

Der virtuelle Konzertsaal

Ein Werkzeug zur Erforschung der audiovisuellen Wahrnehmung von Aufführungsräumen

Hans-Joachim Maempel^a und Michael Horn^a

^aAbteilung III Akustik und Musiktechnologie | Studiotechnik und IT, Staatliches Institut für Musikforschung preußischer Kulturbesitz, Deutschland, maempel@sim.spk-berlin.de

KURZDARSTELLUNG: Die experimentelle Untersuchung der audiovisuellen Raumwahrnehmung erfordert vor dem Hintergrund der inkonsistenten Forschungslage kritische methodologische Vorüberlegungen. Danach ist nicht nur der Einsatz simulierter Räume notwendige Voraussetzung für die Durchführung von Experimenten zur Bestimmung der Beiträge von Hören und Sehen zu verschiedenen Merkmalen der Raumwahrnehmung, es sind auch bestimmte technische Anforderungen an eine entsprechende virtuelle Umgebung zu stellen, unter anderem eine dreidimensionale Darstellung, Interaktivität in Bezug auf Kopfdrehungen, eine hohe Winkelauflösung und ein großer Betrachtungswinkel. Es werden die methodologische Herleitung dieser Anforderungen, die technischen Schritte der Realisation der virtuellen Umgebung, erste empirische Ergebnisse ihres Einsatzes und künftige Forschungsfragen dargestellt. Neben der Verwendung als Forschungswerkzeug wäre eine öffentliche Zugänglichkeit des virtuellen Konzertsaals im Rahmen von Ausstellungen oder Führungen im Museum in mehrfacher Hinsicht von Nutzen.

1. EINFÜHRUNG

Sowohl zur Alltagswelt als auch zu vielen Künsten, etwa der Musik, dem Theater, dem Film oder der multimedialen Installation, ist der wahrnehmende Zugang im wesentlichen ein audiovisueller. So trivial diese Feststellung ist, so grundsätzlich sind die sich aus ihr ergebenden Fragen und so schwierig ist deren Beantwortung mit den Mitteln der empirischen Wissenschaften. Wie beeinflussen uns Stimme und Mimik einer Person? Wie tragen Bildgeschehen und Filmmusik zur Spannung im Film bei? Berührt uns eine musikalische Darbietung eher aufgrund des Gehörten oder eher aufgrund des Gesehenen? Und welchen Anteil haben daran die Akustik und die optische Gestaltung des Aufführungsraums? Im folgenden werden die Entwicklung und der Einsatz eines Forschungswerkzeugs beschrieben, das für die Klärung einiger dieser Fragen prinzipiell geeignet ist und derzeit für die Untersuchung der audiovisuellen Raumwahrnehmung eingesetzt wird. Obwohl seine Entwicklung ausschließlich an methodischen Kriterien der empirischen Forschung orientiert war, verspricht seine öffentliche Ausstellung im institutseigenen

Musikinstrumenten-Museum gleich in mehrfacher Hinsicht einen Gewinn.

2. PROBLEMSTELLUNG

Die akustische Forschung hat dem Zusammenspiel der auditiven und visuellen Modalität lange Zeit wenig Beachtung geschenkt. Speziell die Raumakustik ist zudem traditionell eher physikalisch als psychologisch ausgerichtet ist. Daher wissen wir wenig sowohl über die auditiven und kognitiven Wirkungen raumakustischer Eigenschaften als auch über das Verhältnis von Hören und Sehen bei der Wahrnehmung von Räumen, die ja nicht nur für künstlerische Darbietungen von großer Bedeutung sind. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe *Simulation and Evaluation of Acoustical Environments (SEACEN)* soll das Projekt 'Audio-visual perception of acoustical environments' diese Forschungslücke mithilfe der virtuellen Akustik und unter Anwendung experimenteller Methoden schließen.

