Die Akustik des Hörens aus Sicht der Physiologischen Akustik

Bastian Epp[1]

[1] *Hearing Systems, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark, Email: bepp@elektro.dtu.dk*

Einleitung

Die Wahrnehmung von Schall, das "Hören", spielt eine wichtige Rolle in der alltäglichen Kommunikation von Tieren und Menschen. Eine herausragende Eigenschaft des Gehörs (des Hörsystems), von Säugetieren ist es, Signale von unterschiedlichen Schallquellen zu trennen und zu gruppieren. Vor allem in akustisch komplexen Umgebungen in der viele Schallquellen zeitgleich aktiv sind, übertrifft diese Fähigkeit des Gehörs jedes vergleichbare technische System. Hierzu stehen dem System ausschließlich die akustischen Informationen an den beiden Ohren zur Verfügung. Des Weiteren ist das Gehör in der Lage, Drucksignale in einem Amplitudenbereich von 6 Größenordnungen abzubilden, und gleichzeitig einen Frequenzbereich von circa 10 Oktaven zu unterscheiden. Das genaue Verständnis des Hörprozesses ist eine wichtige Voraussetzung, um akustische Kommunikation besser verstehen zu können, Hörschädigungen zu vermeiden, als auch um zur Entwicklung technischer Lösungen zur Kompensation von Hörschädigungen beizutragen. Als Teildisziplin der Akustik ist die Akustik des Hörens, oder die Hörakustik, damit befasst, dieses Verständnis aufzubauen und zu vertiefen. Die moderne Hörakustik bedient sich einer Vielzahl von Konzepten aus unterschiedlichen Bereichen der Akustik wie zum Beispiel der Linearen Akustik (zur Beschreibung der Schallfelder), der Struktur- und Hydroakustik (zur Beschreibung der mechanischen Verarbeitung von Schall im Innenohr), der Psychologischen Akustik (zur Beschreibung der mit akustischen Signalen verbundenen Wahrnehmung) und der Signalverarbeitung (zur Beschreibung der akustischen Signale und zur Modellierung). Neben diesen Bereichen spielt auch die Physiologie des Gehörs und die Neurowissenschaften eine wachsende Rolle. Hierbei wird angenommen, dass das Systems nur dann verstanden werden kann, wenn das System in seiner natürlichen Form, d.h. als physiologisches System betrachtet wird.

Im folgenden wird dargelegt, wie diese Physiologische Akustik genutzt werden kann, um die herausragenden Fähigkeiten des Gehörs besser verstehen zu können. Im Besonderen wird darauf eingegangen, wie die Kombination von Erkenntnissen aus der Psychologischen Akustik, der Physiologischen Akustik und der Modellierung interessante Einblicke in die Verarbeitung von Schallsignalen im Gehör gewährt. Dieser Ansatz wird anhand von spezifischen Beispielen erläutert, ist jedoch keinesfalls auf die angeführten Beispiele beschränkt.

Psychologische Akustik (Psychoakustik)

Die Psychologische Akustik, oder Psychoakustik, beschreibt die Abbildung eines Schallsignals in eine Wahrnehmung. Das (Hör-)System wird hierbei als Gesamtheit betrachtet, die genaue Art der Verarbeitung spielt also eine untergeordnete Rolle. Dieser "Blackbox-Ansatz" ermöglicht es, bestimmte Eigenschaften von Schallsignalen systematisch auf die akustische Wahrnehmung zu projizieren (siehe Abb. 1).

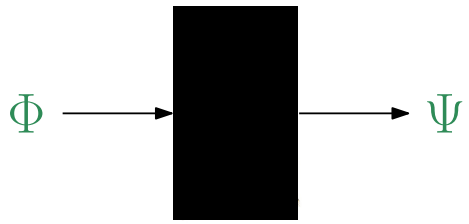

Abbildung 1: Betrachtung des Hörsystems als "Blackbox". Ein Stimulus im physikalischen Bereich Φ wird durch das System verarbeitet und resultiert in einer Wahrnehmung Ψ. Hierbei wird das System nicht im Detail, sondern ausschließlich als Gesamtsystem betrachtet.

