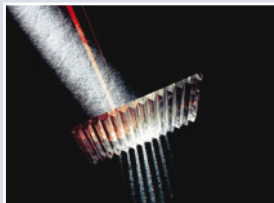
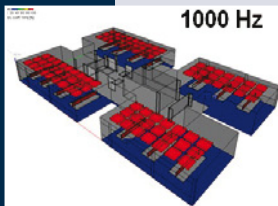


Christian Nocke | Markus Meis

# AKUSTIK IN BÜRO UND OBJEKT

Dokumentation des 2. Symposiums  
Büro. Raum. Akustik. Köln 2011

## RAUMAKUSTIK & MEDIEN-/ KONFERENZTECHNIK



Fraunhofer IRB  Verlag

Christian Nocke | Markus Meis

# **Akustik in Büro und Objekt**

Dokumentation des 2. Symposiums  
Büro. Raum. Akustik.  
Köln 2011

**Raumakustik & Medien-/ Konferenztechnik**

Fraunhofer IRB Verlag

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9079-2

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9080-8

Die Autoren zeichnen für den jeweiligen Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich.

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2013

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70-25 00

Telefax 07 11 9 70-25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

<http://www.baufachinformation.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlanges unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

# Inhalt

<b>C. Nocke, M. Meis</b>	
Vorwort	3
<b>H. Hund</b>	
Grußwort	5
<b>K. Brandenburg, S. Werner</b>	
Wohlfühlen mit dem richtigen Ton: Aktuelle Forschung und Technik	7
<b>Ch. Bartenbach</b>	
Die Bedeutung des Lichtes für Büro und Verwaltung	25
<b>J.-M. Baum</b>	
Akustik planen und gestalten	47
<b>P. D'Antonio</b>	
Acoustical Design of Speech Rooms using the complete acoustical palette: Absorption, Reflection, Diffusion and Isolation	55
<b>W. Eitel</b>	
Kommunikation in Blickgeschwindigkeit Offene Arbeitswelten als Herausforderung	81
<b>A. Liebl</b>	
Kombinierte Wirkung bauphysikalischer Parameter im Büroumfeld	111
<b>J. Rennies, S. Goetze, T. Rohdenburg, J. Appell</b>	
Innovative Hörunterstützung in Kommunikationssystemen	127
<b>P. Rahe</b>	
Medientechnik und Beschallung im Umfeld moderner Bürolandschaften	149
<b>M. Meis, M. Buschermöhle</b>	
Implikationen des demographischen Wandels für die akustische Gestaltung von Büroarbeitsplätzen	159
<b>C. Nocke</b>	
Schallabsorber – Messung, Bewertung, Anwendung	177



## VORWORT

In Fortführung der Oldenburger Symposien zur Psychologischen Akustik war im Jahr 2009 das 1. Symposium Büro.Raum.Akustik in Köln erfolgreich durchgeführt worden. Der Schwerpunkt war die Akustik in Büro und Objekt. Das 2. Symposium Büro.Raum.Akustik in Köln hat dieses Thema aufgegriffen und als Motto die Raumakustik und Medien-/Konferenztechnik in den Mittelpunkt gestellt. Die Technisierung nimmt im Büro auch im Bereich der Audiotechnik zu. Moderne Kommunikationstechnik, egal ob aufwändige Videokonferenzanlage oder aber simples Video-Smartphone, erweitert dabei die Anforderungen an akustische optimierte Umgebungen. Der Stand der Medientechnik einerseits sowie die aktiven und auch passiven Möglichkeiten zur raumakustischen Gestaltung von Räumen für optimale Sprachwiedergabe sind während des Symposiums thematisiert worden. Die Schaffung des interdisziplinären Austauschs zwischen den verschiedenen Disziplinen rund um das Thema Hören und Akustik ist auch mit dieser Sammlung der verschiedenen Beiträge wiederum gelungen. Planer und Nutzer von Gebäuden sollten ebenso wie Bauherren, Personalvertretungen, Arbeitsmediziner aber auch die Hersteller von Büroeinrichtungen aus diesem Austausch ihre Schlüsse ziehen. Nur gemeinsam gelingt die Umsetzung der für die jeweilige Nutzung angemessene Kombination aus Raumakustik und Medientechnik. Vor dem Hintergrund des demographischen Wandels, der auch im Bereich der Audiotechnik und Hörforschung seine Spuren hinterlässt, ergeben sich neue Fragestellungen und Herausforderungen. Verschiedene Umstände haben dazu geführt, dass der nun vorliegende Tagungsband mit einiger Verzögerung erschienen ist. Wir wünschen dennoch eine informative und angenehme Lektüre.

Christian Nocke

Markus Meis



## GRUSSWORT

Liebe Akustik-Interessierte,  
liebe Büro-Gestalter,

die raumakustische Planung hat sich in jüngster Vergangenheit zu einem wichtigen Bestandteil der Gestaltung von Büroarbeitsplätzen entwickelt. Das erste Symposium Büro.Raum.Akustik im Jahr 2009 widmete sich daher der zentralen Herausforderung, Büroräume mit den Mitteln der Absorption, Schallschirmung und notfalls auch durch Maskierung so zu gestalten, dass Gespräche und Telefonate nicht zur Störquelle für andere werden. In jüngster Zeit kommen, bedingt durch den Wandel der Arbeit, durch die Verbreitung neuer Kommunikationstechnologien und den Einsatz medial gestützter Kooperationsformen, neue Anforderungen an die akustischen Eigenschaften von Büro- und Kommunikationsräumen hinzu.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen haben die Referenten des zweiten Symposiums Büro.Raum.Akustik deutlich gemacht, dass es bei der Gestaltung moderner Büroarbeitsplätze nicht mehr nur um bloßes Hören oder Nicht-Hören, um laut oder leise, um Sprachverständlichkeit oder Maskierung gehen kann. Entscheidend für die Akzeptanz und Nutzbarkeit von Räumen wird künftig vielmehr die Qualität des Hörens sein.

