

# Modellierung von Publikumsgeräuschen bei Veranstaltungen mit Sprache und Musik

Sebastian Böldt<sup>1</sup>, Jochen Steffens<sup>1,2</sup>, Clemens Büttner<sup>1</sup> und Stefan Weinzierl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation

<sup>2</sup> Hochschule Düsseldorf, Institute of Sound and Vibration Engineering (ISAVE)

## Einleitung

Das Klangereignis einer Aufführung von Musik und Sprache vor Publikum beinhaltet nicht nur die musikalische oder sprachliche Darbietung selbst, sondern auch die Geräusche des Publikums. Beim Hören einer Aufführung im Raum betrachtet man diese Geräusche meist eher als störend, etwa wenn bei leisen Stellen gehustet, in den Taschen gewühlt oder mit den Nachbarn geflüstert wird. Bei der Simulation musikalischer Aufführungen in einer virtuellen akustischen Realität zeigt sich andererseits, dass ein Verzicht auf das Soundscape des umgebenden Publikums zu einem Verlust von räumlicher und sozialer Präsenz im Erleben der Aufführung führt. Somit kann angenommen werden, dass die Simulation von Publikumsgeräuschen einen unverzichtbaren Beitrag für die Glaubwürdigkeit und die Intensität einer virtuellen Aufführung leistet. Auch für die Planung von Aufführungsräumen kann eine Kenntnis der akustischen Eigenschaften von Publikumsgeräuschen von Bedeutung sein, etwa für eine Festlegung der Grenzwerte für das technische Hintergrundgeräusch oder für eine Prognose der Sprachverständlichkeit für akustische oder elektroakustisch verstärkte Darbietungen nach DIN EN 60268 [1].

In diesem Zusammenhang gibt es bisher nur wenige Untersuchungen, wie das Publikumsgeräusch während einer Aufführung im Hinblick auf den Schallpegel und die spektrale Verteilung des Signals in seiner Häufigkeit verteilt ist, wie es sich in seiner zeitlichen Dynamik verändert, und wie es mit anderen Parametern wie den raumakustischen Bedingungen, der Größe des Publikums und den Inhalten und der Dramaturgie der Aufführung zusammenhängt.

Messtechnische Untersuchungen von Publikumsgeräuschen bei Konzertaufführungen wurden von Kleiner [2] durchgeführt und einer Messung der Schallleistung an Einzelpersonen gegenübergestellt. Hodgson und Kollegen [3] schlugen im Zuge von Schallpegelmessungen in Lehrveranstaltungen ein Verfahren vor, welches die verschiedenen Komponenten des Geräusches durch eine Zerlegung in gaußverteilte Komponenten identifiziert und dadurch das Publikumsgeräusch vom Klang der Darbietung selbst und sowie technischen Fremdgeräuschen trennt (Gaussian Mixture Model, GMM). Dieses Verfahren wurde von Jeong und Kollegen [4] weiterentwickelt und für eine Untersuchung im Kontext klassischer Konzerte eingesetzt. Um Richtlinien für die Grenzwerte der Geräusche der Bühnenmaschinerie zu erhalten, wurde eine ähnliche Untersuchung bei Theater-, Ballett- und Opernaufführungen in vier deutschen Opernhäusern durchgeführt [5]. Hierbei wurden

neben einer statistischen Modellierung zur Charakterisierung des Publikumsgeräusches auch verschiedene Verteilungsgrößen verwendet, etwa der Schallpegel in der „leisesten Sekunde“ des Konzerts ( $L_{\min 1s}$ ) oder der Pegel, der nur in 1% der Dauer des Konzerts unterschritten wurde ( $L_{99}$ ).

Bislang existieren jedoch keine Untersuchungen zu einer wahrnehmungsbezogenen Charakterisierung des Publikumsgeräusches, d.h. zur Frage, welche Attribute sich für eine Beschreibung von Publikumsgeräuschen eignen und durch welche Dimensionen sich das damit verbundene Klangereignis beschreiben lässt. Zur Entwicklung eines solchen psychologischen Messinstruments, analog zu den Inventaren etwa für Soundscapes im Allgemeinen [6] oder für die Wahrnehmung von raumakustischen Bedingungen [7], wurden in der vorliegenden Studie daher in verschiedenen Räumen Aufnahmen von Publikumsgeräuschen durchgeführt und akustisch analysiert. Auf Grundlage einer mehrkanaligen Reproduktion dieser Stimuli im Labor wurde durch ein qualitatives Verfahren zunächst ein Inventar von Attributen zur Beschreibung der Geräusche generiert, und in einem zweiten Schritt die quantitativen Bewertungen der Stimuli mit diesen Items einer Faktorenanalyse unterzogen, um die voneinander unabhängigen Dimensionen des Publikumsgeräusches zu ermitteln. Das so ermittelte sprachliche Inventar kann nicht nur für eine Analyse von Publikumsgeräuschen verwendet werden; es kann auch Grundlage einer Synthese sein, bei der die perzeptiven Dimensionen in akustische Parameter übersetzt werden.

