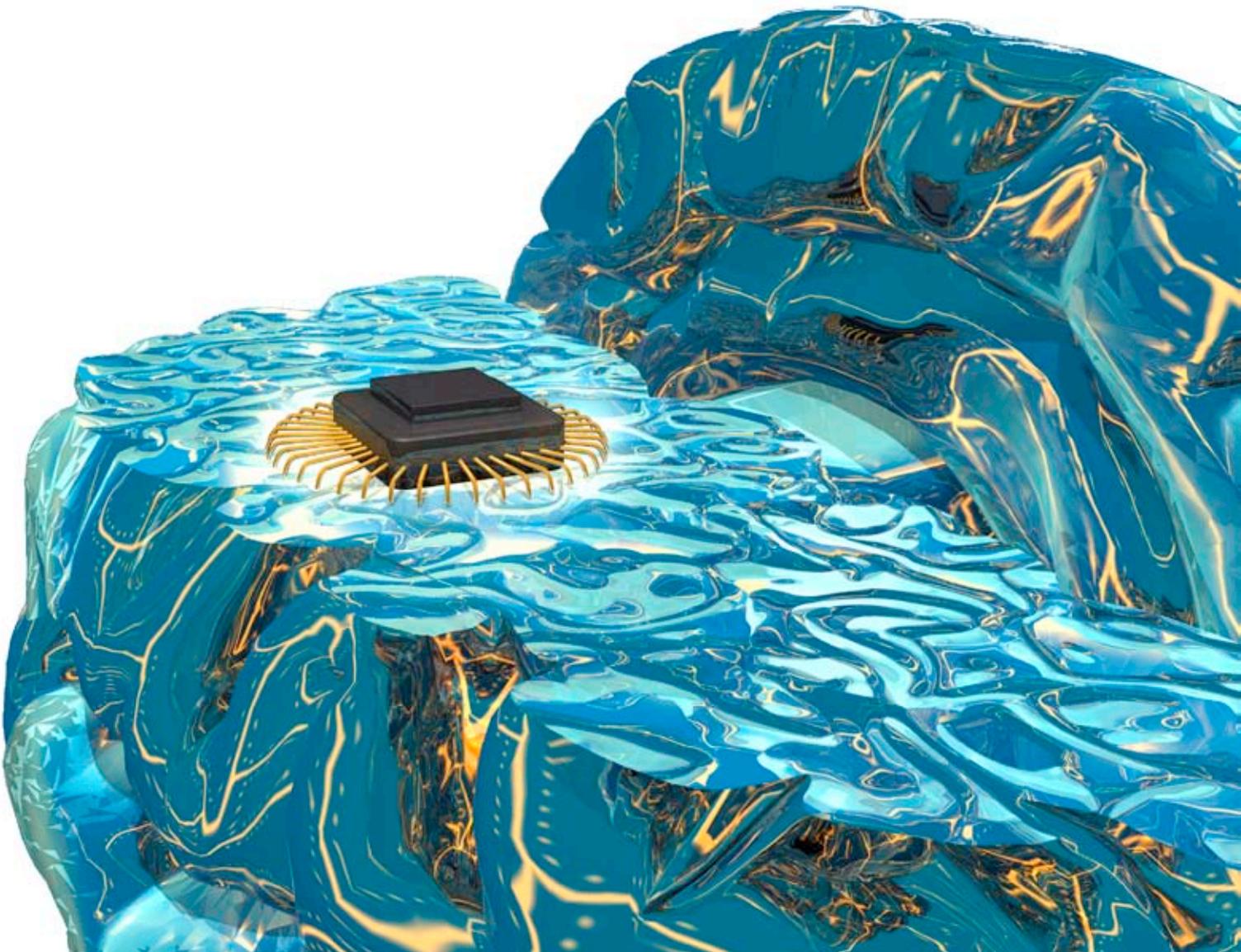


HIRNFORSCHUNG NEUROPROTHETIK

# Hightech im Gehirn

Implantate für Auge und Ohr gibt es bereits. Doch Hightech-Prothesen mitten im Gehirn? Ein gewöhnungsbedürftiger Gedanke – aber durchaus naheliegend



Sie gelten als zwei Seiten derselben Medaille: Körper und Geist. Doch so grundlegend verschieden uns die beiden Charakteristika des Ichs auch scheinen – lassen sie sich wirklich so scharf voneinander trennen? Oder stellen »Leib« und »Seele« statt Vorder- und Rückseite nicht vielmehr die in der Münze miteinander verschmolzenen Elemente dar? Die aktuelle Entwicklung von völlig neuartigen Neuroprothesen und die damit verbundene Grundlagenforschung zeigen, wie sehr die traditionelle Unterscheidung von Materiellem und Geistigem heute ins Wanken gerät. Beginnen wir mit Ersterem.

