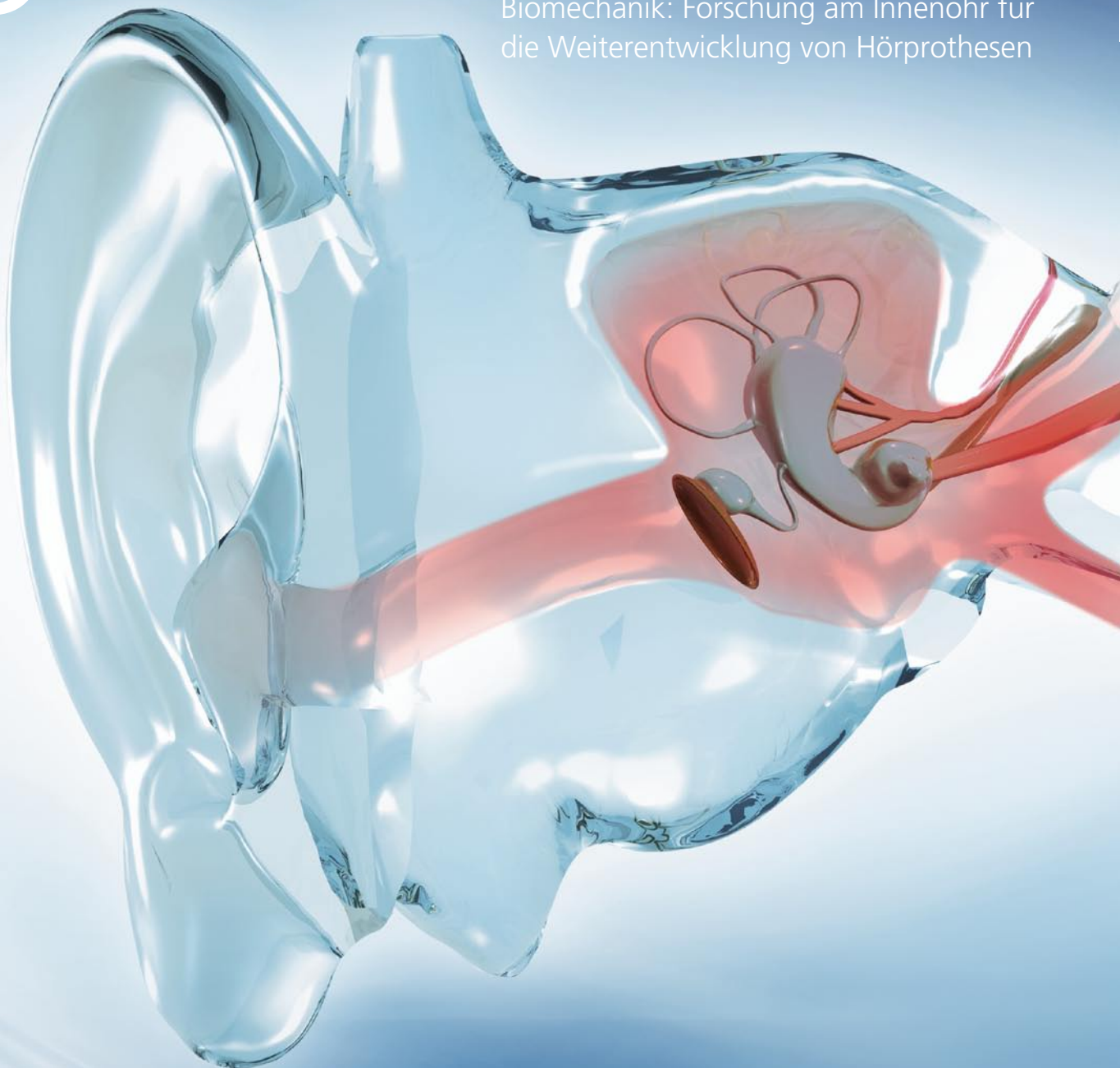


# Schon gehört?

Biomechanik: Forschung am Innenohr für  
die Weiterentwicklung von Hörprothesen



Die Fähigkeit zu kommunizieren ist ein elementarer Bestandteil unseres Lebens. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist das uneingeschränkte Hörvermögen. Forscher arbeiten daher ständig an der Optimierung hörverbessernder Prothesen. An der Universität Stuttgart konnte nun ein neuer Ansatz für die Weiterentwicklung von Mittelohrprothesen erforscht werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Auswirkungen der Gehörknöchelchenkette im Mittelohr, die das Hören unmittelbar beeinflussen.



#### Wie wir hören

Das Hörorgan hat die Aufgabe, Luftdruckänderungen in neuronale Impulse umzuwandeln und so dem Gehirn zugänglich zu machen. Dies geschieht über eine komplexe Kette funktional ineinandergreifender Elemente. Einfach gesagt gelangen Schallwellen als Druckschwankungen der Luft in den Gehörgang und verursachen im Mittelohr eine Bewegung der Gehörknöchelchen, also von Hammer, Amboss und