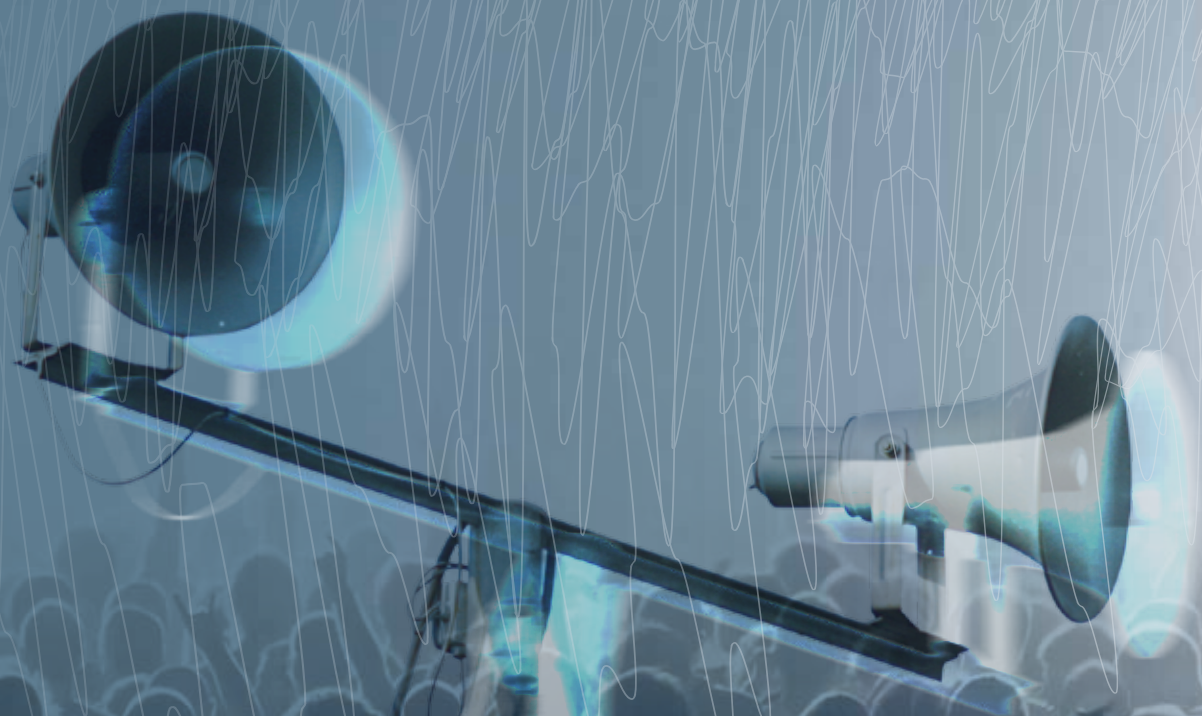


# Der neuronalen Schallverarbeitung auf der Spur

TUM Forscher Prof. Werner Hemmert und sein Team versuchen, das komplexe Zusammenspiel von Innenohr und Gehirn zu verstehen, um anhand von Computermodellen bessere Hörprothesen zu entwickeln **Spotlight on neural sound processing** TUM researcher Prof. Werner Hemmert and his team are exploring the complex interaction between the inner ear and the brain to optimize development of hearing implants with the help of computer-aided modeling



