

# Praktische Anwendungen der Psychoakustik

Hugo Fastl

Arbeitsgruppe Technische Akustik, MMK, Technische Universität München, 80333 München  
E-Mail: fastl@mmk.ei.tum.de

## 1. Einführung

Die Fachdisziplin Psychoakustik hat sich zum Ziel gesetzt, die durch Schallreize hervorgerufenen Hörempfindungen quantitativ zu beschreiben. Das Wesen der Psychoakustik kann anhand von Abbildung 1 erläutert werden: Grundsätzlich müssen zwei Welten unterschieden werden, die Ingenieuren gut vertraute Welt der physikalischen Messungen und die Welt der subjektiven Beurteilung, eine Domäne der Psychologen.

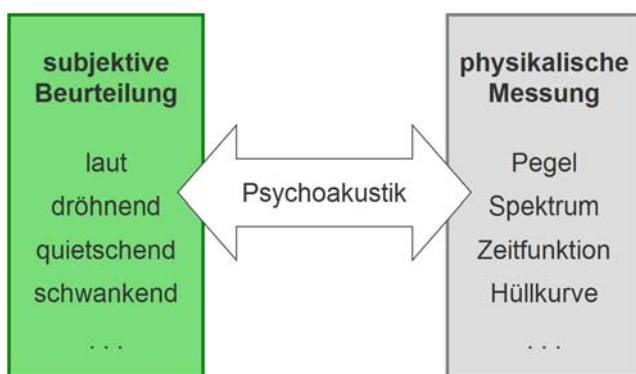


Abbildung 1: Konzept der Psychoakustik

Die Psychoakustik kann als Bindeglied zwischen diesen beiden Welten aufgefasst werden. In der Praxis wird leider häufig die klare Trennung beider Welten verwischt. Beispielsweise werden sogar von Koryphäen wie Paul Hindemith (1938) die Begriffe Tonhöhe und Frequenz vermischt angewandt wodurch Missverständnisse entstehen können. Während die Frequenz dem Bereich der physikalischen Messungen angehört, ist die Tonhöhe etwas Wahrgenommenes, also eine Hörempfindung. Dies wird auch beim Phänomen der Tonhöhenverschiebungen deutlich: obwohl die Frequenz eines Sinustones nicht verändert wird, erhöht sich seine Tonhöhe um bis zu 6%, also einen musikalischen Halbton, wenn zusätzlich ein tieferfrequentes Schmalbandrauschen dargeboten wird.

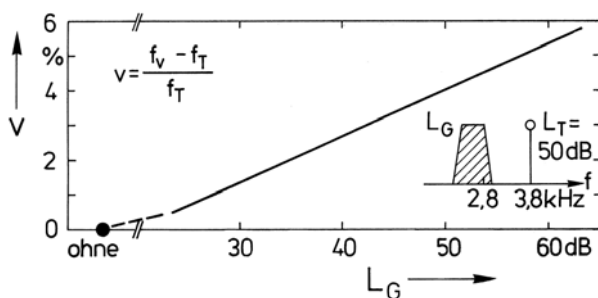


Abbildung 2: Verschiebung der Tonhöhe eines Sinustones bei 3,8 kHz bei zusätzlicher Darbietung eines Schmalbandrauschens um 2,8 kHz als Funktion von dessen Pegel.

Ähnlich salopp werden häufig die Begriffe Schallpegel und Lautheit verwendet. So ist sogar von Experten zu hören „das verbesserte Produkt ist um 10 dB leiser“. Korrekt muss es natürlich heißen, dass der Schallpegel um 10 dB reduziert wurde, was in der Regel eine Reduktion der Lautheit auf die Hälfte bewirkt. Um Missverständnissen vorzubeugen ist hier eine klare Trennung zwischen Reiz und Empfindung bzw. Schall und Laut nötig (vgl. Blauert 2010).

Im vorliegenden Überblicksaufsatz werden zunächst Aspekte der Reizgenerierung und Schallwiedergabe angesprochen. Sodann werden Anwendungen der Psychoakustik in der Audiologie, der Musik und der Geräuschbeurteilung aufgezeigt. Schließlich werden kognitive Aspekte sowie audiovisuelle Interaktionen diskutiert.

## 2. Schallreize und Schallwiedergabe

Bei den Schallreizen wird meist zwischen synthetischen Schallen einerseits und natürlichen oder technischen Geräuschen andererseits unterschieden. Die „klassische“ Psychoakustik (Stevens and Davis 1938, Zwicker und Feldtkeller 1967) hat nahezu ausschließlich synthetische Schalle wie Sinustöne, komplexe Töne, Schmalbandrauschen, Breitbandrauschen etc. studiert. Für grundlegende psychoakustische Untersuchungen werden diese Schalle auch heute noch verwendet (z.B. Verhey 1999, Fruhmann 2006). Die Reizgenerierung erfolgt meist mit MATLAB und es werden Abtastfrequenzen zwischen 44,1 und 192 kHz sowie Wortbreiten von 16 oder 24 bit verwendet. Während für psychoakustische Untersuchungen Abtastfrequenzen um 50 kHz meist ausreichen, ist die Erweiterung auf mehr als 16 bit vor allem bei technischen Geräuschen ein deutlicher Fortschritt, wenn auch in der Praxis die etwa 144 dB Dynamikumfang eines 24 bit D/A-Wandlers meist nicht erreicht werden.