Forschungen zu audiovisuellen Wahrnehmungs- bzw. Verarbeitungsleistungen (vgl. im Überblick [1]) in der Reizintensitätsbestimmung [2], der Reizlokalisation [3] [4] [5], dem Zeit- und Synchronitätsempfinden [6] [7] [8],

der perzeptiven Phonetik [9], der Qualitätsbewertung [10] und der Bedeutungsgebung [11] [12] zeigen, dass sich die geistige Repräsentation physikalischer Eigenschaften in der Regel sowohl auf die auditive als auch auf die visuelle Modalität stützt. Dies ist insofern auch für die Raumwahrnehmung anzunehmen [13]. Ferner wird häufig eine audiovisuelle Interaktion postuliert. Eine Zusammenschau bestehender Untersuchungen zur audiovisuellen Raumwahrnehmung ergab, dass sich bis heute weder eine Theorie der audiovisuellen Raumwahrnehmung noch eine Forschungsstrategie formiert hat [14]. Vielmehr wurden zum Teil sehr spezifische Merkmale untersucht und verschiedene Paradigmen und Methoden angewandt. Beansprucht ein Projekt, diese Situation zu verbessern, muss es forschungsstrategische Aspekte berücksichtigen und die methodologische Reflexion, eine einheitliche Begrifflichkeit und die Bildung einer empirisch fundierten Theorie zum Ziel haben.

Mit Blick auf das geringe Vorwissen in dem Forschungsgebiet sind grundsätzliche Fragen sinnvollerweise zuerst und spezifischere nachfolgend zu untersuchen. Die wichtigsten grundsätzlichen Fragen sind, in welchem Maße Hören und Sehen eigentlich zur Raumwahrnehmung beitragen, etwa zu geometrischen, materialen und ästhetischen Eindrücken, und ob beide Modalitäten interagieren.

3. METHODISCHE VORÜBERLEGUNGEN

Für eine Theoriebildung ist es sinnvoll, Merkmale nicht nur in der physikalischen und in der psychologischen Repräsentationsebene zu bestimmen, sondern auch auf mehreren Stufen innerhalb jeder Repräsentationsebene. Dies bietet die Chance, mehrstufige und komplexe Wirkungsbeziehungen der Merkmale zu erkennen und so den Übertragungs- bzw. Wahrnehmungsprozess über eine größere Strecke nachvollziehen zu können. Dies erfordert zum einen eine klare faktische und terminologische Unterscheidung zwischen physikalischen ('akustischen' und 'optischen') und psychologischen ('auditiven' und 'visuellen') Merkmalen und zum anderen eine Unterscheidung zwischen modalitätsspezifischen und modalitätsunspezifischen Merkmalen. Die wahrgenommene Lautstärke ist z.B. nicht geeignet, visuelle Eindrücke direkt und nicht-metaphorisch zu beschreiben, während das Gefallensurteil

sinnvoll sowohl auf auditive als auch auf visuelle Eindrücke angewandt werden kann und daher ein modalitätsunspezifisches Merkmal darstellt.

Darüber hinaus werden verschiedene Paradigmen der experimentellen Bedingungsvariation unterschieden und in einem integrativen Versuchsdesign angewandt: Audiovisuelle Wahrnehmung wird gewöhnlich untersucht, indem die unter einer akustischen, einer optischen und einer optoakustischen Bedingung erhobenen psychologischen Merkmale miteinander verglichen werden. Dieses Kopräsenz-Paradigma kann allerdings nur Befunde unter der ökologisch wenig validen Wahrnehmungsbedingung liefern, dass einer Modalität alle Informationen fehlen – zudem unter der epistemisch uninteressanten Bedingung, dass die Reize optoakustisch kongruent sind. Interaktionseffekte im methodischen Wortsinne können auf diese Weise ebenfalls nicht aufgedeckt werden, da Hören und Sehen als Faktorstufen eines Faktors und nicht als getrennte Faktoren behandelt werden, die interagieren könnten. Um den proportionalen Beitrag jeder Modalität quantifizieren und Interaktionseffekte aufdecken zu können, müssen optische und akustische Merkmale dissoziiert, d.h. zu einem jeweils eigenen Faktor erhoben werden. Diese können in einem vollständigen Versuchsplan also nur noch in ihren Eigenschaften, nicht in ihrer Präsenz variiert werden, woraus der Einsatz des Konfliktreizparadigmas resultiert. Beispielsweise wäre ein Konfliktreiz, der für die Untersuchung der audiovisuell basierten Lokalisation geeignet wäre, die gleichzeitige Präsentation der optischen Komponente eines Sprechers an einer Position und der akustischen Komponente desselben Sprechers an einer anderen Position. Hier stellt sich das Problem, dass die optoakustischen Konfliktreize nicht unter Einsatz von realen Sprechern herstellbar sind. Vielmehr müssen diese simuliert werden, und das gilt auch im vorliegenden Falle für Räume als Testreize. Natürlich sollte experimentell überprüft werden, inwieweit die entsprechenden empirischen Befunde von der Simulation auf die Realität übertragen werden können.

