

# Hören + Akustik = Psychoakustik

von Hugo Fastl

## Einführung

Die Fachdisziplin Psychoakustik studiert die Zusammenhänge zwischen Schallreizen und den von diesen hervorgerufenen Hörwahrnehmungen. In diesem Sinne behandelt der Begriff »Hören« im Titel die Hörwahrnehmung und der Begriff »Akustik« die Schallreize. Die Psychoakustik kann somit als Brücke zwischen den beiden Welten Physik einerseits und Wahrnehmung andererseits aufgefasst werden.

Diese Argumentation soll anhand von Abbildung 1 erläutert werden: In physikalischen Messungen werden (häufig von Ingenieuren) technische Merkmale von Schallen wie Pegel, Spektrum, Zeitfunktion etc. erfasst. Im Bereich der subjektiven Wahrnehmungen, einer Domäne der Psychologie, beurteilen Versuchspersonen Schalle als laut, dröhnend, quietschend etc. Aufgabe der Psychoakustik ist es, quantitative Zusammenhänge zwischen beiden Welten zu definieren und (möglichst) in Algorithmen zu fassen.

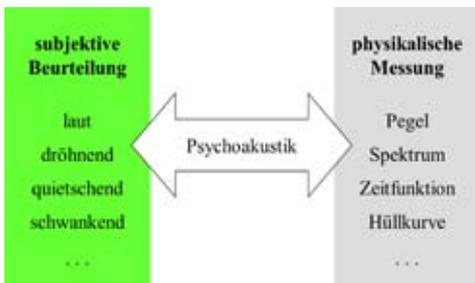


Abb. 1; Die Fachdisziplin Psychoakustik als Brücke zwischen physikalischer Messung und subjektiver Beurteilung

## Schallgenerierung und Schalldarbietung

Im Bereich der Physik kommt der Schallgenerierung und Schalldarbietung eine zentrale Rolle zu. Synthetische Schallreize werden heutzutage meist mittels MATLAB generiert. Für die D/A-Wandlung werden Wandler mit 16 bit bis zu 24 bit verwendet, wobei etwa 144 dB Dynamik, die 24 bit entsprechen würden, in der Praxis oft nicht erreicht werden. Für viele Anwendungen sind jedoch 20 bit mit etwa 120 dB Dynamik ausreichend.

Die Speicherung von Schallen geschieht »klassisch« auf einer Compact Disc (CD) mit 44,1 kHz Abtastfrequenz und 16 bit uniformer Kodierung. Dabei ergeben sich Datenraten von etwa 700 kbit/s. Bei den Nachfolgesystemen der CD zeigt sich eine Dichotomie: Einerseits werden beispielsweise von der DVD-Audio bei 24 bit und 192 kHz Datenraten von etwa 4,6 Mbit/s erreicht; andererseits werden bei psychoakustisch motivierten Kodierverfahren wie MP3 oder AAC Datenraten von 64 kbit/s und weniger eingesetzt.

Werden natürliche oder technische Schalle mit Messmikrofonen unterschiedlicher Hersteller aufgenommen, zeigen sich praktisch identische Ergebnisse. Im Gegensatz dazu kann sich das Klangbild bei Aufnahmen mit verschiedenen Kopfhörern deutlich unterscheiden.



Hugo Fastl,  
Professor für Technische Akustik,  
AG Technische Akustik, MMK,  
Technische Universität München

Als Beispiel zeigt Abbildung 2 Übertragungsmasse verschiedener Kunstköpfe, die heutzutage häufig in der Praxis eingesetzt werden. Während für die Produkte B bis E Freifeld-Entzerrung gewählt wurde, ist für das Produkt A grundsätzlich Diffusfeld-Entzerrung vorgesehen.

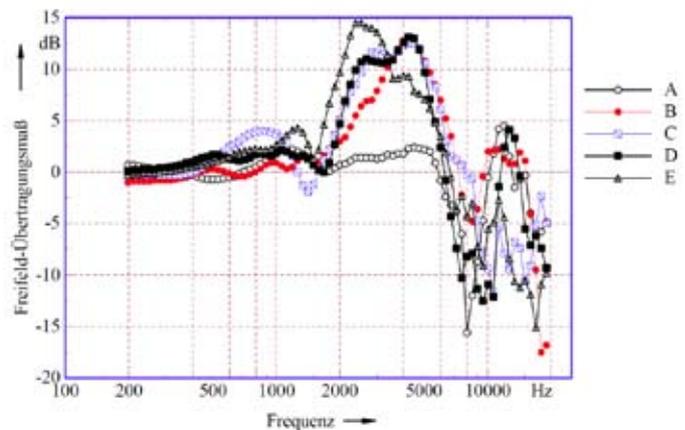


Abb. 2: Übertragungsmasse unterschiedlicher Kunstkopf-Systeme (nach Daniel et al., 2007)