## Methode

Bei acht Musik- und Theaterveranstaltungen in fünf verschiedenen Räumen wurden sowohl Breitband- als auch Terz-Schalldruckpegel während der Dauer der Aufführung aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden die technischen Hintergrundgeräusche und die Nachhallzeit jedes Raumes im unbesetzten Zustand gemessen. Eine genauere Beschreibung des aufgeführten Stückes je Raum ist in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Räume mit Auflistung der dargebotenen Aufführungen während der Messung

Raum	Aufführung
Theater UdK Berlin (UT)	Theateraufführung (stud. Arbeiten)
Audimax TU Berlin (AM)	Vorlesung
UdK Konzertsaal (UK)	Klassisches Konzert (sinf. Aufführg.)
Komische Oper (KO)	Ballett ( <i>Distant Matter</i> - A. Van Dijk)
Staatsoper Berlin (SO)	Oper ( <i>Rigoletto</i> - G. Verdi)

Die Schallpegel wurden mit einem NTI XL2 Schalldruckpegelmessgerät und einem M2230 Klasse 1-Mikrofon aufgezeichnet. Aufnahmen für die spätere Wiedergabe im Labor wurden mit einem 3D-Audiomikrofon (Sennheiser AMBEO VR mit Fireface UFX/Scarlett 8i8 Audiointerface) durchgeführt. Im UniT-Theater wurde unter Verwendung des NTI XL2 M2230 die Nachhallzeit nach EN ISO 354:2003, 3.3 [8] bestimmt. Bei den übrigen Spielorten konnte auf existierende Messungen zurückgegriffen werden. Für die Approximation des besetzten Zustands wurde für jede Aufführung das Verfahren der DIN18041 [9, S. 23] verwendet. Die Nachhallzeiten im besetzten sowie unbesetzten Zustand sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Veranstaltungsräume, Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen ( $T_m$ ) im unbesetzten Zustand und berechnet für den besetzten Zustand, für jede Aufführung, mit Angabe der geschätzten Publikumsgröße (N).

Raum	$T_m$ (unbes.)	$T_m$ (bes.)	N
UT 1/2	1,5	1,4/1,4	80/130
AM 1/2	2,1	1,4/1,9	700/200
UK 01/02	1,6	1,4/1,5	600/230
KO	1,3	1,2	1150
SO	-	1,6	1300

Die Messungen des Schalldruckpegels während der Aufführung wurden im angenäherten Diffusfeld (auf einem Balkon oder einer Empore in ca. 3–3,5 m Höhe über dem Publikum) durchgeführt. Vor der jeweiligen Veranstaltung wurde das technische Hintergrundrauschen im leeren Saal unter Betriebsnahme derjenigen technischen Geräte (Klima, Licht) gemessen, welche auch während der Aufführung eingeschaltet waren. Sobald die ersten Zuschauer den Saal betraten, begann die Publikumsgeräuschmessung, und der Schalldruckpegel wurde im Sekundentakt parallel zu den vier Ausgangskanälen des Sennheiser AMBEO-Mikrofons aufgezeichnet. Anhand des vorgegebenen Programms (verschiedene Werke) oder des dramaturgischen Verlaufs wurden entsprechende Zeitabschnitte annotiert, um eine spätere Analyse dieser Intervalle zu ermöglichen.

