

# HIRNIMPLANTATE DIE INTENTIONSMASCHINE

**Querschnittsgelähmten wieder zu selbstständigen Bewegungen verhelfen – das sollen Neuroprothesen ermöglichen. Eine neue Generation von Gehirn-Computer-Schnittstellen könnte den Durchbruch bringen.**



**Richard Andersen** ist Physiologe und Professor für Neurowissenschaften sowie Direktor des Tianqiao and Chrissy Chen Brain-Machine Interface Center am California Institute of Technology in Pasadena (USA). Seine Arbeitsgruppe forscht über die neuronalen Grundlagen der Sinneswahrnehmungen sowie der Motorik und entwickelt neuronale Prothesen.

► [spektrum.de/artikel/1706910](https://www.spektrum.de/artikel/1706910)

Wenn ich es sehe, bekomme ich jedes Mal eine Gänsehaut: Ein gelähmter Proband steuert vom Rollstuhl aus einen Computer oder einen Roboterarm ausschließlich kraft seiner Gedanken – ermöglicht durch eine Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, kurz BCI (brain-computer interface) oder BMI (brain-machine interface) genannt.

Im Jahr 2013 saß Erik Sorto, der seit seinem 21. Lebensjahr wegen einer Schussverletzung vollständig gelähmt ist, in meinem Labor und konnte zum ersten Mal seit zehn Jahren wieder selbstständig ein Bier trinken. Ein Jahr zuvor hatten wir ihm Elektroden in seine Hirnrinde implantiert, um die Bewegungssignale des Gehirns zu registrieren und an einen elektromechanischen Arm weiterzuleiten. Dieser ergriff die Bierdose und führte sie an Sortos Lippen. Fasziniert beobachteten wir, wie unser Proband diese vermeint-

lich einfache, in Wirklichkeit aber hochkomplexe Aufgabe bewältigte.

Wie lässt sich eine mechanische Prothese per Gedankenkraft steuern? Tag für Tag bewegen wir unsere Gliedmaßen, ohne darüber nachzudenken. Das sollte genauso problemlos mit künstlichen Prothesen möglich sein. Schon seit Jahrzehnten versuchen daher Neurowissenschaftler, die Hirnsignale zu entschlüsseln, mit denen wir Bewegungen initiieren und Objekte ergreifen – lange nur mit mäßigem Erfolg. Inzwischen haben wir bessere Methoden entwickelt, um die Kakophonie elektrischer Aktivitäten anzuzapfen, die während der Kommunikation unserer fast 100 Milliarden Hirnzellen entsteht. Eine neue Generation von BCIs verspricht nun, dem Ziel einer effektiven Kommunikation zwischen Mensch und Maschine näherzukommen.

Es gibt zwei Hauptklassen solcher Schnittstellen. Bei der einen überträgt ein einspeisendes Gerät ein externes Signal mittels Elektrostimulation an ein neuronales Netzwerk im Gehirn. Diese Technik wird schon erfolgreich angewendet. So stimuliert ein Cochleaimplantat den Hörnerv bei einem Schwerhörigen, und eine tiefe Hirnstimulation der Basalganglien mildert motorische Störungen wie das Zittern bei einem Parkinsonpatienten. Geräte zur Stimulation der Netzhaut für Blinde werden derzeit klinisch getestet.

Auslesende BCIs, die neuronale Aktivitäten aufzeichnen, befinden sich dagegen noch im Entwicklungsstadium. Recht grobkörnige Verfahren hierzu gibt es bereits: Ein Elektroenzephalogramm (EEG) misst die durchschnittliche Aktivität des Hirngewebes in einer Distanz von einigen Zentimetern. Dabei registriert es allerdings lediglich die aufsummierten Signale von vielen Millionen Neuronen und nicht etwa die einzelner Hirnzellen in einem bestimmten Netzwerk. Die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) erlaubt indirekte Messungen, indem sie den verstärkten Blutfluss in einer neuronal aktiven Region erfasst. Sie kann zwar kleinere Zonen abbilden als das EEG, besitzt jedoch immer noch eine ziem-

## SERIE

### Das menschliche Gehirn

Teil 1: Februar 2020

#### Was ist Bewusstsein?

Christof Koch

#### Unsere inneren Universen

Anil K. Seth

Teil 2: März 2020

#### Das Netzwerk des Geistes

Max Bertolero und Danielle S. Bassett

#### Ein Schaltplan fürs Gehirn

Sarah DeWeerd

Teil 3: April 2020

#### Die Intentionmaschine

Richard Andersen

#### Der freie Wille und die Algorithmen

Liam Drew



Eine Gehirn-Computer-Schnittstelle kann Signale aus dem Gehirn empfangen oder auch zu ihm senden. Solche Hirnimplantate könnten für Querschnittsgelähmte hoffnungsvoll sein.

lich geringe Auflösung. Zudem reagiert die Durchblutung recht träge, so dass die fMRT rasche Veränderungen der Hirnaktivität nicht erkennen kann.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, versuchen Forscher, einzelne Zellen oder wenigstens eine Gruppe von Neuronen zu erfassen. In den letzten Jahren gelangen solche Aufzeichnungen mit Implantaten aus feinsten rasterartig angeordneten Elektroden. Bei den derzeit verwendeten Arrays handelt es sich um 4 mal 4 Millimeter große Plättchen mit 100 Elektroden, die jeweils 1 bis 1,5 Millimeter lang sind. Ein solches nagelbrettartiges Bauelement kann die Aktivitäten von 100 bis 200 Neuronen aufzeichnen.

Die von den Elektroden erfassten Messdaten fließen zu einem Decoder, der mit mathematischen Algorithmen das Entladungsmuster in ein Signal übersetzt, das eine bestimmte Aktion wie eine Roboterarmbewegung oder einen Computerbefehl auslöst. Solche auslesenden BCIs könnten in Zukunft Patienten helfen, deren Mobilität durch Rückenmarksverletzungen oder Krankheiten eingeschränkt ist.

Unser Team konzentriert sich auf tetraplegische Patienten, die auf Grund von Verletzungen des oberen Rückenmarks weder Arme noch Beine bewegen können. Dafür brauchen wir die Signale aus ihrem Kortex – jener etwa drei Millimeter dicken Oberflächenschicht der beiden Hirnhälften, die ausgebreitet jeweils eine Fläche von ungefähr 800 Quadratzentimetern bedecken würde.

Ein BCI kann mit unterschiedlichen Bereichen der Hirnrinde interagieren. Nach derzeitigen Forschungsstand kennen wir mittlerweile mehr als 180 Areale, die spezifische Hirnfunktionen steuern. Zu nennen wären hier die primären Regionen, die Sinnesreize vom Auge, vom Ohr oder von den Drucksensoren der Haut verarbeiten. Auch die darunter liegenden, dicht vernetzten Bereiche des Assoziationskortex, die auf Sprache, Objekterkennung, Emotion oder exekutive Kontrolle spezialisiert sind, können von den Geräten gezielt angesteuert werden.

Einige Forscherteams haben damit begonnen, Hirnsignale bei gelähmten Patienten aufzuzeichnen, um unter kontrollierten Laborbedingungen eine motorische Prothese

zu steuern. Bis sich neuronal gesteuerte Prothesen so einfach implantieren lassen wie heute ein Herzschrittmacher, liegt noch ein steiniger Weg vor uns. Mein Team verfolgt den Ansatz, statt vom motorischen Kortex Signale der neuronalen Assoziationsareale abzuleiten. Wir hoffen, dass wir damit die Bewegungsabsichten des Patienten schneller und präziser bestimmen können.