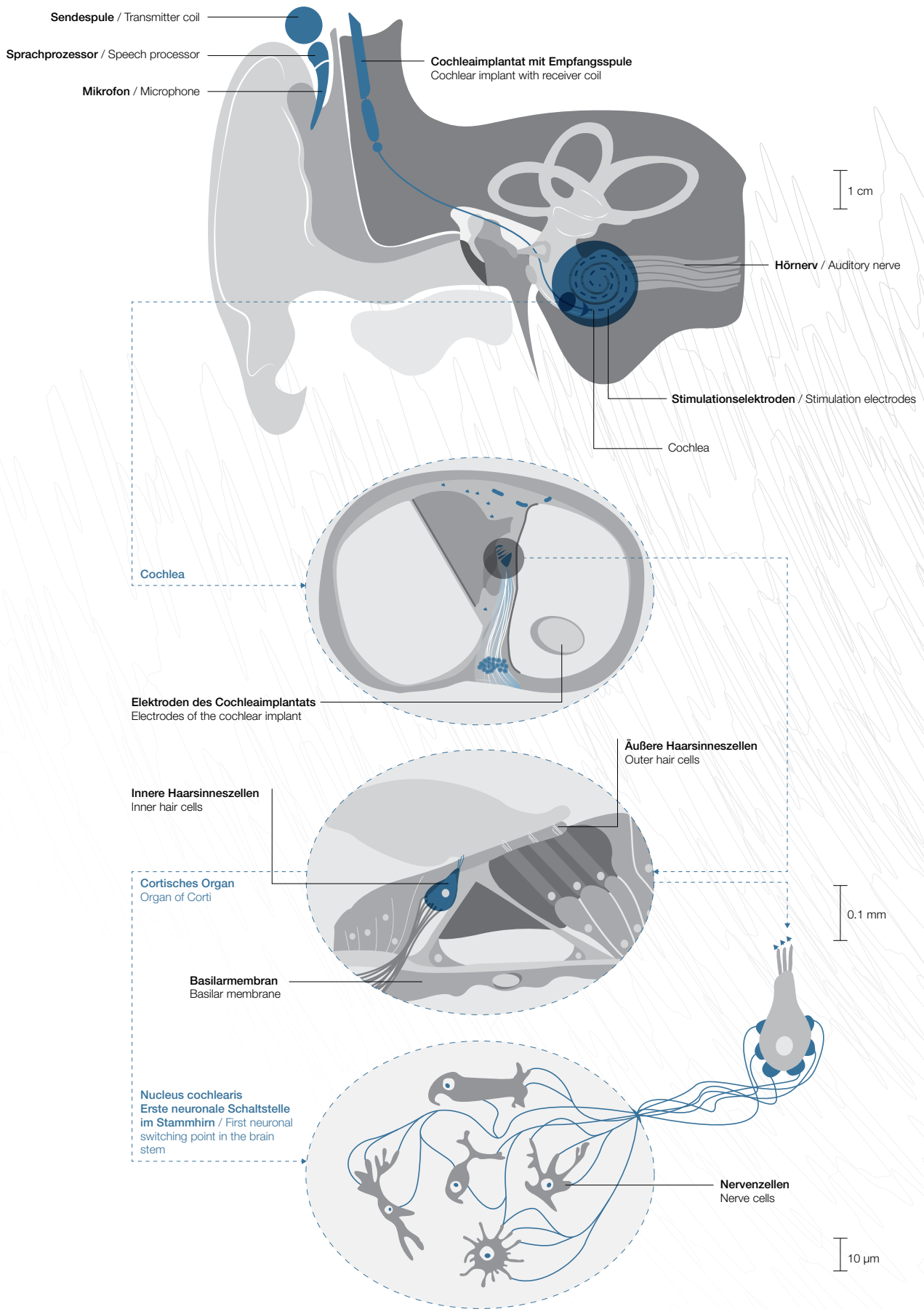
## Link

[www.bai.ei.tum.de](http://www.bai.ei.tum.de)  
[www.youtube.be/OUol3N5ymsk](https://www.youtube.be/OUol3N5ymsk) (Video deutsch)  
[www.youtube.be/JDvM72kyaas](https://www.youtube.be/JDvM72kyaas) (Video english)



Illustrationen / Illustrations: edun dsepp  
Bilder / picture credits: istockphoto.com: miappv,  
photocase.de: jala, photocase.de: MPower.





Grafik/ Graphics: edlundsepp (Quelle/Source TUM)

**Cochleaimplantat: Sprachprozessor und Mikrofon werden hinter dem Ohr getragen. Das eigentliche Implantat wird operativ unter der Haut platziert und das Elektrodenarray in die Hörschnecke eingeführt. Dort stimulieren sie direkt den auditorischen Nerv mit kurzen Stromimpulsen / Cochlear implant: Speech processor and microphone are worn externally behind the outer ear. The implanted part is surgically inserted under the skin and the electrode array is inserted into the cochlea, where the auditory nerve is stimulated directly with short current pulses**

**B**enjamin Bolz sitzt vor seinem Rechner und schaut auf die Kurven, die das Erregungsmuster des Hörnervs zeigen. Soeben hat ihm ein Kollege zugerufen, dass er in die Mittagspause geht, ob er, Benjamin, mitkommen wolle? Der angehende Biologe, der ein Großpraktikum am Zentralinstitut für Medizintechnik (IMETUM) in Garching absolviert, dreht sich um und nickt. Während die zwei jungen Männer zur Mensa gehen, unterhalten sie sich über die Fußballweltmeisterschaft und die Chancen der deutschen Nationalmannschaft, den Wettbewerb endlich einmal wieder zu gewinnen.

Für seinen Kollegen ist es ein ganz normales Gespräch, für Benjamin Bolz war der Weg dahin sehr lang. Der Student erkrankte im Alter von zwei Jahren an einer Hirnhautentzündung und ist seitdem taub. Eine Hörprothese öffnete ihm wieder das Tor zur Welt der Töne. Doch die Technik allein reicht nicht aus: Der junge Mann musste das Hören neu üben und mithilfe eines Logopäden an seiner korrekten Aussprache arbeiten. „Dass Benjamin bei uns untersucht, wie Neuronen auf elektrische Stimulation reagieren, ist ein echter Glücksfall. Denn damit trägt er maßgeblich zur Optimierung von Innenohrprothesen bei“, sagt Benjamins Chef und Leiter des Fachgebiets Bioanaloge Informationsverarbeitung (BAI) am IMETUM, Werner Hemmert.

### Eine Hörprothese für Taube

Die sogenannten Cochleaimplantate (CI) wurden vor rund 40 Jahren erstmals entwickelt. Mikrofon und Elektronik werden außen getragen. Das eigentliche Implantat wird operativ hinter dem Ohr unter der Haut eingesetzt. Ein ▶