Zur Wiedergabe von Schallen werden in der Psychoakustik sowohl Kopfhörer als auch Lautsprecher verwendet. Obwohl Kopfhörer grundsätzlich geringere Verzerrungen erzeugen, können sich gravierende Probleme in der Reproduktion des Klangbilds ergeben. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 den gehörbezogenen Frequenzgang (Freifeld-Übertragungsmaß) von zwei in der Audiologie bis heute häufig eingesetzten Kopfhörern.

Beide Kopfhörer schwächen hohe und tiefe Frequenzen deutlich ab, wodurch erhebliche Einbußen im Klangbild entstehen. In der Psychoakustik wird der in Abbildung 3a charakterisierte Kopfhörer deshalb nur mit einem Entzerrer verwendet, der ein weitgehend frequenzunabhängiges Übertragungsmaß (»linearer Frequenzgang«) ermöglicht. Der Autor bewundert Toningenieure bei Rundfunk und Fernsehen, die im Außendienst oft mit diesem Kopfhörer *ohne* Entzerrer arbeiten und dennoch häufig recht passable Klangbilder schaffen.

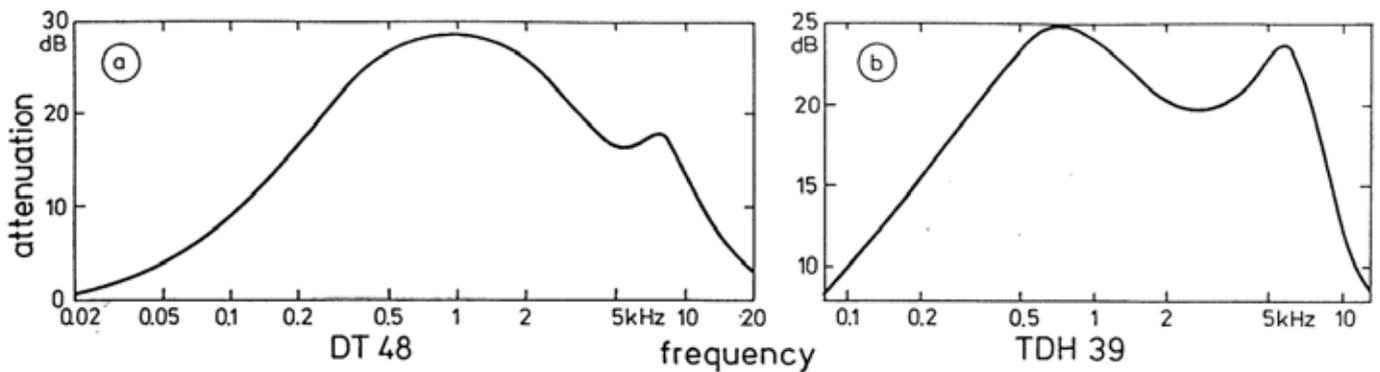


Abb. 3 (a+b): Frequenzgang (Freifeld-Übertragungsmaß) von zwei »klassischen« elektrodynamischen Kopfhörern (nach Fastl und Zwicker, 2007)

Eine für Anwendungen beispielsweise in der Audiologie interessante Entwicklung ist ein »virtueller Kopfhörer«, bei dem mit einem Lautsprecherring akustische Quellen an die beiden Ohren »projiziert« werden (Abbildung 4).

Durch geeignete Algorithmen (cross talk cancellation) gelingt es, die Lautsprecher so anzusteuern, dass das Übersprechen zwischen linkem und rechtem Ohr in einem weiten Frequenzbereich auf etwa 20 dB begrenzt bleibt. Wird beispielsweise an das linke Ohr eine Quelle mit 80 dB und an das rechte Ohr eine Quelle mit 60 dB projiziert, hat die Versuchsperson den Eindruck, nur das linke Ohr würde beschallt werden.

In der Horizontalebene, d.h. einer gedachten Ebene auf Ohrhöhe, klappt die Richtungswahrnehmung mit dem »virtuellen Kopfhörer« bereits recht gut. Abbildung 5 ermöglicht den Vergleich zwischen intendierter und gehörter Richtung: Alle Messdaten liegen nahe bei der Winkelhalbierenden.



