

■ Gemessene Güte Q_0 als Funktion der Beschleunigungsfeldstärke E_a für die supraleitende CH-Struktur (graue Kurve). Die dunkelblaue Kurve gibt die Hochfrequenzleistung an, die zum Aufbau der elektromagnetischen Felder notwendig ist. Da diese Leistung mithilfe eines Kryosystems mit geringem Wirkungsgrad aus dem Heliumbad entfernt werden muss, ist die Netzleistung entsprechend höher (hellblau). Allerdings ist die bei der Supraleitung notwendige Leistung um einen Faktor 100 kleiner als beim normalleitenden Betrieb (rot).

Dies führt einerseits zu drastisch geringeren Betriebskosten und andererseits zu wesentlich höheren mittleren Feldstärken, insbesonde-

re bei Dauerstrich-Beschleunigern wie MYRRHA. Allerdings wird die Hochfrequenzleistung in das Heliumbad abgegeben und muss mit einem kleinen Wirkungsgrad (0,4 %) entfernt werden. Dadurch wird der Vorteil der Supraleitung gegenüber der Normalleitung kleiner, beträgt aber immer noch zwei Größenordnungen bezogen auf die Netzleistung. ■

Der wichtigste Test einer supraleitenden Kavität ist die Messung der Güte Q_0 gegen das Beschleunigungsfeld E_a . Die Güte gibt an, wie viele Schwingungsperioden vergehen, bis die in den Feldern

gespeicherte Energie dissipiert ist. Aufgrund der kleinen Verluste sind die Güten entsprechend hoch und liegen zwischen 10^8 und 10^9 .

Tests der CH-Struktur ergaben Beschleunigungsfelder von bis zu 7 Millionen Volt/meter^{15/}, was nahezu einem Faktor 2 gegenüber den MYRRHA-Designvorgaben entspricht. ■

Dank der europaweiten Vorarbeiten ist die Transmutation inzwischen in greifbare Nähe gerückt. 2010 gab die EU grünes Licht für den Bau von MYRRHA. Der Baubeginn soll 2014 und die Inbetriebnahme 2023 erfolgen. ◆

Literatur

^{11/} EUROTRANS Euratom FP6 contract FI6W. CT.2005-516520.

^{12/} H. Podlech et al. *The EURO-TRANS Project* AIP proceedings 1265 (2010), pp. 355–362, ISBN 978-0-7354-0814-2.

^{13/} C. Zhang et al. *Reliability and Current-Adaptability Studies of a 352 MHz 17 MeV, Continuous-Wave Injector for an Accelerator-Driven System* Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 080101 (2010).

^{14/} F. Dziuba et al. *Development of Superconducting Crossbar-H-Mode Cavities for Proton and Ion Acceleration* Physical Review ST Accel. and Beams 13, 041302 (2010).

^{15/} H. Podlech *Entwicklung von normal- und supraleitenden CH-Strukturen zur effizienten Beschleunigung von Ionen und Protonen* Habilitationsschrift, Universität Frankfurt, 2008.

^{16/} H. Podlech et al. *Superconducting CH-Structure* Physical Review ST Accel. and Beams 10, 080101 (2007).

Der Schallwahrnehmung auf der Spur

Was schreckhafte Wüstenrennmäuse zur Tinnitus-Forschung beitragen können

von **Manuela Nowotny**

Das Innenohr des Menschen liegt tief in einer unzugänglichen Höhle des Felsenbeins im Schädel verborgen. Vieles, was wir heute über die Schallwahrnehmung wissen, ist deshalb an menschlichen Leichen oder an Säugetieren und Insekten erforscht worden. Im Arbeitskreis »Neurobiologie und Biosensorik« untersuchen wir grundlegende Mechanismen der Schallverarbeitung an Heuschrecken, deren Ohren praktischerweise in den Vorderbeinen liegen. An einem zweiten Versuchstier, der Mongolischen Wüstenrennmaus, gehen wir der Entstehung des Tinnitus auf den Grund. Ziel ist es, langfristig neue Therapien für den Menschen zu entwickeln.

Die Entwicklung eines Tinnitus ist typischerweise mit einer Schädigung im Innenohr verbunden, meist hervorgerufen durch einen

Hörsturz, ein Knalltrauma, laute Musik oder auch durch Medikamente. Bisher war die Untersuchung von Tinnitus an Tieren schwierig, da keine objektiven Kriterien existierten, um das Ohrgeräusch bei ihnen festzustellen. Man muss darum indirekte Hinweise für die Existenz eines Tinnitus finden. Bis vor einigen Jahren war dies verbunden mit zeitaufwendigen Versuchsreihen, die auf das Erlernen von bestimmten Verhaltensweisen abzielten. Beispielsweise wurden die Versuchstiere trainiert, an einer Wasserflasche zu lecken, wenn sie einen Ton hörten.