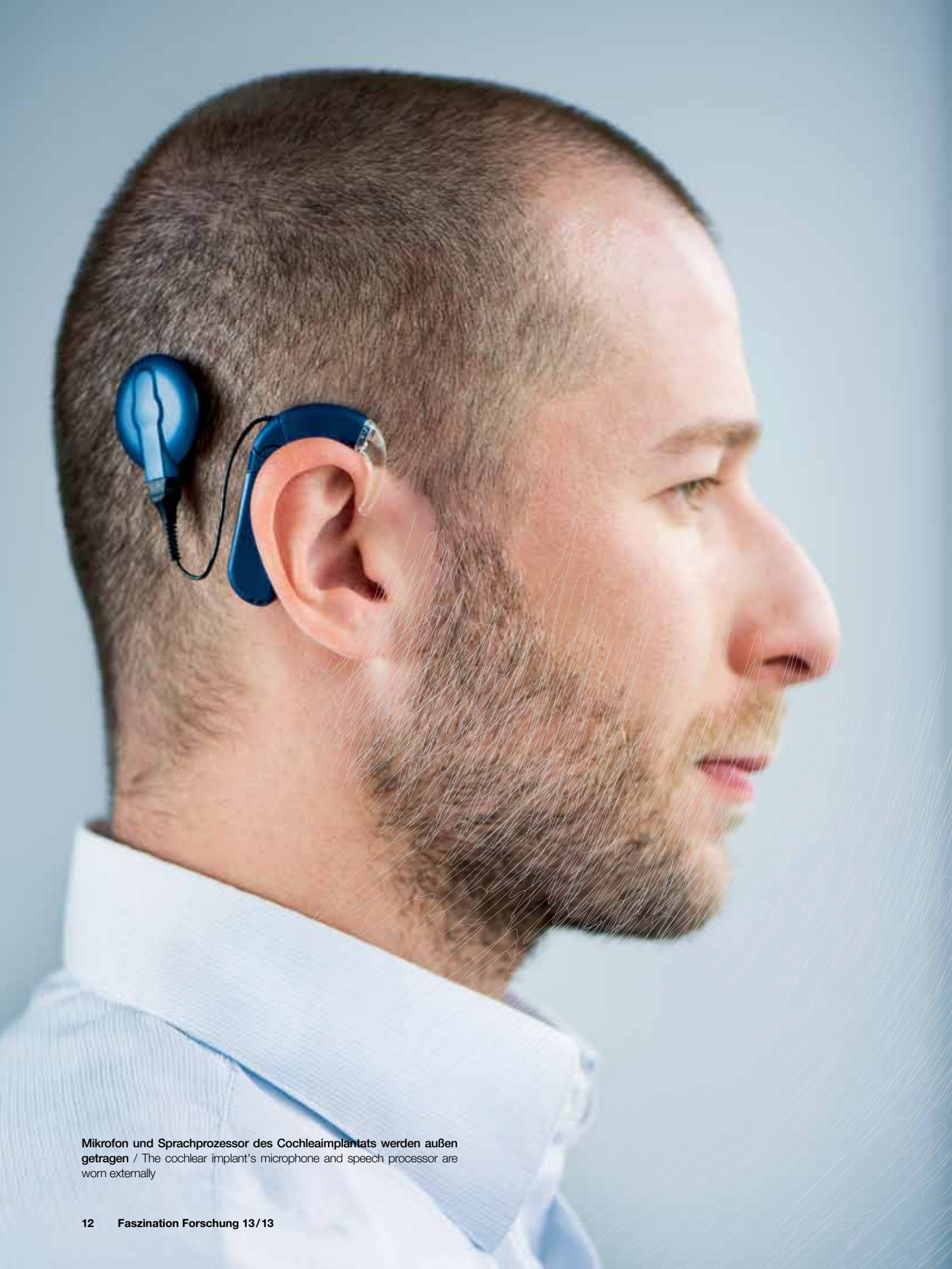
**Benjamin** Bolz is sitting in front of his computer, looking at graphs representing the stimulation patterns of the auditory nerve. A co-worker has just called over that he is going to lunch and asked whether Benjamin wants to go too. The budding biologist, who is completing a research placement at the Central Institute of Medical Engineering (IMETUM) in Garching, turns and nods. On the way to the canteen, the two young men chat about soccer and the German team's chances of finally winning the FIFA World Cup again.

To his co-worker, this is a completely normal conversation, but for Benjamin, getting to this point has been a long journey. The student contracted meningitis at the age of two and has been deaf ever since. A prosthetic hearing device gave him a window to the world of sound, but he had to come to grips with a lot more than technology. He also had to practise his hearing all over again and work with a speech therapist to correct his pronunciation. “It is a real stroke of luck that Benjamin ended up working with us. By investigating the way neurons react to electrical stimulation, he is making a significant contribution to optimizing neuroprotheses,” explains Benjamin's boss and leader of the Bio-Inspired Information Processing (BAI) group at IMETUM, Werner Hemmert.

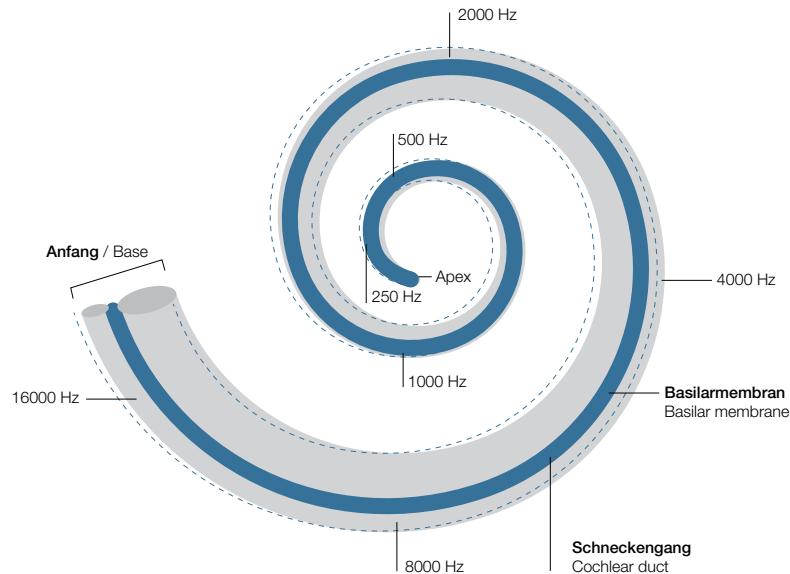
### A hearing prosthesis for deaf persons

Cochlear implants (CI) are the most successful neuroprotheses. They were developed more than forty years ago. The user wears the microphone and electronics externally, while the implant itself is surgically inserted under the skin behind the ear. A speech processor converts the incoming sounds into stimulation sequences for the auditory nerve. The ▶





Mikrofon und Sprachprozessor des Cochleaimplantats werden außen getragen / The cochlear implant's microphone and speech processor are worn externally



Die Wanderwelle breitet sich auf der Basilarmembran entlang der Windungen der Hörschnecke aus. Dabei werden die Schallsignale in ihre Frequenzkomponenten zerlegt: Hohe Töne werden am Eingang abgebildet, tiefe Töne an ihrer Spitze / The traveling wave propagates along the basilar membrane and the sound signals are decomposed into their frequency components: high-pitched sounds are reproduced near the entrance, low frequencies at the tip

