

Die Münchener Schule der Psychoakustik

Hugo Fastl

AG Technische Akustik, MMK, TU München, Arcisstr. 21, D-80333 München, Email: 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. 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" (7) mit psychoakustischen Methoden studiert. Es folgen Arbeiten über die Wahrnehmbarkeit kubischer Differenzöne (18) sowie 1956 seine Habilitation mit dem Thema "Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs" (24). Ende der 50er Jahre beschäftigt sich Zwicker mit Themengebieten, für die sein Name heute noch steht: zum einen die Lautheit (31) und zum anderen die Frequenzgruppe (42). 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. Aus dieser Zeit stammt die Entdeckung des akustischen Nachtons (82), der heute unter dem Begriff "Zwicker-Ton" bekannt ist.

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 (110). 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. 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 (125), 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 (153). Schließlich begann 1971 Hugo Fastl seine Forschungsarbeiten am

Institut für Elektroakustik (135), und das Münchener Triumvirat der Psychoakustik war damit komplett.

In der Folgezeit hat sich Eberhard Zwicker insbesondere Parallelen zwischen Physiologie und Psychoakustik gewidmet. Auf der Grundlage eigener physiologischer Untersuchungen (142) haben Helle (181) und Zwicker (185) hydromechanische Modelle des Innenohrs des Menschen entwickelt. Elektronische Innenohrmodelle wurden sowohl als Analogmodelle (592) wie auch als Digitalmodelle (595) realisiert. Mit den Mithörschwellen-Periodenmustern (216) hat Zwicker ein psychoakustisches Analogon zu den in der Physiologie üblichen Perioden-Histogrammen eingeführt (227).

Ernst Terhardt hat sich insbesondere der Musikalischen Akustik sowie der Akustischen Kommunikation gewidmet. Im Bereich der Musikalischen Akustik hat seine Theorie der Musikalischen Konsonanz (229), die zwischen sensorischer Konsonanz und Harmonie unterscheidet, große Beachtung gefunden. Studien zum absoluten Gehör (392) zeigen, dass das relative Musikgehör und das absolute Gehör mehr Gemeinsamkeiten aufweisen, als üblicherweise angenommen wird (409). Terhardts Modell der virtuellen Tonhöhe (291) ist derzeit konkurrenzlos, kann es doch sowohl Spektraltonhöhen als auch virtuelle Tonhöhen präzise inklusive aller Tonhöhenverschiebungseffekte prognostizieren (354). Einen weiteren Meilenstein in Terhardts Forschung bilden seine Arbeiten zur Fourier-Time-Transformation FTT (460). Diese gehörgerechte, zeitvariante Spektraldarstellung wird weltweit in Theorie und Praxis der Akustischen Kommunikation eingesetzt (653, 669).

Hugo Fastl hat einen Atlas von Mithörschwellen-Mustern für zeitvariante Schalle erstellt (414) und auf dieser Basis dynamische Hörempfindungen wie Subjektive Dauer, Schwankungsstärke und Rauigkeit beschrieben. Als weitere Hörempfindung haben Fastl und Stoll 1979 die „Ausgeprägtheit der Tonhöhe“ eingeführt (308), die sowohl in der Musik als auch bei der Beurteilung von Geräuschmissionen eine wichtige Rolle spielt.

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 (262). Das Pegel-Unterscheidungsvermögen hat sich als wertvolle Hilfe bei der Diagnose des Acusticus-Neurinoms bewährt (290, 343). Die Veränderung des Zeitauflösungsvermögens bei Schwerhörigen kann durch den Temporal Resolution Factor TRF erfasst werden (524). Das veränderte zeitliche Integrationsvermögen bei Hörstörungen hat zur Folge, dass zahlreiche Schwerhörige überversorgt sind (449). Für die Anpassung von Hörgeräten wurde ein Störgeräusch entwickelt, das im Mittel die spektrale und zeitliche Hüllkurve fließender Sprache nachbildet (530). 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. Besonders hervorzuheben ist, dass die Anwendung otoakustischer Emissionen bei der Diagnose des Hörvermögens von Kleinkindern inzwischen zur alltäglichen Routine im Klinikbetrieb geworden ist (620).

Als weitere praktische Anwendung der Psychoakustik wurde der Einsatz der Hörempfindung Lautheit bei der Geräuschbewertung vorangetrieben (534, 580, 715, 821). Es wurden Familien von Lautheitsmessgeräten vorgestellt, die ausgehend von passiven LC-Filtern über aktive RC-Filter hin zu digitaler Signalverarbeitung entwickelt und realisiert wurden (356, 412, 490).

Die Angewandte Psychoakustik bei der Geräuschbewertung wurde von der Beurteilung von Geräuschemissionen auf die Beurteilung von Geräuschimmissionen ausgedehnt (594). Hierbei haben sich langjährige Kooperationen mit unseren Kollegen von der Universität Osaka, Japan sehr gut bewährt (489, 589, 638, 661, 718, 741).

Mitten in dieser äußerst produktiven Phase der Münchener Schule der Psychoakustik kam 1990 völlig unerwartet der plötzliche Tod von deren Gründer Eberhard Zwicker (675). 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.

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 (860) und 1999 in zweiter Auflage Psychoacoustics - Facts and Models von Zwicker und Fastl (880).

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 (931). 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 Zeitaufklärungsvermögen Schwerhöriger separat zu modellieren.

Mit einer neuen, rechnergestützten Meßmethode hat Bernhard Seeber (924) die Messung der Richtungs-wahrnehmung in der Horizontalebene revolutioniert. Seine

Methode ist so intuitiv, dass sie auch von Schwerhörigen aller Altersstufen benutzt werden kann (933). Mit dieser Methode konnte nachgewiesen werden, dass bei manchen Patienten mit beidohrigem Cochlea Implantat die Richtungswahrnehmung mit ähnlicher Präzision wie bei Normalhörenden funktioniert! (967, 977).

Im Hinblick auf die belästigende 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 (929). Bei diesem Verfahren wird das Geräusch zunächst einer FTT-Analyse unterworfen und nach spektraler Verbreiterung mit inverser FTT 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 (984). In Kooperation mit Kollegen von der Universität Eichstätt (949, 983) sowie der Universität Aalborg, Dänemark, (959) 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 (990).

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 (946).

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 (951). Bei Experimenten sowohl in Bayern (975) als auch in Japan (981) 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.

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.

Literatur

Die in Klammern angegebenen Zahlenwerte kennzeichnen die fortlaufenden Nummern in folgender Literaturliste im web: <http://www.mmk.ei.tum.de/psycho.html>