

# Untersuchung praxisrelevanter Parameter des objektbasierten Nachhallzeitverlängerungssystems „SpatialSound Wave“

Josua Hagedorn, Jan Küller, Bernhard Fiedler, Maximilian Gagewi  
*Fraunhofer Institute for Digital Media Technology IDMT, 98693 Ilmenau*

## Abstrakt

Der Bedarf an hochqualitativen Tonwiedergabesystemen für Liveanwendungen stieg in den letzten Jahren auf ein neues Level. In der Praxis sollen Veranstaltungsräume möglichst verschiedene Anwendungsfälle abdecken. Von Sprache, über Theater, bis hin zu verschiedenen Musikdarbietungen muss sowohl eine angemessene Raumakustik, als auch eine natürliche Lokalisation der Schallquellen gewährleistet werden. Eine Möglichkeit dies zu realisieren ist der Einsatz von objektbasierten Audiosystemen. Dabei gilt als großer Vorteil die Skalierbarkeit von akustischen Szenen zwischen verschiedenen Setups. Die Wiedergabequalität hängt von mehreren Faktoren, unter anderem vom Lautsprecher-System und dem realen Raumeinfluss, ab. In diesem Paper soll untersucht werden, ob ein im Studio optimiertes Klangbild auf einen Ort mit anderen akustischen Eigenschaften übertragen werden kann. Dabei sollen ähnliche raumakustische Charakteristiken am Zielort erzeugt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen Aufschluss über die einflussreichsten Parameter bei der Einrichtung einer elektroakustischen Raumsimulation geben.

## 1. Einleitung

Veranstaltungsräume werden zunehmend für eine vielfältige Nutzung mit verschiedensten Anwendungsbereichen konzipiert. Dafür müssen unterschiedliche Anforderungen u.a. eine entsprechende Raumakustik gewährleistet werden. Grundsätzlich ist es einfacher die Nachhallzeit eines Raumes durch akustische Maßnahmen auf einen angemessenen Wert zu reduzieren, als die entgegengesetzte Aufgabe, die Nachhallzeit zu verlängern. [1]

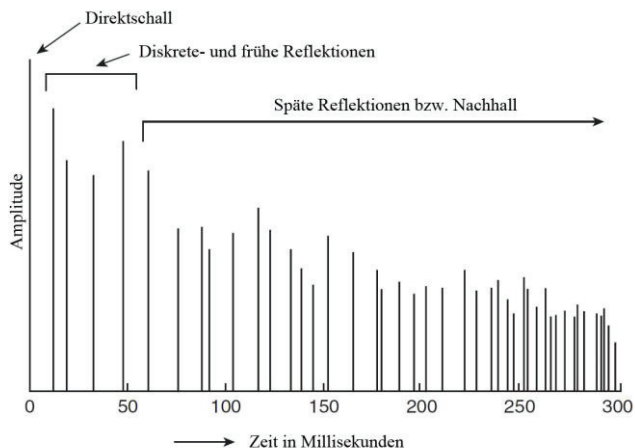
Aus dieser Gegebenheit heraus gelten elektroakustische Nachhallverfahren somit als eine flexible und qualitativ hochwertige Lösung. Durch diese Systeme sind Betreiber von Einrichtungen in der Lage, je nach Art der Veranstaltung oder musikalischer Darbietung, eine optimale Raumakustik zu erzeugen. Für Sprachdarbietungen werden beispielsweise kurze Nachhallzeiten, mit wenig Diffusschall, aber einem hohen Anteil an diskreten Reflexionen benötigt. Orchestermusik hingegen lebt von einem hohen Anteil später Reflexionen ohne die die Musik trocken und unlebendig klingen würde. Mit Hilfe eines elektroakustischen Nachhallverfahrens kann also die Wahrnehmung des Raumes schnell und einfach verändert werden. In diesem Paper wurde das „Room Simulation Module“ (RSM) des objektbasierten „SpatialSound Wave“-Systems untersucht, um einen Überblick auf die einflussreichsten Parameter von Raum und Lautsprecher auf die Qualität der künstlichen Nachhallerzeugung zu bekommen. Bestandteile der Untersuchung waren elektroakustische Messungen und subjektive Beurteilungen. Zu Beginn werden im Abschnitt zwei grundlegende Eigenschaften von Raumakustik und die Zusammensetzung von Schallfelder im Raum beleuchtet. In dem dritten Abschnitt wird die Funktionsweise des eingesetzten Systems und dessen Funktionen beschrieben. Anschließend werden die Gegebenheiten der Untersuchung vorgestellt und die Ergebnisse ausgewertet.

