

# Die Münchener Schule der Psychoakustik

Hugo Fastl  
AG Technische Akustik, Mensch-Maschine-Kommunikation  
Technische Universität München  
fastl@mmk.ei.tum.de

## Vorgeschichte

Die Münchener Schule für Psychoakustik wurde 1967 von Professor Eberhard Zwicker gegründet. Zwicker wurde 1924 im schwäbischen Öhringen geboren und hat nach seinem Kriegsdienst an der Technischen Hochschule Stuttgart Nachrichtentechnik studiert.



**Bild 1:** Eberhard Zwicker im zarten Alter von drei Jahren



**Bild 2:** Zwicker als Student an der TH Stuttgart 1948

Er hat dort am Institut für Nachrichtentechnik bei Professor Richard Feldtkeller promoviert und seine erste Veröffentlichung aus dem Jahre 1952 ist bereits prägend für seinen weiteren Werdegang: Für die Beurteilung der noch in den Kinderschuhen steckenden Magnettonaufzeichnung hat Zwicker sich nicht auf physikalische Messungen beschränkt sondern "die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation

eines Tones" (Zwicker 1952) mit psychoakustischen Methoden studiert. In der Danksagung erscheint als Förderinstitution die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft, die Vorgängerin der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

## AKUSTISCHE BEIHEFTE

unter dem Patronat der internationalen akustischen Zeitschrift  
ACUSTICA

S. HIRZEL VERLAG · STUTTGART

Heft 3

1952

### DIE GRENZEN DER HÖRBARKEIT DER AMPLITUDENMODULATION UND DER FREQUENZMODULATION EINES TONES

Von E. ZWICKER

Mitteilung aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart

#### Zusammenfassung

Die eben hörbare Amplitudenmodulation und die eben hörbare Frequenzmodulation von reinen Tönen verschiedener Tonhöhe und Lautstärke werden in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz gemessen. Unterhalb einer bestimmten Modulationsfrequenz, der sogenannten Phasengrenzfrequenz, kann das Ohr zwischen beiden Modulationen unterscheiden und ist gegen die Amplitudenmodulation empfindlicher als gegen die Frequenzmodulation. Oberhalb der Phasengrenzfrequenz unterscheidet das Ohr die Amplitudenmodulation und die Frequenzmodulation nicht. Die Phasengrenzfrequenz liegt bei tiefen Tönen bei 30 Hz und wächst auf 1 kHz für Töne bei 10 kHz an. Der Einfluß des Frequenzganges des Übertragungsweges auf die Hörbarkeit der Frequenzmodulation wird untersucht und eine bestimmte Steigung des Frequenzganges angegeben, die eine eben hörbare Frequenzmodulation in eine eben hörbare Amplitudenmodulation umwandelt. Diese zulässige Steigung beträgt bis 1 kHz etwa 0,15 dB/Hz und fällt dann bis 0,01 dB/Hz bei 10 kHz ab.

#### Summary

Measurements have been made of the just perceptible amplitude-modulation and the just perceptible frequency-modulation of pure tones of different pitch and loudness-level as a function of the modulating frequency. Below a certain modulating frequency (the so-called phase-limit-frequency) the ear is able to distinguish between the two kinds of modulation and perceives the amplitude modulation much better. Above this phase limit frequency there is no perceptible

**Bild 3:** Erste Veröffentlichung Zwickers aus dem Institut für Nachrichtentechnik der TH Stuttgart

Es folgt 1956 seine Habilitation mit dem Thema "Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs" (Zwicker 1956).

## ACUSTICA

S. HIRZEL VERLAG · ZÜRICH

Vol. 6

1956

### DIE ELEMENTAREN GRUNDLAGEN ZUR BESTIMMUNG DER INFORMATIONS-KAPAZITÄT DES GEHÖRS \*

VON E. ZWICKER

Laboratorium für Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart

#### Zusammenfassung

Aus den eben hörbaren Amplituden- und Frequenzmodulationsgraden sowohl von Sinustönen als auch von Ausschnitten aus weißem Rauschen werden die Elemente der Schalländerungen in der Hörfläche zusammengestellt.

Anhand eines Modells, dem die Wahrnehmbarkeit einer Schallintensitätsänderung von 1 dB innerhalb einer Frequenzgruppe bei einer mittleren Zeitkonstante von 20 ms zugrunde liegt, kann die Hörbarkeit der Amplitudenmodulation, der Frequenzmodulation und diejenige von Phasenunterschieden, sowie die Verdeckung erklärt werden.

Die maximal annehmbare Information wird bestimmt und in einem Vergleich mit der Silbenverständlichkeit ihre Auswirkung erläutert.

\* Habilitationsschrift, Technische Hochschule Stuttgart.

#### Summary

From the audible amplitude and frequency modulation levels, both of pure tones and of sections of white noise, the elements of the sound changes in the hearing surfaces are combined.

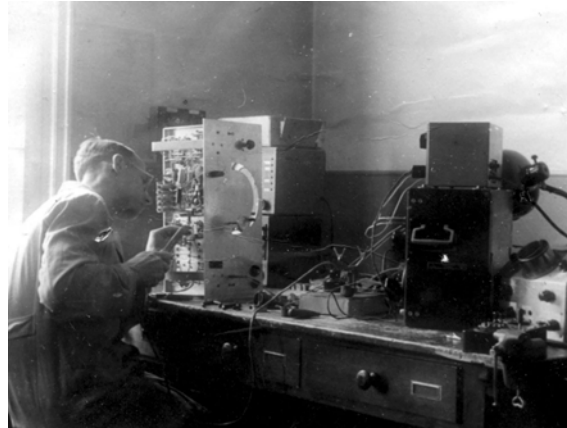
By means of a model which has as basis the perception of a change in sound intensity of 1 dB of a frequency group with a mean time constant of 20 ms., the audibility of the amplitude modulation, the frequency modulation and that of phase differences, as well as the masking is clarified.

The maximum perceptible information is estimated and its application to syllable-intelligibility illustrated.

**Bild 4:** Zwickers Habilitationsschrift 1956

Ende der 50er Jahre beschäftigt sich Zwicker mit Themengebieten, für die sein Name heute noch steht: zum einen die Lautheit (Zwicker 1958) und zum anderen die Frequenzgruppe (Zwicker 1960).

Mitte der 60er Jahre erfolgte ein Forschungsaufenthalt in den USA mit Arbeiten am berühmten Psychoakustik-Labor von S. S. Stevens in Harvard sowie dem damaligen "Mekka" für Wissenschaftler, den Bell Laboratorien.



**Bild 5:** Zwicker bei den Bell Labs

Aus dieser Zeit stammt die Entdeckung des akustischen Nachtons (Zwicker 1964), der heute unter dem Begriff "Zwicker-Ton" bekannt ist.

#### "Negative Afterimage" in Hearing

ERHARD ZWICKER\*

Bell Telephone Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey  
(Received 10 September 1964)

If a white noise with a half-octave-band suppression placed anywhere from 300 to 7000 Hz is presented at an over-all sound-pressure level of about 60 dB for 1 min and then switched off, a decaying, poststimulatory sound similar to a pure tone is heard for about 10 sec. The pitch of the poststimulatory tone corresponds to a frequency within the suppressed band.