Werden für die Aufnahme von natürlichen oder technischen Geräuschen Messmikrofone verwendet, führen Produkte unterschiedlicher Hersteller zu gleichen Ergebnissen. Bei der Schallaufnahme mittels Kunstköpfen ist dieser Standard noch nicht erreicht, und die Aufnahmen mit den Produkten verschiedener Hersteller können sich teilweise sehr deutlich unterscheiden (vgl. Daniel et al. 2007). Hier wäre eine für alle Kunstkopffhersteller gleiche Schale von Vorteil um rein geometrisch bedingte Unterschiede zu vermeiden (Fastl 2004a).

Bezüglich der Schallwiedergabe werden in der klassischen Psychoakustik häufig Freifeldbedingungen bevorzugt, wobei die Schalldarbietung entweder in reflexionsarmen Räumen über Lautsprecher oder in schallgedämmten Kabinen über freifeldentzerrte Kopfhörer erfolgt (z.B. Fastl und Fleischer 1978). Während früher Entzerrungsnetzwerke für Kopfhörer anhand der Ergebnisse subjektiver Lautheitsvergleiche ent-

wickelt wurden (z.B. Fastl und Zwicker 2007, S. 7), werden heute in der Regel Miniaturmikrofone im geschlossenen Gehörgang verwendet (z.B. Møller 1992, Völk 2010). Darüber hinaus werden derzeit vielkanalige Wiedergabeverfahren, die häufig auf dem Prinzip der Wellenfeldsynthese basieren diskutiert (z.B. Berkhout et al. 1999, Wittek 2007), mit deren Hilfe sich auch „virtuelle Kopfhörer“ gestalten lassen (Menzel et al. 2005, 2006, Laumann et al. 2008).

### 3. Anwendungen der Psychoakustik

In diesem Abschnitt werden praktische Anwendungen der Psychoakustik in der Audiologie, in der Musik sowie bei der Geräuschbeurteilung aufgezeigt.

#### 3.1 Audiologie

Methoden und Erkenntnisse der Psychoakustik finden schon seit geraumer Zeit Anwendungen in der Audiologie (z.B. Zwicker 1978). Die Umsetzung psychoakustischen Wissens in audilogische Fragestellungen hat einen ungeahnten Aufschwung erfahren. So befassen sich beispielsweise in Oldenburg zahlreiche Einrichtungen in, an und im Umfeld der Universität mit der Anwendung der Psychoakustik in der Audiologie (Kollmeier et al. 2007).

Eine grundlegende psychoakustische Größe mit audiologischer Bedeutung repräsentiert die Ruhehörschwelle. Beispielsweise wird bei Kandidatinnen und Kandidaten für den Beruf des Tonmeisters das Hörvermögen akribisch untersucht. Abbildung 3 zeigt Ergebnisse einer umfangreichen Studie, die gemeinsam mit dem Bayerischen Rundfunk durchgeführt wurde (Völk et al. 2008). Der Hörverlust ist als Funktion der Frequenz dargestellt.

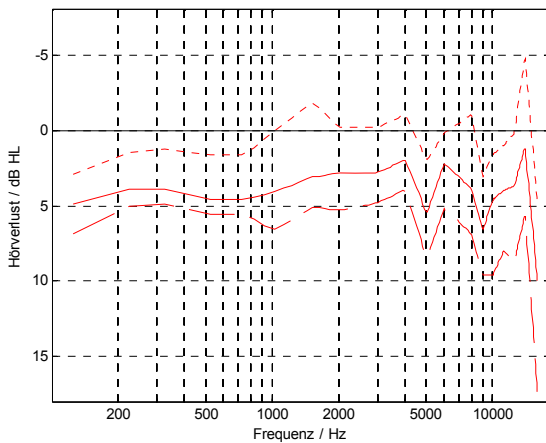


Abbildung 3: Median und Interquartilbereich der Ruhehörschwellen angehender Tonmeister (nach Völk et al. 2008).

Entgegen der Erwartung zeigen die in Abbildung 3 dargestellten Daten kein überdurchschnittliches Hörvermögen (negativer Hörverlust) sondern einen Hörverlust von knapp 5 dB. Dieser Wert soll beim Bayerischen Rundfunk zukünftig als eines von zahlreichen Auswahlkriterien verwendet werden. Da es sich bei angehenden Tonmeistern um „goldene Ohren“ handelt, sollte überlegt werden, ob die vor Jahren bestimmten „Normalhörschwellen“ noch das heutige „normale“ Hörvermögen widerspiegeln.