### **Nach gelungener Implantation folgten »zwei Wochen des Schreckens«**

Dabei konzentrieren wir uns auf den posterioren Parietalkortex (PPC) im hinteren Scheitellappen, wo sich die Intention zur Einleitung einer Bewegung herausbildet (siehe »Mit Gedankenkraft«, S. 40/41). Bei Experimenten mit Affen stießen wir auf einen Bereich des PPC, den so genannten lateralen intraparietalen Kortex, der Augenbewegungen kontrolliert. Signale für die Gliedmaßen werden dagegen von anderen Regionen des PPC verarbeitet. So initiiert das anteriore intraparietale Areal Greifbewegungen, wie das Team von Hideo Sakata von der Nihon-Universität in Tokio bereits Ende der 1990er Jahre herausfand.

Der PPC ist aus mehreren Gründen für die Steuerung eines Roboterarms oder Computercursors besonders geeignet: Im Gegensatz zum motorischen Kortex einer Hirnhälfte, der jeweils nur die gegenüberliegende Extremität aktiviert, kontrolliert der PPC beide Arme. Außerdem wird hier das Ziel der Bewegung angepeilt. Wenn etwa ein Affe nach einem Objekt greifen soll, schaltet sich der PPC sofort ein und lokalisiert es. Der motorische Kortex hingegen kontrolliert den Verlauf der Greifbewegung. Kennt man das Ziel einer beabsichtigten motorischen Handlung, vermag ein BCI, sie binnen weniger hundert Millisekunden zu entschlüsseln. Bei aufgezeichneten Signalen aus dem motorischen Kortex kann es dagegen mehr als eine Sekunde dauern, um daraus die beabsichtigte Bewegung zu errechnen.

Gewappnet mit diesen Erkenntnissen setzten wir uns kurz vor der Jahrtausendwende das Ziel, einem Menschen ein BCI-Implantat in den PPC einzupflanzen. Zunächst implantierten wir die Elektrodenarrays bei Affen, die dann lernten, damit einen Computercursor oder einen künstlichen Arm zu steuern. Etwa 15 Jahre vergingen, bis schließlich unser Team aus Wissenschaftlern, Ärzten und Rehabilitationsexperten des California Institute of Technology, der University of Southern California, der University of California in Los Angeles sowie den Rehabilitationskliniken Rancho Los Amigos und Casa Colina von der Food and Drug Administration sowie den Ethikkommissionen grünes Licht für einen ersten Test an Menschen erhielt.

Probanden eines solchen Projekts sind wahre Pioniere. Denn dass sie selbst davon direkt profitieren, ist keineswegs sicher. Vielmehr helfen sie, eine Technik zu entwickeln, die anderen zugutekommen kann, sobald die Alltagstauglichkeit bewiesen ist. Am 17. April 2013 war es endlich so weit: Die Neurochirurgen Charles Liu und Brian Lee implantierten unserem ersten Patienten Erik Sorto ein BCI. Die Operation verlief einwandfrei – dann begann das lange Warten.

Meine Kollegen von der NASA, die den Mars-Rover zu unserem Nachbarplaneten schickten, sprechen von den »sieben Minuten des Schreckens« für den Zeitraum vom

## **AUF EINEN BLICK KOMMUNIKATION ZWISCHEN MENSCH UND MASCHINE**

- 1** Gehirn-Computer-Schnittstellen sollen eine Kommunikation des Menschen mit einem Computer ermöglichen.
- 2** Ein solches Hirnimplantat erlaubt, motorische Befehle eines Querschnittsgelähmten etwa durch einen Roboterarm umsetzen zu lassen.
- 3** Statt in den motorischen Kortex eines Patienten implantiert die Arbeitsgruppe des Autors die Schnittstelle in ein Hirnareal, in dem die Intention zur Bewegung entsteht.



LANCE HAYASHIDA UND CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

**Erik Sorto (rechts) ist querschnittsgelähmt. Dank eines von Richard Andersen (links) entwickelten Hirnimplantats kann er kraft seiner Gedanken mit einem Roboterarm einen Becher greifen.**

Eindringen in die Marsatmosphäre bis zur Landung. Für mich standen zwei Wochen äußerster Anspannung bevor, bis der Bereich um das Implantat vollständig verheilt war. Wird es funktionieren? Trotz der viel versprechend ausgefallenen Tierversuche betreten wir mit der Implantation eines BCI in den menschlichen PPC Neuland. Niemand hatte je versucht, dort Signale abzuleiten.

Schon am ersten Testtag detektieren wir neuronale Aktivitäten, und gegen Ende der Woche erfassten wir genug Signale, um auszuprobieren, ob Sorto einen Roboterarm über das Implantat steuern konnte. Einige Neurone veränderten ihre Aktivität, sobald unser Proband sich vorstellte, er drehe seine Hand. Seine erste Aufgabe bestand darin, die Roboterhand in verschiedene Richtungen zu wenden, um einem Doktoranden die Hand zu schütteln. Sorto war genauso begeistert wie wir: Zum ersten Mal seit seiner Rückenmarksverletzung konnte er mit der Welt aktiv interagieren – über einen Roboter.

Wir werden oft gefragt, ob es lange dauert, bis ein Mensch ein BCI bedienen kann. Tatsächlich funktionierte die Technik mehr oder weniger sofort. Den Roboterarm zu steuern, erwies sich für Sorto als intuitiv und erstaunlich einfach. Indem er sich verschiedene Bewegungsabläufe vorstellte, konnte er seine Hirnzellen quasi nach Belieben ein- und ausschalten.

Gemeinsam mit Forschern von der Johns Hopkins University gelang es uns, die Intentionssignale aus Sortos

Gehirn mit maschineller Bildverarbeitung und intelligenter Robotertechnik für die Bewegungssteuerung nutzbar zu machen. Dabei verrechnet der Algorithmus Videoaufzeichnungen mit den Intentionssignalen, um den Roboterarm in Bewegung zu setzen.

Wir hatten Sorto zu Beginn der Studie gefragt, was er mit dem Roboterarm am liebsten machen würde. Seine Antwort: ohne fremde Hilfe ein Bier trinken. Unter dem Jubel aller Anwesenden schaffte er dieses Kunststück nach etwa einem Jahr.

Sorto ist nicht unser einziger Patient. Seit fünf Jahren nimmt Nancy Smith an unseren Studien teil. Die ehemalige Computergrafikerin, die in ihrer Freizeit Klavier gespielt hatte, ist durch einen Autounfall vor etwa zehn Jahren an allen vier Gliedmaßen gelähmt. In ihrem PPC stießen wir auf eine detaillierte Repräsentation der Finger beider Hände. Mittels virtueller Realität lernte Smith, die zehn Finger der auf einem Bildschirm erscheinenden Avatar-Hände einzeln zu bewegen. Sie konnte sogar mit den fünf virtuellen Fingern einer Hand einfache Melodien auf einer computergenerierten Klaviertastatur spielen.

Die Arbeit mit unseren Patienten erwies sich für uns als äußerst spannend und lehrreich. Die Menge an Information, die sich aus der Aktivität von wenigen hundert Neuronen ziehen ließ, war überwältigend. Wir konnten eine Reihe von kognitiven Aktivitäten decodieren, darunter mentale Strategieplanung, Verarbeitung visueller Reize, verbale Manifestationen von Aktionen wie Greifen oder Drücken, Fingerbewegungen oder mathematische Berechnungen. Zu unserer Überraschung genügte die Implantation von einigen winzigen Elektrodenarrays, um vieles zu entschlüsseln, was eine Person vorhatte.