Steigbügel. Der Steigbügel grenzt mit seiner Fußplatte an das Innenohr. Hinter dieser befindet sich die Innenohrflüssigkeit, die das Gleichgewichtsorgan und die Hörschnecke ausfüllt. Durch die Bewegung der Steigbügel Fußplatte wird die Flüssigkeit des Innenohrs bewegt, was schließlich die Haarsinneszellen reizt. Durch deren Deformation werden elektrische Signale erzeugt, die über den Hörnerv ins Gehirn geleitet werden und den eigentlichen Höreindruck hervorrufen.

#### Auswirkungen der Kippbewegungen auf das Hören

Für die Prothesenweiterentwicklung will das Forscherteam der Universität Stuttgart herausfinden, in welcher Art und Weise die Gehörknöchelchenkette stimuliert werden muss, damit der Mensch möglichst gut hört.

Der Steigbügel führt kolbenartige und kippende Bewegungen aus, die stark von der Frequenz abhängen:

- Im niederfrequenten Bereich kommt es hauptsächlich zu einer Kolbenbewegung.
- Im hochfrequenten Bereich kommen zusätzliche Kippbewegungen hinzu.

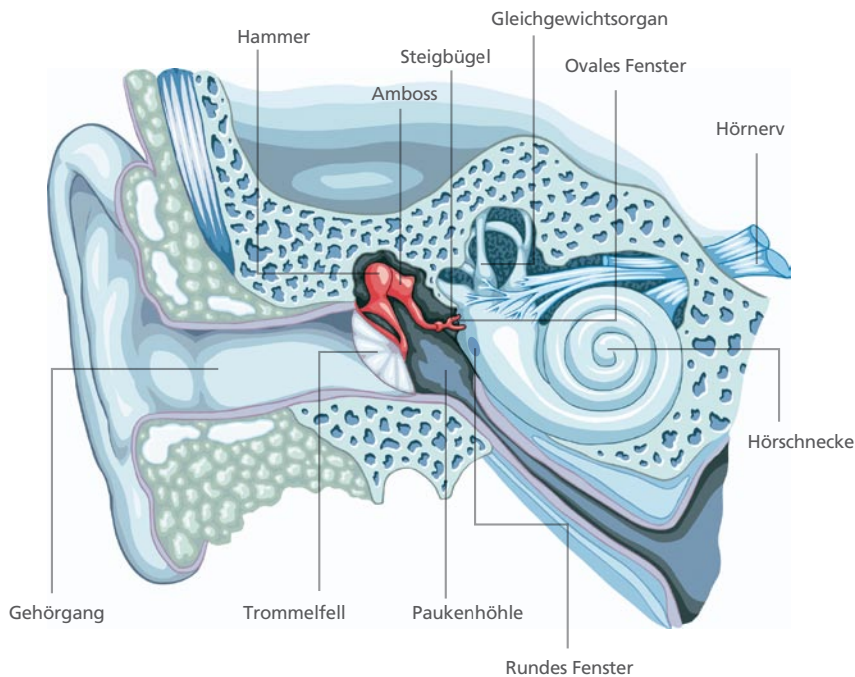
#### Auswirkungen der Kippbewegungen erforschen

