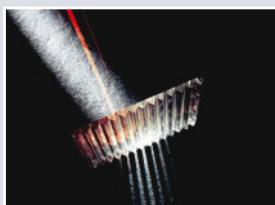
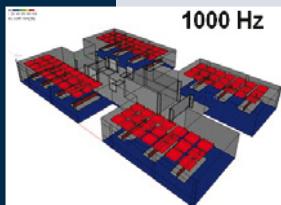


Christian Nocke | Markus Meis

# 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 0711 9 70-25 00  
Telefax 0711 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 Verlages 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 dürfen. 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 akustisch 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 Basilmembran. Gedämpft werden sie dabei durch die Zähigkeit der Lymphflüssigkeit, 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.

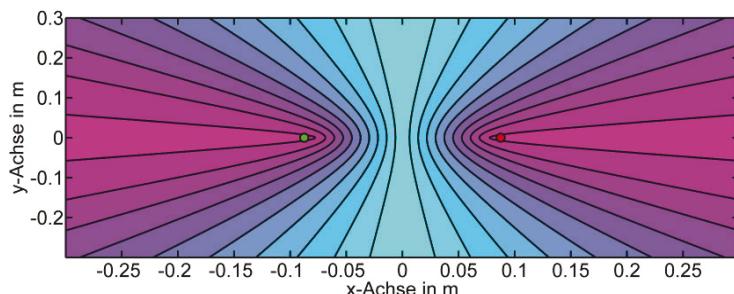


Abbildung 1 – Parabeln gleicher interauraler Merkmale, zwei-dimensionale schematische Darstellung für einen Ohrabstand von 17,5 cm; gleiche Farben entsprechen gleichen interauralen Laufzeit- bzw. Pegeldifferenzen; der richtungsabhängige Einfluss des Kopfes und der Ohrmuscheln ist nicht dargestellt; linker 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 Fehllokalisierungen 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 Schalleinfallsrichtung 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 perzeptiven 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 Schalleinfallsrichtung 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.

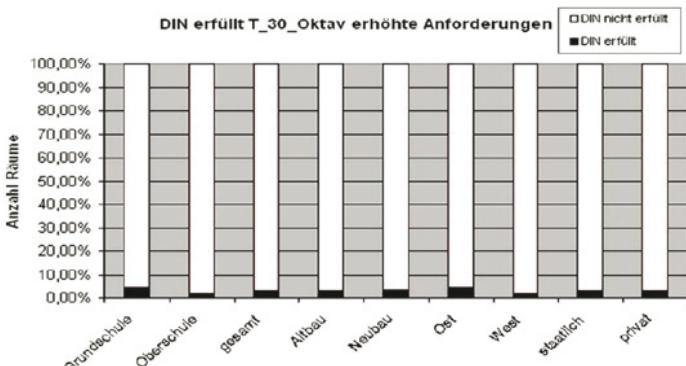


Abbildung 3 – Klassenzimmer (N=270) in Berliner Schulen, die nach DIN 18041 geforderte Nachhallzeit T30 erfüllen / nicht erfüllen; (Abbildung van de Sand [San09]).

## 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], [Møl96], [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], [Møl96].

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).

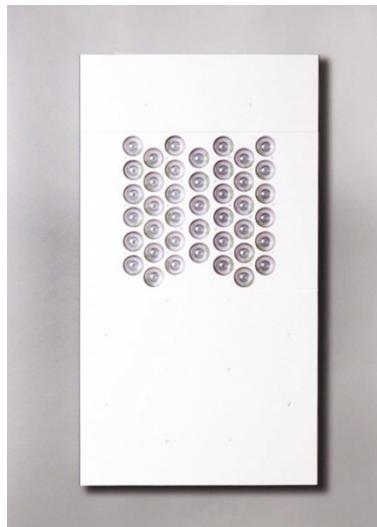


Abbildung 4 - Flachlautsprecher bei Wandmontage [Bee11].

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.

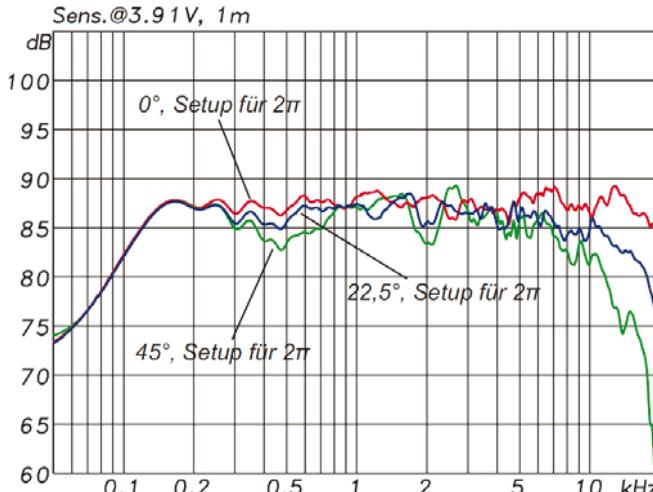


Abbildung 5 - Frequenzgang eines Flachlautsprechers für unterschiedliche Abstrahlwinkel und bei Wandmontage [Bee11].

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 GESÄFTSRÄUMEN**

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. Klefenz 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.

# Die Bedeutung des Lichtes für Büro und Verwaltung

*Ch. Bartenbach*

Bartenbach LichtLabor GmbH

Kontakt: *ch.bartenbach@bartenbach.com*

## ZUSAMMENFASSUNG

Licht beeinflusst die menschliche Leistungsfähigkeit. Ausgewogene Leuchtdichteverhältnisse, insbesondere blendfreie Helligkeiten am Arbeitsplatz und im Raum sowie abgestimmte Materialoberflächen sind daher maßgeblich für produktives Arbeiten.

Im modernen Büro- und Verwaltungsbau setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass Lichtlösungen, die rein auf die Erfüllung geltender Normen ausgelegt sind, den gestiegenen Anforderungen an Raumqualität und Nutzerfreundlichkeit einerseits und Energieeffizienz andererseits, nicht gerecht werden.

Dieser Artikel zeigt den Wirkungszusammenhang von Büroarchitektur und Licht auf und beleuchtet die Themenbereiche Tages- und Kunstlichtgestaltung.

90% der Informationsaufnahme geschieht durch optische Wahrnehmung. Durch Schaffung stabiler Wahrnehmungsbedingungen werden visuelle Erkennungsvorgänge optimiert. Diese bilden die Grundvoraussetzung, um produktive Leistungen zu erbringen.

Tageslicht hat eine höhere Lichtqualität als Kunstlicht und steigert somit produktive Vorgänge. Die Nutzung von Tageslicht und seinen Eigenschaften bzw. die Anwendung von Tageslicht lenkenden Systemen wird damit zunehmend zu einer wichtigen Komponente der heutigen Architektur.

Ausgereifte Kunstlichtsysteme mit geeigneten Betriebsmitteln (z.B. neue Leuchtmittel, Vorschaltgeräte oder Steuerungselemente) und neuen Technologien (z.B. hochwertige Reflektoren) können Tageslicht sinnvoll ergänzen oder gar ersetzen. Solche Systeme tragen ebenfalls zur Produktivitätssteigerung bei, da sie zu einer geringeren Ermüdung führen.

## **ABSTRACT**

Light affects human performance. Balanced luminance ratios, especially glare free brightness at workplace and in the room, as well as coordinated material surfaces, are essential for productive work.

In the modern office and administration buildings there is a growing recognition that lighting solutions which are purely designed to meet current standards do not meet the increased requirements for quality space and usability or energy efficiency.

This lecture will point out the interdependence between office architecture and light, and will also elucidate the topics of daylight and artificial lighting design.

90% of the information is received through visual perception. By creating stable perception conditions, the visual recognition processes are optimized. These are essential for providing productive performances.

Daylight has a higher quality of light than artificial light and thus increases productive processes. Both the use of daylight and its components and the application of light deflecting systems are thus increasingly becoming an important component of today's architecture.

Well-engineered artificial lighting systems with appropriate equipment (e.g. new lighting devices, ballasts or controls) and new technologies (e.g. high-quality reflectors) can usefully supplement natural daylight or even replace it. Such systems also contribute to increased productivity, because they induce less fatigue.

## **LICHTTECHNISCHE UND WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE ASPEKTE**

In diesem Beitrag wird wiederholt auf die Bedeutung der Stabilität visueller Wahrnehmungsbedingungen am Arbeitsplatz hingewiesen. Deshalb sollen vorerst wichtige Aspekte in diesem Zusammenhang erläutert werden. Es ist bekannt, dass etwa 80 bis 90 % der menschlichen Informationsverarbeitung über das visuelle System der Wahrnehmung erfolgt. Um wirksame Rationalisierungsvorhaben realisieren zu können, müssen diese

daher in Zukunft immer mehr visuell ausgerichtet werden. Dies ist eigentlich nicht neu, sondern bereits im Gange. Weiß man um die zunehmende, progressiv steigende Zahl der Bildschirmarbeitsplätze und die damit verbundenen Arbeitsmethoden und Kommunikationssysteme, dann wird die Bedeutung optimierter Sehbedingungen im wahrsten Sinne des Wortes „augenscheinlich“.

## STABILITÄT DER VISUELLEN WAHRNEHMUNG

Forschungen zur optischen Wahrnehmung zeigen, dass die Informationsvermittlung im Gehirn über mehrere (mindestens jedoch zwei) Ebenen abläuft.

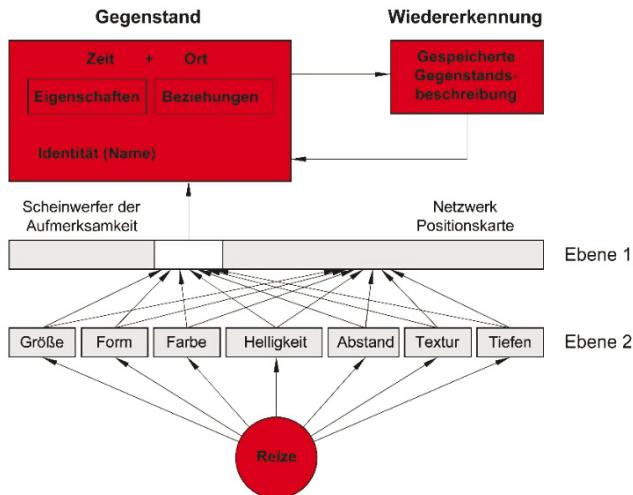


Abbildung 1: Gegenstandsreize werden unbewusst strukturiert und reduziert und durch die Aufmerksamkeit bewusst gemacht.

Auf der ersten Ebene spielen sich die unbewussten Prozesse der Wahrnehmung ab, vor allem jene der Konstanzleistungen, wobei für den Lichttechniker vor allem Helligkeits- und Farbkonstanz entscheidend sind.

Über die Aufmerksamkeitszuwendung, den „Scheinwerfer der Aufmerksamkeit“, wird die Verbindung zur zweiten Verarbeitungsebene hergestellt. Die Konzentration dient als Maß für die Intensität und Dauer der Aufmerksamkeitsvorgänge, die sich auf ein oder sehr wenige Objekte gleichzeitig beschränken. Da die Aufmerksamkeit für berufliche Tätigkeiten wesentlich ist und auf dieser Ebene auch der Freiraum für Motivation enthalten ist, geht es darum, sie für die Arbeitsvorgänge im Sinne der Rationalität, Produktivität aber auch der Humanität zu fördern.

Da bereits die erste Ebene dem Gehirn eine große Verrechnungsleistung abverlangt, die freie Kapazität aber begrenzt ist, kommt es darauf an, letztere richtig zu nutzen (im Sinne einer Beschränkung der optischen Wahrnehmungsabläufe auf das Wesentliche). Störungen in den optischen Wahrnehmungsabläufen wie z.B. Blendungsscheinungen oder sonstige optische Fehlläufe bedeuten, dass die freie Kapazität für die Kompensation solcher Störungen beansprucht wird. Sie wird dadurch eingeschränkt und steht vor allem für die Aufmerksamkeitsvorgänge verringert zur Verfügung, so dass weniger bereitgestellte Information verarbeitet wird und mehr Information verloren geht.

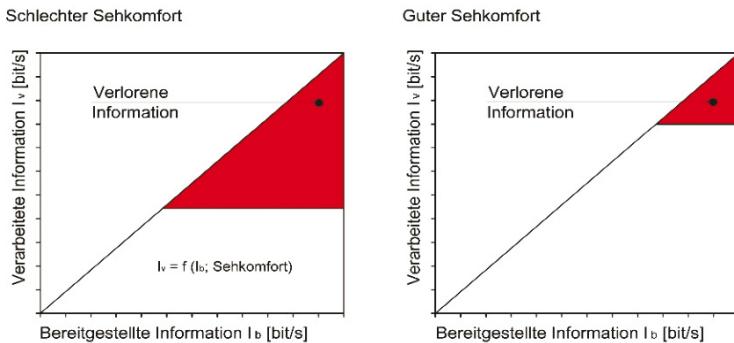


Abbildung 2 :Bei guter Beleuchtung kann mehr Information verarbeitet werden.

Ein einfaches Beispiel: Wenn wir mit jemanden sprechen und wir werden unterbrochen, dann ist unsere Aufmerksamkeit bereits gestört, weil wir einen hohen mentalen Aufwand benötigen, um beide Reizangebote gleichzeitig zu verarbeiten, um darauf zu reagieren. Diesbezügliche Forschungen haben gezeigt, dass vor allem Blendungsercheinungen unbewusst freie Kapazitäten für die Kompensation beanspruchen. Aus einer Reihe solcher Forschungsarbeiten geht hervor, dass es für das Erreichen und das Beibehalten einer Wahrnehmungsstabilität notwendig ist, ausgewogene Leuchtdichteverhältnisse in einem Raum zu schaffen.

Die Abstimmung dieser Leuchtdichteverhältnisse erfolgt an der unmittelbaren Sehaufgabe, welche die Infeldleuchtdichte determiniert. Die Sehaufgabe bestimmt also den Leuchtdichtebereich des fokussierten Blickfeldes. Die Leuchtdichten der umgebenden Raumoberflächen betreffen jene des Umfeldes. Die Hierarchie der Umgebungsleuchtdichten hängt von ihrer Nähe zur Infeldleuchtdichte ab. Somit ist die Schreibtischoberfläche als unmittelbare Umgebung zu verstehen, während Wände, Decke, Fuß-

boden, aber auch die Leuchten und Fensterflächen dem erweiterten Umfeld zugeordnet werden.

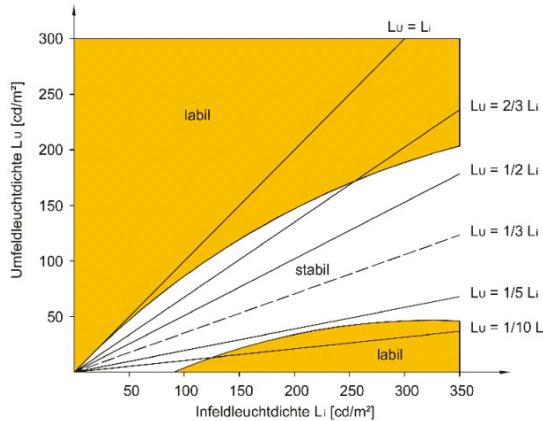


Abbildung 3 zeigt einen objektiven Zusammenhang zwischen der Infeld- und der Umfeld-Leuchtdichte, wobei das Erfordernis stabiler Wahrnehmungsbedingungen erfüllt werden muss.

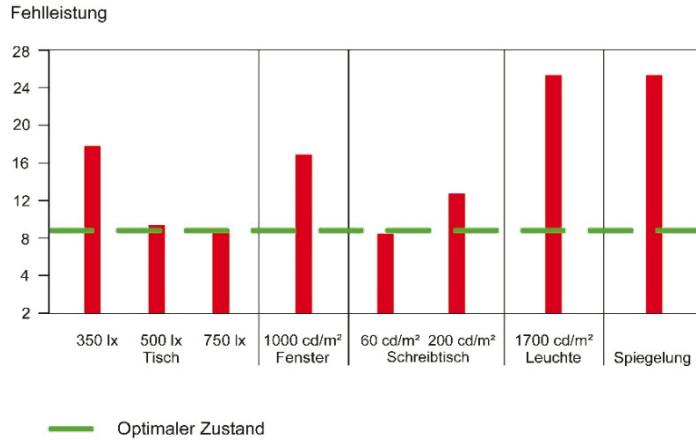


Abbildung 4: Zusammenhang mentaler Belastung, Tätigkeit und Leuchtdichte.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse einer beauftragten Forschungsarbeit (IBM) für Bildschirmarbeitsplätze dargestellt.

Man sieht deutlich die Abhängigkeit der mentalen Belastungen im Zusammenhang mit der Tätigkeit und die damit verbundene Abhängigkeit der Infeld- und Umfeldleuchtdichten.

Die Ergebnisse machen deutlich, wie wichtig es ist, in einem Büroraum die Leuchtdichte-Verhältnisse des Arbeitsbereiches zu den Umgebungsbereichen abzustimmen, und den Raum als ein optisches Ganzes zu betrachten, um störungsfreie entlastende Sehbedingungen zu gewährleisten.

## LICHTTECHNISCHE KRITERIEN EINES SEITENFENSTERS

In Verwaltungsbauten erfolgt die Tagesbelichtung der Räume hauptsächlich über das Seitenfenster.



Abbildung 5: Seitenfenster ohne Blend- und Sonnenschutz mit den auftretenden Leuchtdichteverteilungen.

Das lichttechnische Konzept eines Seitenfensters muss nach folgenden Kriterien bewertet werden:

- Absolute Tageslichtmenge (Quantität)
- Verlauf bzw. Verteilung des Tageslichts im Raum (Tageslichtquotienten)
- Sonnenschutz (Qualität)
- Optische Wahrnehmungsbedingungen: Direktblendung, Reflexblendung,
- Visueller Bezug nach außen (Transparenz)
- Energiefaktoren
- g-Wert (Sonnenschutzwirksamkeit)
- Abschaltzeiten des Kunstlichts

Die Gesamtheit dieser Kriterien, welche auch in die EU-Normen aufgenommen worden sind, lassen sich mit dem herkömmlichen Stand der Technik nicht mehr erfüllen. Der Bildschirmarbeitsplatz, der bei heutigen Büroarbeiten im Wesentlichen die visuellen Anforderungen bestimmt, benötigt ausreichend Licht mit abgestimmten Leuchtdichten im Infeld und im Umfeld sowie geeignete Horizontal- und Vertikalbeleuchtungsstärken und eine ausreichende Ausblendung von Fensteröffnungen.

Durch den Tageslichtquotienten (TQ – siehe Abb.6) wird das Verhältnis zwischen Außenbeleuchtungsstärke und punktueller Innenbeleuchtungsstärke angegeben sowie die Verteilung (Verlauf) des Tageslichts im Raum veranschaulicht.

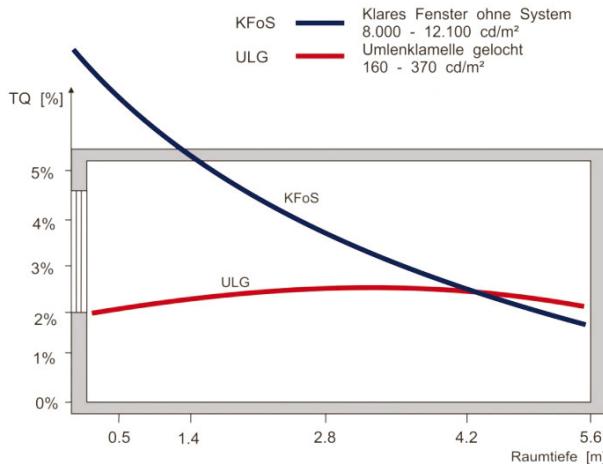


Abbildung 6: Typische Verteilung des Tageslichts mit und ohne Tageslichtsystem.

Abbildung 6 zeigt, dass Seitenfenster ohne Lichtumlenksystem einen ungünstigen Verlauf bzw. eine ungleichmäßige Verteilung des Lichtes innerhalb des Raumes erzeugen.

Die Lichtmenge in Fensternähe ist zu hoch und fällt mit zunehmender Raumtiefe zu stark ab. Es ist deswegen kaum möglich, tiefere Räume ohne künstliche Ergänzungsbeleuchtung (in der Raumtiefe) zu nutzen.

Bedingt durch den ungünstigen Tageslichtverlauf ergibt sich eine typische Anordnung der Arbeitsplätze in Fensternähe, wobei die

fensterfernen Bereiche als Verkehrszone verwendet werden. Dadurch orientiert sich die Position der Einrichtungsgegenstände am Tageslichtverlauf, was jedoch mit einer deutlichen Einschränkung der Raumnutzung einhergeht. Wenn jedoch dafür gesorgt werden würde, dass das vorhandene Licht besser verteilt wird, würde die Menge des einfallenden Tageslichts ausreichen, um bei einer vorgegebenen Beleuchtungsstärke von 400 bis 500 lx eine Raumbreite von 8 bis 10 m auszuleuchten.

Es ist daher naheliegend, das „Zuviel“ an Fensterlicht in die Raumtiefe zu bringen, um dort Arbeitsplätze (nicht nur Verkehrszenen) einzurichten zu können. Die Lichtlenkung ist dafür ein geeignetes Prinzip (Abb.7).

Die Abbildung 7 macht ersichtlich, dass Raumtiefen von 3,5 bis 4m mit Umlenklamellen ohne Maßnahmen an der Decke (weißer Anstrich) blendungsfrei und geeignet für Bildschirmarbeit ausgeleuchtet werden können.

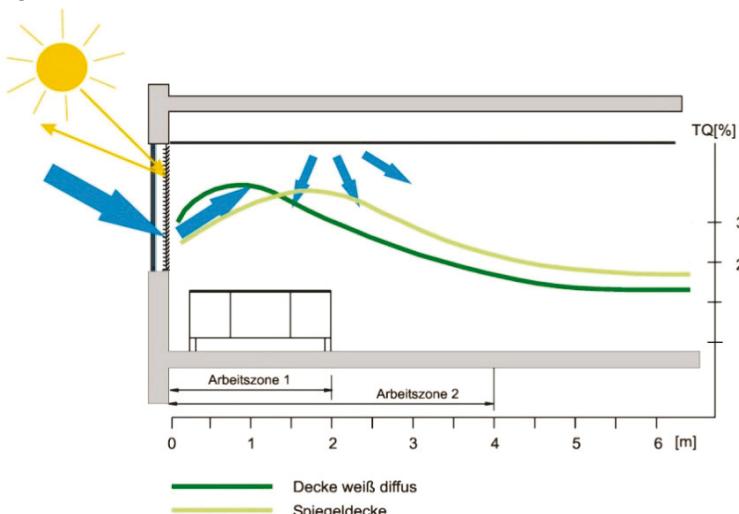


Abbildung 7: Lichtmenge und Lichtverteilung mit Umlenklamellen bei spiegelnder und diffuser Decke.

Die physikalischen Komponenten der Lichtlenkung sind das optische Medium eines Prismas oder die Reflexionsgesetze eines Spiegelreflektors. Die Realisierbarkeit hängt von der Art der Fensteröffnung, der Fassade, ästhetischen Vorstellungen und der Komplexität der lichttechnischen Vorgaben ab.

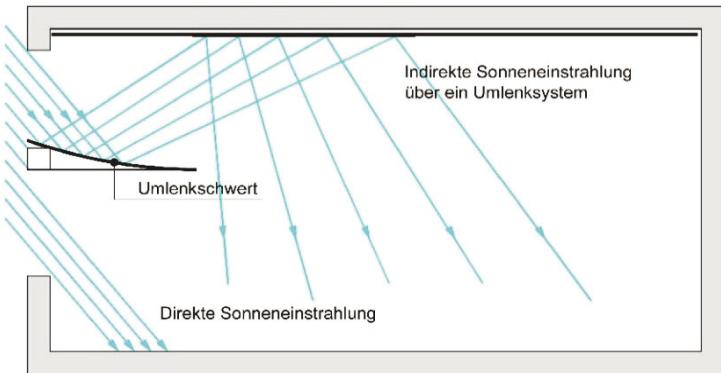


Abbildung 8:Schematische Darstellung einer Lichtlenkmaßnahme

Abbildung 8 zeigt die Anwendung eines Umlenkschwertes. Die Lichtumlenkung erfolgt im Bereich des Fensters. Da in den Einzelräumen die Arbeitszonen (nach hinten) erweitert werden, ist eine Spiegelumlenkdecke notwendig, die für die Optimierung des Kunstlichts genutzt wird, wobei die Spiegeldecke als Sekundärreflektor dient (Abb.9).



Abbildung 9: Beispiel einer Tagesbelichtung durch Umlenklamellen und Spiegeldecke (Bücherturm Neuburg a. d. D., Arch. N. Gänslner).

Beide Varianten reflektieren das Zenitlicht und bringen es an die Raumdecke, von wo es durch Sekundärreflexion in die Raumtiefe transportiert wird. Der Vorteil der Spiegelreflektorlamelle besteht darin, dass der untere Halbraum, d.h. unterhalb der horizontalen Blickrichtung, keinerlei Blendung auftreten kann, so dass auch Reflexionsstörungen am Bildschirm vermieden werden. Lamensysteme können zudem gelocht werden, um deren Transparenz für den Sichtkontakt nach außen zu verbessern. Durch geeignete Lichtumlenkungsmaßnahmen mittels Prismen oder Umlenklamellen ist es möglich, Raumtiefen bis zu 20 m ausreichend mit Tageslicht zu versorgen (Abb.10, 11 ).



Abbildung 10: Modellsimulation eines Raumes mit 3 m Höhe im künstlichen Himmel.

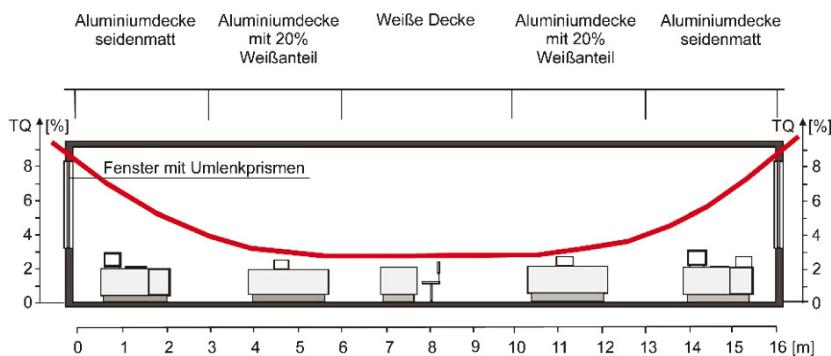


Abbildung 11: Messwerte des Lichtverlaufes zur Modellsimulation von Abbildung 10 bei beidseitiger Belichtung.

## **BLEND SCHUTZ**

Fenster vermitteln einem Betrachter die Umwelt außerhalb des Gebäudes, wodurch Himmelsleuchtdichten unmittelbar als mögliche Blendleuchtdichten auftreten können. Die Leuchtdichtebereiche des Himmels betragen je nach Außenhelligkeit bis zu 8.000 cd/m<sup>2</sup>. Da sich solche Leuchtdichten über große Flächen – eben über die Fensterflächen – ausdehnen und durch die aktive Raumwahrnehmung und die Art der Raumgeometrie in den Gesichtsfeldbereich kommen, tritt eine Störung des stabilen optischen Wahrnehmungszustandes ein. Die damit verbundenen Blendungserscheinungen stellen die Hauptbelastung der visuellen Wahrnehmung dar. Beim Auftreten solcher Leuchtdichtebereiche wird die Nutzung von Bildschirmen durch Direkt- und Reflexblendung beeinträchtigt, so dass geeignete Blendschutzmaßnahmen notwendig sind, die einerseits die Fensterleuchtdichte reduzieren, andererseits jedoch trotzdem einen ausreichenden Tageslichteinfall ermöglichen.

Da für Büroräume ein mittlerer TQ von 3 % gefordert wird, kommt es besonders auf die gleichmäßige Verteilung des Lichts im Raum an. Eine Umlenklamelle, die durch ihre reduzierte Leuchtdichte auch als Blendschutz funktioniert und mit einer Umlenkdecke kombiniert ist, kann die 3 % Forderung am besten erfüllen. Auch Messungen hinsichtlich Ermüdungserscheinungen weisen deutlich auf die Vorteile der Umlenklamelle hin. Während das klare Fenster mit einem konventionellen Blendschutz aufgrund seiner zu hohen bzw. zu niedrigen Helligkeit (Adaptionsblendung) das Auge immens belastet (hohe Ermüdungswerte), bewirkt das Umlenkssystem (gelocht oder ungelocht) Ermüdungswerte, die dem eines konstanten und entspannten Aktivitätsniveaus entsprechen.

Das Fenster ist im Wesentlichen als Bezugssystem zur Außenwelt gedacht und stellt damit einen wesentlichen Faktor einer

Raumöffnung nach außen dar. Es ist sicher nicht möglich, auf die Bezugssituation nach außen zu verzichten. Eine ausführliche Forschungsarbeit über Öffnungsgrößen von Fenstern zeigt, dass mindestens 30 % der Raumgrundfläche als Fensteröffnung notwendig ist. Dieses Maß gewährleistet nicht nur den visuellen Sichtkontakt nach außen, sondern befriedigt zudem das so genannte Fluchtbedürfnis, das im Menschen archaisch verankert ist.

## SONNENSCHUTZ

Mit dem einfallenden Tageslicht kommt Wärme in den Raum, die an Sonnentagen auf Höchstwerte ansteigt. Neben den damit auftretenden Blendungerscheinungen muss die unzulässige Aufheizung des Raumes durch Sonnenwärme vermieden werden, was durch Sonnenschutzsysteme erzielt werden kann. Die Wirksamkeit eines Sonnenschutzes besteht in der Verminderung der Sonnenstrahlung, d.h. je wirksamer der Sonnenschutz, desto geringer ist die Wärmeeinstrahlung. Dadurch wird allerdings auch die Lichteinstrahlung entsprechend reduziert, was dazu führt, dass an strahlenden Sonnentagen Kunstlicht zugeschaltet werden muss. Demnach ist es auf konventioneller Basis nicht möglich, die Sonnenschutzwirkung ohne Verzicht auf Tageslichteinstrahlung zu erreichen. Wird jedoch das Prinzip der Retroreflexion angewandt, ist es – wie in Abb.12 dargestellt – möglich, die wärmeintensive Parallelstrahlung der Sonne wieder nach außen zurück zu lenken, während das diffuse Tageslicht ungehindert in den Raum gelangt.

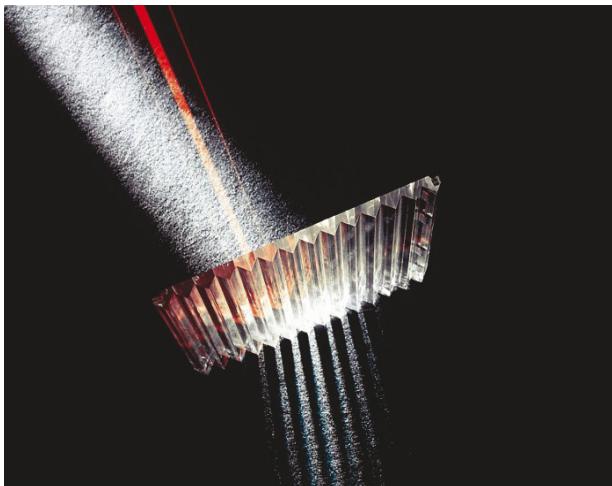


Abbildung 12: Sonnenschutzsystem auf der Grundlage der Retroreflexion von Prismen.

Solche Systeme (Abb.12), die der Sonne nachgeführt werden müssen, lassen sich auch in ein Umlenksystem integrieren. Zudem ist es möglich, sie hinter eine Verbundscheibe zu setzen, ohne die wärmeabhaltende Wirkung wesentlich zu verlieren. Man erreicht eine Lichtdurchlässigkeit von 70 bis 75 % und einen g-Wert von 0,08 bis 0,1 außen liegend bzw. von 0,15 bis 0,20 innen liegend. Diese Tatsachen lassen den Schluss zu, dass bei der Trennung der Funktion des Tageslichts, bezogen auf die Forderungen der optischen Wahrnehmung, neue Räume bzw. Raumgebilde entstehen, die der Komplexität der Nutzung entsprechen, aber auch eine Gestaltungsbereicherung und –Vielfalt zulassen. Retroreflektierende Sonnenschutzprismen eignen sich für Räume mit Bildschirmarbeitsplätzen, wobei durch den optimierten g-Wert zusätzlich die Lüftungs- bzw. Klimaanlage entlastet wird (geringere Betriebs- und Wartungskosten).

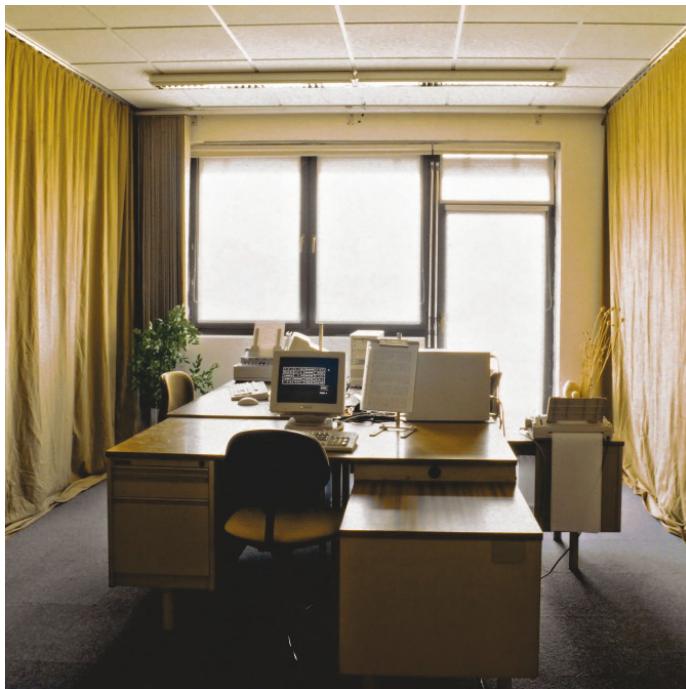


Abbildung 13: Textiles Blendschutzrollo, welches die Leuchtdichte des Außenraumes auf die geforderten 200 bis 300 cd/m<sup>2</sup> reduziert. Es verhindert jedoch die Sicht nach Außen und reduziert das einfallende Licht auf ca. ein 1/10 des Außenraumes, wodurch das Helligkeitsniveau im Inneren zu niedrig ist.

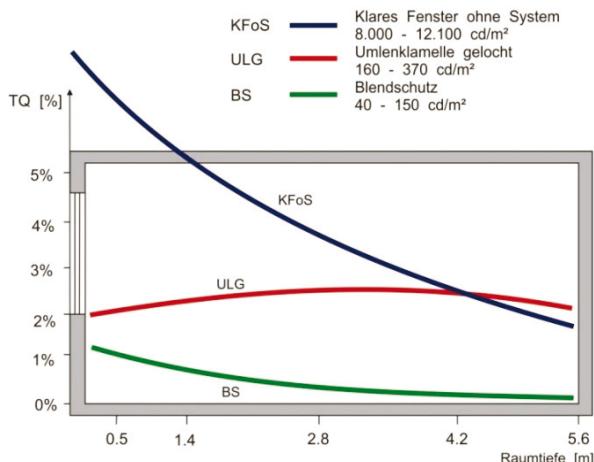


Abbildung 14: Vergleich von Lichtmenge und Lichtverteilung (TQ) eines Blendschutz- und Tageslichtumlenksystems mit dem unbehandelten klaren Fenster.

## KUNSTLICHT ALS ERGÄNZUNGSBELEUCHTUNG

In hauptsächlich tagesbelichteten Räumen ist die Aufgabe der künstlichen Beleuchtung, das Tageslicht zu ergänzen bzw. in der Zeit des Tageslichtmangels zu ersetzen. Die Tageslichtergänzungsbeleuchtung soll so konzipiert sein, dass sie ähnliche Leuchtdichte-Verhältnisse und Beleuchtungsstärkeverläufe aufweist, wie der durch Tageslicht belichtete Raum.

Sollten die Tageslichtverhältnisse Mängel hinsichtlich der Wahrnehmungsstabilität aufweisen, so sind diese durch eine permanente künstliche Ergänzungsbeleuchtung zu korrigieren. Bei Räumen, in denen eine Nutzungszone von mehr als 3,5 m gefordert ist, also bei Raumtiefen von über 6 m, sind reflektierende Umlenkelemente an der Decke notwendig, die das einfallende Tageslicht in die Raumtiefe lenken. In solchen

Räumen ist es empfehlenswert, diese Reflexionselemente zusätzlich als Sekundärreflektoren zu verwenden, um auf diese Weise das Kunstlicht in die Nutzungsbereiche zu bringen (Abb.15).



Abbildung 15:Doppelsystem mit Lichtlenkung und Ausblendung. (Deutsche Bank Frankfurt; ABB Architekten)

Ergänzend zu dieser direkten Sekundärbeleuchtung empfiehlt sich eine Indirektkomponente im hinteren Raumbereich, die jedoch die Deckenleuchtdichte nicht über  $200 \text{ cd/m}^2$  ansteigen lässt.

Eine Möglichkeit ist auch, direktstrahlende Spiegelreflektoren zu verwenden, wobei aufgrund der aktiven Wahrnehmungsvorgänge die Sekundärsysteme bevorzugt werden sollen. Wie sehr die objektiven Leistungsparameter (Bearbeitungszeiten und Ermüdung) von der Charakteristik der Leuchte abhängen, zeigt Abbildung16.

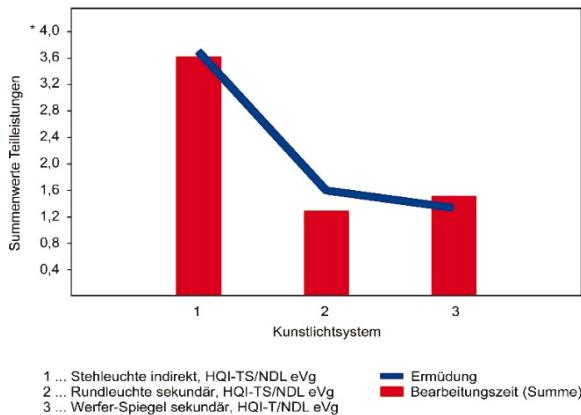


Abbildung 16: Psychophysische Leistung in Abhängigkeit von der Leuchtencharakteristik

Dazu ist zu erwähnen, dass diese Ergebnisse den Untersuchungen von Einzelräumen (Doppelarbeitsplatz) entstammen, wo die Decke und damit auch die Leuchten im Gesichtsfeld eher zurücktreten, d.h. nicht so massiv wirksam werden wie in einem Großraum, wo die Raumdecke eine noch gewichtigere Rolle spielt. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass in größeren Räumen mit mehreren Arbeitsplätzen die Leistungsunterschiede noch stärker mit der Charakteristik der Beleuchtung zusammen hängen.