### Der PPC als visuelles Kontrollzentrum

Vor der Frage, wie viel Information sich aus den Aktivitäten eines kleinen Hirnareals ableiten lässt, stand ich bereits zu Beginn meiner wissenschaftlichen Laufbahn: Als Postdoc bei Vernon Mountcastle (1918–2015) an der Johns Hopkins University untersuchte ich, wie der PPC von Affen den visuellen Raum repräsentiert. Das Auge funktioniert im Prinzip wie eine Kamera, wobei die lichtempfindliche Netzhaut die jeweilige Position der visuellen Reize signalisiert. Das im Gehirn repräsentierte Bild wird als retinotop Karte bezeichnet.

In einem wesentlichen Punkt unterscheidet sich jedoch unser visuelles System grundsätzlich von einer Kamera: Wenn sich Letztere bewegt, verschiebt sich ebenfalls das aufgenommene Bild. Dagegen erscheint uns die Umgebung stets ortsfest. Das Gehirn muss also das von der Netzhaut gelieferte Bild derart umwandeln, dass die Welt nicht so wirkt, als schwenke eine Filmkamera durch die Szene.

Hier kommt der PPC ins Spiel. Er stellt ein Rechenzentrum für die hochintegrierte visuelle Darstellung des Raums dar. Um zielsicher nach einem Objekt zu greifen, muss das Gehirn berücksichtigen, in welche Richtung die Augen gerade blicken. Schädigungen des PPC führen dazu, dass der Zugriff unsicher wird. In Mountcastles Labor identifizierten wir einzelne PPC-Neurone, die einen Ausschnitt einer Szene registrieren. Dieselben Zellen liefern auch Informationen zur

Position der Augen. Beide Signale interagieren, indem sie die visuelle Reaktion mit der Ausrichtung der Augen verrechnen – das resultierende Produkt wird als Gain Field bezeichnet.

Das Problem der mentalen Repräsentation des Raums verfolgte ich als Dozent am Salk Institute weiter. Gemeinsam mit dem Neurowissenschaftler David Zipser von der University of California in San Diego beschrieb ich 1988 ein Computermodell eines neuronalen Netzwerks, das retinotopie Positionsinformationen mit der Blickrichtung verrechnet und damit gegenüber Augenbewegungen unabhängige Karten des Raums erstellt. Während des Trainings der neuronalen Netze entwickelten ihre mittleren Schichten Gain Fields, wie es bei den PPC-Experimenten der Fall war. Indem sie Daten zu visuellen Reizen und der Augenposition in einer einzigen Zelle verrechnen, können bereits neun Zellen das gesamte Gesichtsfeld repräsentieren.

Das Konzept der gemischten Repräsentation – Populationen von Neuronen sprechen auf verschiedene Variablen an – findet inzwischen vermehrt Beachtung. So zeigen Signalaufzeichnungen vom präfrontalen Kortex, dass dortige Neurone unterschiedliche Gedächtnisleistungen mit verschiedenen visuellen Objekten verrechnen.

### **Die Semantik der Bewegung aus partiell gemischten Repräsentationen**

Diese Erkenntnisse könnten erhellen, was im PPC geschieht. Wir bemerkten das, als wir Nancy Smith baten, mit Hilfe ihres Avatars auf dem Computerbildschirm acht verschiedene Entscheidungen zu fällen. Eine bestand darin, sich eine Aktion nur vorzustellen oder sie tatsächlich zu probieren. Eine andere erforderte, nach links oder nach rechts zu greifen; eine dritte, die Hand zu bewegen oder mit den Schultern zu zucken. Wie wir dabei beobachteten, vermischten die Hirnzellen des PPC diese Variablenpaare zu einem spezifischen Muster, das ganz anders aussah als die eher zufälligen Interaktionen, die bei Tierversuchen auftraten.

Die Neuronengruppen, die bei der Steuerung der beiden Körperhälften mitwirken, überlappen sich teilweise. Wenn zum Beispiel eine Hirnzelle feuert, um eine Bewegung der linken Hand zu initiieren, tut sie das mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei einer versuchten Bewegung der rechten Hand. Dagegen agieren die Neurone, die Bewegungen der Schulter und der Hand steuern, eher unabhängig voneinander. Diese Form der Repräsentation bezeichnen wir als partiell gemischte Selektivität.

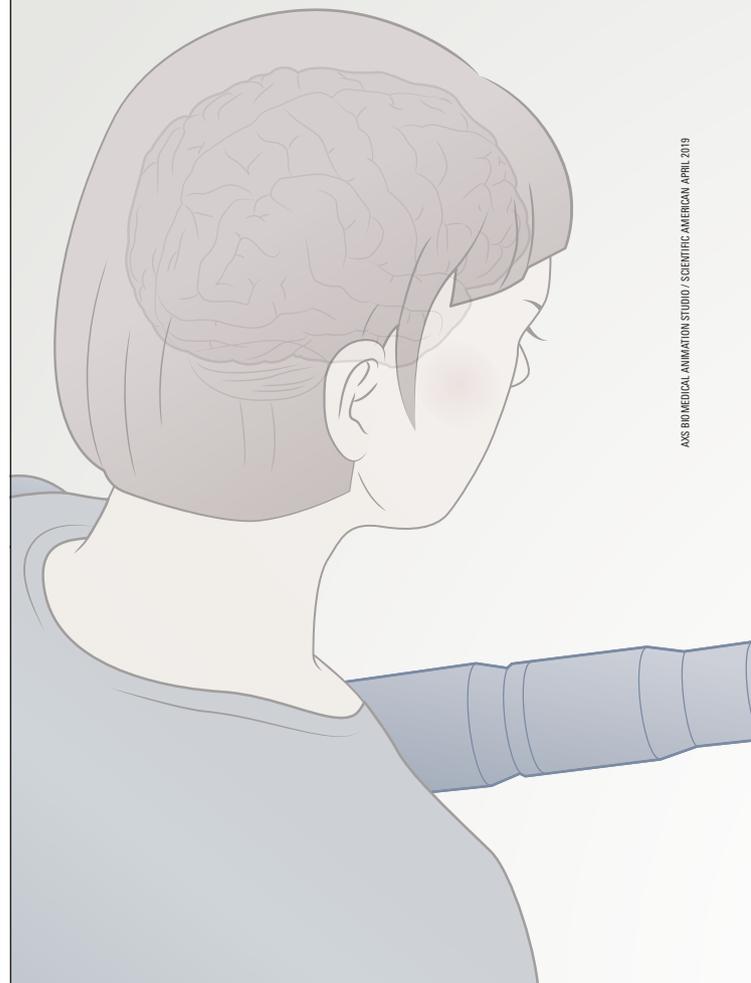
Solche partiell gemischten Repräsentationen bilden offenbar eine Art Semantik der Bewegung: Ein Neuron, das auf Videoaufnahmen einer Person reagiert, die ein Objekt ergreift, regt sich wahrscheinlich auch, wenn der Proband lediglich das Wort »greifen« liest. Davon separiert sind Zellen, die auf andere Aktionen wie »drücken« ansprechen. Im Allgemeinen scheint die partiell gemischte Codierung ähnliche Rechenoperationen zusammenzufassen (Bewegung der rechten oder der linken Hand) und diese von denjenigen abzusetzen, die bei der anstehenden neuronalen Verarbeitung stören könnten (Bewegung der Schulter oder der Hand).