Abb. 4: »Virtueller Kopfhörer«: Ring von 22 Lautsprechern, mit deren Hilfe Schallquellen an die Ohren »projiziert« werden (vgl. Abb. 4) (nach Menzel et al., 2005)

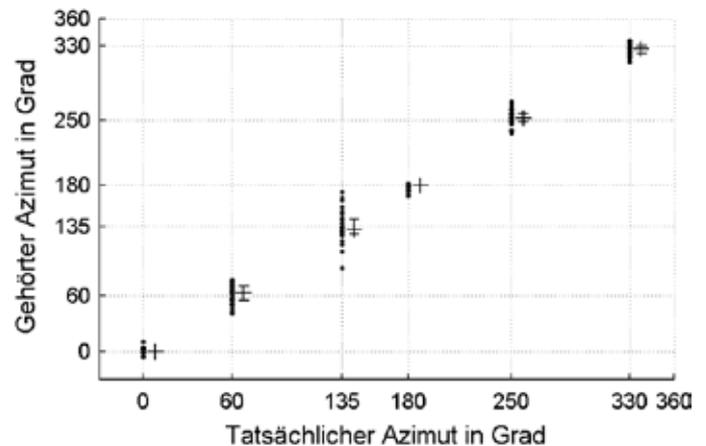


Abb. 5: Richtungswahrnehmung mit dem »virtuellen Kopfhörer« in der Horizontalebene. Gehörte Richtung als Funktion der intendierten Richtung (nach Menzel et al., 2006)

Allerdings besteht noch Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Wahrnehmung der Elevation. Dies soll anhand der in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse diskutiert werden.

In Abbildung 6 entsprechen 0 Grad der Ohrhöhe, positive Werte stehen für Elevationen über der Ohrhöhe, negative Werte für Schallrichtungen unterhalb der Ohrhöhe. Die gestrichelten Geraden verbinden intendierte Schallquellenorte, die durchgezogenen Geraden gehörte Schallquellenorte.

Die in Abbildung 6 dargestellten Daten verdeutlichen, dass die Schallquellenorte grundsätzlich zu hoch gehört werden. Dies ist besonders gravierend bei Schallquelle 3, die eigentlich unterhalb der Ohrhöhe bei -25 Grad auftreten sollte, jedoch oberhalb der Ohrhöhe bei etwa +12 Grad wahrgenommen wird. Entsprechendes gilt für die Schallquelle 6, wobei hier die Unterschiede nicht ganz so gravierend sind.

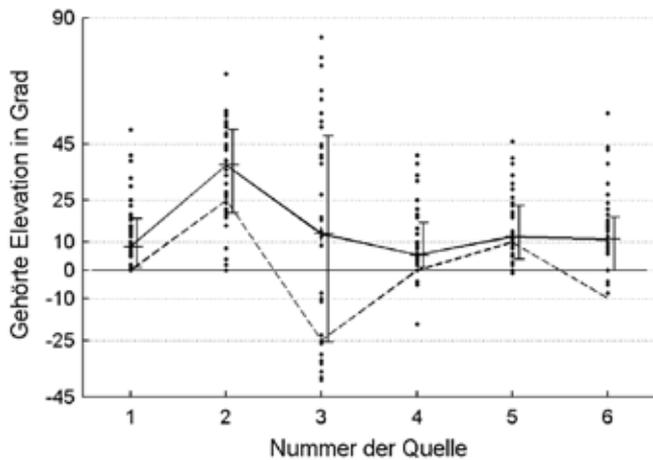


Abb. 6: Wahrnehmung der Elevation mit dem »virtuellen Kopfhörer« (nach Menzel et al., 2006)

Es soll auch nicht verschwiegen werden, dass durch den Abstand zwischen den Lautsprechern Alias-Effekte auftreten, die das Klangbild des virtuellen Kopfhörers bei hohen Frequenzen verfälschen. Dennoch scheint es lohnend, Möglichkeiten und Grenzen der Schall-darbietung mit Gruppen von Lautsprechern auszuloten.

**Hörschwellen**

Eines der grundlegendsten Experimente der Psychoakustik ist die Bestimmung der Ruhehörschwelle. Dabei wird in ruhiger Umgebung für Sinustöne unterschiedlicher Frequenz derjenige Pegel bestimmt, bei dem diese gerade wahrnehmbar werden. In der Audiologie wird meist der Hörverlust dargestellt, d.h. um wie viel dB mehr eine Person im Vergleich zu normal hörenden Personen benötigt, um einen Sinuston in ruhiger Umgebung gerade wahrzunehmen. Positive Werte des Hörverlustes bedeuten schlechteres Hören, negative Werte besseres Hören. Abbildung 7 zeigt als Beispiel die mittleren Hörschwellen von angehenden Tonmeistern.