Hierzu werden die akustischen Signale mit Methoden der Signalverarbeitung mit den zu untersuchenden Signaleigenschaften versehen. Dieses können spektrale (Frequenz, Bandbreite, spektrale Struktur, Harmonizität), zeitliche (Dauer, Periodizität), energetische (Pegel) oder auch spektrotemporale Eigenschaften (kohärente Frequenz- oder Pegelmodulationen über Frequenzen hinweg) sein. In einem Hörversuch werden diese Signale dann einer Versuchsperson per Kopfhörer oder Lautsprecher dargeboten, und die Wahrnehmung abgefragt. Zum Entwurf dieser Experimente und zur Auswertung der Antworten der Versuchsperson, stehen Methoden der Psychologie und der Signaldetektionstheorie zur Verfügung. Eine Zusammenfassung der Methoden der Psychoakustik findet sich in [11, 1, 12, 18].

Maskierung und Demaskierung am Beispiel von CMR und BMLD

Eine psychoakustische Methode, die Verarbeitung von Schall zu untersuchen, ist die Messung von sogenannten Detektionsschwellen. Hierbei wird zum Beispiel die minimale Intensität gemessen welche benötigt wird, um ein Signal einer bestimmten Frequenz zu detektieren. Der Pegel der sich aus dieser minimalen Intensität ergibt, wird dann als Ruhehörschwelle bezeichnet. In Anwesenheit eines Störsignals, oder Maskierers, kann eine höhere Intensität notwendig sein, um das Signal zu detektieren. Dieser Pegel wird dann als Maskierungs- oder Mithörschwelle bezeichnet. Die Erhöhung der Ruhehörschwelle durch Anwesenheit eines Maskierers wird Maskierung genannt. Eine Interpretation von Maskierung ist, dass in Anwesenheit eines Mask-

ierers das Signal vom Maskierer getrennt werden muss bevor es detektiert werden kann (Abb. 2). Diese Trennung geschieht durch Auswertung der an den Ohren anliegenden Schallsignale und deren Eigenschaften.

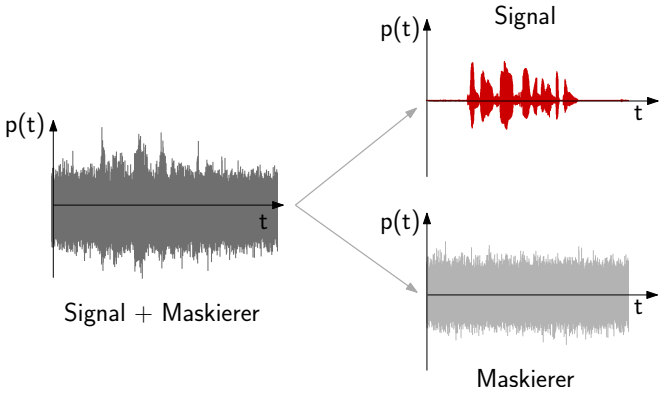

Abbildung 2: Mischung aus Signal und Maskierer (links) und Trennung des Signals (rechts, rot) und des Maskierers (rechts, hellgrau). Nach der Trennung ist eine Detektion trotz Anwesenheit des Maskierers möglich. Im Falle einer Demaskierung, wird diese Trennung durch Ausnutzen verschiedener Signaleigenschaften erleichtert, so dass ein niedrigerer Pegel zur Detektion notwendig ist. Dieser Prozess wird häufig als auditorische Objekttrennung bezeichnet.