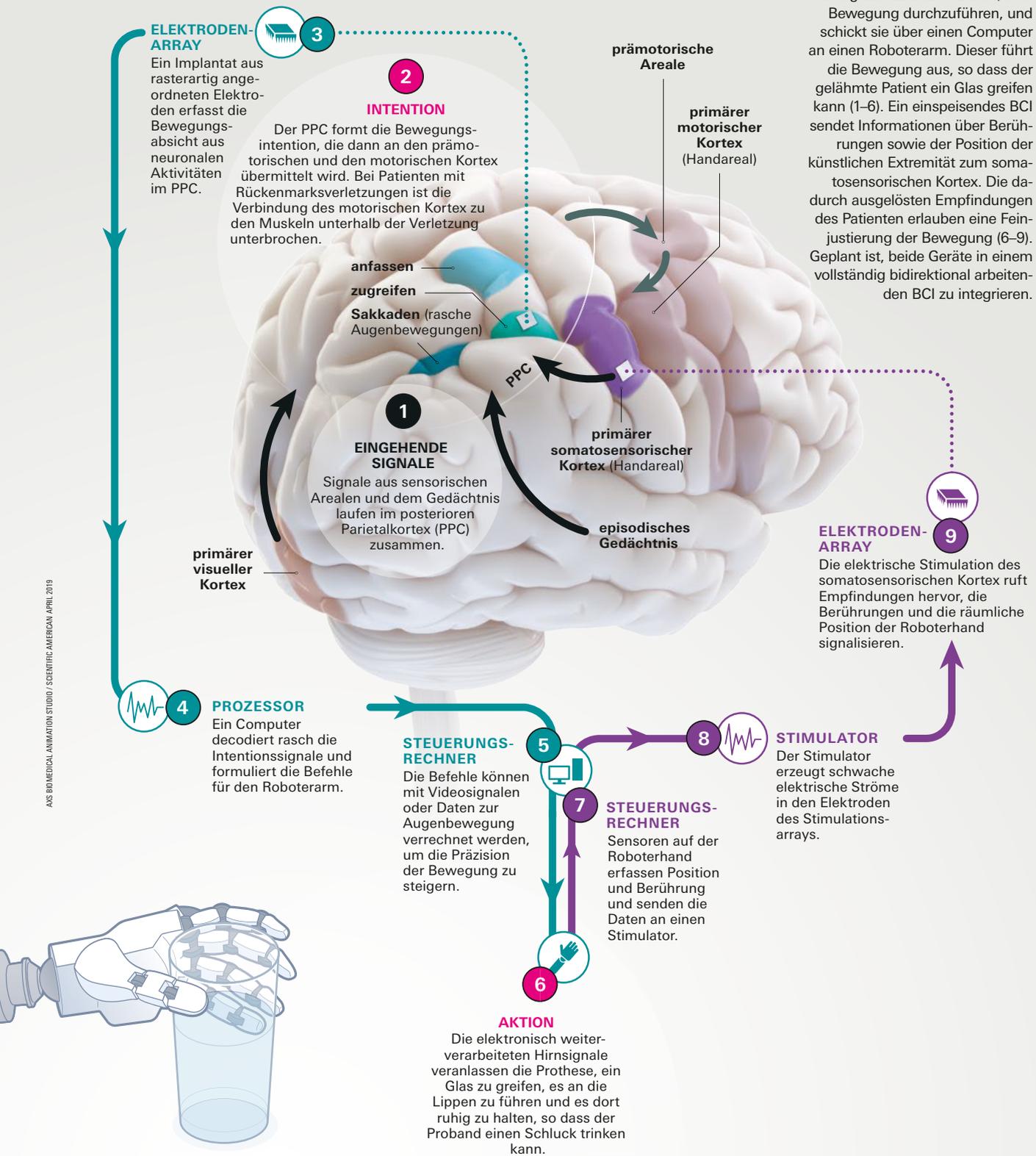
Gemischte sowie partiell gemischte Codierung ließen sich in bestimmten Teilen des Assoziationskortex nachweisen. Künftige Studien sollten zeigen, ob sie auch in anderen Hirnarealen

## **Mit Gedankenkraft**

Seit über 15 Jahren entwickeln Neurowissenschaftler Gehirn-Computer-Schnittstellen (brain-computer interface, BCIs), die Hirnsignale in Computerbefehle umwandeln, um damit einen Cursor oder einen Roboter zu bewegen. Die Übersetzung elektrischer Erregung von Neuronen hat sich jedoch als hochkomplex erwiesen.

Etliche Forscher versuchen, Signale aus dem motorischen Kortex eines Patienten abzugreifen, da dieses Hirnareal Bewegungen kontrolliert. Die Arbeitsgruppe des Autors implantiert dagegen Elektroden in den posterioren Parietalkortex (PPC) im hinteren Scheitellappen. Hier entsteht die bewusste Absicht, eine Extremität zu bewegen. Signale aus dem Hirnbereich zu nutzen, der an der Spitze der kognitiven Befehlskette steht, scheint eine schnellere und präzisere Steuerung von Roboterprothesen zu ermöglichen.





Die von Richard Andersen und seinen Kollegen entwickelten BCIs funktionieren in zwei Richtungen: Ein auslesendes Gerät empfängt Hirnsignale über die Absicht, eine Bewegung durchzuführen, und schickt sie über einen Computer an einen Roboterarm. Dieser führt die Bewegung aus, so dass der gelähmte Patient ein Glas greifen kann (1–6). Ein einspeisendes BCI sendet Informationen über Berührungen sowie der Position der künstlichen Extremität zum somatosensorischen Kortex. Die dadurch ausgelösten Empfindungen des Patienten erlauben eine Feinjustierung der Bewegung (6–9). Geplant ist, beide Geräte in einem vollständig bidirektional arbeitenden BCI zu integrieren.

vorkommen – etwa in denen für Sprache, Objekterkennung oder Handlungskontrolle. Darüber hinaus möchten wir wissen, ob die primären sensorischen oder motorischen Kortextareale ähnliche partiell gemischte Codierungsstrukturen nutzen.

Anstehende Forschungen sollten zudem klären, inwiefern das Erlernen neuer Fähigkeiten die Leistungsfähigkeit von Probanden mit Neuroprothesen beeinflusst. Sollten Lernprozesse sich quasi von selbst einstellen, könnte im Prinzip jeglicher Bereich des Gehirns mit einem BCI versorgt und dann auf passende Aufgaben trainiert werden. Ein Implantat im primären visuellen Kortex könnte dann nach einer entsprechenden Trainingsphase auch nichtvisuelle Aufgaben steuern. Andernfalls ließen sich Implantate etwa in motorischen Arealen ausschließlich auf motorische Aufgaben trainieren. Erste Studienergebnisse deuten darauf hin, dass ein BCI tatsächlich in dem Hirnareal eingepflanzt werden muss, das für die gewünschte kognitive Aktivität zuständig ist.

### **Ohne sensorische Rückkopplung sind flüssige Bewegungen kaum möglich**

Ein BCI muss allerdings mehr können, als nur Hirnsignale zu empfangen und zu verarbeiten – es muss auch eine Rückmeldung von einer Prothese zum Gehirn leiten. Wenn wir den Arm ausstrecken, um ein Objekt zu greifen, hilft die visuelle Rückkopplung, die Hand genauer zum Ziel zu führen. Die Positionierung der Hand hängt ebenfalls von der Form des zu greifenden Objekts ab. Wenn wir beim Zugreifen keine Tastsignale spüren, wird das Vorhaben meist scheitern.

Diese sensorischer Rückkopplung ist gerade für unsere Patienten mit Rückenmarksverletzungen entscheidend. Sie sind nicht nur gelähmt, sondern nehmen auch keine taktilen Reize oder Signale zur Position ihrer Gliedmaßen wahr, was für flüssige Bewegungen unabdingbar ist. Eine ideale Neuroprothese muss diese ausgefallenen Funktionen über bidirektionale Signale kompensieren: Einerseits gilt es, die Intention des Probanden zu übermitteln, andererseits aber auch, Daten zu Berührung und Position aus den Sensoren am Roboterarm zu verarbeiten.