Die klassische These des Hörens besagt, dass lediglich die kolbenartige Bewegung der Steigbügel Fußplatte das Hören unmittelbar beeinflusst, nicht jedoch die kippende. Ziel der Forschergruppe an der Universität Stuttgart und am Universitätsspital Zürich ist es, herauszufinden, ob und inwieweit auch die Kippbewegungen die Haarzellen reizen und Signale an das Gehirn auslösen und somit ein Höreindruck entsteht. Dazu werden In-vivo-Versuche an Meerschweinchen durchgeführt.

#### Versuchsaufbau mit moderner Mikrosystemtechnik

Der Versuchsaufbau besteht aus

- dem Narkose- und Überwachungsgerät für das Versuchstier,
- dem schwingungsgedämpften Versuchsstand in einer vor akustischen Nebengeräuschen und elektromagnetischer Einstrahlung isolierten Kabine,
- der Apparatur zur mechanischen Steigbügelregung mit einem piezoelektrischen Aktor, sowie



Anatomie des menschlichen Gehörs.

und die Überwachung des Narkosezustandes des Versuchstiers wurden von PD Dr. med. Alexander Huber vom Universitätsspital Zürich ausgeführt.

### Mechanische Reizung des Gehörs

Im Unterschied zur akustischen Erregung über einen Lautsprecher bietet die mechanische Anregung des isolierten Steigbügels am Steigbügelkopf die Möglichkeit, die Bewegungsform der Steigbügel Fußplatte vorzugeben. Der Aktor mit seinen drei unabhängigen Piezoaktoren kann dann jede beliebige räumliche komplexe Bewegung ausführen. Insbesondere können so sowohl reine

„Unzureichende Messmethoden gaben Grund zu der Annahme, dass Kippbewegungen der Steigbügel Fußplatte kein Hörereignis zur Folge haben, erst durch modernste Mikrosystemtechnik ist es uns möglich, Kippbewegungen im hochfrequenten Bereich dem Hörorgan einzuprägen und zu messen.“

*Dr.-Ing. Albrecht Eiber, Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart*

- der Messgrößenerfassung der Steigbügelbewegungen und des Nervenpotentials.

„Unzureichende Messmethoden gaben Grund zu der Annahme, dass die Kippbewegungen der Steigbügel Fußplatte keine Nervenreizung zur Folge haben“, erklärt Dr. Albrecht Eiber vom Institut für Technische und Numerische Mechanik an der Universität Stuttgart. „Erst durch modernste Mikrosystemtechnik ist es uns möglich, die Kippbewegung und deren Auswirkungen im hochfrequenten Bereich überhaupt zu messen.“

Bei der Untersuchung von Schwingungen der Gehörknöchelchen im Nanometerbereich ist die Anwendung von Laser-Doppler-Vibrometern weitverbreitet. Bei diesem Versuch

werden durch den Einsatz eines 3D-Lasers die Geschwindigkeiten des Steigbügelkopfes in allen Raumrichtungen simultan erfasst und die elektrische Spannung der elektrophysiologischen Antwort vom Hörnerv des Versuchstiers über einen besonders hochohmigen Biosignalverstärker verstärkt.