## 2. Raumakustik und Nachhall

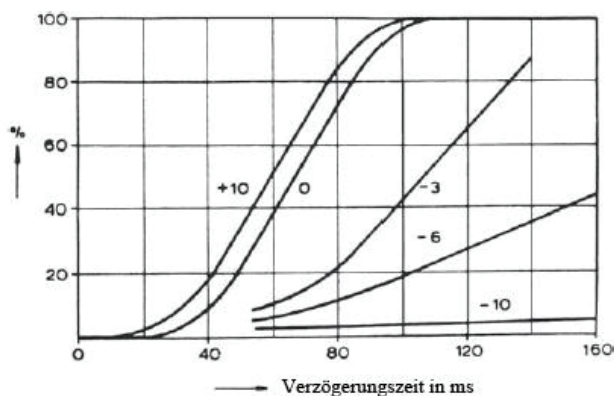
Jeder Raum hat unterschiedliche Eigenschaften und dadurch auch eine entsprechende Akustik. Manche Räume klingen

gut und manche klingen schlecht, wobei die subjektive Wahrnehmung eine große Rolle spielt. Aus diesem Grund kann die Beurteilung des Klangs eines Raumes nicht ausschließlich an messtechnischen Ergebnissen festgemacht werden. Durch das Zusammenspiel von physiologischen und psychologischen Prozessen beim Hören müssen somit sowohl objektive Reize, als auch subjektive Empfindungen betrachtet werden [4]. In einer realen Hörumgebung ist es fast unmöglich Schallquellen nur als Direktsignal, also ohne den Einfluss von Reflektionen, wahr zu nehmen. Hervorgerufen durch reale Oberflächen oder Hindernisse unterliegen Schallwellen auf dem Weg zu einem Hörort immer dem Einfluss von Reflektion und Diffusion. Somit ist der Klang der am Ohr eines Zuhörers ankommt ein zeitlich verwaschenes Gemisch aus dem Originalsignal und den Reflektionen. Ein typisches Schallfeld mit seinen einzelnen Anteilen ist in Abbildung 1 dargestellt. Grundbestandteile sind Direktsignal, diskrete- bzw. frühe Reflektionen und der Nachhall. Die Zeit die ein Schallereignis benötigt um von maximaler Amplitude auf den Ruheschallpegel eines Raumes zu fallen wird als Nachhallzeit bezeichnet. Dieser Wert hängt stark von der Beschaffenheit und der Größe des Raumes und der Struktur des Schallfeldes ab und charakterisiert u.a. seinen Klang. Die Raumakustik spielt für die meisten Menschen im Alltag eine eher untergeordnete Rolle. Spätestens aber bei Veranstaltungen nimmt sie jeder bewusst wahr. Die Qualität einer Darbietung in einem Raum hängt nämlich stark von seiner Akustik ab. So können z.B. übermäßige Reflektionen den Genuss von Musik schmälern oder die Sprachverständlichkeit einer Rede stark herabsetzen. Somit ist es wichtig, und durch elektroakustische Nachhallverfahren auch erst möglich, eine Raumakustik zu schaffen die jeder Art von Darbietung gerecht wird. Dabei hat der Pegel und der zeitliche Verlauf der einzelnen Schallanteile die größte Wirkung auf die Wahrnehmung. Mit diesem Zusammenhang hat sich Helmut Haas [5] schon in den frühen 1950er Jahren beschäftigt und führte Experimente zur Untersuchung von Zeit- und Pegel einfluss von Reflektionen auf die Schallwahrnehmung von Probanden durch. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung, wobei die prozentuelle Zahl der sich gestört

gefühlten Probanden als Funktion von Pegel der Reflektionen in Dezibel über die Zeit in Sekunden zum Direktsignal dargestellt ist.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung eines Schallfeldes über die Zeit. Je nach zeitlicher Folge können die verschiedenen Anteile dem Direktsignal, den frühen Reflektionen und den späten Reflektionen bzw. dem Difusschall zugeordnet werden [4].