Wer durch Unfall oder Krankheit einen Finger, eine Hand oder gar den ganzen Arm verliert, wird über den Einsatz einer künstlichen Gliedmaße nachdenken. Die Entscheidung dafür oder dagegen hängt von verschiedenen Überlegungen ab, etwa: Wie stark schränkt mich der Verlust des Körperteils ein? Wie weit kann die Prothese meine körperliche Behinderung beheben? Dabei dürfte klar sein, dass eine Prothese eben nur ein »nachgebautes« Ersatzteil ist, das zwar wichtige Funktionen erfüllen kann, mich aber nicht zu einer anderen Person macht. Das Ich bleibt bei künstlichen Gliedmaßen unangetastet.

Diese Einschätzung teilen die meisten Menschen auch, wenn sie dieses Gedankenexperiment auf andere Körperorgane übertragen, wie Auge, Ohr oder auch Leber, Herz oder Niere. Erst wenn wir das Gehirn – also die »körperliche Basis«

unseres »Geistes« – manipulieren, beschleicht uns das seltsame Gefühl, dass die Dinge hier anders liegen könnten.

Was aber unterscheidet Neuroprothesen eigentlich von anderen »Ersatzteilen« für den Körper? Im Prinzip sind auch sie nichts anderes als technische Geräte, die eine verlorene oder geschädigte Funktion – in diesem Fall des Nervensystems – wiederherstellen sollen. Die Betonung liegt dabei auf *wiederherstellen*. Lange Zeit konnten etwa verloren gegangene Sinnesleistungen durch andere lediglich kompensiert werden: Das bewährt sich nach wie vor – wenn beispielsweise Sehbehinderte Blindenschrift lernen oder Gehörlose per Gebärdensprache und Lippenlesen kommunizieren.

### NERVÖSE SCHNITTSTELLEN

Neuroprothesen zielen dagegen auf eine *echte* Rekonstruktion der Funktion, indem sie mit Teilen des Nervensystems über eine geeignete Schnittstelle – einem so genannten Neuro-Interface – in direkte Wechselwirkung treten. Die Schnittstelle kann in der Peripherie des Nervensystems liegen, zum Beispiel an sensorischen Nervenbahnen, welche die neuronale Erregung von Auge oder Ohr zum Gehirn leiten – oder aber mitten im Zentralnervensystem selbst, sprich im Gehirn. In unserer naiven Vorstellung wird die Sache umso vertrackter, je tiefer wir in diesen neuronalen Hort des Bewusstseins eindringen. Wann überschreiten wir dabei die magische Grenze, jenseits derer ein künstlicher Ersatz meiner biologischen Hardware mein Ich verändert? Just dieser Übergang von der Peripherie zum Zentrum kennzeichnet auch die aktuelle Entwicklung von Neuroprothesen (siehe Bild S. 66).

Neben dem Einsatzort der Prothese – peripher oder zentral – ist auch wichtig, in welche Richtung die Information fließt: Ein »auslesendes« Neuroimplantat registriert die motorische Aktivität des