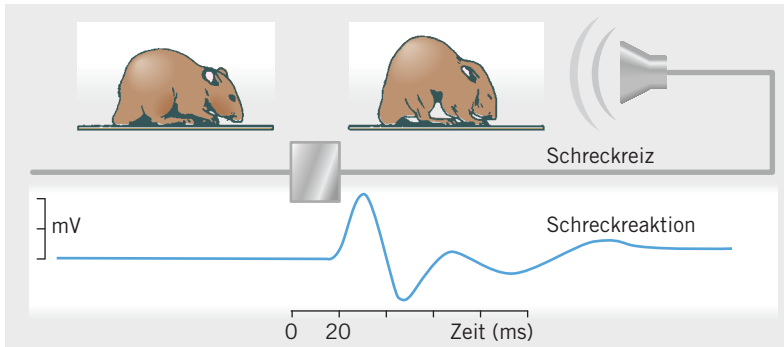
Vor nunmehr fünf Jahren wurde zum ersten Mal über eine neue Untersuchungsmethode zur Tinnitusfeststellung berichtet, die auf einer Reflexreaktion beruht und die damit einfacher und zeiteffizienter durchzuführen ist. Dafür

wird das Versuchstier in einen schallisolierten Kasten gesetzt und durch das Vorspielen von kurzen und vor allem lauten Geräuschen erschreckt. Ähnlich wie bei einem unvermuteten Gewehrschuss führt dieser akustische Reiz zu einem Zusammenzucken. Bei unseren Versuchstieren, den Mongolischen Wüstenrennmäusen, äußert sich das Erschrecken in einer Kontraktion der Gesichts-, Nacken- und Skelettmuskulatur. ■ Da die Tiere auf einer bewegungssensitiven Platte sitzen, kann man die Intensität der Schreckreaktion messen. Abgeschwächt wird die Schreckreaktion, wenn dem lauten Ton ein kurzer leiser Ton vorangeht, der die Aufmerksamkeit des Versuchstiers weckt. Dies entspricht der Situation, in der vor dem Gewehrschuss ein verdächtiges Knacken im Gebüsch zu hören ist. Den gleichen Effekt

einer verringerten Schreckreaktion erzielt man, wenn man die ganze Zeit über ein leises Hintergrundrauschen spielt und dann, anstatt des Knackens, eine kurze Lücke im Rauschen einbaut. Dieser Ansatz wird nun seit Neuestem genutzt, um Tinnitus im Tier nachzuweisen. Wenn das Versuchstier einen Tinnitus hat, füllt dieses Phantomgeräusch die Lücke im Hintergrundrauschen aus, so dass die Schreckreaktion unvermindert hoch bleibt. So können wir Tiere, die durch

Wandernde Schallwellen im Heuschrecken-Bein

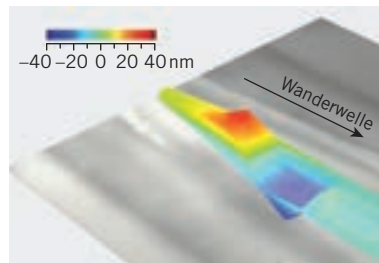
Da aufgrund der schlechten anatomischen Zugänglichkeit direkte Untersuchungen am Innenohr von Säugetieren schwierig sind, arbeiten wir für die Grundlagenforschung mit Laubheuschrecken. Die Laubheuschrecken stammen ursprünglich aus Malaysia und haben ihre Ohren gut zugänglich in den Vorderbeinen. **2** Trotz offensichtlicher Unterschiede zwischen Menschen und Heuschre-



1 Ein kurzer, aber lauter Ton führt zum Erschrecken des Tieres. Die Stärke der Reaktion wird über eine bewegungssensitive Platte gemessen, auf der das Versuchstier sitzt.

Schädigungen im Innenohr an Tinnitus leiden, ohne vorheriges Verhaltenstraining identifizieren.