Damit eröffnete das Symposium seinen Teilnehmern einen neuen Blickwinkel auf die Potenziale der Raumakustik und die Perspektiven in der Gestaltung von Büro- und Kommunikationsräumen. Wir freuen uns, dass die wichtigsten Impulse dieser Veranstaltung nun auch für einen weiteren Interessentenkreis nachlesbar sind.

Hendrik Hund  
Vorsitzender des bso Verband Büro-, Sitz- und Objektmöbel e. V.





# Wohlfühlen mit dem richtigen Ton: Aktuelle Forschung und neue Technik

*K. Brandenburg*<sup>1,2</sup> & *S. Werner*<sup>2</sup>

(1) Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie Ilmenau

(2) Technische Universität Ilmenau

*Kontakt: karlheinz.brandenburg@idmt.fraunhofer.de*

## ZUSAMMENFASSUNG

Musik trägt zur guten Stimmung bei, soviel ist bekannt. Aber wann fühlen wir uns wohl, wann ärgern wir uns über den Lärm um uns herum und was können wir dagegen tun? Ein paar Effekte sind bekannt: zu viele Reflexionen in einem Raum lassen ihn hart klingen, ergeben eine schlechtere Verständlichkeit von Sprache und zerstören den Wohlklang von Musik. Andererseits fühlen wir uns auch in „trockenen“, „schalltoten“ Räumen unwohl und verständliche, „störende“ Sprache kann konzentriertes Arbeiten mehr behindern als nicht-informationstragendes Hintergrund-Rauschen. Viele Hilfsmittel zur Verbesserung des Raumklangs, sowohl für zuhause als auch für Büro-Umgebungen, sind bekannt: schallschluckende Materialien, Vermeidung schallharter Flächen, „comfort noise“ zur Maskierung anderer Schallquellen etc. Die allgemeinen Fragen, wie räumliches Hören funktioniert und was unser Gehirn mit den Schalleindrücken macht, sind aber noch nicht vollständig beantwortet. Der Beitrag führt in die Grundlagen des räumlichen Hörens ein und erläutert dann verschiedene Techniken, die uns helfen können, eine bessere klangliche Umgebung zu schaffen.

## ABSTRACT

Music helps create a good mood, this much we know to be true. But when do we feel comfortable, when are we annoyed by the noise around us and what can we do about it? A few effects are known: too much reflection in a room makes it sound hard, makes language harder to understand and destroys the melodious sound of music. On the other hand, we also feel uncomfortable in "dry", "acoustically dead" spaces and understandable, "disturbing" language can hinder

concentrated work more than non-informational background noise. We are familiar with many ways of improving the sound of a space, whether at home or in office environments: sound-absorbent materials, avoiding sound-reflecting surfaces, "comfort noise" to mask other sound sources, etc. However, general issues as to how spatial hearing functions or what our brains do with the sound impressions have not yet been fully resolved. The contribution provides an introduction to the principles of spatial hearing and then explains various techniques, which can help us create an improved sound environment.

## 1. EINFÜHRUNG

Wie wir alle wissen, kann Musik dazu führen, dass wir uns wohlfühlen. Die Arbeit der Autoren hatte bisher auch immer das Ziel gehabt, bei der Übertragung / Speicherung und Wiedergabe von Musik die Audioqualität weitgehend zu erhalten. Dazu ist Wissen über die menschliche Wahrnehmung von Klängen wichtig, die Psychoakustik hat z. B. ganz wesentlich zur Entwicklung von Audiocodierverfahren wie mp3 und AAC beigetragen. In neuerer Zeit war es bei der Weiterentwicklung von Verfahren zur perfekten Klang-Illusion in Räumen (Wellenfeldsynthese) notwendig, noch mehr über die Klangwahrnehmung über Gehör und Gehirn zu lernen. Dabei zeigt es sich, dass immer neue Fragen auftauchen, wir immer noch zu wenig wissen und insbesondere der Aspekt „Raum“ bei der Klangwiedergabe in einem Raum bisher viel zu wenig beachtet wurde. Wir können recht gut abschätzen, welche Codierartefakte hörbar sind, aber wir tun uns schwer, das vom Klang im Raum ausgelöste Wohlbefinden oder im Fall von Lärm oder unerwünschten Reflexionen das Unwohlsein quantitativ zu fassen. Zwei Erlebnisse sollen die Notwendigkeit noch einmal exemplarisch deutlich machen:

Im Herbst 2011 hielt einer der Autoren einen Vortrag in einer frisch renovierten Villa in Weimar. Die Denkmalpfleger hatten ihre Ideen über die Ausgestaltung des Raumes verwirklicht, mit folgendem Ergebnis: Bei nicht mehr als ca. 40 Zuhörern war die Tonqualität im hinteren Teil des Raumes so schlecht, dass die

Vortragenden kaum zu verstehen waren. Dies war eine Auswirkung der glatten Wandoberflächen, die heute bevorzugt in Häusern angebracht werden.