DURING SOME EXPERIMENTS IN WHICH MODERATE-LEVEL, BAND-suppressed noise was used as a masker, an effect was found that has some similarities to the effect of afterimages known in vision.<sup>1</sup> If one listens to the band-suppressed noise for a minute or so and then disconnects the headphone through which the noise is heard, a decaying sound similar in quality to a sinusoidal tone is heard. The pitch of the subjective tone corresponds to that of a sinusoidal tone within the suppressed frequency range of the preceding noise. Surprisingly, this effect seems to be unknown. This report reviews some brief investigations of the effect as it depends on level of the preceding noise, center frequency of the suppressed band in the noise, bandwidth of the suppression, and time pattern of the preceding noise. Most listening was done monaurally, but tests of binaural interactions were also made.

The band-suppressed noise was produced by a noise generator and four Allison (model 2BR) variable low-pass filter sections in series, connected in parallel with four high-pass sections in series. The filters were resistively decoupled in such a way that a band

dB, 2.55 kHz. For  $L_R = 5$  dB, a noise level 15–20 dB above thresholds, the match was to 2.35 kHz, although here only three people heard the tone. For spectrum-density levels higher than 35 dB, the pitch increases further before the effect disappears. Measurements with noises containing suppressed bands one half-octave wide have shown that the described effect holds for band center frequencies between 700 Hz and 6 kHz. It was found that the change in pitch for a given change in  $L_R$  is larger at higher frequencies, although the pitch of the soft subjective tone was always within the suppressed-band range. For frequencies lower than 700 Hz, a half-octave band seems to be too narrow to produce an audible effect.

An over-all tilt of the noise spectrum seemed to have no influence on the described effect. Besides white noise, two other noises were used, one with a special density level tilt of  $-10$  dB/dec, and the other with a tilt of  $-20$  dB/dec. The poststimulatory sound remained, although its pitch shifted slightly to higher frequencies with steeper overall tilt of the noise

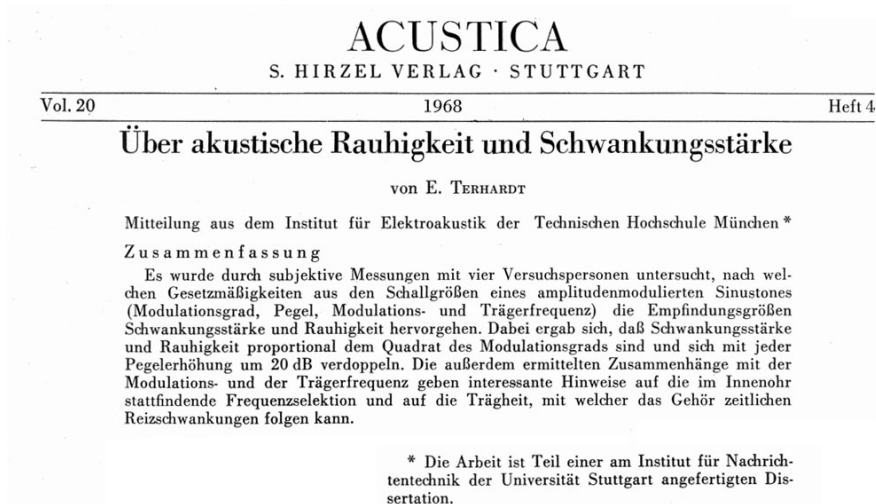
**Bild 6:** Erste Arbeit über den Zwicker-Ton



**Bild 7:** Zwicker vor seinem Auto und Haus während seines USA-Forschungsaufenthalts

## Die Jahre 1967-1990

Im Jahre 1967 wurde Eberhard Zwicker auf den neu gegründeten Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Hochschule München berufen. Dieses Datum markiert im engeren Sinne die Gründung der Münchener Schule für Psychoakustik. Gemeinsam mit Zwicker sind Ernst Terhardt sowie einige Assistenten von Stuttgart nach München übersiedelt. Terhardt hat seine Promotion noch in Stuttgart abgeschlossen, die erste Veröffentlichung aber trägt als Affiliation das Institut für Elektroakustik der Technischen Hochschule München (Terhardt 1968). Gegenstand der Dissertation von Ernst Terhardt waren akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke, Themengebiete, die ihn im Zusammenhang mit seinen Forschungen zur Musikalischen Konsonanz bis heute beschäftigen. Auch hätte sich damals wohl niemand träumen lassen, welche wichtige Rolle diese Hörempfindungen heutzutage beim sound quality design spielen.



**Bild 8:** Terhardts klassische Arbeit zu Rauigkeit und Schwankungsstärke

Neben den bereits genannten Hörempfindungen Lautheit, Tonhöhe, Schwankungsstärke und Rauigkeit wurden am Zwickerschen Institut neue Dimensionen der Hörwahrnehmung erforscht. Bei Untersuchungen zur subjektiven Dauer wurde festgestellt (Zwicker 1970), dass die wahrgenommene Dauer von Schallen oder Schallpausen ganz wesentlich von deren

physikalischer Dauer differieren kann. Als ein Attribut der Klangfarbenwahrnehmung wurde die Hörempfindung Schärfe eingeführt (v. Bismarck 1974). Schließlich begann 1971 Hugo Fastl seine Forschungsarbeiten am Institut für Elektroakustik (Terhardt und Fastl 1971), und das Münchener Triumvirat der Psychoakustik war damit komplett.

## ACUSTICA

S. HIRZEL VERLAG · STUTTGART

Vol. 25

1971

Heft 1

### Zum Einfluß von Störtönen und Störgeräuschen auf die Tonhöhe von Sinustönen

von E. TERHARDT und H. FASTL

Mitteilung aus dem Institut für Elektroakustik der Technischen Universität München

#### Zusammenfassung

Es wurde die Änderung der subjektiven Tonhöhe eines Testtones untersucht, welche bei Drosselung durch Störtöne und Störgeräusche in enger spektraler Nachbarschaft zum Testton auftritt. Diese Tonhöhenverschiebung war bei allen Testtonfrequenzen positiv (das heißt, zu höheren Tönen hin gerichtet), wenn der Störerschall eine tiefere Frequenzlage hatte als der Testton. Lag der Störerschall oberhalb des Testtones, dann wurden bei Testtönen unterhalb 500 Hz negative Tonhöhenverschiebungen beobachtet; Testtöne oberhalb 500 Hz zeigten unter denselben Verhältnissen keine oder eine geringe positive Tonhöhenverschiebung.