Neben Maskierungseffekten gibt es bestimmte Signaleigenschaften, welche die Effektivität des Maskierers reduzieren können. Diese Reduktion der Maskierwirkung wird als Demaskierung bezeichnet. Eine dieser Signaleigenschaften sind kohärente Intensitätsschwankungen des Maskierers über verschiedene Frequenzbereiche, Komodulation genannt [13, 21]. Komodulation ist eine Eigenschaft vieler natürlicher Signale, wie zum Beispiel Sprache. Bei gleichem Leistungsspektrum ergibt sich für ein Sinuston in Anwesenheit eines Maskierers eine niedrigere Maskierungsschwelle, wenn der Maskierer komoduliert ist, verglichen mit einer Situation, in der der Maskierer unkorrelierte Pegelschwankungen über Frequenzen hinweg zeigt (siehe Abb. 3). Dieser Effekt wird als "comodulation masking release (CMR)" bezeichnet. Da das Leistungsspektrum des Stimulus identisch ist zwischen beiden Situationen und ausschliesslich Komodulation eingeführt wird, wird angenommen, dass das System die zusätzliche Information der Komodulation nutzen kann, um Signal und Maskierer besser zu trennen, und somit nur eine niedrigere Intensität benötigt, um das Signal vom Maskierer zu trennen und zu detektieren.

Neben Komodulation können auch Unterschiede zwischen den Ohren (interaurale Unterschiede) zu einer Demaskierung eines maskierten Signals führen. Diese interauralen Unterschiede kommen durch unterschiedliche räumliche Anordnung des zu detektierenden Signals und des Maskierers, und den daraus resultierenden Laufzeit- und Pegelunterschieden zwischen den Ohren zustande. Eine Demaskierung lässt sich messen, wenn beispielsweise ein Sinuston eine Phasendifferenz zwischen den Ohren aufweist, während der Maskierer keine interauralen Unterschiede aufweist (siehe Abb.4). Dabei ist,

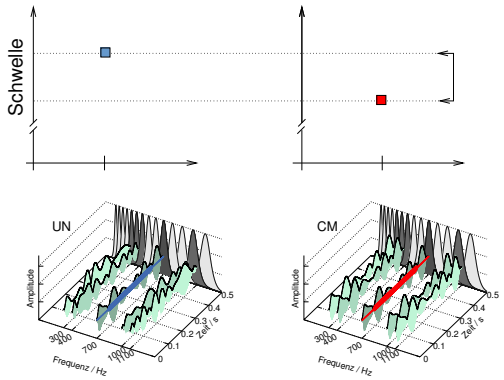

Abbildung 3: Spektrogrammartige Darstellung zweier Konditionen in einem Versuch zu "comodulation masking release (CMR)". In diesem Beispiel ist das zu detektierende Signal ein Sinuston mit einer Frequenz von 700 Hz (linkes Teilbild blau, rechtes Teilbild rot). Das Signal wird in Anwesenheit eines Maskierers, bestehend aus 5 schmalbandigen Rauschbändern (grün) präsentiert. Die Intensitätsschwankungen der einzelnen Rauschbänder sind entweder unkorreliert (UN, links) oder komoduliert (CM, rechts). Das Signal ist in der CM Situation leichter zu detektieren als in der UN Situation. Komodulation führt somit zu einer Demaskierung des zu detektierenden Signals.

bei gleichem Leistungsspektrum des Stimulus, das Signal leichter zu detektieren in Anwesenheit einer interauralen Phasendifferenz verglichen mit der Situation, in der Signal und Maskierer keine interauralen Unterschiede aufweisen. Dieser Effekt wird als "binaural masking level difference (BMLD)" bezeichnet. Ähnlich zur Komodula-

