

Modellbildung der neuronalen auditiven Verarbeitung kombiniert mit Psychoakustik als Werkzeug in der Hörimplantatforschung

Werner Hemmert¹, Siwei Bai¹, Jörg Encke¹, Sonja Karg¹, Stefanie Keller¹, Michele Nicoletti¹, Miguel Obando¹, Marek Rudnicki¹, Florian Völk^{1,2}, Robin Weiß¹, Christian Wirtz^{1,3}, Stefan Zirn^{1,4}

¹ *Bioanaloge Informationsverarbeitung, Technische Universität München, 85748 Garching*

² *WindAcoustics UG, 86949 Windach*

³ *MED-EL, A-6020 Innsbruck*

⁴ *Hochschule Offenburg, 77652 Offenburg*

Einleitung

In diesem Beitrag versuche ich anhand meiner persönlichen Laufbahn den immensen Einfluss der Münchner Schule für Psychoakustik auf seine Schüler aufzuzeigen und zu würdigen.

Die Lehre am Institut für Elektroakustik, stellte sich im Jahr 1990, als ich dort meine Diplomarbeit über otoakustische Emissionen anfertigte, wie folgt dar: Prof. Zwicker las „Elektroakustik“ und „Psychoakustik“, Prof. Terhardt die „Musikalische Akustik“ und Prof. Fastl „Technische Akustik und Lärmbekämpfung“, weiterhin gab es noch verschiedene Praktika, welche wir an der Akustik interessierten Studierenden alle belegten. Prof. Fastl hinterließ bei uns Studierenden durch sein hohes Engagement in Lärmfragen einen bleibenden Eindruck, und so lag es für mich nahe, kurz vor der Fertigstellung des neuen Flughafens „München II“ bei ihm nachzufragen, ob wir nicht vor dessen Eröffnung Messungen zur Dokumentation des derzeitigen Lärmimmissionsstatus durchführen könnten. Prof. Fastl unterstützte das Vorhaben und beauftragte damit Uli Widmann als erfahrenen Mitarbeiter und wir beide fuhren los, um die Messungen an ausgewählten Punkten um den Flughafen durchzuführen. An diesem Beispiel wird deutlich, dass für uns Studierende die Ausbildung weit über die Vorlesungen hinausging. Weiterhin hatten wir durch den damals laufenden Sonderforschungsbereich 204 „Gehör“ Kontakt zu den daran beteiligten Instituten und wir nahmen an den dort stattfindenden Vorträgen teil. Ich selbst erinnere mich an die Neurobiologie der LMU, die damals noch zu Fuß an der Luisenstraße erreichbar war und an die Biologie der TUM in Garching. Mit vielen Forschern, die ich dort kennen gelernt habe, bin ich bis heute in Kontakt, wir haben gemeinsame Forschungsprojekte (Bernsteinzentrum für Computational Neuroscience München, SPP 1608) und Publikationen [1]. Weitere Kooperationen gab es auch mit den HNO Kliniken über otoakustische Emissionen und neuartige audilogische Testverfahren. Durch diese engen Kooperationen waren die Grundlagen der Physiologie auch im Ingenieursstudium präsent, die Psychoakustik und die Messung otoakustischer Emissionen erreichte die Medizin (Prof. Schorn, Prof. Janssen) und Biologie (Prof. Manley, Prof. Klump, Prof. Kössl, Prof. Grothe, Prof. Wiegrebe), eine Tradition, die bis heute weiterlebt.

Dass der Wissensstand über die Funktion des Gehörs dadurch auch die Lehre an ihrer Zeit weit voraus war, wurde mir erst in den nächsten Jahrzehnten klar, als ich auf vielen

internationalen Konferenzen oft überrascht war, dass Grundlagen, die wir schon in den Vorlesungen eingesaugt hatten (z.B. dass das Innenohr einen aktiven Verstärkungsprozess benötigt), dort teilweise vehement bekämpft oder aber später als große Neuerungen vorgestellt wurden. Ich erinnere mich noch genau, wie Prof. Zwicker in einer Vorlesung bekannt gab, dass Prof. Zenner aus Tübingen Bewegungsantworten bei äußeren Haarsinneszellen gefunden hatte und dass diese wohl das zelluläre Substrat für einen aktiven cochleären Verstärkungsprozess darstellen könnten. So kam es, dass ich nach meiner Diplomarbeit und dem vorzeitigen Tod von Prof. Zwicker nach Tübingen in die physiologische Hörforschung ging.

