert ist. Diese Carbon-Traverse kann über einen Spindelantrieb (entlang der eingezeichneten y -Achse) über eine Distanz von 30 cm verfahren werden. Um die freie Bewegung sicher zu stellen ist die Carbon-Traverse an der vorderen und hinteren Quer-Traverse in x -Richtung in einer Schiene rollend und entlang der y -Richtung gleitend gelagert (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Gleit- und Rollenlager der Carbon-Traverse.

An der Carbon-Traverse befinden sich in Abständen von 25 cm Bohrungen durch die jeweils ca. 1 m lange Carbon-Stäbe eingesteckt werden können. An den Enden dieser 32 Stäbe sind die Mikrophone zur Vermessung des Schallfelds befestigt. Da die maximal mögliche Fahrstrecke von 30 cm entlang der y -Achse größer als der Abstand der einzelnen Mikrophone ist, kann mit dieser Anordnung eine vollständige Abtastung beliebiger Auflösung über die Dimensionen des Aufbaus ermöglicht werden.

Um trotz des relativ großen Aufbaus und den damit verbundenen Fertigungstoleranzen eine möglichst genaue Informationen zu den Positionen der Mikrophone zu haben, sind in dem Rahmen und in den Standfüßen des Aufbaus sechs kleine Lautsprecher verbaut. Aus den gemessenen Impulsantworten zwischen diesen Lautsprechern und den Mikrophenen, und den daraus bestimmbar Schallaufzeiten, lässt sich über eine akustische Trilateration die tatsächliche Position der Mikrophone bestimmen. Erste Untersuchungen auf der Basis von Optimierungsstrategien legen nahe, dass die tatsächliche Mikrophonposition mit diesen Daten später auf den Millimeter genau bestimmt werden kann.

Mit einem geübten Team von vier Personen kann der Messapparat in jeweils 2 Stunden auf- und abgebaut werden. Um ein Schallfeld über eine Fläche von $8.00\text{ m} \times 5.30\text{ m}$ in 5 cm Schritten abzutasten sind 530 Einzelmessungen mit 32 Mikrophenen erforderlich. Zwischen den Einzelmessungen wird der Apparat an eine neue Abtastposition gefahren. Da die 32 Einzelmikrophone entlang einer Linie in 25 cm Abstand angeordnet sind, sind für die Abtastung in 5 cm Schritten über eine Entfernung von 8.00 m Länge 5 Einzelmessungen notwendig, zwischen denen der Apparat jeweils um 5 cm in y -Richtung verfahren wird. Um eine Fläche in dieser Auflösung abzutasten wird der Schlitten jeweils nach 5 Einzelmessungen um 5 cm in x -Richtung bewegt. Für die gesamte Messung der Abtastfläche wird mit dem Aufbau etwa 4 Stunden benötigt. In diesem Zeitraum werden dann neben den eigentlich interessanten 16'960 Raumimpulsantworten vom Grad 17 (ca. 2.9 s) auch pro Mikrophen sechs Impulsantworten vom Grad 16 (ca. 1.4 s) gemessenen, die die Grundlage für die Bestimmung der Schallaufzeiten der Trilateration bilden. Inklusive Auf- und Abbau sind somit etwa 8 Stunden erforderlich.

Schallfelddarstellungen

Die Messdaten können je nach Fragestellung vielseitig analysiert werden. Um die Eigenschaften der gemessenen Daten zu verdeutlichen, wird eine Beispielstudie diskutiert bei der die gesammelten Messdaten aus einem Blickwinkel betrachtet werden, der sich erst aus einer Array-Messung ergibt. Die gemessenen Raumimpulsantworten werden dazu verwendet, die Streueigenschaften von Bestuhlung in Auditorien darzustellen.