Die Analyse der Publikumsgeräuschpegel basierte auf dem Ansatz von Jeong et al. [4]. Die gemessene Häufigkeitsverteilung wurde durch drei Gaußsche Verteilungen approximiert, welche das gemischte Hintergrundrauschen sowie Passagen mittlerer und hoher Lautstärke repräsentieren. Das gemischte Hintergrundrauschen ist hierbei aus dem gemessenen technischen Hintergrundrauschen und den gesuchten Publikumsgeräuschen zusammengesetzt. Um die Parameter der Verteilungsfunktionen zu ermitteln, wurde die Fehlerfunktion (RSS) zwischen gemessener und modellierter Kurve minimiert, was die Parameter der drei Normalverteilungen (Mittelwert, Standardabweichung und Verstärkungsfaktor) als Ergebnis des Optimierungsprozesses liefert. Durch energetische Subtraktion des technischen Hintergrundrauschens vom gemischten Hintergrundrauschen konnte so eine Verteilungskurve für die Publikumsgeräusche ermittelt werden.

Abweichend zur Methode von Jeong et al. wurde der Einzahlwert für den Publikumsgeräuschpegel im jeweiligen Oktavband als Mittelwert der extrahierten Verteilungskurve bestimmt. Dieses Verfahren wurde für jedes Oktavband in jedem Zeitabschnitt wiederholt, wodurch Breitbandpegel sowie die spektralen Zusammensetzungen der Publikumsgeräusche für jedes Zeitintervall einer Aufführung ermittelt werden konnten.

Im Anschluss daran wurde der Einfluss des technischen Hintergrundrauschens, der zeitlichen Variable (Zeitabschnitt), der Zuschauerzahl sowie der Nachhallzeit mithilfe mehrerer linearer gemischter Modelle überprüft. In diesen Modellen wurden die eigentlichen Konzerträume als zufälliger Achsenabschnitt (Random Intercept) spezifiziert und das zugehörige Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{marginal}}$  berechnet, um Aufschluss über die durch die jeweilige unabhängige Variable erklärte Varianz zu bekommen.

Als akustische Stimuli für die Laboruntersuchungen wurden aus den Aufnahmen der acht Veranstaltungen insgesamt 31 5–20 s lange Ausschnitte entnommen, die in sich klanglich homogen waren, die zwischen den Ausschnitten aber ein möglichst großes Spektrum akustisch-klanglicher Eigenschaften abdeckten. Die mit dem Ambisonics-Mikrofon aufgenommenen Aufzeichnungen wurden durch ein Plugin (Sennheiser AMBEO) in das ambix-Format umgewandelt, über das 21-kanalige Ambisonics-Array (Raum EN 325) am Fachgebiet Audiokommunikation der TU Berlin wiedergegeben und anhand des gemessenen Schalldruckpegels im Wiedergaberaum kalibriert. Der Fremdgeräuschpegel im Wiedergaberaum lag mit 22 dBA 15dB unterhalb des niedrigsten präsentierten Pegels eines Stimuli (UdK Konzertsaal: 37,5 dBA).

Die Erarbeitung eines Vokabular zur Beschreibung der Publikumsgeräusche durch eine Expertengruppe erfolgte teils literaturbasiert ([10], ISO/TS 12913 [6]), und teils stimulusbasiert, angelehnt an die Repertory Grid Technik [11]. Hierfür wurden fünf Experten aus dem Bereich der Raum-, Psycho- und Musikakustik vier Stimulipaare präsentiert, worauf diese bipolare Begriffe nennen sollten, welche Unterschiede innerhalb der Stimuli beschreiben.

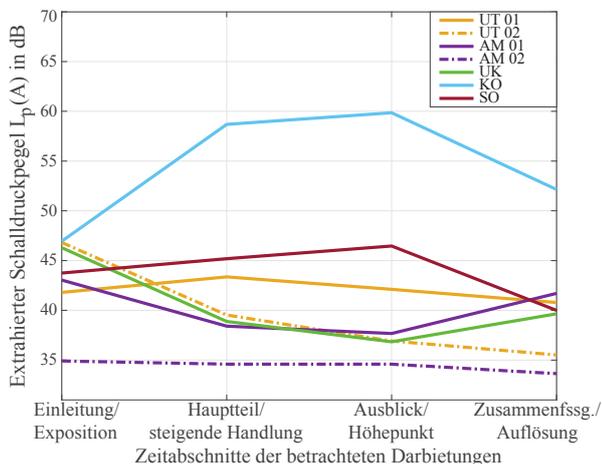
Mit dem auf diese Weise generierten Begriffsinventar wurden die 31 Stimuli von 12 Teilnehmer (8 männlich, 4 weiblich, 18–53 Jahre) im Hinblick auf ihre perzeptiven Qualitäten bewertet. Anschließend wurde basierend auf den gemittelten Begriffsbewertungen je Stimuli eine Faktorenanalyse durchgeführt, um ein mögliches Zusammenfassen von Begriffspaaren zu untersuchen. Hierfür wurden das Scree- und Kaiserkriterium herangezogen, um eine sinnvolle Faktorenanzahl zu bestimmen. Das Berechnen der Interklassen-Korrelationskoeffizienten (ICCs) für alle Bewertungsbegriffe wurde vorangestellt, um die Übereinstimmung (Interrater-Reliabilität) zwischen den Beurteilern in Bezug auf die jeweiligen Begriffe zu prüfen. Abschließend wurde untersucht, inwieweit die durch die Faktorenanalyse gewonnenen Dimensionen mit dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel korrelieren.