**Abbildung 2:** Prozentuelle Darstellung von sich gestört gefühlten Zuhörern bei unterschiedlichen Pegeln und Verzögerungen von Reflektionen eines Sprachsignals in einem Raum mit einer Nachhallzeit von 0,8 s. Die Sprachgeschwindigkeit lag bei 5,3 Silben pro Sekunde. Die Zahlen neben den Kurven zeigen den Pegel der diskreten Reflektionen in Dezibel (Nach Haas) [6].

Die numerischen Werte an den Kurven zeigen den Pegel in Dezibel der Reflektionen relativ zum Direktsignal. Aus dieser Abbildung wird deutlich in welchem zeitlichen Bereich und bei welchen Pegeldifferenzen eine Störung durch Reflektionen stattfinden. Zusätzlich zu dem konnte festgestellt werden, dass diskrete Reflektionen in Umgebungen mit wenig Nachhall als störender empfunden wurden als in Räumen mit höheren Nachhallzeiten. Durch ähnliche Experimente von Muncy et al [5] konnte zusätzlich festgestellt werden, dass unser Gehör bei Musik weniger empfindlich auf diskrete Reflektionen reagiert als bei Sprache. Diese Erkenntnisse können als Anhaltspunkt für das Design von künstlich erzeugten Raumpresets durch elektroakustische Nachhallsysteme genutzt werden. Durch die parametrischen Einstellmöglichkeiten und den

verschiedenen Impulsantworten des „SpatialSound Wave“-Systems kann ein Raumklang erschaffen werden der jeder Art von Darbietung gerecht wird.

### 3. SpatialSound Wave – Room Simulation Module (RSM)

SpatialSound Wave ist ein objektbasiertes Produktions- und Wiedergabesystem zur dreidimensionalen und richtungsgerechten Beschallung. Das System überzeugt mit einer akustisch realistischen Einhüllung des Zuhörers und bietet für Tonschaffende und Kreative neue Möglichkeiten zur einfachen Produktion räumlicher Audioinhalte [3]. Neben zahlreichen 3D-Audio Produktionswerkzeugen steht zusätzlich ein innovatives Modul zur interaktiven Raumsimulation zur Verfügung (RSM). Mit dynamischer Interaktion ermöglicht das „Room Simulation Module“ die Erzeugung verschiedener Raumakustiken durch regenerativer- und faltungsbasierter Auralisation. Dies wird ebenfalls durch den objektbasierten Ansatz realisiert, wodurch eine flexible und setupübergreifende Lösung gewährleistet wird. Die browserbasierte Bedienoberfläche ermöglicht u.a. eine volle Kontrolle über die Position, die Lautstärke und den zeitlichen Verlauf von Direktschall und Reflektionen. Die Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild des Graphen des RSM- Moduls, worin man die unabhängige Signalverarbeitung der einzelnen Schallanteile erkennen kann. Die Erzeugung des Nachhalls wird durch fünf diskrete-, acht frühe- und acht späte Reflektionsobjekte realisiert. Eine besonders realitätsgetreue Abbildung der diskreten Reflexionen wird durch das Spiegelschallquellenmodell ermöglicht. Dabei werden die Eigenschaften der diskreten Reflexionsobjekte, je nach Position der Direktschallquellen im Raum, berechnet. Die diffusen Nachhallanteile, also die frühen- und späten Reflektionen, beruhen hingegen auf dem Konzept von Faltungshall und können als Objekte im Raum frei angeordnet werden [3]. Alle Objekte können einzeln in der Lautstärke und der zeitlichen Verzögerung verändert werden. Ein globaler Equalizer ermöglicht zusätzliche Änderungen der Klangfarbe des virtuellen Raumes.

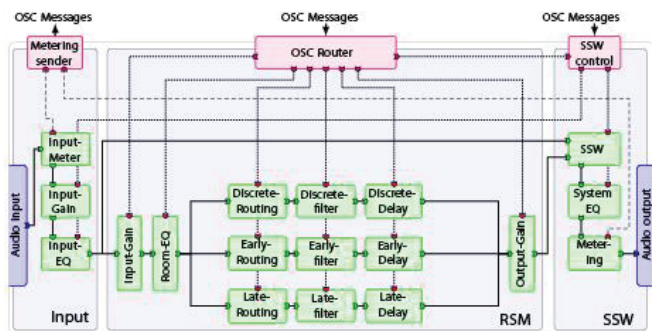
### 4. Untersuchung

Wie wahrscheinlich schon in vorherigen Abschnitten erkannt werden konnte ist die Erzeugung einer optimalen Raumakustik ein recht umfangreiches Thema. Durch elektroakustische Raumsimulation können allerdings manche Anwendungsfälle einfacher und kostengünstiger realisiert werden. Mit dem „Room Simulation Module“ ist es möglich ohne aufwendige bauliche Maßnahmen verschiedene Raumakustiken zu erzeugen. Welche Parameter in der Praxis einen Einfluss auf eine plausible Raumsimulation besitzen sollen in dem folgendem Abschnitt beleuchtet werden.