Sprachprozessor berechnet aus dem eingehenden Schall die Stimmsequenzen für den Hörnerv. Die dazugehörige Sendespule übermitteln die berechneten Signale an die Elektroden des Implantats, die dann direkt die Nervenfasern reizen. Um zu verdeutlichen, wie Menschen mit CI Töne wahrnehmen, klickt Werner Hemmert auf seinem PC eine MP3-Datei an: Die Stimme klingt verzerrt, vergleichbar mit dem Klang eines Antennenradios, bei dem der Sender nicht richtig eingestellt ist. Aber eines ist klar herauszuhören: Es handelt es sich um einen Mann, der einen Text rezitiert.

### Für Sprache optimiert

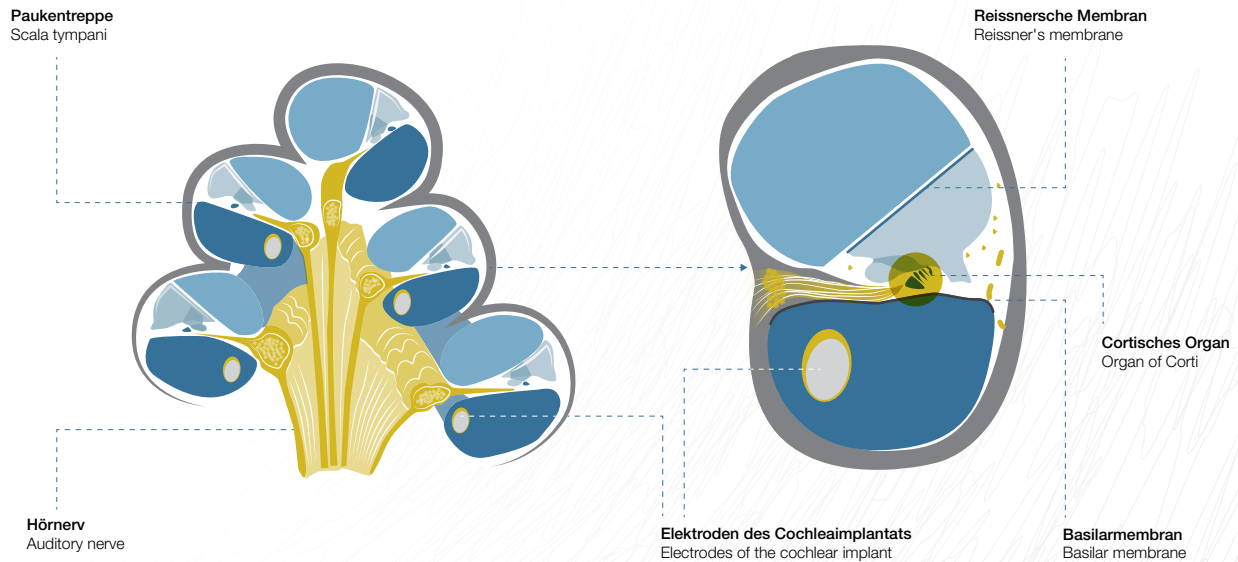
„Ein Cochleaimplantat ist darauf optimiert, Sprache zu verstehen, aber es hat seine Grenzen“, weist der Ingenieur der Elektrotechnik hin. Sprechen in einem Raum viele Menschen durcheinander, etwa bei einer Party, so artet dies für den Betroffenen in Stress aus: Während das Gehirn eines Normalhörenden die Stimme seines Gegenübers herausfiltern kann, gehen für Implantatträger sprachliche Äußerungen oftmals in den Störgeräuschen unter. Genau diesen Nachteil versuchen Werner Hemmert und seine Forschungsgruppe zu minimieren. Ihr wichtigstes Werkzeug sind Computermodelle des Innenohrs und der neuronalen Schallverarbeitung. Bei technischen Systemen sind Computersimulationen, etwa von elektronischen Schaltungen, seit geraumer Zeit zwar Standard. Die TUM Forschungsgruppe geht aber noch einen Schritt weiter: Sie verbindet Modelle des Implantats mit denen der Hörnerven und der neuronalen Verarbeitung – zumindest auf der ersten Stufe des Hörpfades. Denn es reicht nicht, wenn nur das Implantat >

transmitter coil then sends the signals to the implant, which converts the signals into current pulses. These are delivered to the electrode array, which has been inserted into the inner ear, and stimulate the auditory nerve fibers directly. To simulate how people with a CI might perceive sound, Hemmert opens an MP3 file on his PC: the voice sounds distorted, similar to a poorly tuned analog radio station. But it is clearly identifiable as a man reciting text.

### Optimized for speech

“A cochlear implant is optimized to code speech but it has its limits,” points out the electrical engineer. If a lot of people are talking at the same time in one room – at a party, for instance – this can become quite stressful for the user. In someone with normal hearing, the brain can filter out the voice of the person they are talking to, but implant wearers find remarks get lost in the background noise more frequently. It is precisely this disadvantage that Werner Hemmert and his research group are working to minimize. Their most important tools are computer models of the inner ear and of neural sound processing mechanisms. For technical systems, computer simulation – such as electronic circuit modeling – has been the standard for some time. However, the TUM research group is taking it a step further by linking implant models with auditory nerve and neural processing models – at least for the first stage of the auditory pathway. Because it is not sufficient for the implant to precisely encode speech signals, the stimulated nerve cells must also be able to process and transmit the encoded information properly. To develop useful models, the researchers must first understand the human auditory >





Zuständig für die Umwandlung der mechanischen in elektrische Signale ist das Cortische Organ in der Hörschnecke mit seinen speziellen Rezeptoren, den Haarsinneszellen / Inside the cochlea, mechanical vibrations are converted into electrical signals by special sensory receptors or hair cells in the organ of Corti

Sprachsignale präzise kodiert. Nachfolgende Nervenzellen sollten in der Lage sein, die kodierten Informationen auch gut zu verarbeiten und zu übertragen.