Für die Rehabilitation von Hörstörungen werden neben konventionellen Hörgeräten zunehmend Cochlea Implantate eingesetzt (z.B. Hochmair et al. 2006). Dabei werden Schalle nach einem Vocoderprinzip analysiert und als Folgen elektrischer Reizimpulse im Innenohr appliziert (House 1976). Mit Cochlea Implantaten können in ruhiger Umgebung erstaunlich gute Ergebnisse hinsichtlich des Sprachverständnisses erzielt werden. Bei beidohriger Versorgung mit zwei Cochlea Implantaten kann sogar die Richtungswahrnehmung sehr gut rehabilitiert werden (Seeber et al. 2004, Seeber und Fastl 2008). Abbildung 4 zeigt Daten für einen Probanden mit besonders guten Ergebnissen.

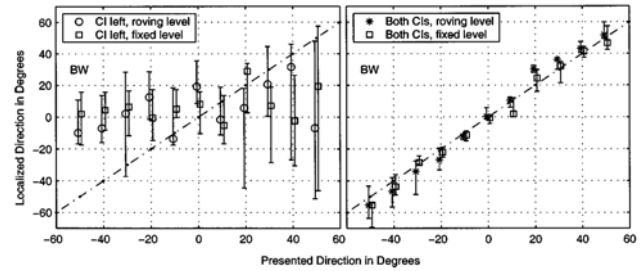


Abbildung 4: Lokalisation in der Horizontalebene mit *einem* Cochlea Implantat (links) bzw. *zwei* Cochlea Implantaten (rechts) nach Seeber et al. 2004.

Wie zu erwarten zeigt der linke Teil der Abbildung, dass mit nur einem Cochlea Implantat die Richtungswahrnehmung nicht rehabilitiert werden kann. Trotz Darbietung von Schallen aus -50 bis +50 Grad, also deutlich links bzw. rechts des Probanden, werden alle Schalle mehr oder weniger in Blickrichtung (geradeaus, 0 Grad) wahrgenommen. Mit zwei Cochlea Implantaten (rechte Teilabbildung) ist jedoch die Richtungswahrnehmung nahezu genauso gut wie bei Normalhörenden.

Trotz dieser sehr erfreulichen Ergebnisse in ruhiger Umgebung soll nicht verschwiegen werden, dass bei Störgeräuschen (Cocktail Party) das Sprachverständnis mit konventionellen Hörgeräten oder Cochlea Implantaten dramatisch abnimmt. Abbildung 5 zeigt einige Ergebnisse für Träger von Cochlea Implantaten (Rader et al. 2009). Für verschiedene Störgeräusche ist der Signal/Rauschabstand für 50% Sprachverständlichkeit dargestellt.

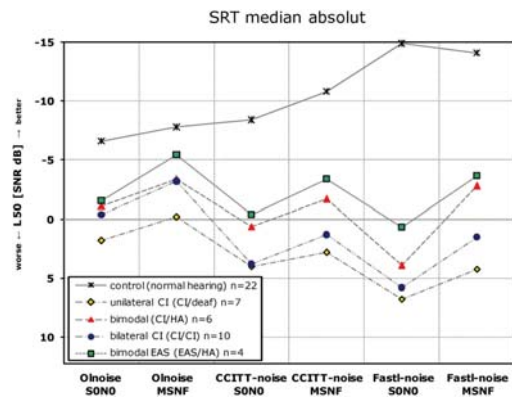


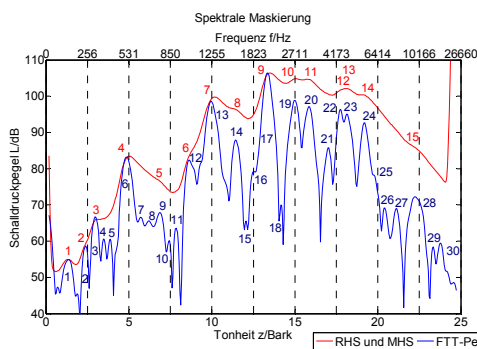
Abbildung 5: Sprachverständlichkeit in verschiedenen Störgeräuschen für Normalhörende (Kreuze) und Patienten mit unterschiedlichen Versorgungen durch Cochlea Implantate (nach Rader et al. 2009).

Während OL-noise und CCITT-noise Dauergeräusche repräsentieren, weist Fastl-noise deutliche zeitliche Hüllkurvenschwankungen auf. Normalhörende (Kreuze) können von den zeitlichen Lücken im Fastl-noise profitieren, benötigen also einen geringeren Signal/Rauschabstand als bei Dauergeräuschen. Patienten mit Cochlea Implantaten gelingt dies nicht; das schwankende Geräusch stört praktisch genauso stark wie die Dauergeräusche. Darüber hinaus benötigen die Patienten grundsätzlich ein wesentlich besseres Signal/Rauschverhältnis wobei Systeme mit elektrisch/akustischer Stimulation (EAS, Quadrate) noch am besten abschneiden. Bei diesen Systemen werden hohe Frequenzen durch ein Cochlea Implantat versorgt, während bei tiefen Frequenzen eine (normale) akustische Reizung erfolgt. Dadurch wird der Bereich der Sprachgrundfrequenzen besser erhalten, was offensichtlich ein besseres Sprachverständnis im Störgeräusch begünstigt (Baumann und Helbig 2009).