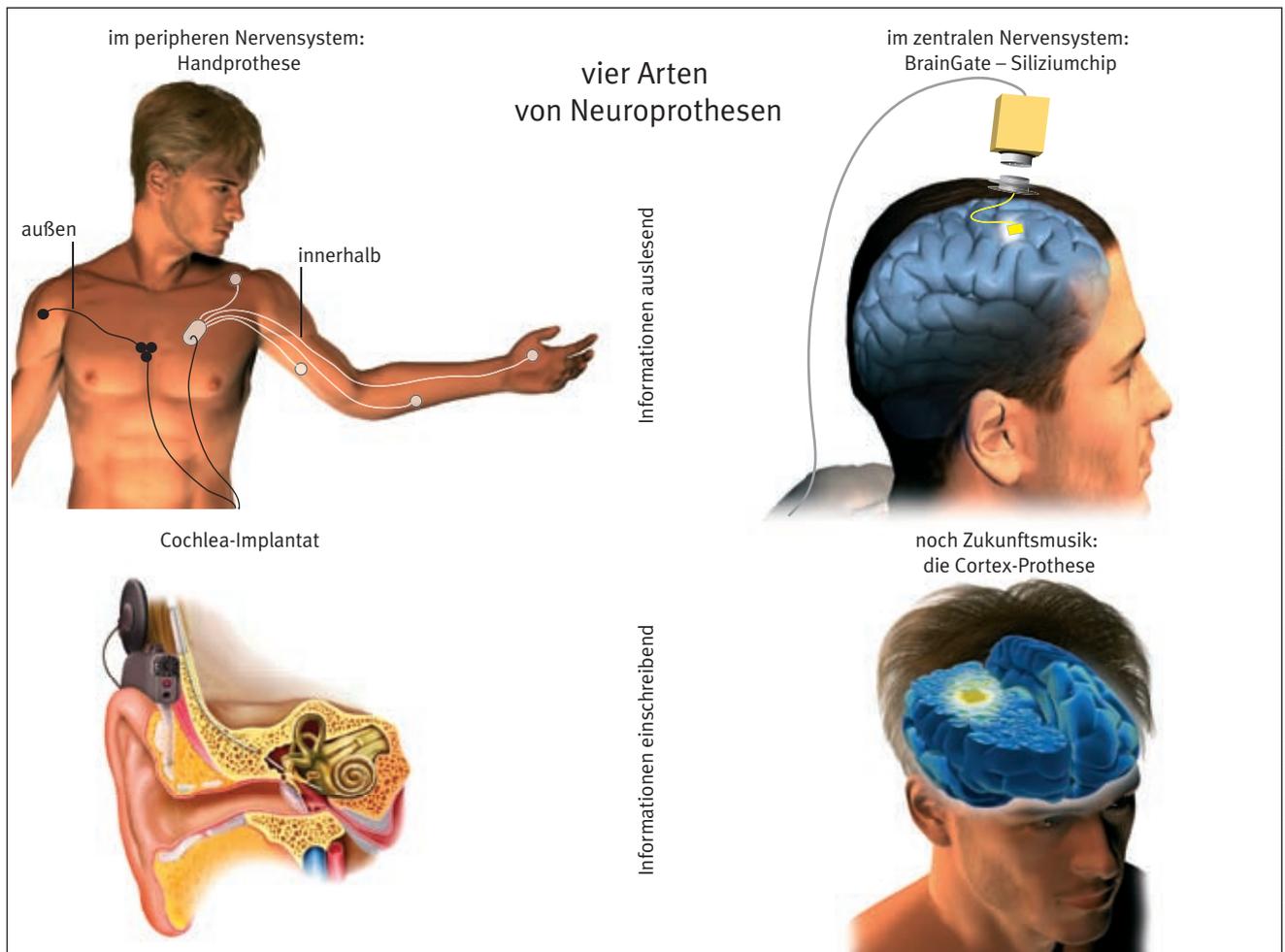
Nervensystems, um beispielsweise einen gelähmten Arm zu bewegen. Umgekehrt können Implantate auch sensorischen Input liefern, also »einschreibend« wirken, indem sie von außen empfangene Signale ans Gehirn senden, um eine bestimmte Sinnesempfindung zu erzeugen.

Schon lange im Einsatz sind periphere auslesende Neuroprothesen. So gibt es bereits Systeme, welche die neuronale Aktivität in den zu den Muskeln ziehenden Nervenfasern messen, um damit Hand-, Arm- oder Beinbewegungen künstlich zu steuern. Inzwischen hat sich gezeigt, dass eine derartige Kontrolle auch durch Abgreifen neuronaler Aktivität in zentralen Bereichen des Gehirns möglich ist. Ein schon fast unheimlich anmutendes Experiment gelang im Jahr 2000 der Arbeitsgruppe von Miguel Nicolelis an der Duke University in Durham (North Carolina): Die Neurobiologen implantierten Elektroden in die Hirnrinde des Nachtaffenweibchens Belle und maßen damit die Hirnaktivität, sobald das Tier einen Hebel bewegte. Die gemessenen Signale wandelten die Forscher in Computerbefehle um und schickten diese per Internet an ein tausend Kilometer entferntes Labor. Ein zweiter Computer setzte hier Belles Gedanken um und bewegte wie von Geisterhand einen Roboterarm (siehe Gehirn&Geist 4/2002, S. 71).