Insbesondere die Quantifizierung der proportionalen Beträge der Modalitäten ist auch aufgrund weiterer methodologischer Restriktionen [15] eine Herausforderung: Erstens verlangt das optoakustische Referenzverhältnis des Konfliktreizparadigmas (kein Konflikt) eine

möglichst vollkommene physikalische und alltagserfahrungskonforme Kongruenz von optischen und akustischen Merkmalsausprägungen, die nur in der Natur vollständig gegeben ist. Um diese Kongruenz zu maximieren, muss die Raumsimulation datenbasiert (im Gegensatz zu numerisch modelliert) und möglichst transparent und immersiv sein in dem Sinne, dass keine wahrnehmungsrelevanten physikalischen *cues* aus der optischen oder akustischen Domäne entfernt, verändert oder in ihrer Qualität reduziert werden und dass Störinformation abgeschirmt wird. Dies erfordert eine hochauflösende Übertragungsstrecke und den Einsatz von 3D-Audio- und Videoübertragungsverfahren (Binauraltechnik, Orthostereoskopie). Zweitens muss die Variationsbreite der optischen und akustischen Eigenschaften identisch sein. Diese setzt aber eine quantitative Kommensurabilität und diese wiederum eine qualitative Kommensurabilität der unabhängigen Variablen voraus. Letztere ist für spezifische akustische und optische Merkmale naturgemäß nicht gegeben, die ja durch verschiedene physikalische Größen ausgedrückt werden (z.B. Beleuchtungsstärke und Schalldruck). Die qualitative Kommensurabilität ist aber indirekt durch Variation der komplexen (bzw. vollständigen) Eigenschaften herstellbar, indem man jeweils die optische und akustische Komponente verschiedener in sich optoakustisch kongruenter Räume kombiniert. Die komplexen optischen und akustischen Eigenschaften entsprechen dann einander, sind qualitativ und quantitativ kommensurabel, indem sie auf identischen höheren physikalischen (optoakustischen) Gegebenheiten beruhen (z.B. Materialien, Strukturen).

4. DER VIRTUELLE KONZERTSAAL

Im vorliegenden Fall wurden sechs existierende Räume ausgewählt (Abb.1), die in ihrem Volumen (Zeilen) und ihrem mittleren akustischen Absorptionsgrad (Spalten) variieren, und optoakustisch simuliert. Die Entwicklung dieses virtuellen Konzertsaals war ausschließlich an den dargestellten Forschungsfragen und methodologischen Kriterien orientiert. Er erlaubt die wechselseitig unabhängige Variation nicht nur von optischer und akustischer Komponente, sondern auch von Übertragungssystem (Raum) und Inhalt (Darbietung)



Abb. 1: Ausgewählte Aufführungsräume (equirektangulare Projektionsgeometrie)

Technische Schritte der Realisation des virtuellen Konzertsaals waren die Akquisition der Raumeigenschaften, die Produktion von künstlerischen Inhalten, die Zusammenführung von Inhalten und Räumen, der Aufbau eines Wiedergabesystems (virtuelle Umgebung) und die Programmierung einer Versuchsablaufsteuerung und -datenerfassung [16].

