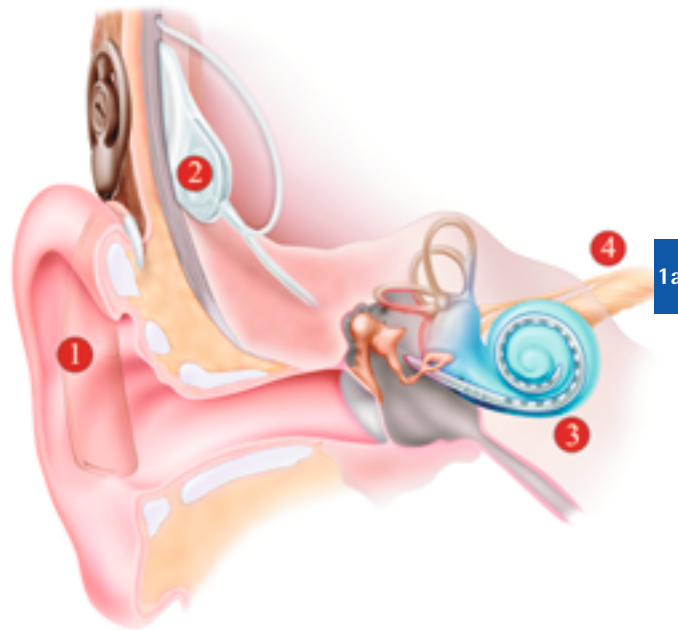


Hoffnung für Schwerhörige

COMPUTER- UND ROBOTERASSISTIERT E INSERTION VON COCHLEA-IMPLANTATEN

Cochlea-Implantate sind Innenohr hörprothesen, die tauben Menschen durch direkte elektrische Stimulation des Hörnervs einen Höreindruck vermitteln. Wissenschaftler des Instituts für Mechatronische Systeme der Leibniz Universität Hannover sowie der Klinik- und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde der Medizinischen Hochschule Hannover berichten über einen neuartigen computer- und roboterassistierten Ansatz zur Insertion solcher Cochlea-Implantate.



Hintergrund

Die bislang einzig wirksame Behandlung von hochgradiger Schwerhörigkeit oder Taubheit besteht in der Implantation eines Cochlea-Implantates (CI)*. Der Schall wird dabei durch ein externes Mikrofon aufgenommen und aufbereitet. Im Anschluss wird dieser in Form elektrischer Impulse an ein in die Hörschnecke (Cochlea) eingebrachtes Implantat weitergeleitet. Dadurch wird der Hörnerv unter Umgehung des natürlichen Schallweges direkt elektrisch stimuliert (Abbildung 1). Patienten mit Schädigungen der Hörsinneszellen, so genannter Innenohrschwerhörigkeit oder -taubheit, kann somit ein Höreindruck vermittelt werden.

Bei der Implantation eines CI ist insbesondere die Bereitstellung des Zugangs zur Cochlea aufgrund der räumlichen Nähe zu funktionellen anatomischen Strukturen wie dem Gesichts- und Geschmacksnerv ein zeitaufwendiger und risikoreicher Operationsschritt. Zudem birgt die Gefahr der Schädigung sensibler Membran-Strukturen innerhalb der Hörschnecke beim Einbringen des Implantates ein nicht zu vernachlässigendes Risiko einer Ertaubung während der Operation. Diese führt zum Verlust eines unter Umständen noch bestehenden Resthörvermögens des Patienten. Daher werden Cochlea-Implantate bisher lediglich bei bereits nahezu vollständig erlaubten Patienten einge-

setzt. Da der allein durch ein CI künstlich vermittelbare Höreindruck qualitativ stark eingeschränkt ist, ist man zunehmend bemüht, Patienten mit vorhandenem Resthörver-



mögen sowohl mit einem Cochlea-Implantat als auch mit konventionellen Hörgeräten gleichzeitig zu versorgen.