Dass ausgebündelte Direkt- und Sekundärsysteme vorteilhafter gegenüber direkt-indirekten oder rein indirekten Systemen sind, zeigt auch die begleitende Befragung der Versuchspersonen über deren subjektiven Eindruck des Raummilieus, das eine bestimmte Beleuchtungsart vermittelt.

Das durch Optimierung der Sonnen- und Blendschutzmaßnahmen mittels Prismen- und Lamellensystemen auch die

Energiekostenbilanz hinsichtlich der Notwendigkeit einer permanenten oder zeitweiligen Kunstlichtzuschaltung merkbar verbessert werden kann, geht aus Abbildung 17 hervor.

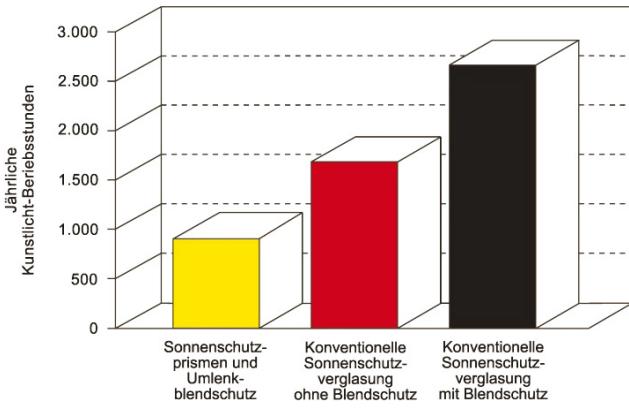


Abbildung 17: Jährliche Betriebsstunden für Kunstlichtzuschaltung bei drei Tageslichtsystemen

Eine optimale Anpassung an das Tageslichtmilieu kann durch LED-Lichtquellen erzeugt werden. Mit geeigneten Systemtechniken ist es möglich, den Ersatz der Tageslichtmenge - z.B. in der Dämmerung und anschließend in der Nacht - hinsichtlich des Lichtverlaufs, der Intensität, aber auch der Lichtfarbe, anzupassen.



# Akustik planen und gestalten

*J.-M. Baum*

*Planungsbüro Weber Baum*

*Kontakt: j-m.baum@pwb-info.de*

Unsere Arbeitswelt erfährt momentan einen rasanten Wandel. Büroarbeit wird durch moderne Technik zunehmend netzwerkartig und frei von den örtlichen Relevanzen. Bürogebäude dienen zukünftig vornehmlich dem Sozialisierungsprozeß der Mitarbeiter.



Abbildung 1

Telearbeit geleistet über eine Netzwerkstruktur nehmen in diesen virtuellen Unternehmen einen großen Raum ein. Gleichzeitig steigt der wirtschaftliche Druck auf die Unternehmen. Die Konsequenz sind hochverdichtete open space Arbeitsflächen in denen der Anteil an privaten Gesprächen, also der Sozialisierung dienenden Kommunikation sehr hoch sein wird. Wir sprechen hier von Akustiksmog durch nicht arbeitsrelevante Schallenergie.

... trotz Verdichtung .... , jeder das Recht auf akustische Diskretion !



... kein Akustikraum am Arbeitsplatz !

Abbildung 2

Planungsaufgabe wird es zukünftig sein, auch in moderner Architektursprache von Bürogebäuden trotz Ganzglasfassade und Betonkernaktivierung für den Mitarbeiter eine akustische Diskretion zu schaffen in der Kommunikation und Konzentration durch geeignete Absorber an der Raumhüllfläche und der Direktschallschirmung getrennt sind. Ein Gebäude ist nur dann schön wenn die Mitarbeiter sich in ihm wohl fühlen. Architektur formuliert sich durch die Schaffung von Funktionalität und Leistungsfähigkeit innerhalb der Infrastruktur eines Unternehmens.

Behaglichkeit der menschlichen Sinne



Wenn die Menschen dahinter lachen

Abbildung 3

Akustische Diskretion hat in den letzten Jahren so an Prominenz gewonnen weil der Hörsinn, durch die Evolution des Menschen geprägt, der Überlebenssinn Nummer eins ist. Wir können unsere Muskeln trainieren, aber Weg hören kann man nicht trainieren. Sprache hat Vorfahrt. Nehmen wir Sprache wahr, versucht unser Kleinhirn diese Information auszuwerten.

## OB WIR WOLLEN ODER NICHT, IM OPEN SPACE HÖREN WIR ALLES MIT.



Abbildung 4

Wie im Büro so kennen wir diese Ablenkung auch im Alltag. Wer ist nicht schon einmal an einer Autobahnausfahrt vorbei gefahren weil gleichzeitig ein Mobilfunkgespräch geführt wurde. Der Arbeitsspeicher in unserem Hirn hat nur eine gewisse Kapazität. Die Wahrnehmung und Auswertung von Sprache nimmt auf der mentalen Ebene einen sehr hohen Stellenwert ein. Kennen wir nicht alle die Ablenkung durch die inhaltlich sprachverständlichen Gespäche anderer. Diese Leistungsminderung kostet die Unternehmen heute viel Geld. Krankheitsstände steigen und die Arbeitsleistung sinkt durch permanente Akustiksmog und Ablenkung am Arbeitsplatz.



Abbildung 5

Unser Ohr hat sich während der Evolution des Menschen auf die Wahrnehmung und Auswertung von sprachlichen Inhalten spezialisiert. Im Bereich zwischen 200 – 2000 Hz ist unser Gehör

am sensibelsten. Selbst ein Flüstern wird von unserem Ohr wahrgenommen und lenkt uns bei der Arbeit ab. Trotz größter Anstrengung lasse ich mich durch die Kommunikation anderer in meiner Konzentration von meinem Kleinhirn überlisten. In uns steckt eben immer noch der Urmensch, bei dem der Überlebenssinn Nr. 1, das Ohr, alle Gefahren gemeldet hat.

Die Ausrichtung der Verbesserung der Raumakustik muss also die Minderung der Sprachverständlichkeit im Fokus haben. Hierzu dienen im Wesentlichen poröse Absorber für die hohen Töne und membrane schwingende Absorber für die tieffrequenten Töne. Poröse Absorber sind z.B. Schaumstoffe, Glas- oder Steinwolle – Textilien – feingelochte Materialien. Membrane Absorber sind schwingende Türen oder Querrolläden sowie Plattenschwinger in Form von Platten aus Metall, Hartfaserplatten in Stellwänden oder akustischen Wand- oder Deckenbelägen.

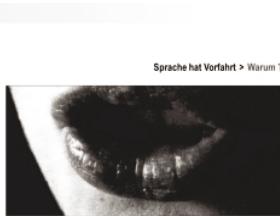


Abbildung 6

Sprache lässt sich am besten durch Sprache anderer verdecken. Wir kennen diesen Effekt in der Gastronomie. Alle Tische sind besetzt und ich kann mich hervorragend mit meinem Tischpartner unterhalten. Durch den Stimmenteppich vieler Stimmen ist die Diskretion zwischen den Tischen gewährleistet. Es wird leer und der Stimmenteppich nimmt ab. Plötzlich verstehen wir den Nachbartisch inhaltlich und unser Gespräch wird ebenso verstanden. Die Diskretion bricht zusammen und die Gäste fühlen sich gegenseitig gestört.



Abbildung 7

Im Büro ist es ebenso. Wird es zu leise und fehlt der Stimmen- und Klangteppich kommt es zu einer hohen Sprachverständlichkeit im akustischen Nahfeld. Wird mehr als 40 % der Sprache eines anderen kognitiv wahrgenommen und ausgewertet, versucht das Kleinhirn die Inhalte auszuwerten. Dieses passiert unbewusst und ungewollt. Ein Verdeckungsgeräusch im sprachfrequenten Bereich kann im open space die Sprachverständlichkeit durch Anhebung des Hintergrundgeräuschpegels senken. Für ein Verdeckungsgeräusch sind folgende Planungsparameter relevant:

#### Das eingespielte Verdeckungsgeräusch

- darf nicht ortbar sein
- muss gefahrlos klingen ( positive Assoziation )
- muss unsichtbar sein ( Deckeneinbau der Lautsprecher )
- darf inhaltlich nicht auswertbar sein.

Ein gutes Beispiel für ein gutes Verdeckungsgeräusch ist der Spaziergang im Wald. Ich assoziiere das Rascheln der Blätter positiv. Verdeckungsgeräusche umgeben uns ständig. Erst wenn unser Kleinhirn meldet „Gefahr“ oder „Sprache hat Vorfahrt“ werden wir aufmerksam und lassen uns von anderen Tätigkeiten ablenken. Unser Ohr ist eben unser Radar- und Warnsinn Nr. 1. Technisch gesehen ist der Schall die Schwingung von Molekülen in der Luft. Diese breiten sich kugelförmig aus, was bei der

Planung der Direktschallschirmung zu berücksichtigen ist. Wir unterscheiden zwischen Direkt - und Reflexionsschall.

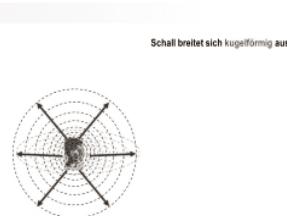


Abbildung 8

Was führt zusammenfassend zu einer akustisch komfortablen Diskretion

- Senkung der Nachhallzeit
- Gleichmäßige Belegung der Raumhülle mit Absorbern der Klasse B ca. 90 % der Decke sollten mit einem Absorber belegt werden.
- Nahfeldschirmung der Arbeitsplätze mit mind. 3,0 m<sup>3</sup> pro Mitarbeiter
- Nutzung der Organisationsmöbel
- Trennung der Arbeitsbereiche in die Zonen – intime Denkzellen-informelle Kommunikation – formelle Kommunikation - Pausenbereiche

## TECHNISCHE UMSETZUNG DER AKUSTISCH KOMFORTABLEN NAHFELDSCHIRMUNG

Im Wesentlichen unterscheiden wir zwischen der Grundkonditionierung über die Raumhülle auf eine Nachhallzeit von ca. 0,5 sec. gemäß DIN 18041 und der Minderung der Sprachverständlichkeit auf ca. 5 m bei einem Grad der Sprachverständlichkeit STI von ca. 40 % gemäß VDI 2569.

Weiterhin sind die Beurteilung der Schallfortleitung und Minderung der Direktschallschirmung wesentliche Planungsparameter.

Für die Minderung der Schallfortleitung des Reflexionsschalls muss insbesondere die Decke mind. zu 80 % mit einem Absorber der Klasse B belegt werden. An den Wänden sollten ca. 20 % der Flächen mit einem Absorber der Klasse B ausgestattet sein.



Abbildung 9

Abbildung 10

Als schirmende Maßnahme wird vor dem Kopf des Mitarbeiters eine Stellwand der Klasse B mit einer Gesamthöhe von ca. 140 cm empfohlen. Diese Stellwand soll über die gesamt Breite des Schreibtisches laufen.

### Wer ist für die Raumakustik verantwortlich?

- Aus Sicht des Arbeitsschutzgesetzes der Arbeitgeber.
- Aus Sicht des Planungs- und Baurechtes der Architekt oder Fachplaner.
- Aus Sicht der HOAI in allen Leistungsphasen der Architekt.



# **Acoustical Design of Speech Rooms using the Complete Acoustical Palette: Absorption, Reflection, Diffusion and Isolation**

*P. D'Antonio*

RPG Diffusor Systems, Inc.

Contact: [pdantonio@rpginc.com](mailto:pdantonio@rpginc.com)

## **ZUSAMMENFASSUNG**

In diesem Beitrag wird die akustische Gestaltung von Räumen mit Anforderungen an gute Sprachverständlichkeit diskutiert. Diese Räume sind Unterrichtsräume, Konferenzräumen, Besprechungszimmer, Distance Learning Räume, Auditorien und andere Präsentationsräume. Für ein umfassendes Design ist die Betrachtung der Schalldämmung gegen externe und störende interne Quellen sowie die Kontrolle von Reflexionen und Nachhall im Raum notwendig, d.h. Bauakustik (noise control) und Raumakustik (sound control) sind zu beachten. Störenden Schallquelle sind zu identifizieren und geräuschmindernde Materialien werden vorgestellt. Absorbierende, reflektierende und streuende raumakustische Oberflächen werden dargestellt. Die Anwendung dieser bau- und raumakustischen Elemente werden vor dem Hintergrund einer raumakustischen Gestaltung für die vielfältigen Räume in den eine gute Sprachverständlichkeit erforderlich ist, diskutiert.

(Übersetzung: C. Nocke)

## **ABSTRACT**

In this presentation we will discuss the acoustical design of rooms in which good speech intelligibility is required. These include rooms used for teaching, meetings, conference, distance learning, lectures and presentations. To properly design these rooms we must provide isolation from external and internal noise interference and control of interfering reflections and reverberation, i.e. we must provide noise control and sound control. Noise interference sources will be identified and materials for mitigating them will be presented. Absorptive, reflective and diffusive sound control surface treatments will be described. Then

utilizing noise and sound control elements, we will discuss the acoustical design of a range of spaces in which high speech intelligibility is required.

## NOISE CONTROL

Noise interference can arise from airborne and or structural borne noise. Any vibrating source can modulate the air and create airborne sound. Airborne sound can infiltrate a speech room via transmission through partitions and through any common path with adjacent rooms. These common paths are referred to as flanking paths, in that even if room boundaries were sufficiently isolated, airborne sound can still flank or bypass the room boundaries rendering them ineffective. Flanking can occur through common HVAC ducts or common floors and ceilings.

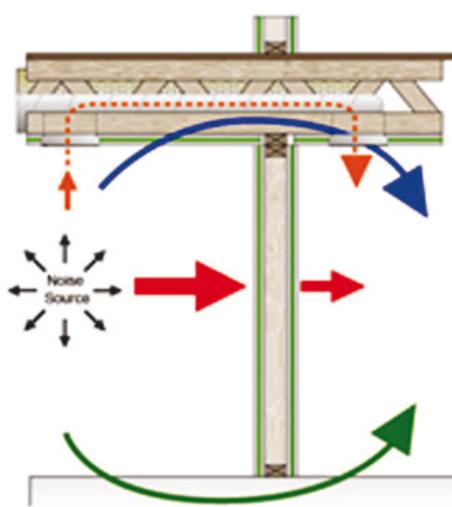


Figure 1. Illustration shows airborne noise paths through a common wall and flanking paths through a common floor, ceiling and HVAC duct.

Travel through common HVAC ducts is understandable, but airborne sounds can cause the common ceiling or floor to vibrate and transmit the sound to an adjacent room and re-radiate. Impulsive sounds caused by footfalls or any direct excitation of a common surface can also flank room boundaries. These paths are shown in Figure 1. As an example, it is common to see two offices separated by a common wall, with a common ceiling and floor. It should be appreciated that despite how effective the common wall

and doors may be, the room is destined to be compromised by flanking

through the common floor, diffraction over the common wall through the typical ACT ceiling and via the common HVAC ducts. The only way to improve this design is to provide a separate floor and ceiling in each room, breaking the flanking path and addressing the common HVAC duct. There are two factors that contribute to noise control and they are mass and isolation. There is a common myth associated with isolation, which states that placing absorption on a room boundary will decrease the

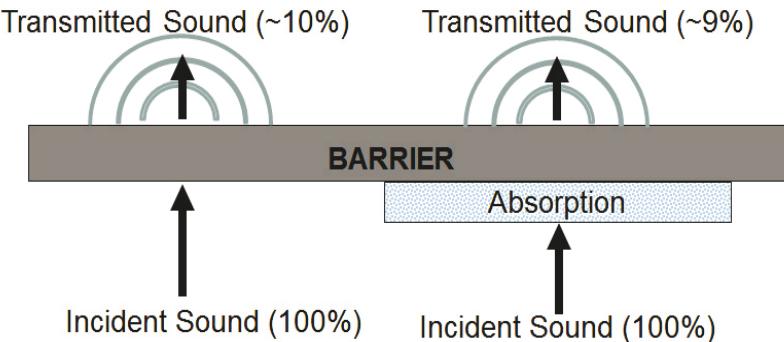


Figure 2. Illustration dispels the common myth that placing porous absorption on a barrier wall will decrease the transmitted sound.

transmitted sound.

Figure 2 shows that the use of a standard fabric wrapped absorptive panel on a room boundary only affects the acoustics within the room, but does little to control transmission through a partition. Improved transmission loss is achieved by increasing the mass, providing an air gap and isolating the partition using a resilient material. Isolators can be either springs, which are effective below 5 Hz, or a wide range of elastomers including, natural rubber, polyurethane, cork-rubbers, recycled tires and microcellular foams, which are effective above 5 Hz. The theory

of isolation is very mature. It states that the effectiveness of the isolation depends on the ratio of the disturbing frequency,  $f_d$ , and the natural frequency of the isolator,  $f_r$ . It can be seen in Figure 3, that when the ratio,  $\beta$ , of the disturbing frequency and the natural frequency of the isolator is equal to one, amplification occurs, making the sound louder. At a ratio of the square root of 2 (1.41), the Transmissibility (the sound that is transmitted through a partition) is equal to 1, meaning all of the sound passes through the partition. As this ratio increases we enter an isolation region in which the transmissibility drops rapidly as the ratio increases.

In Figure 3, we also show a chart of Isolation Efficiency, also called Transmission Loss, in which it is shown that to provide

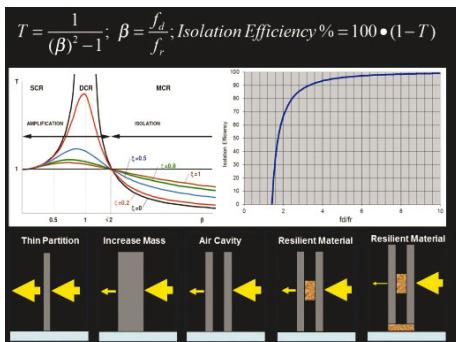


Figure 3. The transmitted sound,  $T$ , is a function of the ratio,  $\beta$ , of the disturbing frequency and the isolator resonant frequency. As  $\beta$  exceeds the square root of 2, isolation is achieved and increases as the ratio increases.

isolation of airborne and structurally borne sound, we must use an isolator with a resonant frequency lower than the disturbing frequency of the noise. The lower the resonant frequency of the isolator compared to the frequency of the noise the greater the isolation. Typical values of  $\beta$  would be greater than 1.41. For example, to isolate a noise source of 60 Hz, and isolator with a resonant frequency of 15 Hz, common for a natural rubber or polyurethane, would

provide 95% isolation. In the lower part of Figure 3, we show how the transmitted sound is progressively decreased by increasing the mass of the partition, introducing an air cavity using a resilient material and lastly floating the partition on a resilient material, separating it from the structure.

There are well established materials to isolate floors, walls and ceilings and some examples are shown in Figure 4. Floors are easily isolated by floating a floor consisting of a lamination of plywood/gypcrete/plywood on polyurethane elastomers spaced in a roll-out polyester mat. When there are height restrictions, a wavy recycled rubber mat can be used, with a compromise in isolation efficiency. The most cost effective way to design a room is to isolate the floor as described and rest the walls on the floor and the ceiling on the walls. Resilient material is used to separate the walls from the floor and ceiling from the walls. To properly account for the added weight of the walls and ceiling a separate strip of isolators is effective around the perimeter of the room. When this design is not appropriate, walls can be isolated with

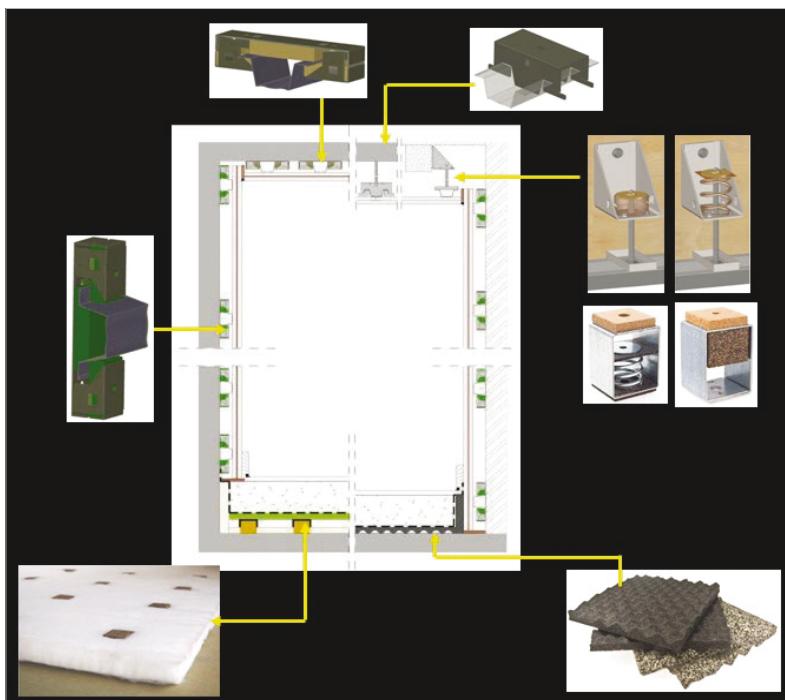


Figure 4. Typical elastomeric and spring isolators for floor, walls and ceiling.

drywall isolation clips and the ceiling can be suspended with spring or elastomer isolators from the structure.

## SOUND CONTROL

Once the room is isolated from external noise interference, the next concern is internal room acoustics. This is typically determined by acoustical treatment on the walls and ceiling. The sound that we hear in a room is determined by the direct sound and indirect reflections from the room's boundaries and internal contents. Control of reflections using absorption has been in practice for over a hundred years, since Sabin linked reverberation with the absorption coefficient. In fact, the term acoustical surface has almost become synonymous with an absorbing surface. The fact is that there are three acoustical surfaces, namely absorptive, reflective and diffusive, as shown in Figure 5. An absorptive surface attenuates sound, a reflective surface redirects sound and a diffusive surface uniformly scatters

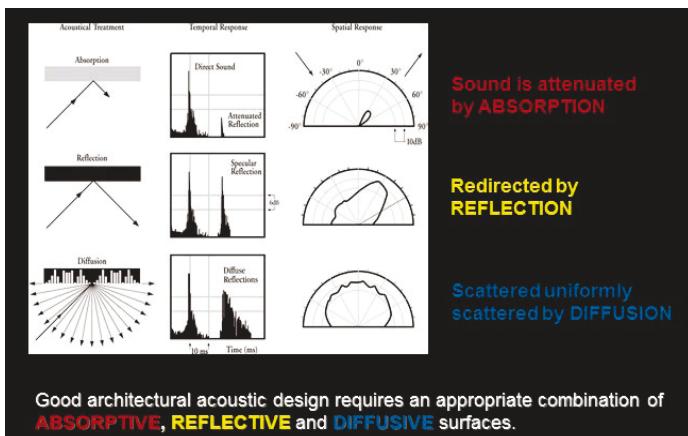


Figure 5. Sound is attenuated by absorption, redirected by reflection and uniformly scattered by diffusion.

sound. Since absorptive surfaces have been available and are relatively affordable, they tend to dominate acoustical design of

office spaces. This presentation is intended to describe how we can improve on using solely absorptive surfaces. To do so we will describe the current absorptive and diffusive surfaces, how to measure and characterize them and where and how to use each. Keep in mind that an effective acoustical design is achieved only through an appropriate combination of absorptive, reflective and diffusive surfaces.

## ABSORPTION

Let's begin by describing the three types of absorptive surfaces, namely porous, resonant and diaphragmatic, shown in Figure 6. The most common are the porous absorber, typically acoustical ceiling tile (ACT) and fabric wrapped fiberglass, rockwool, polyester or cotton panels. These surfaces absorb sound by

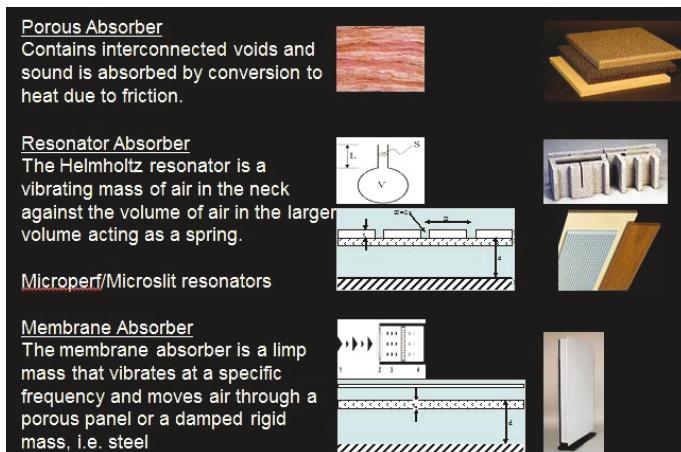


Figure 6. Three types of sound absorbing materials.

converting sound energy into heat, due to friction in the interstitial voids in the material. A second mechanism involves resonance of a small air mass in a hole or slot against a larger volume of air behind it acting like a spring. To extract energy and broaden the

bandwidth, a porous material is placed in the cavity close to the opening, where the particle velocity is a maximum. Products employing this absorption mechanism include perforated or slotted wood panels and slotted concrete masonry units. The last option is a membrane absorber consisting of a vibrating limp mass that moves air through a porous absorber or a damped rigid metal

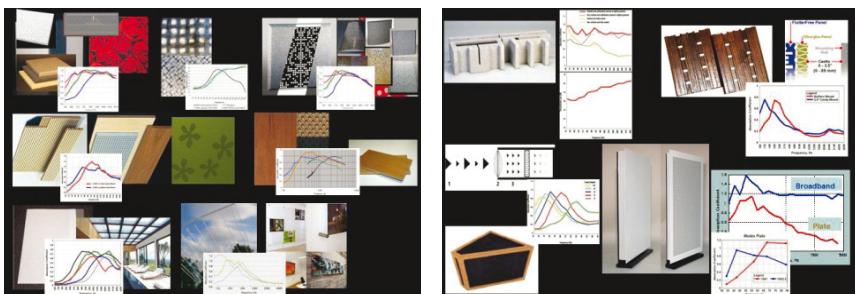


Figure 7: Left- High-Mid frequency absorbers and their effective frequency ranges. Right- Mid-Low frequency absorbers and their effective frequency ranges.

plate. The important thing to appreciate about each of these absorbers is that they each have a limited frequency range in which they provide effective absorption, as shown in Figure 7. Porous absorbers in the form of fabric wrapped panels, typically used in offices, absorb preferentially in the high-mid frequencies, depending on thickness and mounting. If used solely and in excess can cause more harm than good, by overly deadening the room. It is important to examine the absorption efficiency versus frequency and not just the NRC or  $R_w$ . For example, two treatments can have the same NRC, but very different absorption spectra.

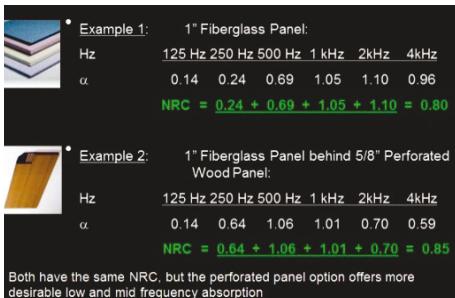


Figure 8. The fabric wrapped panel and the perforated wood absorber have similar NRC values, but the perforated wood panel is more effective in the mid and low frequencies.

impedance surface, consisting of absorptive and reflective areas. The binary amplitude diffusing absorber (diffsorber) consists of a specially designed perforated template on the face of a porous absorber. The location of the perforations is specified by an optimal two-dimensional mathematical binary sequence, where a hole is placed when the sequence value is zero. The template accomplishes two things. It uniformly scatters the high frequencies, instead of absorbing them and deadening the room, and it diaphragmatically increases the mid-low frequency absorption, which is desirable. The design can be seen in Figure 9. At the top left the two dimensional sequence of holes forming the binary amplitude grating is shown, also indicating that the holes are places where the sequence has a zero value. In the upper right, various embodiments of the BAD panel are shown, including flat and curved fabric wrapped panels, exposed flat and curved metal and exposed wood with and without back lighting. In the lower left we see the absorption coefficients for conventional fabric wrapped panels of 1", 2", 3" and 4" thickness. As the thickness increases the low frequency absorption also increases. In the bottom middle graph, we show

In Figure 8, we compare a fabric wrapped panel and a perforated wooden panel. They both have the same NRC; however, the perforated wooden panel provides more uniform absorption in the mid and low frequencies, which often is desirable. Since the fabric wrapped panel is an attractive option, we have developed an approach to improve it, using a variable

how the BAD panel decreases the high frequency absorption and increases the mid and low frequency absorption as a function of the same four panel thicknesses. We also show the absorption spectrum for 1" fiberglass for comparison. In the bottom right a cutaway view of a fabric wrapped BAD panel is shown. The BAD panel is a useful evolution of the conventional fabric wrapped panel for office use.

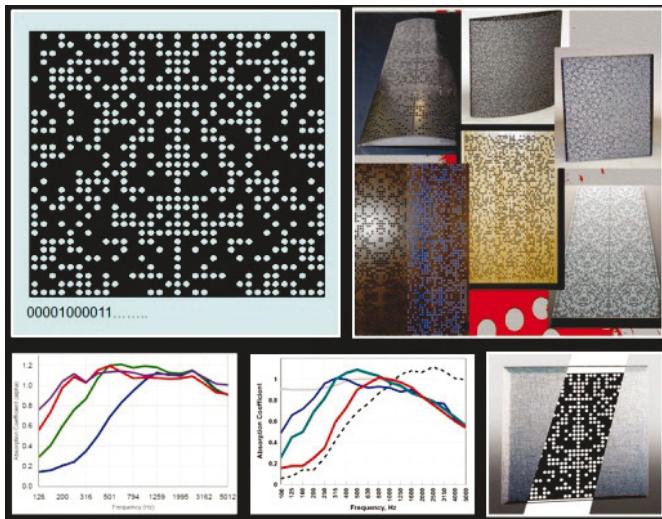


Figure 9. Top left: Binary amplitude diffusor (BAD) template; Top Right: Fabric covered and exposed BAD panels; Bottom left: 1", 2", 3" and 4" fabric wrapped fiberglass absorption coefficients; Bottom middle: absorption coefficients for 1", 2", 3" and 4" BAD panels compared to 1" fiberglass (dotted); Bottom right: cutaway view of fabric wrapped BAD panel

In addition to fabric wrapped absorbers, BAD panels and macro and micro perforated wood, one can also us a new class of transparent microperf and microslit absorbers. Microperf and microslit designs absorb sound through viscous losses in the less than 0.2 mm diameter holes, which are comparable to the thickness of the boundary layer of air. These are especially useful

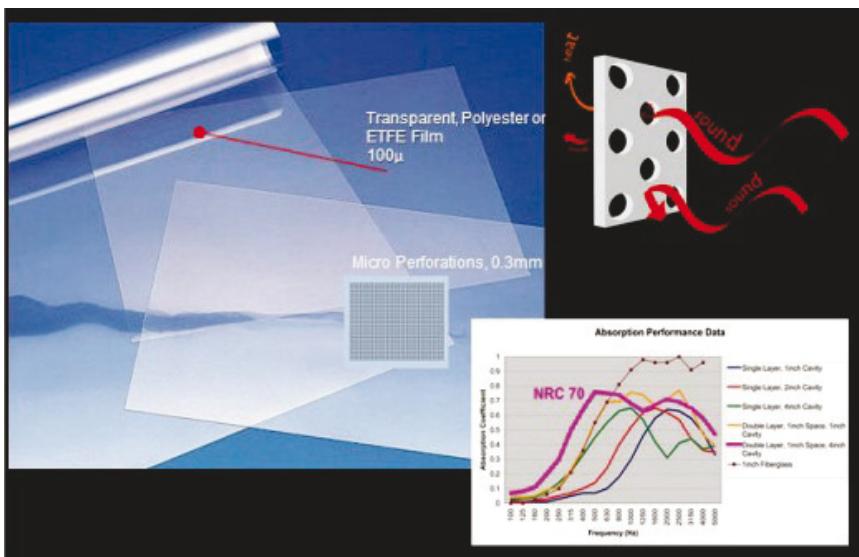


Figure 10. Microperforated foil and absorption coefficients.

when daylight and natural views are desired. The microperf option is available in 100 micron microperf polycarbonate or fire-rated ETFE foils, Figure 10, or acrylic or PETG panels, Figure 11 left, is available in panel form from 2 - 5 mm thick. The microslit panels can be digitally printed for graphics or signage, as seen in Figure 12.

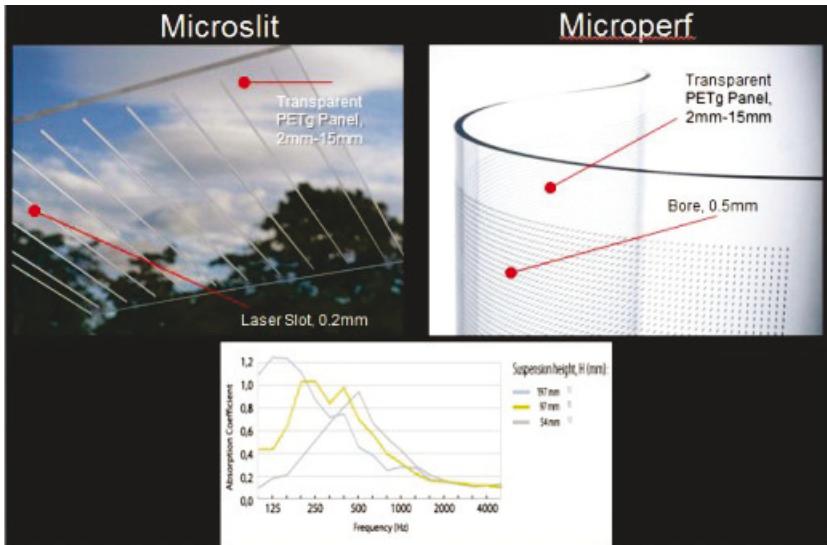


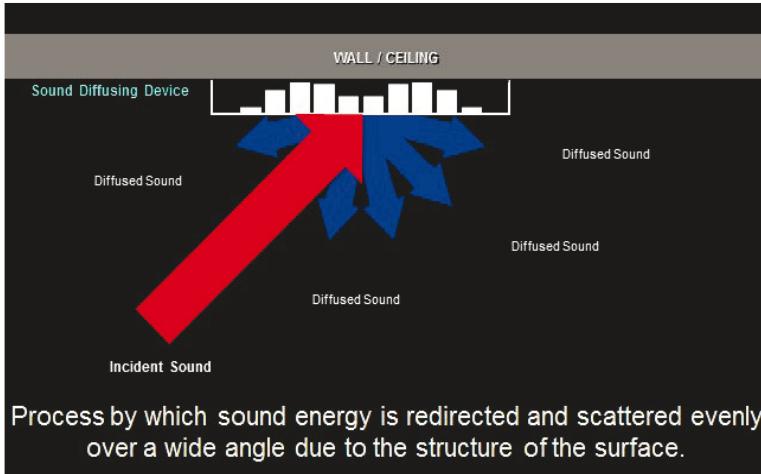
Figure 11. Microslit and microporf panels and their absorption.



Figure 12. Top left: transparent foil window treatment; Top right: translucent foil radiant ceiling treatment; Bottom left: transparent microslit panel window treatment; Bottom right: transparent microporf panel window treatment; Center: digitally printed microslit panel.

## DIFFUSION

Diffusion is a process by which incident sound energy is uniformly scattered, Figure 13. The earliest forms of diffusion consisted of classic architectural columns, statuary, relief ornamentation, etc.,



Process by which sound energy is redirected and scattered evenly over a wide angle due to the structure of the surface.

Figure 13. A ideal diffusor uniformly scatters incident sound from any angle of incidence over a broad range of frequencies.

Figure 14. As these classic forms disappeared from common use, geometrical forms were used to provide scattering. While providing useful scattering and classic beauty, the diffusion performance was not predictable and the bandwidth limited. In the early 1980s, RPG introduced the first reflection phase grating diffusors, based on mathematical number theory. These were the first diffusing surfaces that could be designed with predictable performance and scattered sound uniformly over a broad range of frequencies. These periodic surfaces consisted of either divided wells or raised blocks, whose relative depths or heights were specified by a mathematical sequence, like the quadratic or primitive root sequence, which insured that the sound was scattered uniformly in the diffraction directions, which is

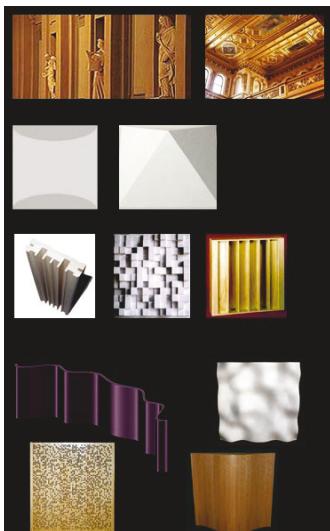


Figure 14. Diffusor surfaces including, top: early classic architecture forms; next: geometrical forms; next: number theoretic reflection phase gratings and bottom: 1D and 2D shape optimized forms and the BAD panel.

determined by the size of the repeat unit. Over the next 30 years, these gratings were optimized. As architecture moved from rectilinear to curvilinear forms, RPG created a shape optimization software to reverse engineer the surfaces to go from a design motif to optimized scattering performance. All of these surfaces are shown in Figure 14.

One might ask “why do we need diffusion”? The answer is illustrated in Figure 15. We are all familiar with air diffusers which provide uniform

temperature and prevent cold and hot zones. We are all familiar

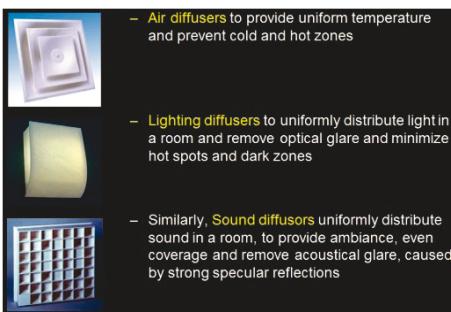


Figure 15. Air diffusers provide uniform temperature, lighting diffusers provide uniform illumination and sound diffusors provide uniform sound coverage and ambience.

While the design of spaces used for speech have relied

solely on absorption, it should be appreciated that an optimal design can only be achieved using an appropriate combination of each ingredient.