Um aussagekräftige Modelle entwickeln zu können, müssen die Forscher zunächst das menschliche Hörsystem verstehen. Bis jetzt wissen sie: Der Schall wird zum Trommelfell geleitet, das zu schwingen beginnt. Die Mittelohrknöchelchen übertragen die mechanischen Schwingungen zur mit Flüssigkeit gefüllten Hörschnecke, wo sie entlang des eigentlichen Hörorgans (Cortisches Organ) als Welle entlangwandern. Dort wird das Schallsignal in seine Frequenzkomponenten zerlegt: Der Bereich am Eingang der Hörschnecke spricht auf hohe Töne an. Das Gebiet weiter hinten ist für niedrige Frequenzen zuständig.

### 1000-fache Verstärkung der Schwingungen

Die Hauptarbeit im Cortischen Organ leisten spezielle Rezeptoren: Die äußeren Haarsinneszellen sorgen zunächst für eine bis zu 1000-fache Verstärkung der Schwingungen. Die so verstärkte Wanderwelle reizt anschließend die inneren Haarsinneszellen, welche die mechanischen in elektrische Signale, also in Aktionspotenziale oder Erregungen des Hörnervs, umkodieren. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die neuronale Verarbeitung: Zuerst werden im Stammhirn Merkmale verarbeitet, die eine hohe zeitliche Präzision erfordern. In der Hörrinde (auditorischer Cortex) sorgen anschließend über 100 Millionen Nervenzellen dafür, dass ein subjektiver Höreindruck entsteht.

Aus experimentellen Messungen konnte Hemmerts Arbeitsgruppe nachvollziehen, wie das Gehirn die Signale

system. So far, we know that sound reaches the eardrum, which then begins to vibrate. The delicate bones of the middle ear transmit these mechanical vibrations to the fluid-filled cochlea, where they travel along the hearing organ – the organ of Corti – as a traveling wave. Here, the acoustic signal is split into various frequencies: the area at the entrance to the cochlea is activated by high-pitched sounds, while the area further back responds to lower frequencies.

### Thousand-fold amplification

The bulk of the work within the organ of Corti is performed by special sensory receptor cells, the hair cells. First, the outer hair cells amplify the vibrations by a factor of up to a thousand. The amplified traveling wave then stimulates the inner hair cells, which convert them from mechanical to electrical signals – and ultimately into action potentials of the audi-