Um den Anforderungen einer möglichst schädigungsfreien Versorgung gerecht zu werden, wird in einer engen Kooperation zwischen der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde (HNO) der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) sowie dem Institut für Mechatronische Systeme (imes) der Leibniz Universität Hannover (LUH) ein dreistufiges minimal-invasives Insertionskonzept entwickelt.

Zunächst erfolgt in einem ersten Schritt eine auf computer-tomographischen Aufnahmen basierende computergestützte Planung des optimalen Zugangsweges zur Hörschnecke, so dass anatomische Risiko-

* siehe auch den Beitrag »Das bionische Ohr«, ebenfalls in dieser Ausgabe

strukturen wie Gesichts- und Geschmacksnerv bestmöglich geschont werden. In einem zweiten Schritt erfolgt die Umsetzung der patientenindividuellen Planung mittels Roboter, wobei ein hochgenauer stichkanalartiger Zugang von weniger als zwei Millimetern Durchmesser zur Cochlea gebohrt wird. Die Herausforderung liegt hier insbesondere in der notwendigen hohen Genauigkeit von 0,5 Millimetern und besser. Eine manuelle Insertion des Implantates durch diesen kleinen Kanal ist nicht mehr möglich. Dritter Schritt ist daher die automatisierte Insertion des Elektrodenträgers mit Hilfe eines speziell entwickelten Insertionstools.

minimal-invasiven Zugangs unter Einsatz von mathematischen Optimierungsalgorithmen möglich. Die dabei zur Anwendung kommenden Kriterien sind zum einen die Einhaltung möglichst großer Sicherheitsabstände des Bohrkansals zu den umliegenden Strukturen. Zum anderen ist zur Schonung der intracochleären Strukturen ein möglichst tangentialer Zugang zur Cochlea wünschenswert (Abbildung 2c). Das entwickelte Verfahren [2] modelliert die segmentierte Cochlea patientenindividuell mittels einer 3D-Spirale. Somit kann für jeden Patienten der gewünschte tangentialer Zugang als Kriterium in den oben genannten

manuelle Bohrung dieses Kanals nicht möglich, es kommt vielmehr ein mechatronisches Assistenzsystem in Form eines Roboters (Abbildung 3) zum Einsatz. In ersten Laborversuchen kam hierfür ein typischer Vertreter der klassischen Industrieroboter (KUKA KR3) zur Anwendung. Die Lage (Position und Orientierung) des Patienten relativ zum Roboter wird dabei durch ein optisches Navigationssystem ermittelt. Derartige Systeme erlauben mittels Stereokameras eine kontinuierliche Erfassung spezieller Referenzmarker (weiße Kugeln in Abbildung 3) und somit indirekt die Bestimmung der Position und Orientierung von Objekten, an denen diese Re-

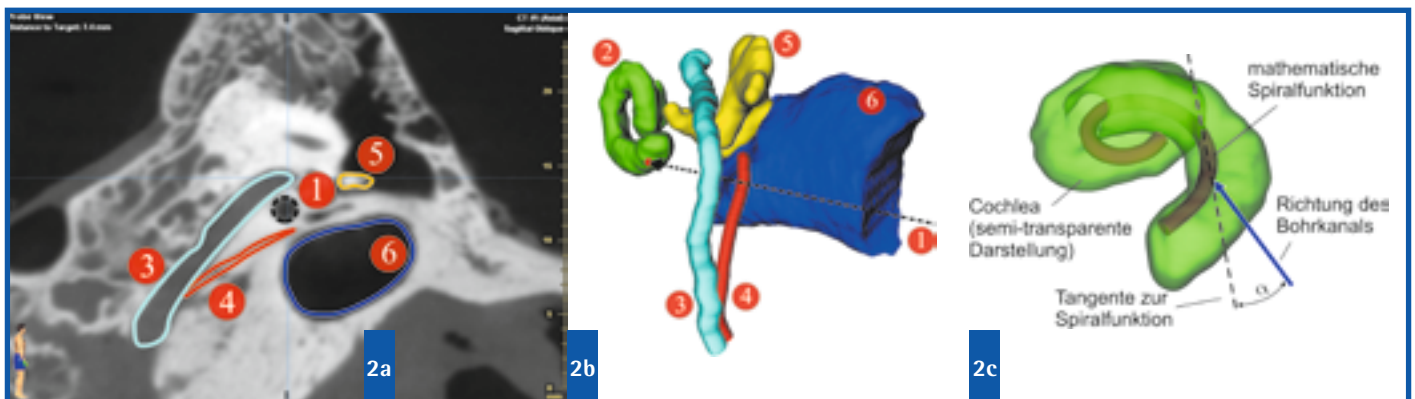
Abbildung 1 (links)
Das Cochlea-Implantat-System
Sprachprozessor (1) mit Sendespule zur Aufnahme und Kodierung des Schalls; unter der Haut eingesetzte Empfangsspule mit Implantat (2) für den Signal-Empfang und die Signal-Aufbereitung; Elektrodenträger (3) zur elektrischen Stimulation des Hörnervs (4)