Sound absorption is measured in a reverberation chamber, according to ISO 354. Sound diffusion is measured in either an anechoic chamber or in a reflection free zone on the floor of a reverberant space, according to ISO 17497-2. Figure 16 shows the complex process necessary to determine the diffusion coefficient. In the center of Figure 16, we show a boundary plane goniometer with the sample at the center of a 1 m semicircle

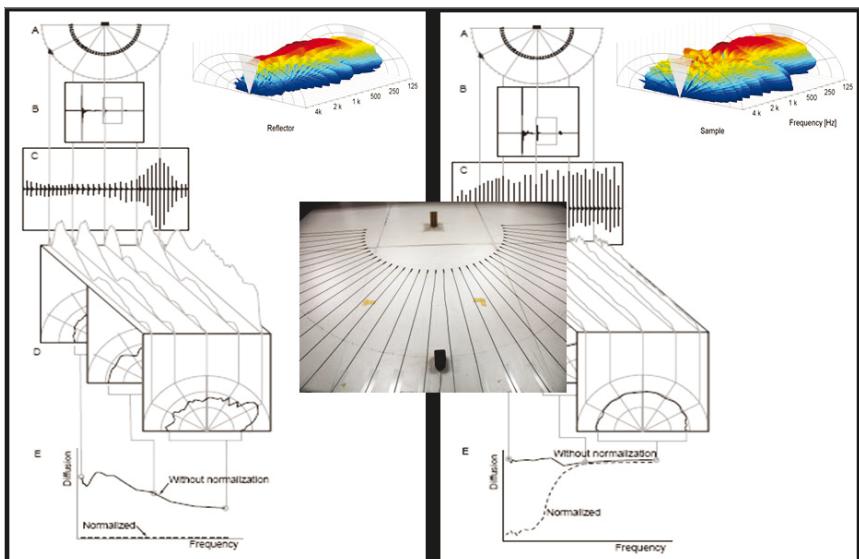


Figure 16. Center: 1D boundary method goniometer with the sample at the center of a 1 m semicircle containing 37 measurement microphones and a 2 m concentric circle containing the loudspeaker providing the test signal; Left: Data reduction process for a reference reflector; Right: Data reduction process for a diffusor. Note the diffusor exhibits a uniform polar response, whereas the reference reflector scatters the sound in a specular manner, like light from a mirror.

containing 37 mics every 5 degrees and a 2 m concentric circle containing the loudspeaker delivering the test stimulus. The sample is irradiated with a test signal at angles of incidence of 30, 60, 90, 120 and 150 degrees, and the impulse response at each observation angle is measured. In the left panel we show the measurement and data reduction for a reference reflector at an angle of incidence of 150 degrees (A). The impulse response of the scattered sound, at each observation angle, is isolated (B and C) and transformed into the frequency domain (D). Then third octave polar responses are calculated and the diffusion coefficient is determined (E) from the uniformity of the polar responses and normalized by the diffusion coefficient of the reference reflector. In the upper right hand corner, we show colored narrow band polar responses, from which the third octave band responses are derived. The right panel illustrates the same data reduction process for a diffusor. Note that the polar responses of the diffusor are close to being semicircles with uniform scattering, whereas the reflector exhibits specular behavior, wherein the scattered sound is directed at an equal and opposite angle to the incident direction.



Figure 17. Top row left to right: 2D Omnifusor and Skyline layin T-bar ceiling treatment; 2D Harmonics T-bar layin ceiling treatment; Oriented 1D Modffusor wall treatment. Bottom row left to right: 2D Bicubic ceiling clouds; Stretch fabric covered 2D BAD panels; Exposed wooden furniture grade BAD panels.

Diffusion can complement absorption and reflection with application on walls and ceilings as shown in a few installations in Figure 17, utilizing omnidirectional (2D) scatterers, in the form of Omnifusor, Skyline, Harmonics and Bicubic diffusors, as well as single plane (1D) Modffusors, oriented vertically and horizontally.

## ROOM DESIGN

Let us now apply the noise and sound control acoustic tools to the design of training rooms, conference and meeting rooms and lecture halls and presentation rooms, where high speech intelligibility is required, using the complete acoustical palette, instead of just absorption. What did you say? Can you hear me now? A good acoustical design mitigates the need for these questions.

The ear/brain processor can fill in a substantial amount of missing information in music, but requires more detailed information for understanding speech. The speech power is delivered in the vowels (a, e, i, o, u and sometimes y) which are predominantly in the frequency range of 250Hz to 500Hz. The speech intelligibility is delivered in the consonants (b, c, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, v, w), which requires information in the 2,000Hz to 4,000 Hz frequency range. People who suffer from noise induced hearing loss typically have a 4,000 Hz notch, which causes severe degradation of speech intelligibility.

Why would we want to absorb these important frequencies on the ceilings of speech rooms and prevent them from fusing with the direct sound, thereby making it louder and more intelligible?

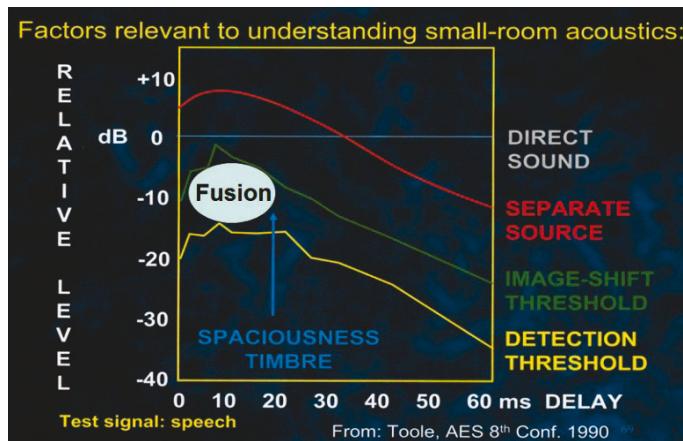


Figure 18. The temporal fusion region is shown in which the direct sound is made louder and more intelligible by including early reflections.

Research has revealed the importance of early reflections and reverberation to intelligibility. There is a difference in hearing speech and understanding it. When early reflections arrive between in a temporal window roughly 20 - 50 ms after the direct sound and roughly between 5 and 15 dB below the level of the direct sound, there is a process called temporal fusion in which the direct sound is fused with the early reflections making it louder and more intelligible. This is shown in Figure 18. So one of the central design criteria for small rooms used for speech is to provide early reflections and not absorb them!

Many of the problems that arise in poorly designed speech rooms stem from a low Signal to Noise Ratio. The Signal consists of the Direct Sound & Early Reflections (up to roughly 20 ms). The Noise consists of reverberation, occupant noise, exterior noise intrusion & noisy MEP systems. Adults typically require 0 dB signal-to-noise ratios for high speech intelligibility when listening to simple and familiar speech material for short periods of time. An additional 2 dB is needed to compensate for neurological

immaturity. An additional 5 dB is required to compensate for sensorineural and conductive hearing losses. An additional 5 dB is required for limited English proficiency and language disorders. An additional 3 dB is required to compensate for the effects of excessive reverberation. These additional requirements for speech rooms total 15 dB over that of normal adults, or a signal-to-noise ratio of +15 dB. We can use the passive acoustics of the architecture to provide some of this needed gain. Most design approaches only try to reduce the Noise and often simultaneously decrease the strength of the Signal as well, by using only absorption. The result is no net improvement. In Figure 19, we see the corrupting effect of reverberation noise on the purity of the



Figure 19. Top to Bottom: Anechoic speech (red), speech in a room with a reverberation time of 0.8 s; in a room with a reverberation time of 1.3 sec. and lastly in a room with a 2 sec reverberation time. The green noise is due to reverberation and corrupts speech intelligibility. Courtesy Mc Squared System Design Group, Inc.

speech signal. At the top in red, we see the anechoic speech signal waveform. Below that we see how the speech signal is progressively degraded with reverberation (green) in rooms with reverberation times of 0.8 sec, 1.3 sec and 2 sec.

The best approach is to decrease the Noise and simultaneously increase the Signal by providing:

- reflective areas surrounding the source to increase the apparent level
- absorptive areas around the perimeter of the ceiling to control the decay time
- useful, early, diffuse reflections from the center of the ceiling
- the combination of high frequency diffusing and mid frequency absorbing (diffusing) panels on the mid-third of the side and rear walls
- treatment to all surfaces minimizing absorption on the ceiling and floor and reflection on the wall
- isolation of the room from all internal and external sources of noise and HVAC

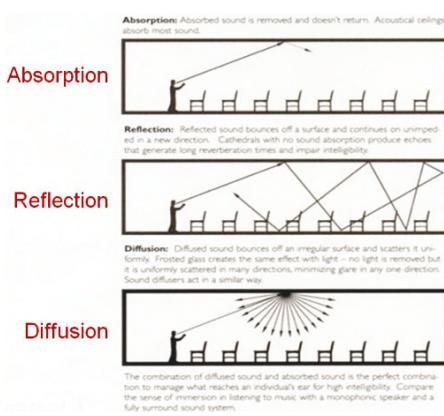


Figure 20. Illustration showing how absorption removes the beneficial early reflections from the ceiling, reflection redirects them and diffusion uniformly distributes them for greater coverage and intelligibility

Figure 20, illustrates the beneficial use of diffusion on the ceiling of speech rooms. Absorption removes these beneficial reflections, reflection redirects them, but only diffusion can uniformly distribute them providing better coverage, cross-communication between participants, and improving intelligibility.

In Figure 21, we compare the Sound Pressure Level and direction of arriving reflections at listeners with an acoustical ceiling tile and a diffusive ceiling. In Figure 21 top left, we see an SPL map at 2

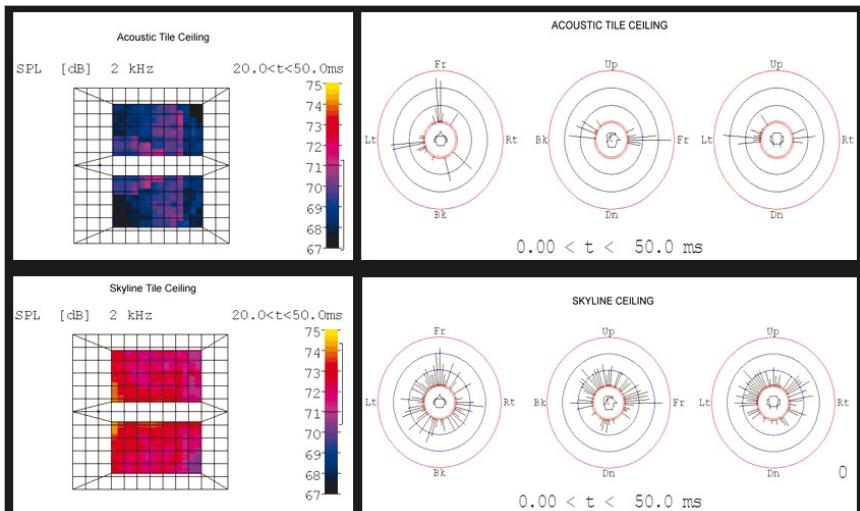


Figure 21. Top left: SPL in a room with an acoustical tile ceiling at 2 kHz between 20 and 50 ms; Top right: Arriving reflections at a listener in the horizontal and frontal and medial vertical planes. Bottom left: SPL in a room with a diffusive ceiling at 2 kHz between 20 and 50 ms; Bottom right: Arriving reflections at a listener in the horizontal and frontal and medial vertical planes. Red indicates higher SPL.

kHz from a source at the center left of the room in two seating areas of the room in a 20 - 50 ms time window. The average level is roughly 68 dB. In Figure 21 top right we show the direction of arriving reflections in a 0 - 50 ms window in the horizontal plane, in the medial plane bisecting the ears and in the frontal vertical plane including the two ears. In Figure 21 bottom left and right, we show the same SPL and reflection directionality when the ceiling is treated with a sound diffusor, as opposed to a sound absorber. It can be seen that the SPL level increases by nearly 6

dB and the sparse reflection pattern with the sound absorbing ceiling is now much more uniform and dense.

Before we provide a concept design, it is important to note that any acoustical treatment used should be uniformly distributed in the room. In many speech rooms absorption is typically the only treatment used and it is often concentrated on the ceiling and floor, with high frequency absorbing material like acoustical ceiling tile and carpeting. We call this the Single Plane Absorption Syndrome (SPAS). All of the absorption is concentrated in the vertical plane, which actually accentuates the potential flutter reflections in the horizontal plane which is purely reflective. This can be seen in Figure 22, in which a vertical sound ray is

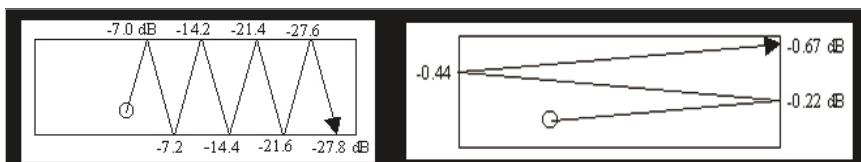


Figure 22. Single Plane Absorptive Syndrome. Sound in the vertical plane is attenuated by almost 30 dB from an absorptive ceiling, but hardly at all in the horizontal plane from reflective walls.

attenuated by almost 30 dB due to absorption, while a horizontal sound ray is hardly attenuated at all. This leads to a non-mixing sound field characterized by different reverberation times in the two planes and makes echoes and flutter more audible and problematic. This should be avoided.



Figure 23. Two typical rooms separated by a partition, but including common floor and ceiling.

and upper third of side and rear walls

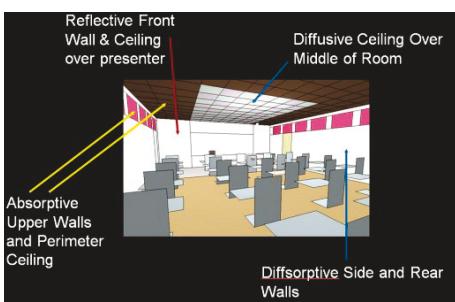


Figure 24. Concept design for a speech room.

In Figure 23, we show two typical office rooms separated by a partition. This design suffers from flanking paths from one side to the other through the common floor and ceiling. If high isolation and speech privacy is required, these rooms need a separate floor and ceiling, with the floors separated from the structure on resilient isolators.

In Figure 24, we present a concept design for a speech room consisting of a reflective front wall and ceiling above the presenter to amplify sound, even when the presenter turns away from the audience, absorptive ceiling perimeter to control the decay time, diffusive ceiling over the center of the room, diffusorptive surfaces on the mid third of the side and rear walls and reflective lower third of the side and rear walls. Now let's look at how typical designs can be improved.



Figure 25. Typical SPAS meeting room design, high frequency absorption on ceiling (ACT) and floor (carpeting) and no absorption on walls. Yellow rectangles indicate area for diffsoptive treatment.



Figure 26. Typical conference room with ACT, fabric wrapped panels on side walls and carpeting. Yellow rectangles indicate areas for diffsoptive treatment and red rectangle indicates area to add diffusion.

areas outlined in yellow. Replace the center of the ACT ceiling with 2D diffusion in the area outlined in red, leaving the perimeter ACT in place.

The first shown in Figure 25, is a classic example of a SPAS design, in which high frequency absorption is provided by ACT on the ceiling and carpeting on the floor. The solution consists of placing diffsoption on the mid-third of the wall area, shown in yellow, and adding 2D diffusion in the ceiling over the conference table, while maintaining the ACT around the perimeter.

In Figure 26, we show a typical conference room with ACT ceiling, hard reflective soffits, fiberglass panels on side walls and carpeting; essentially all high frequency absorption making the room acoustically “dead”. There is little chance that the speaker can be heard in the rear of the room due to this. This room can be improved by replacing the purely absorptive fabric wrapped panels on the side walls with diffsoptive panels in the areas outlined in yellow. Replace the center of the ACT ceiling with 2D diffusion in the area outlined in red, leaving the perimeter ACT in place.



Figure 27. Typical SPAS presentation room, with ACT ceiling and carpeted floor. Suggested reflective, diffusive and absorptive treatment areas are outlined in blue, yellow and red.

should be replaced with 2D diffusing elements, maintaining the perimeter ACT for reverberation control. The mid third area of the side walls should be covered with diffusive panels, indicated in yellow rectangles. Lastly, the mid third of the rear wall should be covered with 2D diffusors or diffusive panels if the last seat is less than 5' of the rear wall. This will provide additional support for speech in the rear of the room.

## **CONCLUSION**

We have identified that good acoustical design of speech rooms requires noise and sound control. Noise control involves isolation of external and internal noise sources, providing sufficiently massive and resiliently mounted room boundaries, isolation of all MEP systems, removal of flanking paths from a common floor, ceiling and HVAC ducts. Noise control products were presented and described. Sound control involves creation of a good acoustical environment providing a high signal to noise ratio. The signal is increased by providing reflective areas around the speaker on the front wall and ceiling directly overhead. The signal

In Figure 27, we show a typical presentation room with a SPAS design of ACT on the ceiling and carpeting on the floor with reflective walls. This leads to poor propagation of sound to the rear of the room. This room can be improved by maintaining the reflective front wall, but making the ceiling over the presenter reflective as well. This area is outlined in blue. The center ACT ceiling, outlined in red,

is further increased by providing early diffuse reflections, using 2D sound diffusors, on the central ceiling area and diffusorptive panels on the mid-third of the side and rear walls. The reverberation is decreased using absorption around the perimeter ceiling of the room and upper third of the side and rear walls. Absorptive and diffusive products were presented and described. In summary, speech rooms with high intelligibility can be created using all ingredients of the acoustical palette, namely, absorption, reflection, diffusion and isolation.

# Kommunikation in Blickgeschwindigkeit- Offene Arbeitswelten als Herausforderung

*W. Eitel*

Vollack archiTec GmbH & Co. KG

*Kontakt: info@vollack.de*

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

Ihr Erscheinen auf dem Symposium Büro/ Raum/ Akustik 2011 zeigt Ihr Interesse an diesem Thema. Es ist gut, dass dieses Symposium zum 2. Mal hier stattfindet und beweist aufs Neue, wie wichtig es ist, sich der Komplexität des Themas Büroarbeitswelten auch über das Zusammenspiel der technischen Raumkonditionen zu nähern.

Doch was passiert denn eigentlich, wenn wir immer mehr in technische Lösungen investieren und unsere Räume mit immer noch besseren Materialien ausstatten um noch besser, noch effektiver arbeiten zu können und trotz dieser Technik und besseren Materialien nicht die Akzeptanz erreichen, die wir im Grunde genommen erwarten dürfen?

Ich möchte mit meinem Vortrag einen etwas anderen Blickwinkel zu diesem Thema einnehmen und dies auf Basis von Erfahrungen, die Sie vielleicht auch aus anderen Bereichen kennen. Wenn Sie auf der Emotionsebene keine Übereinstimmung erzielen, dann können Sie auf der Sachebene immer noch mehr Argumente hinzufügen, es wird Ihnen nicht gelingen, die erwartete Akzeptanz in der Sache zu erreichen.

Ich habe meinen Vortrag „Kommunikation in Blickgeschwindigkeit“ genannt, da ich der Meinung bin, dass dies die Komplexität

unserer heutigen Arbeitswelt hervorragend beschreibt und ich möchte Ihnen in den nächsten Minuten erläutern, weshalb es für uns in heutiger Zeit immer noch so schwierig ist, offene respektive Arbeitswelten zu akzeptieren - weshalb es immer noch eine Herausforderung ist, sich diesem Thema zu nähern. Ich habe zudem ein Beispiel mitgebracht, von dem ich überzeugt bin, dass dies eine von sicherlich mehreren Möglichkeiten sein kann, wie wir in der Zukunft bessere Ergebnisse in der Umsetzung akzeptierter Arbeitswelten erzielen können.

Doch blicken wir zunächst zurück ins Jahr 1975. (Abbildung 1) Sie erinnern sich vielleicht: So sahen damals unsere Autobahnen aus.



Abbildung 1



Abbildung 2

Wir hatten eine Größenordnung von knapp 18 Millionen zugelassenen Fahrzeugen. Das Bild zeigt, wie herrlich frei man sich noch auf diesen Autobahnen bewegen konnte. Die folgende Abbildung (Abbildung 2) ist übrigens keine Schleichwerbung für BMW, es könnte auch eine andere Automarke sein.



Abbildung 3



Abbildung 4



Abbildung 5

So sahen damals die Autos aus (Abbildung 3); das Armaturenbrett war übersichtlich gestaltet und die sogenannten Fahrassistenzsysteme waren entsprechend der Verkehrsdichte noch relativ gering entwickelt.

Das bedeutet, die Automobilindustrie stellte uns die Technik zur Verfügung, die wir zu dieser Zeit benötigten, um uns im damaligen Verkehr möglichst sicher zu bewegen.

Zurück ins Jahr 2011 (Abbildung 4): Viele kennen dies täglich oder zumindest sehr häufig – so sehen unsere Autobahnen heute aus. Wir haben im Moment über 42 Millionen zugelassene Fahrzeuge in Deutschland und eine dramatische Zunahme der Komplexität im Straßenverkehr. Das aktuelle Folgemodell von BMW (Abbildung 5) erkennen Sie hier;



Abbildung 6



Abbildung 7

bei schönem Wetter ihre Sammlerstücke ausführen.

Gehen wir wieder ins Jahr 1975 oder zumindest einmal 30-35 Jahre zurück. Unsere Arbeitswelt war stark dominiert von analogen Arbeitsabläufen (Abbildung 8); noch war der Einzelne gefordert, seine Arbeitsergebnisse selbst zu erbringen. Das Zeitalter des Computers hatte begonnen, die Arbeitsergebnisse bereits dramatisch zu beschleunigen. Die Büroräume waren für diese analoge Welt gestaltet - die Arbeitsplätze weitestgehend als Zellenbüros für Einzel- bzw. Doppelarbeitsplätze angelegt. Auch die Unternehmen waren noch stark hierarchisch strukturiert, die

das Armaturenbrett gleicht einem Cockpit (Abbildung 6) und wenn Sie die Ausstattungsliste (Abbildung 7) dieses Fahrzeuge komplett ausreizen und über ein entsprechendes Portemonnaie verfügen, dann haben sie alle Möglichkeiten an Fahrassistenzsystemen, um mit Hightech dieser Komplexität im Straßenverkehr zu begegnen. Kein Mensch würde heute auf die Idee kommen, mit Fahrzeugen der damaligen Technik sich dauerhaft und täglich dem heutigen Verkehr auszusetzen. Dies findet maximal als Hobby an Wochenenden statt, wo Liebhaber dieser Automobile

Aufträge wurden „Hölzchen auf Stöckchen“ einzeln nacheinander bearbeitet.

Ein Zeitsprung in unsere Zeit (Abbildung 9): Ähnlich der

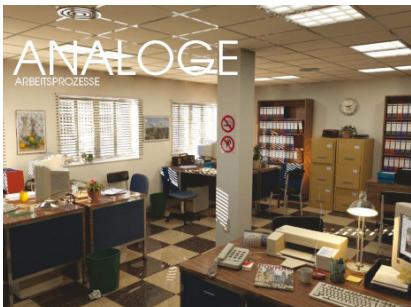


Abbildung 8



Abbildung 9

Komplexitätszunahme im Straßenverkehr haben wir es heute zu tun mit einer dramatischen Zunahme der Komplexität im Bereich unserer Arbeitswelten und es ist sicherlich nicht bestreitbar, dass es nur noch wenige Arbeitsbereiche gibt, in denen ein Einzelner seine Aufgaben im Grunde genommen noch alleine respektive erfüllen kann. Ansonsten sind wir alle lediglich in der Lage, in der verfügbaren Zeit – und Zeit ist heute kein Faktor mehr – sozusagen in Blickgeschwindigkeit Aufgabenstellungen im Team zu lösen, natürlich mit Unterstützung unserer IT und des Internets. Wenn wir jedoch im Team antreten, um anstehende Aufgaben gemeinsam zu lösen, dann kann es nicht mehr richtig sein, dass wir noch immer die gleichen Räume bauen wie zu Zeiten unserer Väter und der analogen Arbeitsprozesse in Einzelbüros. Es helfen uns auch keine philosophischen Diskussionen, ob Großraum, Kombibüro oder Einzelbüro die richtige Raumform sind. Entscheidend für die Qualität der Zusammenarbeit im Team ist jedoch die Kommunikation und so müssen wir Räume entwickeln, die die Kommunikation im Team fördern und nicht behindert. Da dies von Aufgabenstellung zu Aufgabenstellung unterschiedlich sein kann, darf die Lösung nicht im Gießkannenprinzip über die

gesamte Unternehmung angewandt werden, sondern es muss sensibel und kritisch überprüft werden, was der Einzelne oder das jeweilige Team benötigt, um die Arbeitsanforderungen



Abbildung 10

effizient und entsprechend auch mit Spaß und Konzentration bis zum Arbeitsende absolvieren zu können.

Weshalb tun wir uns immer noch so schwer, diese entsprechenden Räume zu entwickeln bzw. sie auch zu akzeptieren? (Abbildung 10)

Nun bewegen wir uns auf einer Ebene, die nichts mehr zu tun hat - so wichtig Raumakustik, Licht und Raumatmosphäre auch sein mögen – mit technischen Parametern, sondern wir haben es zu tun mit einer tief sitzenden emotionalen Bindung in Verbindung mit Raum und Raumgröße. Historisch betrachtet, finden sich große Bürostrukturen, die sich in den vergangenen



Abbildung 11

30-40 Jahren entwickelt haben in großen hierarchisch strukturierten Organisationen wie Banken, Versicherungen aber auch Arbeitsämtern und Ähnlichem.

In diesen Organisationen - ich glaube das ist vielen nicht bewusst - ist Raum ein Statussymbol (Abbildung 11) und sichtbares Zeichen für den Rang und die Karriere innerhalb des Unternehmens.



Abbildung 12

Aktuelles Beispiel einer Versicherung (Abbildung 12): 1 Sachbearbeiter teilt sich mit seinem Kollegen einen Büraum für 2 Arbeitsplätze. Das sind 3 Fensterachsen, also 1,5 Fensterachsen je Sachbearbeiter. Wird er zum Gruppen- oder Abteilungsleiter befördert, steht ihm ein Einzelbüro zu

in einer Raubreite von 2 Fensterachsen. Als Abteilungsdirektor erhält er 3 Fensterachsen und als Vorstand schließlich 4 Fensterachsen. So wächst nicht nur Fassadenfläche, sondern auch Raumgröße, Raumausstattung bis hin zur Wand-/Türqualität. Wir haben ganze Generationen von Bürogebäuden entwickelt, die auf Basis einer gerasterten Struktur eine flexible Raumeinteilung ermöglichen. Dazu musste eine Trennwand an jeder Fensterachse anschließen können. Ohne architektonischen Anspruch ergaben sich so uniforme, austauschbare Bürogebäude, die sich jeweils nur noch in Frage der Fassadenmaterialien und Gebäudeausdehnung unterscheiden. Aufbauend auf den unterschiedlichen Rasterphilosophien der vergangenen Jahrzehnte von 1,20 m, 1,25 m und dem heute aktuellen 1,35 m – Raster hat sich jeweils die Industrie des gesamten Innenausbau entscheidend ausgerichtet. Aus diesen Erfordernissen entwickelten sich in den letzten Jahrzehnten entsprechend modular gerasterte abgehängte Decken, Einbauleuchten usw.

Und jetzt - stellen Sie sich bitte vor - reden wir plötzlich über neue Erfordernisse in unserer Arbeitswelt und der Zusammenarbeit im Team. Plötzlich sprechen wir davon, dass Wände möglicherweise unsere Arbeit behindern und die erforderliche Kommunikation erschweren. Wenn wir beginnen, auf

Grund dieser Erkenntnisse Wände zu verschieben oder sogar wegzulassen ohne den Mehrwert aufzuzeigen, dann haben wir nicht nur ein technisches, sondern ein viel gravierenderes emotionales Problem.

Denn demjenigen, der jahrelang darauf hin gearbeitet hat, Karriere zu machen um auch einmal ein Einzelbüro mit mehreren Fensterachsen zu besitzen, dem nehmen Sie zunächst einmal etwas weg. Er oder Sie verliert zunächst sichtbar seine Stellung im Unternehmen. Ohne ein Aufzeigen des Mehrwerts dieser Veränderung, ohne einen Changemanagement – Prozess, der Betroffene zu Beteiligten macht, wird immer der negative Eindruck überwiegen mit dem Gefühl, etwas verloren zu haben.



Abbildung 13

Ein weiterer wichtiger Aspekt (Abbildung 13): Je größer diese Organisationen waren und sind, je uniformer die Büroräume, desto mehr existiert ein Bedürfnis nach Privatsphäre am Arbeitsplatz – sozusagen als letzter Rückzugsbereich. Das klassische Zellenbüro scheint bis heute für viele die geeignete Raumform zu

sein, diesem Bedürfnis nach Privatsphäre nachzukommen. Privatsphäre am Arbeitsplatz spielt generell in der öffentlichen Diskussion auch heute nur eine untergeordnete Rolle. Man belächelt die Inhalte der gesammelten Ü-Eier an den Arbeitsplätzen; man belächelt die kleinen Nesselpflanzen, die liebevoll gepflegt dem Arbeitsplatz einen zusätzlichen persönlichen Fingerabdruck verleihen.

Natürlich kann die persönliche Ausgestaltung des Arbeitsplatzes nur innerhalb vereinbarter Leitplanken geschehen. Dies passiert normalerweise im Rahmen der vereinbarten Spielregeln und



Abbildung 14

innerhalb der jeweiligen Unternehmenskultur. Wenn dies nicht geschieht, bzw. wenn sich solche Schutzräume nicht anders darstellen lassen, dann geschieht, was Sie auf diesem Bild erkennen können. Der Mensch baut sich Burgen, baut sich ein privates Wohnzimmer (Abbildung 14). Sie finden

hier alles, was Sie auch zu Hause haben. Doch dies ist Ausdruck zutiefst menschlicher Bedürfnisse. Wenn wir diese nicht ernst nehmen, werden wir in der Akzeptanz veränderter Arbeitswelten immer wieder scheitern. Wir können noch so innovative technische Akustiklösungen und Absorbersysteme an Decken und Wände montieren, wir können noch so viele Möbel akustisch aktivieren, wenn wir auf der emotionalen Ebene die genannten Themen nicht berücksichtigen, werden wir weiterhin zu Recht auf Verweigerungshaltungen stoßen.



Abbildung 15

Unwort Großraumbüro (Abbildung 15): Kaum das sie 3-4 Arbeitsplätze in einem Raum anordnen, sofort läuten alle Alarmglocken und der persönliche Abwehrmechanismus beginnt zu wirken. Das Wort Großraumbüro ist aus der Vergangenheit extrem negativ geprägt. Dabei hat jeder bei diesem Thema seine eigenen Vorstellungen



Abbildung 16

Flächenoptimierung war hierbei die Triebfeder. Kein Wunder,



Abbildung 17,18,19

dass wir uns bei diesen Wabenstrukturen als Massenarbeitsplätze an die Privatsphäre keinen Gedanken verschwenden müssen. (Abbildung 17) Die Amerikaner haben es uns damals zunächst vorgelebt mit ihren wirklich großen Großraumbüros. Dort saßen zum Teil Hunderte von Menschen dicht gedrängt. Auch die Behaglichkeits-Parameter wie Raumakustik, Sichtschutz und Ergonomie waren nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. (Abbildung 18)

Das gleiche gilt für die technischen Behaglichkeitskriterien, also staubfreie Heizung, zugfreie Klimatisierung, Luftqualität, blendfreie Beleuchtung etc. Damit hatten diese Arbeitswelten herzlich wenig zu tun. Und sicherlich wurden diese Mitarbeiter auf

von diesem „Großraum“; richtig ist, dass es in der Vergangenheit überwiegend schlecht umgesetzt wurde (Abbildung 16).

Unter dem Primat der Wirtschaftlichkeit wurden die Büroflächen optimiert. Nicht zur Verbesserung der Zusammenarbeit oder zum Wohle des Einzelnen. Alleinig die

dem Weg zu diesen neuen Arbeitsformen auch nicht beteiligt respektive mitgenommen (Abbildung 19).



Abbildung 20



Abbildung 21



Abbildung 22

Einige Schlaglichter auf Bürowelten in 2011 (Abbildungen 20-22): Dies sind keine Archivbilder - wir haben es auch heute immer noch mit einer großen Anzahl von Gebäuden zu tun, die aus der Zeit der sogenannten Großraumbüros stammen. Große

Versicherungskonzerne, Krankenkassen und Energieversorger haben häufig immer noch diese Strukturen. Zudem lassen sich die Gebäude auf Grund ihrer großen Gebäudetiefen nur schwer in andere Büroformen bringen.

Was den Mitarbeitern dieser Gebäude weit über 30 Jahre blieb: Sie haben begonnen,

Wagenburgen zu bauen, um den vorgenannten Bedürfnissen Rechnung zu tragen und den eigenen Arbeitsplatz in irgendeiner Form abzuschotten – ihn ein wenig angenehmer bzw. individueller zu gestalten.

Zum Teil wurden diese Gebäude recht hochwertig

gebaut, doch das was beim einzelnen Mitarbeiter ankam, erzeugte dieses Schutzbedürfnis und zeigte deutlich die Themen, die nicht oder nur unzulänglich berücksichtigt waren. Überall dort, wo man sich mit Stellwänden nicht weiter abschotten konnte, wurden Pflanzen als grüne Wände eingesetzt. Hauptsache aus dem Blickfeld der Öffentlichkeit. Dadurch wurden diese flächeneffizienten Strukturen im Nachhinein logischerweise ineffizient, da es durch die unterschiedlichsten Verkehrswege um die Stellwände der Arbeitsplätze zu teilweisen Doppelungen der Wegeführungen kam.



Abbildung 23

Das Gros deutscher innerstädtischer Mietstrukturen sieht jedoch ein wenig anders aus. Nicht die soeben beschriebenen Großraumbüros, sondern Flächenangebote, in einer Melange aus Einzelbüros und undefinierten Raumgrößen, die keine zusammenhängende Arbeitswelten zulassen. Hier

reglementieren die vorhandene Tragstruktur und die Belichtungsverhältnisse die Besiedelung. Diese Mietobjekte lassen sich häufig nur schwer auf die individuellen Bedürfnisse der Arbeitsplätze ausrichten.

Solche Räume sind eben in irgendeiner Form besiedelt, doch mit Arbeitsplatzqualität hat dies natürlich nichts zu tun. Sie sehen ein aktuelles Beispiel mitten in München im August 2011 und auch die rote Wandfarbe (Abbildung 23) macht das Ganze nicht viel besser.

Sicherlich haben wir zwischenzeitlich mit unseren Möbelsystemen weiterentwickelte Lösungen zur 3. Arbeitsebene, intelligenten Stauraumkonzepten und Möglichkeiten von Steharbeitsplätzen. Auch in Kombibüros schaffen wir mit Glaswänden Transparenz

am Arbeitsplatz, doch diese Ansätze basieren auf Produktebene und viel zu wenig auf Basis von Mitarbeiterbeteiligungen (Abbildung 24).



Abbildung 24

dieser Beispiele noch zu gering und auch in der Öffentlichkeit als Meinungsbildner zu wenig bekannt.

Es wurde bereits angesprochen: Natürlich schafft die Generation Y das, womit wir als die Generation davor uns noch schwer tun.



Abbildung 25

wie Auto, Stellenwert des Gehalts und andere Ansprüche an Arbeitsplatz, Arbeitsumgebung, Community und Zusammenarbeit.

Natürlich finden wir vereinzelt durchaus Bürogebäude – hier ein Backoffice-Gebäude einer Bank (Abbildung 25) – die bereits als gute Beispiele dienen und mit ihrer Besiedelung sowie der Beteiligung der Mitarbeiter am Entwicklungsprozess als richtungsweisend gelten.

Doch leider ist die Zahl

Generation Y – genannt als die Generation der zukünftigen Mitarbeiter im Alter der 20 bis 25 jährigen – die jetzt langsam ins Arbeitsleben kommen, geht völlig anders um mit Kommunikation und social medias. Diese Generation hat ein völlig anderes Selbstverständnis auch in Bezug auf Statussymbole

Dieses Bild (Abbildung 26) zeigt das Loft einer Fitness-Gruppe in Berlin. Dies sind völlig andere Räume und sieht auch ein wenig



Abbildung 26

anders aus, als das, was wir in unserer klassischen Büroarbeitswelt kennen. Die Mitarbeiter dieses Unternehmens möchten bewusst anders arbeiten und zusammenarbeiten; hier sehen sie cubicals (Abbildung 27) in denen sowohl Pause gemacht werden kann als auch ein meeting abgehalten wird. Die Arbeit wird anders erledigt und die Bürolandschaft unterstützt eine stark individuelle Arbeitsweise. Diese ungewöhnliche Art der Bürolandschaften haben Sie zumindest bei Google, Ebay und ähnlichen Unternehmen schon einmal gesehen. Diese Arbeitswelt trägt in ihrer Ausgestaltung beinahe plakativ das vorhin genannte



Abbildung 27

veränderte Kommunikationsbedürfnis dieser jüngeren Generation Rechnung. Doch nicht jeder ist Microsoft und wie gehen wir dann damit um?

Wenn wir also festhalten, dass letztendlich - bis auf einige wenige Ausnahmen - die Komplexität unserer heutigen Arbeitswelt nur im Team vernünftig gelöst werden kann, wenn Teamarbeit eine entscheidende Rolle spielt, dann ist hierfür die Qualität der Kommunikation das höchste Gut und Maß der Dinge. Unsere Aufgabe besteht folglich darin, Räume zu schaffen, die diese

Kommunikation fördern und nicht behindern. (Abbildungen 28-30)



Abbildung 28



Abbildung 29

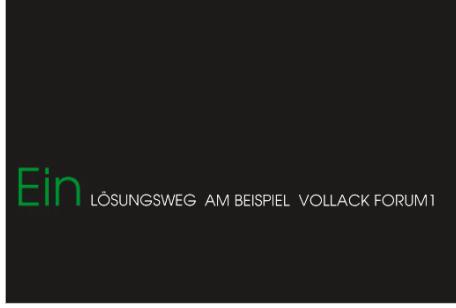


Abbildung 30

Einen Lösungsweg habe ich Ihnen mitgebracht - hier geht es eben nicht nur um das Ergebnis der Architektur. Wir Architekten neigen dazu, schnell das Ergebnis zu zeigen, doch ich denke, es ist ebenso wichtig, auch den Prozess bis zum erreichten Ergebnis aufzuzeigen. Ein Weg ist, Betroffene zu Beteiligten zu machen und deren Bedürfnisse in die Konzeption zu integrieren. Dies ist sicherlich nicht immer möglich, denn je weiter wir als Planer von den späteren Nutzern entfernt sind bis hin zu Mietimmobilien, bei denen spätere Nutzer noch nicht bekannt sind, je weniger individuell können die Raumangebote entwickelt werden und zur späteren Zufriedenheit beitragen.