## Ergebnisse

Mithilfe der Methode nach Jeong et al. konnte das charakteristische Frequenzspektrum der Publikumsgeräusche im schwerpunktmäßigen Bereich von 250–8000 Hz extrahiert werden. Die daraus resultierenden A-bewerteten Publikumsgeräuschpegel erreichten dabei, über die verschiedenen Zeitabschnitte der gemessenen Darbietungen betrachtet, Werte zwischen 34 dBA (leisester Zeitabschnitt) und 60 dBA (lautester Zeitabschnitt). Gemittelt über alle Messungen konnte eine Differenz von 7,4 dB (SD = 3,9 dB) zwischen Publikumsgeräuschpegel und technischem Hintergrundrauschen beobachtet werden, was in Einklang mit den Ergebnissen von Jeong et al. ist, die eine mittlere Differenz von 7,9 dB berichteten.

Die Ergebnisse der linearen gemischten Modelle zeigen, dass der Publikumsgeräuschpegel signifikant vom technischen Hintergrundrauschen abhängt,  $t(4.4)=2.55$ ,  $p=.046$ ,  $R^2_{\text{marginal}}=.39$ . Zudem zeigte sich ein Einfluss der Zuschaueranzahl auf den Publikumsgeräuschpegel,  $t(10.2)=4.08$ ,  $p=.001$ ,  $R^2_{\text{marginal}}=.28$ . Im Gegensatz dazu erwies sich der Zeitabschnitt des Konzertes für alle Räume nicht als signifikanter Einflussfaktor des Publikumsgeräuschpegels,  $t(23.9)=-0.66$ ,  $p=.52$ . Ebenso konnte unter Hinzunahme der Zuschauerzahl als Kontrollvariable kein Einfluss der Nachhallzeit nachgewiesen werden,  $t(9.7)=-1.51$ ,  $p=.16$ .

Betrachtet man die Veränderungen der extrahierten, breitbandigen A-gewichteten Publikumsgeräuschpegel qualitativ über die Zeit, so lassen sich zwei charakteristische Verläufe beobachten, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.



**Abbildung 1:** Zeitlicher Verlauf der mittleren breitbandigen Publikumsgeräuschpegel je Zeitabschnitt (500 Hz - 8000 Hz), während der Aufführung. Breitbandpegel basierend auf den Mittelwerten der erstellten Gaußverteilung je Oktavband erstellt.

Die erste Gruppe von Aufführungen ist durch einen U-förmigen zeitlichen Verlauf gekennzeichnet, mit den niedrigsten Werten meist um den Mittelteil des Werkes und einem danach wieder ansteigenden Pegel. Hierzu gehören die Verläufe der klassischen Konzerte sowie einer Vorlesung. Der zweite Verlauf wird durch die Veranstaltungen

in der Komischen Oper, Staatsoper sowie UT 01 gebildet, welche im Programm einem ähnlichen dramaturgischen Verlauf folgten. Dieser folgt einer invertierten U-Form mit einem Anstieg zum dritten Zeitabschnitt und anschließendem Pegelabfall zum Ende. Die zweite Veranstaltung im Audimax ist mit einem eher monotonen Verlauf keinem der beiden charakteristischen Verläufe zuzuordnen, was wiederum zeigt, dass der Verlauf weniger dem Raum selbst, sondern vielmehr dem spezifischen Programm zuzuordnen ist.

Als Vokabular zur Beschreibung der Stimuli im Labor wurden von den Experten insgesamt 21 bipolare Begriffspaare erarbeitet (Tabelle 4, Spalte 1). Diese wurden zur Bewertung der akustischen Eigenschaften der präsentierten Publikumsgeräusche und der suggerierten Atmosphäre im anschließenden Hörversuch herangezogen.