### 3.2 Musik

Anwendungen der Psychoakustik in der Musik sind äußerst vielfältig. Genau genommen könnte man sagen, dass sich die Prinzipien der Psychoakustik aus Untersuchungen zur musikalischen Akustik entwickelt haben. Bereits vor etwa 2500 Jahren hat Pythagoras mit seinem Monocord psychoakustische Experimente durchgeführt: Durch Verschieben des Stegs hat er die Saitenlänge in unterschiedlich lange Abschnitte aufgeteilt (Reizerzeugung) und mit seinem Gehör festgestellt (Wahrnehmung) ob sich konsonante oder dissonante Intervalle ergeben. Obwohl heutzutage zur digitalen Reizgenerierung und statistischen Auswertung von Versuchsergebnissen mächtige Werkzeuge zur Verfügung stehen, sind die Prinzipien psychoakustischen Experimentierens doch gleich geblieben.

Wegen ihrer kultischen Bedeutung wurden Glocken seit jeher als ganz besondere „Musikinstrumente“ betrachtet. Die einzelnen Teiltöne bilden keine rein harmonischen Verhältnisse und herstellungsbedingte Abweichungen von einer perfekten Rotationssymmetrie führen zu den für Glockenklänge typischen Schwebungen. Im Sinne der Psychoakustik ist nun von besonderem Interesse, welche der zahlreichen physikalisch nachweisbaren Teiltöne den Klang einer Glocke maßgeblich beeinflussen. Ergebnisse einer diesbezüglichen Studie (Fleischer et al. 2007) sollen anhand von Abbildung 6 erläutert werden.

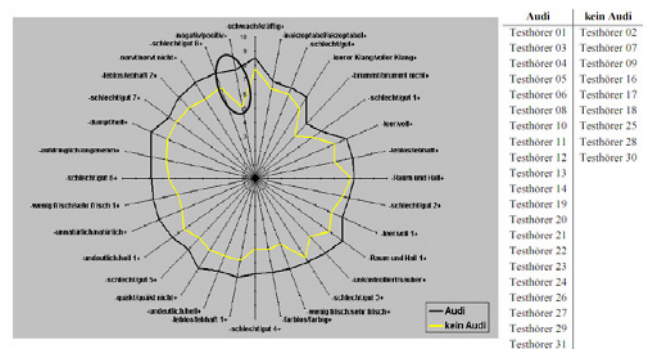


**Abbildung 6:** Teiltöne eines Glockenklangs bei FTT-Analyse (untere Kurve) bzw. Berücksichtigung von Ruhe- und Mithörschwellen (obere Kurve) nach Fleischer et al. 2007.

In Abbildung 6 sind im gesamten Hörbereich 30 Teiltöne eines Glockenklangs dargestellt. Wegen der Verdeckung sind jedoch nicht alle für die Wahrnehmung von Bedeutung. Deshalb wurden Klänge mit einer unterschiedlichen Anzahl von Teiltönen synthetisiert und in psychoakustischen Experimenten beurteilt. Dabei sollten die Versuchspersonen auf einer fünfstufigen Skala folgende Frage beantworten: Klingt der dargebotene Klang nach Kirchenglocke? Wie zu erwarten wurden Klänge mit allen 30 Teiltönen, aber auch Klänge mit den 25 Teiltönen 6...30 der FTT-Analyse als nahezu perfekte Glockenklänge eingeschätzt. Bei Berücksichtigung von Ruhe- und Mithörschwellen genügt ein Klang mit den 12 Teiltönen 4...15. Sogar ein Klang, der lediglich die vier Teiltöne 4, 7, 9, 13 enthält wurde als brauchbarer Glockenklang bezeichnet. Von den zahlreichen, physikalisch nachweisbaren Teiltönen eines Glockenklangs sind demnach psychoakustisch nur vier bis zwölf für den wahrgenommenen Glockenklang von Bedeutung.

Da die Saiten von Elektrogitarren Biegeschwingungen ausführen, weisen die zugehörigen Klänge leicht inharmonische Spektralverteilungen auf (Völk et al. 2006). Werden sowohl rein harmonische Spektra als auch leicht inharmonische Spektra von Gitarrenklängen synthetisiert und in psychoakustischen Experimenten beurteilt, so zeigt sich eine leichte Präferenz für die inharmonischen Spektra, vor allem bei Musikern von Saiteninstrumenten (Fastl und Völk 2008).

Für die Beurteilung der Qualität der Musikwiedergabe in PKW wurde folgende Meßmethode erprobt (Fastl et al. 2009): Die Versuchsperson nimmt in einem PKW Platz, legt eine Test-CD in das fahrzeugeigene Audiosystem ein und markiert auf einem PDA längs zehnstufiger Skalen ihre Beurteilungen von Bass, Mitten, Höhen etc. Die Ergebnisse können in Form eines Netzes ähnlich einem Spinnennetz dargestellt werden, wobei die Qualität der Musikwiedergabe der Fläche des Netzes proportional ist. Abbildung 7 zeigt ein für psychoakustische Experimente typisches Beispiel: Die Beurteilung hängt auch von der Zusammensetzung der Gruppe der Versuchspersonen ab.