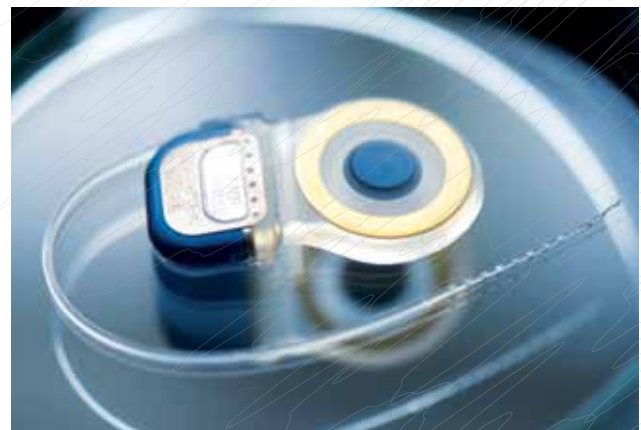
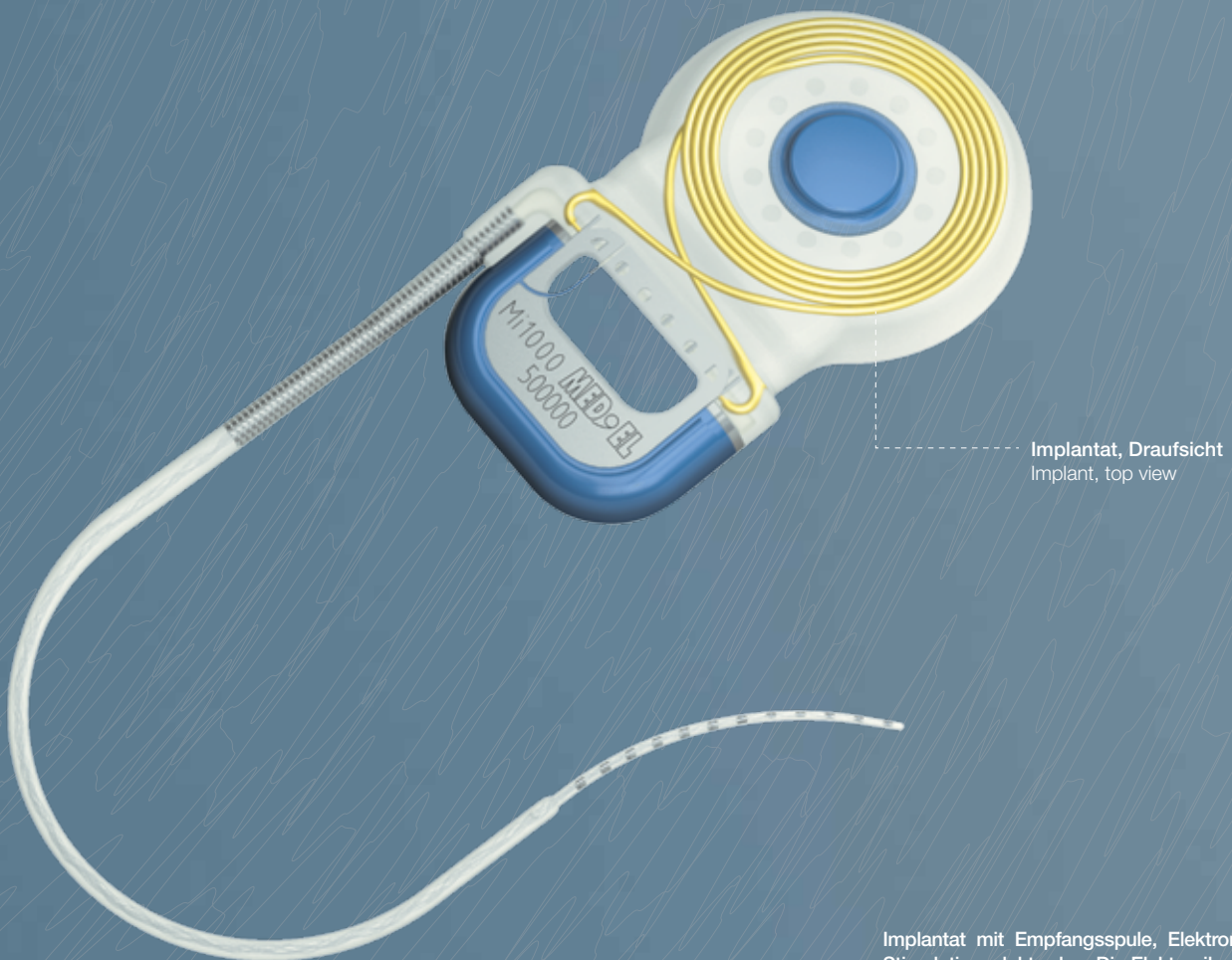
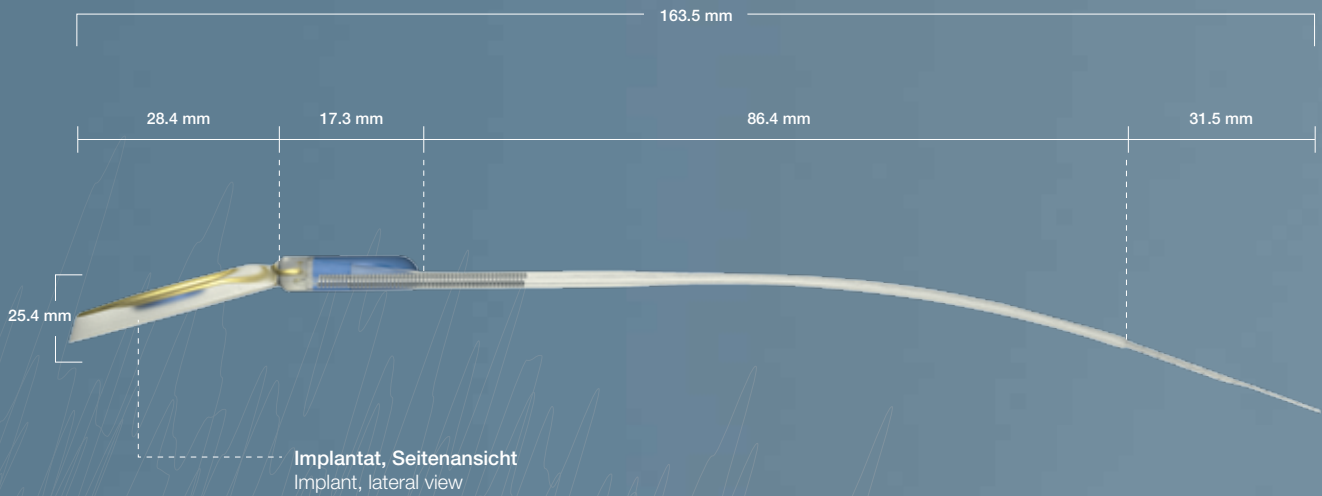


Foto links / Picture credit left: Eckert  
 Grafik / Graphics: edmundsepp (Quelle/Source: NeuroOrielle)  
 Foto rechts / Picture credit right: MED-EL



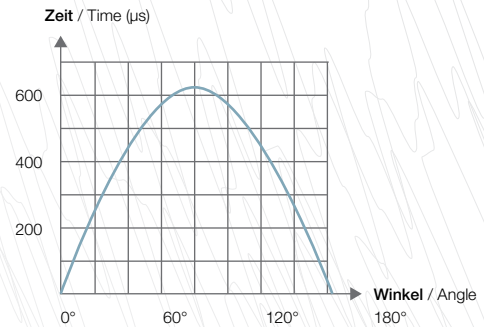
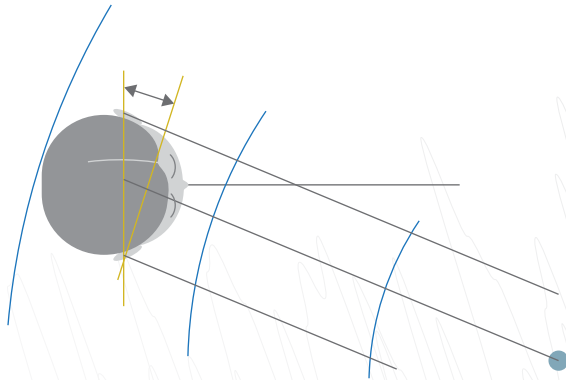
Implantat mit Empfangsspule, Elektronik und Stimulationselektroden. Die Elektronik setzt die empfangenen Signale in elektrische Impulse um, welche die Nervenfasern stimulieren / Implant with receiver coil, electronics and stimulation electrodes. The electronics converts the received signals into electrical pulses, which stimulate the nerve fibers



## Räumliches Hören

Seitlich einfallende Schallsignale erreichen das linke und rechte Ohr nicht gleichzeitig, sondern mit einem Laufzeitunterschied von weniger als einer Millisekunde. Die Differenz hängt vom Einfallswinkel der Schallwelle ab. Unser Gehirn kann sie auswerten und daraus die Schallquelle lokalisieren.