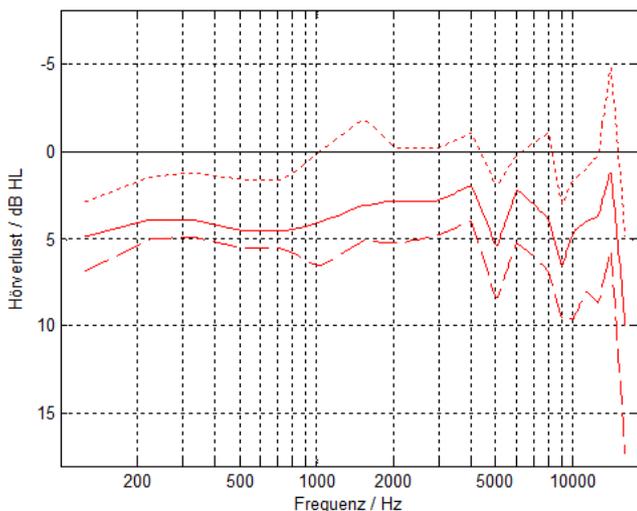


Abb. 7: Hörschwellen von angehenden Tonmeistern (nach Völk et al., 2008)

Da im Allgemeinen angenommen wird, dass Tonmeister »goldene Ohren« besitzen, wird eigentlich ein negativer Hörverlust (z.B. -5 dB) erwartet. Im Gegensatz dazu weisen die in Abbildung 7 dargestellten Daten jedoch auf einen Hörverlust von etwa 5 dB hin. Die Ursachen für dieses unerwartete Ergebnis sind derzeit noch unklar: Es könnten sich die Bezugskurven verschoben haben, oder das Gehör der angehenden Tonmeister könnte durch stundenlanges (über-)lautes Abhören von Aufnahmen bereits geringfügig beeinträchtigt sein.

**Lautheit**

Die Lautstärkewahrnehmung wird in der Psychoakustik als Lautheit bezeichnet. Sie ist von essenzieller Bedeutung sowohl für die Grundlagenforschung als auch für praktische Anwendungen. Die Ergebnisse zahlreicher psychoakustischer Experimente haben Eingang in Algorithmen gefunden, mit denen die Lautstärkewahrnehmung prognostiziert werden kann. So existieren bereits Normen zur Berechnung der Lautheit von stationären Schallen (DIN 45631) und auch von instationären Schallen (DIN 45631/A1).

Basierend auf diesen Arbeiten wurde ein Dynamisches Lautheitsmodell (DLM) entwickelt, mit dessen Hilfe die Lautheit sowohl für normal hörende als auch für schwerhörige Personen prognostiziert werden kann. Abbildung 8 illustriert die einzelnen Verarbeitungsschritte: Es handelt sich eindeutig um eine Variante aus der Familie der Zwicker-schen Lautheits-Modelle mit Frequenzgruppenfiltern (critical band filters), Nachverdeckung (post masking), nichtlinearen oberen Flanken (upward spread of masking) sowie spektraler Summation und zeitlicher Integration. Besonders bedeutsam ist jedoch der Block »Loudness Transformation«, der als Einziger verändert werden muss, um von Lautheits-Prognosen für normal Hörende auf Lautheits-Prognosen für Schwerhörige überzugehen.

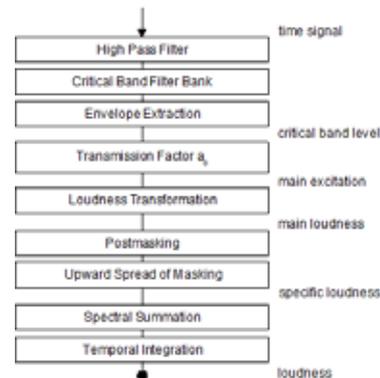


Abb. 8: Dynamisches Lautheitsmodell (DLM) zur Prognose der Lautstärkewahrnehmung von normal Hörenden oder Schwerhörigen (nach Chalupper und Fastl, 2002)

Die in Abbildung 9 dargestellten Daten erlauben einen Vergleich von psychoakustischen Messungen der Kategorial-Lautheit mit Prognosen durch das Dynamische Lautheitsmodell. Im linken Teil sind Ergebnisse für eine normal hörende Person, im rechten Teil für eine schwerhörige Person mit Hochtenschwerhörigkeit dargestellt.