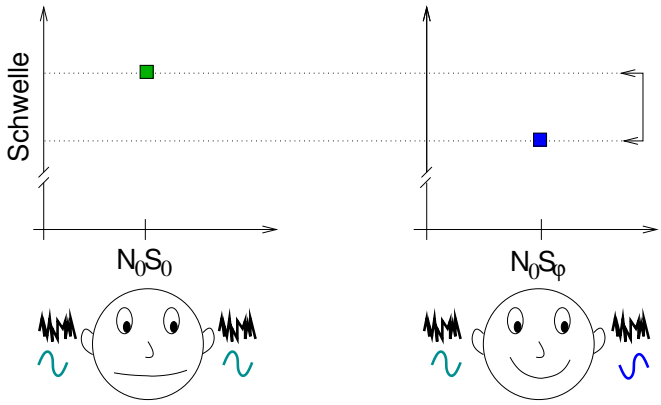

Abbildung 4: Demaskierung durch Einführung einer interauralen Phasendifferenz eines sinusförmigen Signals in Anwesenheit eines zwischen den Ohren identischen Rauschmaskierers (N_0, schwarz). Die Maskierungsschwelle eines, zwischen den Ohren identischen, Sinustons (S_0; links) ist höher als in Anwesenheit eine interauralen Phasendifferenz des Signals (S_π; rechts). Das Leistungsspektrum der beiden Konditionen ist identisch.

tion, wird auch bei interauralen Unterschieden angenommen, dass diese die Trennung von Maskierer und Signal erleichtern, und somit eine niedrigere Intensität zur Detektion notwendig ist.

In natürlichen Situationen, sind diese (und andere) Sig-

naleigenschaften zeitgleich vorhanden, und dem System stehen somit eine Vielzahl von Signaleigenschaften zur Trennung der zeitgleich aktiven Schallquellen zur Verfügung. Im Falle von Komodulation und interauraler Phasendifferenz kann gezeigt werden, dass diese Demaskierungseffekte zeitgleich genutzt werden können, und zu einer Addition [2, 6, 7], bzw. nahezu Addition [14] der Effekte führen.

Die Methoden der Psychologischen Akustik erlauben die phänomenologische Untersuchung der Auswirkungen von bestimmten Schalleigenschaften auf die Wahrnehmung. Dieser Ansatz ermöglicht es, systematisch einzelne und eine Kombination von Signaleigenschaften zu Untersuchen. Eine Einschränkung der Psychologischen Akustik ist jedoch, dass stets das System als Gesamtheit betrachtet wird. Diese Betrachtung erschwert die Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf die der Verarbeitung zu Grunde liegenden Verarbeitungsprozesse. So erlaubt die Erkenntnis, dass zum Beispiel Komodulation und interaurale Phasendifferenzen zu einer Addition der Demaskierung führt, gewisse konzeptionelle Prozesse auszuschliessen, eine genaue Anordnung und Verschaltung der zu Grunde liegenden Prozesse ist jedoch exklusiv auf Basis von psychoakustischen Daten nicht abschliessend möglich, da die einzelnen Verarbeitungsstufen in diesem "Blackbox" Ansatz nicht getrennt werden können.

Physiologische Akustik

In der Physiologischen Akustik wird, im Gegensatz zur Psychologischen Akustik, das System als physiologisches System (die Hörbahn) betrachtet. Das bedeutet, dass das System in verschiedene Verarbeitungsstufen unterteilt wird. Im Falle des Hörsystems, lässt sich eine Unterteilung in akustische Anteile (Ohrmuschel und Ohrkanal), mechanische Anteile (Mittel- und Innenohr), und neuronale Anteile vornehmen. Die neuronalen Anteile lassen sich dann wiederum unterteilen in verschiedene Nuklei (Abb. 5).

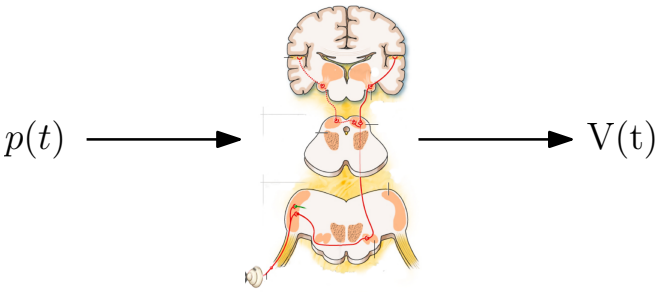

Abbildung 5: Das Hörsystem als physiologisches System. In diesem Konzept wird ein physikalisches Signal $p(t)$ durch die Hörbahn verarbeitet, und eine physikalisch Größe $V(t)$ als Ausgang der Verarbeitung betrachtet.