Dieser Herausforderung stellte sich 2016 das Team um Robert Gaunt von der University of Pittsburgh, indem es einem tetraplegischen Patienten Mikroelektroden-Arrays in den somatosensorischen Kortex implantierte – also jenen Hirnbereich, der sensorische Signale aus den Gliedmaßen verarbeitet. Als die Forscher winzige elektrische Impulse durch die Mikroelektroden sendeten, spürte der Proband tatsächlich etwas an seiner Handfläche.

Ähnliche Implantate setzten wir im Armareal des somatosensorischen Kortex ein. Zu unserer großen Freude nahm unser Proband F. G. Reize wahr wie Quetschen, Klopfen oder Vibrationen auf der Haut, die er als natürlich empfand. Er spürte ebenfalls, dass sich sein Arm bewegte, was als Propriozeption bekannt ist. Diese Experimente beweisen, dass Patienten, die jegliche Wahrnehmung in ihren Gliedmaßen verloren haben, diese ersatzweise durch einspeisende BCIs wiedererlangen könnten. Der nächste Schritt wäre zu prüfen, ob sich die Geschicklichkeit von sensorbestück-

ten, hirngesteuerten Roboterhänden durch eine solche somatosensorische Rückmeldung steigern lässt. Außerdem möchten wir gern wissen, ob bei den Probanden ein »Embodiment« einsetzt – also das Gefühl, das künstliche Glied sei Teil des eigenen Körpers.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, leistungsfähigere Elektroden zu entwickeln. Unsere Implantate funktionieren meist über einen Zeitraum von fünf Jahren. Bei zukünftigen Geräten sollten idealerweise die Lebensdauer sowie die Anzahl der angezapften Neurone weiter ansteigen. Wichtig wäre auch, die feinen Elektrodenfortsätze noch zu verlängern, um Areale zu erreichen, die tiefer in den Hirnfurchen liegen.

Flexible Elektroden, die leichte Bewegungen des Gehirns etwa beim Atmen oder bei Blutdruckschwankungen nachvollziehen, sollten stabilere Signalaufzeichnungen ermöglichen. Bei den jetzigen steifen Elektroden muss der Decoder immer wieder neu eingestellt werden, da sich ihre Position jeden Tag leicht verschiebt – schließlich wollen die Forscher die Aktivität derselben Hirnzellen über Wochen oder Monate erfassen.

Künftige Implantate sollten möglichst klein sein, mit geringer elektrischer Leistung arbeiten, um eine Erwärmung des Gehirns zu vermeiden, sowie drahtlos kommunizieren, so dass wir keine Kabel mehr brauchen, die externe Gerätschaften mit dem Gehirn verbinden. Bislang müssen alle Arrays chirurgisch ins Gehirn verpflanzt werden. Doch eines Tages gibt es hoffentlich Geräte, die neuronale Signale mit gleicher Präzision von außen durch die Schädeldecke senden und empfangen.

BCIs sind primär für Menschen mit schweren Lähmungen gedacht. Doch Sciencefiction-Autoren spekulieren bereits darüber, diese Technik einzusetzen, etwa um schneller laufen oder höher springen zu können, als es für einen Menschen möglich ist. Eine solche körperliche Verbesserung lässt sich aber nur erreichen, wenn einzelne Neurone ohne invasiv implantierte Arrays zielsicher erfasst werden können.

Grundlagenforschung wie diese ist nötig für Erkenntnisse, die wiederum Voraussetzungen für innovative Therapien darstellen. Erst wenn eine Entdeckung in eine praktische Anwendung mündet, hat ein solches Forschungsprojekt seine eigentliche Bestimmung gefunden. Für den Wissenschaftler bleibt die Genugtuung, sich mit einem gelähmten Patienten zu freuen, der über einen hirngesteuerten Roboterarm selbstständig mit der Außenwelt interagiert. ◀

### **QUELLEN**

**Aflalo, T. et al.:** Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. *Science* 348, 2015

**Armstrong Salas, M. et al.:** Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation. *eLife* 7, e32904, 2018

**Flesher, S.N. et al.:** Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex. *Science Translational Medicine* 8, 361ra141, 2016

**Hochberg, L.R. et al.:** Reach and grasp by people with tetraplegia using a neutrally controlled robotic arm. *Nature* 485, 2012



# NEUROETHIK DER FREIE WILLE UND DIE ALGORITHMEN

Schon seit Jahrzehnten profitieren Patienten von Techniken, die ins Gehirn eingreifen. Mit zunehmender Komplexität wachsen aber auch die ethischen Vorbehalte.



Liam Drew ist Neurobiologe und Wissenschaftsjournalist in London (Großbritannien).

» [spektrum.de/artikel/1706912](https://spektrum.de/artikel/1706912)

Ein Forscher trägt den BCI-Helm Brain Invader, der Hirnsignale mit Elektroden erfasst, um Symbole auf einem Computerbildschirm auszuwählen. Das Foto wurde am 20. November 2017 im GIPSA-Labor des CNRS in Grenoble aufgenommen.

»Es wird ein Teil von dir«, beschreibt »Patientin 6« das Gerät, das ihr Leben nach einer 45-jährigen Leidensgeschichte mit schwerer Epilepsie veränderte. Implantierte Hirnelektroden senden Signale an ein Handgerät, sobald Anzeichen für einen bevorstehenden epileptischen Anfall auftauchen. Ein Warnton erinnert nun die Patientin daran, den drohenden Anfall mit Medikamenten zu unterdrücken.

»Man wächst da langsam rein und gewöhnt sich so sehr daran, dass es irgendwann alltäglich wird«, erzählt sie dem Neuroethiker Frederic Gilbert von der australischen University of Tasmania, der sich mit Gehirn-Computer-Schnittstellen (brain-computer interface, BCI) befasst. »Es wurde ich«, fügt sie hinzu.

2019 hatten Gilbert und seine Kollegen sechs Teilnehmer einer ersten klinischen Studie mit prädiktiven BCIs befragt, um herauszufinden, inwiefern ein die Hirnaktivität überwachender Computer seinen Träger psychisch beeinflusst. Die extremste Erfahrung machte Patientin 6: Gilbert bezeichnet die Beziehung zu ihrem BCI als Radikalsymbiose.

Unter Symbiose verstehen Ökologen eine enge Koexistenz zweier Arten zum Vorteil beider. Im Zusammenhang mit den fortschreitenden technischen Möglichkeiten, das menschliche Gehirn direkt mit Computern zu verbinden, beschreibt der Begriff nun ebenfalls die potenzielle Beziehung zwischen Mensch und Maschine.

Schnittstellen lassen sich unterteilen in solche, die das Gehirn »lesen«, die also die Hirnaktivität aufzeichnen und deren Bedeutung entschlüsseln, und jene, die in das Gehirn »schreiben«, um die Aktivität bestimmter Regionen zu manipulieren und damit deren Funktion zu beeinflussen. So entwickeln Wissenschaftler der Social-Media-Plattform Facebook Gehirn-Lese-Techniken für Kopfhörer, welche die Hirnaktivität der Anwender in Text umwandeln sollen. Neurotechnologiefirmen wie Kernel in Los Angeles oder das von Elon Musk gegründete Unternehmen Neuralink in San Francisco spekulieren sogar auf bidirektionale Verbindungen, bei denen der Computer sowohl auf die Hirnaktivität des Menschen reagiert als auch Informationen in den neuronalen Kreislauf einspeist.