**Spatial hearing:** Lateral sound signals do not reach the left and right ears simultaneously, but with an interaural time difference of less than a millisecond. The delay depends on the incoming angle of the sound wave. By analyzing this delay, our brains are able to determine the source of the noise.



auf den ersten Stufen der neuronalen Hörbahn kodiert und verarbeitet. Diese Erkenntnisse fließen sowohl in Computermodelle des intakten und implantierten Innenohrs, das ebenfalls Schall in Aktionspotenziale kodiert, als auch in Modelle der neuronalen Informationsverarbeitung im Hirnstamm. Die Modellstrukturen überprüft die Arbeitsgruppe laufend mit gezielten Experimenten an Normalhörenden und an CI-Trägern.

### Schallquellen orten

Vor allem das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Gehörs imponiert dem CI-Experten: „Unser Hörsystem kann noch Verzögerungen der Schallsignale von zehn Mikrosekunden zwischen linkem und rechtem Ohr auswerten und verarbeiten. Man muss dabei bedenken, dass die Nervenzellen Berechnungen mit Aktionspotenzialen durchführen, die etwa eine Millisekunde, also eine tausendstel Sekunde, lang und damit bereits 100 Mal länger sind als die maximale Zeitauflösung unseres Hörsystems.“

Deshalb ist es mit der Sprachkodierung nicht getan, Modelle der Schalllokalisierung sind ebenso wichtig. Beim räumlichen Hören erreichen die Schallsignale mit einer minimalen Zeitdifferenz die Ohren. Diese kann unser Gehirn auswerten und daraus die Position der Schallquelle errechnen. Patienten mit Innenohrimplantaten könnten davon profitieren, denn die Schalllokalisierung ist bei ihnen wesentlich ungenauer als bei Normalhörenden. Notwendig sind in Zukunft deshalb auch neue Konzepte fürs räumliche Hören – und vor allem ein besseres Verständnis der neuronalen Vorgänge im Gehirn, um daraus erweiterte Kodierungsstrategien abzuleiten. ▶

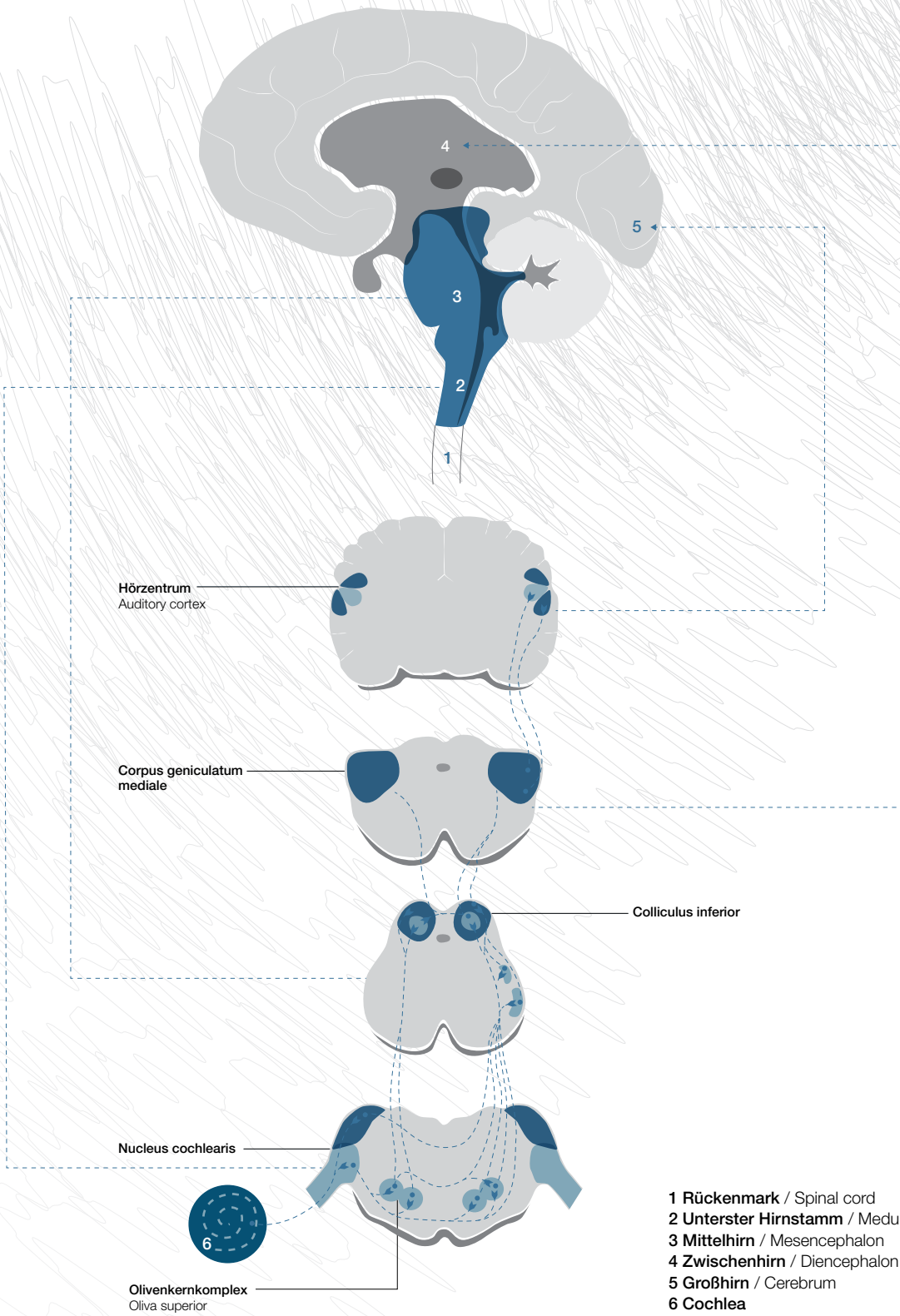
tory nerve. At this point, neural processing begins. The brain stem first processes input requiring high temporal precision. Then, over a hundred million nerve cells in the auditory cortex create our auditory perception.