Das Ziel der Physiologischen Akustik ist es, die Verarbeitungsstrategien genauer zu untersuchen, die einzelnen Verarbeitungsstufen entlang der Hörbahn zu identifizieren, und die unterliegenden Verbindungen zu verstehen. Durch invasive als auch nichtinvasive Methoden kann eine Abbildung von Schalleigenschaften auf mechanische und neuronale Aktivität vorgenommen werden. Diese Methoden können lokal angewandt werden, und unterliegen somit nicht der Limitierung, dass das System stets als Ganzes evaluiert wird. Einige dieser Methoden umfassen die mechanische Messung der Vibrationen der Trommelfells [16], des Mittelohrs oder der Vibrationen im Innenohr [19]. Neuronale Aktivität kann sowohl invasiv, also auch durch Anwendung nicht-invasiver elektrophysiologscher und bildgebender Methoden gemessen werden, wie zum Beispiel durch Elektroencephalographie (EEG), Magnetoecephalographie (MEG) oder durch Magnetresonanztomographie (MRT).

Maskierung, Demaskierung und die "interne Repräsentation"

In der Physiologischen Akustik wird der Vorgang des Hörens häufig als Transformation des Schallsignals in eine "interne Repräsentation" interpretiert. In einem neuronalen System ist diese interne Repräsentation verbunden mit der Aktivität der Neurone in den relevanten Nuklei. Eine vereinfachte Sichtweise einer Detektionsschwelle in dieser Interpretation ist, dass der Pegel an der Schwelle gerade ausreicht, und ein minimales Signal-Rausch-Verhältnis der internen Repräsentation zu erreichen. Die Anwesenheit eines Maskierers, verschlechtert die interne Repräsentation, und somit ist ein höherer Pegel des akustischen Signals notwendig. Im Falle einer Demaskierung können einzelne Verarbeitungsstufen die interne Repräsentation durch Ausnutzen der im Stimulus enthaltenen Signaleigenschaften verbessern. Durch Studien in Tiermodellen konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden darüber, wo entlang der Hörbahn zum Beispiel Komodulation [21] oder interaurale Pegel- und Zeitdifferenzen [17] verarbeitet werden [12, 20].

Auch viele Modelle der auditorischen Verarbeitung basieren auf der Transformation des akustischen Signals mit Hilfe von Signalverarbeitungsstrategien in eine interne Repräsentation. Diese Repräsentation ist häufig ein statistisches Maß der neuronalen Aktivität [3, 15], kann neuronale Aktionspotentiale simulieren [23] oder eine Mischung der beiden Ansätze sein. Diese interne Repräsentation wird durch einen Detektor ausgewertet. Diese Auswertung ist in den meisten Fällen die Auswertung eines Signal-Rausch-Verhältnisses der internen Repräsentation. Unklar ist bisher, ob ein objektives Maß dieser internen Repräsentation existiert. Ein solches Maß müsste, unabhängig von der physikalischen Pegels des Schallsignals, die gleiche Stärke aufweisen bei Pegeln welche der Detektionsschwelle entsprechen. Des Weiteren, müsste dieses Maß mit wachsendem Pegel über der Maskierungsschwelle ansteigen.

Am Beispiel von CMR und BMLD lässt sich ein solches Maß eine Kombination von Psychoakustischen und nichtinvasiven elektrophysiologischen Methoden untersuchen (Abb. 7). Die Hypothese ist hierbei dass, unabhängig von der An- oder Abwesenheit eine Demaskierung, die gemessene neuronale Antwort auf einer späten Stufe der Hörbahn (nahe des postulierten Detektors) die gleiche