Gemäß des KMO-Kriteriums (Grenzwert 0,7), konnten die 21 Begriffspaare mittels Faktorenanalyse (Oblim-Rotation) auf drei Dimensionen reduziert werden. Die Faktoren wurden basierend auf den Faktorladungen (siehe Tabelle 4) als *Lebendigkeit*, *Fokus* und *Technisches Geräusch* interpretiert.

Die erste Dimension beschreibt, wie ‚ausgelassen‘ und ‚lebendig‘ ein Publikum wirkt oder ob es eher einen ‚monotonen‘ und ‚verhaltenen‘ Eindruck macht. Die Wirkung eines auf die Aufführung konzentrierten Publikums wird durch den zweiten Faktor mit Begriffen wie ‚aufmerksam‘, ‚angenehm‘ und ‚ruhig‘ beschrieben, wobei hier Begriffe wie ‚rau‘ und ‚laut‘ das gegensätzliche Extrem bilden. Der dritte Faktor, der mit Begriffen wie ‚tonhaltig‘, ‚dröhnend‘ und ‚technisch‘ assoziiert ist, verweist auf Geräuschanteile, die überwiegend technischer Natur sind.

Eine Korrelationsanalyse zwischen den Faktorwerten und den zugehörigen A-bewerteten Publikumsgeräuschpegeln der gemessenen Aufführungen führte zu einer signifikanten positiven Korrelation mit dem Faktor *Lebendigkeit* (Tabelle 3). Die beiden anderen Faktoren hingegen waren nicht signifikant mit dem Publikumsgeräuschpegel korreliert.

**Tabelle 3:** Ermittelte Korrelationskoeffizienten zwischen dem Publikumsgeräuschpegel und berechneten Faktoren

	Lebendigkeit	Fokus	technisches Geräusch
$L_{eq,A}$	0,40*	0,33	0,21
Lebendigkeit	1	-0,57**	0,12
Fokus	-	1	0,02

\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$

## Diskussion

In der hier vorgestellten Studie wurden der Pegel und der zeitliche Verlauf von Publikumsgeräuschen bei unterschiedlichen sprach- und musikbezogenen Darbietungen bestimmt. Basierend auf erstellten Geräuschaufnahmen

**Tabelle 4:** Erarbeitete Begriffspaare sowie ermittelte Faktoren mit Benennung sowie Ladung der jeweiligen Bewertungsbegriffe

Begriffspaar	Lebendigkeit	Fokus	techn. Geräusch
amüsiert - ernsthaft	<b>1,12</b>	-0,22	0,07
ausgelassen - verhalten	<b>0,95</b>	0,08	0,07
wach - müde	<b>0,81</b>	0,22	-0,05
lebendig - leblos	<b>0,72</b>	0,31	-0,19
ereignisreich - ereignisarm	<b>0,61</b>	0,45	-0,11
hell - dunkel	<b>0,67</b>	0,29	0,23
sprachhaltig - n. sprachhaltig	<b>0,54</b>	0,44	-0,01
rauschhaft - n. rauschhaft	<b>-0,72</b>	0,23	0,25
monoton - n. monoton	<b>-0,61</b>	-0,29	0,30
aufmerksam - unaufmerksam	0,04	<b>0,91</b>	0,09
angenehm - unangenehm	0,08	<b>0,76</b>	-0,31
ruhig - unruhig	-0,44	<b>0,62</b>	0,14
rau - n. rau	-0,14	<b>-0,96</b>	-0,02
räum. verteilt - räum. fokussiert	0,06	<b>-0,89</b>	-0,05
chaotisch - geordnet	0,33	<b>-0,72</b>	-0,03
laut - leise	0,46	<b>-0,65</b>	0,07
transientenhaltig - stationär	0,38	<b>-0,57</b>	-0,23
scharf - dumpf	0,46	-0,45	0,20
tonhaltig - n. tonhaltig	0,28	-0,11	<b>0,67</b>
dröhnend - n. dröhnend	0,07	0,43	<b>0,65</b>
technisch - n. technisch	-0,36	-0,41	<b>0,56</b>

wurde mittels eines theorie- und stimulusbasierten, qualitativen Verfahrens ein Vokabular zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen entwickelt und anhand von subjektiven Bewertungen der Geräuscheigenschaften und der anschließenden Berechnung einer Faktorenanalyse perzeptive Dimensionen dieser Geräusche ermittelt.