Ich zeige Ihnen hier das Forum 1 - Headquarter der Vollack Gruppe in Karlsruhe (Abbildung 31). Für diejenigen die die Vollack - Gruppe nicht kennen: Wir sind eine Baudienstleistungs-Organisation mit Sitz in Karlsruhe und einer Größe ca. 300 Mitarbeitern, davon ca. 150 Architekten und Ingenieure. Wir arbeiten mit Schwerpunkt in Deutschland, aber auch in den benachbarten europäischen Ländern.

Unser Dienstleistungsportfolio ist breit gefächert und erfolgt über dezentrale, selbständige Gesellschaften. Sämtliche Dienstleistungen rund um das Thema Bauinvestitionen im gewerblichen Bereich sind über unsere Gesellschaften abgedeckt. Wir sind ebenso Investor wie auch Createur; wir konzipieren, planen und realisieren die Projekte mit und für unsere Kunden – im Schwerpunkt familiengeführte mittelständische Unternehmen. Dafür haben wir eine Methodik entwickelt und auch schützen lassen, Bauinvestitionen auf die unternehmerische Zukunft unserer Bauherrn auszurichten und abzusichern (Vollack Methode).

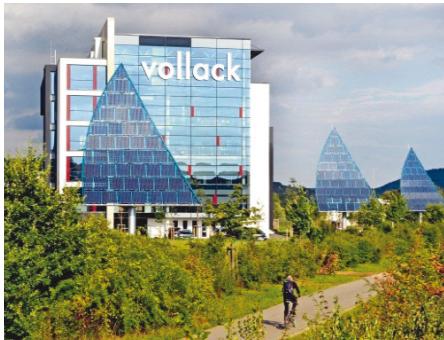


Abbildung 31



Abbildung 32

Hier sehen Sie den Standort im Karlsruher Rheinhafen (Abbildung 32), bevor wir diesen Platz verließen. Mit gelbem Kreis habe ich das ca. 25.000 qm Grundstück markiert. In unserer sogenannten „Culturwerkstatt“ arbeiteten ca. 120 Mitarbeiter in 6

Gesellschaften. Sie sehen auch die industrielle Großanlage unseres Nachbarn ENBW. Dieser Energieversorger hat für ca. 1 Milliarde Euro sein Kohlekraftwerk vergrößert und war höchst interessiert an unserem Grundstück. Wir haben diese - für uns historische - Chance genutzt, an einem neuen Standort alles nochmals neu zu denken und weiter zu entwickeln.

In der Regel haben Sie bei Ihrem täglichen Arbeitspensum nicht die Möglichkeit, derart umfassend kritisch mit sich selbst umzugehen. Nach dem Motto „man wirkt immer“ war es uns wichtig, dass der Neubau durch seine Architektur ein authentisches Abbild unserer Unternehmenskultur darstellt (Abbildung 33). Weiterhin war die Prämisse für unsere Mitarbeiter



Abbildung 33

höchste Arbeitsqualitäten zu schaffen. Dabei sollte diese Arbeitswelt nicht nur ein Maßanzug für uns, sondern auch gleichzeitig in der Lage sein, unseren Bauherrn aufzuzeigen, wie wir deren größte Probleme bei der Konzeption von Büroarbeitsplätzen – und glauben Sie mir, es sind nahezu immer dieselben –

wie Stauraum, Arbeitsplatzverkabelung, Beleuchtung, Blendschutz, Raumakustik, die klassischen Themen der Heizung, Kühlung, Belüftung usw., dass diese Punkte modellhaft gelöst werden.

Ein weiteres Thema - eines eigenen Vortrags wert - ist die Frage nach den zukünftigen Talenten, nach unseren zukünftigen Mitarbeitern. Wie attraktiv muss ein Arbeitgeber zukünftig sein – Stichwort Arbeitgebermarke - um in diesem, auch als „war of talents“ beschriebenen, Wettstreit um die besten Mitarbeiter zukünftig zu den Gewinnern zu gehören. Dabei zeigen uns eine Vielzahl von Studien die zunehmende Wichtigkeit des

Arbeitsumfeldes und die Attraktivität des Arbeitsplatzes, deutlich vor Gehalt und Position.

Ein Gebäude ist mit seiner Architektur auch ein markenbildendes Element und wir vertreten die Philosophie, dass jedes Gebäude eine Botschaft haben sollte - nach Außen und nach Innen. Nach außen zu den Kunden in Bezug eines durchgängigen Unternehmensauftritts und nach Innen in Bezug auf eine erlebbare Unternehmenskultur für die Mitarbeiter.

Unsere Arbeitsweise: Wir arbeiten in Projektteams auf Zeit in interdisziplinärer Zusammensetzung. So ein Team besteht aus Architekten, Bauingenieuren, Projektkaufleuten, Energieingenieuren – sogenannte Effizienzmanager – die speziell für ein Projekt zusammengestellt werden und sich nach Fertigstellung für ein folgendes Bauvorhaben neu konstellieren. Insofern war es wichtig, dass diese Team-Arbeitsplätze auch die notwendige Zusammenarbeit ermöglichen. Als Vorbild haben wir deshalb den Boxenstopp in der Formel 1 identifiziert. Man sieht bei diesem Beispiel sehr gut, wie jeder an der gemeinsamen Aufgabenstellung – natürlich unter Zeitkondition - seine Funktion simultan wahrnimmt: Der eine tankt, der nächste bockt das Fahrzeug hoch, der andere wechselt Reifen, das heißt jeder ist sein eigenen Chef in seinem Verantwortungsbereich. Dies erfordert flache Hierarchien im Unternehmen und muss über die Unternehmenskultur verankert sein, sonst funktioniert dies natürlich nicht.

Und so sehen unsere benches und unsere Arbeitsplätze aus, das bedeutet große Tische. Bevor wir das richtige Möbel gefunden hatten, haben wir dies sozusagen mit Bordwerkzeugen und unseren vorhandenen Möbelsystemen zusammengestellt. Größtenteils nicht besonders ideal zumal die normalen Tische über die Tischbeine immer eine Skalierung darstellen und durch diese Begrenzung die Arbeitsplätze nicht flexibel besetzen werden konnten. Doch wir haben ein System gefunden.

Mit diesem System haben wir unsere benches gestaltet. Und wir haben damit auch einen Paradigmenwechsel vollzogen: Vor dem Hintergrund, dass unsere Projekt-teams nach Fertigstellung des Bauvorhabens in neuer Konstellation in anderen Teams und an anderen benches weiterarbeiten, hatten wir lange Zeit die Philosophie, dass alle Möbel auf Rollen sein mussten, um dieser Flexibilität gerecht zu werden. Dies führte jedoch dazu, dass es bei uns ständig aussah wie kurz vor oder kurz nach einem Umzug. Wir konnten keine qualifizierte Verkabelung vornehmen und man war leicht geneigt, Arbeitsplätze noch in Bereichen anzuordnen, die für qualifiziertes Arbeiten – sei es in Bezug auf das Sitzen an Hauptlaufwegen, sei es auf Grund suboptimaler Ausrichtung des Bildschirms zum Tageslichteinfall - nicht geeignet waren. Wir nahmen dies bei unseren eigenen Arbeitsplätzen in Kauf mit dem Wissen, dass dies keinen Modellcharakter für unsere Kunden besaß. Wie wir diesen angesprochenen Paradigmenwechsel vornahmen will ich Ihnen nun folgend erläutern.

Ich habe vorhin davon gesprochen, wie wichtig es für uns ist, dass wir nicht nur auf der technischen, sprich der Sachebene uns bewegen, sondern auch auf der emotionalen Ebene Betroffene zu Beteiligten machen und die Mitarbeiter bei den anstehenden Veränderungen einbeziehen. Unser USP - unser Alleinstellungsmerkmal - ist die sogenannte „Phase NULL<sup>®</sup>“, ist Teil unserer Methodik im Entwickeln zukunftsorientierter Gewerbeimmobilien und zugleich erster Baustein in der qualifizierten Klärung der Bauaufgabe. Die HOAI, Honorarordnung für Architekten und Ingenieure beginnt mit der Leistungsphase I - Grundlagenermittlung - und wir haben uns durchaus provokant vor über 15 Jahren die Frage gestellt - wenn ein Architekt, ein Planer die Aufgabenstellung nicht verstanden hat, wie soll er denn die entsprechenden Grundlagen ermitteln? Dies war die Geburtsstunde unserer Phase NULL<sup>®</sup>.

Deshalb ist dieser Workshop eine existenzielle Grundlage, bevor man überhaupt ins Arbeiten kommt und in der Phase I gemäß HOAI die Grundlagen ermittelt. Diese Phase NULL® führen wir nicht alleine durch; wir machen sie gemeinsam mit unseren Bauherrn und seinem Führungsteam. In diesem Workshop-Format erarbeiten wir nicht das, was der Bauherr will, sondern fördern zu Tage, was er zukünftig braucht.

Dieses methodische Instrument haben wir natürlich auch für uns



Abbildung 34

angewendet (Abbildung 34). Sie sehen im grün gekennzeichneten Feld den Startworkshop mit Führungskräften aus allen Gesellschaften am Standort in Bezug auf die grundsätzliche Aufgabenstellung. Dann folgend und Prozess begleitend die Präzisierung der Aufgabe in zahlreichen

Workshops mit den unterschiedlichen Arbeitsbereiche, die wir im Hause haben. Denn unsere Erkenntnis lautet: Büroarbeit ist nicht gleich Büroarbeit. So gilt es, die Besonderheiten der Arbeitsweise und die Bedürfnisse in den Partnerteams, im Baumanagement, in der Holding usw. zu hinterfragen und zu erarbeiten, was der einzelne Mitarbeiter zukünftig benötigt, um an seinem Arbeitsplatz optimal arbeiten zu können.

Ein wichtiger und heutzutage entscheidender Beitrag zu umweltverträglichen Technologien ist der Einsatz regenerativer Energien. Dies ist nicht nur ein Zeichen von gesellschaftlicher Verantwortung, es ist auch die Grundlage für niedrige Betriebs- und Folgekosten. Die Grundlast für Heizen und Kühlen übernehmen 20 Erdsonden mit einer Tiefe von 140 m und

ermöglichen die Aktivierung der Betondecken. Wenn wir höchsten Behaglichkeitskriterien sprechen, so reden wir nicht nur von einer Heizung, sondern meinen eine staubfreie Heizung und wenn wir über Kühlung reden, dann sprechen wir nicht nur von Kühlung, sondern wir meinen zugfreie Kühlung.

Bei der Frage eines Wohlfühlklimas am Arbeitsplatz spielt die Raumakustik eine ganz entscheidende Rolle. Doch zugleich muss man festhalten, dass die Bewertung in laut oder leise, störend oder nicht, eben nicht nur eine objektive, technische Komponente besitzt, sondern auch eine extrem subjektive, stimmungsabhängige und persönliche Einschätzung ist. Zudem spielt die Raumakustik häufig nicht die alleinige Rolle, sondern sie ist zugegebenermaßen ein wichtiges Instrument in einem Orchester vielfältiger Raumkonditionen.

Ich zeige Ihnen nun 2-3 Grundrisse, damit sie anschließend die Raumeindrücke im Gebäude besser verstehen können

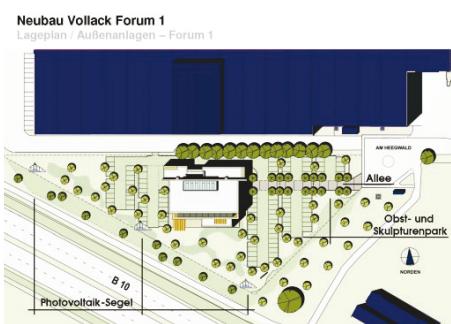


Abbildung 35

Das Grundstück (Abbildung 35), das wir gewählt haben liegt direkt am Autobahnzubringer B10 an der Autobahn A5, Anschlussstelle Karlsruhe Nord. Auf einem Grundstück, wo man durchaus der Meinung sein kann, dass diese Restfläche außer Problemen wie ein problematischer Zuschnitt, starker Verkehrslärm und einer übergroßen Nachbarbebauung keine Qualitäten besitzt. Sie sehen hier den genordeten Lageplan des Industriegebietes. Am oberen Bildrand sehen Sie die Ausmaße der benachbarten Industriegroßanlage. Die Fassade dieses Nachbargebäudes ist 230 Meter lang, silberfarbenes

Trapezblech und bis zu 26 Meter hoch. Ein Gegenüber, das sie nicht unbedingt suchen und schon gar nicht, um mit diesem Ausblick hochwertige Arbeitsplätze anzugeordnen. Wir haben das Gebäude deshalb so organisiert, dass wir uns hauptsächlich zu den restlichen drei Himmelsrichtungen orientieren mit Hauptausrichtung in Ost-West Richtung. Wir haben uns mit einer ca. 1.000 qm großen Wandscheibe, die gleichzeitig unser „backing“ darstellt, selbstbewusst auf dieser Restfläche platziert und unser Gebäude so strukturiert, dass diese Sichtbetonwand unsere offenen Arbeitsbereiche nach Norden abschottet. Die Außenanlagen haben wir den umliegenden Streuobstwiesen angepasst und das Gebäude mit einem Kunst- und Skulpturenpark integriert.

Das Forum 1 ist als ein 6-geschossiger offener Luftraum konzipiert, indem einzelne Arbeitsebenen unabhängig voneinander eingehängt sind. Ausgelegt auf maximal 150 Arbeitsplätze sind aktuell ca. 130 belegt. Dieses Kommunikationsgebäude ist bewusst angelegt, um die Stärke dieser 130 Mitarbeiter in 6 Gesellschaften als Gemeinschaft erlebbar zu machen und dies unseren Bauherrn und Besuchern auch zu zeigen. Gleichzeitig dient diese Offenheit den Mitarbeitern, um auf unkomplizierte Art und Weise – quasi in „Blickgeschwindigkeit“ – miteinander zu kommunizieren. Damit dies möglich ist, haben wir den Hauptlaufweg als Rampe ausgebildet, die die einzelnen Arbeitsebenen miteinander verbindet.

Diese Hauptverkehrszone haben wir vor die beschriebene Betonwandscheibe gelegt, sozusagen aus den ruhigen Arbeitsebenen eliminiert. Ebenso alles, was akustisch oder visuell stört oder stören könnte. So wurden Toiletten, Plotter- und Nebenräume sowie Teeküchen hinter dieser Wandscheibe angeordnet. Einzig die eingehausten, gläsernen Kuben der Druckerstationen verblieben direkt und zentral im Arbeitsbereich der einzelnen Teams.

Bedingt durch die Nähe des Autobahnzubringers direkt vor dem Gebäude und der Höhenlage der Erdgeschossebene unter Straßenniveau, haben wir auf eine Unterkellerung verzichtet und sämtliche Technikräume sowie Archiv- und Lagerräume im

Erdgeschoss angeordnet. So gelangen Sie über die erste Rampe auf die Arbeitsebene im 1. Obergeschoss, in dem sich auch der Empfang befindet.



Abbildung 36

Einige Einblicke in die Arbeitswelt des Forum 1 (Abbildung 36 -37 ).



Abbildung 37

So sehen diese eingehängten offenen Arbeitsetagen aus. Diese Etagen haben alle eine Größenordnung von rund 200 qm mit einem Flächenschlüssel von rund 10 qm pro Arbeitsplatz. Dass dies eher großzügig anmutet, sehen Sie in der Anordnung von Rückzugsräumen und den Alkoven, den sogenannten

„nesting“-Bereichen, die ebenfalls Teil dieses Flächenschlüssels sind. Wenn sie diese Teams mit allen Vorteilen der direkten Kommunikation so kompakt setzen, dürfen die eingesparten Flächen nicht einfach entfallen, sondern müssen im Sinne der Unternehmenskultur den Mitarbeitern als Möglichkeit des temporären Rückzugs zur Verfügung stehen. Auch Arbeitsplätze im Stehen - ein wichtiges Wohlfühlthema - ermöglichen nicht

ausschließlich an den eigenen Arbeitsplatz gebunden zu sein; auch diese Sofaecken, die akustisch wirksam sind, dienen für arbeitsplatznahe Teamgespräche und längere Telefongespräche. Dieses Gebäude, das eine Ausdehnung in Ost- West-Richtung von 35 Metern hat, ist bewusst zur Südseite abgeschottet und mit einer weitestgehend geschlossenen Fassade ausgestattet, um vor Wärmeeinträgen und Verkehrslärm des 4-spurigen Autobahnzubringers zu schützen. Um die entstehenden Dunkelzonen in Gebäudemitte zu vermeiden, wurden über Simulationsmodelle zu Tageslichteinfall sowohl die Fensteröffnungen in dieser Südfassade entwickelt, als auch die Anordnung der Arbeitsebenen zueinander am innenliegenden Luftraum derart modelliert, dass auch in Gebäudemitte hochwertige Arbeitsplätze mit ausreichend Tageslicht angeordnet werden konnten.



Abbildung 38

Auf dem folgenden Bild (Abbildung 38) erkennen Sie die bench eines Projektteams mit einer Länge von 6 Metern. Ob Architekt, Tragwerksplaner, Marketingfachfrau oder Projektkaufmann, für alle Möglichkeiten der interdisziplinären

Teamzusammensetzung wurden diese benches in

einer Technikkonsole in der Tischmitte verkabelt. Normalerweise sind diese Tische für 8 Arbeitsplätze vorgesehen, doch wir haben jeweils nur maximal 6 Arbeitsplätze eingerichtet. Somit erreichen wir, dass sich die unterschiedlichen Teams auf allen Ebenen an identisch ausgestatteten benches neu konstellieren können. Und dies ist der eigentliche Paradigmenwechsel – früher wurden die Möbel bewegt, heute wandern die Mitarbeiter.

Zurück zu den Glaskuben der Druckerstationen. Die Glasscheiben fungieren als Träger für Hochleistungsabsorber, die in der Farbe grün im ganzen Gebäude und an den relevanten Stellen angebracht sind. Natürlich ist klar, dass sich solch ein komplexes, 6-geschossiges Raumgebilde nur relativ schwierig rechnen lässt, um zu ermitteln, welche akustischen Maßnahmen zur Raumbedämpfung notwendig werden, da anders als in einem klar definierten Raum die Frage nach den Raumbegrenzungen und den auftretenden Reflexionen nur schwer beantworten lässt. Daher haben wir ein ganzes Bündel an akustisch wirksamen Maßnahmen umgesetzt. Nach wie vor ist bei bauteilaktivierten Gebäuden die Decke tabu und nur schwer aktivierbar. Nach wie vor ist mit der Wahl eines Teppichbodenbelages eine kostengünstige Grundbedämpfung zu erzielen. Die vorhin beschriebene geschlossene Südfassade ist an ihrer Innenfläche über eine streugelochte Akustikplatte vollflächig aktiviert. Schallschluckende Oberflächen von Raumteilern und Pinwänden an den Arbeitsplätzen ergänzen die Maßnahmen ebenso, wie die Stauräume unserer Arbeitsplätze schallschluckende Oberflächen besitzen.



Abbildung 39



Abbildung 40

Nun ein anderer Blickwinkel in Richtung der Rampenlandschaft vor der Sichtbetonwand (Abbildung 39). Die Rampen sind akustisch hoch interessant, da wir ihre positive raumakustische Wirkung als Absorber zunächst unterschätzt hatten. Das Material ist Leimholz, die größte Länge dieser Rampen hat 25 Meter und eine Rampe wiegt ca. 10 Tonnen. Somit haben wir eine Masse von über 100 Tonnen Leimholz, das durch seine offenporige Struktur im tief frequenten Bereich bei ca. 120 Hertz – dies entspricht einer männlichen Stimme – hochwirksam die Raumakustik verbessert.

Diese Rampen sind jedoch nicht nur reine Verkehrswege, sie dienen auch als Kommunikationszonen, die sogenannte Bordsteingespräche mit Kollegen quasi im Vorbeigehen ermöglichen (Abbildung 40).

Ein Wort zu unseren vielfältigen Besprechungsmöglichkeiten. Da wir die Erfahrung gemacht haben, dass nicht jede Besprechung gleich ist, haben wir für die unterschiedlichen Gesprächsformate auch die Räume unterschiedlich ausgestattet. Besprechungen im Stehen - im Übrigen höchst effektiv - Planungsgespräche an Eiermannischen, Räume mit Konferenzbestuhlung, Mitarbeiter-



Abbildung 41



Abbildung 42

Systeme nach wie vor extrem träge sind, haben wir zur individuellen Regelung einzelner Bereiche sogenannte Randzonenelemente eingesetzt, die mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit und einer Spreizung von 6 Kelvin sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall für eine hohe Qualität des Raumklimas sorgen. Wir erhalten so eine absolut staubfreie Strahlungsheizung sowie im Sommer eine Raumkühlung ohne Zugerscheinungen. Auch diese Elemente, die im Deckenrandbereich angeordnet sind, wirken durch ihre absorbierenden Oberflächen raumbedämpfend.

und Bewerbergespräche, alle Besprechungsräume sind entsprechend unterschiedlich möbliert (Abbildung 41-42). Eine Bibliothek im Erdgeschoss, Teeküchen als Espressoobar auf jeder Etage und unsere Skylounge, die an höchster Stelle mit ihrer Außenterrasse nicht nur einen unverbauten Blick in die Landschaft ermöglicht. Diese Skylounge ist auch ein flexibel nutzbarer Veranstaltungsräum, der als Cafeteria und Pausenzone eine zusätzliche Rückzugsmöglichkeit für die Mitarbeiter bietet.

Ich hatte eingangs erläutert, dass das Forum 1 über bauteilaktivierte Betondecken beheizt und gekühlt wird. Da diese



Abbildung 43

Räumlichkeiten jedoch auch Unternehmen, mit denen wir zusammenarbeiten, für deren Veranstaltungen zur Verfügung. Unsere 1.000qm Sichtbetonwand eignet sich zudem hervorragend für Kunstausstellungen, wobei anzumerken ist, dass Kunst einen hohen Stellenwert in unserer Arbeitswelt einnimmt.

Dieses Gebäude ist als Kommunikationsgebäude auch für Kundenveranstaltungen und Vorträge bis zu einer Teilnehmerzahl von 300 Gästen ausgerichtet, die wir selbst durchführen. Hierzu lässt sich die Etage unserer Skylounge zu einer großen Fläche öffnen (Abbildung 43). Wir stellen die



Abbildung 44

Gebäude. Diese Segel sind ein gemeinsames Forschungsprojekt mit den Stadtwerken Karlsruhe und zwischenzeitlich zu einem Vorzeigeprojekt geworden. Sie sind mitgeführt, das heißt, sie folgen dem Tagesverlauf der Sonne. Die Stadtwerke Karlsruhe sprechen inzwischen von Deutschlands schönster

Den Einsatz regenerativer Energie haben wir über 3 Photovoltaiksegel sichtbar gemacht (Abbildung 44), die wie Segelschiffe auf Reede entlang des Autobahnzubringers angeordnet sind. Sie stehen stellvertretend für unsere unsichtbaren 20 Erdsonden in einer Tiefe von 140 m und den Einsatz der Geothermie bei diesem

Photovoltaikanlage und so ist unser Zeichen, dass wir in gesellschaftlichen Verantwortung in Bezug auf den Einsatz von regenerativer Energie setzen wollten, inzwischen eine Aufforderung an viele andere Unternehmen, sich dieser Verantwortung bewusst zu werden.



Abbildung 45

wäre dieses Gebäude nicht angenommen worden. Selbst bei einer Unternehmung, die schon sehr lange in offenen Strukturen arbeitet, wäre ohne den beschriebenen Changemanagement-Prozess dieses Gebäude nicht hoch akzeptiert, sondern wir hätten mit den natürlichen Widerständen der Mitarbeiter zu kämpfen.

Ohne unsere Unternehmenskultur wäre die Realisierung des Forums 1 (Abbildung 45) in der gezeigten Form nicht möglich gewesen. Ohne die Bereitschaft, Betroffene zu Beteiligten zu machen und ohne den Fokus auf die Notwendigkeiten des einzelnen Arbeitsplatzes / des einzelnen Mitarbeiters,

Ich komme zum Schluss: Mein Beitrag beim diesjährigen Symposium sollte Sie bei aller Wichtigkeit der Raumakustik und der technischen Neuerungen an die zutiefst menschlichen Bedürfnisse und Ängste der Menschen in unseren heutigen Bürolandwelt erinnern und Ihnen aufzeigen, dass wir nicht alles technisch heilen können, was wir auf der Basis der Emotionsebene und der Akzeptanz des Einzelnen versäumt haben.



# Kombinierte Wirkung bauphysikalischer Parameter im Büroumfeld

A.Liebl

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

Kontakt: [andreas.liebl@ibp.fraunhofer.de](mailto:andreas.liebl@ibp.fraunhofer.de)

## ZUSAMMENFASSUNG

Geistige Arbeit wird üblicherweise in Büroumbgebungen erbracht und steht unter dem kombinierten Einfluss der bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes (Schall, Licht, Wärme, Luftfeuchtigkeit, etc.). Diese beeinflussen maßgeblich die Leistungsfähigkeit sowie das Befinden der Beschäftigten. Es wird angenommen, dass das wirtschaftliche Potential der Optimierung der bauphysikalischen Umgebungsbedingungen die notwendigen Investitionskosten um ein Vielfaches übersteigt. Um dieses Potential zu nutzen, ist es zum einen notwendig, den Zusammenhang zwischen den kombinierten bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes und Leistungsfähigkeit sowie Behaglichkeit an Büroarbeitsplätzen zu quantifizieren. Zum anderen bedarf es der Entwicklung von technologischen Lösungen, welche eine gezielte Einstellung der bauphysikalischen Verhältnisse ermöglichen, so dass Leistungsfähigkeit und Behaglichkeit optimiert werden.

## ABSTRACT

Information work is usually performed in offices and influenced by the combined effects of building physical parameters (sound, light, heat, humidity, etc.). Building physical parameters are known to affect employees' performance and well-being. The potential financial benefits of improving indoor environments are estimated to exceed initial investment costs by far. In order to utilize this potential the effects of the physical office environment on performance and well-being in offices must be quantified. Additionally technical solutions must be developed to adjust the physical office environment in a way that optimum performance and well-being are achieved.

## ARBEIT IM BÜRO

Der Anteil geistiger Arbeit hat in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Im Vordergrund stehen nicht mehr manuelle Tätigkeiten sondern die Arbeit mit Wissen und Informationen. Folglich wächst auch die ökonomische Bedeutung geistiger Arbeit. Diese Arbeit wird überwiegend in Büroumgebungen erbracht. Bereits heute existieren in Deutschland ca. 17 bis 20 Millionen Büro- oder büroähnliche Bildschirmarbeitsplätze (Schneider, Windel & Zwingmann, 2004), das sind ca. 50% aller Arbeitsplätze in Deutschland.

In Folge globaler Konkurrenz ist es wichtig, arbeitsbezogene Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass mit angemessenem Aufwand ein optimaler Nutzen erzielt werden kann. Dies bezieht sich nicht nur auf die ideale Gestaltung von Produktionsabläufen sondern in verstärktem Maße auch auf die Optimierung der Umgebungsbedingungen bei Büroarbeit. Das Ergebnis der Arbeitstätigkeit sowie das Befinden der Beschäftigten werden durch bauphysikalische Eigenschaften des Raumes (Schall, Licht, Wärme, Luftfeuchtigkeit, etc.) maßgeblich beeinflusst (z.B. Rashid & Zimring, 2008).

Für den Erhalt der Gesundheit am Arbeitsplatz existieren zahlreiche Anforderungen und Normen (z.B. 2003/10/EG, 90/270/EWG, ArbSchG). Diese müssen eingehalten werden. Subjektive Behaglichkeit und Komfort sind hingegen als Zielgrößen für Gestaltungsmaßnahmen schwer kommunizierbar und werden häufig nur als soziale Geste des Arbeitgebers eingeschätzt. Behaglichkeit und Komfort stellen demnach alleine keine ausreichenden Kriterien für die Gestaltung von Arbeitsumgebungen dar. Leistungsfähigkeit und Effizienz sind dagegen Kategorien, mit denen sich Investitionen bewerten und Arbeitgeber überzeugen lassen. Sie sind jedoch keineswegs zwingend gegeben, wenn Gesundheitsschutz und Komfort erreicht wurden. Wissenschaftliche Untersuchungen in den USA schreiben allein der Optimierung der raumklimatischen

Verhältnisse ein wirtschaftliches Potential in Milliardenhöhe zu (Seppanen & Fisk, 2006). Dabei wird angenommen, dass der resultierende Gewinn die Kosten um das 18- bis 47-fache übersteigt (Fisk, 1998). Folglich ist die Optimierung der bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes ökonomisch sinnvoll und auch sozial erstrebenswert.

Die Optimierung der Rahmenbedingungen für Informationsverarbeitungsprozesse ist Grundvoraussetzung für Leistungsfähigkeit und Effizienz. Leistungsfähigkeit wird häufig allein mit dem Erhalt der Arbeitsfähigkeit und arbeitsorganisatorischen Maßnahmen verbunden, während der Einfluss bauphysikalischer Eigenschaften des Raumes auf die kognitive Leistungsfähigkeit unberücksichtigt bleibt. Um letztere Potentiale zu erschließen bedarf es:

- Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen den kombinierten bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes und Leistungsfähigkeit sowie Behaglichkeit an Büroarbeitsplätzen
- Entwicklung von technologischen Lösungen, welche eine gezielte Einstellung der bauphysikalischen Verhältnisse ermöglichen, so dass Leistungsfähigkeit und Behaglichkeit optimiert werden

Zunächst wird ein Abriss des aktuellen Wissensstandes präsentiert. Eine erschöpfende Darstellung kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Zusätzlich werden exemplarisch Befunde einer experimentellen Untersuchung zur kombinierten Wirkung visueller und akustischer Ablenkung berichtet.

## WIRKUNG BAUPHYSIKALISCHER PARAMETER IN BÜROUMGEBUNGEN

Im Folgenden wird ein Schwerpunkt auf die Analyse der Wirkung bauphysikalischer Parameter auf kognitive Prozesse (z.B. Gedächtnis, Aufmerksamkeit) gelegt, welche das Arbeiten in Büroumgebungen kennzeichnen. Dadurch grenzt sich die Arbeitsplatzgestaltung unter dem Blickwinkel der kognitiven Ergonomie von der physischen Ergonomie ab. Letztere fokussiert auf gesundheitliche Auswirkungen von Arbeitstätigkeiten und zielt vordergründig darauf ab, körperliche Schäden auch bei langfristiger Ausübung von Tätigkeiten zu vermeiden. Die physische Ergonomie stützt sich dabei auf arbeitsmedizinische Erkenntnisse. Die kognitive Ergonomie stellt hingegen die Optimierung der Leistungsfähigkeit und Behaglichkeit in den

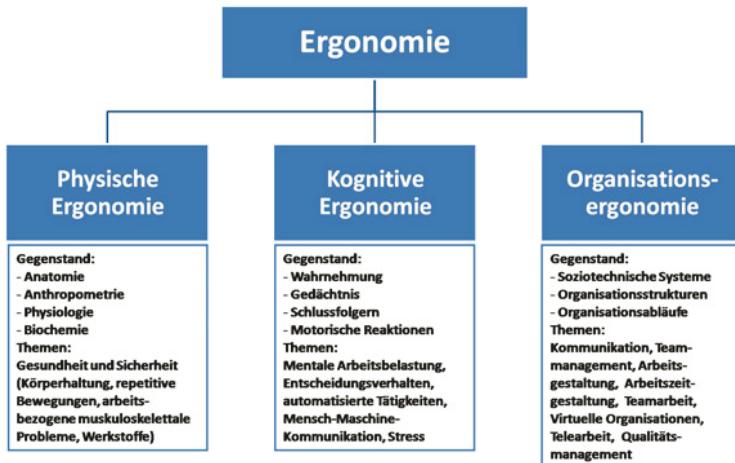


Abbildung 1: Gliederung der Ergonomie nach verschiedenen inhaltlichen Schwerpunkten

Vordergrund und bezieht sich dabei auf Erkenntnisse der Kognitionspsychologie (Karwowski, 2006). Abbildung 1 zeigt die Gliederung der Ergonomie nach verschiedenen inhaltlichen Schwerpunkten.

Als Grundlage kognitiv ergonomischer Raumkonditionierung ist der sog. Informationsverarbeitungsansatz (Wickens, 1992) von wesentlicher Bedeutung. Dabei wird die Existenz einer Hierarchie unterschiedlicher kognitiver Funktionen angenommen, beginnend mit Wahrnehmungsfunktionen. Das bedeutet, Informationen aus der Umgebung müssen zunächst durch sensorische Funktionen Zugang zum kognitiven System erlangen. Danach folgt die Verarbeitung von Informationen anhand kognitiver Grundfunktionen, wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis oder der Inhibition automatisierter Prozesse. An der Spitze des Informationsverarbeitungsprozesses stehen komplexe Funktionen, wie das Lesen und Textverstehen, welche sich durch das kombinierte Wirken kognitiver Grundfunktionen auszeichnen. Abbildung 2 veranschaulicht die beschriebene Hierarchie kognitiver Funktionen am Beispiel des Textverständens.

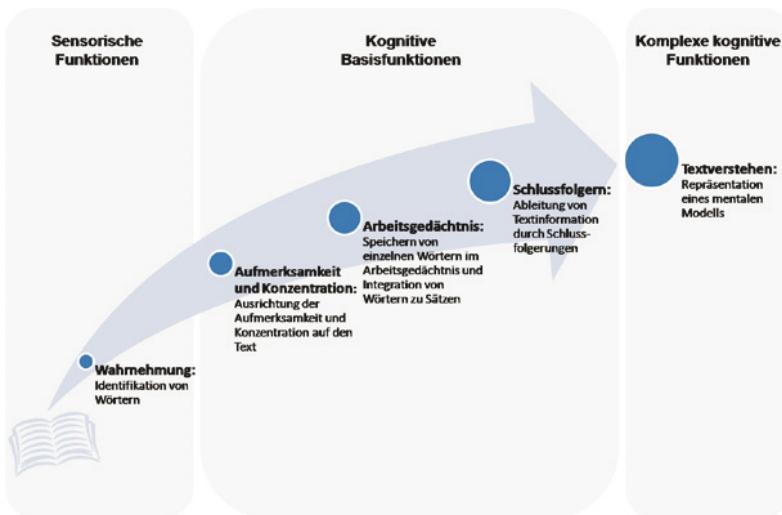


Abbildung 2: Hierarchie kognitiver Funktionen am Beispiel Textverständen

Bislang berücksichtigen Untersuchungen kaum die Differenzierung zwischen unterschiedlichen Arbeitsaufgaben und den zu deren Lösung notwendigen kognitiven Funktionen. Es liegt nahe, dass verschiedene kognitive Funktionen auch in unterschiedlicher Weise sensitiv für Beeinflussungen durch bauphysikalische Parameter sein können (z.B. Wirkung von Geräuschen auf Kommunikations- oder Bildschirmtätigkeiten). Die Bearbeitung unterschiedlicher Arbeitsaufgaben bedarf stets des Einsatzes verschiedener kognitiver Funktionen. Je störungsfreier diese Funktionen ausgeführt werden, desto höher ist die mögliche Leistungsfähigkeit. Kognitive Funktionen können durch die bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes maßgeblich unterstützt oder gehemmt werden.

## WIRKUNG DER RAUMAKUSTISCHEN VERHÄLTNISSE IN BÜROUMGEBUNGEN

Zu den physiologischen und psychologischen Wirkungen von Bürolärm wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. Rashid & Zimring, 2008). Diese belegen Effekte auf Leistungsfähigkeit, Lästigkeit, Motivation, und Sozialverhalten. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über potentielle Einflussgrößen und Wirkungen von Bürolärm.

Tabelle 1: Einflussgrößen und Wirkungen von Bürolärm

| Einflussgröße               | Wirkung  |
|-----------------------------|--|
| Vorhersagbarkeit            | Unvorhersehbar auftretende Geräusche (z.B. Telefonklingeln) sind problematischer einzuschätzen als vorhersehbare Geräusche.  |
| Variabilität                | Intermittierende Geräusche werden störender empfunden als kontinuierliche.   |
| Notwendigkeit, Nützlichkeit | Unnötige Geräusche sind problematischer einzuschätzen als nützliche Geräusche.   |
| Kontrollierbarkeit          | Kontrollierbare oder durch die eigene Tätigkeit verursachte Geräusche verursachen weniger Frustration und ermöglichen eine größere Leistungsfähigkeit. Geräusche die von anderen verursacht werden, werden als unkontrollierbar erlebt und sind daher problematischer. |
| Verständlichkeit            | Verständliche Gespräche verursachen mehr Ablenkung als unverständliche Gespräche.  |
| Pegel                       | Der Pegel von Geräuschen beeinflusst das Lästigkeitsempfinden, allerdings ist er nicht der allein ausschlaggebende Kennwert.   |
| Tonhöhe                     | Hochfrequente Geräusche und tonale Komponenten werden als lästig empfunden.  |
| Neuartigkeit                | Neuartige Geräusche lenken mehr ab, als wiederholt auftretende Geräusche.  |
| Lärmempfindlichkeit         | Die individuelle Lärmempfindlichkeit beeinflusst das Ausmaß der empfundenen Lärmbelästigung.   |

## WIRKUNG DER BELEUCHTUNGSVERHÄLTNISSE IN BÜROUMGEBUNGEN

Zu den physiologischen und psychologischen Wirkungen der Beleuchtungsverhältnisse in Büroumgebungen wurden ebenfalls zahlreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. Rashid & Zimring, 2008). Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über potentielle Einflussgrößen und Wirkungen der Bürobeleuchtung.