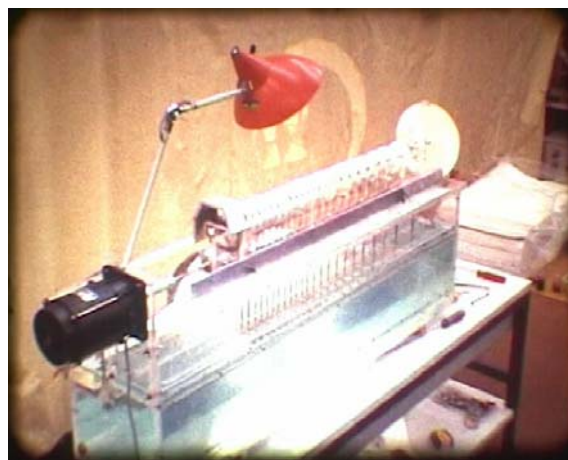
*Influence of Masking Tones and Noises on the Pitch of a Pure Tone*

#### Summary

The pitch shift of a tone caused by superimposing a second tone or a band limited noise, both in close spectral vicinity of the tone, was investigated. The pitch shift was upward for all tone frequencies when the masking sound's frequency range was just below the frequency of the tone. With the masking sound just above the tone, the pitch shift was downward for tone frequencies below 500 Hz; higher tones under the same conditions exhibited either no systematic pitch shift or a small shift upward.

### **Bild 9:** Erste Veröffentlichung mit Hugo Fastl als Koautor

In der Folgezeit hat sich Eberhard Zwicker insbesondere Parallelen zwischen Physiologie und Psychoakustik gewidmet. Auf der Grundlage eigener physiologischer Untersuchungen (Zwicker 1971) haben Helle (Helle 1974) und Zwicker (Zwicker 1974) hydromechanische Modelle des Innenohrs des Menschen entwickelt. Elektronische Innenohrmodelle wurden sowohl als Analogmodelle (Zwicker und Peisl 1990) wie auch als Digitalmodelle (Peisl und Zwicker 1989) realisiert. Mit den Mithörschwellen-Periodenmustern (Zwicker 1976a) hat Zwicker ein psychoakustisches Analogon zu den in der Physiologie üblichen Perioden-Histogrammen eingeführt (Zwicker 1976b).



**Bild 10:** Zwickers hydroakustisches Modell des Innenohres



**Bild 11:** Zwickers elektronisches Innenohrmodell in analoger RC-Technik

Ernst Terhardt hat sich insbesondere der Musikalischen Akustik sowie der Akustischen Kommunikation gewidmet. Im Bereich der Musikalischen Akustik hat seine Theorie der Musikalischen Konsonanz (Terhardt 1976), die zwischen sensorischer Konsonanz und Harmonie unterscheidet, große Beachtung gefunden. Studien zum absoluten Gehör (Terhardt und Seewann 1983) zeigen, dass das relative Musikgehör und das absolute Gehör mehr Gemeinsamkeiten aufweisen, als üblicherweise angenommen wird (Terhardt 1983).

## ACUSTICA

S. HIRZEL VERLAG · STUTTGART

Volume 36

1976/77

No.3

### Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz

von E. Terhardt

Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München

*Herrn Professor Dr. phil. M. Grützner zum 75. Geburtstag gewidmet*

#### Zusammenfassung

Musikalische Konsonanz wird als das Zusammenwirken von Sensorischer Konsonanz und Harmonie aufgefaßt. Die Sensorische Konsonanz ist der elementare, nicht musikspezifische Wohlklang; die Harmonie setzt sich aus Tonverwandtschaft, Kompatibilität, Grundtonbezogenheit und Tonalität zusammen. Es wird nachgewiesen, daß die Sensorische Konsonanz musikalischer Klänge durch die Wahrnehmung von Amplitudenschwankungen (Rauhigkeit) bestimmt wird, und daß die Harmonie ein elementarer Bestandteil der Tonhöhenwahrnehmung ist. Damit wird die Musikalische Konsonanz durch fundamentale, außermusikalische Wahrnehmungsprinzipien psychoakustisch begründet. Verschiedene Folgerungen und Anwendungen, sowie die Beziehungen des Konzepts zur Helmholtzschen Lehre von den Tonempfindungen werden dargelegt.

*Concept and Psychoacoustic Foundations of Musical Consonance*

#### Summary

Musical consonance is considered as the co-operative working of sensory consonance and harmony. With sensory consonance is meant the basic pleasantness (i.e., the absence of disturbances) of any sound; harmony is described by its components tonal affinity, compati-

**Bild 12:** Terhardts Konzept der Musikalischen Konsonanz

Terhardts Modell der virtuellen Tonhöhe (Terhardt 1979) ist derzeit konkurrenzlos, kann es doch sowohl Spektraltonhöhen als auch virtuelle Tonhöhen präzise inklusive aller Tonhöhenverschiebungseffekte prognostizieren (Terhardt et al. 1982). Einen weiteren Meilenstein in Terhardts Forschung bilden seine Arbeiten zur Fourier-Time-Transformation FTT (Terhardt 1985). Diese gehörgerechte, zeitvariante Spektraldarstellung wird weltweit in

Theorie und Praxis der Akustischen Kommunikation eingesetzt (Schlang und Mummert 1990, Mummert 1991).

*Hearing Research*, 1 (1979) 155–182  
©Elsevier/North Holland Biomedical Press

#### CALCULATING VIRTUAL PITCH

ERNST TERHARDT

*Institut für Elektroakustik der Technischen Universität München, Arcisstr. 21, D-8000 Munich 2, F.R.G.*

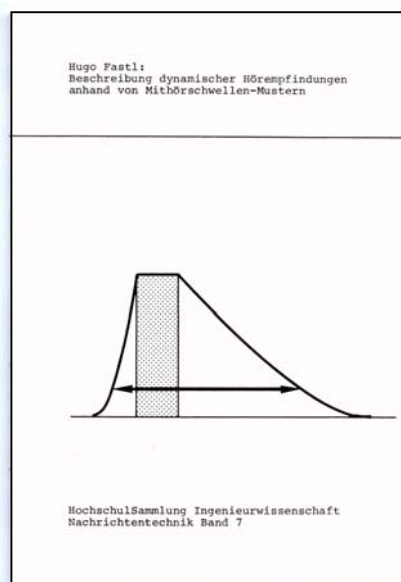
(Received 16 October 1978; accepted 5 December 1978)

A procedure for the schematic and automatic extraction of 'fundamental pitch' from complex tonal signals, such as voiced speech and music, has been developed. While the auditive relevant 'fundamental' of a complex signal cannot be defined in purely mathematical terms, an existent model of virtual-pitch perception turns out to provide a suitable basis. The procedure comprises the formation of determinant spectral pitches (which correspond to the frequencies of certain signal components), and the deduction of virtual pitch (or 'fundamental frequency') from those spectral pitches. The latter deduction is accomplished by a principle of subharmonic matching, for whose realization a simple, universal and efficient algorithm was found. While the calculation may be confined to the determination of 'nominal' virtual pitch, certain typical auditory phenomena, such as the influence of SPL, partial masking and interval stretch, may be accounted for as well, in which case 'true' virtual pitch is obtained. The procedure operates on the frequencies and amplitudes of the signal's spectral components, is suitable for implementation on readily available programmable calculators and other arithmetic computers, and may be used in real-time 'fundamental-pitch' extraction as well. The procedure's performance and its applicability to the research and engineering of auditory communication are illustrated by some examples.

Keywords: virtual pitch; pitch calculation; fundamental-frequency extraction; pitch shifts; interval stretch.