### Chirurgischer Eingriff ins Mittelohr

Unter Aufrechterhaltung der Innenohrfunktion wird der Steigbügel des Versuchstieres chirurgisch freigelegt. Somit haben Aktor und Laserstrahlen direkten Zugang zum Steigbügelkopf. Die Kopplung des piezoelektrischen Aktors an den Steigbügelkopf erfolgt mit einer speziell gefertigten Nadel und feinstem Augenoperationsfaden. Diese diffizilen chirurgischen Aufgaben

kolbenförmige Bewegungen des Steigbügels als auch reine Kippbewegungen erzeugt werden. Demgegenüber steht bei der akustischen Anregung das Verhältnis von Kipp- und Kolbenbewegung des Steigbügels in einem festen frequenzabhängigen Verhältnis, das durch die Dynamik der Kette bestimmt wird. Es kann am Steigbügelkopf auch eine Bewegung aufgeprägt werden, die der akustischen Anregung entspricht. Damit lassen sich die gemessenen Nervenpotentiale mit den Ergebnissen anderer Forschungsgruppen vergleichen.

### Antriebskonzept des Aktors

Der zeitliche Verlauf der Steigbügelbewegung bestimmt den Frequenzinhalt des Signals und somit die Erregung der inneren und äußeren Haarzellen am frequenzspezifischen Ort



„Mit dem DS1005 PPC Board findet der Antrieb des Aktors statt. Durch die drei unabhängigen Piezoaktoren können die elementaren kolbenförmigen und kippenden Bewegungen des Steigbügels genau definiert und hochdynamisch angeregt werden.“

*Dipl.-Ing. Michael Lauxmann, Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart*

der Basalmembran. Der üblicherweise in der Elektrocochleographie verwendete akustische Klickreiz besitzt ein breites Frequenzspektrum. Durch die Dynamik des schwingungsfähigen Systems bei akustischer Anregung, bestehend aus Lautsprecher, Übertragungsschlauch, Ohrkanal und Mittelohr, tritt der zeitliche Verlauf der Anregung am Innenohr deutlich tiefpassgefiltert auf. Dabei wird ein kurzer hochfrequenter Klick am Schallwandler in der Bandbreite stark eingeschränkt und erfährt eine Verzögerung durch die Signallaufzeit. Dies macht es möglich, einen akustischen Klick durch die direkte Anregung am Steigbügelkopf mit einem trägeren mechanischen Antriebssystem nachzustellen.

Die für das Experiment notwendigen Anregungsformen lassen sich mit der modularen Hardware von dSPACE optimal erzeugen. „Mit dem dSPACE DS1005 PPC Board findet der Antrieb des Aktors statt“, erklärt Dipl.-Ing. Michael Lauxmann, ebenfalls vom Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart. „Wir rechnen unter Berücksichtigung der Dynamik der Gehörknöchelchenkette und des Aktors im Vorfeld aus, wie wir den Aktor betreiben müssen, damit wir die gewollte Anregung am Steigbügelkopf erhalten. Zur Identifikation der Systemdynamik nutzen wir ein Multisignal.“

#### Aufnahme der Nervenpotentiale

Die Messung erfolgt durch einen Verstärker mit hochohmigem Eingang und großem Verstärkungsfaktor. Im Signal der Reizantwort ist jedoch ein hoher Störanteil resultierend aus Ver-

suchsumgebung und Grundaktivität der Nerven enthalten. Daher wird eine Vielzahl an Reizantworten aufgezeichnet und durch Mittelung die unkorrelierten Störanteile verringert. Klicks werden hierzu in Abständen von beispielsweise 50 ms ausgegeben. Um konsistente Messdaten zu erhalten, müssen sowohl der physische Zustand des Versuchstiers als auch die Position der Elektroden wie bei einer realen Operation überwacht werden und sollten möglichst konstant bleiben.