a) Prinzipskizze des Cochlea-Implantat-Systems

Abbildung: mit freundlicher Genehmigung der Cochlear GmbH

b) Elektrodenträger des CI-Systems mit Streichholz als Größenreferenz

Quelle: Hals-Nasen-Ohrenklinik, Medizinische Hochschule Hannover



Patientenindividuelle Operationsplanung

Die Identifikation der relevanten und essentiellen Strukturen in präoperativ gewonnenen, hochauflösenden CT-Daten ist die Grundlage für die nachfolgende Planung eines optimalen, minimal-invasiven Zuganges zur Cochlea. Da eine manuelle Planung in den Schichtbildern der CT-Daten (Abbildung 2a) kompliziert und zeitaufwendig ist, werden die relevanten Strukturen zunächst segmentiert. Darauf aufbauend wird ein dreidimensionales Modell des Operationsgebiets erstellt (Abbildung 2b). Mit diesem Modell ist eine automatisierte Planung des

Optimierungsalgorithmus Eingang finden. In einem weiteren Teilschritt werden die Kriterien Tangentialität sowie Abstände zu den Risikostrukturen durch geeignete Gewichtungsfaktoren objektiviert und somit eine optimale, patientenindividuelle Position und Ausrichtung des Bohrkanaals bestimmt.

Roboterassistierte Bohrung des minimal-invasiven Zugangs

Der geplante Bohrkanaal weist nur geringe Abstände von typischerweise wenigen Zehntelmillimetern zu sensiblen anatomischen Strukturen auf. Aus diesem Grund ist eine

Referenzmarker angebracht sind. Auf diese Weise wird während des gesamten Bohrvorgangs die relative Lage zwischen Bohrer und Patient bestimmt.

Eine darauf aufbauende Lageregelung des Roboters ermöglicht es somit, den für den Patienten individuell geplanten, optimalen Bohrkanaal hochgenau anzulegen. Nach dem Transfer der Planungs-Koordinaten an die Steuereinheit des Roboters wird die Bohrung vollautomatisch und unter Kontrolle des optischen Navigationssystems durchgeführt [1]. Durch die präzise Führung des Instrumentes werden dabei die sensiblen anatomischen Strukturen bestmöglich geschont.

Abbildung 2
Darstellung der Schritte einer patientenindividuellen Bohrkanaalplanung

Bohrkanal (1); Cochlea (2), in Abbildung 2a nicht sichtbar; Gesichtsnerv (3); Geschmacksnerv (4); Gehörknöchelchen (5); äußerer Gehörgang (6)