Modellbildung zur Funktion des Innenohres

Im Tübinger Hörforschungslabor lernte ich von Biologen und Medizinern, wie man aus dem Innenohr Haarsinneszellen isoliert und wie man das Innenohr öffnen kann, um Schwingungsantworten zu messen.

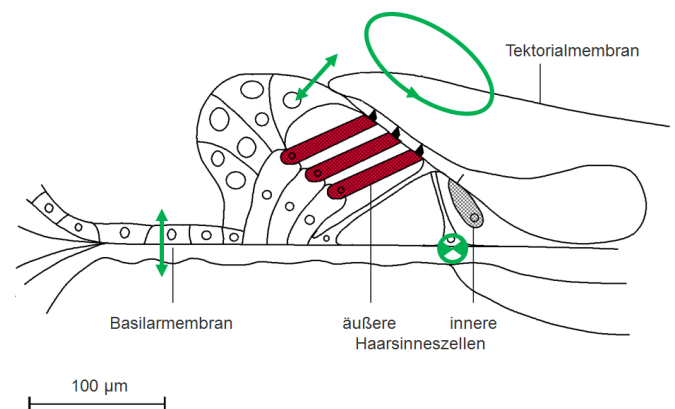


Abbildung 1: Schematische Abbildung eines Schnitts durch das Corti'sche Organ. Mit grünen Bahnkurven sind die Bewegungen ihrer Elemente skizziert. Während sich Basilarmembran und die Oberseite des Corti'schen Organs linear bewegten, wurde in der Bewegungsantwort der Tektorialmembran ein zweiter Freiheitsgrad gefunden, welcher sich an ihrer Resonanzfrequenz in einer elliptischen Bahnkurve ausdrückt.

Daraus gingen viele Veröffentlichungen zur Mikromechanik des Corti'schen Organs hervor, dessen Bewegungen wir auf allen relevanten Strukturen mit einem Laser-Interferometer [2] und später auch dreidimensional mit einer zusätzlich integrierten, kalibrierten Photodiodenmessung charakterisieren konnten [3;4]. Diese Messungen wurden 1996 mit

dem Helmholtzpreis der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ausgezeichnet [5].

Ein weiterer Höhepunkt meiner dortigen Tätigkeit war die Charakterisierung der äußeren Haarsinneszellen, deren Mechano-elektrische Transduktion, d.h. ihre elektrische Reaktion auf eine mechanische Auslenkung ihrer Haarbündel wir in einer interdisziplinären Gruppe messen konnten [6]. Dabei erlaubte uns die Kooperation zwischen Biologen, Medizinern und mich als Messtechniker in allen Bereichen den Stand der Technik voranzutreiben. So waren wir international die ersten (und einzigen), die an isolierten, adulten äußeren Haarsinneszellen Rezeptorpotentiale ableiten und dabei den Frequenzbereich bis zu einigen kHz abdecken konnten [7]. Unsere Ergebnisse zeigten, dass das Rezeptorpotential bei niedrigen Frequenzen konstant bleibt und im Bereich über der Grenzfrequenz der Zellen mit 6 dB/Oktave aufgrund der Membrankapazität abfällt.