Tabelle 2: Einflussgrößen und Wirkungen der Bürobeleuchtung

| Einflussgröße           | Wirkung  |
|-------------------------|--|
| Tageslichtverfügbarkeit | Die Verfügbarkeit von Tageslicht hat positive Auswirkung auf Physiologie, Psyche und Leistungsfähigkeit.   |
| Beleuchtungsniveau      | Das Beleuchtungsniveau kann die Arbeitsleistung direkt (z.B. Einfluss auf das Sehvermögen) oder indirekt (z.B. Einfluss auf das Erregungsniveau) beeinflussen. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Schwierigkeit der Sehaufgabe und das Alter der Beschäftigten. |
| Flicker                 | Leuchtdurchschwankungen von fluoreszierenden Leuchten haben Auswirkungen auf Physiologie, Psyche und Leistungsfähigkeit.   |
| Lichtfarbe              | Für bestimmte Beleuchtungsbedingungen wurden positive Auswirkungen der Lichtfarbe (warmweiß) auf das Sozialverhalten (Kooperation), das emotionale Befinden und die selbstberichtete Leistungsfähigkeit dokumentiert.  |
| Kontrollierbarkeit      | Die Kontrollierbarkeit ist ein wesentlicher Prädiktor der Zufriedenheit mit den Beleuchtungsverhältnissen.   |

## WIRKUNG DER RAUMKLIMATISCHEN VERHÄLTNISSE UND LUFTQUALITÄT IN BÜROUMGEBUNGEN

Insbesondere zu den physiologischen Auswirkungen der Temperaturverhältnisse wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Zu den Auswirkungen auf die Psyche ist die Befundlage geringer und nicht eindeutig (vgl. Rashid & Zimring, 2008). Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über potentielle Einflussgrößen und Wirkungen der raumklimatischen Verhältnisse und Luftqualität in Büroumgebungen.

Tabelle 3: Einflussgrößen und Wirkungen der raumklimatischen Verhältnisse und Luftqualität in Büroumgebungen

| Einflussgröße            | Wirkung  |
|--------------------------|--|
| Temperatur               | In zu kalten und zu warmen Arbeitsumgebungen steigt die Beschwerderate, die Arbeitszufriedenheit und Arbeitsbereitschaft sinken. Die selbstberichtete Leistungsfähigkeit und Konzentrationsfähigkeit nehmen ab. Bei Umgebungstemperaturen von mehr als 23°C nehmen die berichteten Sick-Building Symptome zu. Hohe Umgebungstemperaturen beeinflussen das Sozialverhalten und Erleben der sozialen Umwelt (z.B. Gefühl von Crowding nimmt zu). |
| Ventilationsrate         | Ventilationsraten unter 10 L/sec pro Person können eine Abnahme der physiologischen oder empfundenen Qualität der Raumluft bedingen. Bei höheren Ventilationsraten sinkt das Ausmaß von Sick-Building Symptomen und die empfundene Luftqualität steigt.  |
| CO <sub>2</sub>          | Das Risiko von Sick-Building Symptomen sinkt bei CO <sub>2</sub> Konzentrationen unter 800 ppm. Hohe CO <sub>2</sub> Konzentrationen beeinträchtigen die Konzentrationsfähigkeit.  |
| Strömungsgeschwindigkeit | Geringere Strömungsgeschwindigkeiten der Raumluft werden als angenehmer erlebt.  |

## KOMBINIERTE WIRKUNG BAUPHYSIKALISCHER PARAMETER IN BÜROUMGEBUNGEN

Zu den kombinierten Wirkungen bauphysikalischer Parameter in Büroumgebungen ist der Kenntnisstand noch ungenügend. Zwar wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt (z.B. Clausen & Wyon, 2008), es gibt allerdings kein einheitliches Befundmuster. Ein Problem ist hierbei die Vielzahl möglicher Kombinationen von bauphysikalischen Parametern und der Umstand, dass sich deren Wirkungen gegenseitig addieren oder kompensieren können. Clausen und Wyon (2008) führten beispielsweise eine laborexperimentelle Untersuchung durch, in welcher sie eine positive einer negativen Arbeitsumgebung gegenüberstellten. Tabelle 4 zeigt die von Clausen & Wyon (2008) variierten Umgebungsbedingungen.

Tabelle 4: Variationen der Umgebungsbedingungen zur Untersuchung der kombinierten Wirkungen bauphysikalischer Parameter (Clausen & Wyon, 2008)

| Parameter    | Negative Umgebung                 | Positive Umgebung              |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Verkehrslärm | 55 dB(A)                          | 45 dB(A)                       |
| Bürolärm     | Hintergrundsprechen               | kein Hintergrund-sprechen      |
| Kunstlicht   | Flicker, Blendung,<br>keine Spots | Uplights, Wallwasher,<br>Spots |
| Tageslicht   | Fensterlos                        | Fenster                        |
| Temperatur   | 27°C                              | 22°C                           |
| Luftqualität | 50 L/s p.P. Linoleum              | 50 L/s p.P. Frischluft         |

Überraschenderweise wurden nur Effekte auf das subjektive Empfinden und die selbstberichtete Leistungsfähigkeit nachgewiesen, die objektive Leistungsfähigkeit bei verschiedenen kognitiven Aufgabenstellungen blieb hingegen unbeeinflusst.

## **EXEMPLARISCHE BEFUNDE ZUR KOMBINIERTEN WIRKUNG VISUELLER UND AKUSTISCHER ABLENKUNG**

Im Rahmen des Projekts Büroeffizienz (Liebl, Haller, Jödicke et al., in press) wurde der kombinierte Einfluss akustischer und visueller Ablenkung auf die kognitive Leistungsfähigkeit sowie die Befindlichkeit von Probanden (17 Frauen und 15 Männer im Alter zwischen 19 und 31 Jahren) untersucht. Die Probanden bearbeiteten verschiedene kognitive Leistungstests und Fragebögen jeweils unter einer unveränderlichen Beleuchtungssituation und einer variablen Beleuchtungssituation. Dazu wurde per Beamer eine im Gesichtsfeld der Probanden befindliche Projektionsfläche entweder konstant beleuchtet (gL) oder es wurde ein Wanderbalken auf die Leinwand projiziert, welcher sich mit einer Frequenz von 1-4 Hz zufällig über die Leinwand bewegte (sL). Auf diese Weise wurde visuelle Ablenkung, wie zum Beispiel durch vorbeilaufende Kollegen, simuliert. Die Variation der akustischen Umgebungsbedingungen umfasste die Darbietung von Hintergrundssprechen mit hoher, d.h. 94% Wortverständlichkeit (sA), oder geringer Sprachverständlichkeit, d.h. 24% Wortverständlichkeit (gA). Es gilt hervorzuheben, dass im Kontext stiller, konzentrierter geistiger Arbeit Hintergrundssprechen mit hoher Sprachverständlichkeit als störender einzuschätzen ist, als schlecht verständliches Hintergrundssprechen. Der Mittelungspegel der dargebotenen Geräusche lag bei jeweils 40 dB(A). Dieser Pegel ist als äußerst gering einzuschätzen und wird in Büroumgebungen selten erreicht.

Abbildung 3 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Untersuchungsbedingungen auf die mittels eines objektiven Leistungstests erhobene Kurzzeitgedächtnisfähigkeit. Die varianzanalytische Auswertung der prozentualen Fehlerraten in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ergibt in Bezug

auf die Leistung des Kurzzeitgedächtnisses einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Hintergrundschall ( $F(1,31) = 14,15; p < 0,01$ ). Unter Hintergrundschall mit guter Sprachverständlichkeit werden mehr Fehler gemacht als unter Hintergrundschall mit schlechter Sprachverständlichkeit. Der Haupteffekt des Faktors Beleuchtung ( $F(1,31) = 1,43; p = 0,24$ ) ist ebenso wie die Interaktion ( $F(1,31) < 1$ ) beider Faktoren statistisch nicht bedeutsam. Die Variation der Beleuchtung wirkt sich also nicht auf die Kurzzeitgedächtnisfähigkeit aus.

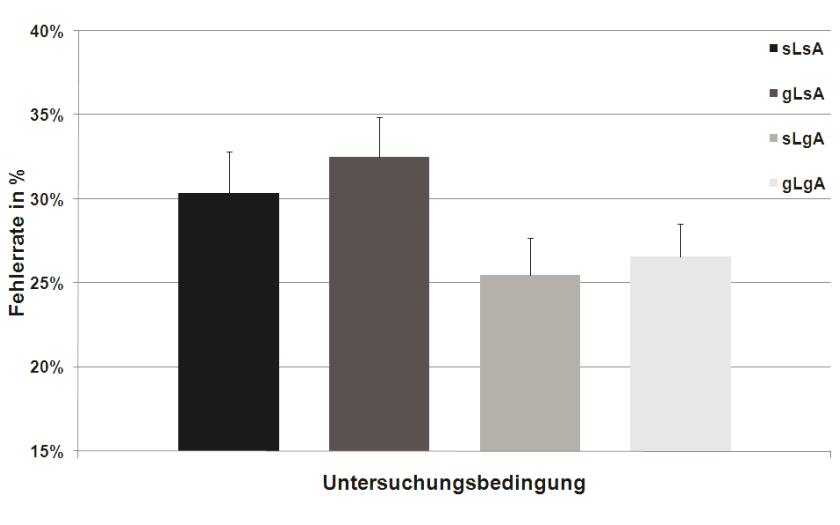


Abbildung 3: Fehlerraten in Prozent und Standardfehler bei Bearbeitung eines Kurzzeitgedächtnistests in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ( $n = 32$ )

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4 die Auswirkungen der verschiedenen Untersuchungsbedingungen auf die, mittels eines Fragebogens erhobene Konzentrationsfähigkeit. Die varianzanalytische Auswertung bzgl. der berichteten Konzentrationsfähigkeit der Probanden bei der

Aufgabenbearbeitung ergibt hochsignifikante Haupteffekte der Faktoren Schall ( $F(1,31) = 17,41; p < 0,01$ ) und Licht ( $F(1,31) = 9,77; p < 0,01$ ). Die Interaktion beider Faktoren ist statistisch nicht bedeutsam ( $F(1,31) < 1$ ). Demnach wird die Konzentrationsfähigkeit unter Hintergrundschall mit hoher Sprachverständlichkeit sowie unter der variablen Beleuchtung als schlechter empfunden.

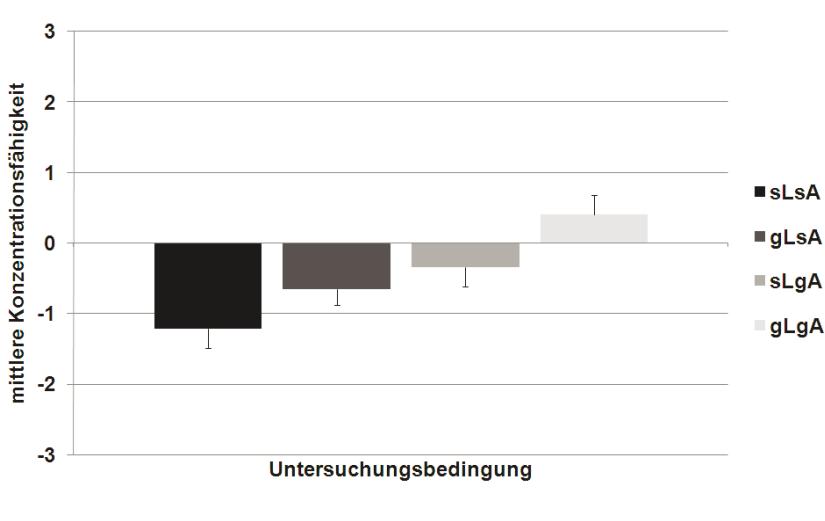


Abbildung 4: Mittlere Urteile und Standardfehler bzgl. der berichteten Konzentrationsfähigkeit in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ( $n = 32$ )

## FAZIT

Es ist festzuhalten, dass die bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes (Akustik, Beleuchtung, Raumklima, Luftqualität) die Leistungsfähigkeit und das Befinden der Nutzer wesentlich beeinflussen. Subjektives Empfinden und gemessene Leistung stimmen dabei nicht immer überein. Der Kenntnisstand zu den kombinierten Wirkungen bauphysikalischer Parameter in Büroumgebungen ist noch unzureichend. Weitere Untersuchungen sind erforderlich. Im Rahmen der Forschungsinitiative High Performance Indoor Environment (HiPIE) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik wurden daher Laborräume (HiPIE-Labor) geschaffen, die es ermöglichen, die verschiedenen bauphysikalischen Eigenschaften des Raumes gezielt zu variieren. Deren Auswirkungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit und die Befindlichkeit von Probanden können somit in einem laborexperimentellen Ansatz unter validen Bedingungen untersucht werden. Zudem bieten die Laborräume eine Plattform um technische Lösungen, wie Büromöbel, einer technischen Bewertung aber insbesondere auch einer Evaluation durch Nutzer zu unterziehen. Damit ist es möglich den Einfluss der Produkte auf Leistungsfähigkeit und Behaglichkeit zu quantifizieren und eine wirtschaftliche Bewertung vorzunehmen.

## LITERATUR

- Clausen, G., Wyon, D. P. (2008). The combined effects of many different indoor environmental factors on acceptability and office work performance. HVAC&R RESEARCH, 14(1), 103–113.
- Fisk, W. J., Rosenfeld, A. H. (1998). Estimates of improved productivity and health from better in-door environments. INDOOR AIR, 8(4), 301-301.
- Karwowski, W. (2006). The Discipline of Ergonomics and Human Factors. In: SALVENDY, G. (Hrsg.): Handbook of human factors and ergonomics. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., (3), 1–31.
- Liebl, A., Haller, J., Jödicke, B., Baumgartner, H., Schlittmeier, S., Hellbrück, J. (2011). Combined effects of acoustic and visual distraction on cognitive performance and well-being. Applied Ergonomics, in press.
- Rashid, M., Zimring, C. (2008). A review of the empirical literature on the relationships between in-door environment and stress in health care and office settings - Problems and prospects of sharing evidence. ENVIRONMENT AND BEHAVIOR 40(2), 151–190.
- Schneider, W., Windel, A., Zwingmann, B. (2004). Die Zukunft der Büroarbeit : Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bremerhaven : Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss.
- Seppanen, O. A., Fisk, W. J. (2006). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. HVAC&R RESEARCH 12(4), 957–973.
- Wickens, C. D. (1992) Engineering Psychology and Human Performance. New York : HarperCollins.



# **Innovative Hörunterstützung in Kommunikationssystemen**

*J. Rennies, S. Goetze, T. Rohdenburg & J.-E. Appell*

Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie  
Projektgruppe Hör-, Sprach- und Audiotechnologie

*Kontakt: jan.rennies@idmt.fraunhofer.de*

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Trotz des technischen Fortschritts ist akustische Qualität in modernen Kommunikationssystemen in vielen Situationen nicht optimal. Sowohl äußere Faktoren, wie z.B. Hintergrundlärm oder schlechte Raumakustik, als auch persönliche Faktoren, wie z.B. individuelle Hörstörungen, können die akustische Kommunikation erheblich einschränken. Vor dem Hintergrund einer im Mittel älter werdenden und daher häufiger schwerhörenden Arbeitnehmerschaft und der zunehmenden Bedeutung von akustischer Kommunikation am Büroarbeitsplatz sind innovative Lösungen erforderlich. Diese reichen von Strategien zur Reduktion störender Signalanteile über den Einsatz von Gehörmodellen zur Überwachung der Kommunikationsqualität bis zur Kompensation individueller Hörstörungen.

## **ABSTRACT**

Despite technological advances acoustic quality in modern communication systems is still not perfect in many situations. Both external factors, e.g. background noise or poor acoustics as well as personal factors such as individual hearing loss can considerably impede acoustic communication. In the light of the demographic change which on average leads to older and therefore to an increased number of hearing impaired employees, and the increasing importance of acoustic communication at office working places, innovative solutions are required. They range from strategies for reducing acoustic disturbances and the use of hearing models to monitor communication quality to compensation techniques for individual hearing impairments.

## EINLEITUNG

Die Qualität von akustischer Kommunikation macht einen wesentlichen Anteil der ergonomischen Eigenschaften eines modernen Arbeitsplatzes aus. Dies betrifft einerseits die direkte zwischenmenschliche Sprachkommunikation und die Kommunikation mithilfe von Kommunikationssystemen und andererseits auch die Wahrnehmung und Lokalisierung von Alarmsignalen und die akustische Orientierung in der Arbeitsumgebung. Moderne Strukturen der Arbeitsorganisation beruhen immer mehr auf einem intensiven akustischen Informationsaustausch, der zunehmend auch in Produktionsbereichen mit beachtlichem Umgebungslärm vordringlich wird. Auch im Büroumfeld sind wesentliche Strukturen direkt an akustische Kommunikation geknüpft, was durch die wachsende Verbreitung videotestzter Konferenz- oder Chatsysteme weiter verstärkt wird.

Den herausragenden Möglichkeiten der modernen Kommunikationsmittel stehen dabei Risiken gegenüber, die entstehen, wenn die Bedingungen für eine qualitativ hochwertige akustische Kommunikation nicht gegeben sind. Ist dies der Fall, sind häufig erhöhte Höranstrengung der Mitarbeiter und damit reduzierte Konzentrations- und Leistungsfähigkeit die Folge. In gravierenden Fällen können fehlende oder falsch übermittelte Informationen erhebliche Störungen des Arbeitsablaufes verursachen. Eine optimale akustische Kommunikation ist daher eine Voraussetzung für reibungslose und effiziente Abläufe an modernen Arbeitsplätzen.

Faktoren, die die Kommunikationsqualität einschränken können, sind einerseits physikalischer (äußerer) Natur. Dies umfasst störende Nebengeräusche (z.B. Maschinen, Geräte, Gespräche der Mitarbeiter), deren Lautstärke durch schlechte raumakustische Eigenschaften noch verstärkt werden kann, sowie nicht-optimale Systemeigenschaften von Kommunikationsgeräten (z.B. Band- und Dynamikbegrenzung, Störeinflüsse durch Aufnahme, Kodierung und Übertragung). Andererseits können

persönliche (innere) Faktoren eine barrierefreie akustische Kommunikation erschweren, bspw. wenn eine Hörstörung oder eine erhöhte Lärmempfindlichkeit vorliegt. Dadurch kann die Arbeitsfähigkeit derart eingeschränkt sein, dass hörgeschädigte Mitarbeiter gänzlich von der Nutzung der im Betrieb etablierten (Kommunikations-)Systeme ausgeschlossen werden, da Sie diese nur in ruhiger Umgebung nutzen könnten, der Umgebungslärm z.B. in einem Großraumbüro sie jedoch daran hindert. Aktuelle Studien belegen, dass Kommunikationseinschränkungen durch eine Hörstörung sowohl schwerwiegende individuelle Folgen für die betroffenen Mitarbeiter als auch erhebliche betriebs- und volkswirtschaftliche Konsequenzen haben (Bormann, Sust, Heinecke-Schmitt et al., 2005; Shield, 2006). Da etwa 16% der erwachsenen Europäer (d.h. ca. 70 Mio. Menschen) an einem behandlungsbedürftigen Hörverlust leiden und nur 20% dieser Personen ein Hörgerät nutzen, ist die Problematik bereits heute hoch relevant und wird sich vor dem Hintergrund des demografischen Wandels weiter verstärken, da Schwerhörigkeit überwiegend altersbedingt ist (Davis, 2003; Shield, 2006). Dieser Beitrag beschreibt Technologien und aktuelle Forschungsarbeiten, die eine Verbesserung der akustischen Kommunikation zum Ziel haben, welche durch äußere und innere Faktoren eingeschränkt ist. Die Technologien umfassen dabei die Reduktion ungewünschter Signalanteile, die Kompensation von Hörverlusten und den Einsatz von Hörmustern zur optimalen Planung und Qualitätsüberwachung von Arbeitsplätzen.

## **REDUKTION UNGEWÜNSCHTER SIGNALANTEILE**

Moderne Kommunikationssysteme (z.B. Telefone, Konferenzsysteme, Audiochatsysteme, PA-Systeme) haben das gemeinsame Prinzip, dass das akustische Signal durch ein Mikrofon aufgenommen wird. Anschließend wird es nach mehr oder weniger aufwändiger Verarbeitung (z.B. Kodierung, Langzeitpegelanpassung) an den Empfänger gesendet, dort

verarbeitet (z.B. dekodiert) und schließlich akustisch wiedergegeben. In der Praxis werden diese Kommunikationssysteme häufig in nicht-optimalen akustischen Umgebungen eingesetzt, die Störgeräusche, Raumhall oder Verzerrungen hinzufügen. Die entstehende Problematik ist in Abbildung 1a) schematisch dargestellt: Die Störeinflüsse wie z.B. Rauschen (R) werden zusammen mit dem Sprachsignal (S) von Mikrofon aufgenommen und an den Empfänger übertragen, so dass bei diesem eine reduzierte Signalqualität vorliegt.

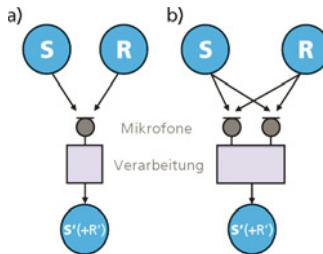


Abbildung 1: Schematische Darstellung von a) einkanaliger und b) mehrkanaliger Störgeräuschbefreiung.

Um die dadurch entstehenden Qualitätseinbußen zu verringern, zielen Kommunikationssysteme darauf ab die störenden Signalanteile zu reduzieren. Verfügt das System über nur ein Mikrofon, besteht der Ansatz darin, solche Frequenzanteile des gemischten Signals abzuschwächen, die überwiegend Störungen enthalten, und Frequenzanteile mit starken Sprachsignalkomponenten nicht abzuschwächen. Dadurch wird insgesamt die Energie der Störung reduziert. Idealerweise ist das verarbeitete Signal ( $S'$ ) gleich dem gewünschten Sprachsignal am Eingang ( $S$ ). In der Praxis ist eine perfekte Trennung nicht möglich, da in den abgeschwächten Frequenzanteilen auch immer ein Anteil gewünschter Sprache und in den nicht abgeschwächten Anteilen immer ein Anteil der Störung enthalten ist. Dadurch liegt am Ausgang noch eine Reststörung ( $R'$ ) vor und das Sprachsignal ( $S'$ ) stimmt qualitativ nicht mit dem Originalsignal überein. In

besonders störgeräuschbehafteten Umgebungen ist die Trennung von Sprache und Störungen auch für moderne Systeme sehr schwierig. Typischerweise treten dann derartige Verzerrungen im Sprachsignal auf, dass trotz der Reduktion der Störgeräusche keine Vorteile bzgl. der Sprachverständlichkeit erreicht werden können. Da diese Verzerrungen nicht vollständig vermeidbar sind, zielen aktuelle Forschungsansätze für Systeme mit einem Mikrofon darauf ab, die Verzerrungen so zu gestalten, dass sie so wenig wie möglich die Hörwahrnehmung beeinträchtigen (Vary, Heute und Hess, 1998; Gustafsson, 1999; Rohdenburg, Hohmann und Kollmeier, 2005; Goetze, Mildner und Kammeyer, 2006). Ein großer Vorteil ergibt sich, wenn Systeme über mehr als ein Mikrofon verfügen (Abbildung 1b). Räumlich getrennte Sprach- und Störgeräuschquellen kommen in unterschiedlichen Zeitabständen an den Mikrofonen an. Intelligente Signalverarbeitungsstrategien können dies ausnutzen, um eine bessere Trennung zwischen gewünschten und ungewünschten Signalanteilen zu erreichen, indem räumliche Richtungen, aus denen vornehmlich Störgeräusche kommen, abgeschwächt werden (Bitzer und Simmer, 2001; Goetze, Mildner und Kammeyer, 2006; Rohdenburg, Goetze, Hohmann et al., 2008).

Die Einsatzmöglichkeiten solcher Technologien im Büroumfeld reichen dabei von der Verwendung von Telefonen und Diktiersystemen in lärmbehafteter Umgebung bis hin zu Videokonferenzsystemen. Insbesondere die Verfahren mit mehrkanaligen Signalverbesserungsstrategien sind hier jedoch noch Gegenstand aktueller Forschung und haben bisher nur vereinzelt Anwendung in marktfähigen Geräten gefunden.

## KOMPENSATION VON HÖRVERLUSTEN

Etwa 16% der Bevölkerung in Europa ist von einer Hörstörung betroffen. Obwohl Schwerhörigkeit mit dem Alter zunimmt, geht man davon aus, dass etwa die Hälfte der Schwerhörigen noch im berufsfähigen Alter ist<sup>1</sup>. Jeder Zweite über 65 Jahren gibt an Probleme beim Hören und bei der Kommunikation zu haben.

Abbildung 2 verdeutlicht die Verteilung der unterschiedlichen Abstufungen von Schwerhörigkeit in Deutschland. Wie schematisch angedeutet leidet der überwiegende Teil der Betroffenen an leichter Schwerhörigkeit, die sich vor allem dadurch auszeichnet, dass Kommunikationsprobleme auftreten, wenn die äußeren akustischen Bedingungen nicht optimal sind. In dieser Gruppe ist nur ein geringer Anteil mit Hörgeräten versorgt. Zwar steigt die Versorgungsrate mit dem Grad der Schwerhörigkeit, aber erst bei schweren Hörverlusten tragen mehr als die Hälfte der Betroffenen Hörgeräte. Die Gründe hierfür sind neben den hohen Anschaffungskosten, nicht zufrieden stellender Anpassung und Stigmatisierung auch Probleme im Berufsalltag, die durch die Inkompatibilität zwischen Hörgeräten und im Betrieb etablierten Kommunikationssystemen (z.B. Telefon, Headsets, Kopfhörer, Gehörschutz) bedingt sind und die das Tragen von Hörgeräten prinzipiell nicht ermöglichen.

---

<sup>1</sup> <http://www.german.medical.hear-it.org/Ursachen-von-Horverlust>

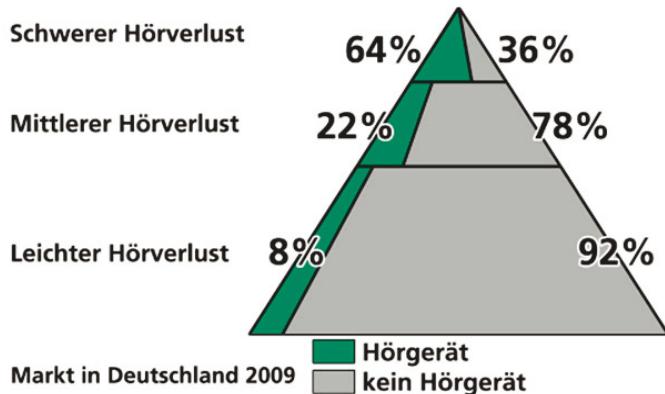


Abbildung 2: Hörgeräteversorgungsrate für leichte, mittlere und schwere Hörverluste in Deutschland.

## HÖRVERLUSTKOMPENSATION IN KOMMUNIKATIONSSYSTEMEN

Die geringe Versorgungsrate und die Inkompatibilität von Hörgeräten und Kommunikationssystemen erfordern innovative Ansätze, wie betroffenen Personen die Kommunikation am Arbeitsplatz erleichtert oder sogar erst wieder zugänglich gemacht werden kann. Die Algorithmen, die eine individuelle Kompensation von Hörverlusten ermöglichen, sind dabei durch die Entwicklung in Hörgeräten gut erforscht und bieten Hörgeräteträgern in vielen Situationen eine gute Unterstützung. Das Prinzip besteht darin, frequenzabhängig leise Signalanteile zu verstärken, die aufgrund der erhöhten Hörschwelle nicht hörbar wären, deutlich hörbare Signalanteile der gleichen Frequenz werden nicht weiter verstärkt, um eine unangenehm hohe Lautstärke zu vermeiden (Dynamikkompression). Die optimalen Parameter der Dynamikkompression sind dabei individuell sehr unterschiedlich. Dies liegt unter anderem daran, dass einerseits die Form der Hörschwelle meist frequenzabhängig und individuell stark unterschiedlich ist, und andererseits auch überschwellige Wahrnehmungsstörungen in

sehr unterschiedlichen Ausprägungen auftreten können (z.B. erhöhte Lärmempfindlichkeit oder schlechtere räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen). Daher ist die Anpassung von Hörgeräten in der Regel ein sehr individueller und langwieriger Prozess, bei dem in mehreren Anpassssitzungen und Gewöhnungsphasen die Parameter durch einen professionellen Hörgeräteakustiker immer weiter optimiert werden.

Sollen nun ähnliche Signalaufbereitungsverfahren in alltäglichen Kommunikationssystemen für den Arbeitsalltag eingesetzt werden, besteht die technische Herausforderung nicht in der Entwicklung der Algorithmen selbst, sondern vielmehr darin, wie die Parameter individuell eingestellt werden können, da eine professionelle Anpassung nicht praktikabel ist. Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen daher verschiedene Verfahren, die eine schnelle, selbständige und dennoch akkurate Anpassung erlauben und somit den Einsatz von Hörunterstützung in Kommunikationssystemen erst ermöglichen (z.B. Irandoost, 2011).

Im Folgenden werden Ergebnisse einer Studie beschrieben, in denen hörunterstützende Technologie in Festnetztelefonen implementiert und evaluiert wurde. Die Anpassung für die einzelnen Probanden wurde durch eine selbständige Auswahl aus einem Satz typischer Einstellungen (Presets) von Hörverlustkompensation bei altersbedingter Schwerhörigkeit vorgenommen. Altersbedingte Schwerhörigkeit zeichnet sich in den meisten Fällen durch eine mit der Frequenz ansteigende Hörschwelle aus, d.h., hohe Frequenzen werden schlechter wahrgenommen, während die Wahrnehmung tiefer Frequenzen weitestgehend normal bleibt. Die Presets wurden daher so gestaltet, dass sie zehn verschiedene Grade an Verstärkung von höheren Frequenzen abdeckten. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, einem Gespräch über das Telefon zu folgen und dabei das Preset auszuwählen, das für sie individuell am angenehmsten war.

| Subject<br>(Gender) | Ear   | PTA / dB | Mean<br>Preset | Beneficial<br>or not |
|---------------------|-------|----------|----------------|----------------------|
| 1(male)             | left  | 43       | 1              | no                   |
|                     | right | 53       | 4              | yes                  |
| 2(male)             | left  | 43       | 4              | yes                  |
|                     | right | 41       | 2              | yes                  |
| 3(female)           | left  | 23       | 3              | yes                  |
|                     | right | 18       | 3              | yes                  |
| 4(male)             | left  | 55       | 5              | yes                  |
|                     | right | 56       | 5              | yes                  |
| 5(female)           | left  | 38       | 1              | no                   |
|                     | right | 30       | 1              | no                   |
| 6(male)             | left  | 22       | 3              | no                   |
|                     | right | 25       | 1              | no                   |
| 7(male)             | left  | 37       | 6              | yes                  |
|                     | right | 33       | 6              | yes                  |
| 8(female)           | left  | 31       | 1              | no                   |
|                     | right | 38       | 1              | no                   |

Tabelle 1: Evaluationsergebnisse der Hörunterstützung im Telefon für alle Probanden.

Die Auswahl erfolgte über das Zifferblatt (0-9) des Telefons. Von den acht teilnehmenden Probanden (25-76 Jahre) waren sechs altersschwerhörig und zwei zeigten eine Hörstörung, die gerade im Sprachbereich ausgeprägt war. Alle Probanden besaßen ein Hörgerät, das während des Auswahlprozesses nicht getragen wurde. In einem Vergleichstest wurde dann das Telefon mit integrierter Hörunterstützung mit dem individuell angepassten Hörgerät in der Telefonsituation verglichen. Die Tests fanden in ruhiger Umgebung statt, um den Einfluss äußerer Störgeräusche zu verhindern. Beide Ohren aller Probanden wurden getrennt getestet. Die Ergebnisse der Messreihe sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Hörverluste der Probanden sind als pure-tone average (PTA) angegeben, welcher den mittleren Hörverlust bei 0,5, 1 und 2 kHz widerspiegelt. Die vierte Spalte gibt das im Mittel eingestellte Preset wieder, wobei 1 für das Preset steht, das keine Hochtonverstärkung enthält (normale Telefonübertragung) und die

Hochtonverstärkung mit steigender Presetzahl ansteigt. Es ist erkennbar, dass in 10 von 16 Fällen ein von 1 verschiedenes Preset bevorzugt wurde, d.h., dass die Hörunterstützung im Telefon gegenüber der normalen Telefonübertragung ohne Verarbeitung bevorzugt wurde. Im Allgemeinen stellten sich Probanden mit einem stärkeren Hörverlust eine größere Verstärkung (ein höheres Preset) ein. Die letzte Spalte in Tabelle 1 gibt die Ergebnisse des zweiten Tests wieder, in dem die Probanden angaben, ob die integrierte Hörunterstützung ggü. dem eigenen Hörgerät bevorzugt wurde. Dabei gaben die Probanden in 9 der 16 Fälle an, dass die integrierte Hörunterstützung gegenüber dem eigenen Hörgerät bevorzugt wurde. Dieses Ergebnis ist besonders interessant, da es zeigt, dass durch die Auswahl aus einem sehr begrenzten Satz an Presets bereits eine gute Unterstützung erreicht werden kann, die in Telefonsituationen der Unterstützung durch individuell angepasste Hörgeräte gleichwertig oder sogar überlegen ist. Dieses Ergebnis ist auch dadurch begründet, dass einige der Probanden nach eigener Angabe in der Regel ohne Hörgerät telefonieren, da sie Schwierigkeiten bei der Ankopplung von Telefonhörer und Hörgerät haben. Da diese Inkompatibilität wie oben erwähnt ein Grund für das Nichtverwenden von Hörgeräten am Büroarbeitsplatz ist, deuten die Messergebnisse an, dass ein großes Potenzial in hörunterstützenden Technologien liegt, die direkt in Kommunikationssysteme integriert werden, und dass eine Anpassung an individuelle Hörverluste in bestimmten Anwendungsfällen bereits durch einfache auf den Anwendungsfall optimierte Presets erfolgen kann.

## VORHERSAGE VON KOMMUNIKATIONSQUALITÄT

Im Bereich der akustischen Planung von Gebäuden, Einrichtungen und Kommunikationsumgebungen wird vor allem auf präzise messbare physikalische Größen zurückgegriffen, wie z.B. den Schallpegel oder die Nachhallzeit. Diese Messgrößen geben die Hörwahrnehmung des Menschen jedoch nur begrenzt wieder und führen ggf. zu falschen Planungsgrundlagen. So ist es bspw. möglich, dass verschiedene Geräusche mit demselben physikalischen Pegel völlig andere empfundene Lautstärken hervorrufen. Auch die Verständlichkeit von Sprache hängt von vielen Parametern ab, deren Zusammenwirken bei der Sprachwahrnehmung nicht direkt physikalisch messbar ist. Aus diesem Grund werden vermehrt auch auf Hörmodellen basierte Messverfahren in der Planung von Raumakustik eingesetzt. Ein weit verbreitetes Beispiel ist der Sprachübertragungsindex (Speech Transmission Index, STI, siehe Steeneken und Houtgast, 1980; IEC, 2003). Er basiert auf einer Messmethodik, in der festgestellt wird, wie gut zeitliche Fluktuationen, die wichtige Informationsträger von Sprache sind, in einem Übertragungssystem erhalten bleiben, z.B. bei Wiedergabe von Sprache durch einen Bürroraum. Dabei wird ein Messsignal abgespielt und an der Stelle des Empfängers aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen dem Messsignal und dem aufgezeichneten Signal gibt dann Aufschluss über die Energieverhältnisse von gewünschter Sprache und Störgeräuschen sowie der Nachhallzeit, so dass die zu erwartende Sprachverständlichkeit abgeschätzt werden kann. Dabei werden wichtige Eigenschaften des menschlichen Gehörs, wie etwa die frequenzabhängige Hörschwelle, die gegenseitige Maskierung benachbarter Frequenzen, die Maskierung von Sprache durch Störgeräusche und der Einfluss der Verzerrung von Sprache durch Raumhall, berücksichtigt. Die Präzision der Vorhersagen des STI und seine Überlegenheit ggü. einfachen physikalischen Messgrößen sind also vor allem darin begründet, dass die wesentlichsten Eigenschaften des Gehörs in der

Berechnung berücksichtigt werden. Trotz dieser Vorteile ergeben sich Grenzen in der praktischen Anwendbarkeit des STI. Zum einen ist zur Ermittlung des STI immer das Abspielen und Aufnehmen eines Messsignals notwendig, so dass eine regelmäßige Überprüfung der Raumakustik nur mit hohem Aufwand und mit einer Unterbrechung des Arbeitsalltags möglich ist. Zum anderen sind wichtige Eigenschaften des auditorischen Systems, wie etwa das binaurale (zweiohrige) Gehör des Menschen, nicht berücksichtigt, woraus sich teilweise erhebliche Falschaussagen des STI ergeben. Beide Formen der Limitation des STI sind aktuelle Forschungsfelder, aus denen einige Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

## **REFERENZLOSE ABSCHÄTZUNG DES STI**

Das oben geschilderte Prinzip des STI erfordert die genaue Kenntnis des Testsignals und des aufgenommenen Signals, da nur dann eine genaue Aussage über die Verhältnisse von Sprach- und Störennergie als Grundlage für die weitere Berechnung vorliegt. Das Testsignal dient also als Referenz, deren Störung durch das aufgenommene Signal beschrieben werden kann. Die Tatsache, dass eine Referenz bekannt sein muss, verhindert prinzipiell, dass der klassische STI für eine regelmäßige oder gar kontinuierliche Überwachung der Kommunikationsqualität zum Einsatz kommt. In der Praxis ist das gewünschte Sprachsignal, das durch ein Übertragungssystem gestört wird nicht bekannt, sondern es liegt lediglich das gestörte Signal am Eingang eines Mikrofons vor (vgl. Abschnitt zu Störgeräuschbefreiung).

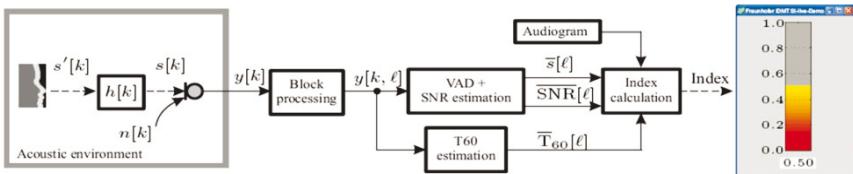


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Systems zur referenzlosen STI-Schätzung. Die einzelnen Blöcke symbolisieren die Verarbeitungsschritte vom Mikrofonsignal (Kreis links) bis zum Index (rechts).