Das langfristige Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Therapieansätzen. Doch dazu muss zuerst geklärt werden, wie und warum Tinnitus entsteht. In einem ersten Versuchsansatz haben wir deshalb getestet, wie sich eine akustische Überstimulation, vergleichbar mit einer Stunde Discobesuch, auf das Innenohr auswirkt, und welche Tiere danach einen Tinnitus entwickeln. Das Augenmerk richtete sich dabei auch auf den Eindruck, den das Phantomgeräusch bei den Tieren erzeugt, das heißt, in welcher Tonhöhe und Lautstärke sie den Tinnitus empfinden. Dies konnten wir erfolgreich überprüfen, indem wir das Hintergrundrauschen in Tonhöhe und Schalldruckpegel variierten. Hier greift das Prinzip: Je mehr das Hintergrundrauschen den Eigenschaften des Phantomgeräusches ähnelt, umso weniger wird die Schreckreaktion durch die Lücke im Hintergrundrauschen abgeschwächt. Da nicht alle Tiere einen Tinnitus entwickelt haben, überprüfen wir aktuell, welche Veränderungen im Innenohr durch akustische Überstimulation zustande kommen.



3 Das Vorspielen eines Tones erzeugt eine wandernde Welle entlang des Ohres, wobei unterschiedliche Tonhöhen zu einer Veränderung in der Position des Maximums der Wanderwelle führen. Das ermöglicht es den Tieren, verschiedene Tonhöhen zu unterscheiden.

cken ergaben erste Untersuchungen verblüffende Ähnlichkeiten in der Schallverarbeitung. Damit die Nervenzellen akustische Reize verarbeiten können, müssen die Schallwellen im Ohr von Mensch und Insekt erst in eine Bewegung und dann in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Diese Leistung vollbringen spezialisierte Sinneszellen im Innenohr.

Vergleichbar mit den Tasten eines Klaviers reihen sich sowohl bei Säugetieren als auch bei Laubheuschrecken die Sinneszellen im Hörorgan nacheinander auf. Jede dieser Zellen ist dabei für die Wahrnehmung einer ganz bestimmten Tonhöhe verantwortlich.

Hohe Töne werden an dem einen und tiefe an dem anderen Ende der Klaviatur verarbeitet. Dieses Phänomen wird »Ortsprinzip« genannt. Aber wie werden die Sinneszellen angeregt? Erste Theorien hierzu wurden bereits vor über 100 Jahren formuliert, erwiesen sich aber im Nachhinein als nicht zutreffend. Unser heutiges Wissen beruht auf den Untersuchungen des ungarisch-amerikanischen Biophysikers Georg von Békésy. Er fand das Phänomen der Schallausbreitung durch Wanderwellen, als er menschliche Leichen untersuchte. Für seine Arbeiten erhielt er 1961 den Nobelpreis für Medizin. Anders als bei einer schwingenden Klavierseite, die sich auf der Stelle auf und ab bewegt, breiten sich die Berge und Täler von Wanderwellen entlang einer schwingfähigen Membran in der Hörschnecke aus. Die Frequenzzерlegung wird dadurch möglich, dass die Membran graduell unterschiedliche Eigenschaften hat, welche sie an unterschiedlichen Stellen zum

2 Die tropische Laubheuschrecke, *Mecopoda elongata*, dient als Untersuchungstier für die Erforschung der Wahrnehmung von Schallwellen im Innenohr. Neben ihrer Größe war besonders der einfache Zugang der Ohren (Pfeil) in den Vorderbeinen der Tiere entscheidend für die Wahl des zu untersuchenden Tieres.

Literatur

von Békésy, G. (1960) <i>Experiments in Hearing</i> New York, McGraw-Hill.	Neurobiology (59): 107–128.	<i>poda elongata</i> , <i>Tettigoniidae</i> tympanum J. Comp. Physiol. A. 196: 939–945.
Hummel, J., Kössl, M., Nowotny, M. (2011) <i>Sound-induced tympanic membrane motion in bushcrickets and its relation to the sensory output</i> J. Ex. Bio. 214: 3596–3604.	Nowotny, M., Remus, M., Kössl, M., Gaese, B.H. (2011) <i>Characterization of the Perceived Sound of Trauma-Induced Tinnitus in Gerbils</i> J. Acoust. Soc. Am. In press.	Yang, G., Lobariñas, E., Zhang, L., Turner, J., Stolzberg, D., Salvi, R., Sun, W. (2007) <i>Salicylate induced tinnitus: behavioral measures and neural activity in auditory cortex of awake rats</i> Hear. Res. 226(1–2): 244–253.
Koch, M. (1999) <i>The neurobiology of startle</i> Progress in	Nowotny, M., Hummel, J., Weber, M., Möckel, D., Kössl, M. (2010) <i>Acoustic-induced motion of the bushcricket (Meco-</i>	



Sie wollen verstehen, wie das Hören funktioniert: Arun Palghat Udayashankar, Master Neuroscience, Diplom-Biologin Doreen Möckel, Diplom-Biologin Jennifer Hummel und Gruppenleiterin Dr. Manuela Nowotny.