Streifender Schalleinfall über Gestühl

Die Raumimpulsantwort ist eines der wichtigsten Merkmale einer akustischen Übertragungsstrecke. Je nach Darstellungsintervall lassen sich in der Raumakustik Details wie der Direktschall oder einzelne Reflexionen als isolierte zeitliche Ereignisse mit relativ hoher Amplitude identifizieren. Neben diesen offensichtlichen Merkmalen ist der detaillierte Schalldruckverlauf einer Raumimpulsantwort zwischen einzelnen Reflexionen oft schwerer zu interpretieren, da die ursächlichen Zusammenhänge der vielen verschiedenen zeitlichen Ereignissen schwerer zu erkennen sind. Diese Herausforderung ist im oberen Bild der Abbildung 5 zu erkennen. In diesem Bild sind die ersten 15 ms einer Impulsantwort gezeigt. Der Direktschall ist in dieser Darstellung eindeutig als erstes deutlich sichtbares Schallereignis zu sehen. Weitere Merkmale, wie z.B. die relativ hohen Pegel zu den Zeiten 3 ms, 5 ms, 10 ms oder 12 ms, sind in dieser Darstellung nicht intuitiv erklärbar. Wird die dargestellte Impulsantwort jedoch im Kontext der im Abtastfeld benachbart gemessenen Impulsantworten betrachtet, werden zusätzliche Zusammenhänge deutlich.

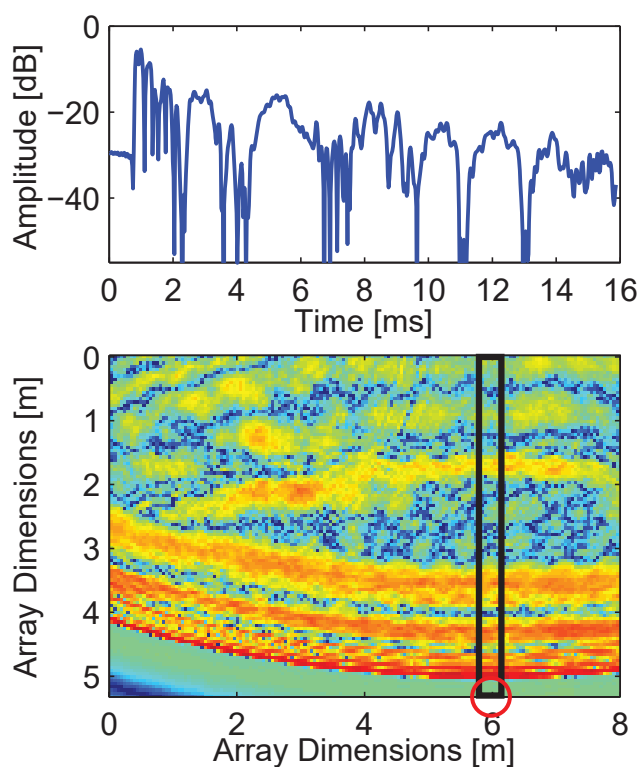


Abbildung 5: Raumimpulsantwort (oben); Örtliche Schalldruckpegelverteilung gemessener Impulsantworten (unten).

Das untere Bild in Abbildung 5 zeigt die Schalldruckpegelverteilung im gesamten Abtastfeld zum Zeitpunkt $t = 0$ der im gleichen Bild oben dargestellten Impulsantwort. Der Pegel ist dabei farblich kodiert und deckt zwischen den Farben Rot und Blau einen Dynamikbereich von 0 bis -55 dB ab. Die einzeln dargestellte Impulsantwort wurde an der Position 6.00 m (horizontal, bezogen auf das Koordinatensystem in Abb. 2: y-Richtung) und 5.30 m (vertikal, x-Richtung), also an der roten Markierung am unteren Bildrand, gemessen. Für die Mikrophone in dem dargestellten Kasten ist die Ausbreitungsrichtung des Direktschalls direkt nach unten in vertikaler Richtung.

Genau wie bei Schlierenbildern, z. B. denen von Cremer [6], zeigen sich in der örtlichen Auftragung die Wellen, die dem Direktschall zuzuordnen sind, als konzentrische Kreisausschnitte zur ersten Wellenfront. Die ersten 7 ms der oben dargestellten Impulsantwort sind also vom Direktschall bestimmt. Da der Lautsprecher für diese Messungen nicht entzerrt wurde, wird der signaltheoretisch perfekte Impuls der entfalteten Anregung durch die frequenzabhängige Gruppenlaufzeit des Lautsprechers auf einen Bereich von ca. 7 ms ausgedehnt.