Auch zur Elektromobilität konnten wir einen Meilenstein setzen, indem wir die Auslenkung und Kraft von isolierten äußeren Haarzellen bis zu maximal 195 kHz messen konnten und so ihr Verhalten über den gesamten Hörbereich und sogar darüber hinaus charakterisierten [8]. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass die Kraftgeneration bis hin zu den höchsten messbaren Frequenzen konstant blieb. Die Auslenkung der Zellkörper blieb konstant und fiel erst bei sehr hohen Frequenzen mit 12 dB/Oktave ab. Mit diesen Daten konnten wir eine hochkarätige Veröffentlichung wiederlegen [9], welche aufgrund des geringeren erfassten Frequenzbereichs von einer Tiefpassfunktion erster Ordnung ausging, die sie als Grenzfrequenz des Motorproteins interpretierte. Wegen dem höheren Frequenzbereich unserer Messungen konnten wir schließen, dass der Tiefpass in der Mechanik der Haarzellen begründet war. Steifigkeit und Masse der bei der Längenänderung bewegten Flüssigkeit bestimmt die Grenzfrequenz der Haarzellen. Die mechanische Grenzfrequenz liegt dabei über der charakteristischen Frequenz an der Stelle des Innenohres, von der die jeweiligen Zellen stammten. Die Verstärkung muss nur bei tieferen Frequenzen erfolgen, so beeinträchtigt die Grenzfrequenz der Mechanik der Haarsinneszelle die Verstärkungsfunktion daher nicht. Die Grenzfrequenz der elektromechanischen Transduktion lag dagegen 3-6 Oktaven unterhalb dieser charakteristischen Frequenz. Sollen die äußeren Haarsinneszellen also die Schwingungen des Corti'schen Organs verstärken, ergibt sich das Problem, dass die Effizienz der äußeren Haarzellen bereits abgefallen ist. Falls die Motorproteine, welche übrigens im Jahr 2000 sequenziert werden konnten und den Namen „Prestin“ erhielten [10], sich analog zu einem piezoelektrischen Kristall funktionieren, könnte die mechanische Resonanzfrequenz die Kapazität der Zellmembran wiederum kompensieren. Die Konzepte zum Verständnis diese biologischen Vorgänge bauen stark auf die elektro-mechanischen Analogien auf, welche an der TUM als Grundlage in der Akustik gelehrt wurden. Wie diese Effekte zusammenspielen und wie der cochleäre Verstärkungsprozess im Detail funktionieren könnte, ist jedoch weiterhin unklar. Fest steht, dass auch die mechanischen Eigenschaften der Tektorialmembran

entscheidend sind [11;12], auf welcher sich wohl eine weitere Wanderwelle ausbreiten kann [13]. Neben der Funktion des Innenohres war auch die Schädigung seiner fragilen Elemente durch Lärm Thema eines Forschungsprojektes in Tübingen. Hierzu wurden objektive und psychoakustische Methoden verglichen, um Lärmschäden nach einer Beschallung des Gehörs möglichst sensitiv zu erkennen [14].

Die Modellentwicklung zur Funktion des Innenohrs konnte ich am IBM Forschungslabor in Rüschlikon zunächst anhand eines hydrodynamischen Modells studieren [15]. Es bestand aus einer mikrostrukturierten Basilarmembran, welche aus drei Schichten des Photolacks SU8 gefertigt wurde. Diese wurde in eine CNC-gefräste Cochlea im Maßstab 1:1 eingebettet. Mit diesem Funktionsmodell konnte unter anderem gezeigt werden, dass durch die anisotrope Strukturierung der Basilarmembran, welche die quer über die Membran laufenden Fasern simuliert, für die steilen Filterflanken der passiven Wanderwelle nötig sind. Im Anschluss an diese Arbeiten ging es an der Forschungsabteilung von Infineon Technologies darum, automatische Spracherkennungssysteme zu verbessern. Dazu konnten wir ein Computermodell des menschlichen Innenohres entwickeln, welches Schallsignale in Nervenaktionspotentiale des auditorischen Nerven umsetzt [16]. Die Besonderheit dieses Modells war seine hohe Dynamikkompression/Verstärkung von bis zu 60 dB, die eine qualitativ hochwertige Kodierung von Sprache in einem breiten Dynamikbereich ermöglichte. Anhand dieses Modells konnten wir die Robustheit des menschlichen Gehörs in Störgeräuschen untersuchen [17]. Insgesamt sind inzwischen auch die physiologischen Innenohrmodelle so präzise, dass sich viele psychoakustischen Erkenntnisse auf neuronaler Ebene nachvollziehen lassen.

Hörimplantatforschung und Psychoakustik

Nach meiner Berufung an die TUM konnte ich meine Forschungsinteressen auch auf den Bereich der Cochlea Implantate (CIs) ausweiten. Diese Implantate gehören zu den erfolgreichsten Neuroprothesen, da sie komplett ertaubten Menschen wieder ermöglichen, Schallsignale wahrzunehmen und in der Regel Lautsprache zu verstehen. Erstaunlicher Weise sind bei der elektrischen Stimulation von Neuronen noch viele elementare Details unbekannt, die mit psychoakustischen Untersuchungen erfasst werden können. So konnte z.B. Frau Karg die zeitliche Dynamik der auditorischen Nervenfasern beim Menschen durch die Messung der zeitlichen Interaktion von elektrischen Stimulationspulsen ermitteln [18]. Ein besseres Verständnis der komplexen Vorgänge wird durch die Kombination experimenteller Arbeiten mit einer Modellbildung auf physiologischen Grundlagen erwartet. So begannen wir früh, auch für die elektrische Stimulation der Hörnervenfasern Modelle zu entwickeln, mit deren Hilfe die Qualität der Sprachkodierung und die zeitliche Präzision der Kodierung untersucht werden konnten [19].