Neuroethiker beobachten solche Entwicklungen sehr genau. Ziel ihrer sich seit rund 15 Jahren entwickelnden Disziplin ist, dass Techniken, die das Gehirn direkt beeinflussen, ethisch vertretbar bleiben. »Wir wollen kein Wachhund der Neurowissenschaften sein oder vorschreiben, wie sich die Neurotechnologie entwickeln sollte«, betont der Neuroethiker Marcello Ienca von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Vielmehr fordern die Neuroethiker, dass ethische Überlegungen bereits bei den ersten Entwürfen sowie den verschiedenen Entwicklungsstadien dieser Technologien einfließen, um so deren Nutzen zu steigern und mögliche Risiken zu erkennen und einzudämmen – sei es für den Einzelnen oder für die Gesellschaft als Ganzes.

Bereits jetzt zeichnet sich ab, dass die Verschmelzung digitaler Techniken mit dem menschlichen Gehirn weit reichende Folgen nach sich ziehen kann – nicht zuletzt für den freien Willen, also die Fähigkeit, sich gemäß eigener Entscheidungen zu verhalten. Auch wenn der Fokus der Neuroethiker auf der medizinischen Praxis liegt, mischen sie sich ebenfalls in die Debatten über die Entwicklung kommerzieller Neurotechnologien ein.

In den späten 1980er Jahren setzten französische Wissenschaftler Elektroden in das Gehirn von Parkinsonpatienten im fortgeschrittenen Stadium ein. Elektrische Ströme in den mutmaßlich für das Zittern verantwortlichen Hirnarealen sollten dort die neuronale Aktivität unterdrücken. Diese tiefe Hirnstimulation (THS) konnte enorm effektiv sein: Heftige und kräftezehrende Zitteranfälle ließen augenblicklich nach, sobald die Elektroden angeschaltet wurden.

### »Wie viel davon stammt von meinem eigenen Denken?«

1997 genehmigte die US-amerikanische Food and Drug Administration (FDA) den THS-Einsatz für Parkinsonpatienten. Seitdem wird die Methode ebenfalls bei anderen Erkrankungen erprobt: THS ist mittlerweile zur Therapie von Zwangsstörungen und Epilepsie zugelassen und wird für psychische Störungen wie Depression oder Magersucht getestet.

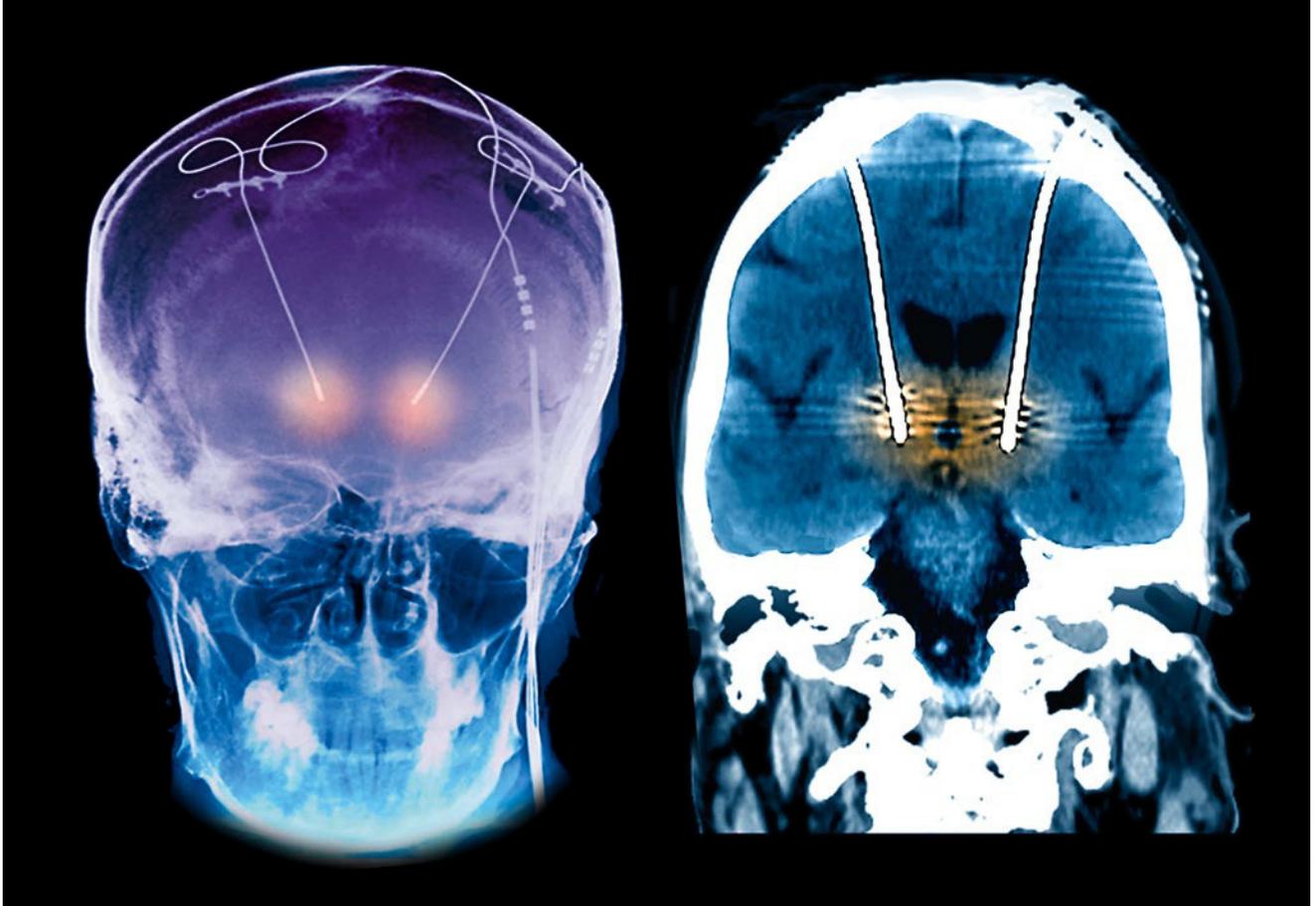
Die Methode zielt direkt auf das Organ, aus dem unser Identitätsempfinden entspringt, und lässt daher Befürchtungen aufkeimen, die für andere Therapieansätze nicht gelten. »Es stellen sich Fragen über unsere Autonomie, weil sie direkt das Gehirn beeinflusst«, erklärt die Neuroethikerin Hannah Maslen von der University of Oxford.

Es gibt Parkinsonpatienten, die nach einer THS-Behandlung unter einem gesteigerten Sexualtrieb oder Problemen mit ihrer Impulskontrolle litten. Ein Schmerzpatient wurde zutiefst apathisch. »THS ist höchst wirkungsvoll«, sagt Gilbert, »bis hin zu dem Punkt, an dem sie die Selbstwahrnehmung des Patienten verzerrt.« Bei anderen, die wegen Depressionen oder Zwangsstörungen mit THS behandelt worden waren, wandelte sich das Empfinden für den freien Willen. »Du fragst dich, wie viel noch von dir übrig bleibt«, erzählte eine Betroffene. »Wie viel davon stammt von meinem eigenen Denken? Wie würde ich mich verhalten, wenn ich das Stimulationssystem nicht hätte? Man fühlt sich irgendwie künstlich.«

Erst nach und nach erkennen Neuroethiker die Tragweite der Therapie. »Einige Nebenwirkungen wie Persönlichkeits-

## AUF EINEN BLICK ETHISCHE PROBLEME BEI HIRNIMPLANTATEN

- 1 Techniken wie die tiefe Hirnstimulation oder Gehirn-Computer-Schnittstellen werden immer bedeutender und haben bereits etlichen Patienten geholfen.
- 2 Die Systeme greifen direkt in das menschliche Denkorgan ein. Somit stellt sich die Frage, inwieweit der Einsatz ethisch vertretbar ist.
- 3 Bei manchen Systemen nehmen KI-Algorithmen menschliche Entscheidungen ab. Dadurch wird die subjektive Urheberschaft des Handelns fraglich.