### Bild 13: Terhardts Virtuelle Tonhöhe

Hugo Fastl hat einen Atlas von Mithörschwellen-Mustern für zeitvariante Schalle erstellt und auf dieser Basis dynamische Hörempfindungen wie Subjektive Dauer, Schwankungsstärke und Rauigkeit beschrieben (Fastl 1982). Als weitere Hörempfindung haben Fastl und Stoll 1979 die „Ausgeprägtheit der Tonhöhe“ eingeführt (Fastl und Stoll 1979), die sowohl in der Musik als auch bei der Beurteilung von Geräuschimmissionen eine wichtige Rolle spielt.

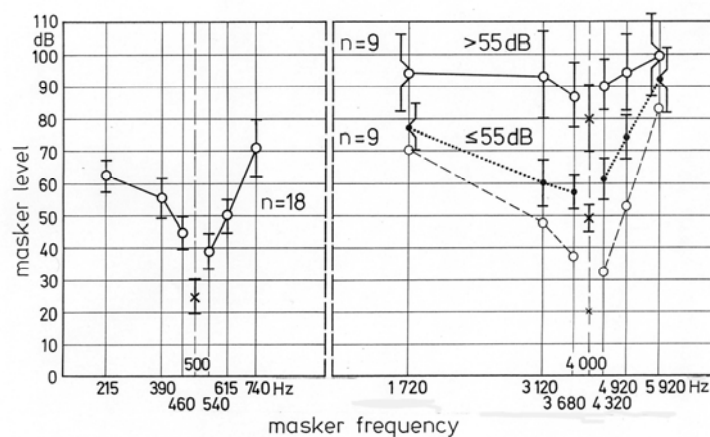


**Bild 14:** Fastls Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern

Zwicker und Fastl haben sich neben der Grundlagenforschung auch praktischen Anwendungen der Psychoakustik zugewandt. Im Bereich der Audiologie sind Untersuchungen zum Frequenzauflösungsvermögen des Gehörs bei Schwerhörigen zu nennen, die mit psychoakustischen Tuning-Kurven erfasst werden (Zwicker und Schorn 1978).



**Bild 15:** Gerät zur Messung psychoakustischer Tuningkurven



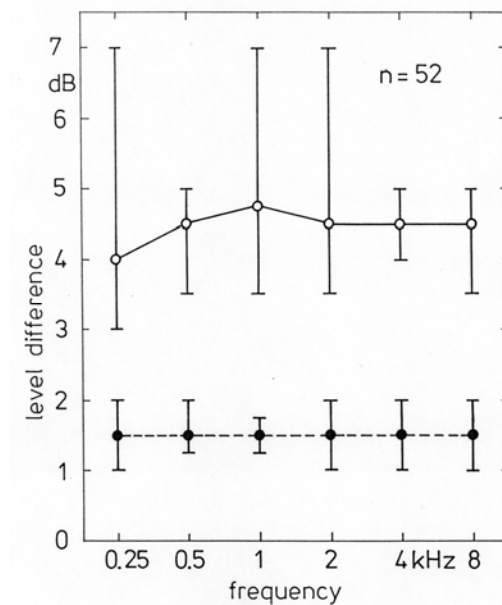
**Bild 16:** Psychoakustische Tuningkurven bei Lärmschwerhörigkeit

Das Pegel-Unterscheidungsvermögen hat sich als wertvolle Hilfe bei der Diagnose des Acusticus-Neurinoms bewährt (Fastl und Zwicker 1979, Fastl und Schorn 1981). Während normalhörende Personen Pegelunterschiede von 1..2 dB sicher erkennen, benötigen Patienten mit Acusticus Neurinom Pegelunterschiede von mehr als 4 dB um Lautheitsunterschiede bei durch eine Pause getrennten, aufeinanderfolgenden Tönen wahrzunehmen.



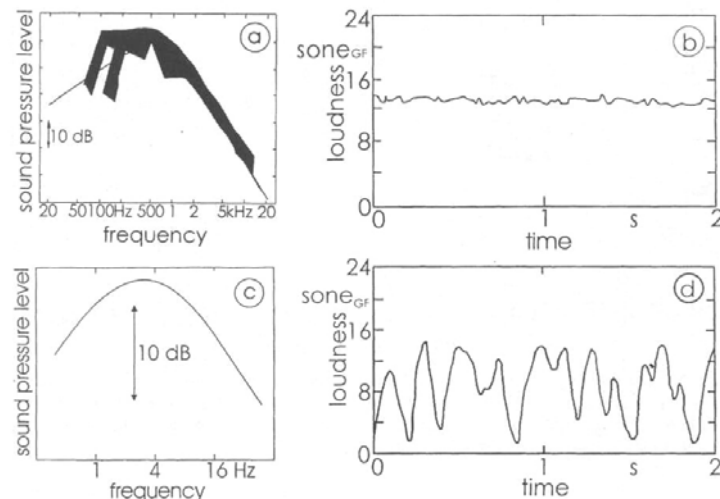


**Bild 17:** Gerät zur Messung der Pegelunterschiedsschwelle



**Bild 18:** Pegelunterschiedsschwelle bei Normalhörenden (ausgefüllte Kreise) und bei Patienten mit Acusticus Neurinom (unausgefüllte Kreise)

Die Veränderung des Zeitauflösungsvermögens bei Schwerhörigen kann durch den Temporal Resolution Factor TRF erfasst werden (Zwicker 1986). Das veränderte zeitliche Integrationsvermögen bei Hörstörungen hat zur Folge, dass der Hörverlust für kurze Schalle von einigen Millisekunden Dauer geringer ausfällt als für längere, in der Audiologie übliche Schalle. Da Sprachschalle kurze Dauern aufweisen kann dies dazu führen, dass zahlreiche Schwerhörige übertersorgt sind (Fastl 1984). Für die Anpassung von Hörgeräten wurde ein Störgeräusch entwickelt, das im Mittel die spektrale und zeitliche Hüllkurve fließender Sprache nachbildet (Fastl 1987). Dieses Rauschen gestattet insbesondere bei modernen digitalen Hörhilfen die Überprüfung, ob Geräuschreduktionsverfahren - wie gewünscht - nur die Störschalle beeinflussen oder auch unerwünschte Nebenwirkungen auf den Nutzschall Sprache haben.



**Bild 19:** Konzept eines Störgeräusches, das in Mittel die spektrale und zeitliche Hüllkurve fließender Sprache nachbildet (Fastl-Rauschen)

Besonders hervorzuheben ist, dass die Anwendung otoakustischer Emissionen bei der Diagnose des Hörvermögens von Kleinkindern inzwischen zur alltäglichen Routine im Klinikbetrieb geworden ist (Zwicker und Schorn 1990).



**Bild 20:** Gerät zur Messung verzögerter, evozierter otoakustischer Emissionen (DEOAE)

Als weitere praktische Anwendung der Psychoakustik wurde der Einsatz der Hörempfindung Lautheit bei der Geräuschbewertung vorangetrieben (Zwicker 1978, Zwicker 1988, Fastl 1993, Fastl 1997). Es wurden Familien von Lautheitsmessgeräten vorgestellt, die ausgehend von passiven LC-Filtern über aktive RC-Filter hin zu digitaler Signalverarbeitung entwickelt und realisiert wurden (Zwicker und Daxer 1981, Zwicker und Fastl 1983, Zwicker et al. 1985).