4.1 AKQUISITION DER RAUMEIGENSCHAFTEN

Die Akquisition der akustischen Raumeigenschaften erfolgte durch das Abspielen von Sinussweeps über Lautsprecher, die anstelle der Musiker/innen eines Streichquartetts sowie einer Rezitatorin auf der jeweiligen Bühne aufgestellt waren, und durch Aufnahme der binauralen Raumimpulsantworten für verschiedene Kopforientierungen (Azimuth) in Ein-Grad-Schritten über die Im-Ohr-Mikrofone eines Kopf-und-Torso-Simulators (Abb. 2) [17].



Abb. 2: Lautsprecher und head and torso simulator FABIAN im Kloster Eberbach

In der optischen Domäne wurden stereoskopische zirkuläre Fotografien für 360 Kopforientierungen erstellt und in die equirektangulare Projektionsgeometrie transformiert. Durch das Zusammensetzen (*stitching, mosaicing*) der jeweils ein Grad breiten vertikalen Bildausschnitte (*finite slit method*) je Auge wurden dann stereoskopische Vollpanoramen erzeugt.

4.2 PRODUKTION DER INHALTE

In einem reflexionsarmen Raum spielten Berufsmusiker den zweiten Satz des Streichquartetts g-moll op. 10 von Claude Debussy. Dabei wurden die Instrumente zugleich, aber akustisch separiert als Mehrspuraufzeichnung aufgenommen. Um auch einen Wortbeitrag für die Experimente zur Verfügung zu haben, rezitierte außerdem eine professionelle Schauspielerin den ersten Absatz der Duineser Elegien von Rainer Maria Rilke (Abb. 3).



Abb. 3: Sprecherin im reflexionsarmen Raum

Die Darbietungen wurden dann in einem Green-Box-Studio im Vollplayback-Verfahren wiederholt und mit einer stereoskopischen Videokamera im Full-HD-Format aufgezeichnet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf optoakustische Synchronität und Konsistenz der Interpretation gelegt.

4.3 ZUSAMMENFÜHRUNG VON INHALTEN UND RÄUMEN

Die akustischen Darbietungen und Raumakustiken werden im Moment der Wiedergabe (vgl. 4.4) in Echtzeit durch das Verfahren der dynamischen Binauralsynthese (ursprünglich als *Binaural Room Scanning* [16] bezeichnet) zusammengeführt. Dabei wird die reflexionsfreie Audioaufnahme in jedem Moment mit derjenigen binauralen Raumimpulsantwort gefaltet, die bei der der mittels *head tracking* erfassten Kopforientierung des Hörers entspre-

chenden Kopforientierung des head and torso simulators im realen Raum aufgezeichnet wurde. Wiedergegeben wird das resultierende Audiosignal über eine speziell angefertigte hochqualitative Kopfhörer-Verstärker-Kombination mit digital linearisierter Übertragungsfunktion [18]. Das angewandte Binauralsynthese-System erlaubt aufgrund weiterer technischer Verbesserungen [18] eine hochplausible dreidimensionale Wiedergabe [20], d.h. Schallquellen und Raumreflexionen werden aus allen Richtungen wahrgenommen.



Abb. 4: Halbpanorama des Gewandhauses mit einmontiertem Streichquartett (zylindrische Projektionsgeometrie)

Die optischen Darbietungen wurden mittels *chroma key compositing* unter Hinzufügung von Schatten und Anwendung von Farbkorrekturen Frame für Frame in die Raumpanoramen montiert. Ein Ergebnis zeigt Abb. 4.

4.4 WIEDERGABESYSTEM UND DATENERFASSUNG

Die aus den Einzelbildern gerenderten stereoskopischen Halbpanorama-Videos wurden durch fünf senkrecht ausgerichtete Projektoren und unter Verwendung einer Warping- und Edge-Blending-Software auf eine halbzyklische Leinwand (Höhe: 2,8 m; Durchmesser: 5,0 m) projiziert, so dass ein Sichtwinkel von nahezu 180° und eine Winkelauflösung, die in der Größenordnung derjenigen des menschlichen Auges liegt, realisiert werden konnte.