ZEPHYR / SCIENCE PHOTO LIBRARY

**Bei der tiefen Hirnstimulation werden Elektroden in das Gehirn von Parkinsonpatienten implantiert. Dort unterdrücken sie das krankhafte Zittern.**

veränderungen sind problematischer als andere«, meint Maslen. Wichtig ist, ob der Patient nach der Stimulation erkennen kann, wie er sich verändert hat. So beschreibt Gilbert einen THS-Patienten, der spielsüchtig wurde und hemmungslos die Ersparnisse seiner Familie verzockte. Erst als die Stimulation ausgeschaltet wurde, konnte er nachvollziehen, wie problematisch sein Verhalten war.

Solche Fälle wecken ernsthafte Befürchtungen, inwieweit die Technik die Urteilsfähigkeit beeinflusst. Sollte ein Familienmitglied oder ein Arzt sein Veto einlegen können, wenn ein THS-Patient die Weiterbehandlung wünscht? Wenn jemand anderes als der Patient die Therapie gegen dessen Willen abbrechen kann, impliziert das, dass die Methode die Fähigkeit einschränkt, Entscheidungen für sich selbst zu treffen. Daraus folgt, dass die Gedanken, die nur auftreten, solange ein elektrischer Strom die Hirnaktivität beeinflusst, nicht dem authentischen Selbst entspringen.

Besonders schwierig werden solch Dilemmata, wenn die Therapie explizit auf Verhaltensänderungen zielt wie etwa bei Magersucht. »Wenn ein Patient vor einer THS sagt: ›Ich bin jemand, dem Schlanksein über alles geht‹, und man ihn dann stimuliert, so dass sich sein Verhalten oder seine Einstellung ändert«, erklärt Maslen, »dann müssen wir wissen, ob diese Veränderungen vom Patienten wirklich gewollt sind.«

Ihrer Ansicht nach »leuchtet es absolut ein, dass ein Patient die durch THS ausgelösten Veränderungen begrüßt«, sofern diese mit den therapeutischen Zielen in

Einklang stehen. Sie und andere Wissenschaftler wollen genauere Einverständniserklärungen für die THS-Behandlung entwerfen, die ausführliche Beratungen einschließen, bei denen alle möglichen Folgen und Nebenwirkungen umfassend erklärt werden.

Es ist äußerst beeindruckend, einem Querschnittsgelähmten zuzusehen, wie er mit einem Roboterarm, den er über ein auslesendes BCI steuert, ein Wasserglas zum Mund führt (siehe Artikel S. 36). Diese sich rasch entwickelnde Technik beruht auf Elektrodenarrays, die an oder in einer für Planung und Ausführung von Bewegungen zuständigen Hirnregion implantiert werden. Während der Proband sich beispielsweise vorstellt, seine Hand zu bewegen, wird seine Hirnaktivität aufgezeichnet, um daraus Befehle für den Roboterarm zu generieren.

Ließen sich diese neuronalen Signale vom Grundrauschen unterscheiden und eindeutig dem Willen der Person zuordnen, wären die ethischen Probleme überschaubar. Das ist aber nicht der Fall. Die neuronalen Korrelate geistiger Prozesse sind wenig verstanden, so dass die Hirnsignale durch künstliche Intelligenz (KI) verarbeitet werden müssen.

Wie der Neurologe Philipp Kellmeyer von der Universität Freiburg meint, habe der Einsatz von KI und Algorithmen des maschinellen Lernens zur Entschlüsselung neuronaler Aktivität das gesamte Feld auf den Kopf gestellt. Er verweist auf eine 2019 veröffentlichte Studie, bei der eine solche Software die Hirnaktivität von stummen Epilepsiepatienten interpretierte, um daraus synthetische Sprachlaute zu erzeugen. »Vor zwei oder drei Jahren«, sagt er, »hätten wir gedacht, dass sei entweder unmöglich oder werde noch 20 Jahre dauern.«

Allerdings brächten KI-Werkzeuge auch ethische Probleme mit sich, mit denen etwa Aufsichtsbehörden bislang

wenig Erfahrung hätten. Software zum maschinellen Lernen beruht auf einer Datenanalyse, die schwer zu durchschauen ist. Dadurch steht ein unbekannter und kaum nachvollziehbarer Prozess zwischen den Gedanken einer Person und der Technik, die in ihrem Auftrag handelt.

Prothesen funktionieren besser, wenn BCI-Geräte versuchen vorherzusagen, was der Patient als Nächstes tun will. Die Vorteile hierfür leuchten ein: Bei scheinbar simplen, in Wirklichkeit aber hochkomplexen Handlungen wie dem Griff zur Kaffeetasse stellt das Gehirn unbewusst viele Berechnungen an. Prothesen, die mit Hilfe von Sensoren zusammenhängende Bewegungen autonom durchführen, erleichtern dem Anwender erheblich, damit umzugehen. Das bedeutet aber auch, dass vieles von dem, was ein Roboterarm tut, nicht wirklich vom Patienten stammt.

Derartige prädiktive Eigenschaften bergen weitere Probleme, die jeder Handynutzer kennt. Die automatische Texterkennung der Mobiltelefone ist oft hilfreich und spart Zeit – wer aber unbeabsichtigt schon einmal eine Nachricht mit falscher Autokorrektur gesendet hat, weiß, dass hier mitunter etwas schiefgehen kann.

### **»Es entsteht der merkwürdige Zustand eines Hybridwillens«**

Solche Algorithmen lernen aus früheren Daten und nehmen dem Anwender – basierend auf seinen Handlungen in der Vergangenheit – Entscheidungen ab. Wenn aber ein Algorithmus beständig das nächste Wort oder die nächste Aktion vorschlägt und der Mensch lediglich diesen Vorschlag akzeptiert, wird die Autorenschaft der Nachricht oder des Handelns fraglich. »Irgendwann entsteht dieser merkwürdige Zustand eines gemeinsamen oder Hybridwillens«, erklärt Kellmeyer. Ein Teil der Entscheidung stammt vom Anwender und ein anderer von der Maschine. »Damit haben wir ein Problem: eine Verantwortungslücke.«

Hannah Maslen befasst sich damit im Rahmen des EU-Projekts BrainCom, das Sprachgeneratoren entwickelt. Solche Systeme sollen hörbar machen, was die Person sagen möchte. Um Fehlern vorzubeugen, kann man dem Anwender die Möglichkeit geben, jedes einzelne Wort freizugeben. Doch eine ständige Rückmeldung von Sprachfragmenten würde das Ganze wohl zu einem mühsamen Geschäft machen.

Solche Rückversicherungen wären allerdings besonders wichtig, wenn die Geräte nur schwer zwischen der neuronalen Aktivität fürs Sprechen und der fürs Denken unterscheiden können. Unsere Gesellschaft fordert zu Recht grundlegende Grenzen zwischen privaten Gedanken und äußerem Verhalten.

Die Symptome vieler Hirnerkrankungen tauchen unvorhersehbar auf. Deshalb kommen zunehmend Methoden zur Hirnüberwachung zum Einsatz. Solche Aufzeichnungselektroden – wie etwa bei Patientin 6 – verfolgen die Hirnaktivität, um zu erkennen, wann Symptome auftreten oder kurz bevorstehen. Doch statt lediglich dem Anwender einen Hinweis zu geben, senden manche autonom einen Befehl an eine Stimulationselektrode. Diese unterdrückt die relevante Hirnaktivität, sobald sich ein epileptischer Anfall oder bei Parkinsonpatienten ein Tremor abzeichnet. Einen derar-

tigen geschlossenen Regelkreis hat die FDA bereits 2013 zur Behandlung von Epilepsie zugelassen; ähnliche Systeme zur Parkinsontherapie werden klinisch getestet.