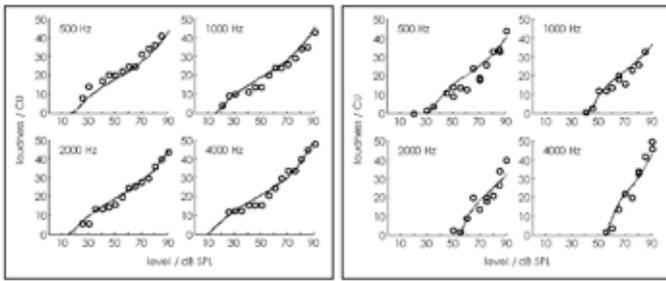


Abb. 9: Vergleich von in psychoakustischen Experimenten bestimmten Lautheiten (Kreise) mit Prognosen durch das Dynamische Lautheitsmodell (Kurven). Links: normal hörende Person. Rechts: schwerhörige Person mit Hochtonverlust (nach Fastl und Zwicker, 2007)

Gemäß den in Abbildung 9 dargestellten Ergebnissen kann das Dynamische Lautheitsmodell die Lautheitsskalierung sowohl von normal hörenden als auch von schwerhörigen Personen quantitativ nachvollziehen. Sogar das Recruitment der schwerhörigen Person bei 4.000 Hz wird vom DLM mit großer Genauigkeit prognostiziert.

### Sprache im Störgeräusch

Während bereits normal hörende Personen Schwierigkeiten beim Sprachverstehen in Störgeräuschen haben – beispielsweise auf einer Cocktailparty –, ist diese Problematik bei schwerhörigen Personen noch wesentlich verschärft. Deshalb wird bei der Anpassung von Hörhilfen auch das Sprachverständnis im Störgeräusch geprüft. Traditionell wurden für diese Untersuchungen stationäre Geräusche verwendet, die in ihrer Spektralverteilung dem Spektrum von Sprachschall ähneln. Allerdings sind zeitliche Schwankungen des Pegels für Sprachschall typisch. Bei normaler Sprechgeschwindigkeit werden im Mittel etwa vier Silben pro Sekunde gesprochen. Die zugehörige Hüllkurvenschwankung mit 4 Hz entspricht dem Maximum der Hörempfindung Schwankungsstärke. Vereinfacht ausgedrückt lässt sich also sagen, dass das Gehör für diejenigen Schwankungsfrequenzen besonders empfindlich ist, bei denen die Schwankungen in fließender Sprache auftreten.

Aus diesem Grunde wurde ein Störgeräusch entwickelt, das im Mittel die Spektralverteilung und zeitliche Schwankung fließender Sprache nachbildet. In Abbildung 10 sind entsprechende Spektralverteilungen und Lautheits-Zeitmuster dargestellt.

Abbildung 10a zeigt die langzeitgemittelte Spektralverteilung von Sprache, die in CCITT Rec. G227 nachgebildet wurde. Gemäß Abb. 10b weist die Lautheits-Zeitfunktion dieses Geräusches praktisch keine zeitlichen Schwankungen auf. Abbildung 10c repräsentiert die Hüllkurvenschwankung fließender Sprache, die mit der Abhängigkeit der Hörempfindung Schwankungsstärke von der Modulationsfrequenz weitgehend übereinstimmt. Wird nun das Rauschen nach CCITT Rec. G227 mit einem Schmalbandrauschen gemäß Abbildung 10c amplitudenmoduliert, ergibt sich die in Abbildung 10d dargestellte Lautheits-Zeitfunktion. Dieses Geräusch, das in der Literatur auch häufig als Fastl-Rauschen bezeichnet wird, ist im Internet als wav file verfügbar (<http://www.mmk.ei.tum.de/~tal/demos/noise.html>).

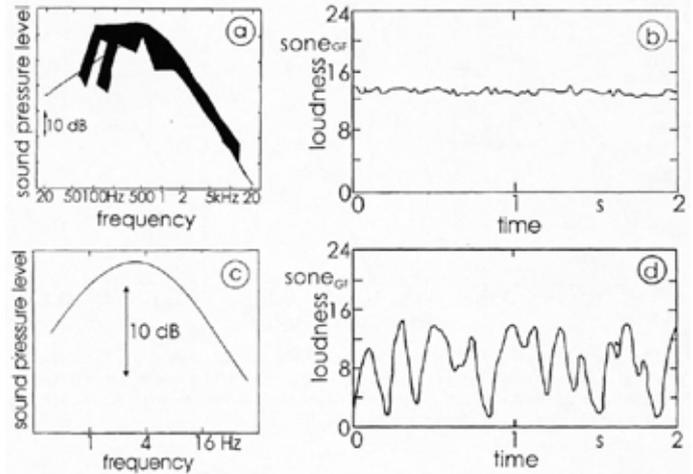


Abb. 10: Störgeräusch für die Sprachaudiometrie, in der Literatur häufig als Fastl-Rauschen bezeichnet (nach Fastl und Zwicker, 2007)

Im schwankenden Störgeräusch gemäß Abbildung 10d ist Sprache leichter zu verstehen als im kontinuierlichen Störgeräusch gemäß Abbildung 10b, da beim schwankenden Störgeräusch die Möglichkeit besteht, Wörter in den Minima der Lautheits-Zeitfunktion zu verstehen, also gewissermaßen »in die Lücken hineinzuhören«.