#### Folgen der Kippbewegungen der Steigbügelfußplatte

Durch das Einprägen von elementaren kolbenförmigen Bewegungen und elementaren Kippbewegungen kon-

nen die aus der Elektrocochleographie bekannten Nervenpotentiale nachgewiesen werden. Bei den Versuchen wurde erstmalig gezeigt, dass auch die Kippbewegungen im Gegensatz zum bisherigen Wissen einen Nervenreiz auslösen. Die Antwort der Sinneszellen auf Kippbewegungen stimmt in Form und Latenzzeitverschiebung abhängig von der Intensität des Stimulus mit der Antwort der Nerven überein, wie sie bisher nur bei kolbenförmigen Bewegungen beobachtet wurde.

#### Anregung und Datenaufnahme mit der dSPACE AutoBox

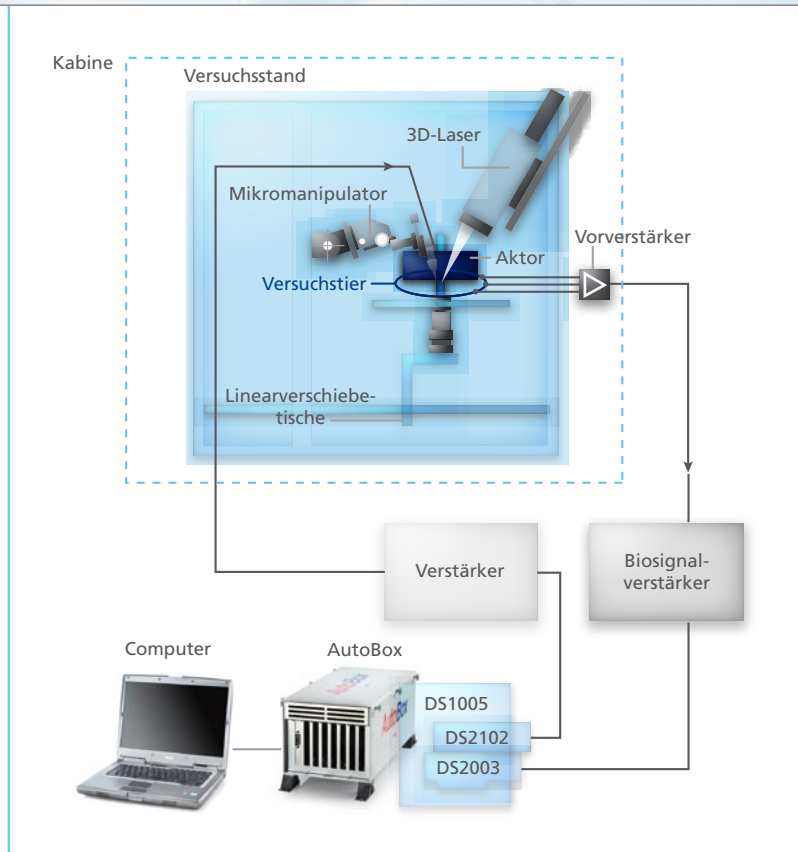
Für den Betrieb des Versuchstandes und die Auswertung steht die dSPACE AutoBox zur Verfügung.

*Dr.-Ing. Albrecht Eiber (rechts) und Dipl.-Ing. Michael Lauxmann (links), Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart.*



„Aufgrund der guten Erfahrungen mit dSPACE beim Betrieb von Versuchsständen im mechatronischen Bereich haben wir uns bei den biomechanischen Experimenten ebenfalls für dSPACE entschieden“, berichtet der Forschungsbeauftragte Dr. Albrecht Eiber. Dazu gehört das DS1005 PPC Board, auf dem das Messprogramm in Echtzeit läuft. Weitere modulare Hardwarekomponenten von dSPACE wie das DS2102 High-Resolution D/A Board sorgen für die analoge Ausgabe von Größen des Messprogramms und das DS2003 Multi-Channel A/D Board übernimmt das Einlesen analoger Signale.

Der modulare Aufbau des dSPACE-Systems und die hohe Flexibilität im Einsatz ermöglichen es, die Messum-



Komponenten und Signalfluss des Versuchsaufbaus.