**Abbildung 7:** Beurteilung der Qualität von Musikwiedergabe in einem PKW (nach Fastl et al. 2009)

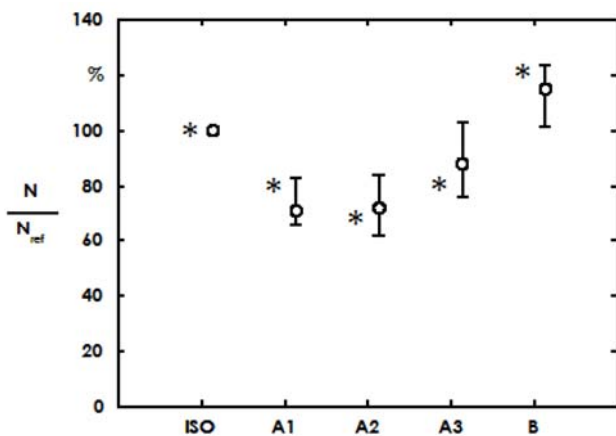
Bei Personen, die eine Beziehung zum Produkt haben (Angestellte von Audi, Audifahrer) fällt die Beurteilung der Qualität der Musikwiedergabe im PKW wesentlich günstiger aus (äußere Kurve) als bei Personen ohne Bezug zum Produkt (innere Kurve). Die dunkle äußere Kurve beinhaltet demnach eine größere Fläche als die helle innere Kurve.

Beim globalen Urteil (eingekreist) vergeben Personen mit Beziehung zum Produkt acht von zehn möglichen Punkten, während Personen ohne Produktbezug nur fünf von zehn Punkten vergeben. Bei praktischen Anwendungen der Psychoakustik muss dementsprechend die Zielgruppe genau definiert werden, da über die eigentliche Akustik hinaus andere Aspekte eine ganz wesentliche Rolle spielen können.

### 3.3 Geräuschbeurteilung

Da praktische Anwendungen der Psychoakustik bei der Geräuschbeurteilung bereits alltäglich geworden sind (z.B. Mellert und Weber 1984, Fastl und Zwicker 2007, Hellbrück 2007, Scheuren et al. 2009, Genuit 2010) sollen hier nur zwei Beispiele, nämlich schallabsorbierende Straßenbeläge und Außengeräusche von KFZ, kurz erwähnt werden.

Abbildung 8 verdeutlicht die schallabsorbierende Wirkung unterschiedlicher Straßenbeläge.



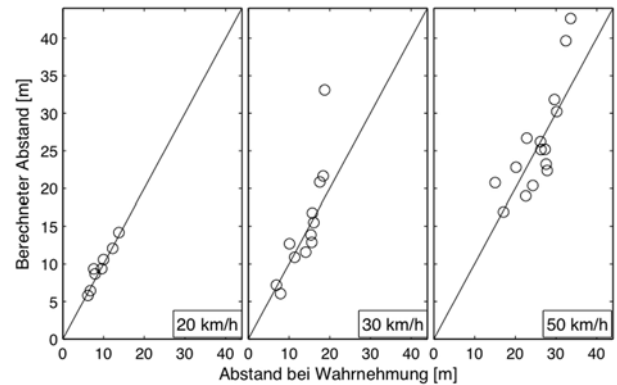
**Abbildung 8:** Lautheitsunterschiede bei verschiedenen schallabsorbierenden Straßenbelägen (nach Fastl et al. 2007)

Die Lautheit von Verkehrsgeräuschen wurde zum einen in psychoakustischen Experimenten ermittelt (Kreise mit wahrscheinlichen Schwankungen); zum anderen wurde die Perzentillautheit  $N_5$  physikalisch mit einem Lautheitsanalyse-System nach DIN 45631/A1 bestimmt (Sterne). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von subjektiver und physikalischer Beurteilung. Wird jedoch die Wirkung der schallabsorbierenden Beläge anhand der Faustformel „10 dB weniger ist halb so laut“ abgeschätzt, werden gute Ingenieurleistungen deutlich unterschätzt: Beispielsweise beschreibt für den Straßenbelag A1 die Perzentillautheit  $N_5$  – im Einklang mit der subjektiven Beurteilung – im Vergleich zum ISO-Belag eine Geräuschreduktion um mehr als 20%, während nach der Faustformel eine Reduktion um lediglich etwa 3% prognostiziert wird (Fastl et al. 2007).

In den letzten Jahren haben – auch aufgrund immer niedrigerer Grenzwerte – die Außengeräusche von KFZ abgenommen. Bei neuen Antriebskonzepten wie Hybridfahrzeugen oder Elektroautos sind die Außengeräusche bereits so niedrig, dass nicht immer gewährleistet werden kann, dass Fußgänger die Fahrzeuge in Hintergrundgeräuschen rechtzeitig

wahrnehmen, um Kollisionen zu vermeiden (Kerber und Fastl 2007).

Vor diesem Hintergrund wurde das Konzept des „kritischen Abstands“ entwickelt; in diesem Abstand muss ein Fußgänger ein KFZ in Hintergrundgeräuschen wahrnehmen können, damit eine Kollision vermieden wird. In einer Modellvorstellung gehen die Schalldruck-Zeitfunktionen von sich näherndem Fahrzeug und Hintergrundgeräusch ein, und anhand der zugehörigen Mithörschwellen wird der kritische Abstand berechnet. Abbildung 9 ermöglicht einen Vergleich der in psychoakustischen Experimenten gemessenen mit berechneten Werten.