**Bild 21:** Ur-Lautheitsmesser in analoger LC-Technik



**Bild 22:** Tragbarer Lautheitsmesser in analoger RC-Technik



**Bild 23:** Lautheitsmesser mit digitaler Signalverarbeitung

Die Angewandte Psychoakustik bei der Geräuschbewertung wurde von der Beurteilung von Geräuschemissionen auf die Beurteilung von Geräuschimmissionen ausgedehnt (Fastl et al. 1989). Hierbei haben sich langjährige Kooperationen mit unseren Kollegen von der Universität Osaka, Japan sehr gut bewährt (Fastl et al. 1986, Namba et al. 1988, Fastl et al. 1990, Fastl et al. 1991, Fastl et al. 1994, Fastl et al. 1996).

Mitten in dieser äußerst produktiven Phase der Münchener Schule der Psychoakustik kam 1990 völlig unerwartet der plötzliche Tod von deren Gründer Eberhard Zwicker (Fastl 1992). Sowohl national als auch international wurde Eberhard Zwicker posthum durch memorial sessions sowie durch die Verleihung der ersten Helmholtz-Medaille der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) geehrt.



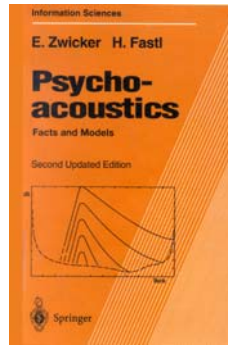
**Bild 24:** Eberhard Zwicker 1990

### **Die Jahre 1991-1999**

Nach Zwickers Tod, der national und international eine große Lücke hinterlassen hat, haben Ernst Terhardt und Hugo Fastl die Münchener Schule der Psychoakustik weitergeführt. Viele der erarbeiteten Forschungsergebnisse sind in zwei Büchern zusammengefasst, die beide im Springer Verlag erschienen sind: 1998 Akustische Kommunikation von Ernst Terhardt (Terhardt 1998) und 1999 in zweiter Auflage Psychoacoustics - Facts and Models von Zwicker und Fastl (Zwicker und Fastl 1999).



**Bild 25:** Akustische Kommunikation 1998 von Ernst Terhardt



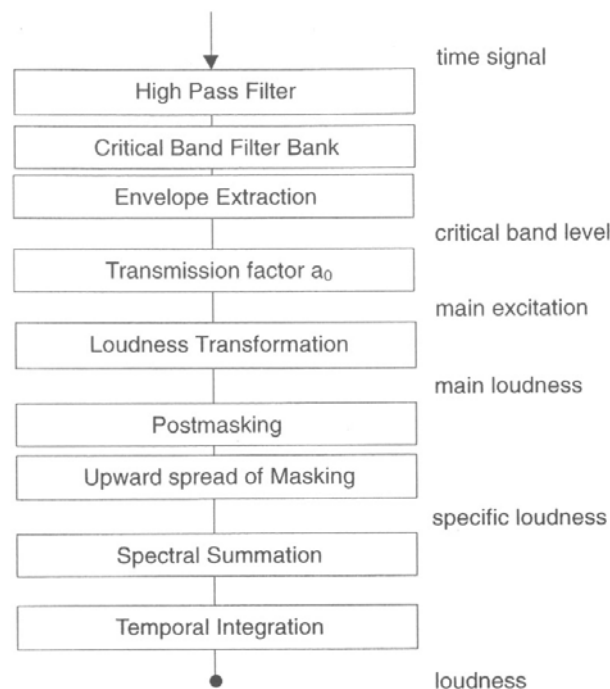
**Bild 26:** Psychoacoustics-Facts and Models, 2. Auflage 1999 von Eberhard Zwicker und Hugo Fastl

## Die Jahre 2000-2005

Ernst Terhardt ging vor wenigen Jahren in "Ruhestand". Wenn man seine Homepage betrachtet, wird allerdings sofort klar, dass diese Bezeichnung völlig unpassend ist. Nach wie vor ist Terhardt - jetzt von seinem Wohnzimmer aus - auf den Gebieten Musikalische Akustik und Akustische Kommunikation äußerst aktiv.

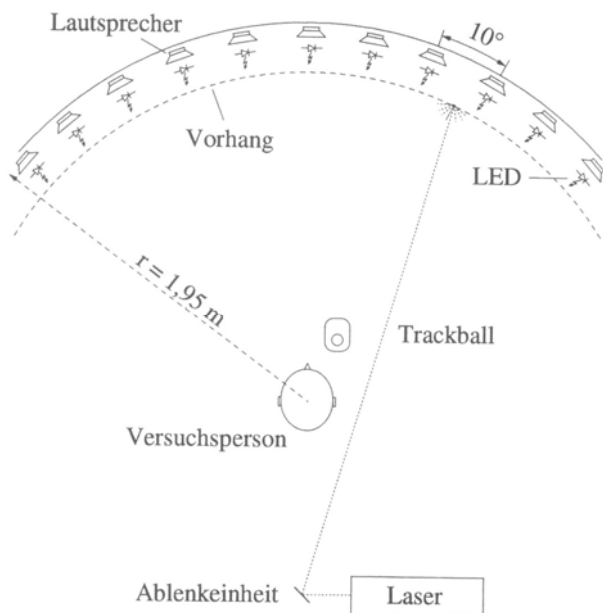
Die Arbeitsgruppe um Hugo Fastl hat sich in den letzten Jahren sowohl mit Grundlagen als auch mit Anwendungen der Psychoakustik beschäftigt.

Josef Chalupper hat ein Lautheitsmodell (DLM) entwickelt, das nicht nur für Normalhörende, sondern auch für Schwerhörige deren dynamische Lautheitswahrnehmung simuliert (Chalupper und Fastl 2002). Der "Clou" ist dabei, dass für die Simulation der Lautheitswahrnehmung von Normalhörenden bzw. Schwerhörigen im Modell nur ein einziger Block, nämlich die Transformation von Pegel in spezifische Lautheit, ausgetauscht werden muss. Entgegen den Erwartungen zahlreicher Kollegen ist es *nicht* nötig, das verschlechterte Frequenz- und Zeitauflösungsvermögen Schwerhöriger separat zu modellieren.

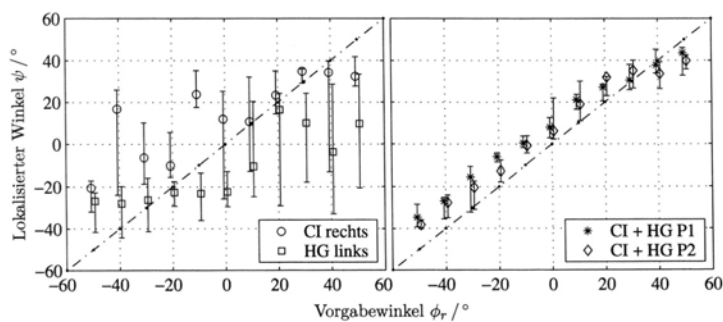


**Bild 27:** Dynamisches Lautheitsmodell für Normalhörende und Schwerhörige

Mit einer neuen, rechnergestützten Meßmethode hat Bernhard Seeber (Seeber 2001) die Messung der Richtungswahrnehmung in der Horizontalebene revolutioniert. Seine Methode ist so intuitiv, dass sie auch von Schwerhörigen aller Altersstufen benutzt werden kann (Seeber 2002). Mit dieser Methode konnte nachgewiesen werden, dass bei manchen Patienten mit beidohrigem Cochlea Implantat (CI) die Richtungswahrnehmung mit ähnlicher Präzision wie bei Normalhörenden funktioniert! (Seeber et al.2003, Seeber und Fastl 2004).