„Aufgrund der guten Erfahrungen mit dSPACE beim Betrieb von Versuchsständen im mechatronischen Bereich haben wir uns bei den biomechanischen Experimenten ebenfalls für dSPACE entschieden.“

Dr.-Ing. Albrecht Eiber, Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart

## Glossar

**Basilarmembran** – Membran in der Hörschnecke, deren Bewegungen über die Haarsinneszellen in Nervensignale umgewandelt werden. Diese werden über den Hörnerv ans Gehirn geleitet und erzeugen dort den eigentlichen Höreindruck.

**Elektrocochleographie** – Untersuchungsmethode der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde zur Messung von Potentialen, die als Antwort auf akustische Reize innerhalb der Hörschnecke erzeugt werden.

**Kurze und lange Achse** – Der Steigbügel hat zwei charakteristische Bügel, die von der Fußplatte ausgehen und am Steigbügelkopf zusammen treffen. Die Fußplatte hat eine ovale Form und weist somit eine kurze und eine lange Achse auf.

gebung schnell und optimal an verschiedenste Fragestellungen aus der Biomechanik anzupassen“, so der Forscher weiter. Die Bedienung des Messprogramms auf dem Echtzeitrechner erfolgt über die dSPACE-Experimentiersoftware ControlDesk. Automatisiert und beschleunigt wird die Versuchsdurchführung durch MATLAB 2008a, zudem stellt dSPACE mit der Bibliothek MLib Funktionen zur Verfügung, mit denen ein Datentransfer zwischen dem Messrechner und dem Arbeitsspeicher von MATLAB erfolgen kann.

Nach der Versuchsdurchführung werden die Daten nach MATLAB übertragen, wodurch die Zeit

zwischen zwei Messzyklen minimiert wird, da die Anzahl der manuellen Schritte reduziert ist und die Dokumentation von Parametern der Versuchseinstellung entfällt. Der automatisierte Messablauf baut sich folgendermaßen auf:

- Eingabe der Anregung in ControlDesk
- Start der Messprozedur aus der Kommandozeile in MATLAB
- Speichern der Messdaten und Kontrolle der Messung in MATLAB

### Positive Messergebnisse mit weiterem Forschungsbedarf

Die gesammelten Daten stellen die These in Frage, dass lediglich die kolbenförmige Bewegung des Steigbügels, nicht aber die kippende das Hören bewirkt. Die Ergebnisse vermitteln, dass eine komplexe Bewegungsstruktur der Steigbügelfußplatte zu einer Aktivierung des Innenohrs und somit zu einem Hörereignis führt – und zwar sowohl die kolbenförmige als auch die kippenden Bewegungen der Steigbügelfußplatte. Zur statistischen Auswertung

Die Verbindung zwischen Aktornadel und Steigbügel wird durch einen Faden hergestellt.



der Versuche müssen weitere Versuchstiere untersucht werden. Sollten weitere Untersuchungen beweisen, dass die Kippbewegungen des Steigbügels ebenfalls einen Hörreiz auslösen, wird dies die Zielsetzungen bei der Weiterentwicklung von Mittelohrprothesen nachhaltig prägen. Die Bewertung eines