a) CT-Schichtbild mit segmentierten anatomischen Strukturen

b) 3D-Modell mit Planung

c) 3D-Modell der Cochlea mit angepasstem Spiralmodell und optimalem Bohrkanaal

Quelle: Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

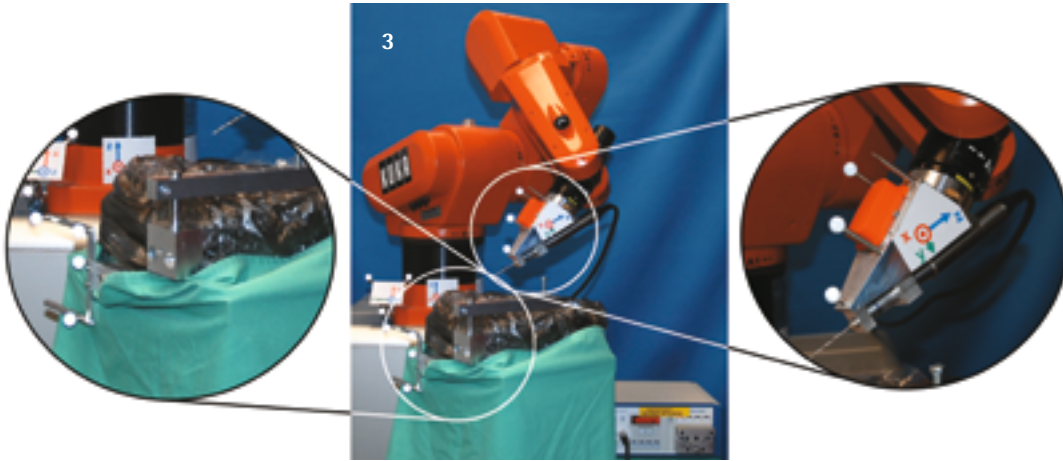


Abbildung 3
Roboterassistierte Bohrung

Die Detailaufnahmen zeigen das Präparat sowie den Bohrer jeweils mit daran angebrachten Navigationsmarkern (weiße Kugeln).
Quelle: Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

Automatisierte Insertion des Implantates

Durch den minimal-invasiven, engen Bohrkanal ist es dem Chirurgen nicht mehr möglich, den Elektrodenträger des Implantates auf herkömmliche Art manuell in die Cochlea einzusetzen. Daher wurde ein Prototyp eines automatisierten Insertionstools (Abbildung 4) zur Einbringung von Cochlea-Implantaten entwickelt [3].

Das aufgebaute Tool ist dabei zweigeteilt in einen geometrisch eng beschränkten Teil, der den Dimensionen des Bohrkanals entspricht und in diesen eingeführt werden kann, sowie einen zweiten Teil, der den Antrieb und die Sensorik umfasst und dem ersten Teil nachgelagert ist. Der erste Teil verfügt innerhalb eines dünnen Führungsrohres über miniaturisierte Greifmechanismen für den Elektrodenträger des Implantates (siehe die beiden unteren Bilder in Abbildung 4). Geeignete Antriebe erlauben es, den Elektrodenträger automatisiert aus dem Führungsrohr heraus in die Cochlea vorzuschieben und zum anderen ein eventuell vorhandenes, den Elektrodenträger während der Insertion versteifendes Stilet zeitgleich aus dem Träger zu entfernen. Das Zurückziehen dieses Stilets aus dem Elektrodenträger bewirkt dabei, dass der gekrümmt vorgefertigte

Elektrodenträger wieder in seine spiralförmige Ausgangsposition zurückkehrt und somit der Form der Cochlea folgen kann.

Die automatisierte Umsetzung des Insertionsvorgangs eröffnet die Möglichkeit, komplexe Bewegungsabläufe während der Insertion hochgenau auszuführen. Derartige Strategien sind aufgrund einer fehlenden haptischen und visuellen Rückkopplung im Rahmen einer manuellen Insertion von einem Chirurgen nicht umsetzbar. Es werden erstmals patientenindividuell geplante Insertionsvorgänge ermöglicht, wodurch eine deutliche Reduktion der auftretenden Insertionskräfte zu erwarten ist. Die Verringerung der auftretenden Insertionskräfte schont empfindliche intracochleäre Strukturen. Diese Schonung lässt einen Erhalt verbleibenden Resthörvermögens des Patienten erwarten und bietet daher die Möglichkeit einer hybriden Versorgung aus natürlichem und elektrisch stimuliertem Hörvermögen.

Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Konzept der computer- und roboterassistierten Insertion von Cochlea-Implantaten wurde von der Arbeitsgruppe in einer Vielzahl von Experimenten validiert [4, 5] und zeigt ein großes Potenzial auf, die aktuelle Operationstechnik

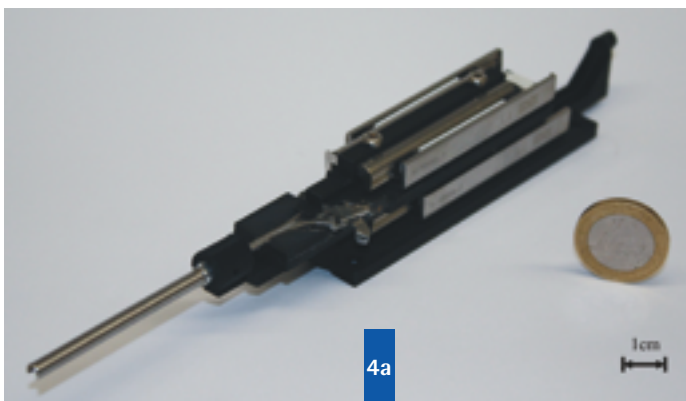
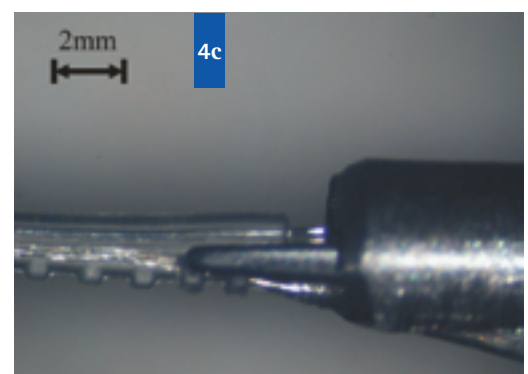
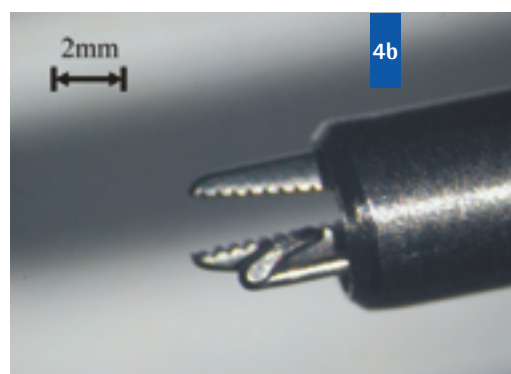


Abbildung 4
Automatisiertes Insertionstool für Cochlea-Implantate (oben)

Detailaufnahmen des Greifmechanismus (unten links) sowie eines gegriffenen Implantates (unten rechts)

Quelle: Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover





Beteiligte Wissenschaftler

Das beschriebene Projekt wird von einer Arbeitsgruppe aus Wissenschaftlern des Instituts für Mechatronische Systeme (imes) der Leibniz Universität Hannover und der Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde (HNO) der Medizinischen Hochschule Hannover bearbeitet. Neben den Autoren besteht die Arbeitsgruppe insbesondere aus:

- Dipl.-Ing. Stephan Baron (imes)
- Dipl.-Ing. Hubertus Eilers (imes)
- Prof. Dr. med. Thomas Lenarz (HNO)
- Dr. med. Martin Leinung (HNO)
- Dipl.-Ing. Thomas Rau (HNO)

Dipl.-Ing. Andreas Hussong

Jahrgang 1977, arbeitet seit 2004 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronische Systeme an der Leibniz Universität Hannover. Als Mitglied der Arbeitsgruppe Medizintechnik beschäftigt er sich schwerpunktmäßig mit Aspekten der computer- und roboterassistierten Chirurgie. Kontakt: andreas.hussong@imes.uni-hannover.de

Die Autoren vertreten die Arbeitsgruppe und präsentieren hier die Arbeiten der gesamten Gruppe.