#### 4.1 Gegebenheiten und Bestandteile

Untersucht wurden zwei Räume mit unterschiedlichen Charakteristiken und Wiedergabesystemen. Beide Räume besitzen eine Raumakustik nach ITU-R BS 1116 Standard [8]. Als Referenz wurde ein Studioraum mit einem Volumen

von 56m<sup>3</sup> und einer mittlere Nachhallzeit von 0.18 Sekunden genutzt. Als zweite Testumgebung stand ein Forschungs- und Präsentationsraum mit 412m<sup>3</sup> und einer mittlere Nachhallzeit von 0.35 Sekunden zur Verfügung. Im Weiteren bezeichnen wir den kleineren Raum als „Studio“ und den größeren Raum als „3DP“. Im Studio wurden 30 Referenzlautsprecher und im 3DP 64 typische PA-Lautsprecher für die Untersuchung eingesetzt.

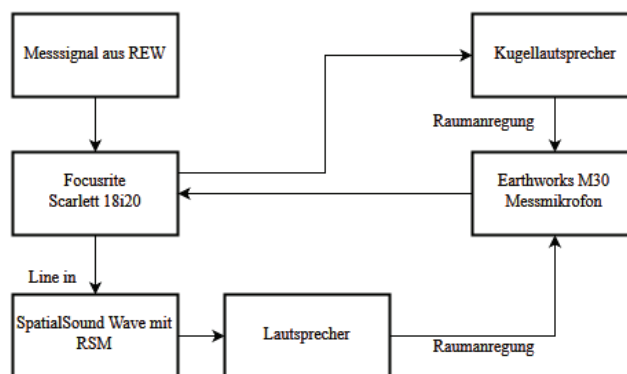


**Abbildung 3:** Blockschaltbild des „Room Simulation Modules“ (RSM). Erkennbar sind die einzelnen Blöcke der verschiedenen Reflektionsanteile.

Folgende Parameter des Systems wurden in beiden Räumen untersucht:

- Frequenz- und Impulsverhalten
- Nachhallzeit RT30
- Subjektive Raumwahrnehmung

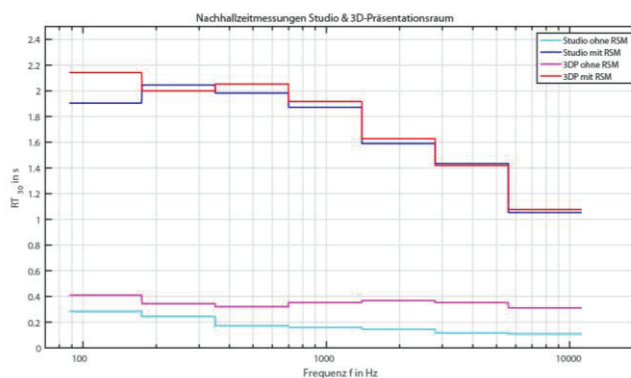
Um einen plausiblen Vergleich ziehen zu können wurde die Raumakustik in beiden Räumen jeweils im Originalzustand und mit aktiver Raumsimulation untersucht. Die raumakustischen Messungen sind nach DIN EN ISO 3382 [9] durchgeführt worden. Die Signalführung ist in Abbildung 4 dargestellt. Als Anregungssignal wurde ein Sinus von 70 Hz bis 20 kHz genutzt welcher von der Messsoftware „REW“ generiert wurde. Durch das Audiointerface wurde das Signal DA-gewandelt und in den Kugellautsprecher bzw. direkt in das SSW- System gespeist. Durch den Audiorenderer wurden die Signale objektbasiert verarbeitet, im Raum verteilt, und anschließend kanalbasiert auf die einzelnen Lautsprecher wiedergegeben. Die Impulsantworten der Messungen des Raumes wurden mit den Mikrofonen an verschiedenen Positionen aufgezeichnet und mit Hilfe von „REW“ verarbeitet. Als Grundlage für alle Messungen wurde das RSM- Preset „Kirche“ verwendet. Mit seiner Nachhallzeit von ca. 2 Sekunden und dem relativ großen Anteil an frühen Reflektionen beinhaltete dies alle relevanten räumlichen Informationen. Basierend auf den bekannten Parametern, welche in Abschnitt 2 beschrieben wurden, wurden zusätzliche Anpassungen im Studio vorgenommen. Durch die automatische Skalierung zwischen verschiedenen Lautsprecher setups war es einfach das Preset in den zweiten Raum zu transferieren. Anpassungen wurden dort nicht mehr vorgenommen, um einen Eindruck vom Verhalten zwischen verschiedenen Setups zu bekommen.