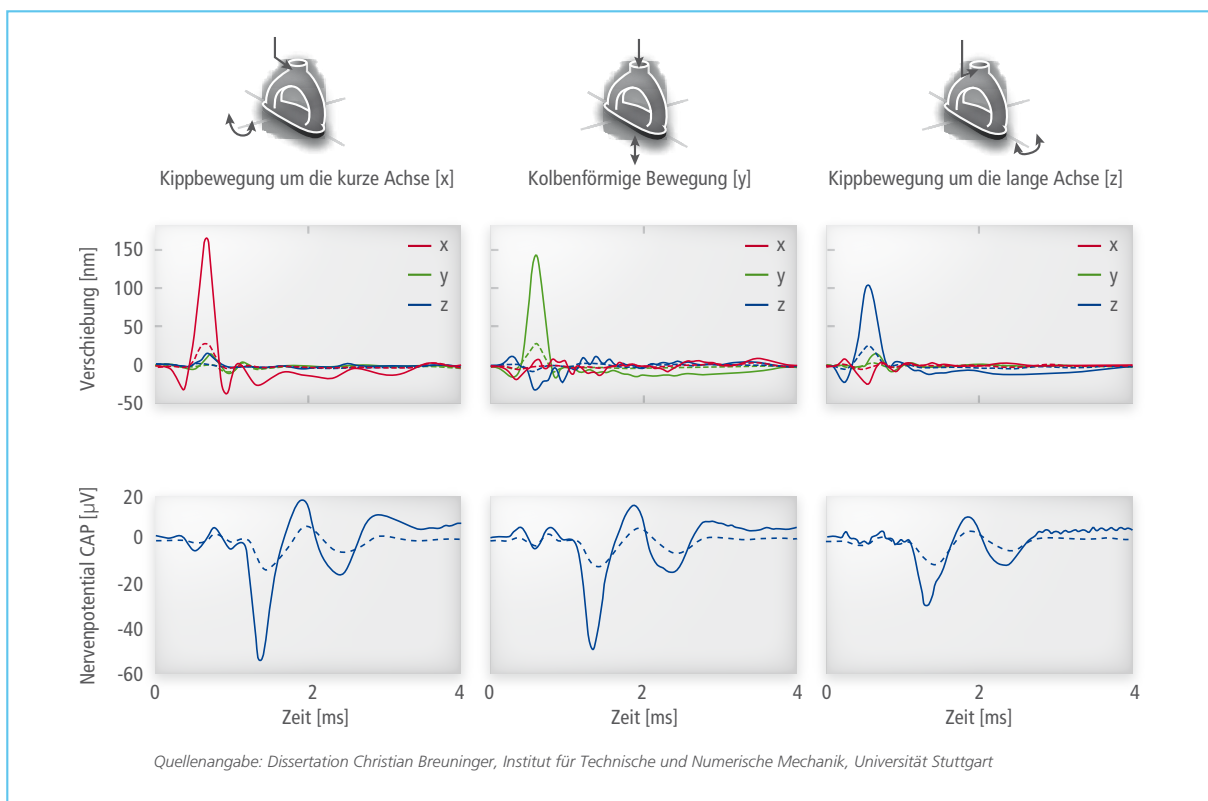
Implantats ließe sich dann nicht mehr ausschließlich anhand der mit dem Implantat erzeugten kolbenförmigen Steigbügelbewegung festmachen, sondern die komplexe räumliche Steigbügelbewegung müsste der neue Maßstab zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Implantats werden. ■

„Der modulare Aufbau des dSPACE-Systems und die hohe Flexibilität im Einsatz ermöglichen es, die Messumgebung optimal an verschiedenste Fragestellungen aus der Biomechanik anzupassen.“

Dr.-Ing. Albrecht Eiber, Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart

## Fazit

- Ein Forscherteam der Universität Stuttgart liefert entscheidende Ergebnisse für die Weiterentwicklung von hörverbessernden Mittelohrprothesen.
- Untersucht wird, ob Kippbewegungen des Steigbügels im Mittelohr einen Hörreiz auslösen.
- Mit den dSPACE-Produkten lassen sich komplexe Fragestellungen aus der Biomechanik beantworten.
- Der modulare Aufbau und die flexiblen Einsatzmöglichkeiten des dSPACE-Equipments bieten ideale Forschungsvoraussetzungen.



Compound Action Potential (CAP) für kolbenförmige und kippende Bewegungen der Steigbügel Fußplatte. Die durchgängige Linie stellt eine starke Anregung dar, die gestrichelte Linie eine weniger starke Anregung.