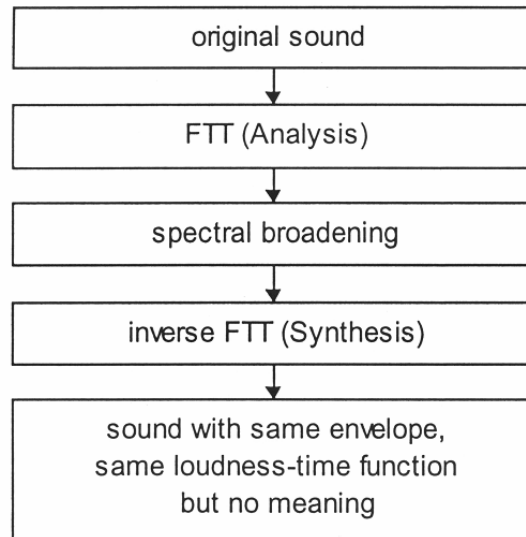
**Bild 28:** Versuchsanordnung zur Messung der Richtungswahrnehmung in der Horizontalebene



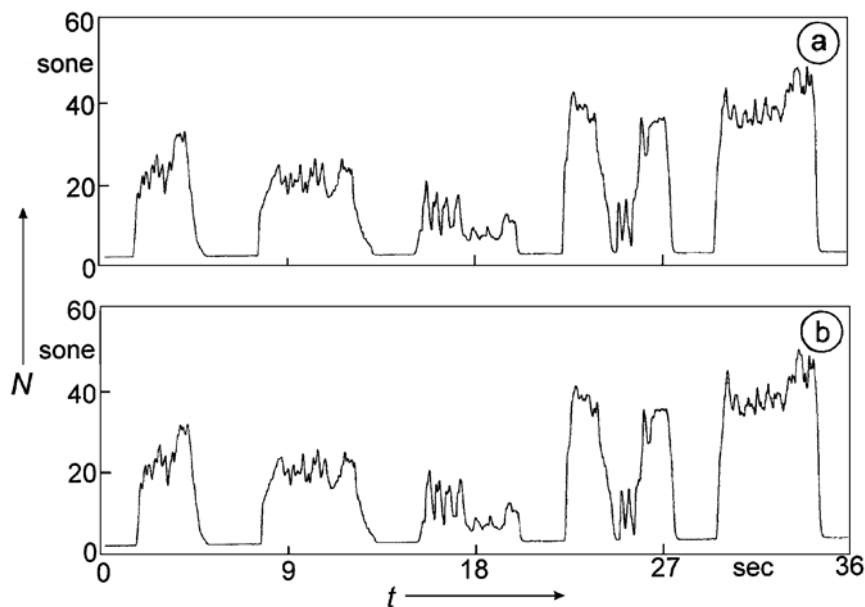
**Bild 29:** Richtungslokalisierung mit CI oder Hörgerät (links) sowie mit CI plus Hörgerät (rechts).

Im Hinblick auf die belastigende Wirkung von Schallen spielt deren Bedeutungsgehalt eine wichtige Rolle. Um diesen Einfluss quantitativ erfassen zu können, wurde eine Methode entwickelt, bei der die Lautheits-Zeitfunktion von Geräuschen erhalten bleibt, die Erkennbarkeit der Schallquelle jedoch drastisch abnimmt (Fastl 2001). Bei diesem Verfahren wird das Geräusch zunächst einer FFT-Analyse unterworfen und nach spektraler Verbreiterung mit inverser FFT wieder re-synthetisiert. Während bei Originalschallen in über 90 % der Fälle die Schallquelle erkannt wird, trifft dies bei den prozessierten Schallen nur in etwa 14 % zu (Zeitler et al. 2004). In Kooperation mit Kollegen von der Universität Eichstätt

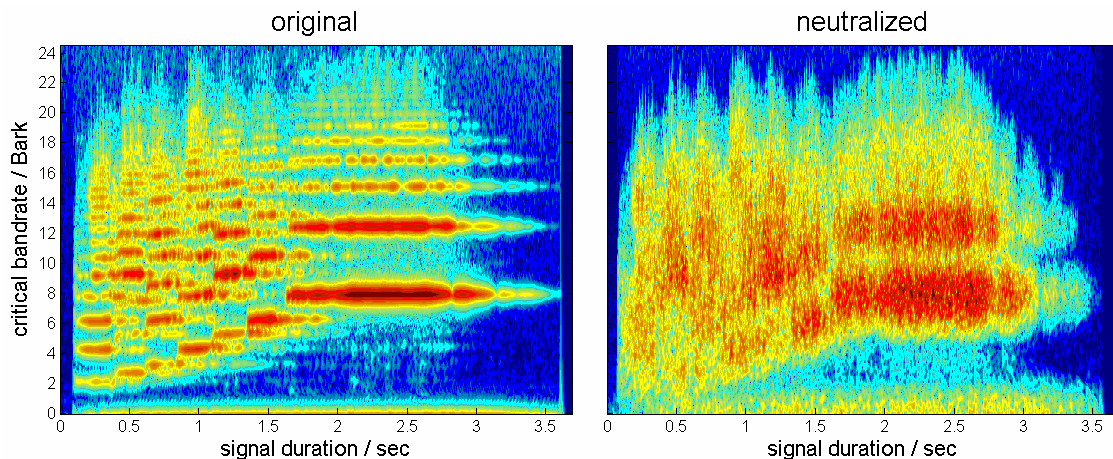
(Hellbrück et al. 2002, Hellbrück et al. 2004) sowie der Universität Aalborg, Dänemark, (Zeitler et al. 2003) konnte nachgewiesen werden, dass originale und prozessierte Schalle praktisch die gleiche Lautheit aufweisen. Es treten jedoch deutliche Unterschiede in der Lästigkeit auf, die auf das Erkennen der Schallquelle zurückgeführt werden können (Ellermeier et al. 2004).