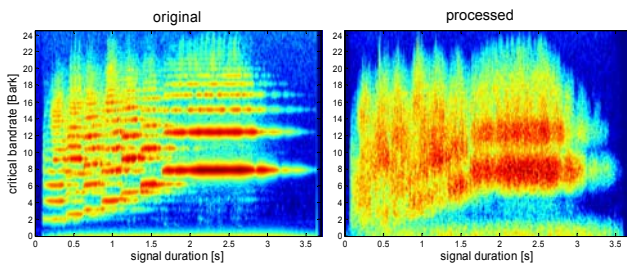
**Abbildung 9:** Vergleich von in psychoakustischen Experimenten gemessenen mit berechneten kritischen Abständen (nach Kerber 2008)

Die in Abbildung 9 dargestellten Daten zeigen eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten der kritischen Abstände. Während bei 20 km/h die Übereinstimmung perfekt ist, ergeben sich bei 30 km/h und 50 km/h einige Ausreißer. Allerdings werden in diesen Fällen in der Regel zu große kritische Abstände berechnet, das Fahrzeug ist also weiter als für die Hörbarkeit unbedingt nötig vom Fußgänger entfernt, und eine Kollision kann sicher vermieden werden.

## 4. Ausblick

### 4.1 Kognitive Effekte

Bei der Umsetzung von Ergebnissen psychoakustischer Grundlagenforschung in praktische Handlungsanweisungen können kognitive Effekte eine zentrale Rolle spielen. Bei Vorliegen einer Aversion gegen eine bestimmte Geräuschart wie beispielsweise Motorradgeräusche wird sogar bei erheblicher Reduktion der Lautheit die belästigende Wirkung kaum abnehmen. Um den Einfluss kognitiver Effekte studieren zu können wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Lautheits-Zeitfunktion eines Geräusches praktisch erhalten bleibt, aber die Schallquelle nicht mehr erkannt werden kann (Fastl 2001). Im Wesentlichen werden dabei die spektralen Feinheiten verwischt (engl. blur). Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für einen Trompetenklang, wenn eine Tonleiter gespielt wird.

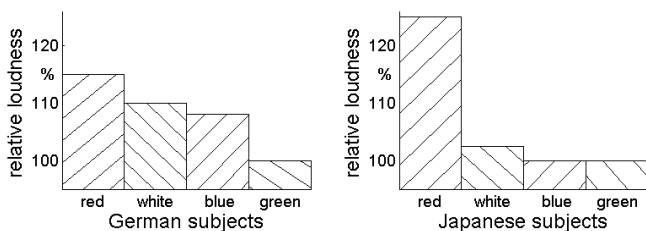


**Abbildung 10:** Spektrogramme eines Trompetenklangs wenn eine Tonleiter gespielt wird. Originalschall (links) und prozessierte Version (rechts)

Im linken Teilbild sind der Anstieg der Tonhöhe sowie die spektrale Struktur mit Grundton und Obertönen des Trompetenklangs deutlich zu erkennen. Das rechte Teilbild zeigt ebenfalls einen Anstieg der Tonhöhe und andeutungsweise Reste einer spektralen Struktur mit Grundton und erstem Oberton, jedoch ist das Gesamtbild im Vergleich zum linken Teilbild „verwischt“. Dementsprechend kann der prozessierte Klang nicht als Trompetenklang erkannt werden. Auf diese Art und Weise kann die Größe des Einflusses kognitiver Effekte im Vergleich zu psychoakustischen Größen wie der Lautheit abgeschätzt werden, da gleiche Lautheits-Zeitmuster vorliegen, die Information über die Schallquelle aber weitgehend verloren geht.

#### 4.2 Audio-visuelle Interaktionen

Werden Versuchspersonen zusätzlich zu Schallen Bilder beispielsweise eines ICEs dargeboten, so kann – trotz gleichem Schallpegel – die Lautheit von der Farbgebung der Züge abhängen (Fastl 2004b): Rote Züge werden im Vergleich zu hellgrünen Zügen als lauter wahrgenommen. Abbildung 10 zeigt entsprechende Ergebnisse für deutsche und japanische Versuchspersonen.



**Abbildung 11:** Lautheit von ICE-Zügen unterschiedlicher Farbe bei gleichem Schallpegel.

Während für die deutschen Versuchspersonen der rote ICE im Mittel um etwa 15% lauter erscheint als der hellgrüne ICE, beträgt der Lautheitsunterschied bei den japanischen Versuchspersonen im Mittel sogar etwa 25%.

Offensichtlich ist rot als „laute“ Farbe für Sportwagen besonders gut geeignet, wie dies beispielsweise bei Ferrari in die Praxis umgesetzt wird. Auf den ersten Blick scheinen die grünen englischen Sportwagen nicht in dieses Bild zu passen. Allerdings waren die Züge hellgrün eingefärbt während das englische „racing green“ einen dunkelgrünen Farbton darstellt. Psychoakustische Experimente, bei denen zusätzlich zu den Geräuschen Bilder von Sportwagen in verschie-

denen Farben gezeigt wurden haben ergeben, dass nicht nur rot sondern auch dunkelgrün eine „laute“ Farbe repräsentiert (Menzel et al. 2008).