Schon vor einigen Jahren gab es eine Demonstration der Wellenfeldsynthese in einem Raum der Messe Leipzig. Die Wände waren mit schallabsorbierendem Material verkleidet, aber aus Feuerschutzgründen durfte kein Material zwischen der schallharten Decke und den Zuhörern befestigt werden. Das Ergebnis: Der sonst so eindrucksvolle Effekt der Wellenfeldsynthese, virtuelle Klangquellen in- und außerhalb des Raumes platzieren zu können, ging fast vollständig verloren.

Man merke: Wir hören nicht nur Signale, wir hören Räume und deren Eigenschaften. Dies passiert in unserem Gehirn in Mechanismen, die bisher nur unvollständig verstanden werden.

Dieser Beitrag versucht, einige Aspekte aufzuzeigen. Zunächst erfolgt eine kurze Einführung in die Funktionsweise des Gehörs. Weit ausführlichere Darstellungen finden sich an anderer Stelle, z. B. bei Zwicker und Fastl „Psychoacoustics- Facts and Models“ [Zwi99] oder Blauert „Spatial Hearing - The Psychophysics of Human Sound Localization“ [Bla97]. Ausführungen über räumliches Hören vervollständigen diese Einführung. Ein wesentlicher Teil der nachfolgenden Abschnitte ist den speziellen Auswirkungen gewidmet, die zu viele Reflexionen auf unser Hören haben. Aktuelle Forschungen versuchen, quantitative Antworten zu finden. Der Beitrag beschreibt exemplarisch weitere Projekte, in denen die Qualität des Schalls im Raum verbessert werden soll: Der Bau von Flachlautsprechern, die Echounterdrückung bei Vielkanal- Tonwiedergabesystemen, die Untersuchung der emotionalen Wirkung von Tonsequenzen und, noch weiter in der Zukunft, die Idee von verteilten Lautsprecherarrays in Wohn- und Geschäftsräumen.

## 2. DIE PHYSIK DES HÖRENS

Die Wahrnehmung der akustischen Umwelt geschieht durch die Auswertung der an den Ohren eines Hörers ankommenden Schallereignisse durch das Gehirn. Der Schall eines räumlichen Schallfeldes durchläuft das Außen-, Mittel- und Innenohr. Das Außenohr stellt dabei einen richtungsabhängigen Filter dar. Im Mittelohr wird die Schwingung der Luftteilchen in eine mechanische Schwingung der Gehörknöchelchen umgesetzt. Es findet eine Impedanzanpassung statt. Weiterhin wird im Mittelohr die von außen kommende Schalldruckänderung in eine hydrodynamische Druckänderung in der Cochlea überführt. Dazu drückt der Steigbügel des Mittelohres auf das ovale Fenster der Cochlea und verursacht eine Druckwelle. Diese Druckwelle pflanzt sich entlang der Basilarmembran fort und verursacht eine Wanderwelle auf der Basilarmembran. Diese Welle erreicht abhängig von ihrer Frequenz an bestimmten Stellen der Membran ihr Maximum. Hohe Frequenzen haben ihr Maximum am ovalen Fenster, dort ist die Breite der Basilarmembran klein. Tiefe Frequenzen erreichen ihr Maximum an der Spitze der Cochlea, dort ist die Breite der Membran groß. Im Innenohr werden nun die Schwingungen innerhalb der Cochlea mit Hilfe der Haarzellen in elektrische Signale der Hörnerven codiert. Das Cortische Organ stellt das Transformationsorgan dar. Dieses eigentliche Hör-Organ besteht beim Menschen aus ca. 3500 inneren Haarzellen in einer Reihe und parallel dazu in drei Reihen ca. 12000 äußere Haarzellen [Sze08]. Nur die inneren Haarzellen dienen dem direkten Hören. Die äußeren Haarzellen dienen der Erhöhung der Frequenzselektivität und dem Verstärken von kleinen Amplituden. Dabei können sie sich ähnlich einem Muskel strecken und wieder zusammenziehen und somit die Auslenkung der Basilarmembran gegenüber der darunter liegenden Membran beeinflussen [Zen94].

Die inneren Haarzellen sind in ihrer Funktion ein mechanisch-elektrischer Wandler. Mit ihren Härchen (Stereocilien) folgen sie

der Schwingung der Basilarmembran. Gedämpft werden sie dabei durch die Zähigkeit der Lympheflüssigkeit, in der sie sich bewegen und der Eigensteifigkeit der Härchen selbst. Werden die Härchen ausgelenkt kommt es zu einer Reizung der auditorischen Nerven. Höhere Verarbeitungsstufen des auditorischen Pfades im Gehirn ermitteln aus diesen Signalen verschiedenste auditorische Merkmale und interpretieren diese zu einem Hörereignis. Tiefergehende Ausführungen finden sich in [Moo94], [Zen94], [Ehr96], [Bla97] und anderen.