**Bild 30:** Verfahren zur „Neutralisation“ des Bedeutungsgehalts von Schallen bei gleicher Lautheits-Zeitfunktion

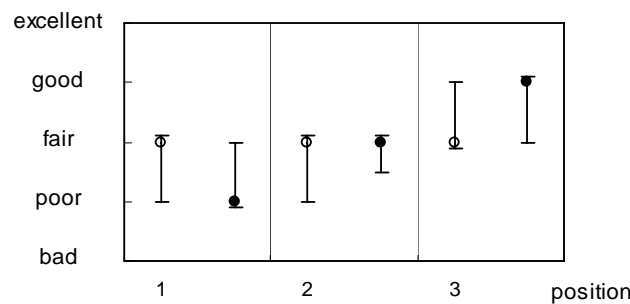


**Bild 31:** Lautheits-Zeitmuster von originalen (oben) sowie „neutralisierten“ Schallen (unten).



**Bild 32:** FTT-Spektrum eines Originalschalls (links) sowie des zugehörigen „neutralisierten“ Schalls (rechts)

Abschließend sollen noch zwei Ergebnisse audio-visueller Interaktionen erwähnt werden. In einem Konzertsaal wurden an verschiedenen Plätzen Kunstkopfaufnahmen und Fotoaufnahmen durchgeführt. Werden nur die Sprachschalle dargeboten, so wird die Sprachqualität im Mittel als „brauchbar“ eingeschätzt. Werden dagegen die zugehörigen Bilder zusätzlich dargeboten, so zeigt sich für einen weit entfernten Sprecher eine Verbesserung der wahrgenommenen Sprachqualität. Offensichtlich wird erst durch das Bild die große Entfernung zwischen Schallquelle und Empfänger klar, und für diese unvorteilhafte Situation wird die Sprachqualität als "gar nicht einmal so schlecht" eingeschätzt (Fastl 2002).



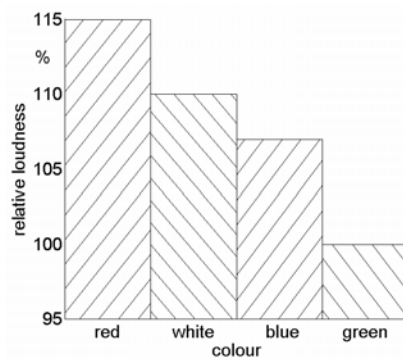
**Bild 33:** Beurteilung der Sprachqualität in einem Konzertsaal an den Plätzen 1, 2 und 3 in zunehmender Entfernung vom Sprecher. Unausgefüllte Symbole: nur akustische Darbietung; ausgefüllte Symbole: akustische plus visuelle Darbietung

Eine zweite audio-visuelle Interaktion, die von Christine Patsouras untersucht wurde, beschäftigt sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Farben auf die wahrgenommene Lautstärke. Versuchspersonen wurden Vorbeifahrten von ICE Zügen bei identischem Schallpegel dargeboten. Zusätzlich wurden Standbilder der Züge in unterschiedlichen Farben wie weiß (original) oder aber hellrot, hellgrün oder hellblau dargeboten (Patsouras et al. 2002). Bei Experimenten sowohl in Bayern (Fastl und Patsouras 2004) als auch in Japan (Fastl 2004) zeigte sich, dass hellrote Züge bei gleichem Schallpegel lauter wahrgenommen werden als hellgrüne Züge. Die psychologischen und neurophysiologischen Grundlagen dieser audiovisuellen Interaktionen sind derzeit Gegenstand der Forschung.





**Bild 34:** ICE Züge in verschiedenen Farben



**Bild 35:** Lautheitsunterschiede bei gleichem Schallereignis in Kombination mit Bildern von ICEs in verschiedenen Farben.

Die Münchener Schule der Psychoakustik ist derzeit integraler Bestandteil des Lehrstuhls für Mensch-Maschine-Kommunikation der TU München. Es ist zu erwarten, dass die akustische Modalität neben visuellem und taktilem System bei der Mensch-Maschine-Kommunikation auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen wird.

### Danksagung

Der Autor dankt Herrn Dipl.-Ing. Markus Fruhmann und Herrn Dipl.-Ing Stefan Kerber für tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung und Bearbeitung des Bildmaterials sowie bei der Realisierung des endgültigen Layouts.

## Literatur

- v. Bismarck 1974** *Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds.* Acustica 30, 159-172 (1974).
- Chalupper and Fastl 2002** *Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners.* ACUSTICA/acta acustica, 88: 378-386 (2002).
- Ellermeier, Zeitler, Fastl 2004** *Predicting annoyance judgments from psychoacoustic metrics: Identifiable versus neutralized sounds.* The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, In: Proc. inter-noise 2004 (2004).
- Fastl 1982** *Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern.* Hochschul-Verlag, Freiburg, 1982.
- Fastl 1984** *Ein Gerät zur Messung des zeitlichen Integrationsvermögens des Gehörs.* Audiol. Akustik 23, 164-170 (1984).
- Fastl 1987** *Ein Störgeräusch für die Sprachaudiometrie.* Audiol. Akustik 26, 2-13 (1987).
- Fastl 1992** *Eberhard Zwicker - A landmark in Auditory Science.* In: Auditory Physiology and Perception, Advances in the Biosciences Vol. 83, Pergamon Press Oxford, 643- 648 (1992).
- Fastl 1993** *Psychoacoustics and noise evaluation.* In: Contr. to Psychological Acoustics, (A.Schick ed.) Oldenburg: Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Univ., 505-520 (1993).
- Fastl 1997** *Gehörgerechte Geräuschbeurteilung.* In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e.V., Oldenburg, 57-64 (1997).
- Fastl 2001** *Neutralizing the meaning of sound for sound quality evaluations.* In: Proc. 17. ICA Rome, CD ROM (2001).
- Fastl 2002** *Sound design of machines from a musical perspective.* In: Proc. SQS 2002, Dearborn, Michigan, USA, Eds.: Ebbitt, G. Davies, P. (2002).
- Fastl 2004** *Audio-visual interactions in loudness evaluation.* In: 18. ICA Kyoto, 1161-1166 (2004).
- Fastl und Patsouras 2004** *Das rote Auto ist lauter! Psychophysik audio-visueller Interaktionen.* "forschung" 2/2004, DFG, Wiley-VCH Verlag, 13-14.
- Fastl and Schorn 1981** *Discrimination of level differences by hearing-impaired patients.* Audiology 20, 488-502 (1981).
- Fastl and Stoll 1979** *Scaling of pitch strength.* Hearing Research 1, 293-301 (1979).
- Fastl und Zwicker 1979** *Ein Gerät zur Messung von Pegel- und Frequenzunterschiedsschwellen.* Z. Hörger. Akustik 18, 26-34 (1979).
- Fastl, Kuwano und Namba 1994** *Psychoakustische Experimente zum Schienenbonus.* In: Fortschritte der Akustik, DAGA 94, Verl.: DPG- GmbH, Bad Honnef, 1113-1116 (1994).