Da die Farbe rot eines Produkts bei gegebenem Schallpegel eine Überschätzung der Lautheit bewirken kann, wäre folgendes Szenario denkbar: Ein iPod wird rot eingefärbt. Da die „laute“ Farbe rot zu einer größeren wahrgenommenen Lautstärke führt, könnten die gehörgeschädigenden hohen Schallpegel etwas zurückgenommen werden. Leider haben umfangreiche psychoakustische Experimente (Menzel et al. 2010) bei diesen Produkten nicht zu den erwarteten audio-visuellen Interaktionen hinsichtlich der Farbgebung geführt. Die wahrgenommene Lautstärke ist praktisch unabhängig von der Farbe des iPod. Deshalb sollte nach wie vor für die Vermeidung überlauter Musikdarbietungen vor allem bei jungen Menschen geworben werden.

#### 5. Schlussbemerkung

Die in der Grundlagenforschung entdeckten Phänomene der Psychoakustik wie Maskierung, Frequenzgruppen, Spektral- und Zeitauflösung des Gehörs haben in Feldern wie Audio-Codierung oder Geräuschbeurteilung bereits breite Anwendung gefunden. In anderen Bereichen der Akustik wie der Raumakustik und Auralisation (z.B. Vorländer 2007, Goossens 2010, Weinzierl et al. 2010) oder Multimedia (z.B. Kohlrausch et al. 2005, Rigoll 2005, Möller et al. 2010) steht der Anwendung psychoakustischer Prinzipien noch eine große Zukunft bevor.

Der Autor dankt Herrn Dipl.-Ing. Daniel Menzel und Herrn Dipl.-Ing. Florian Völk für weiterführende Diskussionen und dem Erstgenannten für tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung des Vortrags und des Manuskripts.

Einige der hier erwähnten Arbeiten wurden oft über viele Jahre hinweg von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

#### Literaturauswahl

- Baumann U., S. Helbig: Hören mit kombinierter elektrischer und akustischer Stimulation. *HNO* **57**(6), 542-550 (2009)
- Berkhout A.J., D. de Vries, J. Baan, B.W. van den Oetelaar: A Wave field extrapolation approach to acoustical modelling in enclosed spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 1725-1733 (1999)
- Blauert J: Zur Terminologie der Hörakustik im Lichte der neuen DIN 1320, In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Daniel P., H. Fastl, T. Fedtke, K. Genuit, H.-P. Grabsch, T. Niederdränk, A. Schmitz, M. Vorländer, M. Zollner: *Kunstkopftechnik - Eine Bestandsaufnahme*. Nuntius Acusticus, *Acustica/acta acustica* **93**(1), CD-ROM (2007)
- Fastl H.: Neutralizing the meaning of sound for sound quality evaluations. In *Proc. 17th ICA Rome*, CD-ROM (2001)
- Fastl H.: Towards a new Dummy Head? In *Proc. inter-noise 2004*, CD-ROM (2004a)
- Fastl H: Audio-visual interactions in loudness evaluation. In *Proc. 18th ICA Kyoto*, 1161-1166 (2004b)
- Fastl H., H. Fleischer: Freifeldübertragungsmaße verschiedener elektrodynamischer und elektrostatischer Kopfhörer. *Acustica* **39**, 182-187 (1978)