### 3. RÄUMLICHES HÖREN

Die Fähigkeit der Lokalisierung und Entfernungsschätzung von Schallereignissen wird in der Regel durch die Auswertung von binauralen und monauralen Merkmalen realisiert. Zu den binauralen Merkmalen zählen interaurale Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen den beiden Ohren eines Hörers. Bei der alleinigen Auswertung dieser Merkmale kann es zu Mehrdeutigkeiten in der Positionsbestimmung von Schallereignissen kommen. Schallsignale aus unterschiedlichen Richtungen im Raum können gleiche interaurale Unterschiede hervorrufen, wenn sich diese auf einer Parabel, im dreidimensionalen Fall ein Konus (Cone-of-Confusion), orthogonal zur frontalen Blickrichtung befinden. Abbildung 1 verdeutlicht schematisch die Richtungen gleicher interauraler Differenzen. Dem Gehirn ist es auf Basis der Auswertung lediglich dieser Merkmale nicht möglich, eine eindeutige Richtungs- und Entfernungszuweisung zu treffen.

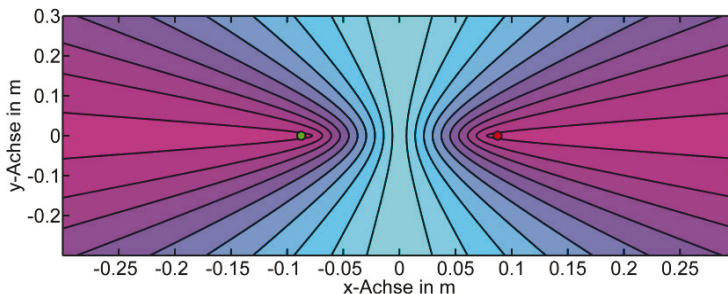


Abbildung 1 – Parabeln gleicher interauraler Merkmale, zwei-dimensionale schematische Darstellung für einen Ohrabstand von 17,5 cm; gleiche Farben entsprechen gleichen interauralen Laufzeit- bzw. Pegeldifferenzen; der richtungsabhängige Einfluss des Kopfes und der Ohrmuscheln ist nicht dargestellt; linker grüner Kreis = linkes Ohr, rechter roter Kreis = rechtes Ohr.

Werden neben binauralen Merkmalen auch monaurale Merkmale ausgewertet, können diese Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden. Solche monauralen Merkmale sind z. B. die richtungsabhängigen

Filtereigenschaften des Kopfes, des Torsos und der Ohrmuschel. Diese spiegeln sich in den Außenohrübertragungsfunktion (eng.: head-related transfer function, HRTF) wider [Wig92], [Hof98a], [Len07]. Jede Raumrichtung wird durch eine eindeutige Übertragungsfunktion beschrieben. Zusätzlich mit den binauralen Merkmalen ergeben sich eindeutige Richtungszuweisungen zu einem Schallereignis. Weitere Hinweise können aus der Auswertung von Kopfbewegungen und aus der Analyse von Raumhall abgeleitet werden. Kopfbewegungen können dabei unter anderem die Vorne-Hinten-Vertauschung deutlich reduzieren [Thu67]. Lokalisationsexperimente mit bandbegrenzten Signalen bestätigen dies [Per97]. Raumhall kann dazu dienen, eine bessere und korrekte Entfernungswahrnehmung zu erreichen [Bro99].

Die HRTF können von Individuum zu Individuum sehr große Unterschiede aufweisen. Bei einer binauralen Synthese einer akustischen Szene kann es durch die Verwendung von nicht individuell angepassten HRTFs zu einer deutlichen Verringerung der Lokalisationsschärfe kommen. Dies drückt sich vor allem in einer unschärferen Lokalisationsgenauigkeit, in der Zunahme von Vorne-Hinten-Vertauschungen und in Fehllokalisationen in der vertikalen Richtung aus.

### **3.1. EINFLUSS DER RAUMAKUSTIK**

In realen Umgebungen spielen Schallrückwürfe von den Begrenzungsflächen eines Raumes eine wichtige Rolle. Diese Reflexionen wirken sich dabei nicht nur auf die Wahrnehmung von Räumlichkeit und dem Gefühl des „Eingehüllt-Sein“, sondern vor allem auch auf die Lokalisierung von Schallquellen aus. Diese Auswirkung auf die Lokalisation wird durch den sehr dominanten Präzedenzeffekt beschrieben [Bla05]. Er beschreibt das Phänomen, dass die Schalleinfallrichtung einer Schallquelle aus der Richtung wahrgenommen wird aus der die erste Schallfront, also der Primärschall, eintrifft. Rückwürfe von z. B. Wänden, also



der Sekundärschall, fusioniert mit dem Primärschall zu einem perceptiven Hörereignis. Dieser Effekt hängt sehr stark von dem zeitlichen Versatz von Sekundärschall zu Primärschall und der Art des Audiosignals ab. Betrachten wir lediglich eine Primär- und eine Sekundärschallquelle und einen kleinen Versatz von bspw. kleiner ca. 1,5 ms für ein breitbandiges Signal, bildet sich die Hörereignisrichtung zwischen den beiden Schallquellen heraus. Dieser Bereich wird als Summenlokalisierung umschrieben und wird in der Stereophonie genutzt um z. B. Phantomschallquellen bei einer Stereowiedergabe zwischen Lautsprechern zu platzieren. Wird der zeitliche Versatz erhöht, wandert die wahrgenommene Richtung auf die Primärschallquelle. Selbst bei weiterer Erhöhung des Versatzes bleibt die wahrgenommene Schalleinfallrichtung an dem Ort des Primärschalls. Dieser Effekt bleibt auch dann erhalten, wenn der Sekundärschall deutlich stärker in seinem Schalldruckpegel als der Primärschall ist (Haas-Effekt) [Has00]. Bei der Beschallung von großen Auditorien kann dieser Wahrnehmungseffekt ausgenutzt werden. Sollen Zuhörer beschallt werden die sich relativ weit weg von z. B. einer Bühne befinden, können Lautsprecher nahe diesen Personen verwendet werden. Werden die Signale dieser nahen Lautsprecher unverzögert zu den Signalen der Bühnenlautsprecher angesteuert, werden die wahrgenommenen Richtungen der Schallereignisse von diesen nahen Lautsprechern dominiert, da diese durch ihre Nähe zeitlich früher und deutlich höhere Schalldruckpegel als die ferneren Bühnenlautsprecher am Hörort erzeugen. Verzögert man aber die Signale um einige Millisekunden ergibt sich der Effekt, dass die wahrgenommene Richtung der Schallereignisse von den zuerst eintreffenden Schallwellen, also von denen der Primärlautsprecher auf der Bühne dominiert wird (Präzedenzeffekt), selbst dann wenn die Sekundär- oder Delay-Lautsprecher einen deutlich höheren Schalldruckpegel am Hörort erzeugen. Erhöht man die Verzögerungszeit weiter wird der Präzedenzeffekt zusammenbrechen und es kommt zur Wahrnehmung von