Entsprechende Messergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt: Normal hörende Personen benötigen für das schwankende Störgeräusch (leere Kreise) wesentlich weniger Signal/Rauschverhältnis als für das kontinuierliche Störgeräusch (leere Quadrate).

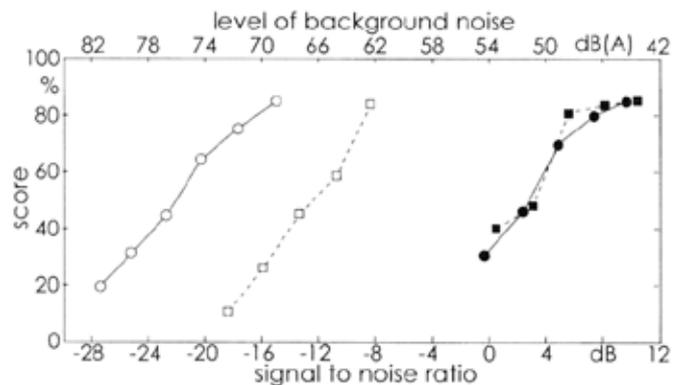


Abb. 11: Sprachverstehen im Störgeräusch von normal hörenden Personen (leere Symbole) bzw. CI-Patienten (ausgefüllte Symbole). Kontinuierliches Störgeräusch gemäß Abb. 10b (Quadrate) bzw. schwankendes Störgeräusch gemäß Abb. 10d (Kreise) (nach Fastl und Zwicker, 2007)

Im Gegensatz dazu benötigen CI-Patienten für beide Störgeräusche praktisch das gleiche Signal/Rauschverhältnis (ausgefüllte Symbole). Offensichtlich ist die Fähigkeit, »in Lücken hineinzuhören«, bei den Patienten verloren gegangen, was zu deren verschärften Problemen mit dem Sprachverständnis in Störgeräuschen beiträgt.

### Audiovisuelle Interaktionen

Abschließend soll noch kurz auf Ergebnisse hingewiesen werden, die nahelegen, dass die Lautheitswahrnehmung nicht nur von akustischen Reizen, sondern auch von zusätzlich dargebotenen visuellen Reizen beeinflusst werden kann.

Ein Beispiel, das bereits Eingang in populärwissenschaftliche Medien gefunden hat, soll anhand von Abbildung 12 erläutert werden: Versuchspersonen wird das Geräusch eines vorbeifahrenden ICE dargeboten, und gleichzeitig werden abwechselnd Bilder eines ICE in unterschiedlichen Farben gezeigt.



Abb. 12: Bilder eines ICE in den Farben Weiß, Rot, Hellblau und Hellgrün, die jeweils zusätzlich zu den Geräuschen der Vorbeifahrt eines ICE dargeboten werden (nach Fastl, 2004)

Trotz **gleicher** Schalldarbietung werden die Geräusche des ICE bei Kombination mit dem Bild eines roten ICE als lauter wahrgenommen im Vergleich zur Kombination mit dem Bild eines hellgrünen ICE.

Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse illustrieren, dass solche audiovisuellen Interaktionen nicht nur bei deutschen Versuchspersonen, sondern sogar in noch stärkerem Maße auch bei japanischen Versuchspersonen auftreten.

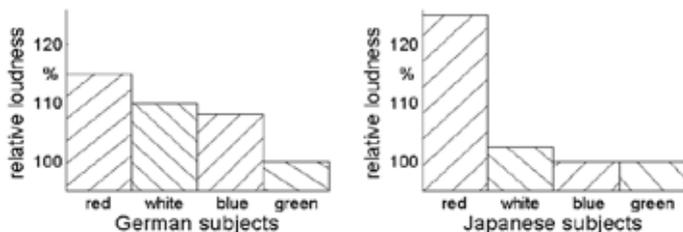


Abb. 13: Audiovisuelle Interaktionen: Einfluss der Farbe eines ICE auf die wahrgenommene Lautstärke trotz **gleicher** Schalldarbietung bei deutschen (links) bzw. japanischen (rechts) Versuchspersonen (nach Fastl, 2004)