Bei der Evaluation der Spracherkennung von mit CIs versorgten Probanden schließt sich der Kreis zu den Arbeiten von Prof. Fastl. In einer Studie mit selektierten

Probanden (N=12) konnten Zirn, Polterauer und Keller [20] zeigen, dass diese in kontinuierlichen Störgeräuschen (dies entspricht dem klinischen Standardverfahren) überraschend gut abschneiden. Das Signal-Rausch-Verhältnis, bei dem sie 50% der Wörter eines Sprachtests verstehen (dieser Wert wird „speech reception threshold“ genannt und mit SRT abgekürzt) war mit -3 dB nur 3 dB unterhalb des Wertes einer normalhörenden Vergleichsgruppe. Dieser Wert ist erstaunlich gut und zeigt das hohe Potential der CI Versorgung. Andererseits lässt dieses gute Ergebnis kaum Raum für weitere Verbesserungen bei den Anpassungsparametern der CIs. In zeitlich moduliertem Störgeräusch, welches zu Ehren seines Erfinders „Fastl Rauschen“ genannt wird, gehen die Unterschiede dagegen weit auseinander: während Normalhörende in die zeitlichen Lücken des Störgeräusches hineinhören können (der SRT verbessert sich auf -18.9 dB), verschlechtert sich die SRT bei CI Nutzern auf -1.4 dB. Die dabei auftretende Lücke von mehr als 20 dB spiegelt dabei die Probleme von CI Nutzern in schwierigen Umgebungen, z.B. bei konkurrierenden Störsprechern, eher wider. Gleichzeitig ermöglicht dieser anspruchsvollere Test mit Fastl-Rauschen die weitere Optimierung der CIs und ihrer Kodierungsstrategien auch bei Probanden, welche bei dem klinischen Standardverfahren schon nahezu optimal abschneiden. Weitere Synergien mit Prof. Fastl ergaben sich bei der Betreuung von Doktorarbeiten. So übernahm ich das Zweitgutachten für die Arbeit von Florian Völk [21], der inzwischen in meiner Gruppe tätig ist und dort jetzt die Arbeiten im Bereich Psychoakustik leitet. Dort hat er beispielsweise die Arbeiten von Frau Keller zur Evaluation und Neukonzeption eines Matrixtests zur Evaluation von CIs mitbetreut [22] sowie Versuche zur Tonhöhenempfindung von CI Nutzern [23,24] zusammen mit Frau Dr. Karg unterstützt. Prof. Fastl fungierte wiederum bei der Dissertation von Frau Keller [25] als Zweitgutachter.

Modellierung der neuronalen Verarbeitung im auditorischen Hirnstamm

Nach der Kodierung von Schallsignalen im Innenohr erfolgt die neuronale Verarbeitung entlang der Hörbahn zunächst im Stammhirn. Die physiologisch motivierte Modellbildung auf der Basis von Nervenaktionspotentialen bietet den entscheidenden Vorteil, dass die Verarbeitung bei Normalhörenden und CI Nutzern einfach durch einen Austausch des Innenohrmodells verglichen werden kann. Herr Rudnicki entwickelte ein Modell von Neuronen im auditorischen Hirnstamm, welches die zeitliche Präzision der neuronalen Kodierung erhöht [26], welches von Herrn Encke weiterverwendet wurde, um die Grundlagen des neuronalen Schaltkreises nachzubilden, der im mittleren Olivenkern interaurale Zeitdifferenzen auswertet, welche für die Schalllokalisation essentiell sind [27]. Dieses komplexe physiologische Modell konnte nach einer eingehenden Analyse auf ein einfaches funktionales Modell reduziert werden, welches im Wesentlichen mit zwei Parametern gefittet werden kann [28]. An dieser Stelle zeigte sich wiederum die Synergie mit der Psychoakustik, da für die Bestimmung dieser Parameter wieder mit Unterstützung von Dr. Völk und Herrn Encke eine Serie von Hörversuchen

konzipiert und von Masterstudenten durchgeführt werden konnten [29-33].