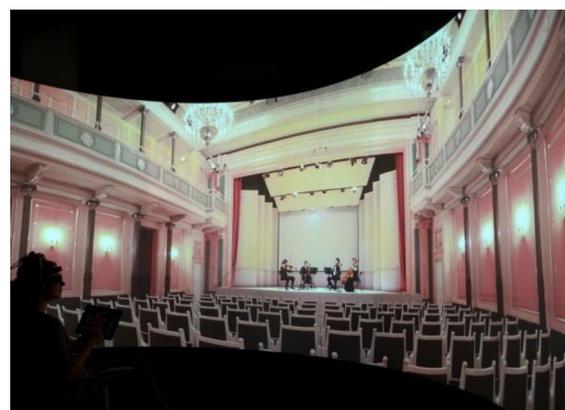


Abb. 5: Versuchsperson im Virtuellen Konzertsaal

Mit dieser Verbindung aus akquirierten Raumeigenschaften, produzierten Inhalten und Wiedergabesystem ist es erstmals möglich, identische künstlerische Darbietungen in verschiedenen optischen und akustischen Konzerträumen zu präsentieren, und zwar unter Bewahrung fast aller physikalischen Schlüsselmerkmale (*cues*), die für beide Modalitäten perceptiv relevant sind (*rich cue condition*). Da sich bei Kopfdrehung die virtuelle akustische Umgebung aufgrund des interaktiven, dynamischen Auralisationsverfahrens nicht mitdreht, kann der Rezipient die virtuellen Räume auditiv und visuell aktiv erkunden. Etwa 50 Versuchspersonen je Inhaltskategorie (Musik, Sprache) wurden gebeten, jede der 36 möglichen Kombinationen der optischen und akustischen Raumkomponenten sowie alle unimodalen Reize hinsichtlich auditiver, visueller und audiovisueller Merkmale mithilfe eines elektronischen Fragebogens auf einem Tablet-Computer zu beurteilen. Diese in vollfaktorierter Messwiederholung erhobenen Daten wurden varianzanalytisch ausgewertet.

5. ERSTE ERGEBNISSE

Im Gegensatz zum verbreiteten Postulat einer audiovisuellen Interaktion zeigen erste Ergebnisse generell keine signifikanten oder hinsichtlich der Effektgröße praktisch bedeutsamen Interaktionen zwischen Hören und Sehen, vielmehr wurden Haupteffekte beobachtet. Das heißt, dass keine Kombinationen bestimmter Stufen des optischen und des akustischen Faktors gefunden wurden, die sich in anderer Weise auf die erhobenen Merkmale auswirken als die Faktoren selbst. Darüber hinaus wurden keine signifikanten oder bedeutsamen cross-modalen Effekte, also weder eine optische Beeinflussung auditiver Merkmale noch eine akustische Beeinflussung visueller Merkmale, beobachtet. Im Experiment basierte die auditive Wahrnehmung also einfach auf der akustischen Information und die visuelle Wahrnehmung auf der optischen Information. Die Berücksichtigung einer Voruntersuchung [21] zur Distanz- und Raumgrößenwahrnehmung auf der Grundlage einer schlechteren optischen Raumsimulation zeigt, dass die verfügbaren optischen und akustischen Informationen für die Raumwahrnehmung in sehr flexibler Weise genutzt werden. Bei Verfügbarkeit der meisten

cues (rich cue condition) im virtuellen Konzertsaal basieren beide Merkmale jedenfalls ganz überwiegend auf den optischen Informationen. Im Gegensatz zu den geometrischen Urteilen scheinen die ästhetischen Urteile jedoch vorwiegend auf der Auswertung der akustischen Informationen zu beruhen.