Folgende praktische Anwendung der Erkenntnisse über audiovisuelle Interaktionen wäre hinsichtlich der Abhörlautstärke von Musikwiedergabegeräten wie iPods denkbar: Da bei gegebenem Schallpegel die wahrgenommene Lautstärke von roten Produkten besonders groß ist, wäre zu erwarten, dass der Abhörpegel bei roten iPods etwas geringer eingestellt wird, da die rote Farbe einen zusätzlichen »Lautstärkegewinn« bewirkt. Auf diese Art und Weise sollte sich die Gehörgefährdung durch übergroße Lautstärken bei der Musikwiedergabe etwas reduzieren lassen.

In Abbildung 14 sind visuelle Reize entsprechender audiovisueller Experimente illustriert: Zusätzlich zur Musikdarbietung wurden Bilder von iPods in jeweils unterschiedlichen Farben dargeboten.



Abb. 14: Bilder von iPods in unterschiedlichen Farben, die zusätzlich zur Musikwiedergabe dargeboten wurden (nach Menzel et al., 2010)

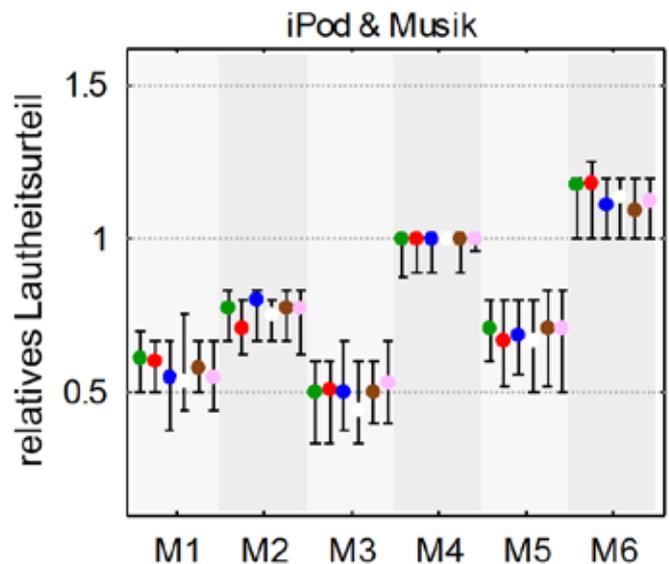


Abb. 15: Wahrgenommene Lautstärke von Musikstücken M1 bis M6, wenn gleichzeitig zur Musikwiedergabe Bilder von iPods in unterschiedlichen Farben gezeigt werden (nach Menzel et al., 2010)

Die Ergebnisse der entsprechenden audiovisuellen Experimente sind in Abbildung 15 dargestellt: Zwar ergeben sich deutliche Unterschiede in der wahrgenommenen Lautstärke für die verschiedenen Musikbeispiele M1 bis M6. Allerdings hat die Farbe der zusätzlich zu den Mu-

sikdarbietungen gezeigten Bilder von iPods praktisch keinen Einfluss auf die wahrgenommene Lautstärke. Leider kann demnach durch die Farbgebung von Musikwiedergabegeräten eine denkbare Gehörgefährdung durch überlaute Musikdarbietungen **nicht** reduziert werden.

## Ausblick

Dem Fachgebiet Psychoakustik können mit seiner Kombination aus Hören und Akustik glänzende Zukunftsaussichten vorhergesagt werden.

Auf dem Gebiet der Schalldarbietung werden analog zum hier vorgestellten »virtuellen Kopfhörer« Möglichkeiten und Grenzen vielkanaliger Lautsprechersysteme beispielsweise bei Wellenfeld-Synthese ausgelotet (vgl. Völk et al., 2010). Darüber hinaus bietet die binaurale Raumsynthese vielseitige Möglichkeiten der Schalldarbietung für grundlegende psychoakustische Experimente, aber auch für praktische Anwendungen in der Raumakustik oder bei der Anpassung von Hörgeräten und Cochlea-Implantaten (Völk und Fastl, 2010).

Anwendungen der Psychoakustik beim sound engineering und sound quality design (Fastl, 2006) sind in der Automobilindustrie bereits weit verbreitet, jedoch stehen noch zahlreiche recht unterschiedliche andere Anwendungsfelder wie Haushaltgeräte, Windkraftanlagen oder Hörhilfen erst am Anfang. Insbesondere die Beziehungen von Psychoakustik und Musikwahrnehmung (z.B. Fastl, 2007) sind bei Weitem noch nicht umfassend ausgelotet. Auch spielen kognitive Effekte bei Anwendungen der Psychoakustik beispielsweise in der Lärmbekämpfung eine zunehmende Rolle (z.B. Fastl, 2010).