Zur Lösung dieses Problems wurde ein System entwickelt, das auf den Berechnungsvorschriften des STI beruht und ebenfalls die zwei wesentlichen Eingangsparameter Signal-Rausch-Abstand (Energieverhältnis zwischen Sprache und Rauschen, engl. signal-to-noise ratio [SNR]) und Nachhallzeit (T60) verwendet. Das System berechnet diese Größen jedoch nicht auf Grundlage einer bekannten Referenz, sondern schätzt diese aus einem mit einem Mikrofon aufgenommenen Signal ab. Die schematische Darstellung in Abbildung 3 zeigt, dass zunächst ein ähnliches Problem besteht wie in der einkanaligen Störgeräuschbefreiung, da aus einem gemischten Signal abgeschätzt werden muss, ob Sprache anwesend ist (engl. voice-activity detection [VAD]) und wenn ja, welche Frequzanteile Sprache und welche Störgeräusche sind. Aus den geschätzten Parametern SNR und T60 wird schließlich der STI berechnet. Dabei kann optional auch ein Audiogramm berücksichtigt werden, falls dieses als zusätzliche Information vorliegt, um dadurch auch die erhöhte Hörschwelle bei Schwerhörigkeit zu berücksichtigen (Rennies, Albertin, Goetze et al., 2010). Da die Abschätzung in kurzen Zeitblöcken erfolgt, ist eine Abschätzung des STI und damit eine Überwachung der Kommunikationsqualität quasi in Echtzeit möglich, so dass sich ändernde akustische Bedingungen und

eventuelle Einbußen der Sprachqualität detektiert und quantifiziert werden können<sup>2</sup>.

Abbildung 4 zeigt eine exemplarische Antwort des Systems, wenn 1 Minute laufender Sprache bei konstantem Pegel durch ein Störgeräusch überlagert wird, dessen Pegel über die Zeit ändert. Aufgetragen ist der geschätzte Index über die Zeit, der alle 2 s neu berechnet wurde. Das Störgeräusch hatte zunächst einen relativ geringen Pegel, so dass der Sprachpegel 15 dB oberhalb des Rauschens lag (d.h., der SNR war 15 dB). Nach 20 s wurde der Pegel des Rauschens um 5 dB erhöht (SNR = 10 dB) und nach weiteren 20 s um weitere 10 dB (SNR = 0 dB). Nach jeweils weiteren 20 s wurde der Störgeräuschpegel in zwei Schritten wieder auf seinen ursprünglichen Wert verringert. Es ist erkennbar, dass die Antworten des Systems den äußeren Änderungen der akustischen Umgebung (dem Pegel des Rauschens) gut folgen. In Phasen von konstantem Störgeräusch ist die Antwort des Systems relativ konstant, abgesehen von kleineren Abweichungen, welche durch die zeitlichen Fluktuationen des Sprachsignals (und damit der Schätzwerte) begründet sind. Der Störfaktor Rauschen kann vom System also prinzipiell bewertet werden.

---

<sup>2</sup>[http://www.idmt.fraunhofer.de/eng/press\\_media/download/product\\_information/09\\_si\\_live\\_demo\\_en.pdf](http://www.idmt.fraunhofer.de/eng/press_media/download/product_information/09_si_live_demo_en.pdf)

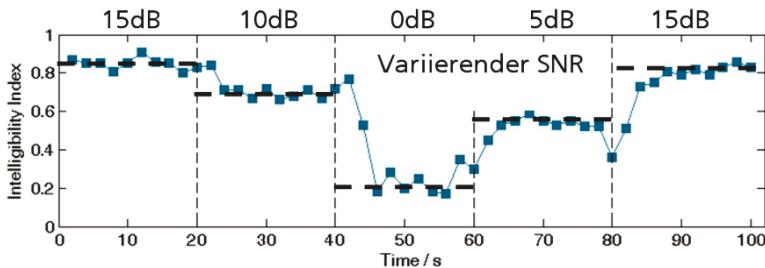


Abbildung 4: Antwort des referenzlosen STI-Schätzers auf laufende Sprache, welche durch ein Störgeräusch überlagert ist, dessen Pegel sich alle 20 s ändert (gestrichelte Linien).

Um die Anwendbarkeit des Systems weiter zu validieren, wurden in einer weiteren Testreihe (Schepker, 2011; Schepker, Rennies, Holube et al., 2011) die für jeden Zeitblock geschätzten STI-Werte mit denen verglichen, die mit den *berechneten* anstatt den *geschätzten* Werten ermittelt wurden. Um allgemeinere Aussagen treffen zu können, wurden verschiedene Arten von Störgeräuschen und verschiedene Arten der zeitlichen Pegeländerungen der Störgeräusche getestet. Zusätzlich wurden verschiedene SNR verwendet und jede Bedingung mehrmals wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Werte sicher zu stellen. Wie zuvor diente laufende Sprache, die von den verschiedenen Störungen überlagert wurde, als Testsignal.

Die Gegenüberstellung der geschätzten und berechneten (theoretischen) STI-Werte (in Prozent) ist in Abbildung 5a) dargestellt. Die durchgezogene Linie symbolisiert die perfekte Abbildung, d.h. bei optimaler Übereinstimmung sollten alle Messwerte auf dieser Linie liegen. Die gestrichelte Linie gibt die beste Anpassung einer Gerade mit Steigung 1 an die Daten wieder. Wie zu erkennen ist sind die Abweichungen zur idealen Abbildung sehr gering (Abweichung [Bias] 2.6%) und alle Messpunkte liegen in ihrer unmittelbaren Umgebung. Dies drückt sich auch in der hohen Korrelation aus ( $R^2 = 0,943$ ). Die

blockweise Abschätzung des STI für Sprachen in verschiedenen Arten von Hintergrundlärm kann also mit hoher Präzision erfolgen. Der letzte Teil der Studie (Schepker, 2011; Schepker, Rennies, Holube et al., 2011) beschäftigte sich mit der Frage, inwieweit das System zur Schätzung des STI in der Lage ist subjektiv wahrgenommene Höranstrengung vorherzusagen. Hierfür wurden 22 normalhörende Probanden aufgefordert, die Höranstrengung eines laufenden Sprachsignals mit variierendem Hintergrundgeräusch zu bewerten.

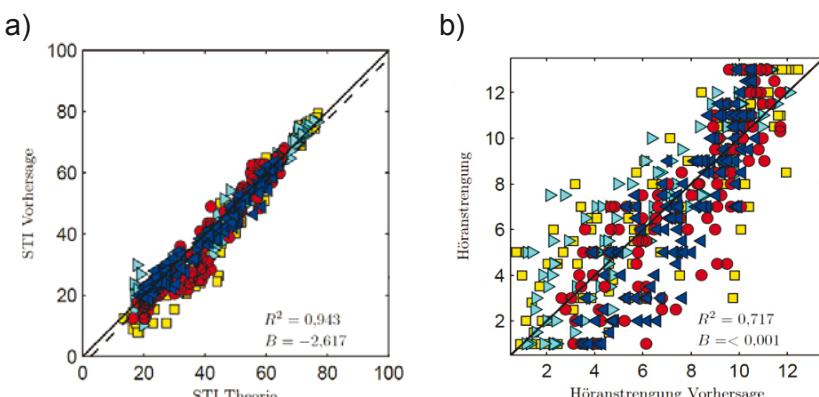


Abbildung 5a: Gegenüberstellung von geschätztem und berechnetem (theoretischem) STI. Unterschiedliche Symbole repräsentieren unterschiedliche Arten von zeitlich veränderlichen Störgeräuschen.

Abbildung 5b: Gemessene und durch das System vorhergesagte Höranstrengung für dieselben Störgeräuschbedingungen wie in Abbildung 5a)..

Die Bewertung wurde anhand einer 13-stufigen Skala von mühelos (1) bis extrem anstrengend (13) durchgeführt und erfolgte kontinuierlich, d.h. die Probanden bewegten einen „Slider“ entlang der Skala und bewerteten jeweils die momentan empfundene Höranstrengung. Änderungen des Störgeräusches hatten in der Regel Änderungen der Höranstrengung zur Folge,

worauf die Probanden entsprechend durch Justierung des Sliders reagierten. Dieselben Mischungen von Sprache und Rauschen wurden anschließend durch das System bewertet. Die abgeschätzten Indizes wurden mit den subjektiven Daten korreliert und eine lineare Abbildung der Daten auf die Indizes berechnet. Die mit dieser Abbildung transformierten Werte sind als vorhergesagte Höranstrengung in Abbildung 5b) den tatsächlichen Messwerten gegenüber gestellt. Verschiedene Symbole stellen erneut unterschiedliche Störgeräuschbedingungen dar, während die durchgezogene Linie einer idealen Vorhersage entspricht. Es ist zu erkennen, dass die Streuung insgesamt größer ist als beim Vergleich zwischen theoretischem und geschätztem STI (Abbildung 5a). Dies ist nicht verwunderlich, da Höranstrengung eine in hohem Maße subjektive Wahrnehmung ist und sich die Probanden teilweise stark unterschieden. Der Anspruch eines Systems wie dem referenzlosen STI ist es daher stets, die generellen Trends derart komplexer Wahrnehmungsgrößen wiedergeben zu können. Dass dies der Fall ist, zeigt die erneut hohe Korrelation ( $R^2 = 0,717$ ). Das System ist somit in der Lage subjektive Wahrnehmungsdaten vorherzusagen, ohne dabei eine bekannte Referenz vorauszusetzen. Dadurch ergeben sich völlig neue Anwendungsmöglichkeiten von Hörmustern im Büroumfeld. Diese liegen bspw. in der visualisierten Rückmeldung an den Sprecher in Videokonferenzsystemen bzgl. der eigenen Verständlichkeit beim Empfänger, so dass letzterer nicht mehr aktiv in die Kommunikation eingreifen muss, wenn die Verständlichkeit zu schlecht wird. Weitere Möglichkeiten bestehen in der automatischen Steuerung von Soundmasking-Systemen, die bspw. nur dann aktiviert werden, wenn die Verständlichkeit des Büronachbarn *zu gut* wird und die eigene Konzentrationsfähigkeit mindern würde. Eine solche bedarfsangepasste Steuerung könnte den Lärmpegel und damit die Belastung der Mitarbeiter minimieren.

## **VORHERSAGE BINAURALER SPRACHVERSTÄNDLICHKEIT**

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt ist der STI in der Lage den Einfluss wichtiger Faktoren wie SNR und Nachhallzeit auf die Sprachwahrnehmung gut wiederzugeben. Andere Faktoren bleiben jedoch unberücksichtigt. Einer davon ist die Wahrnehmung von räumlich verteilten Schallquellen. Der Mensch ist mit erstaunlicher Genauigkeit in der Lage Informationen aus komplexen akustischen Szenen zu extrahieren (z.B. Gespräch in einer lauten Bar. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass mit zwei Ohren Schall empfangen wird. Wie schon in Abbildung 1b) dargestellt erreichen im Raum verteilte Schallquellen die beiden Ohren (Mikrofone) mit unterschiedlicher Verzögerung. Zusätzlich erfolgt eine Abschattung durch den Kopf, so dass der Pegel auf dem der Quelle abgewandten Ohr in der Regel niedriger ist als auf dem zugewandten Ohr. Diese Effekte führen dazu, dass enorme Gewinne in der Sprachverständlichkeit erreicht werden können, wenn Sprache und Störgeräusch aus unterschiedlichen räumlichen Richtungen präsentiert werden. Daten aus einer Studie von Beutelmann und Brand (2006) verdeutlichen dieses Phänomen. Gefüllte Kreise in Abbildung 6 zeigen Sprachverständlichkeitsschwellen, das heißt die SNR, bei denen 50% der Wörter verstanden werden können, die für eine frontale Sprachquelle ( $0^\circ$ ) und eine Störquelle aus verschiedenen Richtungen in der Horizontalebene gemessen wurden. Messungen wurden in einem schallarmen Raum (links) und einem Büro (rechts) durchgeführt. In beiden Fällen ist zu erkennen, dass eine räumliche Trennung von Sprach- und Störsignal eine erhebliche Absenkung der Schwelle zur Folge hat, d.h., dass der Proband bei einem wesentlich höheren Rauschpegel immer noch die gleiche Verständlichkeit zeigt. Dieser Effekt tritt auch signifikant in Büroräumen auf, wenngleich der Gesamteffekt reduziert ist.

Der STI wurde für frontale Sprachpräsentation entwickelt. Die Vorhersagen des STI (horizontale Linien in Abbildung 6) für räumlich getrennte Schallquellen stimmen daher nur für ebenfalls frontale Störung mit den Messdaten überein, während bei anderen Störgeräuschrichtungen erheblich Abweichungen auftreten. In der Praxis könnte dies bei richtungsabhängigen Schallquellen ungenaue Planungsvorgaben zur Folge haben. Beutelmann und Brand (2006) entwickelten daher ein Modell, dass die binaurale Verarbeitung des menschlichen Gehörs nachahmt.

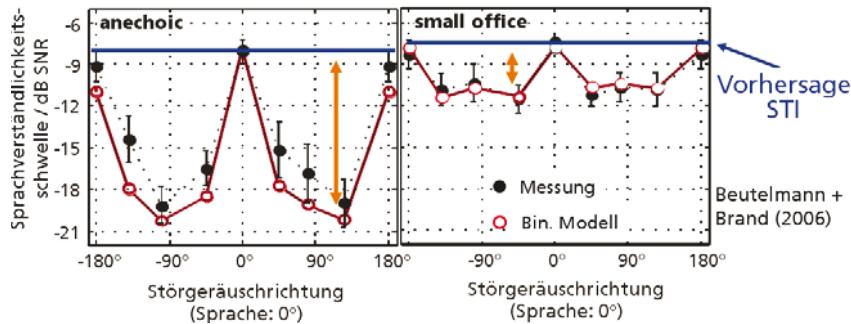


Abbildung 6: Sprachverständlichkeitsdaten (gefüllte Kreise) und –vorhersagen mit dem Modell von Beutelmann und Brand (offene Kreise) und dem STI (horizontale Linie).

Offene Kreise in Abbildung 6 stellen die entsprechenden Vorhersagen dar, die in allen Bedingungen gut mit den Messdaten übereinstimmen. Aufgrund seiner erhöhten Komplexität ist das Modell bisher zwar nicht Echtzeitfähig und somit noch nicht wie das oben beschriebene System zur kontinuierlichen Überwachung von Sprachqualität geeignet. Die erhöhte Präzision und aktuelle Forschungsarbeiten zur noch generellen Anwendbarkeit (Rennies, Brand, Kollmeier, 2011) lassen jedoch auf ein hohes Potenzial der binauralen Modelle in der akkurate Planung von Büroraumakustik hoffen.

## ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Trotz des technischen Fortschritts ist akustische Kommunikation in Büroumgebungen noch nicht optimal. Äußere Störfaktoren wie Nebengeräusche und schlechte Raumakustik schränken die Kommunikationsfähigkeit ein, was insbesondere für den beachtlichen Anteil von schwerhörenden Mitarbeitern erhebliche Probleme aufwirft und diese in Extremfällen sogar von der Kommunikation mit im Betrieb etablierten Systemen ausschließt. Technische Lösungen zur Unterstützung von akustischer Kommunikation sind daher unabdingbar. Hierfür wurden verschiedene Ansätze vorgestellt. Ein Bereich befasst sich mit der Befreiung des zu Sprachsignals von unerwünschten nach Anteilen wie z.B. Lärm oder Nachhall. Dabei sind besonders gute Ergebnisse zu erzielen, wenn mehr als ein Mikrofon verwendet wird, da dann das System (ähnlich wie das menschliche Gehör) in der Lage ist eine Richtung, aus der vornehmlich Störgeräusch kommt, auszublenden. Weitere Ansätze zielen auf eine individuelle Kompensation von Hörverlusten ab, die direkt in Kommunikationssysteme integriert ist. Dadurch kann nicht nur die Problematik der geringen Hörgeräteversorgungsrate und der Inkompatibilität mit gängigen Geräten umgangen werden. Der konkrete durch das Gerät vorgegebene Nutzungskontext, beispielsweise bei Integration in einem Telefon, erlaubt zudem auf den Anwendungsfall spezifisch zugeschnittene Lösungen. Die Herausforderung besteht hier hauptsächlich in der Anpassung der Kompensationsparameter ohne professionelle Unterstützung. Erste Studien zeigen jedoch viel versprechende Ergebnisse und verdeutlichen damit das Potenzial, die Kommunikation für Schwerhörende am Arbeitsplatz zu verbessern. Als weiterer Bereich wurden Hörmodele vorgestellt, die die menschliche Sprachwahrnehmung vorhersagen können. Solche Modelle sind in ihrer Aussagekraft einfachen, technischen Maßen deutlich überlegen und finden daher bereits Anwendung in der raumakustischen Planung. Aktuelle Ansätze der angewandten

Hörforschung zielen darauf ab, etablierte Verfahren (z.B. STI) in referenzlose Echtzeitanwendungen zu überführen, um damit neue Anwendungsfelder wie die kontinuierliche Überwachung der Kommunikationsqualität zu erschließen. Fortlaufende Verbesserungen der zugrunde liegenden Hörmodelle schließen mittlerweile auch Wahrnehmungen in komplexen akustischen Situationen mit räumlich verteilten Schallquellen ein. Der Einsatz solcher weit entwickelten Modelle wird die Präzision von raumakustischen Planungen und die Evaluation von Kommunikationsumgebungen in Zukunft erheblich verbessern.

## LITERATUR

- Bitzer, J. und Simmer, K.U. (2001). Superdirective microphone arrays. In M. S. Brandstein and D. Ward, editors, *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications*, Kapitel 2, pp. 19–38. Springer-Verlag.
- Bormann, V., Sust, C.A., Heinecke-Schmitt, R., Fuder, G. und Lazarus, H. (2005). Schwerhörigkeit und Sprachkommunikation am Arbeitsplatz. Fb 1041 – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Wirtschaftsverlag NW, Dortmund- Berlin-Dresden.
- Goetze, S., Kallinger, M. und Kammeyer, K.-D. (2005). Residual echo power spectral density estimation based on an optimal smoothed mi-salignment for acoustic echo cancelation. Int. Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC-2005), Eindhoven, Niederlande
- Goetze, S., Mildner, V. und Kammeyer, K.-D. (2006). A psychoacoustic noise reduction approach for stereo hands-free systems. In Audio Engineering Society (AES), 120. Convention, Paris, Frankreich
- Gustafsson, S. (1999). Enhancement of audio signals by combined acoustic echo cancellation and noise reduction. Dissertation, RWTH Aachen, Wissenschaftsverlag Mainz, Aachener Beiträge zu digitalen Nachrichtensystemen, Band 11.
- IEC (2003). Sound System Equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Standard IEC 60268-16 (International Electrotechnical Commission).
- Irandoost, A. (2011). Entwicklung und Evaluation eines Verfahrens zur Personalisierung von Mediendaten für leichte bis mittelgradige Schwerhörigkeit. Bachelorarbeit, Jadehochschule Oldenburg + Fraunhofer IDMT, Oldenburg, 2011.
- Rennies, J., Albertin, E., Goetze, S. und Appell, J.-E. (2010). Automatic live monitoring of communication quality for normal-hearing and hearing-impaired listeners. In Miesenberger, K.; Klaus, J.; Zagler, W. und Karshmer, A. (ed.) *Computers Helping People with Special Needs, ICCHP 2010, Part II, LNCS 6180*, Springer – Berlin/Heidelberg, pp. 568-575.
- Rennies, J., Brand, T. und Kollmeier, B. (2011). Prediction of the influence of reverberation on binaural speech intelligibility in noise and in quiet. *J.Acoust.Soc.Am.*, *in press*.

- Rohdenburg, T., Hohmann, V. und Kollmeier, B. (2005). Objective perceptual quality measures for the evaluation of noise reduction schemes. In 9th International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control, 2005, pp. 169-172.
- Rohdenburg, T., Huber, R., van Hengel, P., Bitzer, J. und Appell, J.-E. (2009). Hearing aid technology and multi-media devices. In ITG Fachtagung für Elektronische Medien, 13. Dortmunder Fernsehseminar.
- Rohdenburg, T., Goetze, S., Hohmann, V., Kollmeier, B. und Kammerer, K.-D. (2008). Combined Source Tracking and Noise Reduction for Application in Hearing Aids, 8. ITG-Fachtagung Sprachkommunikation, Aachen
- Schepker, H. (2011). Weiterentwicklung und Evaluation von Verfahren zur subjektiven und objektiven Bestimmung von Höranstrengung. Bachelorarbeit, Jadehochschule Oldenburg + Fraunhofer IDMT, Oldenburg, 2011.
- Schepker, H., Rennies, J., Holube, I. und Kollmeier, B. (2011). Kontinuierliche Messung und Vorhersage von Höranstrengung. Proc. 37th Annual Convention for Acoustics (DAGA), pp. 589-590.
- Shield, B. (2006). Evaluation of the social and economic costs of hearing impairment. Technical report, Hear-It.
- Steeneken, H.J.M. und Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. J.Acoust.Soc.Am. 67(1), pp. 318-326.
- Vary, P., Heute, U. und Hess, W. (1998) Digitale Sprachsignalverarbeitung, Teubner-Verlag, Stuttgart
- Xiong, F., Schneider, D., Goetze, S., Ewert, S., Rohdenburg, T., Appell, J.-E. (2011). Hearing-Loss Compensation in a telephone system. Proc. 37th Annual Convention for Acoustics (DAGA), pp. 377-378.

# **Medientechnik und Beschallung im Umfeld moderner Bürolandschaften**

*P. Rahe*

Akustikbüro Rahe-Kraft GmbH

*Kontakt: peter@rahe-kraft.de*

Neben Beleuchtung und Klima ist die Akustik maßgeblich für das Raumempfinden verantwortlich.

Damit ein Raum als stimmig empfunden wird, muss er über eine – seiner Nutzung, Größe und Materialität – entsprechenden Akustik verfügen.

Konferenzräume haben darüber hinaus eine ganz besondere akustische Anforderung:

Die Verständlichkeit von Sprache.

Kürzlich rief mich der Facility Manager einer mittelständischen Firma an und klagte über die „schlechte Akustik“ im Konferenzraum:

„Das Zuhören und Verstehen der Teilnehmer am gegenüberliegenden Ende des Tisches wird – besonders zur fortgeschrittenen Tageszeit – schwieriger, die Konzentration der Teilnehmer lässt nach. Die per Video-Konferenz zugeschalteten Teilnehmer sind besonders schwer verständlich, die Sprache wirkt abgehackt, man kann nur schwer ein flüssiges Gespräch führen.“

Was geht hier akustisch schief, wie kann die Situation verbessert werden?

## VERSTANDEN WERDEN

Ein Maß für die Güte der Sprachkommunikation ist der Sprachverständlichkeitsindex. Bereits in den 1980er Jahren entwickelten Tammo Houtgast und Herman Steeneken an der TNO Human Factors in Delft/Niederlande ein Verfahren, die Güte der Sprachverständlichkeit als Einzahlwert messtechnisch zu erfassen. Das Verfahren ist stetig weiterentwickelt worden und ist in die Norm IEC 60268-16 eingeflossen. Gemessen wird die gesamte Übertragungsstrecke von der Quelle bis zum Zuhörer. Alle Veränderungen des Signals – seien es klangliche Veränderungen oder durch Echos, Nachhall oder Hintergrundgeräusche verursachte Verwaschungen werden erfasst und als STI-Einzahl-Wert auf einer Skala 0-1 ausgegeben. Werte zwischen 0 und 0,3 gelten als unverständlich, zwischen 0,3 und 0,45 als „schwach“ verständlich, 0,45 - 0,6 als „angemessen“ und über 0,6 als „gut“ bzw. „ausgezeichnet“.

Für eine optimale Sprachkommunikation sollte ein STI-Wert größer 0,6 angestrebt werden.

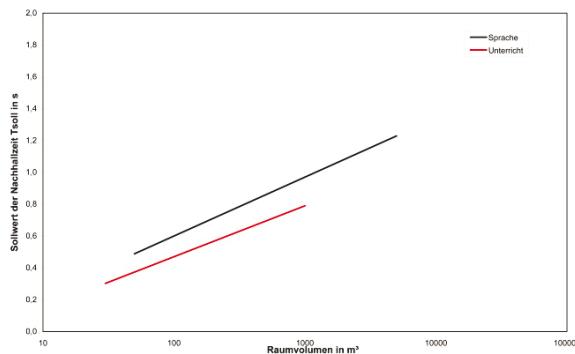
## SCHALL IM RAUM

Die Grundvoraussetzung für gute Verständlichkeit in Innenräumen ist eine der Nutzung angemessene Raumakustik. Ein Konzertsaal hat andere Anforderungen als eine Sporthalle, ein Flughafenterminal andere als ein Konferenzraum.

Die deutsche Norm DIN 18041 „*Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*“ regelt das wichtigste Kriterium der Raumakustik: die Nachhallzeit.

Als Nachhallzeit wird die Zeit bezeichnet, die der Schalldruck in einem Raum nach plötzlichem verstummen einer Schallquelle um den tausendsten Teil seines Anfangswertes abnimmt. Dies entspricht einer Pegelabnahme von 60dB.

Die DIN 18041 gibt Hinweise für die optimale Nachhallzeit, immer bezogen auf das Volumen und die geplante Nutzung des Raumes.



Grafik:Soll- Nachhallzeiten DIN 18041

In vielen Konferenzräumen ist die Nachhallzeit deutlich zu lang.

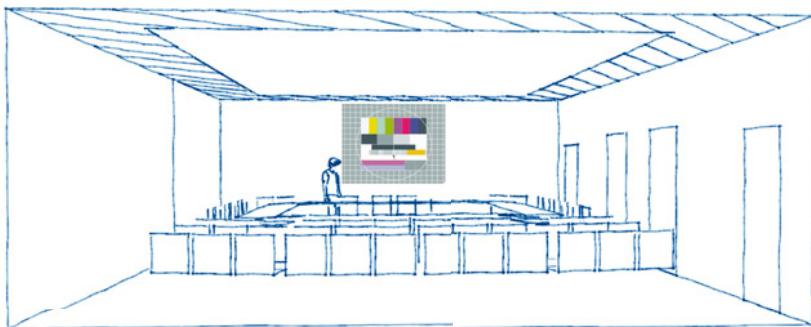
Langer Nachhall entsteht durch Reflexion des Schalls an den raumbegrenzenden Flächen. Je mehr Flächen den Schall hart zurückwerfen –Akustiker bezeichnen diese Eigenschaft als „schallhart“ – desto länger wird die Nachhallzeit im Raum.

Das Gegenteil von Reflexion ist Absorption – der Schall wird vom Bauteil aufgenommen, die Schallenergie wird in thermische oder mechanische Energie umgewandelt.

Die Kunst der optimalen akustischen Gestaltung von Räumen, die der Sprachkommunikation dienen, besteht darin, eine perfekte Kombination aus Flächen mit absorbierenden und reflektierenden Eigenschaften einzubringen.

Dem Raum muss einerseits Schallenergie entzogen werden so dass die Nachhallzeit kurz gehalten wird und andererseits muss

der Schall durch reflektierende Flächen zum letzten Platz gelenkt werden.



Grafik: Deckenspiegel und umlaufender Streifen aus Absorbern

Das Beispiel zeigt einen typischen Konferenzraum mit einem umlaufenden Absorber-Streifen und einem reflektierenden Deckenspiegel. Die schallharte Fläche reflektiert den Schall zum entferntesten Sitzplatz, der Absorber verkürzt die Nachhallzeit. Das Augenmerk muss auch auf kurze wiederkehrende Echos – so genannte „Flatterechos“ – gelegt werden. Diese können durch Absorber an einer der sich gegenüberstehenden parallelen Wände vermieden werden.

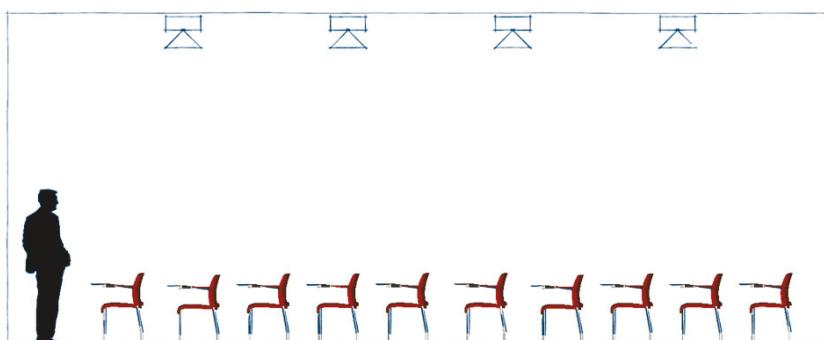
## NACHHILFE

Oft fragen Bauherren ob sich die Situation neben baulichen Maßnamen auch durch technische Hilfsmittel, etwa durch den Einbau einer Beschallungsanlage verbessern lässt.  
Die Antwort ist ein klares „Ja, aber!“.

Es gibt verschiedene konzeptionelle Ansätze durch Lautsprecheranlagen die Verständlichkeit zu verbessern.

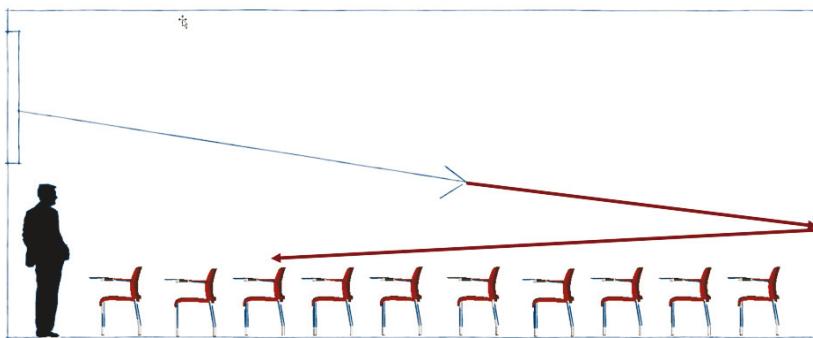
Oft werden in Konferenz-Situationen Sprechstellen-Systeme eingesetzt. Jede Sprechstelle ist – neben einem Mikrofon – mit einen eigenen Lautsprecher ausgestattet. Die prinzipbedingte hohe Anzahl dieser gleichzeitig abstrahlenden Schallquellen verbessert die Situation bei mangelhafter Raumakustik meist nicht hinreichend. Raumakustische Maßnahmen bleiben dann auch hier unvermeidbar.

Gleiches gilt für den Einsatz von Decken-Einbaulautsprechern. Die Stimme wird bei verteilten Beschallungskonzepten dieser Art zwar gleichmäßig gut im Raum verteilt, der korrekte Richtungsbezug zum Sprecher ist aber an keinem Platz möglich – der Sprecher steht vorne, man hört ihn jedoch von oben.



Grafik: Beispiel einer Deckenbeschallung ohne Richtungsbezug

Die Lokalisierung der Schallquelle im Raum ist aber ein wichtiges Kriterium – sowohl für die Sprachverständlichkeit – als auch den akustischen Komfort. Derzeit bleibt der Richtungsbezug bei allen aktuellen Beurteilungs-Verfahren der Sprachverständlichkeit außen vor. Aktuelle Forschungen untersuchen die Sprachverständlichkeit bei binauralem Hören (hören mit beiden Ohren).



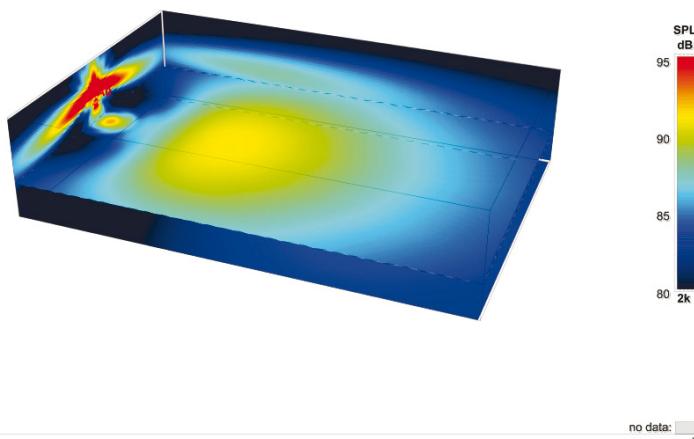
Grafik: Beispiel einer Frontalbeschallung mit gutem Richtungsbezug aber ungünstiger schallharter Rückwand

Geht es bei der Raumnutzung primär um eine Frontalsituation— also eine Vortragsituation oder um den Einsatz von Videopräsenzsystemen—kann durch die Nutzung einer Beschallungsanlage auch in halligen Räumen eine Verbesserung erreicht werden. Voraussetzung hierfür ist aber, dass die Lautsprecher eine sehr hohe Richtcharakteristik aufweisen. Der Schall soll direkt zum Ohr des Zuhörers gelenkt und Reflexionen an schallharten Flächen weitestgehend vermieden werden. Zum Einsatz kommen für diesen Anwendungsfall stark bündelnde Linienstrahler, so genannte „Line-Arrays“. Diese Lautsprechersysteme bestehen aus einer Vielzahl von Einzellautsprechern, die vertikal linienförmig übereinander

angeordnet werden. Durch diese Anordnung entsteht jenseits der Hauptachse ein starker Pegelabfall bzw. eine hohe Bündelung des Schalls entlang der Hauptachse. Je länger die vertikale Ausdehnung der Lautsprecherlinie, desto besser sind deren Bündelungseigenschaften. Linienquellen haben einen weiteren Vorteil: Der Pegelabfall auf die Entfernung ist geringer als die konventioneller Lautsprecher. Somit kann mehr Direktschall das Ohr des Zuhörers erreichen.

Die modernste Form dieser Lautsprechergattung geht noch einen Schritt weiter: Durch den Einsatz von digitalen Signalprozessoren wird das Schallfeld synthetisiert und per Software individuell auf die Beschallungssituation angepasst. Man spricht von „DSP-gesteuerten Schallzeilen“.

Incident, 0,09x0,09m<sup>2</sup>



model  
TUCT v1.0f.2

no data:  
mode

Grafik: Schallfeld einer DSP-gesteuerten Schallzeile



Grafik: Konferenzraum mit DSP gesteuerten Schallzeilen, eingebaut in die Leinwand

## GESEHEN UND GEHÖRT WERDEN

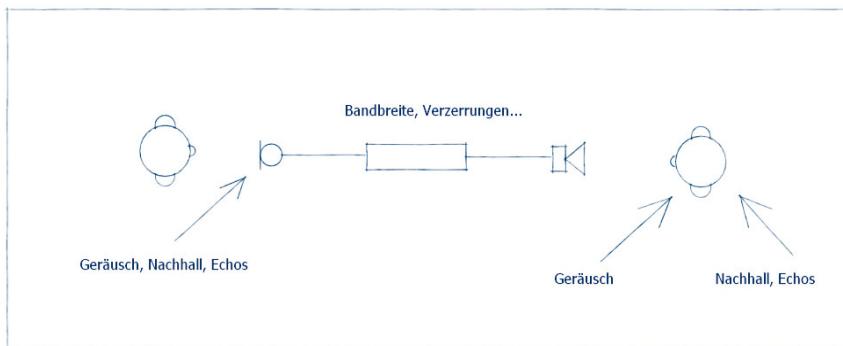
An besondere Grenzen kommen moderne Kommunikationssysteme wie Telefon- und Videokonferenzsysteme in Räumen mit mangelhafter Raumakustik. Videopräsenzsysteme sollen die Teilhabe an einer eins-zu-eins Situation ermöglichen. Bild und Ton werden über Internetverbindungen übertragen und im Konferenzraum über Flachbildschirm und Lautsprecher wiedergegeben. Der Rückkanal wird wiederum über Kamera und Mikrofon aufgenommen. Um zu verhindern, dass das über Raum-Lautsprecher wiedergegebene Wort des entfernten Teilnehmers wieder zurück zum Sender übertragen wird, werden die Signale durch einen Signalprozessor analysiert und das betreffende Signal (welches schon einmal übertragen wurde) wird unterdrückt. Diese Echo Unterdrückung oder „Echo Canceling“ genannt, kommt schnell an technische Limits.

Je schlechter die raumakustische Situation, desto schwerer findet der Algorithmus das zu unterdrückende Signal in dem durch Nachhall oder Echos verwaschenen Signal. Aussetzer oder andere technische Artefakte sind die Folge, die schlimmstenfalls – wie eingangs zitiert – ein flüssiges Gespräch unmöglich machen.

## GRENZEN

Alle hier vorgestellten technischen Mittel zur Verbesserung der Sprachkommunikation in halligen Räumen kommen schnell an ihre physikalischen Grenzen. Besonders in kleinen Konferenzräumen können Beschallungssysteme die Verständlichkeit in der Regel nicht verbessern. Geeignete raumakustische Maßnahmen sind also unabdingbar und sollten frühzeitig und sorgfältig geplant werden.

Nachträglich eingebaute Maßnahmen sind meist um ein Vielfaches teurer und lassen sich ästhetisch nicht optimal in die Architektur integrieren.



Grafik: Kommunikationsweg über elektroakustische Konferenzanlage

Klangbeispiele verschiedener Raumsituationen können auf der Webseite des Autors angehört werden.  
[www.Rahe-Kraft.de/aks2011](http://www.Rahe-Kraft.de/aks2011)



# **Implikationen des demographischen Wandels für die akustische Gestaltung von Büroarbeitsplätzen**

*M. Meis<sup>1</sup> & M. Buschermöhle<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Hörzentrum Oldenburg GmbH

<sup>2</sup>HörTech Oldenburg gGmbH

*Kontakt: markus.meis@hoerzentrum-oldenburg.de*

## **ZUSAMMENFASSUNG**

In diesem Artikel werden die Implikationen des demographischen Wandels für die akustische Gestaltung von Büroumgebungen dargestellt.

In ca. 10 Jahren wird der Anteil der 50- bis 65-jährigen deutschen Erwerbstägigen von derzeit knapp 11 Millionen bis 2020 auf über 13 Millionen angewachsen sein. Das wird einem Drittel der Erwerbstägigen entsprechen. Ca. 2 Millionen Mitarbeiter im Büro werden einen behandlungsbedürftigen Hörverlust aufweisen und werden daher besondere akustische Lösungen apparativer und/oder raumakustischer Art benötigen. Neben diesen Projektionen beschäftigt sich dieser Artikel auch mit den physiologischen Grundlagen des menschlichen Hörsinns, der alterskorrelierten Hörschädigung und Screening-Verfahren zur Bestimmung der Hörfähigkeit. Die hier vorgestellten Screening Methoden sind in den Unternehmen ökonomisch einzusetzen, um Planungsgrundlagen für unternehmensseitige Interventionen im Bereich der Raumakustik und des Gesundheitsmanagements einzuleiten zu können.

## **ABSTRACT**

The implications of the demographic change for the acoustical design of office environments is shown in this article.

The proportion of German employees, aged 50 to 65 years, will be increased in the next 10 years from 11 million to over 13 million in 2020. This will be one-third of all employees. About two million of the office staff will have a hearing loss, requiring a treatment. Those people will need special acoustical solutions, such as room acoustical optimizations and/or device oriented solutions. Beside these epidemiological projections, this article deals also with the physiological basics of the human hearing sense, as well as the age related hearing loss, and screening

procedures for measuring hearing ability. The screening procedures can be used economically in order to take measurements by the company regarding room acoustics and company health managements.