Auch beim Menschen gelingt eine solche Gedankenübertragung: Niels Birbaumer von der Universität Tübingen entwickelte 1999 ein »Thought Translation Device«. Dieser Apparat misst per Elektroencephalografie die Hirnströme einer Versuchsperson, während diese sich die Bewegung eines Cursors an einem Computerbildschirm vorstellt. Nach langem Üben lassen sich die gemessenen Hirnsignale tatsächlich in kontrollierbare Aktionen umsetzen – eine Hoffnung für vollständig gelähmte Locked-in-Patienten (siehe Gehirn&Geist 3/2004, S. 70). ▷

---

**CHIP IM KOPF**  
Verändert eine ins Gehirn implantierte Prothese die Persönlichkeit des Menschen?



UNTEN LINKS: MIT FRIL. GEN. VON MED-EL DEUTSCHLAND GMBH; ALLE ANDEREN: GÖPFEREN, SIGANIK / GEHIRN&GEIST

▷ Forscher um John Donoghue von der Brown University in Providence (Rhode Island) wagten einen noch weiter gehenden Eingriff beim Menschen: Im Sommer 2004 implantierten sie Matthew Nagle, der wegen einer Messerattacke vom Hals ab querschnittsgelähmt ist, einen Chip mit dem treffenden Namen »BrainGate«. Dieses »Tor zum Gehirn« registrierte Nagles Hirnsignale, sodass der Patient per »Gedankenkraft« eine Handprothese bewegen konnte. Inzwischen hat der Gelähmte sogar schon gelernt, eine geometrische Figur recht genau nachzuzeichnen (siehe Gehirn&Geist 6/2006, S. 22).

Einschreibende Neuroprothesen dagegen beschränken sich bisher auf den peripheren Bereich – hier haben sie allerdings bereits klinischen Einsatz gefunden. So überwacht ein Blasenstimulator die Harnblasenfunktion vieler querschnittsgelähmter Patienten, und mit Cochlea-Implantaten können Gehörlose häufig sogar wieder Sprache akustisch

wahrnehmen (siehe Gehirn&Geist 7-8/2006, S. 63). Dabei wandelt ein Computerchip die von einem Mikrofon aufgezeichneten Laute in elektrische Signale um und reizt über ein in die Innenohrschnecke (Cochlea) implantiertes Elektrodensystem den Hörnerv. Und auch erste Retina-Implantate für Blinde, die mit Kamera, Mikrochip und ins Auge implantierten Elektroden arbeiten, werden zurzeit getestet.

**VORSTOSS INS ZENTRUM**

Systeme wie Cochlea- und Retina-Implantate funktionieren jedoch nicht, wenn die für die Sinneswahrnehmung zuständigen Hirnregionen geschädigt sind. Nicht zuletzt deshalb versuchen Wissenschaftler schon seit den 1960er Jahren, durch elektrische Stimulation auch in weiter zentral liegenden Strukturen, wie der Hörrinde des Gehirns, mit Hilfe einschreibender Prothesen definierte Empfindungen auszulösen. Ähnliche Forschungsprojekte nehmen sich

**ERSATZTEILE FÜR ALLE FÄLLE Neuroprothesen können im peripheren (links) oder im zentralen Nervensystem ansetzen (rechts). Auslesende Implantate (obere Reihe) steuern die Muskelaktivität, während einschreibende (unten) Sinneswahrnehmungen erzeugen.**

die elektrische Stimulation des visuellen Cortex zum Ziel, um Sehwahrnehmungen zu erzeugen.

Bislang jedoch sind derartige Versuche gescheitert. So nahmen Patienten, deren Sehrinde elektrisch gereizt wurde, lediglich kleine farbige Lichtpünktchen wahr – so genannte Phosphene. Komplexere Gebilde mit Kanten oder Konturen blieben ihnen verborgen. Auch die elektrische Reizung der Hörrinde lässt Patienten, wenn überhaupt, lediglich ein Rauschen oder Knacken vernehmen, was Neurowissenschaftler als Auden-Wahrnehmung bezeichnen.

Schuld an diesen Misserfolgen ist unserer Ansicht nach nicht nur die bis heute unzureichend entwickelte Interface-Technologie. Vielmehr spiegelt sich hier ein grundsätzliches Problem wider: Anders als ein peripherer Nerv arbeitet der sensorische Cortex eben nicht als passiver Empfänger, der die Umwelt einfach abbildet. Die Sinnesverarbeitung im Gehirn stellt stattdessen ein hochflexibles, aktives System dar, das alle einlaufenden Informationen abhängig vom neuronalen Zustand vieler anderer Hirnbereiche ständig neu interpretiert. Einfache elektrische Reizungen, wie sie an Hör- und Sehnerv funktionieren, können daher in der Großhirnrinde keinen Erfolg haben. Eine hier implantierte sensorische Prothese müsste selbst flexibel arbeiten, also umfangreiche Hirnaktivität gleichzeitig messen und interpretieren. Eine derartige interaktive Neuroprothese sollte demnach fähig sein, mit dem Nervensystem eine fruchtbare Unterhaltung zu führen.