Eine aussichtsreiche Weiterentwicklung des Fachgebiets Psychoakustik kann in der Ausweitung auf multi-modale Fragestellungen gesehen werden. Hier sind insbesondere audiovisuelle Interaktionen (z.B. Fastl, 2004) zu nennen, aber auch Kombinationen von akustischen und taktilen Reizen bieten sich an.

## Danksagung

Der Autor dankt den derzeitigen und früheren Mitgliedern seiner Arbeitsgruppe Technische Akustik für wertvolle Beiträge, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Florian Völk für Diskussionen und Unterstützung bei der Erstellung des Manuskripts. Zahlreiche der hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

### Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Hugo Fastl  
E-Mail: fastl@mmk.ei.tum.de

## Literatur

- Chalupper J and Fastl H. Dynamic Loudness Model (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners. *ACUSTICA/acta acustica*, 88(3): 378-386, 2002. Hirzel-Verlag, Stuttgart.
- Daniel P, Fastl H, Fedtke T, Genuit K, Grabsch H-P, Niederdränk T, A. Schmitz, Vorländer M, and Zollner M. Kunstkopftechnik – Eine Bestandsaufnahme. *ACUSTICA/acta acustica/Nuntius Acusticus*, 93(1): 58 Seiten, 2007.
- Fastl H. Audio-visual interactions in loudness evaluation. *Proc. of ICA 2004*, 18.

- Intern. Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, volume II, pp. 1161–1166, 2004. »Acoustic Science and Technology for Quality of Life«, 04. bis 09.04.2004. Ed.: Intern. Commission on Acoustics.
- Fastl H. Psychoacoustic basis of sound quality evaluation and sound engineering. In: Eberhardtsteiner J, Mang H A, and Waubke H, editors, *Proc. 13th Intern. Congress on Sound and Vibration ICSV13*, Vienna, Austria, 2006. 02. bis 06.06.2006.
- Fastl H. Psychoacoustics, sound quality and music. *Proc. of 36th Intern. Congress on Noise Control Engineering INTER-NOISE 2007*, Istanbul, Turkey, 2007. 28. bis 31.08.2007.
- Fastl H. Praktische Anwendungen der Psychoakustik. *Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2010*, Berlin, Germany, pp. 5-10. DEGA, 2010. 15. bis 18.03.2010.
- Fastl H and Zwicker E. *Psychoacoustics, Facts and Models*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 3 edition, 2007. 462 p., 313 fig., incl.
- Menzel D, Wittek H, Theile G, and Fastl H. The Binaural Sky: A Virtual Headphone for Binaural Room Synthesis. *Proc. of Intern. Tonmeister Symposium, Hohenkammer*, 2005. 31.10. bis 02.11.2005. [http://www.tonmeister.de/symposium/2005/np\\_pdf/R04](http://www.tonmeister.de/symposium/2005/np_pdf/R04).
- Menzel D, Wittek H, Fastl H, and Theile G. Binaurale Raumsynthese mittels Wellenfeldsynthese – Realisierung und Evaluierung. *Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2006*, Braunschweig, pp. 255–256. DEGA, 2006. 20. bis 23.03.2006.
- Menzel D, Schulze T, and Fastl H. Zum Einfluss der Farbpräferenz auf die Lautheitsbeurteilung. *Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2010*, Berlin, Germany, pp. 873–874. DEGA, 2010. 15. bis 18.03.2010.
- Völk F, Fastl H, Lott F, Hasford B, and Glink A. Mindestanforderungen an das Hörvermögen von angehenden Mediengestaltern Bild und Ton. In: Jekosch U and Hoffmann R, editors, *Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2008*, Dresden, pp. 55–56. DEGA, 2008. 10. bis 13.03.2008.
- Völk F and Fastl H. Advantages of binaural room synthesis for research and fitting of hearing aids, cochlear implants, electro-acoustical stimulation, and combined systems. *Proc. 20th Intern. Congress on Acoustics, ICA (2010)*, Sydney, Australia, 2010. 23. bis 27.08.2010.
- Völk F, Faccinelli E, and Fastl H. Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen virtueller Wellenfeldsynthese. *Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2010*, Berlin, Germany, pp. 1069–1070. DEGA, 2010. 15. bis 18.03.2010.

Weitere Literaturhinweise unter <http://www.mmk.ei.tum.de/~tal/Literatur/>