- Fastl, Kuwano, Namba 1996** *Assessing in the railway bonus in laboratory studies.* J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 17, 139-148 (1996).
- Fastl, Namba, Kuwano 1986** *Cross-cultural investigations of loudness evaluation for noises.* In: *Contributions to Psychological Acoustics*, (A. Schick, et al. eds.) Kohlrenken, Oldenburg, 354-369 (1986).
- Fastl, Widmann, Kuwano, Namba 1991** *Zur Lärminderung durch Geschwindigkeitsbeschränkungen.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'91*, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 449-452 (1991).
- Fastl, Zwicker, Kuwano, Namba 1989** *Beschreibung von Lärmimmissionen anhand der Lautheit.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'89*, Verl.: DPG- GmbH, Bad Honnef, 751-754 (1989).
- Fastl, Zwicker, Kuwano, Namba 1990** *Mittlere Lautheit von Lärmereignissen unterschiedlicher Anzahl und Art.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'90*, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 393-396 (1990).
- Hellbrück, Fastl, Keller 2002** *Effects of meaning of sound on loudness judgements.* In: *Proc. Forum Acusticum Sevilla 2002, NOI-04-002-IP*, CD-ROM (2002).
- Hellbrück, Fastl, Keller 2004** *Does Meaning of Sound influence Loudness Judgements?* In: 18. ICA Kyoto, 1097-1100 (2004).
- Helle 1974** *Selektivitätssteigerung in einem hydromechanischen Innenohrmodell mit Basilar- und Deckmembran.* *Acustica* 30, 301-312 (1974).
- Mummert 1991** *Rücktransformation des Kurzzeitspektrums der Fourier- t-Transformation und Ansatz für eine gehörgerechte Transformationskodierung.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'91*, Verl.: DPG- GmbH, Bad Honnef, 753-756 (1991).
- Namba, Kuwano, Fastl 1988** *Loudness of road traffic noise using the method of continuous judgment by category.* In: *Noise as a Public Health Problem*, Swedish Council for Building Research , Stockholm, Sweden 1988, 241-246.
- Patsouras, Filippou, Fastl 2002** *Influences of color on the loudness judgement.* In: *Proc. Forum Acusticum Sevilla 2002, PSY-05-002-IP*, CD-ROM (2002).
- Peisl und Zwicker 1989** *Simulation der Eigenschaften oto-akustischer Emissionen mit Hilfe eines analogen und eines digitalen Innenohrmodells.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'89*, Verl.: DPG- GmbH, Bad Honnef, 419-422 (1989).
- Schlang und Mummert 1990** *Die Bedeutung der Fensterfunktion für die Fourier-t-Transformation als gehörgerechte Spektralanalyse.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA'90*, Verl.: DPG- GmbH, Bad Honnef, 1043-1046 (1990).
- Seeber 2001** *Eine neue Meßmethode für Lokalisationsuntersuchungen.* In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 2001*, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg, 102-103 (2001).
- Seeber 2002** *A new method for localization studies.* *ACUSTICA/acta acustica*, 88: 446-450 (2002).

- Seeber and Fastl 2004** *Localization cues with bilateral cochlear implants investigated in virtual space – a case study.* In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2004, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg, (2004), Strassburg, France.
- Seeber, Fastl, Baumann 2003** *Mechanismen der Lokalisation mit bilateralem Cochlea Implantat.* In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2003, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg, 110-111 (2003).
- Terhardt 1968** *Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke.* Acustica 20, 215-224 (1968).
- Terhardt 1976** *Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz.* Acustica 36, 121-137 (1976).
- Terhardt 1979** *Calculating virtual pitch.* Hearing Research 1, 155-182 (1979).
- Terhardt 1983** *Absolute and relative pitch revisited on psychoacoustic grounds.* In: Proc. 11. ICA Paris, Vol. 4, 427-430 (1983).
- Terhardt 1985** *Fourier Transformation of time signals: Conceptual revision.* Acustica 57, 242-256 (1985).
- Terhardt 1998** *Akustische Kommunikation.* Springer, Berlin/Heidelberg, 1998.
- Terhardt und Fastl 1971** *Zum Einfluß von Störtönen und Störgeräuschen auf die Tonhöhe von Sinustönen.* Acustica 25, 53-61 (1971).
- Terhardt and Seewann 1983** *Aural key identification and its relationship to absolute pitch.* Music Perception 1, 63-83 (1983).
- Terhardt, Stoll, Seewann 1982** *Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals.* J. Acoust. Soc. Am. 71, 679-688 (1982).
- Zeitler, Fastl, Ellermeier 2004** *Impact of source identifiability on perceived loudness.* In: 18. ICA Kyoto, 1491-1494 (2004).
- Zeitler, Fastl, Hellbrück 2003** *Einfluss der Bedeutung auf die Lautstärkebeurteilung von Umweltgeräuschen.* In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2003, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg, 602-603 (2003)
- Zwicker 1952** *Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones.* Acustica, Akustische Beihefte AB 125 - AB 133 (1952).
- Zwicker 1956** *Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs.* Acustica 6, 365-381 (1956).
- Zwicker 1958** *Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit.* Acustica 8, 237-258 (1958).
- Zwicker 1960** *Zur Unterteilung des hörbaren Frequenzbereichs in Frequenzgruppen.* Acustica 10, 185 (1960).
- Zwicker 1964** *"Negative afterimage" in hearing.* J. Acoust. Soc. Am. 36, 2413-2415 (1964).

- Zwicker 1970** *Subjektive und objektive Dauer von Schallimpulsen und Schallpausen.* Acustica 22, 214-218 (1970).
- Zwicker 1971** *Die Abmessungen des Innenohrs des Hausschweines.* Acustica 25, 232 - 239 (1971).
- Zwicker 1974** *Spaltweite und Spaltströmung in einem Ausschnittmodell des Innenohres.* Acustica 31, 47-49 (1974).
- Zwicker 1976a** *Psychoacoustic equivalent of period histograms.* J. Acoust. Soc. Am. 59, 166-175 (1976).
- Zwicker 1976b** *Mithörschwellen-Periodenmuster amplitudenmodulierter Töne.* Acustica 36, 113-120 (1976).
- Zwicker 1978** *Meaningful noise measurement and effective noise reduction.* Noise Contr. Engng. J. 29, 66-76 (1978).
- Zwicker 1986** *Das Zeitaufklärungsvermögen des Gehörs - Eine zweckmäßige Meßmethode im Hinblick auf die Sprachverständlichkeit.* Audiol. Akustik 25, 156-169 (1986).
- Zwicker 1988** *Loudness patterns (ISO 532 B), an excellent guide to noise-reduced design and to expected public reaction.* In: Proc. of NOISE-CON 88, (J. S. Bolton, Ed.) Noise Contr. Found., New York, 15-26 (1988).
- Zwicker and Daxer 1981** *A portable loudness meter based on psychoacoustical models.* In: Proc. Internoise'81, Vol. 2, 869-872 (1981).
- Zwicker and Fastl 1983** *A portable loudness-meter based on ISO 532 B.* In: Proc. 11. ICA Paris, Vol. 8, 135-137 (1983).
- Zwicker and Fastl 1999** *Psychoacoustics. Facts and Models.* Second updated edition. Springer, Heidelberg, New York (1999)
- Zwicker and Peisl 1990** *Cochlear preprocessing in analog models, in digital models and in human inner ear.* Hearing Research 44, 209-216 (1990).
- Zwicker and Schorn 1978** *Psychoacoustical tuning curves in audiology.* Audiology 17, 120-140 (1978).
- Zwicker and Schorn 1990** *Delayed evoked otoacoustic emissions - an ideal screening test for excluding hearing impairment in infants.* Audiology 29, 241-251 (1990).
- Zwicker, Deuter, Peisl 1985** *Loudness meters based on ISO 532 B with large dynamic range.* In: Proc. inter-noise'85, Vol II, 1119-1122 (1985).

#### **Weitere Literaturhinweise:**

<http://www.mmk.ei.tum.de/psycho.html>