## EINLEITUNG

Die Tragweite des demographischen Wandels ist vielfach als Damoklesschwert für die sozialen Sicherungssysteme aber auch für den Arbeitsmarkt diskutiert worden. Die hieraus resultierenden Implikationen für die akustische Gestaltung von Büroarbeitsplätzen wurden aber bislang nur wenig beachtet und daher in der betrieblichen Praxis unzureichend umgesetzt, was zukünftig problematisch wird: Der alternde Mitarbeiter im betrieblichen Umfeld sieht sich mit stetig wachsenden Kommunikationsanforderungen konfrontiert, die er ggf. aufgrund sensorischer Defizite immer weniger kompensieren kann. Aufgrund des demographischen Wandels wird es besonders in den nächsten 10-15 Jahren wichtig sein, aus Sicht der Unternehmen Lösungsmöglichkeiten für die Zielgruppe der 50- bis 65-jährigen Mitarbeiter zu entwickeln.

In dem vorliegenden Artikel werden Grundlagen der alterskorrelierten Höreinschränkung kurz vorgestellt und ein Screeningverfahren der Hörfähigkeit ausführlicher besprochen. Nachfolgend werden die Wirkungen schlechter akustischer Bedingungen und einer unversorgten Hörschädigung aufgezeigt. Abschließend werden Lösungsmöglichkeiten auf verschiedenen Ebenen kurz dargestellt.

## **GRUNDLAGEN DES HÖRSINNS UND DER ALTERSKORRELIERTE HÖRVERLUST**

Über das Außenohr gelangen Schallwellen in das Mittelohr, wonach sie im Innenohr in ein flüssiges Medium gelangen. Dieses besteht aus zwei Teilen, der für das Hören zuständigen Hörschnecke (Cochlea) und den Bogengängen des Gleichgewichtsorgans.

In der Schnecke laufen die Schallschwingungen vom ovalen Fenster aus als Wanderwelle durch die Spiralwindungen. Dabei verursachen sie eine Schwingung der darin befindlichen Basilarmembran. Die Region der höchsten Auslenkung dieser Membran ist dabei frequenzspezifisch. Hohe Frequenzen verursachen eine Auslenkung der Membran in der Nähe des ovalen Fensters, während tiefe Frequenzen Schwingungen in der Nähe der Schnekkenspitze verursachen. Auf der Basilarmembran befindet sich das Cortische Organ, welches mehrere Reihen von Sinneszellen beinhaltet, die Haarzellen genannt werden. Man unterscheidet dabei zwischen inneren und äußeren Haarzellen. Die inneren Haarzellen sind die eigentlichen Hörrezeptoren. Wenn die Basilarmembran zum Schwingen angeregt wird, bewegen sich die Härchen (Stereozilien) der inneren Haarzellen ebenfalls. Es kommt zu einer Reaktion, die die Bewegung der Stereozilien in eine elektrische Aktivität an der dazugehörigen Nervenfaser im Hörnerv umwandelt. Diese Nervenimpulse werden über weitere Nervenfasern schließlich zum für das Hören zuständigen Teil des Gehirns geleitet. Die äußeren Haarzellen sind nicht für das eigentliche Hören zuständig, sondern wirken als Verstärker, ohne den leise Schalle die inneren Haarzellen nicht ausreichend anregen könnten.

Das Hörvermögen des Menschen ist durch die Beschaffenheit seines Hörsystems auf einen speziellen Frequenz- und Schalldruckbereich beschränkt. Die Frequenzen, die von Menschen wahrgenommen werden können, liegen im Bereich zwischen ca. 16 Hz (tiefe Frequenzen) und 20.000 Hz (hohe

Frequenzen). In diesem Bereich können Töne wahrgenommen werden. Für die Wahrnehmung von Sprache sind vor allem Frequenzen von ca. 250 Hz bis 4 kHz wichtig. So liegt die Bandbreite des Telefonnetzes zwischen 300 Hz und 3,4 kHz um die wichtigsten sprachrelevanten Informationen zu übertragen.

Oft lässt das normale Hörvermögen im Lauf des Lebens nach, und es tritt eine Schwerhörigkeit auf. Für die vorliegende Fragestellung wesentlich ist die altersbegleitende Hörschädigung, die durch das Absterben der Haarzellen als Schallempfindungsstörung gekennzeichnet ist.

Etwa 12-14 Millionen Menschen in der Bundesrepublik Deutschland im Alter von 15-75 Jahren weisen einen versorgungsbedürftigen Hörverlust auf (Heger und Holube, 2010). Bei ca. 19% der 50 bis 60-jährigen, über 37% der 60 bis 70-jährigen sowie über 60% der über 70-jährigen kann eine Schwerhörigkeit festgestellt werden (z.B. Davis, 1989, Quaranta et al., 1996). In der Gruppe der 50-65-jährigen Personen kann bei jedem Vierten (25%) eine Schwerhörigkeit festgestellt werden.

Ob ein peripherer Hörverlust vorliegt, kann mittels eines Tonaudiogramms bestimmt werden. Dabei wird die subjektive Hörempfindlichkeit für Töne verschiedener Frequenzen mittels Präsentation über Kopfhörer bestimmt. Bei normalhörenden Menschen liegt die Hörschwelle um 0 dB HL. HL steht für „hearing level“, also Hörpegel. Obwohl die Empfindlichkeit des Menschen für verschiedene Frequenzen unterschiedlich ist, ist das Audiogramm so skaliert, dass bei allen gemessenen Frequenzen der Wert für 0 dB HL der Hörschwelle von Normalhörenden entspricht. Die gemessenen Werte werden auf der y-Achse nach unten hin aufgetragen. Je „tiefer“ auf der Achse der Wert, desto schlechter ist das Hörvermögen und desto größer ist der Hörverlust. Werte bis 20 dB HL werden im Allgemeinen noch als normalhörend bewertet. Liegt das gemessene Hörvermögen bei einer oder mehreren Frequenzen bei Werten über 20 dB HL, beginnt der Bereich der Schwerhörigkeit. Beispiele für mittlere

Tonaudiogramme in Abhängigkeit vom Alter sind in Abb.1 dargestellt.

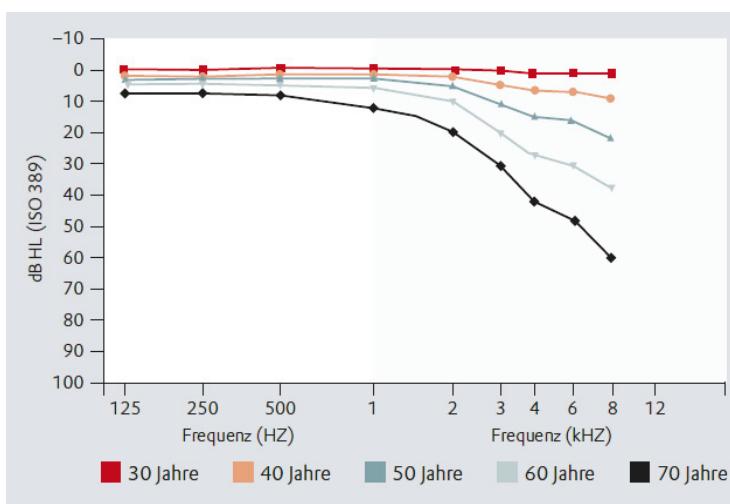


Abb. 1: Altersbezogener Hörverlust (Datenquelle: Fördergemeinschaft Gutes Hören), Abb. entnommen aus: Meis & Klink, 2010. Fachschrift 11. Schall- und Lärmwirkung, p.14. Wiesbaden: büro-forum des bso; [http://www.buero-forum.de/uploads/media/11\\_Schall-und\\_Laermwirkung.pdf](http://www.buero-forum.de/uploads/media/11_Schall-und_Laermwirkung.pdf))

Es gibt zwei grundsätzliche Arten der Schwerhörigkeit, abhängig davon, welcher Teil des Hörsystems betroffen ist. Bei einer Schallleitungsschwerhörigkeit kann der Schall nicht ungestört ins Innenohr gelangen. Eine Schallempfindungsschwerhörigkeit hingegen (auch „sensorineurale“ Schwerhörigkeit genannt) entsteht durch Schädigungen der Haarzellen im Innenohr und/oder durch Schäden am Hörnerv. Solche Schädigungen entstehen im Verlauf des natürlichen Alterungsprozesses und sind (nach dem heutigen Stand der Technik) irreparabel. Eine Schallempfindungsschwerhörigkeit äußert sich dadurch, dass Geräusche (und damit insbesondere Sprache) nicht nur leiser

sondern auch verzerrt wahrgenommen werden. Die Verzerrung kommt vor allem durch eine Schädigung der äußereren Haarzellen zustande; ist deren verstärkende Wirkung nicht mehr vorhanden, können niedrige Schallpegel nicht mehr oder nur noch extrem leise wahrgenommen werden, hohe Schallpegel hingegen werden weiterhin als laut empfunden. Sind die inneren Haarzellen geschädigt, können Töne in den betroffenen Regionen nicht mehr oder nur noch eingeschränkt wahrgenommen werden. Häufig sind vor allem hohe Frequenzen betroffen, und tiefere Frequenzen sind weniger stark beeinträchtigt. Eine Schallempfindungsschwerhörigkeit äußert sich aufgrund der verzerrten Schallwahrnehmung vor allem in einem deutlich reduzierten Sprachverstehen. Eine Schallempfindungsschwerhörigkeit macht sich häufig ab einem Alter von 50 bis 60 Jahren bemerkbar und schreitet mit zunehmendem Alter voran – daher auch die Bezeichnung Altersschwerhörigkeit (Presbyacusis). In Abb. 1 sind idealisierte gemittelte Hörverlustkurven über die Frequenzen dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Kurven gemittelte Kurven einer großen Population (einschließlich normalhörender Personen) sind. Die individuellen Hörverluste hörgeschädigter Personen haben i.d.R. andere Verläufe, insbesondere, was den Sprachbereich anbelangt.

## DER DEMOGRAPHISCHE WANDEL IN DER ARBEITSWELT BIS 2030

Der Anteil der älteren *erwerbsfähigen* Personen wird sich bis zum Jahre 2030 stark erhöhen und 2023 einen Gipfel erreichen. So wird die Gruppe der späteren Baby-Boomer der Jahrgänge von 1960 bis 1965 dazu führen, dass der Anteil der 50-65-jährigen sich von derzeit ca. 27% auf über 37% im Jahre 2030 erhöhen wird. Diese Projektionen beruhen auf Daten des Statistischen Bundesamtes aus der 12. Koordinierten

Bevölkerungsvorausberechnung (mittlere Variante, W1-UG, ab 2009 vorausberechnete Werte, vgl. die Dissertation von Lutz Schneider, 2011). Es wird also ein Zuwachs von ca. 10% an Personen zu verzeichnen sein, die im Vergleich zu jüngeren erwerbsfähigen Arbeitnehmern ein erheblich höheres Risiko haben, in Kommunikationssituationen Probleme zu haben.

Die Anzahl der 50- bis 65-jährigen deutschen *Erwerbstägigen* lag im Jahr 2000 bei 9,4 Millionen. Gemäß einer Studie des Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB, 2005) wird diese Zahl von derzeit ca. 11 Millionen bis 2020 auf über 13 Millionen angewachsen sein. Ein Drittel der Erwerbstägigen wird dann zu der hohen Altersgruppe gehören. Von diesen 13 Millionen werden gemäß obiger Projektionen ca. 3,25 Millionen einen behandlungsbedürftigen Hörverlust aufweisen. Wenn man zukünftig von einem Anteil von 60% der Informationsberufe in 10 Jahren ausgeht, würden insgesamt knapp 2 Millionen Büromitarbeiter Höreinschränkungen aufweisen und bedürften besonderer hörakustischer und raumakustischer Bedingungen im Büroumfeld.

Dieser Zuwachs hat eine ernst zu nehmende gesellschaftspolitische Bedeutung. Ältere Mitarbeiter sind hinsichtlich der Arbeitsplatzgestaltung aufgrund sensorischer Einschränkungen besonders zu berücksichtigen. Die "Ressource" der gut ausgebildeten, qualifizierten Mitarbeiter wird immer knapper und findet sich auch in den älteren Jahrgängen. Wenn man zusätzlich von einer Verschiebung des Renteneintrittsalters auf 67 Jahre, oder wie von der deutschen Bundesregierung im Jahr 2011 verlautete, auf 69 Jahre ausgeht, wird offenbar, dass der ältere Mitarbeiter bei der akustischen Planung von Büroumwelten zukünftig immer mehr berücksichtigt werden muss. Für den heutigen und insbesondere den zukünftigen Büroalltag ist die sprachliche Kommunikation über verschiedene Medien (z.B. im direkten Kundendialog) eine sehr wichtige Voraussetzung für erfolgreiche Arbeitsprozesse. Vielfach steht nicht das eigentliche Produkt im Fokus, sondern die erfolgreiche

Darstellung des Produktes und die Ergebnis- und Kundenzufriedenheit. Eine sine qua non Bedingung für die erfolgreiche Kommunikation ist die peripher-sensorische Erfassung und darauf aufbauend, die zentrale Verarbeitung von Kommunikationsinhalten. Hörgeschädigte Personen müssen für das Verstehen, Speichern und Verarbeiten einen höheren kognitiven Aufwand betreiben als nicht eingeschränkte Personen. Für die eigentliche Aufgabe/Arbeit kann nicht mehr so viel Energie verwendet werden, so dass eine Hörschädigung letztendlich auch leistungsreduzierend ist, insbesondere dann, wenn zusätzlich noch die raumakustischen Gegebenheiten mangelhaft sind (Klatte, Lachmann & Meis, 2010). An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass auch normalhörende Personen unter schlechten akustischen Bedingungen leiden und von besseren akustischen Bedingungen profitieren, jedoch haben besonders hörgeschädigte Personen höhere Anforderungen, was auch in einer Norm explizit berücksichtigt wird (DIN 18041, 2004). Bei kleinen bis mittelgroßen Räumen, die für Sprachdarbietung konzipiert sind, darf einerseits die Sprachverständlichkeit nicht durch zu hohe Nachhallzeit beeinträchtigt werden, andererseits soll durch Nachhall aber die Lautstärke des Sprechers angehoben werden. Es werden je nach Raumgröße Nachhallzeiten zwischen 0,6 und 0,8 sec. empfohlen. Bei Personen mit eingeschränktem Hörvermögen sollte dieser Wert nochmals um etwa 20 % verringert werden, also von ca. 0,4 bis 0,6 sec. Für Unternehmen ist es daher wichtig, das Ausmaß und die Verbreitung von Hörstörungen der Mitarbeiter zu erfassen, um geeignete Präventionsmaßnahmen und Interventionen einleiten zu können.

## DIAGNOSE UND SCREENING VON HÖRSTÖRUNGEN

Die Diagnose eines Hörverlustes sollte ärztlicherseits erfolgen und ist durch ton- und sprachaudiometrische Verfahren zu quantifizieren.

In größeren Betrieben kann dies idealerweise der Arbeitsmedizinische Dienst übernehmen, jedoch zeigen Erfahrungen, dass von flächendeckenden tonaudiometrischen Untersuchungen in den Unternehmen nicht auszugehen ist.

Eine mögliche einfache Lösung besteht darin, einen relevanten Hörverlust mittels einfacher und ökonomisch handzuhabender Screeningtests durchzuführen. Hierzu bietet sich z.B. der im Rahmen des EU-Projektes HearCom entwickelte Zahlentripeltest an (siehe z.B. Zokoll et al., 2012). Dieser Test ist nicht nur einfach, schnell (ca. 5 Minuten) und auch vom Mitarbeiter selbst zu bedienen, sondern hat den Vorteil, dass leise Umgebungsgeräusche weniger zu Messverfälschungen führen als bei den klassischen tonaudiometrischen Verfahren. Der Zahlentripeltest ist ein Sprachtest im Störgeräusch, der Dreierkombinationen von Ziffern als Stimuli benutzt, vgl. Abb. 2.



Abb. 2: Benutzeroberfläche des Zahlentripeltests (Version für Smartphones).

Dieser Test steht zur Verwendung durch Endbenutzer in verschiedenen Varianten zur Verfügung: als webbasierte Version ([www.HearCom.eu](http://www.HearCom.eu)), als kostenpflichtige Telefonversion (09001-217221; 0,99 € pro Anruf aus dem deutschen Festnetz), als App für iOS-Geräte von Apple (HearContrOL) sowie als PC-gestützte Version auf einem Messrechner (Oldenburger Messprogramme). Bei diesem Test wird die Verständlichkeit von Sprache in Umgebungen mit Störgeräusch getestet. Es kommt somit weniger auf die Ruhehörschwelle an, sondern vielmehr auf den Abstand von Nutz- und Störgeräusch, so dass dieser Test zwar auch ruhige Bedingungen voraussetzt, aber weit weniger empfindlich gegenüber diesen ist. Darüber hinaus ist das Sprachverstehen im Störgeräusch eine weitaus alltagsrelevantere Hörprüfung als die Tonaudiometrie. Da der Zahlentripeltest begrenztes Sprachmaterial verwendet (nur die Ziffern von 0 bis 9), bietet das Testergebnis nur eine Abschätzung der Sprachverstehens im Störgeräusch, so dass bei einem auffälligen Ergebnis auf eine

ärztliche Diagnose zur Absicherung des Befundes nicht verzichtet werden sollte.

Als Messwert wird beim Zahlentripeltest die Sprachverständlichkeitsschwelle im Störgeräusch ermittelt. Diese gibt an, bei welchem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) gerade die Hälfte der Sprache richtig verstanden wird. Zur Darstellung für den Benutzer wird das Ergebnis des Screeningtests als eine von drei Kategorien ausgegeben und kann auch als Ampelfarbe dargestellt werden:

1. „Ihr Hörvermögen bei diesem Hörtest ist normal.“ (grün)
2. „Bei diesem Hörtest verstehen die meisten Menschen etwas besser als Sie.“ (gelb)
3. „Bei diesem Hörtest verstehen die meisten Menschen deutlich besser als Sie.“ (rot)

Die Klassifikation in diese drei Kategorien hängt von der ermittelten Sprachverständlichkeitsschwelle ab.

## LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN

Veränderte Arbeitsbedingungen, eine wachsende Informationsvielfalt und damit verbunden die Notwendigkeit zu einer regelmäßigen und intensiven Kommunikation der Beschäftigten untereinander sowie mit Kunden, die oft auch über Distanzen per Telefon oder Videokonferenz geführt werden muss, stellen für viele Beschäftigte eine große Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für Hörgeschädigte und/oder ältere Mitarbeiter.

Die Wirkungen einer schlechten Akustik auf die Leistungsfähigkeit und Befindlichkeit besonders älterer und hörgeschädigter Mitarbeiter, wenn eine oder mehrere Bedingungen nicht optimal

gestaltet sind, sind hinlänglich nachgewiesen (Bell & Buchner, 2007, Banbury & Berry, 1998, Sundstrom et al, 1994).

Hinsichtlich der Maßnahmen in Richtung Ergonomie, Arbeitsplatzgestaltung und Gesundheitszirkel sind in der Vergangenheit vermehrt schallpegelorientierte Maßnahmen eingesetzt worden (Sust, 1989), die aber in heutigen Büroumwelten nicht mehr zielführend sind. Vielmehr kommt es darauf an, die Qualität der akustischen Bedingungen (Raum, Schallwandler, Konferenzsystem, Telefonie) zu verbessern, vgl. Helenius & Hongisto (2004), Meis & Klink (2010a), Hongisto (2008), Sailer & Hassenzahl (2000), Rennies, Goetze, & Appell (2010), Goetze, Rennies, & Appell (2010).

In den Untersuchungen zur Raumakustik konnte gezeigt werden, dass die Optimierungsansätze auf mehreren Ebenen zu einer nachhaltigen Verbesserung der Befindlichkeit und Leistungsfähigkeit führen kann, wie etwa die Reduktion der Nachhallzeiten und des Direktschalles durch Absorber und Schirmungen. Auch die Maskierung von irrelevantem Sprachschall durch ein systematisches Rauschen kann zu einer Verbesserung der Situation im Büroumfeld sorgen. Diese Maßnahmen sollten in Mitarbeiterbefragungen im Bereich des Total Quality Management (Bungard, 1998) eingebunden sein um zu einer nachhaltigen Verbesserung der Befindlichkeit und Leistungsfähigkeit beitragen zu können. Diese Optimierungen sollten aber für alle Büromitarbeiter gelten, auch wenn insbesondere hörgeschädigte Personen von guten akustischen Bedingungen profitieren.

Für hörgeschädigte und ältere Mitarbeiter kommen insbesondere apparative Lösungsmöglichkeiten in Betracht, wie klassische Hörhilfen und innovative Ansätze in Form von Konferenzsystemen und Telefonanlagen mit Hörunterstützung (Rennies, Goetze, & Appell, 2010, Goetze, Rennies, & Appell, 2010). Die bau- und raumphysikalischen Gegebenheiten sind dabei als eine notwendige Voraussetzung anzusehen.

**Hörsysteme (Hörgeräte).** Mit Hilfe von Hörgeräten lassen sich Hörverluste oft ganz oder zumindest teilweise ausgleichen. Hörgeräte bestehen im Wesentlichen aus einem Mikrofon, durch das der Schall aufgenommen wird, einem Prozessor zur Verarbeitung/Verstärkung des Schalls und einem Lautsprecher, der als Hörer bezeichnet wird. Vom Hörer werden die verarbeiteten Schallsignale durch einen Schlauch ins Ohr geleitet. Die Stromversorgung erfolgt üblicherweise durch eine Batterie. Aufgrund ihrer Komplexität werden moderne Hörgeräte oft als Hörsysteme bezeichnet. Man unterscheidet dabei im Wesentlichen zwischen zwei Hörgerätetypen, den Hinter-dem-Ohr-Geräten und den Im-Ohr-Geräten.

Bei Hinter-dem-Ohr-Geräten (HdO) befindet sich das eigentliche Hörgerät hinter der Ohrmuschel. Der bearbeitete Schall wird von dort mittels Schlauch und Ohrpassstück (Otoplastik) ins Ohr geleitet. HdO-Geräte können bei den meisten Hörverlusten eingesetzt werden. Bei leichten Hörverlusten kann - statt normalem Schlauch und Ohrpassstück - auch ein dünner Schlauch mit kleinerem Endstück verwendet werden („offene Versorgung“); diese Mini-Hörgeräte sind damit kaum noch sichtbar und weisen einen deutlich geringeren Okklusionseffekt auf. Eine besondere Art der HdO-Geräte stellen moderne RIC-Geräte dar, bei denen der Hörer sich nicht mehr im Gehäuse hinter dem Ohr befindet, sondern am Ende eines dünnen Kabels direkt im Gehörgang sitzt (Außenhörer); daher auch der Name RIC („receiver in the canal“). Im Gegensatz zu HdO- und RIC-Geräten befindet sich bei Im-Ohr-Geräten (kurz IdO) das Hörgerät ganz oder teilweise im Gehörgang.

Es gibt sowohl analoge als auch digitale Hörgeräte. Inzwischen werden fast ausschließlich digitale Hörgeräte verwendet, da bei ihnen sowohl die Schallverarbeitung als auch die Programmierung digital erfolgt. Dadurch wird die Anpassung der Hörgeräteprogramme an den individuellen Hörverlust vereinfacht. Zudem können je nach Bedarf leicht weitere Funktionen integriert

werden, wie z.B. Spracherkennung, Störgeräuschunterdrückung, Echounterdrückung, Windgeräuschunterdrückung etc.

Welche Art von Hörgeräten empfehlenswert ist, hängt stark vom Hörverlust und individuellen Gegebenheiten ab. Zudem ist es nur selten möglich, das Hörvermögen mittels Hörgerät vollständig auszugleichen. Dennoch ist eine frühzeitige Versorgung mit Hörgeräten im Berufs- und Familienalltag wichtig, um das Gehör nicht von alltäglichen Sinneseindrücken zu entwöhnen und um eine kontinuierlich gute Kommunikationsfähigkeit zu gewährleisten. Nur ca. 20% aller versorgungsbedürftigen Menschen tragen ein Hörgerät, besonders bei geringgradigen Hörstörungen ist die Versorgungsquote sehr gering.

**Intelligente Konferenzsysteme.** In der modernen Arbeitswelt gewinnt der Einsatz von akustischen Kommunikationssystemen, z.B. von Videokonferenzanlagen oder Chatsystemen, zunehmend an Bedeutung. Da bei solchen Kommunikationssystemen – im Gegensatz zum herkömmlichen Telefon – der Sprecher oft relativ weit vom Mikrofon entfernt ist, ist die akustische Übertragung besonders anfällig für Beeinträchtigung durch äußere Einflüsse wie Störgeräusche oder Nachhall. Bei einer einfachen, unbearbeiteten Signalübertragung werden diese unerwünschten Störgeräusche zusammen mit dem eigentlichen Sprachsignal zum Kommunikationspartner geschickt und reduzieren dort die Sprachverständlichkeit. Selbst für Normalhörende stellt dies eine besondere Herausforderung dar. Für Menschen mit Schwerhörigkeit können die daraus resultierenden Beeinträchtigungen der Kommunikation gravierend sein und sie gegebenenfalls sogar von der Nutzung des Systems ausschließen. Ein weiteres Problem beim Einsatz akustischer Kommunikationssysteme besteht darin, dass der Sprecher nicht direkt erkennen kann, wie gut oder schlecht er zu verstehen ist. Dies ist derzeit nur durch eine gezielte Rückmeldung des Gesprächspartners möglich.

Ein vom Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie neu entwickeltes, intelligentes Kommunikationssystem kann die Qualität und den Komfort der Kommunikation bedeutend erhöhen. Die zwei wesentlichen Komponenten dieses neuen Systems sind die Signalverbesserung und die Signalüberwachung.

Ziel der Signalverbesserung ist es, die akustischen Eigenschaften der Signale individuell zu optimieren. Dies geschieht zum einen durch Verminderung von ungewollten Störgeräuschen oder Nachhallanteilen. Zum anderen werden die Signale vor der akustischen Ausgabe zusätzlich so verarbeitet, dass sie die bei Schwerhörenden erhöhte Hörschwelle ausgleichen und so die für die Kommunikation relevanten Signalanteile besser hörbar machen. Gleichzeitig kann diese Art der Vorverarbeitung genutzt werden, um die Schallausgabe an bevorzugte Einstellungen von Normalhörenden anzupassen.

Die Signalüberwachung dient dazu, die Sprachqualität des Kommunikationssignals kontinuierlich zu begutachten. Dazu werden Gehörmodelle eingesetzt, die aus den physikalischen Eigenschaften des Signals abschätzen, wie gut die Verständlichkeit der Sprache beim Empfänger ist. Der Sprecher erhält eine direkte Rückmeldung, wie gut er gerade zu verstehen ist, z.B. in Form eines optischen Signals („Ampel“).

Das entwickelte Video-Chatsystem (Rennies, Goetze, & Appell, 2010, Goetze, Rennies, & Appell, 2010) kann durch Signalverbesserung und Signalbewertung zu einer erhöhten Kommunikationsqualität für Normal- und Schwerhörende beitragen.

## **Telefonie für Hörgeschädigte.**

Die Fraunhofer Projektgruppe HSA des IDMT entwickelte ein Telefonssystem für Hörgeschädigte, bei dem vorhandene Telefone weiterhin genutzt werden können. Das System integriert aktuelle Signalverarbeitungsstrategien in bestehende Kommunikationssysteme, die neben einer Verbesserung der Sprachqualität für Normalhörende auch eine Kompensation des

Hörverlustes für Schwerhörende beinhaltet (Goetze et al 2010b, Xiong et al. 2011). Das System passt das Sprachsignal an den individuellen Hörverlust an und reduziert Störgeräusche, die in schwierigen akustischen Situationen schnell zu Ermüdungserscheinungen führen können. Das Telefonystem umfasst verschiedene Voreinstellungen, die die häufigsten Hörverluste abdecken. Über die Telefontastatur können diese vom Nutzer ausgewählt werden. Nach der individuellen Anpassung wird jeder Anruf für das individuelle Gehör aufbereitet und die wahrgenommene Qualität durch ein gleichmäßiges und gut verständliches Klangbild deutlich erhöht. Auch bei einer schlechten Telefonverbindung wird das Sprachsignal immer mit einem angenehmen Pegel dargeboten. Mit der Anwendung dieser innovativen Signalverarbeitungsstrategien können schwerhörende Menschen ohne Hörgerät in verbesserter Sprachqualität per Telefon kommunizieren.

## LITERATUR

- Bell, R. & Buchner, A. (2007). Equivalent irrelevant-sound effects for old and young adults. *Memory & Cognition* 35(2), S. 352-364.
- Banbury, S. & Berry, D.C. (1998). Disruption of office-related tasks by speech and office noise. *British Journal of Psychology* 89, S. 499-517.
- Bungard W. (1998). Mitarbeiterbefragungen als Instrument eines Total-Quality-Ansatzes. In Steffgen, G., Meis, M. & Bollendorff, C. (Hrsg.): *Psychologie in der Arbeitswelt*, S. 131-143. Promoculture, Luxembourg.
- DIN 18041 (2004). DIN 18041:2004-05. Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, in der Neufassung vom Mai 2004. Beuth Verlag.
- Goetze, S. Rennies, J. & Appell, J.-E. (2010a). Intelligente Konferenzsysteme für natürliche Freisprechkommunikation, In A. Schick, M. Meis und C. Nocke: Beiträge zur psychologischen Akustik, Akustik in Büro und Objekt, Isensee Verlag, ISBN: 978-3-89995-710-5, Oldenburg.

- Goetze, S.; Xiong, F.; Rennies, J.; Rohdenburg, T. & Appell, J.-E. (2010b). Hands-Free Telecommunication for Elderly Persons Suffering from Hearing Deficiencies 12th IEEE International Conference on E-Health Networking, Application and Services (Healthcom'10), 2010
- Heger & Holube (2010). Wie viele Menschen sind schwerhörig? Zeitschrift für Audiologie, 49 (2) 61–70.
- Helenius, R & Hongisto, V. (2004). The effect of the acoustical improvement of an open-plan office on workers. Proceedings of Inter-Noise 2004, Paper 674, 21-25 August, Prague, Czech Republic.
- Hongisto, V.O. (2008). Effect of sound masking on workers in an open office. Proceedings of Acoustics 08, June 29-July4 2008, Paris, France, S. 537-542.
- IAB (2005). IAB-Kurzbericht 11/2005. Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. Link: <http://doku.iab.de/kurzber/2005/kb1105.pdf>, geprüft: 13.03.2012.
- Meis, M., & Klink, K. (2010a). Lärmwirkungen in Büroumwelten: Review und Optimierungsansätze durch Mitarbeiterbefragungen. In: Schick, A., Meis, M., & Nocke, C. (2010): Akustik in Büro und Objekt, Beiträge zur psychologischen Akustik 10, S. 179-218.
- Meis, M. & Klink, K. (2010b). Fachschrift Nr. 11 – Schall- und Lärmwirkung im Büroumfeld. Grundlagen des Hörens, Schallwirkungen und Maßnahmen. Buero-forum. Zu beziehen unter [www.buero-forum.de](http://www.buero-forum.de).
- Rennies, J., Goetze, S. & Appell, J.-E. (2010). Considering Hearing Deficiencies in Human-Computer Interaction. In M. Ziefle & C. Röcker (Eds.) Human-Centered Design of E-Health Technologies: Concepts, Methods and Applications, IGI Global, ISBN-10: 1609601777.
- Sailer, U. & Hassenzahl, M. (2000). Assessing noise annoyance: an improvement-oriented approach. Ergonomics 43(11), S. 1920-1938.
- Schick, A., Meis, M. & Nocke, C. (2010) 1. Symposium Büro.Raum.Akustik.Köln, zugleich 10. Oldenburger Symposium zur Psychologischen Akustik: Akustik in Büro und Objekt. Schick, Meis & Nocke (Hrsg.). ISBN 978-3-89995-710-5 © 2010 Isensee Verlag Oldenburg.
- Schneider, Lutz (2011). Alterung und Arbeitsmarkt. Eine Untersuchung zum Einfluss des Alters von Beschäftigten auf Produktivität, Innovation und Mobilität, 2011

- Sundstrom E., Town J.P., Rice, R.W., Osborn, D.P. & Brill, M. (1994). Office Noise, Satisfaction, and Performance. *Environment and Behavior* 26, S. 195-222.
- Xiong, F.; Schneider, D.; Goetze, S.; Ewert, S.; Rohdenburg, T. & Appell, J.-E. (2011) Hearing-Loss Compensation in a Telephone System DAGA, 2011.
- Zokoll M.A., Wagener K.C., Brand T., Buschermöhle M. & Kollmeier B. (2012). Internationally comparable screening tests for listening in noise in several European languages: The German digit triplet tests as an optimization prototype (accepted for publication in *Int. J. Audiol.*).

# **Schallabsorber**

## **Messung, Bewertung, Anwendung**

C. Nocke

Akustikbüro Oldenburg

Kontakt: [nocke@akustikbuero-oldenburg.de](mailto:nocke@akustikbuero-oldenburg.de)

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Die raumakustische Gestaltung von Räumen erfordert den Einsatz von Schallabsorbern. Schallabsorber gibt es in den vielfältigsten Ausformungen von flächigen Akustikdecken bis hin zu in Möbel integrierte absorbierende Elemente. Die Charakterisierung von Schallabsorber erfolgt nach den Vorgaben der DIN EN ISO 354 (2003). Diese Norm dient als Grundlage der Absorptions-Messung für raumakustische Anwendungen. Weitere Messverfahren werden kurz vorgestellt. Die Bewertung der Schallabsorption erfolgt für einige Absorbertypen anhand weiterer Normen. Zur Anwendung in Räumen stehen schlussendlich verschiedenste Produkte bereits, sodass die Anwendung und Auswahl der „richtigen“ Schallabsorber nicht unbedingt eine Aufgabe für den Akustiker ist, sondern durch viele andere Faktoren bestimmt wird.

## **ABSTRACT**

The room acoustical design of rooms requires the application of sound absorbers. Sound absorbers can be anything from acoustic ceilings up to sound absorbing elements integrated into furniture. The characterisation or description of sound absorbing properties follows the procedures as given in DIN EN ISO 354 (2003). This standard is the basis of absorption measurements for room acoustical applications. Other measurement procedures will be briefly described. The rating of sound absorption follows other standards for certain types of absorbers. For the application in rooms there are various products available hence the application and choice of the „right“ absorbers is not only a task for the acoustic consultant but is often defined by many other factors.

## EINLEITUNG

Die Messung der akustischen Eigenschaften von Materialien ist ein klassisches Thema der Akustik. Für die Raumakustik ist seit geraumer Zeit der Hallraum als eine Art Standardverfahren zur Anwendung gelangt. Weitere Methoden, die beispielsweise die Messung der Absorption auch vor Ort, d.h. an der Stelle des Einbaus, erlauben würden, haben bislang nur geringe Verbreitung gefunden.

Zur Bewertung der Messergebnisse für die Schallabsorption aus dem Hallraum existieren ebenfalls mehrere Verfahren. Die Verfahren werden in diesem Beitrag vorgestellt und diskutiert.

Die Anwendung von Schallabsorbern ist eine der wesentlichen Aufgaben der Raumakustik. Hierzu werden Angaben zur Schallabsorption, ausgedrückt durch den Schallabsorptionsgrad oder auch die äquivalente Schallabsorptionsfläche, benötigt. Der Beitrag schließt daher mit einer Liste wesentlicher Schallabsorptionsgrade, die den Raumakustik-Planer als Basis seiner Planungen dienen kann.

## HALLRAUMVERFAHREN

Das sogenannte Hallraumverfahren ist in der DIN EN ISO 354 Messung der Schallabsorption in Hallräumen, die letztmalig im Jahr 2003 neu gefasst wurde, beschrieben. Diese Norm beruht auf der Sabineschen Nachhallformel. Die grundlegende Annahme des Verfahrens ist damit ein diffuses Schallfeld. Das Einrichten eines Hallraums, um diese Voraussetzung eines diffusen Schallfelds im Sinne der Norm zu erfüllen, wird detailliert im Anhang A der Norm zur Diffusität des Schallfeldes im Hallraum beschrieben.

Normativ im Detail beschrieben sind der Ablauf der Messung sowie die apparativen Vorgaben zur Ausstattung des Labors als auch der zu verwendenden Messgeräte. Die wichtigsten Aspekte

sind im Folgenden aufgeführt; für weitere Details wird die Lektüre der Norm empfohlen. Das Hallraum-Volumen muss mindestens  $200 \text{ m}^3$  betragen. Gemessen wird zunächst die Nachhallzeit im leeren Hallraum; anschließend wird die zu untersuchende Probe eingebracht und die Nachhallzeit nochmals gemessen. Die Messungen sind zwischen 100 Hz und 5000 Hz in Terzbandbreite durchzuführen. Aus den Nachhallzeiten des leeren Hallraums  $T_1$  und des Hallraums mit Probe  $T_2$  kann die aus der Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche im Hallraum die äquivalente Absorptionsfläche des Prüfobjekts  $A_T$  der untersuchten Probe berechnet werden.

Zu beachten ist, dass beispielsweise die Temperatur wie auch die relative Luftfeuchtigkeit zwischen den beiden Messungen ohne und mit Probe nicht stark schwankt, da ansonsten durch die Änderung der Dämpfung in der Luft speziell bei hohen eine „Scheinabsorption“ gemessen wird. Die Änderung der Dämpfung durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit kann nach den Vorgaben der Norm korrigiert werden.

Es sind mindestens zwölf räumlich voneinander unabhängige Abklingkurven jeweils mit und ohne Probe zu messen. Bei der heutzutage verwendeten modernen und automatisierten Messtechnik dauert der Auf- und Umbau der Proben im Hallraum häufig länger als die eigentliche Messung und Auswertung.

Zur Beschreibung der Schallabsorption unterscheidet die DIN EN ISO 354 zwischen flächenhaften Absorbern und einzelnen Schallabsorbern. Als Beispiele für flächenhafte Schallabsorber werden in Anhang B der Norm verschiedene Aufbautypen genannt. Klassische Akustikputze oder -decken sind ebenso wie Vorhänge oder Baffle-Aufbauten aufgeführt. Als Beispiele für einzelne Schallabsorber werden Stühle, freistehende Stellwände oder auch Personen beschrieben.