Using experimental measurements, Hemmert’s working group has been able to map the way the brain encodes and processes signals in the first stages of the neural auditory pathway. These findings are then fed into computer models of both the intact and implanted inner ear, which also encodes sound into nerve impulses, and then into models of neural information processing in the auditory brain stem. The team tests this on an ongoing basis with targeted experiments involving CI wearers and people with normal hearing.

### Sound localization

Hemmert is particularly impressed by the temporal resolution of the human hearing system. As the CI expert explains: “Our auditory system can analyze and process sound signal timing differences between the left and right ear down to ten microseconds (millionths of a second). Bear in mind here that nerve impulses last around a millisecond – a thousandth of a second – which makes them a hundred times slower than the maximum resolution of our hearing.”

Speech encoding is only part of the story, then. Sound localization models are equally important. Sound signals reach our ears with a slight time difference, which our brains are able to analyze in order to determine the source of the noise – also known as spatial hearing. Efforts in this area could be of particular benefit to people with inner ear implants, since their sound localization capabilities are significantly less precise than ▶



Hörzentrum  
Auditory cortex

Corpus geniculatum  
mediale

Colliculus inferior

Nucleus cochlearis

Olivenkernkomplex  
Olivula superior

- 1 Rückenmark / Spinal cord
- 2 Unterster Hirnstamm / Medulla oblongata
- 3 Mittelhirn / Mesencephalon
- 4 Zwischenhirn / Diencephalon
- 5 Großhirn / Cerebrum
- 6 Cochlea

**Hauptschaltstellen der Hörbahn:** Die neuronale Reizverarbeitung beginnt in der Hörschnecke (Cochlea) und wird entlang der Hörbahn immer komplexer. In der Hörinde (auditorischer Kortex) lassen schließlich 100 Millionen Nervenzellen den subjektiven Höreindruck entstehen / **Main processing stages along the auditory pathway:** Neuronal processing starts in the cochlea and gets more and more complex along the pathway. In the auditory cortex finally about a hundred million nerve cells code our auditory perception





Der Elektroingenieur Werner Hemmert erforschte bereits während seiner Diplomarbeit das menschliche Hörsystem / Electrical engineer Werner Hemmert began investigating the human auditory system during his diploma thesis

### Modellbasierte Tests

Besonders die Hersteller von Ohrprothesen sind an den Computermodellen der TUM Forscher interessiert. Denn es handelt sich um wertvolle Evaluationswerkzeuge, mit denen die Implantate getestet und optimiert werden können, bevor eine Prothese überhaupt realisiert wird. „Damit lassen sich viele Ideen überprüfen, und nur die erfolgversprechendsten Verfahren werden weiterentwickelt. Die klassischen Entwicklungszyklen für Ohrprothesen sind extrem lang: Ein neues Implantat muss konzipiert, gebaut und in einem aufwendigen Prozess zugelassen werden. Erst danach kann es implantiert werden. Und noch mehr Zeit vergeht, bis an einer ausreichend großen Probandenzahl signifikante Verbesserungen nachgewiesen werden können. Ein Vorabtest mit einem Modell bedeutet für die Industrie eine enorme Kostenersparnis“, erläutert Hörforscher Werner Hemmert.

Für Benjamin ist ein modernes Implantat ein Segen, ermöglicht es ihm doch, am sozialen Leben teilzunehmen. Von den Forschungen, an denen er beteiligt war, profitiert er als Betroffener und als Forscher. Während er das eigentliche Implantat in seinem Innenohr ein Leben lang tragen wird, kann er seinen Sprachprozessor durch eine neuere Version ersetzen. Und wer, wenn nicht er, kann am besten beurteilen, wie gut die Computermodelle funktionieren?

Zu Hause vor dem Zubettgehen schaltet er sein Cochleaimplantat aus. Denn trotz der technischen Hilfe muss er sich stark konzentrieren, um hören zu können. Er ist erschöpft und genießt die absolute Stille. *Autorin: Evdoxía Tsakiridou*

those of people with normal hearing. This means we need new concepts to restore spatial hearing and, in particular, a better understanding of the underlying neural processes in the brain. These insights would help researchers to develop optimized coding strategies.

### Model-based testing

The TUM researchers' computer models are of particular interest to manufacturers of hearing devices, who see them as valuable evaluation tools, enabling testing and optimization of implants prior to production. "This way, we can look at a wide range of ideas and only go on to develop the most promising techniques. Traditionally, development cycles are extremely long here: A new implant has to be designed and built, then undergo an extensive licensing process before it can even be inserted in humans – and it takes yet more time to demonstrate significant improvements in a large number of subjects. So model-based pre-testing can yield huge cost savings for the industry," confirms Hemmert. For Benjamin, his sophisticated implant is a blessing, allowing him to take part in social interaction. The research he was involved in stands to benefit him both personally and professionally. While the actual implant in his inner ear will remain there for the rest of his life, he can upgrade the speech processor to a newer version. And who better to assess how well the computer models are working?

At home, Benjamin switches off his CI before heading to bed. Despite the technical assistance, hearing still takes a lot of concentration for him. He is tired out and enjoys the total silence. *Author: Evdoxía Tsakiridou*