**Abbildung 4:** Blockdiagramm der Signalkette der akustischen Messungen. Das Messsignal bestand aus einem Sinussignal und diente zur Anregung des Raumes jeweils mit und ohne künstlicher Nachhallzeugung.

## 5. Auswertung und Ergebnisse

In diesem Paper wurden Eigenschaften und Wirkungen von Raumakustik in natürlicher als auch in elektroakustisch erzeugter Form beschrieben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung geben Aufschluss über das Verhalten des RSM- Systems in zwei verschiedenen Testumgebungen. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass sich in beiden Räumen der Untersuchung eine Nachhallzeitverlängerung auf durchschnittliche 1,7 Sekunden erzeugen ließ. In Abbildung 5 ist ein Oktavbandplot der Nachhallzeiten (RT30) über die Frequenz dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind in der Tabelle 2 aufgeführt. Daraus lässt sich erkennen, dass sich die Nachhallzeiten beider Räume mit aktiver Raumsimulation nur wenig zueinander unterscheiden. Der Einfluss der unterschiedlichen Größen beider Räume besitzen in dieser Untersuchung nur wenig Einfluss.



**Abbildung 5:** Gemessene Nachhallzeiten RT30 von beiden Setups jeweils mit und ohne aktiver Nachhallzeitverlängerung (Dargestellt in Oktavbändern). Hierbei sind die RT30 Werte in Sekunden über die Frequenz in Herz dargestellt. Alle Werte wurden an vier verschiedenen Positionen gemessen und anschließend gemittelt.

Wie schon im vorherigen Abschnitt theoretisch erläutert, hat die zeitliche Position und der Schalldruckpegel der Reflektionen einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung des Raumes. In Abbildung 6 ist der Amplituden-Zeit-verlauf der einzelnen Schallfeldanteile der Raumsimulation im Studio dargestellt. Diese Werte

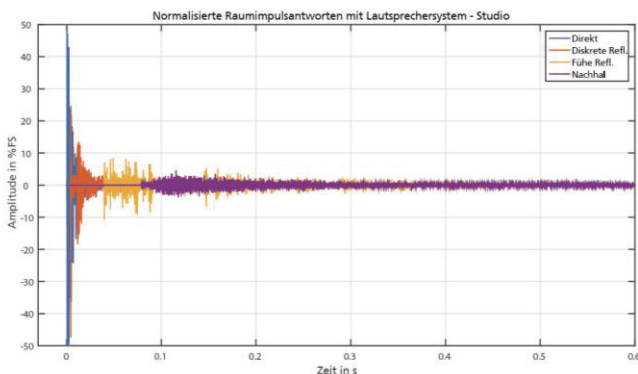
sind an Empfehlungswerte [4] angelehnt und durch subjektives Hörempfinden angepasst worden. Es konnte festgestellt werden, dass auch im 3DP die zeitlichen Positionen sehr große Ähnlichkeiten mit den Werten im Studio aufwiesen.

**Tabelle 2:** Gemessene Nachhallzeiten RT30 von beiden Setups jeweils mit und ohne aktiver Nachhallzeitverlängerung (Dargestellt in Oktavbändern). Alle Werte wurden an vier verschiedenen Positionen gemessen und anschließend gemittelt.