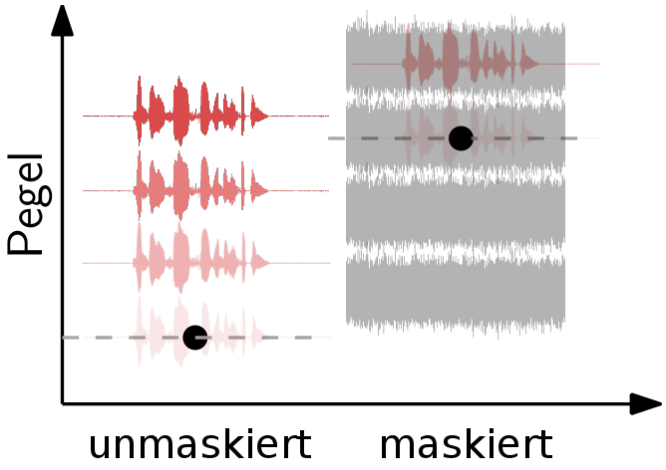

Abbildung 6: Darstellung der Stärke der internen Repräsentation eines unmaskierten (links) und eines maskierten (rechts) Signals. Der Kreis markiert die den minimal zur Detektion notwendigen Pegel, d.h., die Ruhe- bzw. Mithörschwelle. In der maskierten Situation in die Schwelle erhöht. An der Schwelle und bei gleichen Pegeln über der unmaskierten bzw. der maskierten Situation ist die interne Repräsentation des Signals jedoch vergleichbar (angedeutet durch die Stärke des Rottones).

Stärke aufweist. Es konnte kürzlich gezeigt werden, dass eine Komponente des späten akustisch evozierten Potentials gemessen an der Kopfoberfläche mit Hilfe von EEG, korreliert mit dem individuell an die Versuchsperson angepassten Pegel über der Mithörschwelle [10], [5].

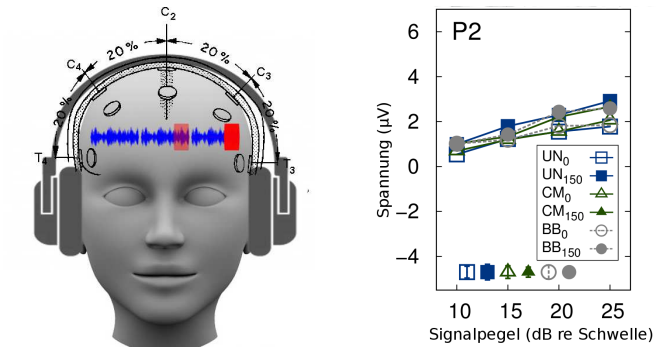

Abbildung 7: Kombination eines psychoakustischen Experiments mit gleichzeitiger Messung von akustisch evozierten Potentialen auf der Kopfoberfläche. Eine Komponente der späten akustischen Potentiale zeigt eine starke Korrelation der Amplitude mit dem Pegel über der individuellen Maskierungschwelle. Dies Korrelation ist unabhängig vom physikalischen Pegel des Stimulus, und unabhängig von Anwesenheit oder Abwesenheit von Signaleigenschaften welche zu einer Demaskierung führen.

Obwohl die physikalischen Pegel der Stimuli einen Unterschied von bis zu 20 dB hatten in einer Kondition ohne Demaskierung verglichen mit einer Kondition in der eine Addition von CMR und BMLD beobachtet werden konnte, wurden gleiche Amplituden der neuronalen Antwort gefunden, wenn die Pegel den gleichen Wert relativ zu der Maskierungsschwelle hatten. Somit konnte ein objektives Maß der Stärke der internen Repräsentation im Menschen gefunden werden.

Die Physiologische Akustik kann, im Vergleich zur Psychologischen Akustik, einzelne Verarbeitungsstufen der Verarbeitung von akustischen Signaleigenschaften zuordnen. In Isolation jedoch kann die Physiologische Akustik alleine nicht die Relevanz der beobachteten Effekte auf die Wahrnehmung bestimmen. Eine Kombination von Psychologischer Akustik und Physiologischer Akustik erlaubt jedoch die Abbildung von Signaleigenschaften auf einzelne Stufen der Hörbahn und gleichzeitig deren Einfluss auf die Wahrnehmung der Signale. Nicht-invasive Methoden der Physiologischen Akustik beruhen jedoch häufig ihrerseits auf Annahmen bezüglich der Generierung der gemessenen physikalischen Größen. Am Beispiel der späten akustisch evozierten Potentiale gemessen mit EEG werden nicht einzelne Neurone, sondern die kohärente Aktivität eine Neuronenpopulation gemessen. Invasive Methoden unterliegen nicht diesen Annahmen, jedoch sind die Messungen hierbei lokal, was die Interpretation des Beitrags der Einzelelemente zur Wahrnehmung erschwert.