Zusätzlich fällt in Abbildung 5 unten, bei ca. 2 m in der Vertikalen, eine weitere kreisförmige Welle auf, die ihren scheinbaren Ursprung weit unterhalb des Abtastfeldes hat. Da sich die Schallquelle während der Messung tatsächlich weit oberhalb des Abtastfeldes befunden hat und in dieser Darstellung der Direktschall zu sehen ist, ist klar, dass es sich um eine Reflexion oder um eine Streuung des Direktschalls an einem Gegenstand in der Nähe des Messaufbaus handeln. Die Bilderfolge in Abbildung 6 zeigt, von oben nach unten, zur Bestätigung die zeitliche Entstehung dieser Sekundärwelle. Aus dem hier nicht dargestellten Vergleich einer Messung, die bei sonst unverändertem Aufbau, allerdings ohne Bestuhlung, durchgeführt wurde, kann der Streukörper identifiziert werden. Die zuvor identifizierten Merkmale der Impulsantwort zu $t \approx 10$ ms bzw. $t \approx 12$ ms lassen sich also mit recht großer Wahrscheinlichkeit auf die Streuung am Gestühl zurückführen.

Aus den in Abbildung 6 dargestellten Bildern lassen sich zusätzlich noch zwei weitere interessante Merkmale von streifendem Schalleinfall über Gestühl visualisieren. Zum einen ist an allen Bildern zu erkennen, dass nur die letzte dem Direktschall zugeordnete Welle mit den Stühlen sichtbar interagiert. Die hochfrequenten Anteile der ersten Wellenfront, (mit steilen Flanken,) scheinen in ihrer Ausbreitung kaum durch die Stühle beeinträchtigt. Hauptsächlich die letzte, tieffrequente, Direktschallwelle wird an den Stuhlreihen gestreut. Dies deckt sich mit bisherigen Erkenntnissen, dass sich der „Seat Dip Effect“ [7] hauptsächlich bei tiefen Frequenzen nachweisbar ist. In den hier gezeigten Messungen ist die Schallausbreitung der gestreuten Wellen an Bestuhlung erstmals direkt zu sehen.