Frequenz [Hz] (Oktavband)	3DP ohne RSM	3DP mit RSM	Studio ohne RSM	Studio mit RSM
125	0,41	2,14	0,29	1,91
250	0,34	2,00	0,24	2,05
500	0,32	2,05	0,17	1,98
1000	0,35	1,92	0,16	1,87
2000	0,37	1,62	0,15	1,59
4000	0,35	1,42	0,12	1,44
8000	0,31	1,08	0,11	1,05
Mittelwert	0,35	1,75	0,18	1,70

Den einzelnen Reflektionsanteilen konnten folgende Eigenschaften zugewiesen werden:

- Diskrete Reflektionen haben einen großen Einfluss auf die wahrgenommene Lautstärke von Direktschall und definieren die Breite der Quelle.
- Frühe Reflektionen haben einen großen Einfluss auf die Klangfarbe und die Raumentiefe. Die zeitliche Abfolge zum Direktsignal bestimmt u.a. die Größe des Raumes.
- Die späten Reflektionen oder der Nachhall erzeugt ein diffuses Schallfeld und erzeugt ein Gefühl der Einhüllung. Außerdem definieren sie den resultierenden Wert der Nachhallzeit.



**Abbildung 6:** Amplituden-Zeit-verlauf [%] der einzelnen Teile des RSM-Schallfeldes im Studio über die Zeit [s]. Der blaue Impuls bei Null Sekunden zeigt die direkten Reflektionen, die darauffolgenden Roten Ausschläge die diskreten-, die Gelben die frühen- und die Violetten die späten Reflektionen.

Trotz des nahezu linearen Lautsprechersystems trat eine wahrnehmbare Färbung der Anregungssignale auf. So konnte z.B. beim Klatschen oder Sprechen eine leichte Tonfärbung in manchen Frequenzbereichen wahrgenommen werden. Die Ursache dafür ist die Verzögerung der diskreten

und frühen Reflektionen zum Direktsignal, genau genommen die daraus entstehenden Kammfiltereffekte. Ob eine hörbare Färbung des Schallfeldes stattfindet hängt zum Einen von der Zeit zwischen dem Direktsignal und den Reflektionen, zum Anderen von den relativen Amplituden ab [7]. Der absolute Schwellenwert für hörbare Färbung wird mit steigendem Abstand zwischen Direktsignal und Reflektion größer. Zusätzlich zur Färbung durch dieses Phänomen findet eine Färbung durch die Charakteristik der Lautsprecher und des Raumes statt. Somit werden Unebenheiten im Amplituden-Frequenzverlauf der Lautsprecher und des Raumes auch auf die Klangfarbe des virtuellen Raumes übertragen. So konnte ein leichter tonaler Unterschied zwischen beiden Räumen wahrgenommen werden. Durch die Referenzlautsprecher war der Klang des Systems im Studio etwas brillanter und definierter als im 3DP. Dafür besaß das System im größeren Präsentationsraum mehr Raumentiefe. Grund dafür ist der größere Hallradius und der Abstand vom Hörort zum Lautsprecher. Daraus kann man schließen, dass der Abstand und das Abstrahlverhalten der eingesetzten Lautsprecher berücksichtigt werden sollte. Abschließend kann man sagen, dass in beiden Räumen mit verschiedenen akustischen- und technischen Eigenschaften eine realistische Raumakustik mit einer durchschnittlichen Nachhallzeit von 1,7 Sekunden erschaffen werden konnte. Das Übertragen von Setups funktionierte dabei ohne Probleme und benötigte keine aufwendige Anpassung. Welchen Einfluss weitere Räume mit schlechteren Eigenschaften auf das System besitzen, könnte in weiteren Untersuchungen erforscht werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Wosnik, Johannes: „Elektroakustik II“, Vieweg+Teubner Verlag, 1962.
- [2] Brix, Sandra: “Wave Field Synthesis Based Concept Car for High-Quality Automotive Sound”, AES 48th International Conference, Munich, Germany, 2012.
- [3] Fraunhofer IDMT Homepage, URL: <http://www.idmt.fraunhofer.de>.
- [4] Kuttruff, Heinrich: “Room Acoustics”, Spon Press, 2009.
- [5] Meyer E, Kuttruff H: „Zur Raumakustik einer großen Festhalle“, *Acustica*, 1964; 14:138.
- [6] Guelke RW, Broadhurst AD. Reverberation time control by direct feedback, *Acustica* 1971; 24:33.
- [7] Berkhout AJ: “A holographic approach to acoustic control”, *J Audio Eng Soc* 1988; 36:977.
- [8] Floyd E. Toole: “Sound Reproduction”, Elsevier Ltd., 2008.
- [8] ITU-R BS 1116 URL: <https://www.itu.int>.
- [9] DIN EN ISO 3382 URL: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nmp/normen/wdc-beuth:din21:116072001>.