Dr. Omid Majdani

Jahrgang 1971, ist Oberarzt an der Medizinischen Hochschule Hannover, Abteilung für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde (Direktor: Prof. Dr. Th. Lenarz), sowie seit 2004 Adjunct Assistant Professor an der Vanderbilt University Medical Center, Nashville, TN, USA. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten bildgestützte Chirurgie, minimal-invasive Zugänge zur Schädelbasis, Entwicklung von computer- und robotergestützten Operationstechniken, Optimierung und Funktionalisierung von auditiven Implantaten. Kontakt: majdani.omid@mh-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier

Jahrgang 1974, lehrt seit 2008 am Institut für Mechatronische Systeme an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Modellierung, Identifikation, Optimierung und Regelung komplexer Systeme, die sich durch eine enge funktionelle und räumliche Verzahnung elektrischer, mechanischer und informationsverarbeitender Baugruppen auszeichnen. Anwendung finden die Methoden beispielsweise in der Robotik, Medizin-, Kraftfahrzeug- sowie der Produktionstechnik. Kontakt: tobias.ortmaier@imes.uni-hannover.de

langfristig durch einen minimal-invasiven, schonenden und resthör-erhaltenden Eingriff abzulösen. Die auf CT-Bilddaten basierende Planung eines optimalen Zugangsweges ermöglicht es, gefährdete anatomische Strukturen in der Operationsregion patienten-individuell sicher zu identifizieren. Eine robotergestützte präzise Bohrung des kleinen minimal-invasiven Kanals zur Cochlea im Gegensatz zu einem aufwendig und risikobehaftet angelegten offenen Zugang bietet eine Reihe von Vorteilen. Dies sind neben der bereits erwähnten verringerten Zugangstraumatisierung beispielsweise ein geringeres Risiko von Wundinfektionen, eine verringerte Rehabilitationszeit sowie nicht zuletzt der kosmetische Aspekt kleinerer Narben. Die automatisierte

und auf die individuelle Form der Cochlea des jeweiligen Patienten angepasste Einführung des Implantates lässt eine deutliche Verringerung der Schädigung der sensiblen intracochleären Strukturen erwarten und ermöglicht somit den Erhalt des Resthörvermögens. Die vorgestellte Methode eröffnet somit auch schwerhörigen Patienten eine sichere ergänzende Versorgung mit Cochlea-Implantaten.

Literatur

- [1] Stephan Baron, Hubertus Eilers, Benjamin Munske, Jenna L. Toennies, Ramya Balachandran, Robert F. Labadie, Tobias Ortmaier, Robert J. Webster. Percutaneous Inner-Ear Access Via an Image-Guided Industrial Robot System, *Journal of Engineering in Medicine*, vol. 224 – Part H.

- [2] Hubertus Eilers, Andreas Hussong, Stephan Baron, Bodo Heimann, Thomas Rau, Martin Leinung, Thomas Lenarz, and Omid Majdani. Optimierung der Trajektorienplanung für eine minimal-invasive Cochleostomie. In *Tagungsband der 6. Jahrestagung der Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V., CURAC 2007*, pages 219–222, 2007.
- [3] Andreas Hussong, Thomas S. Rau, Tobias Ortmaier, Bodo Heimann, Thomas Lenarz, and Omid Majdani. An automated insertion tool for cochlear implants – another step towards atraumatic cochlear implant surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(2):163–171, 2010. published online 13.06.2009.

- [4] Omid Majdani, Daniel Schurzig, Andreas Hussong, Thomas Rau, Justin Wittkopf, Thomas Lenarz, and Robert Labadie. Force measurement of insertion of cochlear implant electrode arrays in vitro: comparison of surgeon to automated insertion tool. *Acta Otolaryngol*, pages 1–6, May 2009.
- [5] Thomas S. Rau, Andreas Hussong, Martin Leinung, Thomas Lenarz, and Omid Majdani. Automated insertion of pre-formed cochlear implant electrodes: evaluation of curling behaviour and insertion forces on an artificial cochlear model. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(2):173–181, 2010. published online, 10.04.2009.