Problematisch dabei ist: Handelt eine Person nach Einführung eines entscheidungstreffenden Geräts in ihrem Gehirn – eventuell verknüpft mit einer autonom agierenden KI-Software – noch selbstbestimmt? Bei Geräten, die für Diabetiker den Blutzuckerspiegel und die Insulingabe kontrollieren, ist diese automatische Entscheidungsfindung unumstritten. Bei Interventionen im Gehirn sieht die Sache jedoch anders aus. Beispielsweise könnte eine Person, die mit einem geschlossenen Regelkreissystem eine affektive Störung behandelt, unfähig werden, jegliche negative Emotion zu empfinden, auch wenn dies wie etwa bei einer Beerdigung völlig normal wäre. »Wenn ein Gerät sich ständig in dein Denken oder deine Entscheidungsfindung einmischet«, sagt Gilbert, »kann es dich als frei handelnder Mensch einschränken.«

Das Epilepsie-BCI, das die von Gilbert interviewten Anwender benutzten, überließ ihnen die Kontrolle, indem sie vor anstehenden Anfällen warnte. Ihnen blieb so die Entscheidung, ob sie Medikamente nehmen wollten oder nicht. Dennoch avancierte das Gerät für fünf der sechs Patienten zum hauptsächlichen Entscheidungsträger in ihrem Leben. Nur einer der sechs ignorierte es meist. Patientin 6 akzeptierte ihr Gerät vollständig als integralen Bestandteil ihres neuen Selbst. Drei Anwender verließen sich bereitwillig darauf, ohne dadurch das Gefühl zu bekommen, ihr Selbstempfinden hätte sich grundlegend verändert. Ein weiterer Proband verfiel allerdings in Depressionen und berichtete, das BCI »gab mir das Gefühl, keine Kontrolle mehr zu haben.«

»Die Entscheidung liegt letztlich bei einem selbst«, meint Gilbert. »Aber in dem Moment, in dem man merkt, dass das Gerät in bestimmten Situationen effektiver ist als man selbst, achtet man nicht mehr auf die eigene Einschätzung. Man verlässt sich auf das Gerät.«

Das Ziel der Neuroethiker – Maximierung der Vorteile und Minimierung der Risiken – ist schon lange in die medizinische Praxis eingebettet. Die Entwicklung kommerzieller Techniken für Verbraucher läuft im Gegensatz dazu meist verborgen ab und unterliegt kaum einer Kontrolle. So erforschen Technologieunternehmen bereits die Realisierbarkeit von BCI-Geräten für den Massenmarkt. Marcello Ienca sieht hier einen wichtigen Moment gekommen: »Wenn sich eine Methode noch im Anfangsstadium befindet, sind die Ergebnisse sehr schwer vorhersehbar. Ist sie jedoch hinsichtlich Marktgröße oder -öffnung ausgereift, kann sie schon zu sehr etabliert sein, um noch eingreifen zu können.« Seiner Ansicht nach wissen wir inzwischen genug, um sachkundig zu handeln, bevor es zu einer verbreiteten Anwendung von Neurotechnologien kommt.

Ein Problem liegt laut Ienca in der Privatsphäre. »Informationen aus dem Gehirn sind wahrscheinlich die intimsten und privatesten Daten überhaupt«, betont er. Digital aufgezeichnete neuronale Daten könnten von Hackern gestohlen oder von Firmen, denen die Nutzer Zugang hierzu gewährt haben, unangemessen verwendet werden. Ienca betont, wegen der Bedenken von Neuroethikern hätten die Entwickler sich mit der Sicherheit ihrer Geräte befassen müssen, um die Daten ihrer Nutzer besser zu schützen, und könnten nicht mehr den

Zugang zu Social-Media-Profilen und anderen Quellen persönlicher Daten als Voraussetzung für die Gerätenutzung fordern. Dennoch bleibt der Datenschutz für Verbraucher auf Grund der sich immer schneller entwickelnden Neurotechnologien eine Herausforderung.

### »Ich habe mich selbst verloren«

Privatsphäre und freier Wille gehören zu den Hauptthemen in den Empfehlungen, die von verschiedenen Arbeitsgruppen wie auch von groß angelegten Neuroforschungsprojekten herausgegeben werden. Dennoch bleibe viel zu tun, meint Philipp Kellmeyer. »Die Grundannahmen der herkömmlichen Ethik, die sich auf Autonomie, Gerechtigkeit und damit zusammenhängenden Konzepten stützen, wird nicht ausreichen«, sagt er. »Wir brauchen auch eine Ethik und Philosophie der human-technischen Interaktionen.« Viele Neuroethiker halten auf Grund der Möglichkeit, das Gehirn direkt zu manipulieren, eine Überarbeitung der grundlegenden Menschenrechte für nötig.

Hannah Maslen berät die Europäische Kommission über Richtlinien zu frei verkäuflichen, nichtinvasiven Geräten, die das Gehirn verändern. Derzeit gelten hierfür nur lasche Sicherheitsbestimmungen. Die Apparate mögen zwar harmlos aussehen, leiten jedoch elektrische Ströme durch die Schädeldecke, um die Hirnaktivität zu verändern. Laut Maslen könnten sie Verbrennungen, Kopfschmerzen und Sehstörungen auslösen. Sie nennt ebenfalls klinische Studien, wonach die mögliche Verbesserung bestimmter

geistiger Fähigkeiten durch nichtinvasive Hirnstimulation seinen Preis hätte, weil dadurch an anderer Stelle kognitive Defizite aufträten.

Frederic Gilberts Forschungen zu den psychischen Auswirkungen von BCI-Geräten verdeutlicht, was auf dem Spiel steht, wenn Unternehmen Methoden entwickeln, die das Leben von Personen grundlegend verändern können. Da die Firma, die Patientin 6 das BCI ins Gehirn implantiert hatte, in Konkurs ging, musste es entfernt werden. »Sie weigerte sich und zögerte es so lange wie möglich hinaus«, erzählt Gilbert. Weinend sagte sie nach der Entfernung des Geräts zu Gilbert: »Ich habe mich selbst verloren.«

»Es war mehr als ein Gerät«, sagt Gilbert. »Die Firma besaß die Existenz dieser neuen Person.« ◀

### QUELLEN

**Gilbert, F. et al.:** Embodiment and estrangement: results from a first-in-human »intelligent BCI« Trial. *Science and Engineering Ethics* 25, 2019

**Klein, E. et al.:** Brain-computer interface-based control of closed-loop brain stimulation: attitudes and ethical considerations. *Brain-Computer Interfaces* 3, 2016

### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 571, S. S19–S21, 2019

**Spektrum LIVE**  
Veranstaltungen des Verlags  
Spektrum der Wissenschaft

Samstag,  
2. Mai 2020  
Zürich

## B777-Flug- und Space-Simulator und Vortrag

Seien Sie einmal selbst Pilot und Astronaut: Fliegen Sie im B777-Flugsimulator, und/oder erforschen Sie im Space-Simulator Galaxien, Sternennebel und Planeten. Genießen Sie einen spannenden Vortrag zum Thema »Risk Management im Cockpit« sowie ein Apéro-Catering, nehmen Sie an einem Wettbewerb teil und tauschen Sie sich mit einem aktiven B777-Kapitän in fachkundigen Gesprächen aus.

Spektrum LIVE-Veranstaltung in Kooperation mit  
Fly & Race Simulations GmbH

Infos und Anmeldung:

[Spektrum.de/live](http://Spektrum.de/live)