6. AUSBLICK

Die zweite Projektphase ist der Entflechtung der derzeit noch komplexen Faktoren und der genaueren Betrachtung bestimmter Merkmale gewidmet [22]. So wird die Wahrnehmung von Distanz, Raumgröße und Raumform im Detail untersucht werden. Weiterhin soll geklärt werden, ob Menschen in der Lage sind, optische und akustische Räume einander auch dann richtig zuzuordnen, wenn eine Domäne erinnert anstatt unmittelbar wahrgenommen wird. Die Ermittlung des Einflusses einer Vereinfachung der optischen Reize wird von Nutzen für die Interpretation bestehender Untersuchungen sein. Schließlich wird die Rolle der musikalischen und raumakustischen Expertise untersucht werden, um die Beschränkungen und Geltungsbedingungen einer Theorie zur audiovisuellen Raumwahrnehmung abschätzen zu können.

Um die geplante Dichte an Experimenten realisieren zu können, wird zum einen ein professionelles Feldinstitut mit der Rekrutierung von Versuchspersonen beauftragt werden, zum anderen wird derzeit eine zweite, kleinere virtuelle Umgebung unter Verwendung eines industriell gefertigten Kopfhörer-Verstärkersystems und eines planaren 85"-Flachbildmonitors mit Ultra-HD-Auflösung eingerichtet und parallel betrieben.

Mit Blick auf die populärwissenschaftliche Wissensvermittlung wird außerdem ein hinsichtlich der technischen Daten weiter reduziertes und insofern kostengünstiges Demonstrationssystem eingerichtet, das den Besucherinnen und Besuchern des institutseigenen Musikinstrumenten-Museums sowohl für begleitete Vorführungen in einem gesondertem Raum als auch als festes Selbstbedienungs-Terminal auf der Ausstellungsfläche zur Verfügung stehen kann. Ein solches Demonstrationssystem würde es erstens erlauben, immobile und daher bislang nicht ausstellbare Objekte, nämlich Räume, wenigstens als technische Replikation erlebbar zu machen. Unter Aufgabe des Krite-

riums der Datenbasierung ließen sich auch solche einbeziehen, die nicht mehr (oder noch nicht) existieren. Der Ansatz einer historischen Rekonstruktion und Auralisation wurde, wenn gleich ohne optische Simulation, bereits für die verschiedenen baulichen Varianten des Leipziger Gewandhauses erfolgreich umgesetzt [23]. Zweitens dissoziiert speziell der hier dargestellte virtuelle Konzertsaal Einflussgrößen auf Reizebene, die im Alltag konfundiert sind. Indem beispielsweise bei laufender und unveränderter künstlerischer Darbietung die Aufführungsräume umgeschaltet werden können, wird der empirische Befund der Bedeutsamkeit des Aufführungsraums für bestimmte Wahrnehmungsmerkmale individuell erlebbar. In Verbindung mit einem entsprechenden Begleittext wird drittens die empirische Methodik selbst anschaulich, und zwar sowohl was die Simulationstechnologie (3D Audio und Video) als auch was die Bedingungsvariation (Konfliktreizparadigma) und die erhobenen Merkmale (uni- und multimodale) betrifft.

Am Staatlichen Institut für Musikforschung, das den Forschungsauftrag bereits im Namen trägt, und dessen Musikinstrumenten-Museum ohnehin beispielsweise instrumentenbauliche Verfahren zeigt, wird der Frage, ob es zulässig ist, den Objektbegriff um wissenschaftliche Befunde und Methoden zu erweitern, jedenfalls offen begegnet.