In ihrer Veränderung über die Dauer der Aufführung ließen sich zwei charakteristische Verläufe für den breitbandigen Publikumsgeräuschpegel identifizieren, welche einer U-förmigen und einer invertierten U-förmigen Kurve folgen. Bei Veranstaltungen, die eine hohe Konzentration auf Inhalte überwiegend intellektueller Natur erfordern (Vorlesungen), scheint ein U-förmiger Verlauf typisch zu sein, während bei Veranstaltungen, welche überwiegend als unterhaltsam wahrgenommen werden (Theater, Oper), ein umgekehrt U-förmiger Verlauf charakteristisch zu sein scheint. Für eine Verallgemeinerung dieser Beobachtung war die Stichprobe der untersuchten Veranstaltungen jedoch zu klein.

Die Unterschiede zwischen den Zeitabschnitten zeigen, dass Publikumsgeräusche eine hohe Dynamik von bis zu 15 dB während des Verlaufs der Veranstaltung aufweisen können. Die verwendete Methode der Gauß-Modellierung gerät allerdings bei kontinuierlichen, lauten Passagen der musikalischen Darbietung an ihre Grenzen, da hier der gemessene Schalldruckpegel nie auf das Niveau der eigentlichen Publikumsgeräusche abfällt.

Mit Hilfe der berechneten Modelle konnte ein signifikanter Einfluss des technischen Hintergrundrauschens sowie der Zuschaueranzahl auf den Publikumsgeräuschpegel nachgewiesen werden. Die Ergebnisse bestätigen die Beobachtung von Jeong et al. [4] und suggerieren, dass Publikumsgeräusche mit dem technischen Hintergrundgeräusch ansteigen. Im Umkehrschluss ist also zu erwarten, dass ein Absenken der technischen Hintergrundgeräusche zu einem geringeren Publikumsgeräuschpegel

führen könnte, was bei der Planung von Konzerthäusern berücksichtigt werden sollte.

Eine Faktorenanalyse der perzeptiven Bewertungen der aufgenommenen Publikumsgeräusche anhand von 21 Begriffspaaren ergab drei relativ unabhängige Dimensionen, die sich als *Lebendigkeit*, *Fokus* und *Technisches Geräusch* interpretieren lassen. Bei zukünftigen Untersuchungen zu Publikumsgeräuschen kann somit auf diese Faktoren bzw. das in diesem Beitrag erarbeitete Vokabular als Messinstrument zurückgegriffen werden. Durch weitere, daran anknüpfende Analysen sollen insbesondere Zusammenhänge zwischen den ermittelten perzeptiven Faktoren und technischen Audio Features ermittelt werden, sodass durch eine Analyse dieser Features beispielsweise Rückschlüsse auf die Stimmungslage des Publikums gezogen werden können.

## Literatur

- [1] DIN EN 60268-16:2012. Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex.
- [2] Kleiner, M.: On the Audience Induced Background Noise Level in Auditoria. Acta Acustica united with Acustica 46 (1980), 82–88.
- [3] Hodgson, M., Rempel, R. and Kennedy, S.: Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. J. Acoust. Soc. Am. 105 (1999), 226–233.
- [4] Jeong, C.-H., Marie, P., Brunskog, J. and Møller Petersen, C.: Audience noise in concert halls during musical performances. J. Acoust. Soc. Am. 131 (2012), 2753–2761.
- [5] Melnikov, A., Witew, I., Maeder, M., Gatt, M., Scheffler, M., and Marburg, S.: Sound pressure level limits for stage machinery noise in operas and theaters. Applied Acoustics 156 (2019), 29–39.
- [6] ISO 12913-1:2014. Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework.
- [7] Weinzierl, S., Lepa, S., Ackermann, D.: A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). J. Acoust. Soc. Am. 144 (2018), 1245–1257.
- [8] ISO 3382-1:2009. Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume.
- [9] DIN 18041:2016. Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.
- [10] Kang, N., Brinkman, W., Riemsdijk, M. B. v. and Nee-rinx, M. A.: An Expressive Virtual Audience with Flexible Behavioral Styles. IEEE Transactions on Affective Computing 4 (2013), 326–340.
- [11] Berg, J. and Rumsey, F.: Identification of Quality Attributes of Spatial Audio by Repertory Grid Technique. J. Audio Eng. Soc. 54 (2006), 365–379.