Zusammenfassung

Die Lehre der Münchner Schule der Psychoakustik war im Rückblick ihrer Zeit in vielen Aspekten weit voraus und bildete ihre Absolventen für verschiedenste Bereiche in Industrie und Wissenschaft hervorragend aus. Der besondere Verdienst von Prof. Fastl bestand darin, dass er nach dem Tod von Prof. Zwicker dessen Lehre zunächst mit Prof. Terhardt weiterführte. Nach dessen Pensionierung übernahm er nahezu das gesamte Kurrikulum und gewährleistete so eine kontinuierliche Akustikausbildung an der TUM. Dies kann ihm nicht hoch genug angerechnet werden, denn aufgrund der Neuorientierung des Instituts in Richtung Mensch-Maschine-Kommunikation fand dieses Engagement lange Zeit unter sehr schwierigen Rahmenbedingungen statt.

Auch wenn inzwischen mit Prof. Seeber einer seiner Schüler seine Nachfolge angetreten hat und mit mir auch der mehr Physiologie-orientierte Teil der Hörforschung abgedeckt ist, hoffen wir, dass uns Prof. Fastl noch weiter mit seiner Lehre unterstützt und uns als geschätzter Ratgeber zur Seite steht.

Literatur

- [1] Reuter, G., Kössl, M., Hemmert, W., Preyer, S., Zimmermann, U., Zenner, H.-P.: Electromotility of outer hair cells from the cochlea of the echolocating bat, *Carollia perspicillata*. *Journal of Comparative Physiology A* 175 (4), 449-455 (1994)
- [2] Hemmert, W., Zenner, H.P., Gummer, A.W.: Characteristics of the travelling wave in the low-frequency region of a temporal-bone preparation of the guinea-pig cochlea. *Hearing Research* 142 (1-2), 184-202 (2000)
- [3] Hemmert, W., Zenner, H.P., Gummer, A.W.: Three-dimensional motion of the organ of Corti. *Biophysical Journal* 78 (5), 2285-2297 (2000)
- [4] Gummer, A.W., Hemmert, W., Zenner, H.P.: Resonant tectorial membrane motion in the inner ear: its crucial role in frequency tuning. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93 (16), 8727-8732 (1996)
- [5] Hemmert, W.: Dreidimensionale Schwingungsmessungen im Innenohr: Aufklärung der Frequenzselektivität des Gehörs. *PTB-Mitteilungen* 107 (1), 12-18 (1996)
- [6] Preyer, S., Hemmert, W., Pfister, M., Zenner, H.-P., Gummer, A.W.: Frequency response of mature guinea-pig outer hair cells to stereociliary displacement. *Hearing Research* 77 (1-2), 116-124 (1994)
- [7] Preyer, S., Renz, S., Hemmert, W., Zenner, H.-P., Gummer, A.W.: Receptor potential of outer hair cells isolated from base to apex of the adult guinea-pig cochlea: implications for cochlear tuning mechanisms. *Auditory Neuroscience* 2, 145-157 (1996)
- [8] Frank G., Hemmert, W., Gummer, A.W.: Limiting dynamics of high-frequency electromechanical