getrennten Hörereignissen für Primärschall und Sekundärschall (Echo). Eigene Experimente in reflexionsgedämpfter Umgebung mit jeweils einer Primär- und Sekundärschallquelle ergaben mittlere Echoschwellen von 40 bis 55 ms für breitbandige Rauschpulse und Raumrichtungen von 45°, 90° und 135°. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Medientechnik (Fachgebiet Audiovisuelle Technik) der Technischen Universität Ilmenau sind 270 Klassenräume in Berliner Schulen hinsichtlich raumakustischer Parameter untersucht worden [San09]. Eine Befragung von 77 Lehrern dieser Schulen ergab auf die Fragestellung: „Wie groß ist Ihrer Meinung nach der Einfluss der folgenden Faktoren auf die Unterrichtssituation?“, eine sehr hohe Wichtigkeit der Raumakustik. Abbildung 2 fasst die Ergebnisse der Umfrage zusammen.

	Licht	Temperatur	Luftfeuchte	Akustik	farbl.Gestaltung	Lärm	Interieur	Architektur
Gültig	77	77	69	77	76	77	77	75
Fehlend	0	0	8	0	1	0	0	2
Mittelwert	4,64	4,60	3,74	4,90	4,13	4,74	4,18	4,11
Standardfehler	0,069	0,077	0,132	0,035	0,096	0,075	0,092	0,105
Median	5,00	5,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00
Standardabw	0,605	0,674	1,093	0,307	0,838	0,657	0,807	0,909
Varianz	0,366	0,454	1,196	0,094	0,702	0,432	0,651	0,826
Minimum	3	2	1	4	2	2	2	2
Maximum	5	5	5	5	5	5	5	5

Abbildung 2 - Ergebnisse der Befragung von 77 Lehrern; 1=gar keinen Einfluss, 5=sehr großen Einfluss (van de Sand [San09]).

In der Untersuchung sollte herausgefunden werden, inwieweit sich die gemessenen raumakustischen Eigenschaften der Räume mit denen in der DIN 18041 geforderten Eigenschaften decken. Insbesondere wurde dabei auf die Nachhallzeit T30 zurückgegriffen. Abbildung 3 gibt eine Übersicht der Ergebnisse für die Nachhallzeitmessung (T30) bezogen auf die Anforderungen der DIN 18041. Ob der Lernerfolg der Schüler in einem Zusammenhang mit der Raumakustik steht, wurde nicht untersucht.

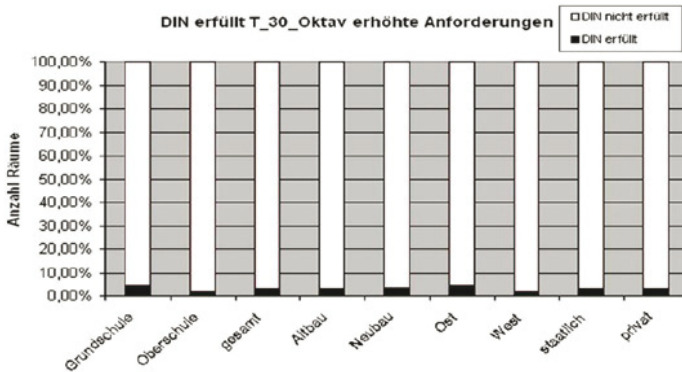


Abbildung 3 – Klassenzimmer (N=270) in Berliner Schulen, die nach DIN 18041 geforderte Nachhallzeit T30 erfüllen / nicht erfüllen; (Abbildung van de Sand [San09]).

## 4. AKTUELLE FORSCHUNGSPROJEKTE

In den folgenden Abschnitten werden einige Beispiele aktueller Forschung für besseren Klang im Raum beschrieben. Für die wissenschaftlich exakte Darstellung muss aus Platzgründen auf die jeweiligen Originalveröffentlichungen verwiesen werden.

### 4.1. BINAURALE WIEDERGABE

Die binaurale Wiedergabe einer drei-dimensionalen akustischen Szene lässt sich durch Kopfhörersysteme ([Wig89], [Dje00], u. a.) oder durch Lautsprechersysteme ([Ata66], [Len07], u. a.) realisieren. In beiden Systemen kommen Verfahren zur Anwendung, die es ermöglichen, die Audiosignale so aufzubereiten, dass am linken bzw. rechten Ohr nur die zu diesem Ohr gehörenden Signale ankommen [Vor07]. Die Individualisierung solcher Systeme stellt eine große Herausforderung für eine plausible Synthese der akustischen Szene dar [See04], [Moo08].