Für flächenhafte Schallabsorber, und nur für diese, kann der Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  berechnet werden. Hierbei wird die gemessene äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A_T$  auf die vom Prüfobjekt überdeckte Fläche  $S$  bezogen. Es gilt:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

Für einzelne Schallabsorber kann kein Schallabsorptionsgrad berechnet werden. Hier ist die Angabe der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für ein Objekt  $A_{obj}$  vorgesehen. Nach den Vorgaben der DIN EN ISO 354 sind in der Regel drei gleichartige Objekte zur Messung zu verwenden. Somit gilt:

$$A_{obj} = \frac{A_T}{n}$$

mit der Anzahl n der untersuchten Elemente.

In der folgenden Abbildung 1 sind exemplarisch Ergebnisse aus Hallraum-Messungen an einem flächenhaften Schallabsorber (Akustikdecke) und einem einzelnen Schallabsorber (Sitzmöbel) dargestellt.

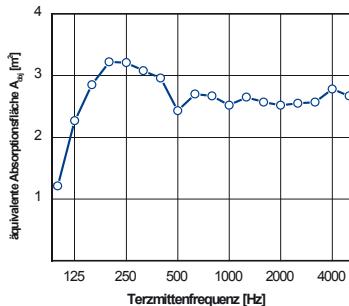
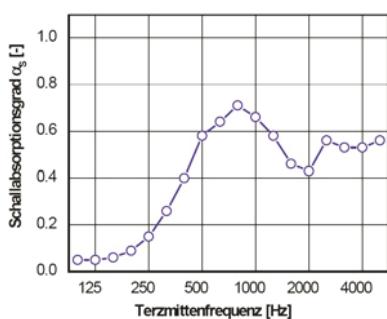


Abbildung 1: Ergebnisse aus dem Hallraum:  
links – Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  für flächenhaften Schallabsorber  
rechts – äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A_{obj}$  für einen einzelnen Schallabsorber (Schrank mit perforierter Front, Seite und Rückwand)

Neben einer grafischen Darstellung des Ergebnisses wie in Abbildung 1 wird in der Norm vorgegeben, dass die Messwerte auch tabellarisch anzugeben sind. Neben diesen Angaben zum eigentlichen Messergebnis sind Messdatum, Angaben zum Hallraum, Angaben zu den Messbedingungen, speziell zur verwendeten Probe aufzuführen. Ein vollständiger Messbericht im Sinne der DIN EN ISO 354 umfasst neben dem Prüfzeugnis auch Angaben zur durchführenden Institution und sollte nachvollziehbar und den Ablauf der Messung dokumentieren.

## MESSUNGEN IM KUNDTSCHEN ROHR

Eine klassische Methode zur Untersuchung akustischer Materialien ist das sogenannte Kundtsche Rohr oder auch Stehwellen-Rohr-Methode. Mit der DIN EN ISO 10534, Teil 1 und Teil 2 ist das Verfahren zur Bestimmung der Schallabsorption für senkrechten Schalleinfall normativ gefasst. Die Norm führt aus, wie die Messung durchzuführen ist und welche apparativen Voraussetzungen erfüllt sein müssen.

Die folgende Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze eines Kundtschen Rohrs, das ursprünglich zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit verwendet wurde.

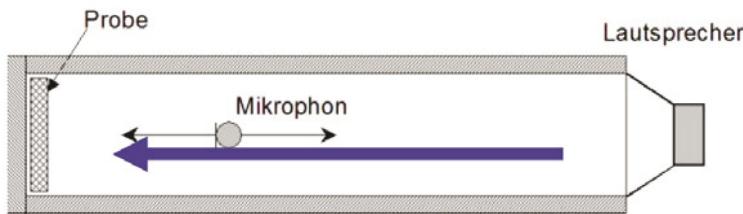


Abbildung 2: Skizze zum Messverfahren im Kundtschen Rohr.

Die Messung im Kundtschen Rohr beruht auf der eindimensionalen Schallausbreitung in einem abgeschlossenen Volumen. Der Frequenzbereich, der zu Messung verwendet werden kann, ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen des Messrohrs, an dessen einem Ende ein Lautsprecher als Schallquelle angebracht ist und dessen andere Seite die zu untersuchende Probe aufnimmt. Je nach akustischer Wirkung der Probe bildet sich das Schallfeld im Rohr aus. Durch Abtastung bzw. Vermessung des Schallfelds im Rohr kann auf die Schallabsorption des Materials geschlossen werden.

Traditionell wurde die Messungen bei einzelnen Frequenzen durchgeführt und das Schallfeld durch ein im Rohr bewegliches Mikrofon abgetastet. Heutige Messtechnik arbeitet in der Regel mit ortsfesten Mikrofonen im Rohr und breitbandigen Signalen, sodass eine effiziente Messdurchführung möglich wird. Details zu verschiedenen Möglichkeiten der Messdurchführung sind in der Norm dargestellt.

Typischerweise wird mit gebräuchlichen Rohrabmessungen (5 cm bis 20 cm Durchmesser/Querschnitt) ein Frequenzbereich von ca. 100 Hz bis ca. 2000 Hz abgedeckt. Größere Rohre (ca. 100 cm Querschnitt) können auch tiefere Frequenzen erreichen. Häufig wird auch zusätzlich ein sehr kleines Rohr (1 cm bis 5 cm) ergänzend für hohe Frequenzen bis zu einigen Kilo-Hertz (z.B. 6000 Hz) verwendet. Es werden dann jeweils auf den Rohrquerschnitt zugeschnittene Proben benötigt.

Als Ergebnis liefert das Kundtsche Rohr den Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall, der als  $\alpha_0$  bezeichnet wird.

In der folgenden Abbildung 3 ist ein Ergebnis einer Messung in einem Kundtschen Rohr dargestellt. Eine direkte Umrechnung auf den allseitigen oder diffusen Schalleinfall (wie im Hallraum idealerweise angenommen) ist aus Messungen im Kundtschen Rohr nicht möglich.

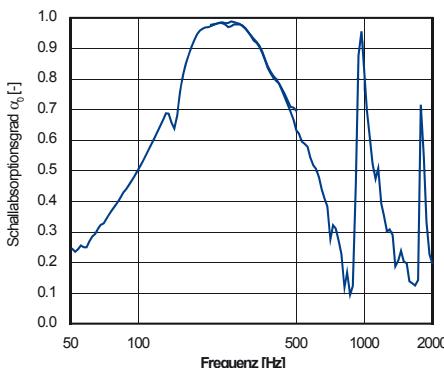


Abbildung 3: Ergebnis für den Schallabsorptionsgrad  $\alpha_0$  aus dem Kundtschen Rohr.

Der Vorteil des Kundtschen Rohrs besteht darin, dass mit kleinen Proben Aussagen zur akustischen Wirksamkeit eines Materials getroffen werden können. Relative Vergleiche zwischen verschiedenen Materialien sind mit Hilfe des Kundtschen Rohrs möglich, sodass diese Methode im Vorfeld von Produktentwicklungen wertvoller Hinweise zur Materialwahl geben kann. Für Schallabsorber, die wie beispielsweise Resonanzabsorber aufgrund ihres Aufbaus oder ihrer geometrischen Abmessungen wirken, ist das Kundtsche Rohr mitunter nicht geeignet.

## WEITERE MESSVERFAHREN

Neben den beiden genannten Methoden, Hallraum und Kundtsches Rohr, existieren seit geraumer Zeit verschiedene weitere Vorgehensweisen zur messtechnischen Bestimmung der akustischen Wirksamkeit von Materialien. Neben Labormethoden existieren auch Verfahren, um akustische Material-Kennwerte wie den Schallabsorptionsgrad direkt im eingebauten Zustand in

einem Raum oder auch im Freien an einer Oberfläche Lärmschutzwand zu vermessen.

In der folgenden Abbildung 4, links ist ein Messaufbau von Ernsthausen, v. Wittern (1939) zur Vermessung einer Oberfläche, hier eine Wiese, im Freien dargestellt. Die Beschallung erfolgte durch einen Lautsprecher in einiger Höhe über der Oberfläche. Das Mikrofon zur Aufnahme des reflektierten Schallsignals wurde dicht vor der Oberfläche positioniert. Durch die Laufzeit des Schalls konnten einfallende und reflektierte Schallwelle getrennt werden und somit auf die Absorption der Fläche geschlossen werden.

Das rechte Bild in Abbildung 4 zeigt eine Umsetzung dieses Messgedankens bei der Vermessung einer Lärmschutzwand-Oberrfläche nach dem Subtraktionsverfahren von Mommertz (1996), das zwischenzeitlich als DIN 1793, Teil 5 auch normativ gefasst wurde.

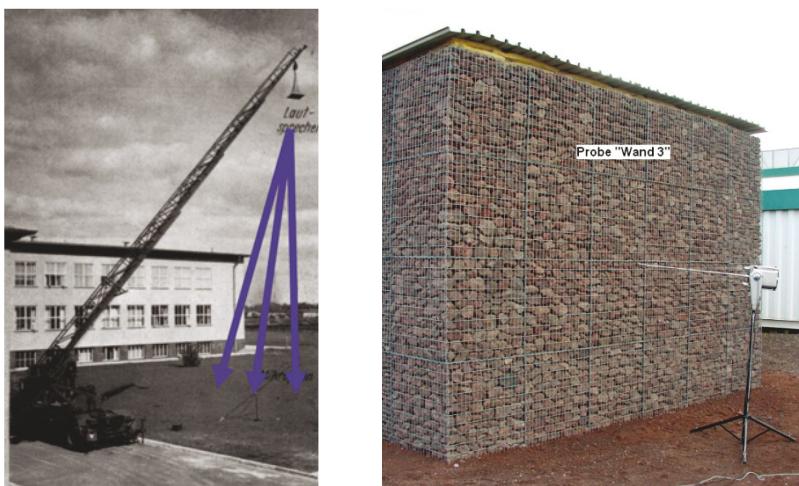


Abbildung 4: Abbildung aus dem Jahr 1939 aus 2007 zur Bestimmung des Absorptionsgrads einer Oberfläche im Freien.

Eine Übersicht von Methoden zur Messung der Schallabsorption oder auch der allgemeineren Kenngröße Wandimpedanz ist in der Dissertation des Autors dieses Beitrags zu finden, siehe Nocke (2000). Im Rahmen der Dissertation wurde eine Methode zur Messung vor Ort, d.h. in-situ, der akustischen Wandimpedanz entwickelt und in verschiedenen Räumen und an verschiedenen Materialien entwickelt.

In der folgenden Abbildung 5 ist die Messung an einer Decke gezeigt, deren Absorptionsgrad im eingebauten Zustand erheblich von den Angaben aus Messungen im Hallraum abwich.

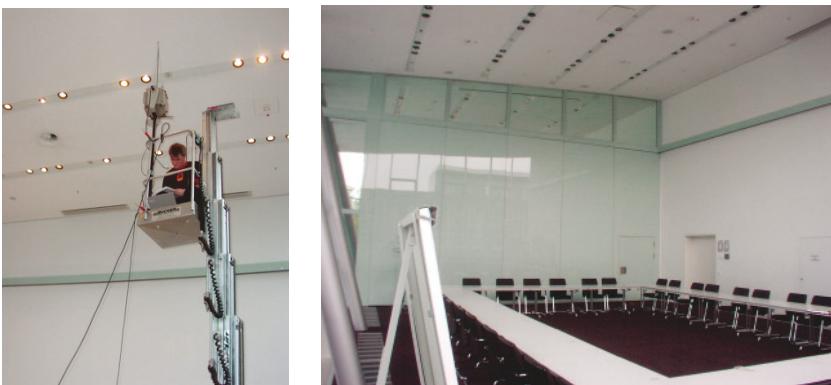


Abbildung 5: In-situ Vermessung einer hoch technisierten Decke (links) in einem modernen Konferenz-/Besprechungsraum.

Die Verfahren zur in-situ Messung der Schallabsorption haben bislang noch keine allgemeine Verbreitung in der alltäglichen Beratungs- und Planungspraxis gefunden, auch wenn schlussendlich die Beschallungssituation, egal ob im Freien oder in Räumen, wesentlich realistischere Aussagen zur tatsächlich vorhandenen Schallabsorptionswirkung von Materialien zulässt als die idealisierten Bedingungen des diffusen Schalleinfalls im Hallraum oder auch des senkrechten Schalleinfalls im Kundtschen Rohr.

## **BEWERTUNG DER SCHALLABSORPTION**

Durch die Angabe der frequenzabhängigen Schallabsorption (Schallabsorptionsgrad oder äquivalente Schallabsorptionsfläche) ist eine vollständige Beschreibung der absorbierenden Wirkung von Absorbern gegeben. Wie auch in anderen Bereichen der Akustik existieren zur vereinfachten Darstellung der Absorptionswirkung ebenfalls Verfahren zur Ableitung von Einzahlwerten aus den frequenzabhängigen Werten.

Eine Einzahlangabe zur Schallabsorption stellt grundsätzlich eine starke Vereinfachung dar. Schallabsorber mit ganz unterschiedlichen frequenzabhängiger Absorption können identische Werte als Einzahlangabe erhalten. Als Vorteil von Einzahlangaben ist anzumerken, dass sich Schallabsorber hierdurch grob klassifizieren lassen und damit untereinander schnell vergleichbar werden.

In Europa und den USA wurden verschiedene Einzahlwerte für die Schallabsorption definiert, deren Ableitung jeweils deutlich unterschiedlich ist. In Europa ist der gängigste Einzahlwert der Schallabsorption der so genannte bewertete Schallabsorptionsgrad  $\alpha_w$ , während im englischsprachigen Raum als Einzahlwerte der Schallabsorption eher der NRC-Wert (Noise Reduction Coefficient) oder der SAA-Wert (Sound Absorption Average) verwendet werden.

Allen Verfahren zur Ermittlung des Einzahlwertes liegen die im Hallraum gemessenen Terzwerte für den Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  zugrunde.

### **DIN EN ISO 11654**

Das in der DIN EN ISO 11654 beschriebene Verfahren dient dazu, aus dem gemessenen Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  einen Einzahlwert, den sogenannten bewerteten Schallabsorptionsgrad  $\alpha_w$ , abzuleiten. Hierzu wird ein mehrstufiges Verfahren beschrieben, das im Folgenden beschrieben wird. Die hierbei

verwendeten Größen sind in der folgenden Abbildung 6 dargestellt.

Ausgehend von den 18 gemessenen Terzwerten zwischen 100 Hz und 5000 Hz des Schallabsorptionsgrads  $\alpha_s$  wird zunächst der praktische Schallabsorptionsgrad  $\alpha_p$  berechnet. Hierzu werden jeweils die drei Terzwerte der  $\alpha_s$ -Werte einer Oktave gemittelt und auf ein Vielfaches von 0,05 gerundet. Aus 18  $\alpha_s$ -Terzwerten werden somit 6  $\alpha_p$ -Werte.  $\alpha_s$  und  $\alpha_p$ -Werte sind in der folgenden Abbildung 6 in der linken Grafik dargestellt.

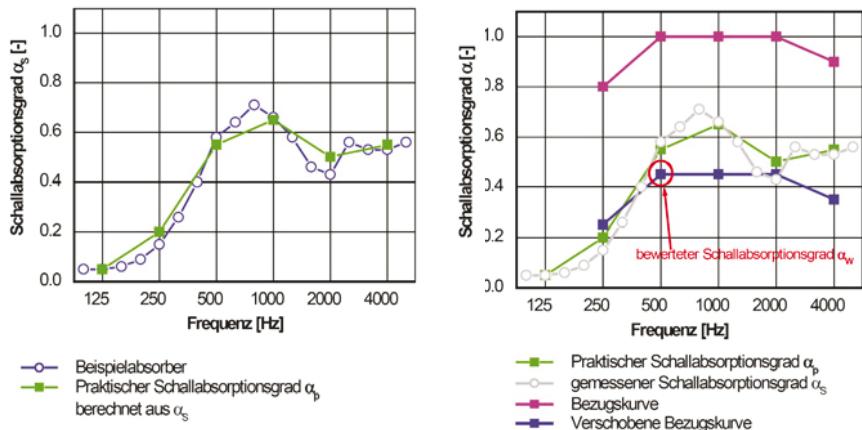


Abbildung 6: Skizze zum Verfahren der DIN EN ISO 11654 zur Ableitung des bewerteten Schallabsorptionsgrads  $\alpha_w$ . Links: Praktischer Schallabsorptionsgrad  $\alpha_p$  abgeleitet aus dem Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  nach DIN EN ISO 354. Rechts: Ableitung des bewerteten Schallabsorptionsgrads  $\alpha_w$  aus dem Vergleich der  $\alpha_p$ -Werte mit der Bezugskurve.

Der praktische Schallabsorptionsgrad  $\alpha_p$  zwischen 250 Hz und 4000 Hz wird anschließend mit einer in der Norm festgelegten Bezugskurve verglichen. Aus diesem Vergleich lässt sich der bewertete Schallabsorptionsgrad  $\alpha_w$  als Einzahlwert ableSEN.

Details zum Verschieben der Bezugskurve und dem Vergleich sind in der Norm im Detail beschrieben.

Abweichungen um mehr als 0,25 zwischen  $\alpha_p$ -Werten und der verschobenen Bezugskurve werden mit Formindikatoren L, M oder H gekennzeichnet, je nachdem, ob sie bei 250 Hz (L), bei 500 Hz bzw. 1000 Hz (M) oder bei 2000 Hz bzw. 4000 Hz (H) auftreten. So ergeben sich Angaben wie  $\alpha_w = 0,65$  (H),  $\alpha_w = 0,20$  oder  $\alpha_w = 0,80$  (LM).

Anhand des Werts von  $\alpha_w$  kann nach einem informativen Anhang zur DIN EN ISO 11654 eine Klassifizierung in Schallabsorberklassen vorgenommen werden. Werte für  $\alpha_w$  von mehr als 0,90 werden beispielsweise der Schallabsorberklasse A zugeordnet, Werte zwischen 0,15 und 0,25 der Schallabsorberklasse E. Die Klassenzuordnung ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Schallabsorptionsgrad exemplarischer Materialien

| Schallabsorberklasse | Bereich der $\alpha_w$ -Werte |
|----------------------|-------------------------------|
| A                    | 0,90 bis 1,00                 |
| B                    | 0,80 bis 0,85                 |
| C                    | 0,60 bis 0,75                 |
| D                    | 0,30 bis 0,55                 |
| E                    | 0,15 bis 0,25                 |
| Unklassifiziert      | 0,00 bis 0,10                 |

Grundsätzlich sollten in Räumen, in denen gehobene Anforderungen an die Raumakustik bestehen, stets die Terz- oder zumindest die Oktavwerte für den Schallabsorptionsgrad in der Planung herangezogen werden. Die DIN EN ISO 11654 weist entsprechend darauf hin, dass in anspruchsvollen Umgebungen nur vollständige frequenzabhängige Schallabsorptionswerte für die raumakustische Planung verwendet werden sollten.

## **ANSI 423**

Die im amerikanischen Raum verbreitete Größe NRC (Noise Reduction Coefficient) wird ermittelt, indem aus vier Terzwerten für den Schallabsorptionsgrad (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz) der Mittelwert gebildet wird und dieser anschließend auf 0,05 genau gerundet wird. Liegt genau die Mitte der durch 0,05 teilbaren Zahlen vor, so wird stets aufgerundet (Beispiel: 0,625 => 0,65; 0,675 => 0,70).

Die ebenfalls im amerikanischen Raum genutzte Größe SAA (Sound Absorption Average) wird ermittelt, indem aus den zwölf Terzwerten für den Schallabsorptionsgrad zwischen 200 Hz und 2500 Hz der Mittelwert gebildet wird und dieser anschließende auf 0,01 genau gerundet wird.

## **ANWENDUNGEN VON SCHALLABSORBERN**

In der folgenden Übersicht aus der Fachschrift Nr. 8 Raumakustik sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit gängige Materialien zusammengestellt, die in den unterschiedlichen Produkten zur Schallabsorption in Räumen zum Einsatz kommen.

### **a) Glas- und Mineraalfaserplatten**

Hierbei handelt es sich um poröse Absorber, die entweder direkt auf einen schallharten Untergrund oder – was häufiger der Fall ist – mit einem gewissen Abstand davor montiert werden. Häufig anzutreffen sind gerasterte Einlegesysteme unterschiedlichster Ausprägung. Für die schallabsorbierende Wirkung ist der Luftraum hinter den Einlegeplatten von besonderer Bedeutung. Ein geringer Abstand bzw. ein kleines Luftvolumen hinter der Absorberplatte bedeutet in der Regel Einschränkungen in der Absorption der tiefen Frequenzen.

b) Schaumstoffe

Offenporige Schäume zeigen bei üblichen Dicken im Zentimeterbereich ihre Schallabsorptionswirkung vor allem bei den hohen Frequenzen. Man findet Schäume auch als Auflage von gelochten oder geschlitzten Paneelen oder Streckmetalloberflächen. Zur Verbesserung der Schallabsorptionswirkung – insbesondere bei den tiefen Frequenzen – wird die Oberfläche des Schaums mit einem Vlies, einem Gewebe oder einer dünnen Schicht aus einem schallharten Material versehen. Es eröffnen sich damit ganz unterschiedliche Einsatzbereiche.

c) Gelochte Gipskartonplatte

Gelochte Gipskartonplatten findet man als fugenlose Systeme oder auch als Einlegeplatten in Rastersysteme. In beiden Fällen wird die akustische Wirkung im Wesentlichen durch die Lochung in Verbindung mit einem aufgebrachten Vlies vor einem dahinter liegenden Luftvolumen erzielt und diese gegebenenfalls noch durch Auflage einer Mineralfasermatte erhöht. Es handelt sich hierbei um Resonanzabsorber. Je nach Abhängehöhe verändert sich die Absorptionswirkung des Aufbaus.

d) Geschlitzte oder perforierte Holzpaneele

Holzpaneele sind in der Regel Resonanzabsorber, deren Schallabsorptionswirkung sich durch das Zusammenspiel von gelochter Platte, Vlies und dahinter liegendem geschlossenem Luftvolumen ergibt. Wie bei den gelochten Gipskartonplatten wird häufig zusätzlich ein poröser Absorber in das Luftvolumen eingebracht, um die schallabsorbierende Wirkung auf einen größeren Frequenzbereich auszudehnen.

Der Vorteil der Holzpaneele liegt in ihrer mechanischen Beanspruchbarkeit, die einen Einsatz auch an Stellen mechanischer zulässt. Deswegen werden Holzpaneele vorrangig als Absorber im Wandbereich, aber auch für

Büromöbel – wie zum Beispiel als Schrankoberflächen – eingesetzt.

e) Akustikputze

Bei Akustikputzen handelt es sich um poröse Absorber, die es in unterschiedlichsten Ausprägungen gibt: Putze, die direkt am Objekt auf den Untergrund aufgesprüht werden oder aber Putze, die auf - glatten, porösen oder gelochten Trägerplatten - aufgebracht und am Objekt montiert werden. Im zweiten Fall ist eine Abhängigkeit möglich, die sich gegebenenfalls günstig auf das Absorptionsverhalten des Materials auswirkt.

Aus optischer Sicht besteht ein Vorteil der Akustikputze darin, dass sie über ein fugenloses Erscheinungsbild verfügen und somit optisch sehr unauffällig sind. Gerade in modernen Gebäuden besteht vielfach der Wunsch nach glatten Oberflächen ohne erkennbare Rasterung.

f) Geschichtete Materialien

Geschichtete Materialien kommen vielfach dort zum Einsatz, wo wenig Möglichkeit einer Abhängigkeit besteht, beispielsweise bei geringen Deckenhöhen. In geschichteten Schallabsorbern werden in der Regel poröse Absorber mit Resonanzabsorbern kombiniert. Kombinationen bestehen beispielsweise aus Putzen mit Mineralwolle oder auch Plattschwingern mit Mineralwolle. Sie sind darauf hin optimiert, bei einer geringen Aufbauhöhe Schallabsorptionswerte zu erzielen, die man ansonsten nur mit abgehängten Systemen erhält.

g) Mikroperforierte Schallabsorber

Bei mikroperforierten Schallabsorbern handelt es sich um Materialien aus Plexiglas, Metall, Holz oder Folie, und die schallabsorbierende Wirkung wird durch die feine Lochung in

Verbindung mit einem hinter der Platte oder Folie befindlichen Luftvolumen erzielt.

Durch Veränderung des Abstandes kann man die schallabsorbierenden Eigenschaften des Materials gezielt verändern und damit auf die Erfordernisse am Objekt abstimmen.

Der besondere Reiz der mikroperforierten Schallabsorber liegt darin, dass sich neue Einsatzmöglichkeiten ergeben, indem die Schallabsorber auch in transparenter oder transluzenter Form hergestellt und damit auch vor Fenstern und vor Beleuchtungseinrichtungen positioniert werden können. Auch die Möglichkeit schallabsorbierender Lichtdecken wird durch diesen Absorber geschaffen.

In den folgenden Tabellen 2 und 3 werden Absorptionswerte ausgewählter Materialien und Aufbauten exemplarisch aufgeführt. Letztlich wird jedes Material in einem Raum durch die frequenzabhängigen Schallabsorptionswerte, d.h. Schallabsorptionsgrad oder äquivalente Absorptionsfläche eindeutig beschrieben.

Materialien wie Beton, Fliesen oder Marmor besitzen im gesamten Frequenzbereich eine äußerst geringe Schallabsorption von weniger als 0,10. Andere Materialien, meist poröse Materialien wie Teppichböden oder auch Vorhänge zeigen bei tiefen Frequenzen eine geringe und bei höheren Frequenzen eine stärkere Absorption.

Tabelle 2: Werte Schallabsorptionsgrad (Auszug Cox, D'Antonio (2009) bzw. DIN 18041 (2004) )

| Materialbeschreibung   | Frequenz [Hz] |      |      |      |      |      |
|--|---------------|------|------|------|------|------|
|  | 125           | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
| Marmor, Fliesen, glatter Beton   | 0.01          | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| Kalk- oder Gipsputz  | 0.02          | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.03 |
| Verglasung, 2-3 mm Glas, doppelt mit ca. 1 cm Zwischenraum   | 0.10          | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Verglasung, große, schwere Scheiben  | 0.18          | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Dünner Teppich auf Beton   | 0.02          | 0.04 | 0.08 | 0.20 | 0.35 | 0.40 |
| Schwerer Teppich auf Beton   | 0.02          | 0.06 | 0.14 | 0.37 | 0.60 | 0.65 |
| Parkett auf Beton  | 0.04          | 0.04 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| Baumwollvorhang, 475 kg/m <sup>2</sup> , doppelt gerafft   | 0.07          | 0.37 | 0.49 | 0.81 | 0.65 | 0.54 |
| 25 mm Glaswolle direkt auf schallharter Unterlage  | 0.08          | 0.25 | 0.45 | 0.75 | 0.75 | 0.65 |
| 25 mm Glaswolle mit 25 mm Luftspalt vor schallharter Unterlage                                       | 0.15          | 0.55 | 0.80 | 0.90 | 0.85 | 0.80 |
| 40 mm Akustikputz  | 0.31          | 0.55 | 0.84 | 0.78 | 0.71 | 0.54 |
| 60 mm Schaumstoffplatte mit Schwerfolie an der Front, direkt aufgeklebt                              | 0.42          | 0.97 | 0.94 | 0.77 | 0.63 | 0.50 |
| Mikroperforierte Spanndecke, einlagig, 100 mm Abstand  | 0.04          | 0.16 | 0.53 | 0.66 | 0.48 | 0.48 |
| Rasterdecke mit Mineralwollplatten, 200 mm Abhängehöhe   | 0.30          | 0.54 | 0.60 | 0.74 | 0.83 | 0.75 |
| gelochter Gipskarton, flächig, 13% Lochflächenanteil, 60 mm Abhängehöhe mit 20 mm Mineralwollauflage | 0.29          | 0.84 | 0.87 | 0.74 | 0.51 | 0.49 |
| gelochter Gipskarton, flächig, 13% Lochflächenanteil, 60 mm Abhängehöhe ohne Mineralwollauflage      | 0.16          | 0.42 | 0.70 | 0.84 | 0.50 | 0.48 |

Tabelle 3: Werte äquiv. Schallabsorptionsfläche (DIN 18041 (2004), eigene Messungen)

| Materialbeschreibung  | Frequenz [Hz] |      |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|------|
|   | 125           | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
| 1,0 m <sup>2</sup> / Person, sitzend auf Holzgestühl                                      | 0,18          | 0,26 | 0,55 | 0,68 | 0,78 | 0,78 |
| 6 m <sup>2</sup> / Person, sitzend  | 0,12          | 0,18 | 0,35 | 0,56 | 0,68 | 0,74 |
| 6 m <sup>2</sup> / Person, stehend  | 0,12          | 0,19 | 0,42 | 0,66 | 0,86 | 0,94 |
| Einfacher Polsterstuhl, mit Textilbezug   | 0,15          | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,40 |
| Einfacher Polsterstuhl mit Lederbezug   | 0,05          | 0,15 | 0,20 | 0,10 | 0,03 | 0,03 |
| Schüler in Unterrichtsräumen an Holztischen: 3 m <sup>2</sup> / Person                    | 0,05          | 0,33 | 0,43 | 0,32 | 0,38 | 0,37 |
| 0,14 bis 0,17 Personen pro m <sup>2</sup> stehend, männlich im Wintermantel               |               | 0,42 | 0,87 | 1,34 | 1,40 | 1,58 |
| 0,14 bis 0,17 Personen pro m <sup>2</sup> sitzend, weiblich im Kleid                      |               | 0,10 | 0,17 | 0,37 | 0,47 | 0,58 |
| Stoffbespannte Stellwand, 1,6 m x 1,48 m groß, 30 mm dick, mit Mineralwolle gefüllt       | 1,0           | 1,8  | 2,2  | 2,6  | 2,8  | 2,6  |
| Stoffbespannte Stellwand, 1,5 m x 1,0 m groß, 30 mm dick, mit Schaumstoff gefüllt         | 0,70          | 1,2  | 1,5  | 1,9  | 1,9  | 1,9  |
| Schrank 1,2 m breit aus Holz, 5 OH hoch, mit Standardfront                                | 0,97          | 0,63 | 0,39 | 0,30 | 0,36 | 0,49 |
| Schrank 1,2 m breit aus Holz, 5 OH hoch, mit absorb. Front                                | 0,93          | 1,92 | 1,82 | 1,71 | 1,49 | 1,81 |
| Schrank 1,52 m breit aus Stahl, 3 OH hoch, mit geschl. Metallplatten 1 mm an allen Seiten | 0,71          | 0,51 | 0,35 | 0,21 | 0,12 | 0,11 |

In der folgenden Abbildung 7 ist ein dreidimensionales Raummodell zur Berechnung der Schallausbreitung im Raum dargestellt. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Schallabsorption ist die räumliche Verteilung der Absorption je nach Frequenz unterschiedlich. Dargestellt durch die farbliche Kodierung ist die räumliche Verteilung der Schallabsorption.

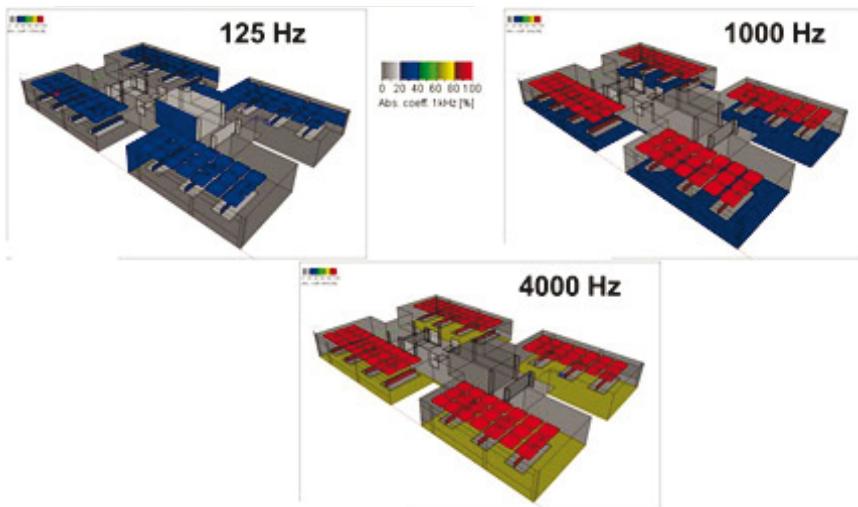


Abbildung 7: Verteilung/Anordnung der Schallabsorption bei verschiedenen Frequenzen.

## ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden die Grundlagen zur Messung der Schallabsorption zur Anwendung im Bereich der Raumakustik zusammengefasst. Das klassische Hallraumverfahren, das durch die DIN EN ISO 354 (2003) international genormt ist, stellt die Grundlage der Vermessung von Schallabsorbern dar. Verschiedene Bewertungsmethoden, wie in der DIN EN ISO 11654 (1997) beschrieben, führen dann zu vereinfachten Charakterisierungen von Schallabsorbern. Schließlich werden Beispiele und Schallabsorptionswerte für verschiedene Absorber und Aufbauten exemplarisch dargestellt.

## LITERATUR

- ASTM C423 (2001) Standard test method for sound absorption and absorption coefficients by the reverberation room method  
Absorptionsgradtabelle der PTB,  
<http://www.ptb.de/de/org/1/17/172/datenbank.htm>
- Fachschrift Nr. 8 Raumakustik, Verband BSO <http://www.buero-forum.de>  
Cox, T., D'Antonio, P. (2009) Acoustic Absorbers and Diffusers, Spon Press
- DIN 18041 (2004) Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen
- DIN EN ISO 11654 (1997) Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden, Bewertung der Schallabsorption
- DIN EN ISO 354 (2003) Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen
- Ernsthausen, W., v. Wittern, W. (1939), Akust. Zeitschrift 4(6), 353-359
- Mommertz, E. (1996) Untersuchung akustischer Wandeigenschaften und Modellierung der Schallrückwürfe in der binauralen Raumsimulation, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag
- Nocke, C. (2000) In-situ Messung der akustischen (Wand-)Impedanz, Dissertation Universität Oldenburg, Shaker Verlag
- Schick, A., Meis, M. & Nocke, C. (2010) 1. Symposium Büro.Raum.Akustik.Köln, zugleich 10. Oldenburger Symposium zur Psychologischen Akustik: Akustik in Büro und Objekt. Schick, Meis & Nocke (Hrsg.) 2010 Isensee Verlag Oldenburg.



## Akustiksystem Pannello

Die Kollektion Pannello von Ruckstuhl: Das sind verschiedene Akustikelemente mit ausgezeichneten schallschluckenden Eigenschaften in zeitlosem, elegantem Design. Ein Genuss für Auge und Ohr.

Aus der Begegnung zwischen Ruckstuhl, dem kreativen Hersteller von Bodentextilien und Matteo Thun, dem innovativen Architekten und Gestalter, ist das Akustiksystem Pannello entstanden, das sich den verschiedenen architektonischen Gegebenheiten anpassen kann. Die mit Wollfilz bespannten Pannellos sind optisch, akustisch und funktional überzeugend und flexibel einsetzbar.

### RUCKSTUHL AG

Teppichfabrik/fabrique de tapis/carpet factory/fabbrica di tappeti  
Bleienbachstrasse 9, CH 4901 Langenthal, Tel. 0041 (0)62 919 86 00, Fax 0041 (0)62 922 48 70  
[info@ruckstuhl.com](mailto:info@ruckstuhl.com), [www.ruckstuhl.com](http://www.ruckstuhl.com)



MEHR AUS HOLZ.

E EGGER



RAUMAKUSTIK EINFACH PLANEN UND GESTALTEN.

## EGGER AKUSTIK-LÖSUNGEN.

Als Komplettanbieter für Holzwerkstoffe bietet EGGER im Bereich Akustik umfangreiche Lösungen, die **FUNKTIONALE SCHALLABSORPTION** mit **TRENDGERECHTEM DESIGN** verbinden. Akustisch wirksame Produkte von EGGER kommen insbesondere in vier Anwendungsgebieten zum Einsatz:

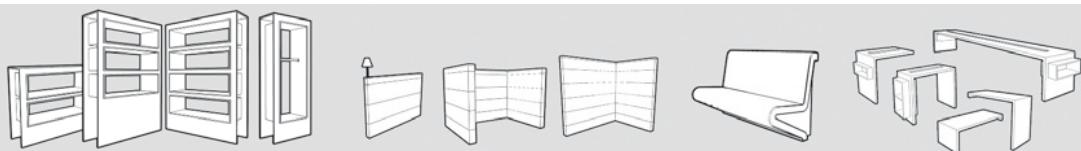
- Wandverkleidungen und Trennwände
  - Möbelkomponenten
  - Decken oder Deckensysteme
  - Nachträgliche Einbauten
- Weitere Informationen unter [www.egger.com/akustik](http://www.egger.com/akustik)

ZOOM®  
EINFACH JEDEN TAG

# Ideas for new working.



## Akustische Lösungen nach Maß.



ROHDE & GRAHL GmbH . 31595 Steyerberg / Voigtei . Tel. 05769/7-0  
Fax 05769/333 . [www.rohde-grahl.com](http://www.rohde-grahl.com) . [info@rohde-grahl.de](mailto:info@rohde-grahl.de)

Moderne Büroarbeitsplätze gibt's

# Nicht von der Stange



Die Möglichkeiten, gute Arbeitsbedingungen zu schaffen, sind vielfältig. Für jedes Unternehmen und jede Raumform werden die Umsetzungen unterschiedlich ausfallen. Und oft reichen schon kleine Veränderungen, um die Arbeitsabläufe besser zu unterstützen. Qualifizierte Beratung finden Sie beim Fachhandel. Wer sich dort wirklich gut mit Büroeinrichtungen auskennt, können Sie an den QUALITY OFFICE-Zeichen für Fachberater erkennen. Das Zeichen für zertifizierte Bürofachhändler weist Ihnen darüber hinaus den Weg zu maßgeschneidertem Service.



Fordern Sie einfach unsere Liste mit Kontaktadressen aus Ihrer Region an!  
[www.quality-office.org](http://www.quality-office.org)

Das Qualitätssiegel  
für Büromöbel



Das Qualitätssiegel  
für Fachberater und  
Planer



Das Qualitätssiegel  
für Bürofachhändler



ISBN 978-3-8167-9079-2

9 783816 790792  
Fraunhofer IRB Verlag

## Akustikelemente für USM Haller

### Ruhe im Raum!



### Schallabsorption Akustikelemente im USM Haller Möbel optimieren die Raumakustik.

USM U. Schärer Söhne GmbH, D-77815 Bühl, Tel. +49 72 23 80 94 0  
USM U. Schärer Söhne AG, CH-3110 Münsingen, Tel. +41 31 720 72 72  
Showrooms: Berlin, Bern, Düsseldorf, Hamburg, München,  
New York, Paris, Stuttgart, Tokio  
info@usm.com , www.usm.com

**USM**  
Möbelbausysteme