- transduction of outer hair cells. Proceedings of the National Academy of Sciences 96 (8), 4420-4425 (1999)
- [9] Gale, J.E., Ashmore, J. F.: An intrinsic frequency limit to the cochlear amplifier. *Nature* 389:63–66 (1997)
- [10] Zheng, J., Shen, W., He, D.Z., Long, K.B., Madison L.D., Dallos, P.: Prestin is the motor protein of cochlear outer hair cells. *Nature* 11:405(6783):149-55 (2000)
- [11] DM Freeman, D.M., Abnet, C.C., Hemmert, W., Tsai, B.S., Weiss, T.F.: Dynamic material properties of the tectorial membrane: a summary. *Hearing Research* 180 (1-2), 1-10 (2003)
- [12] Gu, J.W., Hemmert, W., Freeman, D.M., Aranyosi, A.J.: Frequency-dependent shear impedance of the tectorial membrane. *Biophysical Journal* 95 (5), 2529-2538 (2008)
- [13] Ghaffari, R., Aranyosi, A.J., Freeman, D.M.: Longitudinally propagating traveling waves of the mammalian tectorial membrane. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 16;104(42):16510-5, (2007)
- [14] Monitoring noise susceptibility: sensitivity of otoacoustic emissions and subjective audiometry. PK Plinkert, W Hemmert, W Wagner, K Just, HP Zenner *British Journal of Audiology* 33 (6), 367-382 (1999)
- [15] Hemmert, W., Dürig, U., Despont, M., Drechsler, U., Genolet, G., Vettiger, P., Freeman, D.M.: A life-sized, hydrodynamical, micromechanical inner ear. *Biophysics of the Cochlea: from Molecules to Models*, 409-416 (2003)
- [16] Holmberg, M., Hemmert, W.: An auditory model for coding speech into nerve-action potentials. *Proc. Joint Congress CFA/DAGA'04*, 773-4 (2004)
- [17] Holmberg, M., Gelbart, D., Hemmert, W.: Speech encoding in a model of peripheral auditory processing: Quantitative assessment by means of automatic speech recognition. *Speech Communication* 49 (12), 917-932 (2007)
- [18] Karg, S.A., Lackner, C., Hemmert, W.: Temporal interaction in electrical hearing elucidates auditory nerve dynamics in humans. *Hearing Research* 299, 10-18 (2013)
- [19] Nicoletti, M., Wirtz, C., Hemmert, W.: Modeling sound localization with cochlear implants. In: *The Technology of Binaural Listening* (ed.: Prof. Jens Blauert) *Modern Acoustics and Signal Processing*, pp. 309-331, ASA Press & Springer Verlag, Berlin Heidelberg (2013)
- [20] Zirn, S., Polteraer, D., Keller, S., Hemmert, W.: The effect of fluctuating maskers on speech understanding of high-performing cochlear implant users. *International Journal of Audiology* 55 (5), 295-304 (2016)
- [21] Völk, F.: Interrelations of Virtual Acoustics and Hearing Research by the Example of Binaural Synthesis. Dissertation, TUM, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (2013)
- [22] Keller, S., Hemmert, W., Völk, F.: Aspects of generating syntax-free word lists for quantifying speech intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140 (4), 3213-3213 (2016)
- [23] Huber M., S. Karg, W. Hemmert, F. Völk: Kriterien von Cochlea-Implantat-Nutzern zur Beurteilung der Ortstonhöhe. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)
- [24] Karg S., M. Huber, W. Hemmert, F. Völk: Kriterien von Cochlea-Implantat-Nutzern zur Beurteilung der Ratentönhöhe. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)
- [25] Keller, S. A.: Konzeption und Analyse von Sprachverständlichkeitstests bei Normalhörenden und Cochlea-Implantat-Trägern. Dissertation, TUM, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (2017)
- [26] Rudnicki, M., Hemmert, W.: High Entrainment Constrains Synaptic Depression Levels of an In vivo Globular Bushy Cell Model. *Frontiers in Computational Neuroscience* 11, 16 (2017)
- [27] Encke, J., Hemmert, W.: Extraction of Inter-Aural Time Differences Using a Spiking Neuron Network Model of the Medial Superior Olive. *Frontiers in Neuroscience* 12, 140 (2018)
- [28] Encke J., D. Reimann, W. Hemmert, F. Völk: Ein Zweikanalmodell der neuronalen Verarbeitung interauraler Phasendifferenzen. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)
- [29] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Relevance of headphone characteristics in binaural listening experiments: A case study. *143rd Convention of the Audio Engineering Society* (2017)
- [30] Völk F., J. Encke, J. Kreh, W. Hemmert: Pure-Tone Lateralization Revisited. *174th Meeting of the Acoust. Soc. Am., 2017*
- [31] Encke J., J. Kreh, W. Hemmert, F. Völk: Evaluierung eines Verfahrens für psychoakustische Lateralisationsexperimente. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)
- [32] Kreh J., J. Encke, W. Hemmert, F. Völk: IPD, nicht ITD: Psychoakustische Hinweise auf phasennormierte Feinstrukturverarbeitung bei der Lateralisation. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)
- [33] Reimann D., J. Encke, W. Hemmert, F. Völk: Lateralisation bei symmetrisch und asymmetrisch definierten interauralen Pegeldifferenzen. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e.V., Berlin* (2018)