Die Ohrübertragungsfunktion (HRTF) für die linke bzw. rechte Seite ergibt sich unter Freifeldbedingungen aus dem Verhältnis der Fouriertransformierten des Signals am Trommelfell und dem Schallsignal am Koordinatenursprung (Mitte des Kopfes). Können keine Freifeldbedingungen angenommen werden, kommen zusätzlich Schallanteile an den Ohren an, die durch Reflexionen an den Begrenzungsflächen des Raumes verursacht werden. Die Gesamtheit der HRTFs und der Raumakustik kann durch binaurale Raumimpulsantworten beschrieben werden.

Die binauralen Übertragungsfunktionen sind von Mensch zu Mensch sehr unterschiedlich. Die Unterschiede können dabei, vor allem im hochfrequenten Bereich, 30 dB erreichen [Len07], [Fel08]. Für die authentische binaurale Wiedergabe sind individuelle Übertragungsfunktionen notwendig, um eine gehörrichtige Wiedergabe zu gewährleisten. In Untersuchungen zur Lokalisation von Schallquellen in der Horizontal- und Medianebene konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung von fremden Übertragungsfunktionen die Lokalisationsschärfe deutlich abnimmt und es vermehrt zu Vorne-Hinten-Vertauschungen und vertikalen Lokalisationsfehlern kommt [Wen93], [Ham92], [Ham95], [Mø196], [See04]. Die Lokalisationsschärfe bei individuell angepasster Auralisierung ist vergleichbar mit der in realen Hörumgebungen [See04]. Die externe Wahrnehmung von Schallereignissen (Externalisierung) ist dahingegen weitestgehend unabhängig von der Verwendung individueller HRTFs [Law73], [Ham95], [Mø196].

Die Kompensation des Frequenzgangs des Systems Kopfhörer-Ohr (aufgesetzter Kopfhörer) ist eine wichtige Voraussetzung für eine gehörrichtige Wiedergabe. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass bei der Verwendung von nicht individuellen binauralen Raumimpulsantworten bzw. HRTFs aber individueller Entzerrung des Kopfhörersystems schlechtere Externalisierungs- und Lokalisationsergebnisse erzielt werden als bei Verwendung von gleichsam nicht individueller Kopfhörerentzerrung [Lin10]. Eine Gewöhnung an „fremde“ HRTFs konnte in Experimenten

ebenfalls gezeigt werden [Hof98b], [See04]. Dynamische binaurale Kopfhörer berücksichtigen weiterhin die Kopfpose des Hörers (Head Tracking). Die Berücksichtigung der Kopfpose führt zu einer deutlichen Verbesserung der Lokalisationsgenauigkeit und der Entfernungswahrnehmung. Ausführliche psychoakustische Untersuchungen dazu finden sich in Pellegrini [Pel01] und Begault [Beg05].

Die genannten Wiedergabeverfahren berücksichtigen zahlreiche Faktoren, wie Individualisierung der HRTFs, Head Tracking, Entzerrung des Systems, verwendete binaurale Eingangssignale und andere. Die Simulation einer plausiblen akustischen Szene ist dennoch manchmal nur unbefriedigend möglich. Kognitive Einflüsse werden durch die Verfahren in der Regel nicht berücksichtigt. Hier liegen die Schwerpunkte aktueller Forschung.

## 4.2. LAUTSPRECHERARRAYS

Um Wohn- und Arbeitsumgebungen mit flächiger Schallerzeugung zu versehen (z. B. für die weiter unten angegebenen Anwendungen) braucht es eine Schallerzeugung, die sich in Wände oder Möbel integrieren lässt (siehe Abbildung 4).

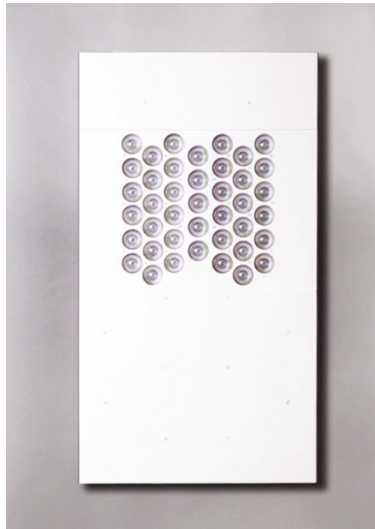


Abbildung 4 - Flachlautsprecher bei Wandmontage [Bee11].

Flachlautsprecher gibt es schon seit vielen Jahrzehnten, allerdings waren die Anforderungen flach, gut klingend und direkt an der Wand anbringbar bisher nicht gleichzeitig erfüllbar. In einer Dissertation am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie in Ilmenau wurden verschiedene Schallwandlungsprinzipien untersucht [Bee11]. Als System, mit dem die Anforderungen erfüllt werden können, stellte sich eine Array-Anordnung herkömmlicher kleiner Kolbenlautsprecher heraus. In Abbildung 5 ist exemplarisch der Amplitudenfrequenzgang eines solchen Flachlautsprechers dargestellt. Vor allem der gegenüber dem

geringen Gehäusevolumen relativ hohe erreichbare Schalldruckpegel und die durch den Einsatz von Arrays breite Abstrahlcharakteristik sind hervorzuheben.