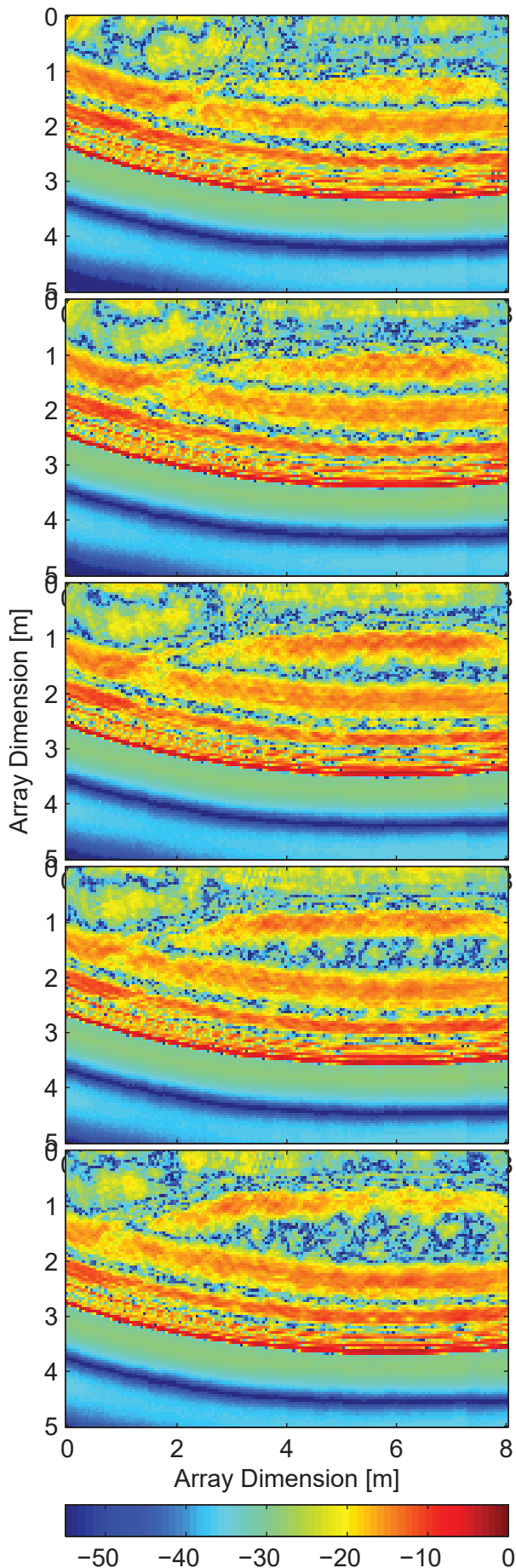


Abbildung 6: Streuung der ersten Wellenfront an Stühlen

Weiter, ist im obersten Bild der Abbildung 6 eine Wellenfront zu sehen, welche die Stuhldreihe unter der Abtastebene noch nicht vollständig passiert hat. Die Stuhldreihe befindet sich, horizontal ausgerichtet, genau an der Zeile, an der sich die gestreute Welle ablöst und die tieffrequente Direktschallwelle sichtbar unterbrochen ist. Die Dämpfung des „Seat Dip Effekt“ ist in der Darstellung der Abbildung 6 sehr deutlich an der farblichen Kodierung zu erkennen. Die ungestreute Welle im obersten Bild, im linken Darstellungsbereich, zeigt eine deutliche orange Färbung ($\approx -15 \text{ dB re Max}$) auf, während die Wellenfront, nach der Streuung (im rechten Darstellungsbereich) deutlich niedrigere Amplituden im gelb-orangen Farbbereich ($\approx -18 \text{ dB re Max}$) aufweist. In der hier dargestellten Messung ist die Dämpfung der tieffrequenten Direktschallwelle besonders deutlich sichtbar.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der Werkstätten des Instituts für die tatkräftige Unterstützung beim Bau des Roboters, besonders den Herren Kaldenbach und Schlömer. Bei der Durchführung der Messungen haben zahlreiche Studenten und Mitarbeiter des Instituts geholfen, wofür die Autoren danken. Besonders hervorgehoben sind dabei die Arbeiten von Florian Thevissen für die Ansteuerungssoftware des Apparats, sowie von Jakob Hartl für die Durchführung von Messungen und die Prüfungen zur Fehlersicherheit des Roboters. Vielen Dank an die Mitarbeiter der Historischen Stadthalle Wuppertal und des Eurogress Aachen, die uns großzügig Zeit für Messungen zur Verfügung gestellt haben.

Literatur

- [1] de Vries, D., Hulsebos, E. M., Baan, J., “Spatial fluctuations in measures for spaciousness”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **110** (2), 947 – 954, 2001
- [2] Akama, T., Suzuki, H., Omoto, A., “Distribution of selected monaural acoustical parameters in concert halls”, *Applied Acoustics*, **71**, 564 – 577, 2010
- [3] Xiang, N., Escolano, J., Navarro, J. M., Jing, Y., “Investigation on the effect of aperture sizes and receiver positions in coupled rooms”, *J. Acoust. Soc. A.*, **133** (6), 3975 – 3985, 2013
- [4] Witew, I. B., Behler, G. K., Vorländer, M., “Spatial variation of lateral measures in different concert halls”, *Proc. 18th int. Cong. Acoust.*, **18** (4), 2949 – 2952, 2004
- [5] Witew, I. B., Vorländer, M., “Uncertainties of room acoustical measurements – Influence of the exact source and receiver position”, *Proc. Inst. Acoust.*, **33** (2), 2011
- [6] Cremer, L., “Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik”, *Bd. 1*, Hirzel-Verlag, Stuttgart, 1948
- [7] Sessler, G. M., West, J. E., “Sound transmission over theatre seats”, *J. Acoust. Soc. A.*, **36**, 1725 – 1732, 1964