Modellierung

Modellierung des Hörsystems kann dazu Beitragen, bestimmte Annahmen und Hypothesen aus den Bereichen der Psychologischen und der Physiologischen Akustik gezielt zu Überprüfen. Konzeptionelle Modelle können den Einfluss einzelner funktioneller Verarbeitungsstufen systematisch variieren, und den Einfluss auf die Wahrnehmung abschätzen (z.B. [15]). Diese Modelle nutzen häufig Methoden der Signalverarbeitung und unterwerfen sich funktionellen, und nicht physiologischen Randbedingungen. Physiologische, oder physiologisch motivierte Modelle im Gegensatz, orientieren sich an der Struktur und Funktion des physiologischen Systems. Hierbei werden Verarbeitungsstufen, oder Elemente davon, nachgebildet, um die Funktion im Detail nachzustellen. Beispiele hierzu sind die Modellierung der Schwingung der Basilarmembran im Innenohr als gekoppelte, nichtlineare Oszillatoren (z.B. [8, 22, 4]), oder die Simulation von Aktionspotenzialen im auditorischen Nerv (z.B. citezilany1997).

Zur Trennung mechanischer und neuronaler Anteile an der Verarbeitung von akustischen Signalen, lässt sich ein physiologisch motiviertes Modell des Innenohrs anwenden. Hierbei wird die Funktion des Innenohrs mit Hilfe physikalischer Prinzipien in Übereinstimmung mit experimentellen Daten nachgebildet. Die Analyse der Dynamik des Innenohrs kann hierbei einen Aufschluss darüber geben, welche Effekte auf Ebene des Innenohrs verarbeitet werden können, und welche Effekte spätere Stufen voraussetzen. Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass sich Unterschiede in der Detektionsleistung von Tönen in einem schmalen Frequenzbereich exklusiv durch die Verarbeitung im Innenohr erklären lassen [8]. Weiterhin kann ein solches physiologisches Modell in Kombination mit Erkenntnissen aus der Psychologischen Akustik genutzt werden, um Mechanismen der Verarbeitung eindeutig zu testen [9], was mit jeder der einzelnen Methoden alleine

nicht möglich wäre.

Zusammenfassung

Hören spielt eine wichtige Rolle in der alltäglichen Kommunikation. Die Hörforschung bedient sich einer Vielzahl von Methoden der Akustik, der Signalverarbeitung, der Psychologie und den Neurowissenschaften. In diesem Beitrag wurde dargelegt, wie die Kombination von verschiedenen Herangehensweisen zum Verständnis der Funktion des Gehörs beitragen können. Während die Psychologische Akustik das die Endgültige Abbildung eines Schallsignals in eine Wahrnehmung untersucht, können in Kombination mit Methoden der Physiologischen Akustik und der Modellierung Aussagen über die Anordnung und Funktionalität der Verarbeitungsstufen getroffen werden. Jeder der Methoden in Isolation angewandt, würden solche Einblicke verschlossen bleiben. Das Verständnis der Gehörs wird in Zukunft zur Verbesserung der Kommunikation in technischen Anwendungen, als auch zur Entwicklung von Hörhilfen zur Kompensation von Hörschädigungen notwendig sein.

Danksagung

Dieser Artikel ist eine Zusammenfassung eines Plenarvortrages im Zusammenhang mit der Verleihung des Lothar-Cremer Preises. Ich möchte mich bei meinen Mentoren Volker Mellert, Jesko Verhey und Torsten Dau für die gute Zusammenarbeit bedanken, sowie bei der Deutschen Gesellschaft für Akustik für diesen Preis als Anerkennung meiner bisherigen Arbeit.