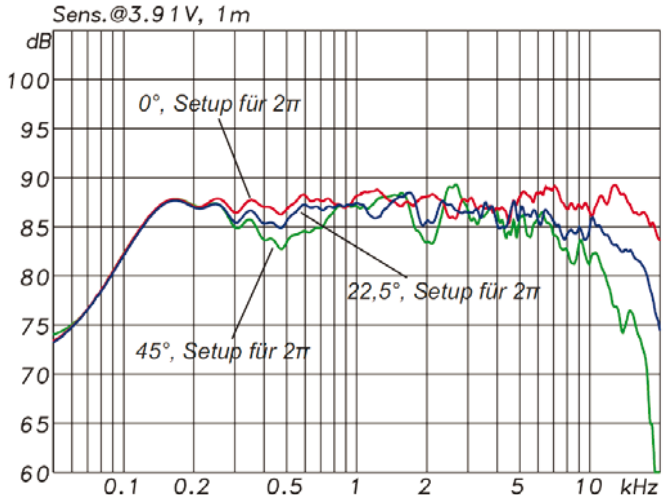


Abbildung 5 - Frequenzgang eines Flachlautsprechers für unterschiedliche Abstrahlwinkel und bei Wandmontage [Bee11].

Mit der Entwicklung solcher Systeme ist ein wesentlicher Schritt getan, um mittels aktiver Methoden noch weitere Anwendungen (siehe unten) zu ermöglichen.

### 4.3. UNTERDRÜCKUNG VON NACHHALL

Seit vielen Jahren wird die Idee verfolgt, mittels aktiver Elemente störende Reflexionen oder Raum-Modi zu neutralisieren. Für Systeme mit wenigen Kanälen ist die Theorie entsprechender adaptiver Filter für die Raumkompensation gut bekannt, allerdings in ihrer Wirksamkeit deutlich eingeschränkt. In der Praxis lassen sich nur Verbesserungen um wenige dB erreichen. Deutlich größere Gewinne können mittels Systemen erreicht werden, die eine Vielzahl von Lautsprechern einsetzen. Bisher war die Lösung

der entsprechenden Gleichungssysteme zur optimalen Reduktion von Reflexionen und Raum-Modi prohibitiv teuer. Dies gilt nicht nur für die notwendige Rechenleistung, sondern auch für die Stabilität entsprechender Lösungen. Mittels der an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten Methode des „Wave Domain Adaptive Filtering“ sind hier deutliche Verbesserungen zu erwarten [Wen09].

#### **4.4. VERTEILTE LAUTSPRECHERARRAYS IN WOHN- UND GESCHÄFTSRÄUMEN**

Mit einzeln angesteuerten Lautsprechern lassen sich noch mehr Klangwirkungen erzielen als nur die perfekte Wiedergabe per Wellenfeldsynthese. Die folgenden Anwendungen seien hier nur angerissen, zum Teil gibt es schon prototypische Implementierungen, zum Teil nur die theoretischen Überlegungen.

Als Anwendungsbereiche werden zurzeit überlegt:

die Fokussierung von Schall, um auch in offenen Räumen Schall soweit möglich auf bestimmte Bereiche zu beschränken, räumlich konzentrierter Gegenschall, z. B. um Ruhezonen mit weniger passiver Schalldämpfung zu erreichen. ANC (Active Noise Cancellation) braucht je nach Wellenlänge und Anwendungsfall eine große Anzahl von erzeugenden Elementen und ist daher bis jetzt nur eingeschränkt möglich, mittels verteilter Lautsprecher kann diese Situation verbessert werden, die konkrete Bekämpfung von einzelnen Störschallquellen mittels Methoden des ANC.

All diese Methoden brauchen eine adaptive Beeinflussung des Schallfeldes (d. h. auch eine Messung) sowie viel Rechenleistung.



## 4.5. EMOTIONALE WIRKUNG VON AUDIO

Schon lange gibt es Versuche, die emotionale Wirkung von Musik wissenschaftlich zu beschreiben. Das Ziel ist klar: Es wäre schön, Musik zum Wohlfühlen für bestimmte Situationen auswählen zu können. Derzeit wird in Ilmenau in einem DFG-Projekt untersucht, ob die emotionale Wirkung aus Tonraummodellen abgeleitet werden kann. Ergebnisse können hier noch nicht berichtet werden, aber das Thema steht exemplarisch für die Fragestellung nach der Wirkung des Klangs auf uns Menschen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

An vielen Stellen wird derzeit untersucht, wie Raumakustik, Lautsprecherwiedergabe von Tönen und neuartige aktive Methoden der Schallbeeinflussung unser Wohlbefinden steigern können. Es gibt noch viel Arbeit, bis die Zusammenhänge wirklich gut verstanden sind. Bisherige Ergebnisse zeigen aber, dass viel erreichbar ist und wir uns auf akustisch bessere Umgebungen, sei es im Arbeitsumfeld oder im Heimkino, freuen dürfen.

## 6. LITERATUR

- [Ata66] B. S. Atal und M. R. Schroeder, „Nachahmung der Raumakustik durch Elektronenrechner“, *Gravesaner Blätter* 27/28, S. 124-137, 1966.
- [Bee11] D. Beer, „Untersuchungen zum Einsatz von Flachlautsprechern an schallreflektierenden Grenzflächen“, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2011.
- [Beg05] D. R. Begault, „Tutorial on distance perception“, *Audio Engineering Society* 118th Convention, Barcelona, and 119th Convention, New York, 2005.
- [Bla97] J. Blauert, „Spatial Hearing – The Psychophysics of Human Sound Localization“. MIT Press, ISBN 0-262-02413-6, 1997.
- [Bla05] J. Blauert und J. Braasch, „Acoustic Communication: The Precedence Effect“, *Forum Acusticum*, Budapest, 2005.