Schwingen bringt. Die weicheren Abschnitte im Innenohr werden von tiefen Tönen in Schwingung versetzt, während die steiferen Abschnitte auf die hohen Töne reagieren. Man könnte meinen, damit wäre bereits alles untersucht, aber bedingt durch die schwer zugängliche Lage des Innenohres im Säugetier sind diese Wanderwellen im lebenden Säugetier nur sporadisch nachweisbar.

Erste Untersuchungen im Ohr der Laubheuschrecken zeigten nun überraschenderweise, dass diese Insekten auch Wanderwellen benutzen, um die Tonhöhe einer Schallwelle zu erfassen. Die Sinneszellen bei Laubheuschrecken liegen auf einer luftgefüllten Röhre, der sogenannten akustischen Trachee, die durch die Vorderbeine der Tiere

5 Fragen an die Nachwuchsforscherin



Dr. Manuela Nowotny, 35, MainCampus »educator«-Stipendiatin (2008–2010)
 Institut für Zellbiologie und Neurowissenschaften
nowotny@bio.uni-frankfurt.de
www.uni-frankfurt.de/fb/fb15/institute/inst-2-zellb-neuro/AK-Koessl/

1. Wann begannen Sie sich für Ihr Fachgebiet zu interessieren? Gab es prägende Ereignisse oder Vorbilder?

Sinnesphysiologie fand ich eigentlich schon immer spannend. Schon im Studium war ich begeistert von der Frage, wie wir Umweltreize in für uns verwertbare Informationen umwandeln. Damals drängte mich aber noch eine andere Frage viel mehr: Wo kommen wir her? Ich habe mich daher während meines Studiums mehr mit Paläontologie und Zoologie auseinandergesetzt. Erst in der Doktorarbeit fand ich zum Thema Reizverarbeitung zurück und habe angefangen, in der Hörforschung zu arbeiten. Seitdem bin ich begeisterte Hörforscherin.

2. Welche Stationen Ihrer wissenschaftlichen Laufbahn waren für Sie die wichtigsten?

Die Grundlagen meiner Begeisterung für die Wissenschaft an sich wurden schon früh im Studium gelegt. Vor allem das Fördern und Fordern während meines Hauptstudiums an der Friedrich-Schiller-Universität Jena durch Prof. Dr. Martin Fischer hat mich sehr geprägt. In einem inspirierenden Umfeld war es mir möglich, ein selbstständiges und kritisches Denken, weit weg von dem üblichen Auswendiglernen, zu entwickeln. Dafür bin ich ihm und seiner Arbeitsgruppe bis heute noch sehr dankbar.

3. In welchen Augenblicken fühlen Sie sich als Wissenschaftlerin am glücklichsten?

Als Wissenschaftler treiben einen immer Fragen, die man beantworten möchte, und Phänomene, die man verstehen will, an. Gelingt die Beantwortung und wächst die Einsicht in ein Phänomen, ist dies natürlich befriedigend. Richtig glücklich bin ich dann, wenn die eigene Arbeit auch durch andere Wissenschaftler anerkannt wird. Dies kann geschehen durch positive Gutachten für Veröffentlichungen oder auch positives Feedback auf Tagungen.

4. Wer oder was hilft, wenn bei der Arbeit Schwierigkeiten auftreten?

In unserer Arbeitsgruppe herrscht ein sehr offenes und produktives Arbeitsklima. Jeder hilft mit, wenn Schwierigkeiten auftreten. Kompetenz gepaart mit Freundlichkeit bei den Kollegen ergibt die perfekte Arbeitsatmosphäre. Kommunikation ist dabei der Schlüssel.

5. Was tun Sie, wenn Sie eine Pause von der Wissenschaft brauchen?

Ich glaube, ich hatte noch nie das Gefühl, eine Pause von der Wissenschaft zu brauchen. Man macht ja genau das, was einen selber interessiert. Bedingt durch meine Familie, meinen Mann und vierjährigen Sohn, habe ich regelmäßig auch andere Dinge im Kopf als meine Forschung. Und die Tatsache, dass wir im Dezember unseren zweiten Sohn erwarten, wird den Familienteil meines Lebens in den nächsten Monaten noch verstärken.