### LAUTLOSES HÖREN

Zusammen mit Physiologen, Medizinern und Technikern untersuchen wir derzeit die grundlegenden Prinzipien dieses Dialogs. Wir arbeiten dabei mit Mongolischen Wüstenrennmäusen (*Meriones unguiculatus*), die im niederfrequenten Schallspektrum ähnlich empfindlich hören wie der Mensch und sich außerdem als äußerst gelehrt erweisen. So lernen die Tiere beispielsweise sehr schnell, über eine Hürde zu springen, sobald sie zwei Töne in aufsteigender Tonhöhe vernehmen. Bei absteigender Klangfolge bleiben sie dagegen einfach sitzen. Genauso kann man den Tieren beibringen, nur dann zu springen, wenn sie eine Serie gleicher Töne in immer kürzeren Abständen hören.

Wir verpflanzten Prototypen einer zweikanaligen Neuroprothese in die Hörrinden unserer Wüstenrennmäuse. Damit ließ sich dieses Hirnareal künstlich an zwei verschiedenen Orten gleichzeitig reizen: einmal dort, wo hohe Tonfrequenzen verarbeitet werden, und außerdem in dem Abschnitt, der niedrige Frequenzen repräsentiert.

Unsere Prothese funktionierte: Ohne einen einzigen Laut auf normalem Weg



zu hören, bestanden die Wüstenrennmäuse den Lerntest mit Bravour – sie konnten nicht nur hoch- von niederfrequenten Tönen unterscheiden, sondern nahmen auch zeitliche Veränderungen der Reize wahr. Selbst komplexe Stimuli, bei denen wir verschiedene räumliche und zeitliche Reizmuster miteinander kombinierten, überforderten die Prothesen tragenden Tiere keineswegs. Die Mäuse lernten genauso gut wie nicht operierte Artgenossen, die ganz normal über ihre Ohren hörten.

Eine einzige Prothese im Hörcortex kann also durchaus sinnvolle Wahrnehmungen erzeugen. Allerdings lehren unsere Experimente auch, dass die elektrische Stimulation zeitlich hochpräzise in die Aktivität des Gehirns eingetaktet werden muss. Denn die Lernleistung der Wüstenrennmäuse nahm dramatisch zu, wenn wir ihre Hörrinde in bestimmten Phasen der Hirnaktivität reizten. Offensichtlich ist die Prothese auf den Informationsaustausch mit den zu stimulierenden Cortex-Arealen angewiesen. Für die Praxis bedeutet dies, dass corticale einschreibende Prothesen erst »lernen« müssen, sich auf ihren Dialogpartner, wie etwa die Hörrinde, einzustellen.

Diese ersten viel versprechenden Ergebnisse bringen uns zu der eingangs gestellten Frage zurück: Macht eine Hirnprothese einen Menschen zu einer anderen Person? Die Antwort lautet: Im Prinzip ja. Schließlich kann sie seine Wahrnehmung grundlegend verändern! Allerdings trifft das Gleiche auch auf

viele ganz alltägliche Prozesse zu: Ständig machen wir neue Erfahrungen und lernen hinzu – und verändern so unser Ich.

Die Entwicklung interaktiver Neuroprothesen steckt noch in den Kinderschuhen. Es zeigt sich jedoch bereits jetzt, dass Grundlagenforschung, klinische Anwendung und ethisch-gesellschaftliche Beurteilung parallel voranschreiten müssen. Dann verliert auch der gewöhnungsbedürftige Gedanke an eine Prothese im Gehirn viel von seinem vermeintlichen Schrecken. ◀

**FRANK W. OHL** ist Professor für Neurobiologie an der Universität Magdeburg und leitet eine Arbeitsgruppe zur Entwicklung interaktiver Neuroprothesen am dortigen Leibniz-Institut für Neurobiologie. **HENNING SCHEICH** ist Direktor dieses Instituts.

 [www.gehirn-und-geist.de/audio](http://www.gehirn-und-geist.de/audio)

### Literaturtipps

**Abbott, A.:** Neuroprosthetics: In Search of the Sixth Sense. In: *Nature* 442(7099), 2006, S. 125 – 127.

**Ohl, F.W., Scheich, H.:** Learning-Induced Plasticity in the Auditory Cortex. In: *Current Opinion in Neurobiology* 15(4), 2005, S. 470 – 477.

**Scheich, H., Breindl, A.:** An Animal Model of Auditory Cortex Protheses. In: *Audiology & Neurologie* 7(3), 2002, S. 191 – 194.