Literatur

[1] Blauert, J. (Ed.): Communication Acoustics. Springer Verlag. 2005.

[2] Cohen, M., und Schubert, E.D.: Comodulation masking release and the masking level-difference. J. Acoust. Soc. Am. 89 (1991), 3007-3008

[3] Dau, T., Kollmeier, B., und Kohlrausch, A.: Modeling auditory processing of amplitude modulation. I. Detection and masking with narrow-band carriers. J. Acoust. Soc. Am. 102 (1997).

[4] Duifhuis H.: Cochlear Mechanics. Springer Verlag. 2012.

[5] Egger, K., Dau, T., und Epp, B.: Supra-threshold perception and neural representation of tones presented in noise in conditions of masking release. (in Begutachtung)

[6] Epp, B., und Verhey, J.L.: Superposition of masking releases. J. Comput. Neurosci. (2009), 393-407

[7] Epp, B., und Verhey, J.L.: Combination of masking releases for different center frequencies and masker amplitude statistics. J. Acoust. Soc. Am. (2009), 2479-2489

[8] Epp, B., Mauermann M., und Verhey, J.L.: Modeling cochlear dynamics: interrelation between cochlea mechanics and psychoacoustics. J. Acoust. Soc. Am. 128 (2010), 1870-1883

[9] Epp, B., Mauermann M., und Verhey, J.L.: Cochlear Fine Structure-Implications for Modulation Processing at the Level of the Cochlea. What Fire is in Mine Ears: Progress in Auditory Biomechanics (2010), 206-211.

[10] Epp, B., Yasin, I., und Verhey, J.L.: Objective measures of binaural masking level differences and comodulation masking release based on late auditory evoked potentials. Hearing Research 306 (2013). 21-28.

[11] Fastl, H. und Zwicker, E.: Psychoacoustics: facts and models. Springer Verlag. 2005.

[12] Geisler, C.D.: From Sound to Synapse. Oxford University press. 1998.

[13] Hall J.W., Haggard, M.P., und Fernandes, M.A.: Detection in noise by spectro-temporal pattern analysis. J. Acoust. Soc. Am. 76 (1984), 50-56

[14] Hall, J.W., Buss, E., und Grose, J.H.: Exploring the additivity of binaural and monaural masking release. J. Acoust. Soc. Am. 129 (2011), 2080-2087.

[15] Jepsen, M., Ewert, S., und Dau, T.: A computational model of human auditory signal processing and perception. J. Acoust. Soc. Am. (2008), 422-438.

[16] Rodriguez Jorge, J., Zenner, H. P., Hemmert, W., Burkhardt, C., und Gummer, A.W.: Laservibrometrie Ein Mittelohr- und Kochleaanalysator zur nicht-invasiven Untersuchung von Mittel- und Innenohrfunktionsstörungen. HNO 45 (1997), 997-1007

[17] Moore, D.R.: Anatomy and Physiology of Binaural Hearing. Audiology 30 (1991), 125-134.

[18] Pulkki, V. und Karjalainen, M.: Communication Acoustics. Wiley. 2015

[19] Robles, L, und Ruggero, M.: Mechanics of the Mammalian Cochlea. Physiol. Rev. 81 (2001), 1305-1352.

[20] Schnupp, J., Nelken, I., and King, A.: Auditory Neuroscience. MIT press. 2010.

[21] Verhey, J., Pressnitzer, D., und Winter, I.: The psychophysics and physiology of comodulation masking release. Exp. Brain Res. 153 (2003), 405-417

[22] Verhulst, S., Dau, T., und Shera, C.: Nonlinear time-domain cochlear model for transient stimulation and human otoacoustic emission. J. Acoust. Soc. Am. 132 (2012), 3842-3848.

[23] Zilany, M. S. A., und Bruce, I. C.: Modeling auditory-nerve responses for high sound pressure levels in the normal and impaired auditory periphery. J. Acoust. Soc. Am. 135 (2006), 1446-1466