- [Bro99] A. W. Bronkhorst und T. Houtgast, „Auditory distance perception in rooms“, *Nature*, 397, pp.517-520, 1999.
- [Dje00] T. Djelani, Ch. Pörschmann, J. Sahrhage und J. Blauert: “An interactive virtual environment generator for psychoacoustic research II: Collection of head-related impulse responses and evaluation of auditory localization”. *Acustica*, 86(6), pp.1046-1053, 2000.
- [Ehr96] G. Ehret und R. Romand, „The Central Auditory System“, Oxford University Press, ISBN 0195096843, 1996.
- [Fel08] J. Fels, „From Children to Adults: How Binaural Cues and Ear Canal Impedances Grow“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2008.
- [Ham92] D. Hammershøi, H. Møller und M. F. Sørensen, „Head-Related Transfer Functions: Measurements on 40 Human Subjects“, Preprint 3289 of the 92nd Convention of Audio Engineering Society, Wien, 1992.
- [Ham95] D. Hammershøi, „Binaural Technique – a method of true 3D sound reproduction“, Dissertation, Universität Aalborg, 1995.
- [Hof98a] P. M. Hofman und A.J. Van Opstal, „Spectro-temporal factors in two-dimensional human sound localization“, *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(5), pp.2634-2648, 1998.
- [Hof98b] P.M. Hofman, J.G. Van-Riswick und A.J. Van Opstal, „Relearning sound localization with new ears“, *Nature Neuroscience*, 1(5), pp.417-421, 1998.
- [Law73] P. Laws, „Entfernungshören und das Problem der Im-Kopf-Lokalisiertheit von Hörereignissen“, *Acustica*, 29, S. 243-259, 1973.
- [Len07] T. Lentz, „Binaural Technology for Virtual Reality“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2007.
- [Lin10] A. Lindau und F. Brinkmann, „Perceptual evaluation of individual headphone compensation in binaural synthesis based on non-individual recordings“, *Proc. of the 3rd International Workshop on Perceptual Quality of Systems*. Dresden, Germany, 2010.
- [Moo94] B. C. J. Moore (editor), „Hearing – Handbook of Perception and Cognition“, University of Cambridge, England, Academic Press, 1994.
- [Moo08] A. H. Moore, A. I. Tew und R. Nicol, „An initial validation of individualised crosstalk cancellation filters for binaural perceptual experiments“, AES 125th Convention, San Francisco, 2008.
- [Møl96] H. Møller, M. F. Sørensen, C. B. Jensen und D. Hammershøi, „Binaural Technique: Do We Need Individual Recordings?“, *J. Audio Eng. Soc.*, 44(6), pp.451-469, 1996.
- [Pel01] R. S. Pellegrini, „Quality assessment of auditory virtual environments“, *Proc. Int. Conf. on Auditory Display ICAD01*, Finland, pp. 161-168, 2001.

- [Per97] S. Perret und W. Noble, „The contribution of head motion cue to localization of low-pass noise“, *Perception and Psychophysics*, 59, pp. 1018-1026, 1997.
- [San09] F. van de Sand, „Auswertung raumakustischer Parameter in Schulen“, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2009.
- [See04] Seeber, B. and Fastl, H., „On auditory-visual interaction in real and virtual environments“, In Proc. ICA 2004, 18<sup>th</sup> Int. Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, volume III, Int. Commission on Acoustics, pp.2293–2296, 2004.
- [Sze08] G. Szepannek, F. Kiefenz und C. Weihs, „Schallanalyse Neuronale Repräsentation des Hörvorgangs als Basis“, *Informatik Spektrum*, Volume 28, Number 5, S. 389-395, 2005.
- [Thu67] W. R. Thurlow und P.S. Runge: “Effect of Induced Head Movements on Localization of Direction of Sounds”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 42(2), pp. 480-488, 1967.
- [Vor07] M. Vorländer, „Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality“, Springer, ISBN 3540488294, 2007.
- [Wen93] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler und F. L. Wightman, „Localization using nonindividualized head-related transfer functions“, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(1), pp. 111-123, 1993.
- [Wen09] J. Y. C. Wen, A. Sehr, P. A. Naylor, W. Kellermann, „Blind estimation of a feature-domain reverberation model in non-diffuse environments with variance adjustment“, *Proc. European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 175-178, Glasgow, Scotland, Aug. 2009.
- [Wig89] F. L. Wightman und D. J. Kistler, „Headphone Simulation of Free-field Listening: II Psychophysical Validation“, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(2), pp. 868-878, 1989.
- [Wig92] F. L. Wightman und D. J. Kistler, „The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization“, *J. Acoust. Soc. Am.* 91 (3), pp. 1648-1661, 1992.
- [Zen94] H.-P. Zenner, „Hören – Physiologie, Biochemie, Zell- und Neurobiologie“, Georg Thieme Verlag, ISBN 3-13-139001-8, 1994.
- [Zwi99] E. Zwicker und H. Fastl, „Psychoacoustics – Facts and Models“, Springer Verlag, ISBN 3-540-65063-6, 1999.