5. LITERATURHINWEIS

- Maempel, H.-J.: Audiovisuelle Wahrnehmung. In: H. de la Motte-Haber et al. (Hg.), *Lexikon der Systematischen Musikwissenschaft*, Laaber, Laaber, 2010, S. 49–53.
- Stevens, J. C.; Marks, L. E.: Cross-Modality Matching of Brightness and Loudness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 54, 2, S. 407–411, 1965
- Thomas, G. J.: Experimental Study of the Influence of Vision of Sound Localization. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 2, S. 163–177, Februar 1941
- Howard, I. P.; Templeton, W. B.: *Human spatial orientation*. Wiley, London, 1966
- Gardner, M. B.: Proximity Image effect in sound localization. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 43, S. 163, 1968
- Shams, L.; Kamitani, Y.; Shimojo, S.: Visual illusion induced by sound. *Cognitive Brain Research*, 14, S. 147–152, 2002
- Andersen, T. S.; Tippiana, K.; Sams, M.: Factors influencing audiovisual fission and fusion. *Cognitive Brain Research*, 21, 3, S. 301–308, 2004
- Heide, B. L. & Maempel, H.-J.: Die Wahrnehmung audiovisueller Synchronität in elektronischen Medien. 26. *Tonmeistertagung*, Leipzig, November 2010, S. 525–537
- MacDonald, J.; McGurk, H.: Visual Influences on Speech Perception Process. *Perception and Psychophysics*, 24, 3, S. 253–257, 1978
- Beerends, J. G.; de Caluwe, F. E.: The Influence of Video Quality on Perceived Audio Quality and Vice Versa. *Journal of the Audio Engineering Society*, 47, 5, S. 355–362, 1999
- Bullerjahn, C.; Gülkenring, M.: An empirical investigation of effects of film music using qualitative content analysis. *Psychomusicology* 13, 1/2, S. 99–118, 1994
- Cohen, A. J.: How music influences the interpretation of film and video: approaches from experimental psychology. In: R. A. Kendall & R. W. H. Savage (Hg.), *Perspectives in systematic musicology*, Univ. of Calif., Los Angeles, 2005, S. 15–36
- Kohlrausch, A.; van de Par, S.: Audio-Visual Interaction in the Context of Multi-Media Applications. In: *Communication Acoustics*, Springer, Berlin et al., 2005, S. 109–138
- Maempel, H.-J.: P9: Audio-visual perception of acoustical environments. In: *Simulation and Evaluation of Acoustical Environments (SEACEN)*. Proposal for a DFG Research Unit, Techn. Univ. et al., Berlin et al., S. 189–221 (DFG-Antrag MA 4343/1-1)
- Maempel, H.-J.: Experiments on audio-visual room perception: A methodological discussion. *DAGA*, 38. Jahrestagung für Akustik, Darmstadt, 2012, S. 783–784
- Karamustafaoglu, A. et al.: Design and applications of a data-based auralization system for surround sound. *106th AES Convention*, München, 1999, Preprint 4976
- Lindau, A.; Weinzierl, S.: FABIAN - An instrument for software-based

- measurement of binaural room impulse responses in multiple degrees of freedom. 24. Tonmeistertagung, Leipzig, 2006, 5 S.
- Erbes, V.; Schultz, F.; Lindau, A.; Weinzierl, S.: An extraaural headphone system for optimized binaural reproduction. *DAGA, 38. Jahrestagung für Akustik*, Darmstadt, 2012, S. 313–314
- Maempel, H.-J.; Lindau, A.: Opto-acoustic simulation of concert halls – a data-based approach. 27. *Tonmeistertagung*, Köln, Germany, November 2012, S. 293–309.
- Lindau, A.; Weinzierl, S.: Assessing the Plausibility of Virtual Acoustic Environments. *Acta Acustica united with Acustica*, 98, 5, S. 804–810, 2012
- Maempel, H.-J.; Jentsch, M.: Auditory and visual contribution to egocentric distance and room size perception. *Building Acoustics*, 20, 4, S. 383–402, 2013
- Maempel, H.-J.: P9: Audio-visual perception of acoustical environments. In: *SEACEN. Renewal Proposal for a DFG Research Unit*, Techn. Univ. et al., Berlin et al., S. 157–175 (DFG-Antrag MA 4343/1-2)
- Weinzierl, S.; Rosenheinrich, H.; Blickensdorff, J.; Horn, M.; Lindau, A.: Die Akustik der Konzertsäle im Leipziger Gewandhaus. Geschichte, Rekonstruktion und Auralisation. *DAGA, 36. Jahrestagung für Akustik*, Berlin, 2010, S. 1045–1046