- Fastl H., E. Zwicker: *Psychoacoustics – Facts and Models*, 3rd Edition (Springer, Berlin, Heidelberg 2007)
- Fastl H., F. Völk: Inharmonicity of Sounds from Electric Guitars: Physical Flaw or Musical Asset? *ICMCP10* (2008)
- Fastl H., M. Ammler, A. Sulowski: Psychoacoustic Evaluation of Music Reproduction in Passenger Cars, *NAG/DAGA'09*, 1137-1139 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2009)
- Fastl H., C. Patsouras, S. Bayer, T. Beckenbauer: Psychoacoustic evaluation of sound absorbing road surfaces. In *Proc. 19th ICA Madrid* (2007)
- Fleischer H., H. Fastl, M. Sattler: Wann klingt ein Glockenklang nach Kirchenglocke? In *Fortschritte der Akustik, DAGA'07*, 241-242 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2007)
- Fruhmann M.: *Ein Modell zur Wahrnehmung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe*, Dissertation, Techn. Univ. München (2006)
- Genuit K.: Quo vadis Psychoakustik? Potential und Limitation einer Disziplin zwischen den Disziplinen. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Goossens S.: Simulation und Auralisierung kleiner Räume. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Hellbrück J.: Wahrnehmung und Wirkung von Schall – Akustik zwischen Physik und Psychologie. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'07*, 17-22 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2007)
- Hindemith P.: *Unterweisung im Tonsatz*. (Schott 1938)
- Hochmair I., P. Nopp, C. Jolly, M. Schmidt, H. Schösser, C. Garnham, I. Anderson: MED-EL Cochlear implants: state of the art and a glimpse into the future. *Trends Amplif.* **10**(4), 201-219 (2006)
- House W.F.: Cochlear Implants. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* **85**, suppl 27(3Pt2), 1-93 (1976)
- Kerber S.: *Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen*. (Verlag Dr. Hut, München 2008)
- Kerber S., H. Fastl: Perceptibility of approaching vehicles in urban background noise. In *Proc. inter-noise 2007*, CD-ROM (2007)
- Kohlrausch A., J. Breebaart, M. McKinney, S. van de Par, J. Skowronek: Psychoacoustic contributions to new techniques for the representation of and interaction with multi-media content. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'05*, 7-8 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2005)
- Kollmeier B., G. Klump, V. Hohmann, U. Langemann, M. Mauermann, S. Uppenkamp, J. Verhey (Eds.) *Hearing – From Sensory Processing to Perception*. (Springer, Berlin 2007)
- Laumann K., G. Theile, H. Fastl: A virtual headphone based on wave field synthesis. In *Proc. Acoustics 08 Paris*, 3593-3597 (2008)
- Mellert V., R. Weber: Gehörbezogene Verfahren zur Lärmbeurteilung. In: *Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls*, (Schick, A., Walcher, K.P. eds.), 183 (Verlag Peter Lang, Bern 1984)
- Menzel D., T. Schulze, H. Fastl: Zum Einfluss der Farbpräferenz auf die Lautheitsbeurteilung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Menzel D., H. Wittek, G. Theile, H. Fastl: The Binaural Sky: A Virtual Headphone for Binaural Room Synthesis. In *Proc. 1st International Tonmeister Symposium* (2005)
- Menzel D., H. Wittek, H. Fastl, G. Theile: Binaurale Raumsynthese mittels Wellenfeldsynthese - Realisierung und Evaluierung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '06*, 255-256 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2006)
- Menzel D., H. Fastl, R. Graf, J. Hellbrück: Influence of vehicle color on loudness judgments. *J. Acoust. Soc. Am.* **123**(5), 2477-2479 (2008)
- Möller S., B. Weiss, I. Wechsung, C. Kühnel, K.-P. Engelbrecht: Qualitätsintegration bei multimodaler Interaktion. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Møller H.: Fundamentals of Binaural Technology. *Appl. Acoustics* **36**, 171-218 (1992)
- Rader T., U. Baumann, H. Fastl: Comparison of Speech Intelligibility by EAS, Bimodal, Uni- and Bilateral Cochlear Implant Patients in a 'Multi-Source Noise Field' (MSNF). In: *NAG/DAGA 2009*, 1288-1290 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2009)
- Rigoll G.: Multimodale Mensch-Maschine-Kommunikation in München: Stand der Forschung und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'05*, 11-12 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2005)
- Scheuren J., O. Martner, C. Zerbs, S. Wartini: Applying Calculated Loudness to Evaluate Sound Characteristics in Practice. In *Proc. inter-noise 2009*, CD-ROM (2009)
- Seeber B., U. Baumann, H. Fastl: Localization ability with bimodal hearing aids and bilateral cochlear implants. *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**(3), 1698-1709 (2004)
- Seeber B., H. Fastl: Localization cues with bilateral cochlear implants. *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1030-1042 (2008)
- Stevens S.S., H. Davis: *Hearing: Its Psychology and Physiology* (Wiley, New York 1938)
- Verhey J: *Psychoacoustics of spectro-temporal effects in masking and loudness perception* (BIS Univ. Oldenburg 1999)
- Völk F.: Messtechnische Verifizierung eines datenbasierten binauralen Synthesystems, In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Völk F., H. Fastl, M. Fruhmann, S. Kerber: Psychoakustische Untersuchungen zu Inharmonizitäten von Gitarrensaiten, In *Fortschritte der Akustik, DAGA'06*, 743-744 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2006)
- Völk F., H. Fastl, F. Lott, B. Hasford, A. Glink.: Mindestanforderungen an das Hörvermögen von angehenden Mediengestaltern Bild und Ton. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'08*, 55-56 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2008)
- Vorländer M.: *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality* (Springer, Berlin 2007)
- Weinzierl S., H. Rosenheinrich, J. Blickensdorff, M. Horn, A. Lindau: Die Akustik der Konzertsäle im Leipziger Gewandhaus. Rekonstruktion und Auralisierung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA'10* (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010)
- Wittek H.: *Perceptual differences between wavefield synthesis and stereophony*, PhD Thesis, University of Surrey (2007)
- Zwicker, E.: *Klassifizierung von Hörschäden nach dem Frequenzselektionsvermögen*. In: *Kybernetik 1977*, (G. Hauske, E. Butehandt, eds.), 413-415 (Oldenbourg-Verlag, München 1978)
- Zwicker E., R. Feldtkeller: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, 2. erw. Auflage (Hirzel-Verlag, Stuttgart 1967)

Weitere Literaturhinweise im web:  
<http://www.mmk.ei.tum.de/~tal/Literatur/>  
 Fastl-noise: [www.mmk.ei.tum.de/~tal/demos/noise.html](http://www.mmk.ei.tum.de/~tal/demos/noise.html)